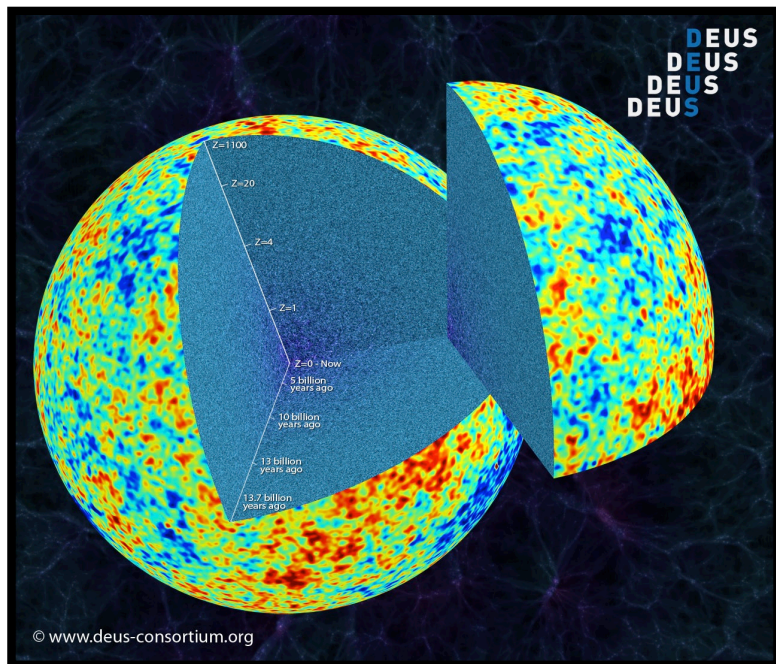


# NATURE DE L'ÉNERGIE NOIRE ET ORIGINE DE LA STRUCTURATION DE L'UNIVERS



Première simulation de Tout l'Univers Observable



Supercalculateur Curie

**Jean-Michel Alimi**

Laboratoire Univers et Théories – Observatoire de Paris  
DEUS (Dark Energy Universe Simulation) Consortium

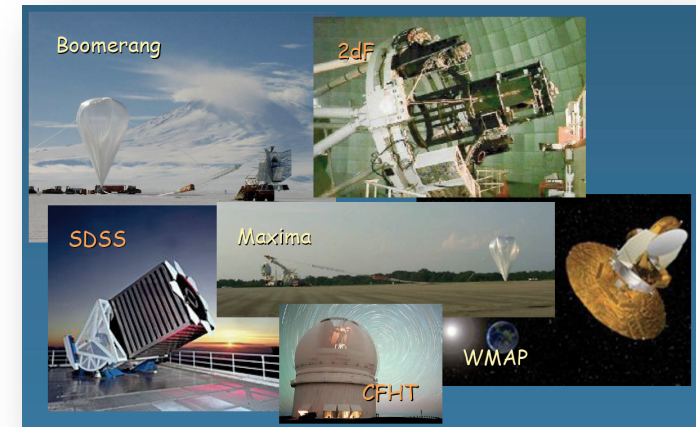
[www.deus-consortium.org](http://www.deus-consortium.org)

**Service de Physique Nucléaire, CEA Saclay, 22 Mars 2013**

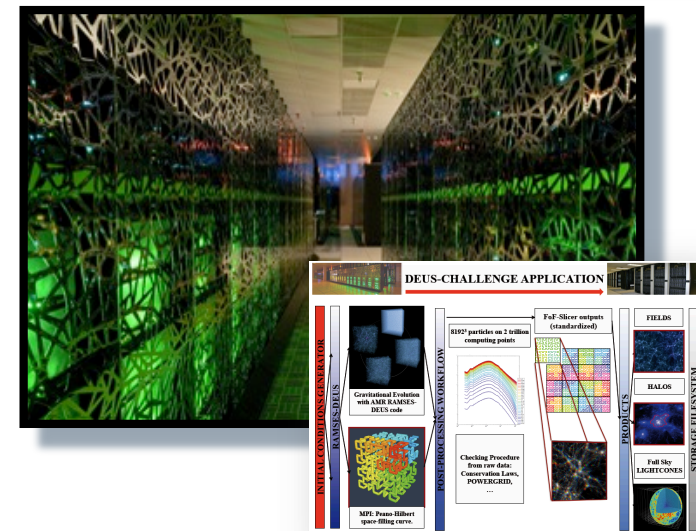
# L'Énergie Noire: Un défi majeur de la (Astro)Physique.

## A l'aube d'un nouveau paradigme cosmologique.

- De nombreuses observations cosmologiques confortent aujourd'hui l'idée que **l'expansion récente de notre Univers est accélérée**. Ce résultat questionne les **principes fondamentaux** de notre paradigme cosmologique.
- Quelle est l'origine de cette accélération ? Quelle est la nature de **l'énergie noire** ?
- Comment discriminer parmi les nombreux modèles d'énergie noire ? **La structuration de l'Univers**, le « meilleur » marqueur cosmologique.
- Pourquoi et comment **simuler Tout l'Univers Observable** ? L'expérience DEUS
- Avons nous **les moyens de conclure** ?
- **Quelles leçons pour le HPC** (« Calcul Scientifique Intensif ») ?



*Cosmologie de Précision*



*Ressources et Applications*

# **LES PRINCIPES FONDAMENTAUX DU PARADIGME COSMOLOGIQUE.**

# Les Principes fondamentaux du paradigme cosmologique

## Le Principe d'équivalence:

Support expérimentale: Etvös (1889), Dicke (1964):  $10^{-12}$ , STEP :  $10^{-17}$



$$m_{\text{inertielle}}(\text{résistance au mouvement}) = m_{\text{grave}}(\text{charge gravitationnelle})$$

Fortuit en Mécanique Classique.

$$\vec{a} = \left( \frac{m_g}{m_i} \right) \vec{g} = \vec{g}$$

Tous les corps tombent de la même façon, il est possible de supprimer localement l'effet d'un champ gravitationnel, identification de la gravitation avec la courbure locale

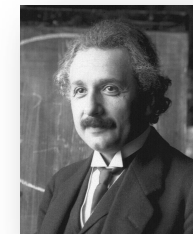
### PE faible / PE d'Einstein

Universalité de la chute libre, quelque soit les énergies de liaison non gravitationnelle. Les lois de la physique sont en tout point de l'espace temps les lois données par la relativité restreinte.

### PE fort.

Universalité de la chute libre, quelque soit les énergies de liaison y compris gravitationnelle.

La RG confond tous ces énoncés

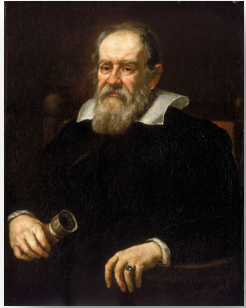


# Les Principes fondamentaux du paradigme cosmologique

---

## Le Principe de Covariance généralisé :

### Généralisation conceptuelle:



- **Mécanique classique** (Invariance de Galilée): Transformations de Galilée laissent invariante la distance calculée par le théorème de Pythagore  $dl^2 = \delta_{ij}dx^i dx^j$  et réciproquement.

- **Relativité Restreinte** (Invariance de Lorentz): Transformations de Lorentz laissent invariante le temps propre de Minkowski  $d\tau^2 = -\eta_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu = c^2 dt^2 - dx^2$  et réciproquement



- **Relativité Générale**: Les équations préservent leur forme sous une transformation générale des coordonnées: Invariance par difféomorphisme, le temps propre  $d\tau^2 = -g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu$  est conservé ( $g_{\mu\nu}$  le tenseur métrique)

La RG se donne pour objectif de construire une description de la nature invariante dans tout système de coordonnées, dans tout référentiel, quelque soit son mouvement.

# Les Principes fondamentaux du paradigme cosmologique

---

**Le Principe d'Équivalence et Le Principe de Covariance Généralisée fondent la Relativité Générale.**

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$R_{\mu\nu} [g_{\mu\nu}, \partial g_{\mu\nu}, \partial^2 g_{\mu\nu}] \quad \text{et} \quad R[g_{\mu\nu}, \partial g_{\mu\nu}, \partial^2 g_{\mu\nu}]$$

Continuum Espace – Temps - Matière (énergie),  
Identifie la forme au substrat (géométrie, dynamique/contenu énergétique)

Description locale  
Seul la courbure de l'espace-temps est effective,  
une même courbure est ressentie identiquement en tout point (G=Cst).

**Appliquée à l'Univers: L'univers est dynamique, il est en expansion**

# Les Principes fondamentaux du paradigme cosmologique

## Le Principe Cosmologique: la dynamique de l'Univers

Il exprime le principe de Copernic; nous n'occupons pas de place privilégiée dans l'Univers (dans l'espace).

- Support Observationnel: CMB + Catalogues de Galaxies + Champs de Vitesses

**Notre Univers est Homogène et Isotrope** (aux grandes échelles  $> \text{qq } 100 \text{ Mpc}$ ).  
La métrique de FLRW (à symétrie maximale fixée par 1 seule constante  $k$  la courbure)

$$d\tau^2 = dt^2 - a(t)^2 \left[ \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right]$$

Ce principe permet rigoureusement de définir un temps cosmique.

Les équations d'Einstein se simplifient

La dynamique de l'Univers est alors donné seulement à travers la fonction  $a(t)$ .

$$\left( \frac{\dot{a}}{a} \right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G \sum_i \rho_i}{3}, \quad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \sum_i (\rho_i + 3P_i)$$

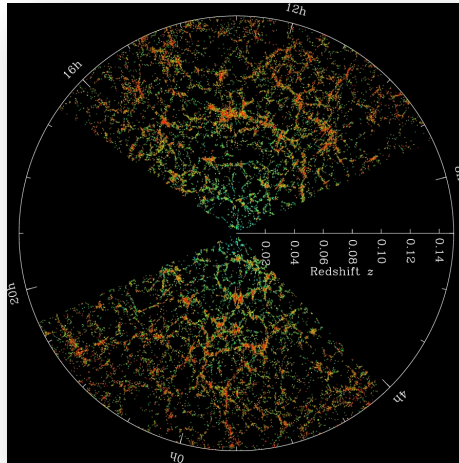
$(\rho + 3P > 0, \ddot{a} < 0)$  Un univers en principe décéléré  
 $(a > 0, \dot{a} > 0, \ddot{a} < 0)$  Existence d'un big-bang  $a(t_0)=0$



**L'UNIVERS EST STRUCTURÉ !**



# Dynamique de l'Univers et Structures Cosmiques.



*Sloan Digital Sky Survey*

**Le fluide de matière emplissant tout l'Univers n'est plus homogène !**

**Dynamique du « fond » Homogène et Isotrope /  
Dynamique du fluide de matière (perturbation sur le fond)**

La composante 00 des équations d'Einstein en champ faible

$$\Delta_{\vec{r}}^2 \Phi = 4\pi G \rho \quad P \ll \rho c^2, \Lambda = 0$$

Ce fluide évolue dans un univers en expansion, coordonnées (physiques) comobiles:  $\vec{r} = a(t)\vec{x}$

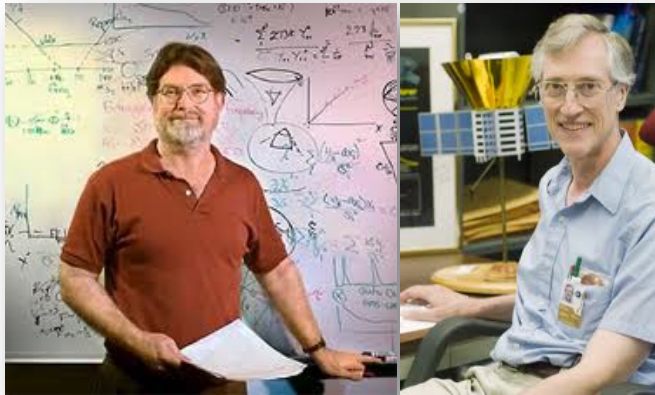
$$\Delta_{\vec{x}}^2 \phi = 4\pi G a^2(t) \bar{\rho}(t) \delta(\vec{x}, t) \quad \delta(\vec{x}, t) = \frac{\rho(\vec{x}, t) - \bar{\rho}(t)}{\bar{\rho}(t)}$$

$$\rho = \int f(\vec{x}, \vec{p}, t) d\vec{p} \quad , \quad \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\vec{p}}{a^2} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{x}} - \vec{\nabla} \phi \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{p}} = 0$$

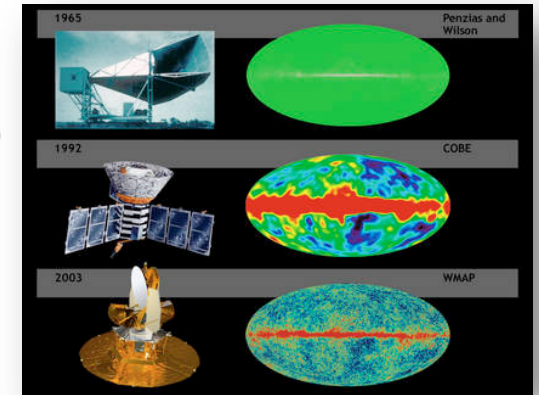
**Un univers homogène reste homogène  
Structures cosmiques résultent de la croissance des  
fluctuations primordiales de matière**

# La structuration de l'Univers résulte de la croissance des fluctuations primordiales de matière

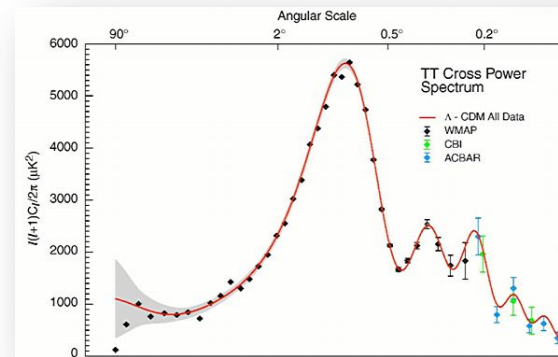
Ces fluctuations ont laissé une empreinte sur le ciel : le fond de rayonnement cosmologique dont l'amplitude et la forme sont de mieux en mieux connues



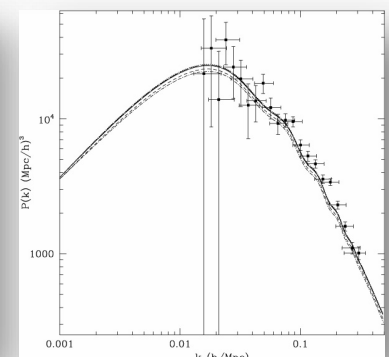
**G. Smoot et J. Mather 1992**  
**(Prix Nobels 2006) (Satellite Cobe)**  
**WMAP 2003 - Planck 2013**



$$\begin{aligned} \xi(r) &= \langle \delta(\vec{r}_1) \delta(\vec{r}_1 + \vec{r}) \rangle = \int d^3k \langle |\delta_{\vec{k}}|^2 \rangle e^{i\vec{k}\vec{r}} \\ &= 4\pi \int_0^\infty k^2 dk P(k) \frac{\sin kr}{kr} \end{aligned}$$



Sur le ciel

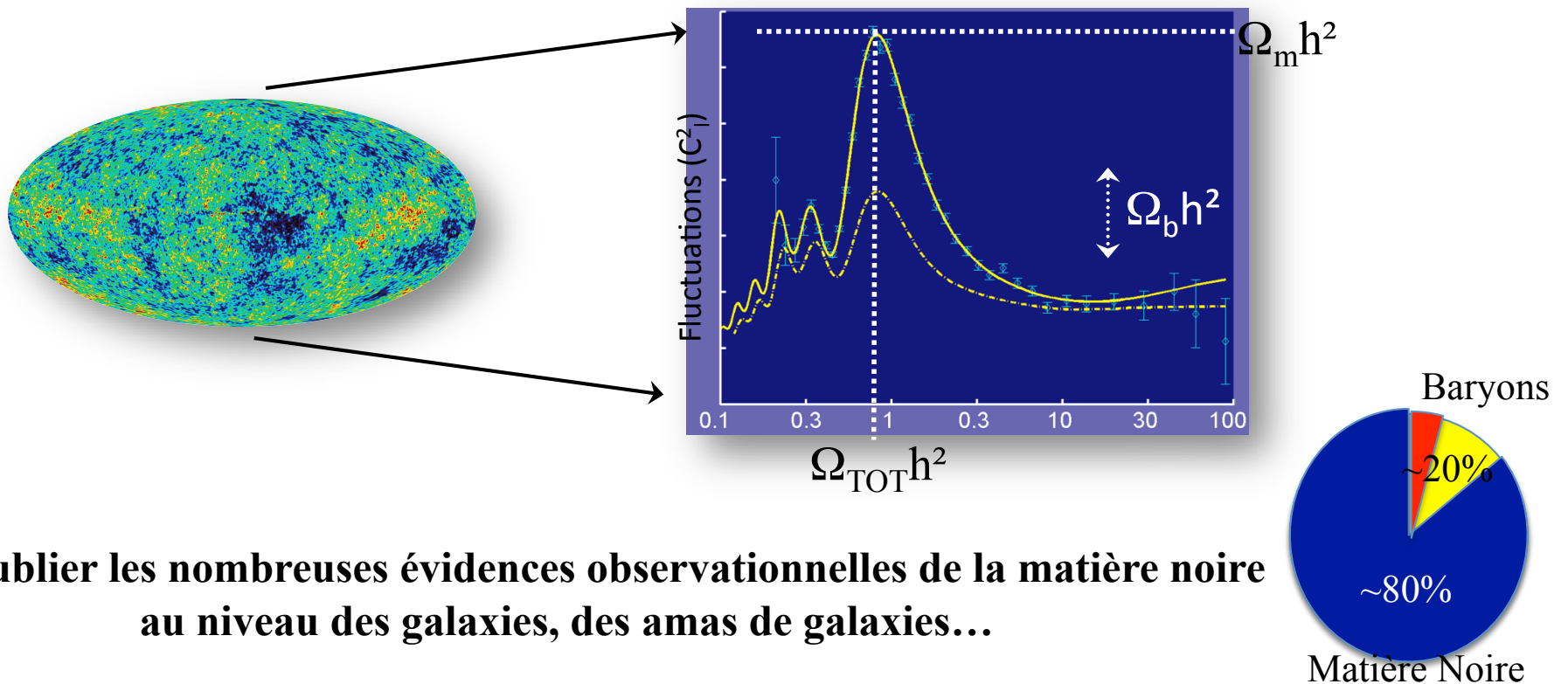


Fluctuations de matière

# La structuration de l'Univers résulte de la croissance des fluctuations primordiales de matière noire

L'amplitude observée des fluctuations est très faible ( $10^{-5}$ ) !  
Comment alors former des « galaxies » dans l'âge de l'Univers ?

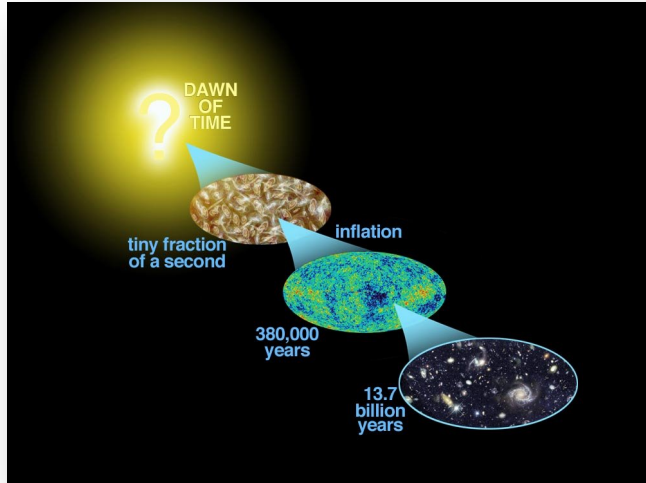
**Cosmologie:** Nécessité d'introduire une grande quantité de matière supplémentaire (matière noire,  $P=0$ ). Mais seule l'analyse détaillée du spectre de fluctuations permet de déduire la quantité précise nécessaire.



Sans oublier les nombreuses évidences observationnelles de la matière noire au niveau des galaxies, des amas de galaxies...

# La structuration de l'Univers résulte de la croissance des fluctuations primordiales de matière noire

Le schéma de formation des structures cosmiques.



L'Univers est spatialement homogène et isotrope, il est décrit par la Relativité Générale, sa dynamique est donnée par  $a(t)$  à travers l'équation de FLRW

Les fluctuations primordiales d'origine quantique sont gonflées sur les échelles cosmologiques par l'inflation.

La forme et l'amplitude de ces fluctuations sont observées sur le CMB.

Elles croissent par instabilité gravitationnelle dans un Univers en expansion et conduisent à la formation des structures cosmiques que nous observons aujourd'hui.

Cette structuration dépend (au moins linéairement) explicitement du taux d'expansion cosmique !

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} + 2 \frac{\dot{a}}{a} \frac{\partial \delta}{\partial t} = 4\pi G \bar{\rho} \delta$$

**Le contenu énergétique de l'Univers (qui détermine l'expansion) a récemment beaucoup évolué**

**L'ACCÉLÉRATION COSMIQUE RÉCENTE DE NOTRE  
UNIVERS, L'ÉNERGIE NOIRE.**

# L'Énergie Noire: petite parenthèse historique

---

(Remerciements à Robert Caldwell pour avoir pointé cette correspondance)



*« It cannot be denied that the introduction of the constant... detracts from the simplicity and elegance of the original theory...one of whose great charms was that it embraced so much without introducing a new empirical constant... »*

**(Letter to Einstein 1917)**

*« In any case, one thing stands. The general theory of relativity allows the addition of the [cosmological constant] in the field equations.. **One day, our actual knowledge of the composition of the fixed-star sky,, the apparent motions of the fixed stars, the position of the spectral lines as a function of distance,** will probably have come far enough for us to be able to decide empirically the question of whether or not vanishes.. »*

**(Letter to De Sitter 14 April 1917)**



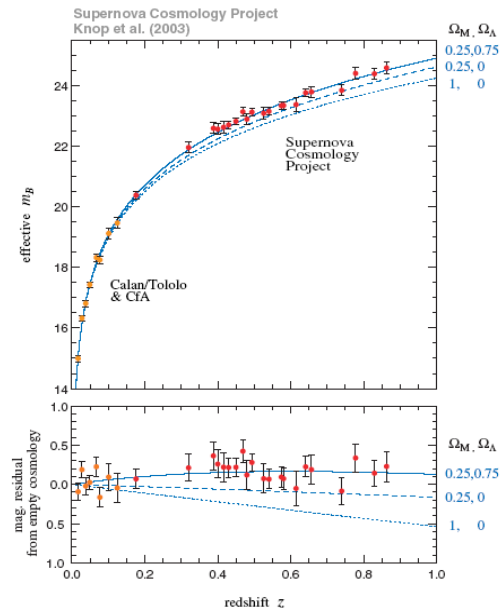
*« The main point in our 'difference in creed' is that you have a specific belief and I am a skeptic. Observations will never be able to prove that vanishes, only that is smaller than a given value. Today I would say that is certainly smaller than  $10^{-45} \text{ cm}^{-2}$  and is probably smaller than  $10^{-50} \text{ cm}^{-2}$  . Maybe one day observations will also provide a specific value, but up to now I have no knowledge of anything pointing to this. »*

**(Letter to Einstein 18 April 1917)**

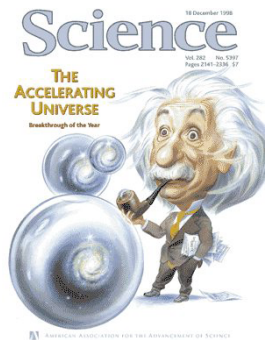
# L'Énergie Noire: Évidences Observationnelles

Mesure de distances sur les échelles cosmologiques

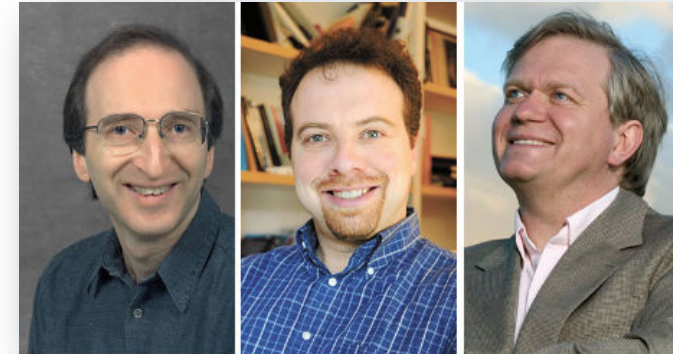
$$D(z) = a(z) \int_0^z \frac{cdz}{a(z)H(z)} \approx \frac{c}{H_0} \left[ z - \frac{1}{2}(q_0 - 1)z^2 + \dots \right]$$



- Chandelles standards ?
- Le rapport de leur luminosité intrinsèque (supposée connue) et de leur luminosité apparente fixe la distance-luminosité ( $d_L$ ) des supernovae, le redshift  $z$  peut être indépendamment mesuré par spectroscopie.
- Finalement, on obtient  $d_L(z)$  ou de façon équivalente la magnitude( $z$ ) et on peut alors tracer un diagramme de Hubble (mesure direct du facteur d'accélération)



High-z Supernova Search Team  
(Riess et al. '98)  
Supernova Cosmology Project  
(Perlmutter et al. '99)



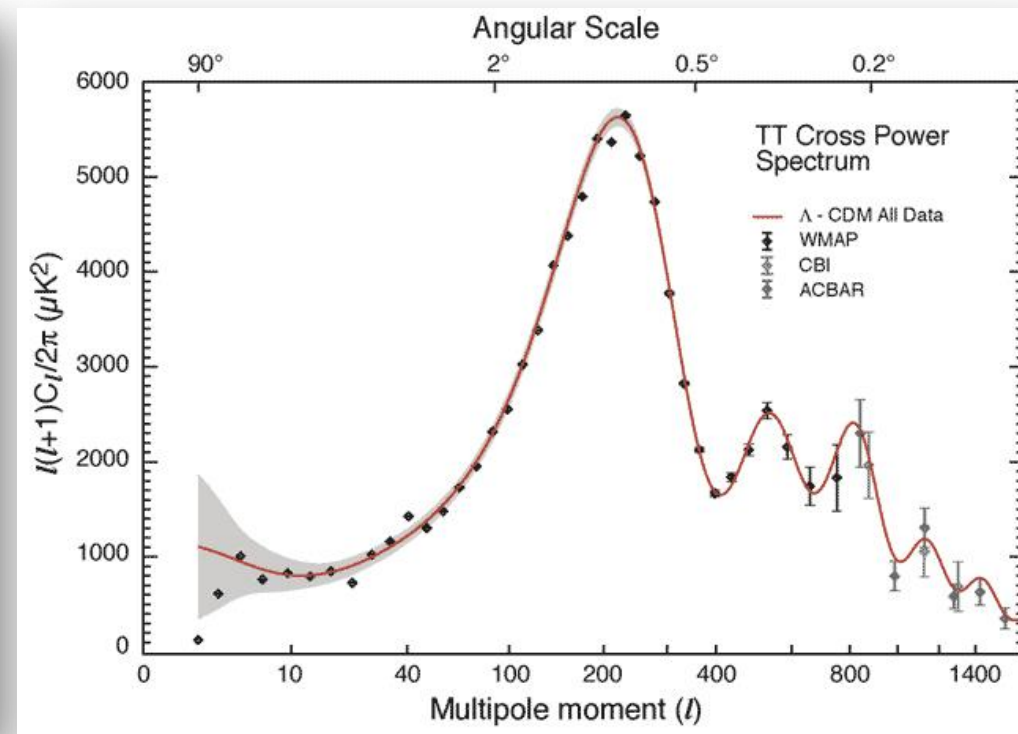
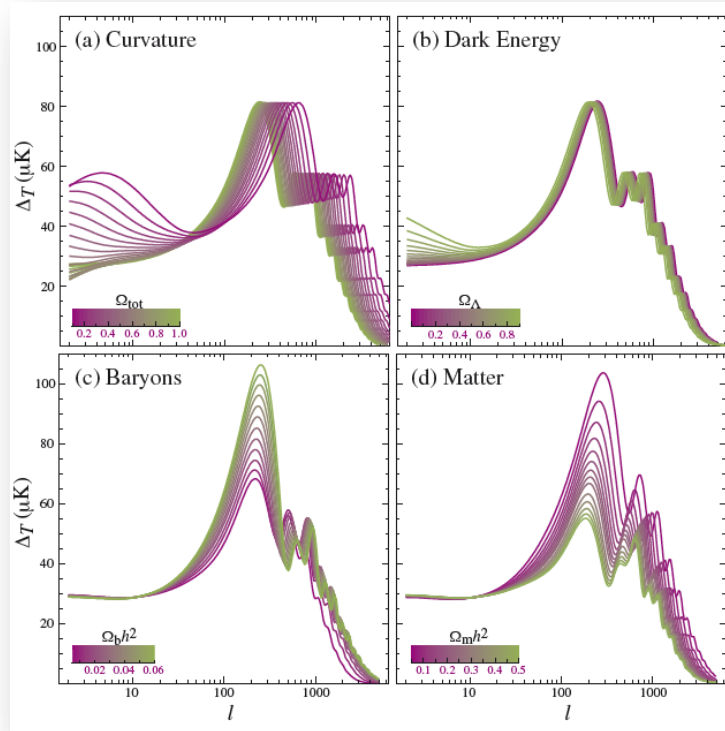
S. Perlmutter, A. Riess et B. Schmidt  
1998 (Prix Nobels 2011)

Les Supernovae de Type Ia apparaissent plus faiblement lumineuses qu'attendues.

**L'expansion cosmique a récemment accéléré ou/et les supernovae ne sont pas des chandelles standards**

# L'Énergie Noire: Évidences Observationnelles

L'analyse des anisotropies du fond de rayonnement cosmologique à  $T=2.725\pm 0.002$  K est un puissant outil pour déterminer les paramètres cosmologiques.



*Wu & Dodelson 2010*

Géométrie: Espace Plat ( $\Omega_T \sim 1$ ),

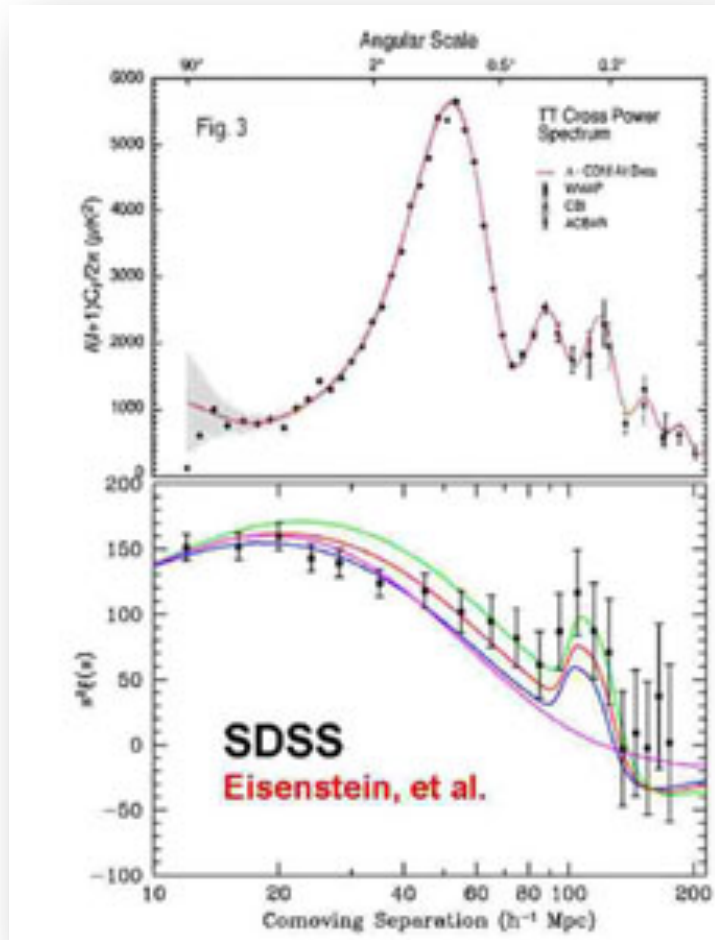
Contenu Présent de l'Univers: Matière :  $\sim 25\%$  avec Baryons:  $\sim 5\%$

=> Matière Noire :  $\sim 20\%$  , => Énergie Noire Manquante:  $\sim 75\%$ !



# L'Énergie Noire: Évidences Observationnelles

Nombreuses autres mises en évidences observationnelles: BAO, LSS, WL ...



- Avant le découplage entre la matière et le rayonnement ( $z = 1100$ ) les fluctuations de densité primordiales ont donné lieu à des ondes de pression dans le fluide photons-baryons.

- Au découplage, ces oscillations ont été gelées, laissant leur empreinte sur le CMB, et dans la distribution des baryons et matière noire (Peebles & Yu, Sunyaev & Zeldovitch (1970)).

- Cette empreinte dans la fluctuation du fond diffus cosmologique, correspond au pic principal dans le spectre de puissance du CMB, et  $\sim 150$  Mpc dans la distribution à grande échelle des galaxies à redshift  $z \approx 0,3$  (Eisenstein et al 2005, SDSS-1).

- Ces oscillations « BAO » dans le spectre de puissance des galaxies peuvent être utilisées comme sondes cosmologiques et en particulier pour déterminer le paramètre d'équation d'état de l'énergie noire.

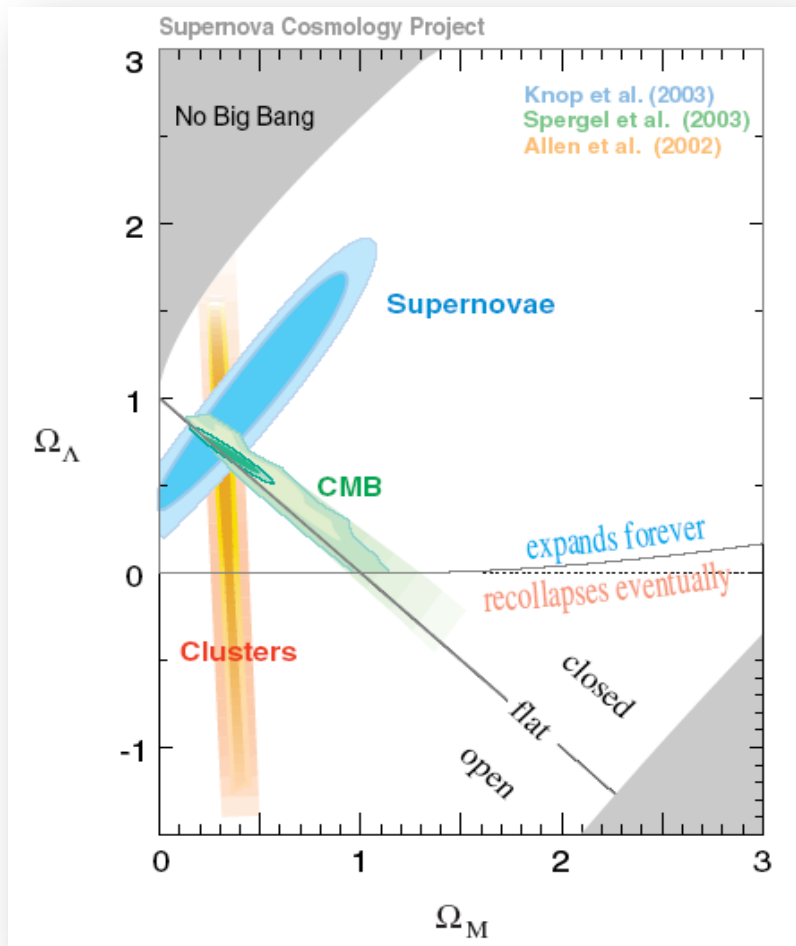
- Distribution aux grandes échelles des galaxies 2dFGRS:  $0.65 < \Omega_L < 0.85$ , SDSS:  $\Omega_M = 0.24 \pm 0.02$

- Le comptage des amas de galaxies permet d'inférer la densité de matière dans l'Univers,  $\Omega_M \sim 0.3$

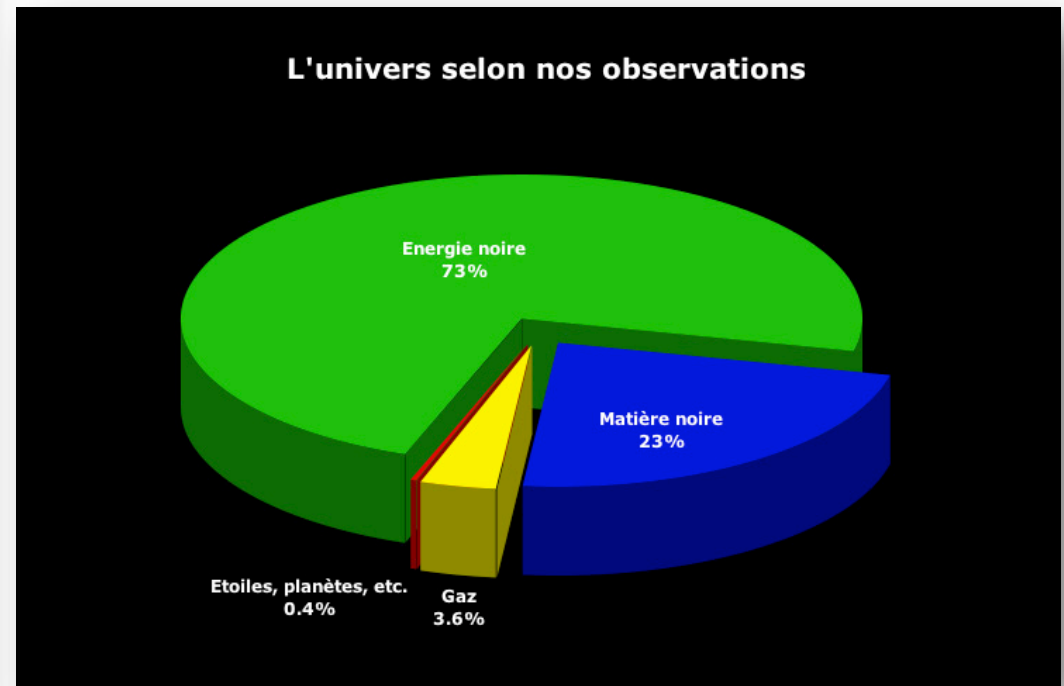
# L'Énergie Noire: Évidences Observationnelles

Combinaison des mesures de distance et des mesures de quantité d'énergie

## Complémentarité Cosmique



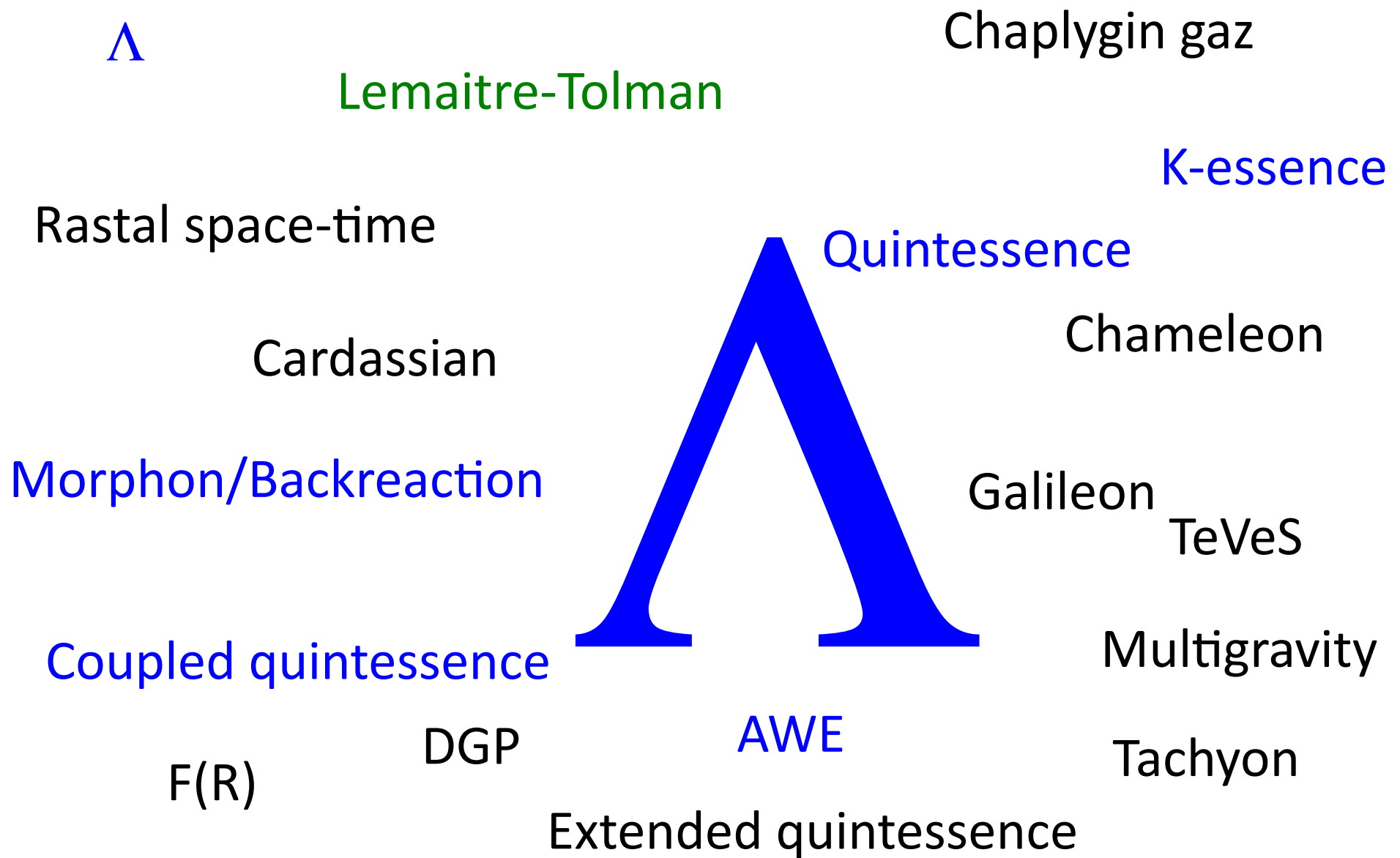
## L'Univers est essentiellement invisible



Matière noire ?! **Energie Noire ?!**

# Nature de l'Énergie Noire ? Interprétations Théoriques

---



# Nature de l'Énergie Noire ? Interprétations Théoriques

L'interprétation théorique interroge notre Paradigme Cosmologique

- Principe de Covariance
- Principe d'Équivalence
- Principe Cosmologique : La dynamique de l'Univers est donné seulement à travers  $a(t)$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G\rho}{3}, \quad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P)$$

$$G_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

} RG

Nouvelle Composante énergétique ( $\rho$ ) qui s'ajoute à la ML et à la MN:

$$G_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} [T_{\mu\nu}^{SM} + T_{\mu\nu}^{DM} + T_{\mu\nu}^{DE}]$$

Violation de la condition forte d'énergie

$$\ddot{a} > 0 \text{ si } p < -\frac{\rho}{3}$$

Au delà du Modèle Standard de l'infiniment petit

Extensions de la RG, au delà du principe d'équivalence

$$\tilde{G}_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}^{Matter}$$

Une extension à la RG peut être réécrite comme un modèle effectif de type « Friedmann ».

$$w(z) = \frac{\tilde{P}}{\tilde{\rho}}$$

Interprétation Géométrodynamique de l'énergie noire

L'hypothèse "Théorie De la Relativité Générale d'Einstein" est conservée

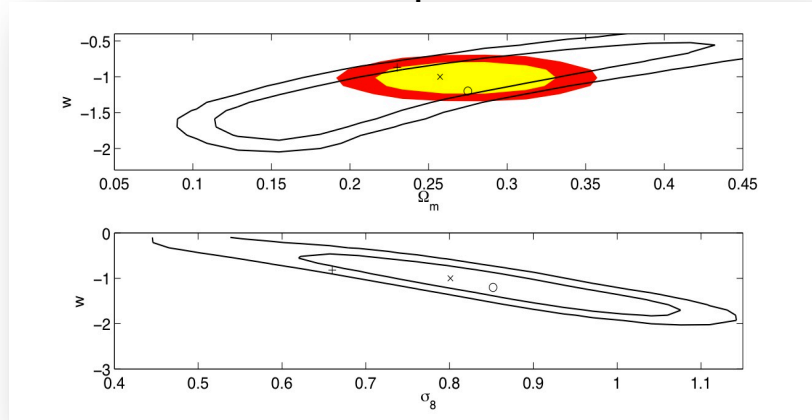
Au delà du principe cosmologique (Energie noire comme un effet des inhomogénéités)

Nouveau statut de l'Observateur

3 interprétations, 3 axes de recherches, Nombreux modèles concurrents

# Nature de l'Énergie Noire et Modèles Réalistes.

- De nombreux modèles sont possibles ( $\Lambda$  (Fine tuning, et coincidence), Q, Gravité étendue,  $f(R)$ , AWE, Dimensions supplémentaires, Univers Inhomogène...).
- Motivations théoriques et observationnelles se rejoignent dans la notion de modèles réalistes.



Analyse Monte-Carlo: Surface de confiance  $1\sigma$  et  $2\sigma$  dans les plans  $w$ - $\Omega_m$  (haut) et  $w$ - $\sigma_8$  (bas)  
 WMAP7-yr data : ligne solide  
 Sn UNION data : région rouge et jaune  
 RCDM (+),  $\Lambda$ CDM-W7 (x) et wCDM (o).

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho_m + \rho_Q + 3p_Q) \quad \ddot{a} > 0 \text{ if } p_Q < -\frac{\rho_Q + \rho_m}{3}$$

$$\rho_Q = \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + V(\varphi) \quad p_Q = \frac{\dot{\varphi}^2}{2} - V(\varphi)$$

$$\ddot{\varphi} + 3\frac{\dot{a}}{a}\dot{\varphi} + \frac{dV}{d\varphi} = 0 \quad w_{DE} = \frac{P_{DE}}{\rho_{DE}} = \frac{\frac{\dot{\varphi}}{2} - V(\varphi)}{\frac{\dot{\varphi}}{2} + V(\varphi)}$$

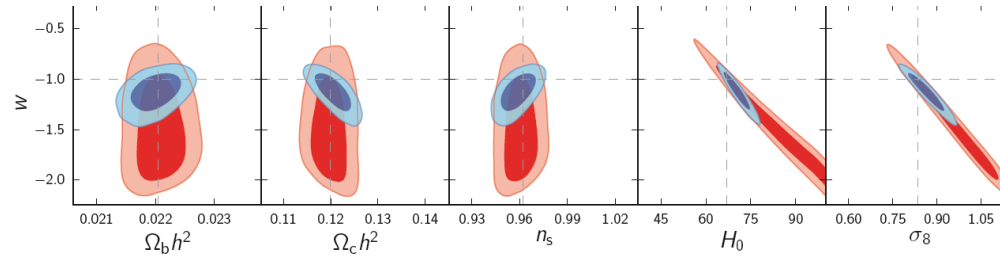
$$V_{RP}(\varphi) = \frac{\lambda^{4+\alpha}}{\varphi^\alpha} \quad V_{SU}(\varphi) = \left(\frac{\lambda^{4+\alpha}}{\varphi^\alpha}\right) \exp(4\pi G\varphi)$$

Parameters	$\Lambda$ CDM	RCDM	SUCDM	W'CDM
$H_0$ (km/s/Mpc)	72	72	72	72
$\Omega_{\text{cdm}}$				0.275
$\Omega_b h^2$				0.2258
$\sigma_8^{\text{lin}}$				0.852
$\alpha$				/
$\lambda$ (eV)				/
$A_s$				/
$n_s$				0.963
$w_0$				-1.2
$w_1$	0	0.08	0.19	0

# Choix des Modèles Réalistes, Planck 2013!

## Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters

Planck Collaboration: P. A. R. Ade<sup>90</sup>, N. Aghanim<sup>63</sup>, C. Armitage-Caplan<sup>96</sup>, M. Arnaud<sup>77</sup>, M. Ashdown<sup>74,6</sup>, F. Atrio-Barandela<sup>19</sup>, J. Aumont<sup>63</sup>, C. Baccigalupi<sup>89</sup>, A. J. Banday<sup>99,10</sup>, R. B. Barreiro<sup>70</sup>, J. G. Bartlett<sup>1,72</sup>, E. Battaner<sup>102</sup>, K. Benabed<sup>64,98</sup>, A. Benoit<sup>61</sup>, A. Benoit-Lévy<sup>26,64,98</sup>, J.-P. Bernard<sup>10</sup>, M. Bersanelli<sup>37,53</sup>, P. Bielewicz<sup>99,10,89</sup>, J. Bobin<sup>77</sup>, J. J. Bock<sup>72,11</sup>, A. Bonaldi<sup>73</sup>, J. R. Bond<sup>9</sup>, J. Borrill<sup>14,93</sup>, F. R. Bouchet<sup>64,98</sup>,



**Fig. 21.** 68% and 95% confidence regions on one-parameter extensions of the base  $\Lambda$ CDM model for *Planck*+WP (red) and *Planck*+WP+BAO (blue). Horizontal dashed lines correspond to the fixed base model parameter value, and vertical dashed lines show the mean posterior value in the base model for *Planck*+WP.

Parameter	<i>Planck</i> +WP		<i>Planck</i> +WP+BAO		<i>Planck</i> +WP+highL		<i>Planck</i> +WP+highL+BAO	
	Best fit	95% limits	Best fit	95% limits	Best fit	95% limits	Best fit	95% limits
$\Omega_K$ . . . . .	-0.0105	-0.037 <sup>+0.043</sup> <sub>-0.049</sub>	0.0000	0.0000 <sup>+0.0066</sup> <sub>-0.0067</sub>	-0.0111	-0.042 <sup>+0.043</sup> <sub>-0.048</sub>	0.0009	-0.0005 <sup>+0.0065</sup> <sub>-0.0066</sub>
$\Sigma m_\nu$ [eV] . . . . .	0.022	< 0.933	0.002	< 0.247	0.023	< 0.663	0.000	< 0.230
$N_{\text{eff}}$ . . . . .	3.08	3.51 <sup>+0.80</sup> <sub>-0.74</sub>	3.08	3.40 <sup>+0.59</sup> <sub>-0.57</sub>	3.23	3.36 <sup>+0.68</sup> <sub>-0.64</sub>	3.22	3.30 <sup>+0.54</sup> <sub>-0.51</sub>
$Y_P$ . . . . .	0.2583	0.283 <sup>+0.045</sup> <sub>-0.048</sub>	0.2736	0.283 <sup>+0.043</sup> <sub>-0.045</sub>	0.2612	0.266 <sup>+0.040</sup> <sub>-0.042</sub>	0.2615	0.267 <sup>+0.038</sup> <sub>-0.040</sub>
$dn_s/d \ln k$ . . . . .	-0.0090	-0.013 <sup>+0.018</sup> <sub>-0.018</sub>	-0.0102	-0.013 <sup>+0.018</sup> <sub>-0.018</sub>	-0.0106	-0.015 <sup>+0.017</sup> <sub>-0.017</sub>	-0.0103	-0.014 <sup>+0.015</sup> <sub>-0.017</sub>
$r_{0.002}$ . . . . .	0.000	< 0.120	0.000	< 0.122	0.000	< 0.108	0.000	< 0.111
$w$ . . . . .	-1.20	-1.49 <sup>+0.65</sup> <sub>-0.57</sub>	-1.076	-1.13 <sup>+0.24</sup> <sub>-0.23</sub>	-1.20	-1.51 <sup>+0.62</sup> <sub>-0.53</sub>	-1.109	-1.13 <sup>+0.23</sup> <sub>-0.23</sub>

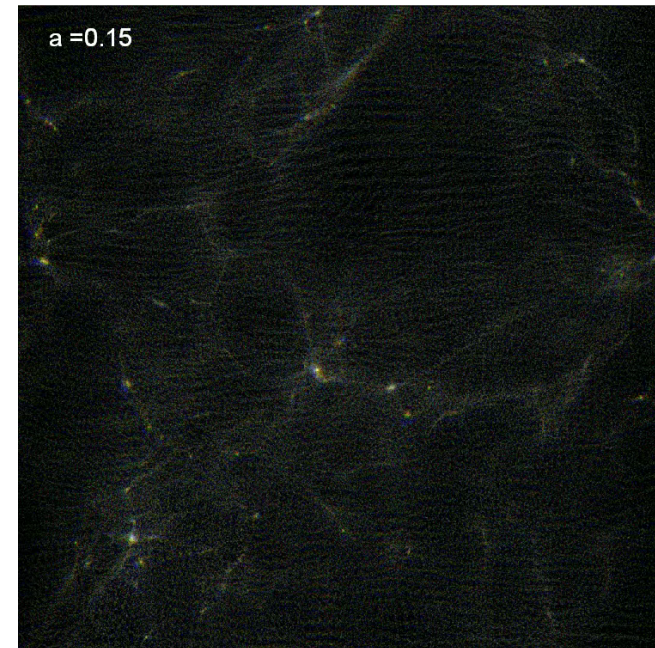
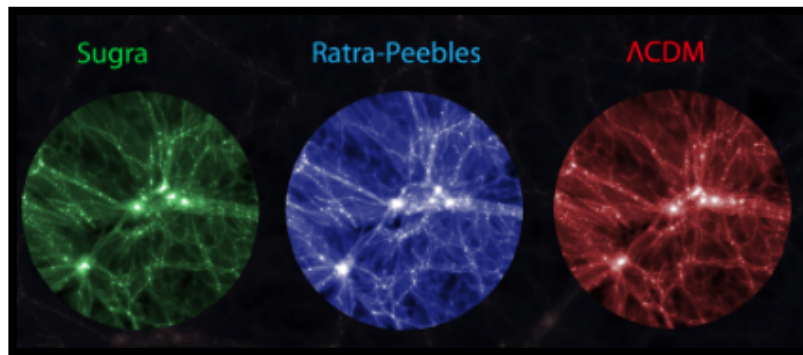
**Table 10.** Constraints on one-parameter extensions to the base  $\Lambda$ CDM model. Data combinations all include *Planck* combined with *WMAP* polarization, and results are shown for combinations with high- $\ell$  CMB data and BAO. Note that we quote 95% limits here.

Parameters	$\Lambda$ CDM	RPCDM	SUCDM	W'CDM
$H_0$ (km/s/Mpc)	72	72	72	72
$\Omega_{\text{cdm}}$	<b>0.26</b>	<b>0.23</b>	<b>0.25</b>	<b>0.275</b>
$\Omega_b h^2$	0.02273	0.02273	0.02273	0.02258
$\sigma_8^{\text{lin}}$	<b>0.8</b>	<b>0.66</b>	<b>0.73</b>	<b>0.852</b>
$\alpha$	0	0.5	1	/
$\lambda$ (eV)	$2.4 \times 10^{-3}$	4.9	$2.1 \times 10^3$	/
$A_s$	$2.1 \times 10^{-9}$	$2.0 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-9}$	/
$n_s$	0.951 (0.963)	0.951 (0.963)	0.951	0.963
$w_0$	-1	<b>-0.87</b>	-0.94	<b>-1.2</b>
$w_1$	0	<b>0.08</b>	<b>0.19</b>	<b>0</b>

# Nature de l'Énergie Noire et Structuration de l'Univers.

---

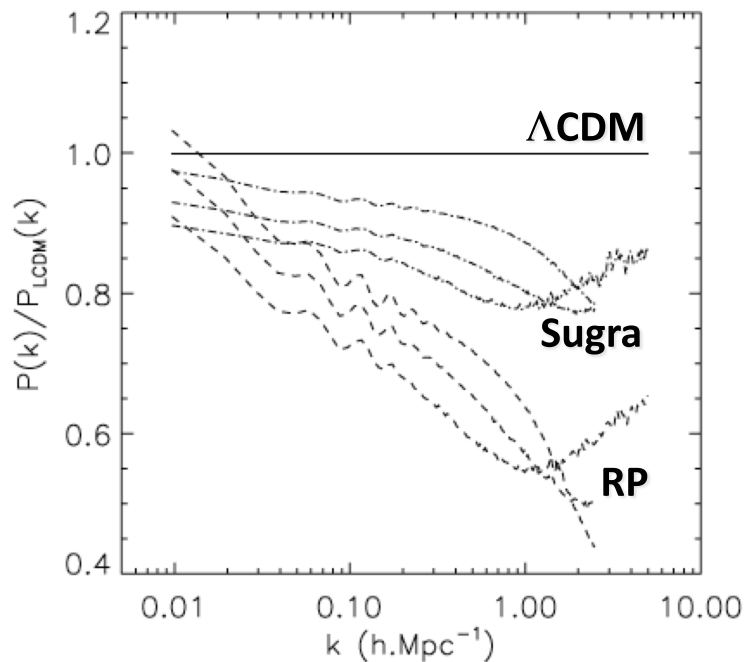
- Ces modèles sont (par construction) dégénérés sur la dynamique globale (SN), et faiblement perturbée (CMB) de l'Univers.
- Différente nature de l'EN  $\Rightarrow$  expansion cosmique différente et parfois une dynamique gravitationnelle locale différente due à une modification de gravité ou à un effondrement de l'EN...



$\Rightarrow$  Structurations cosmiques différentes

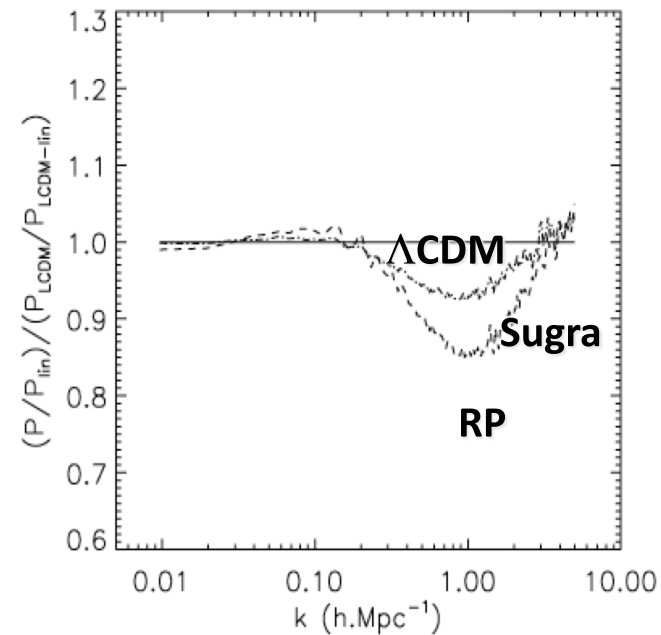
**Réciproquement, la structuration de l'Univers est une signature de la nature de l'EN,  
de la nature de la gravitation.**

# Nature de l'Énergie Noire et Structuration de l'Univers.



Evolution of the non-linear power spectrum in quintessence cosmologies relative to the  $\Lambda$ CDM case

*Alimi et al MNRAS 2010*



Ratio of the non-linear power spectrum relative to linear prediction for the different cosmologies as a measurement of the evolution of non-linearity in the gravitational collapse.

**Empreinte de l'Énergie Noire sur la formation des structures cosmiques, lever la dégénérescence, construire empiriquement le modèle d'énergie noire.**



# **MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE LA STRUCTURATION DE L'UNIVERS.**

# Formation des grandes structures et modélisation numérique

La structuration résulte de l'évolution, de l'effondrement, de la matière (noire + baryon) tout au long de l'histoire de l'Univers.

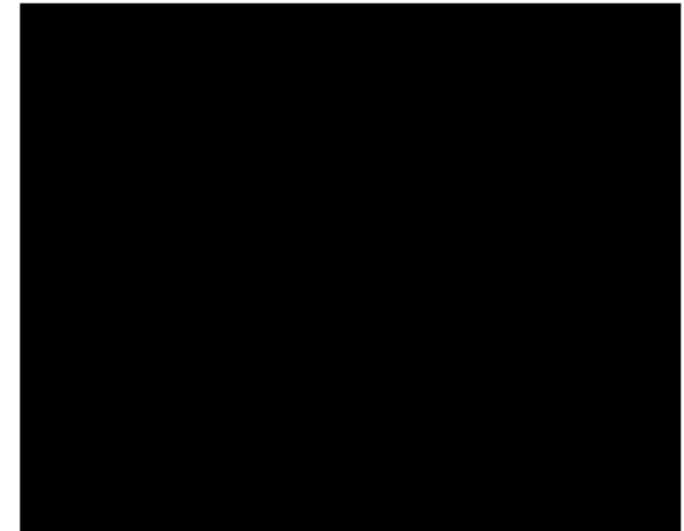
L'équation Vlasov-Poisson est difficile à résoudre directement du fait de sa dimensionalité (6D EDP) et du mélange (multistreaming) lors de la croissance des structures par instabilité de Jeans.

Discrétisation en terme de « pseudo » particules qui évoluent selon les caractéristiques du système V-P.  
Code N-Corps Particule Grille (Particule Mesh)

**Défi: Maximum de résolutions en masse et spatiale, Résoudre la structures interne des halos - le plus grand nombre de particules**

Suivre la dynamique **multi-échelle** sur **le plus grand des volumes** - le plus grand nombre de points de calcul

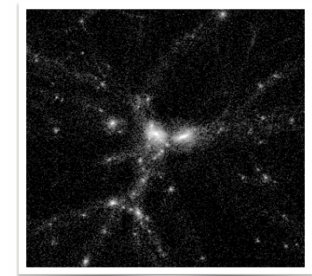
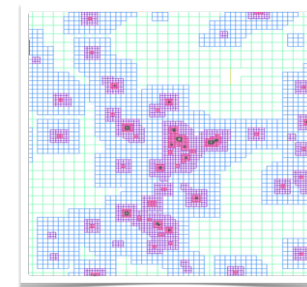
**Meilleure Moyen:** Raffinement de la Grille, là où cela est nécessaire; PM-AMR



$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\vec{p}}{a^2} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{x}} - \vec{\nabla} \phi \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{p}} = 0, \quad \Delta \phi = \frac{4\pi G \bar{\rho}}{a} \delta$$
$$\delta = \frac{\rho - \bar{\rho}}{\bar{\rho}}, \quad \rho = \int f(\vec{x}, \vec{p}, t) d\vec{p}, \quad \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G \bar{\rho}}{3}$$

$f(\vec{x}, \vec{p}, t)$ :  $N \uparrow$  particules massives,  $\vec{x}_i, \vec{p}_i$

$$\frac{d\vec{x}_i}{da} = \frac{\vec{p}_i}{\dot{a}a^2}, \quad \frac{d\vec{p}_i}{da} = \frac{-\vec{\nabla} \phi}{a}$$



# « N-body solver »: PM-AMR (Particle - Mesh – Adaptive Mesh Refinement)

## Grille Principale: méthode PM

Calcul le champ de densité sur la grille à partir de la distribution des particules  
(Schéma d'affectation de la masse)

Résoudre l'équation de Poisson (équation de champ) sur la grille

Interpoler la force à la position des particules

Déplacer les particules



## Grille de Raffinement: AMR

La grille est raffinée de façon récursive là où la densité excède un seuil donné ( $\sim 10$ )

Chaque cellule divisée en 8 nouvelles cellules, de taille deux fois plus petite (idéal pour suivre la formation de structures anisotropes comme les filaments).

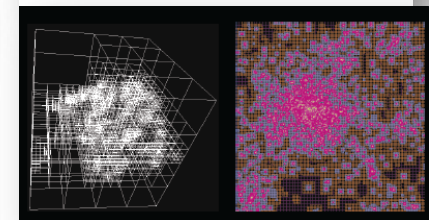
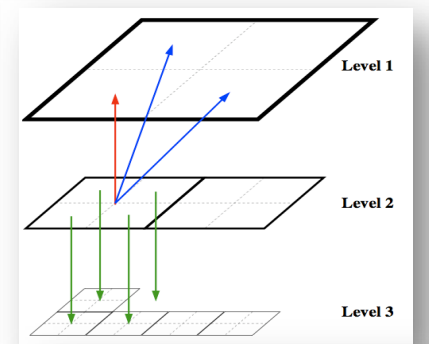
2 cellules adjacentes ne diffèrent que d'un seul niveau de grille, arbre totalement non-structuré (Khokhlov 98, Teyssier 2002):

**1 oct**: petite grille de 8 cellules pointent vers

**1 cellule parente**, **6 cellules parentes voisines**, **8 cellules filles**

Le pas de temps décroît d'un facteur 2 à chaque niveau de grille

L'équation de Poisson est résolue sur un domaine aux CL fixées, méthode de relaxation de Gauss-Seidel et « Successive Over Relaxation » (Press et al. 1992)



# Implémentation sur Supercalculateur – Décomposition de domaines

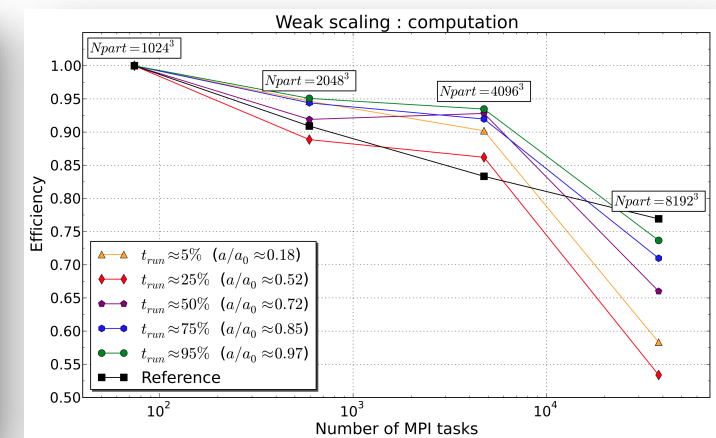
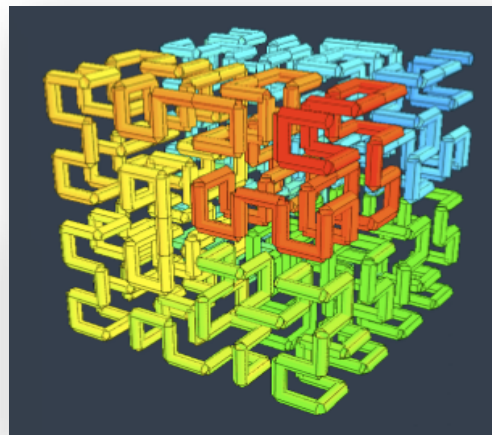
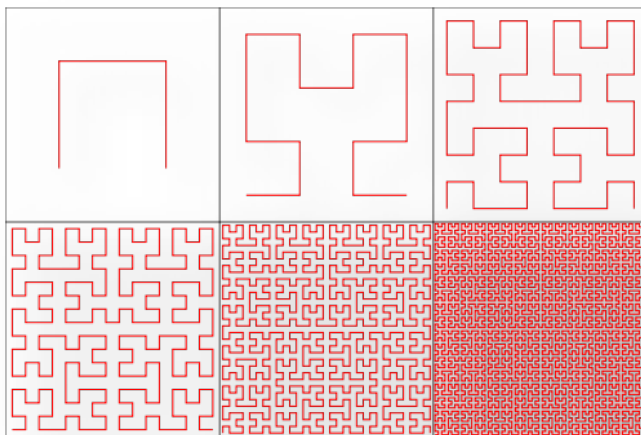
L'implémentation parallèle utilise la bibliothèque MPI avec une décomposition de domaines selon la courbe « space filling Peano-Hilbert »:

## Avantages:

- La courbe Peano-Hilbert est une courbe remplissant tout l'espace, elle permet d'optimiser l'équilibrage de charge durant le calcul.
- 2 particules proche dans l'espace sont proches sur la courbe de P-H avec des identifiants proches.
- Testé, opérationnel, et efficace pour des systèmes complexes de grandes tailles (très bonne scalabilité jusqu'à 80 000 cœurs)

## Désavantage:

- Non intuitif et non naturel pour un utilisateur extérieure. Il nécessite de réécrire les données de résultats.



# DEUS

**LARGE SET OF UNIVERSE VOLUMES (+ 30 SIMULATIONS),  
HIGH SPATIAL RESOLUTION AND MASS:  $2.5 \text{ h}^{-1} \text{ kpc}$  to  $10.4 \text{ h}^{-1} \text{ Gpc}$ ,  $2.5 \cdot 10^8 \text{ h}^{-1} M_{\odot}$  to  $10^{16} \text{ h}^{-1} M_{\odot}$   
INITIAL REDSHIFT DEEP IN LINEAR REGIME**

Computing Volume ( $\text{h}^{-1} \text{ Mpc}^3$ )	Spatial Resolution ( $\text{h}^{-1} \text{ kpc}$ )	Mass of Particle ( $\text{h}^{-1} M_{\odot}$ )	Number of Particles	Initial Redshift	Cosmological Model	Computer (# of cores)
$162^3$	2.5	$2 \cdot 10^9$	$512^3$	90	$\Lambda$ , SU, RP	Titane (64)
$162^3$	2.5	$2.5 \cdot 10^8$	$1024^3$	130	$\Lambda$ , SU, RP	BlueGene/P (4096)
$648^3$	20	$1.5 \cdot 10^{11}$	$512^3$	55	$\Lambda$ , SU, RP	Ressources locales
$648^3$	10	$1.7 \cdot 10^{10}$	$1024^3$	90	$\Lambda$ , SU, RP	BlueGene/P (4096)
$648^3$	5	$2 \cdot 10^9$	$2048^3$	90	$\Lambda$ , SU, RP	BlueGene/P (32768)
$1296^3$	40	$10^{12}$	$512^3$	40	$\Lambda$ , SU, RP	Ressources locales
$2592^3$	40	$10^{12}$	$1024^3$	55	$\Lambda$ , SU, RP	BlueGene/P (4096)
$2592^3$	20	$1.5 \cdot 10^{11}$	$2048^3$	55	$\Lambda$ , RP	BlueGene/P (24576)
$5184^3$	40	$10^{12}$	$2048^3$	40	$\Lambda$ , RP	BlueGene/P (24576)
$10368^3$	40	$10^{12}$	$4096^3$	100	$\Lambda$ , RP, w	Curie Thin (9504)
$21000^3$	40	$10^{12}$	$8192^3$	100	$\Lambda$ , RP, w	Curie Thin (76032)

*DEUS: Alimi et al 2013*

**POURQUOI ET COMMENT SIMULER TOUT L'UNIVERS ?**

## Empreinte de l'énergie noire sur Tout l'Univers observable

---

Les mesures précises de l'empreinte de l'EN sur la formation des structures, nécessite de suivre l'effondrement gravitationnelle de la matière tout au long de l'histoire de l'univers sur plusieurs ordres de grandeurs de la taille d'une galaxie à la taille de l'Univers Observable.



**L'Univers Observable inclus toutes les distances parcourues par la lumière dans l'âge de l'Univers.** Dans un Univers avec  $\Lambda$ , en 13.7 milliards d'années (l'âge d'un tel univers) du fait de l'expansion cosmique, la lumière parcourt plus de 47 milliards d'années lumières.

# Pourquoi simuler Tout l'Univers Observable ?

On accède à deux observables spécialement sensibles à l'énergie noire:

- **La mesure des oscillations baryoniques acoustiques aujourd'hui**
- **La statistiques des évènements rares aux valeurs extrêmes comme l'amas de masse maximale**

La taille de l'Univers observable ( $\sim 21 \text{ h}^{-1} \text{ Gpc}$ ) contient aujourd'hui plus de 150 fois l'échelle des « BAO »

L'erreur statistique sur un mode est inversement proportionnelle à  $L_{\text{box}}$ . Lorsque la taille de la boîte de calcul atteint la taille de l'Univers observable, la fluctuation statistique sur l'échelle de la boîte se réduit à la « variance cosmique ».

$$\sigma(k) \propto \sqrt{\frac{1}{N_k}} \propto \sqrt{\left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2} \propto \frac{1}{kL_{\text{Box}}}$$

En simulant tout l'univers observable, nous avons la garantie de réaliser les évènements rares que représentent les amas super massifs, qui sont sous-représentés dans des simulations de plus petite taille.

En disposant d'une résolution en masse suffisante nous pourrions résoudre les halos (amas) les plus massifs ( $M > 10^{14} M_{\odot}$ ) avec au moins 100 particules

Mais pour que chaque particule ait au moins la masse de notre voie lactée ( $\sim 10^{12} M_{\odot}$ ) et pour une résolution spatiale ( $\sim 40 \text{ kpc}$ ) ( $L_{\text{box}} / \Delta x = 525\,000$ ), cela exige  **$\sim 550$  milliards de particules sur plus de 2,5 trillions points de calcul.**

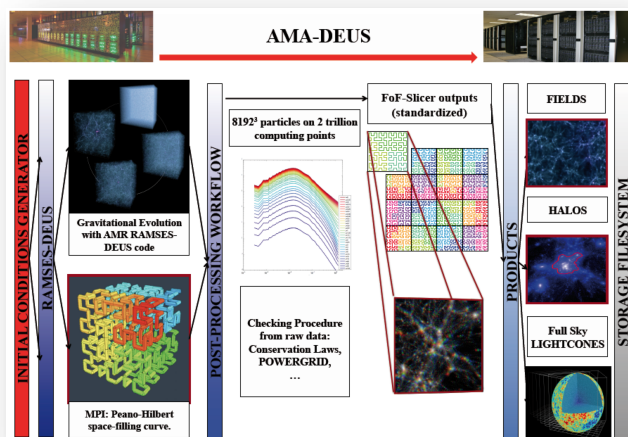
**Bien au delà de tout ce qui avait été jusque là calculé!**



# Comment simuler Tout l'Univers Observable ?

Tant que le nombre de particules et le nombre de points de calcul n'est pas gigantesque, la principale difficulté pour réaliser une simulation numérique cosmologique de structuration de l'Univers est la résolution du système Vlasov-Poisson qui gère la dynamique non collisionnelle de la matière noire dans un Univers en expansion. Mais au-delà, les aspects auparavant périphériques de la simulation deviennent de tailles comparables sinon supérieures (ressources nécessaires (cpu, mémoire, communication), gestion des volumes massifs de données); Une application globale capable de gérer de façon optimisée le "pipe-line" de codes (et une organisation de type projet) sont alors nécessaires....

## AMADEUS: A Multiple purpose Application for Dark Energy Universe Simulation



Définition des Modèles réalistes: Monte-Carlo et Sol. Cosmo.

Générateur des Conditions Initiales

« Gravity Solver » : PM-AMR algorithme

Post-Processing quasi « on the fly »

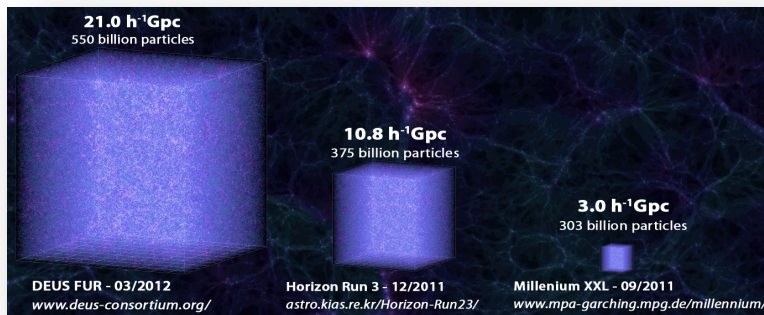
Gestion et le stockage des données numériques

## Défi Numérique !

Toutes les facettes du HPC sont sollicitées: Temps de calcul, l'usage de la mémoire, les schémas de communications la gestion des I/O. Tout doit être spécialement optimisé au même instant en sollicitant ABSOLUMENT TOUTES les ressources disponibles.

# Simuler Tout l'Univers, un défi au delà de la cosmologie numérique.

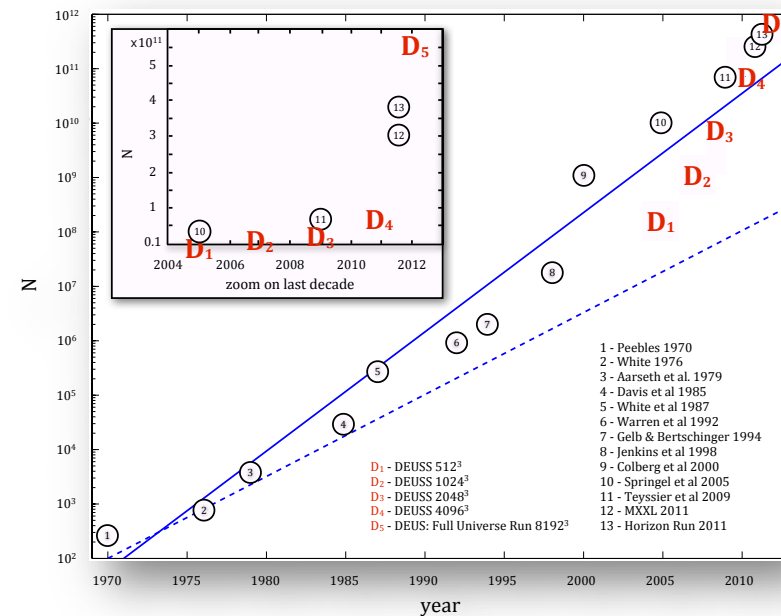
Le plus grand ensemble de simulations numériques cosmologiques au monde capable de suivre la formation de halos de  $10^{11} h^{-1} M_{\odot}$  à plus de  $10^{16} h^{-1} M_{\odot}$  sur des volumes de la taille de l'environnement d'un groupe de galaxies au volume de TOUT l'Univers Observable avec une résolution spatiale de  $2.5 h^{-1} \text{ kpc}$  à  $40 h^{-1} \text{ kpc}$  et cela pour 4 modèles d'énergie noire réalistes:  $\Lambda\text{CDM}$ ,  $\text{RPCDM}$ ,  $\text{SUCDM}$ ,  $\text{WCDM}$



2.5 trillions points de calculs (double precision)  
Coarse Grid  $8192^3$  ( $21 h^{-1} \text{ Gpc}$ ) Résolution  
Formelle  $524288^3$  ( $40 h^{-1} \text{ kpc}$ )

## 550 billions particles:

- Une « loi de Moore » décrivant un facteur de croissance de 2 chaque 18 mois sous-estime l'accélération de l'état de l'art des simulations cosmologiques N-corps.
- L'évolution moyenne de la taille des simulations est issue de Springel et al. 2005. Elle montre une augmentation d'un facteur 10 chaque 4.55 années.
- Tout les halos (amas de galaxies) dans l'Univers observable avec  $M > 10^{14} h^{-1} M_{\odot}$  (avec 100 particules, 1 particule = Voie Lactée).



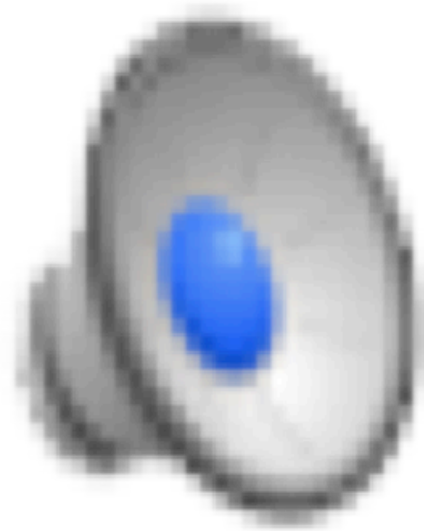
Alimi et al 2012

# REPRÉSENTATION DE TOUT L'UNIVERS OBSERVABLE

# Accéder à la distribution de matière dans tout l'Univers Observable !

---

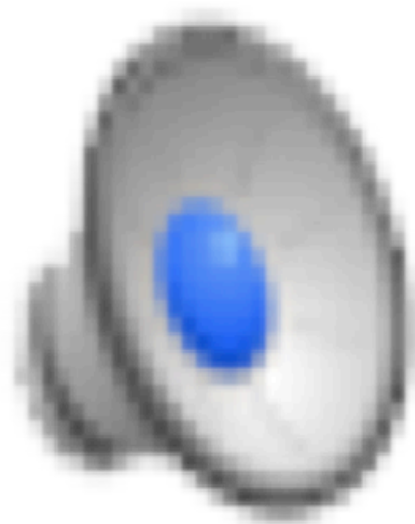
**Vue d'ensemble de la distribution présente de matière noire dans une tranche d'Univers avec constante cosmologique de 95 milliards d'années-lumière de côté. Zoom sur la structure la plus massive dans un tel Univers... (espace physique).**



# Accéder à la distribution de matière dans tout l'Univers Observable !

---

**Voyage au sein de la distribution présente de matière noire dans une tranche d'Univers dominé par un fluide « fantôme » (espace physique)  
(moins d'une minute pour parcourir plusieurs Milliards d'années lumière).**

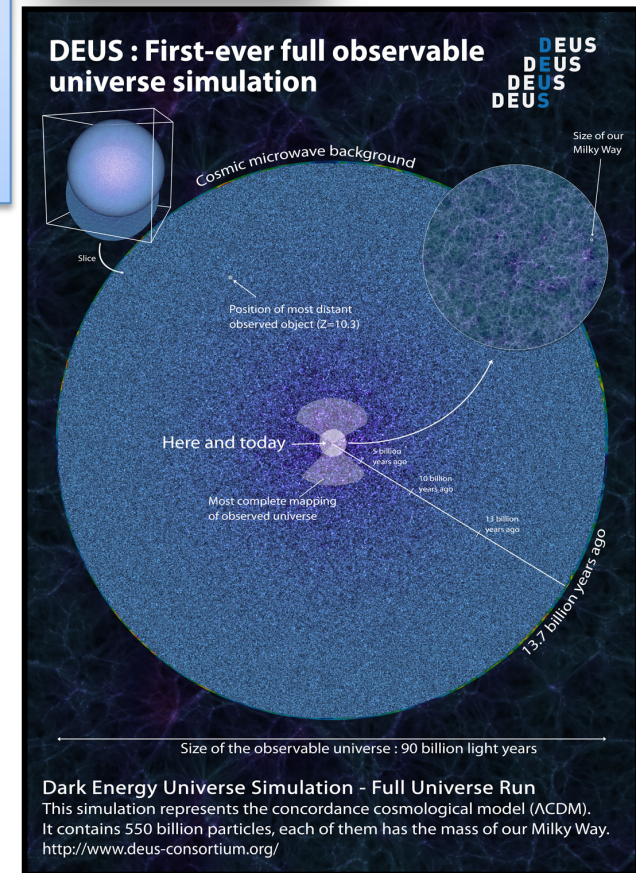
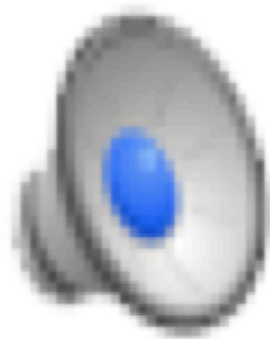
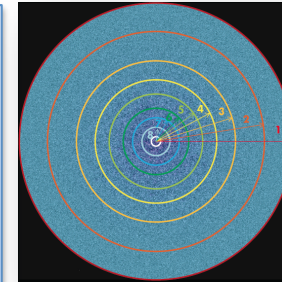


# Accéder à la distribution de matière dans tout l'Univers Observable !

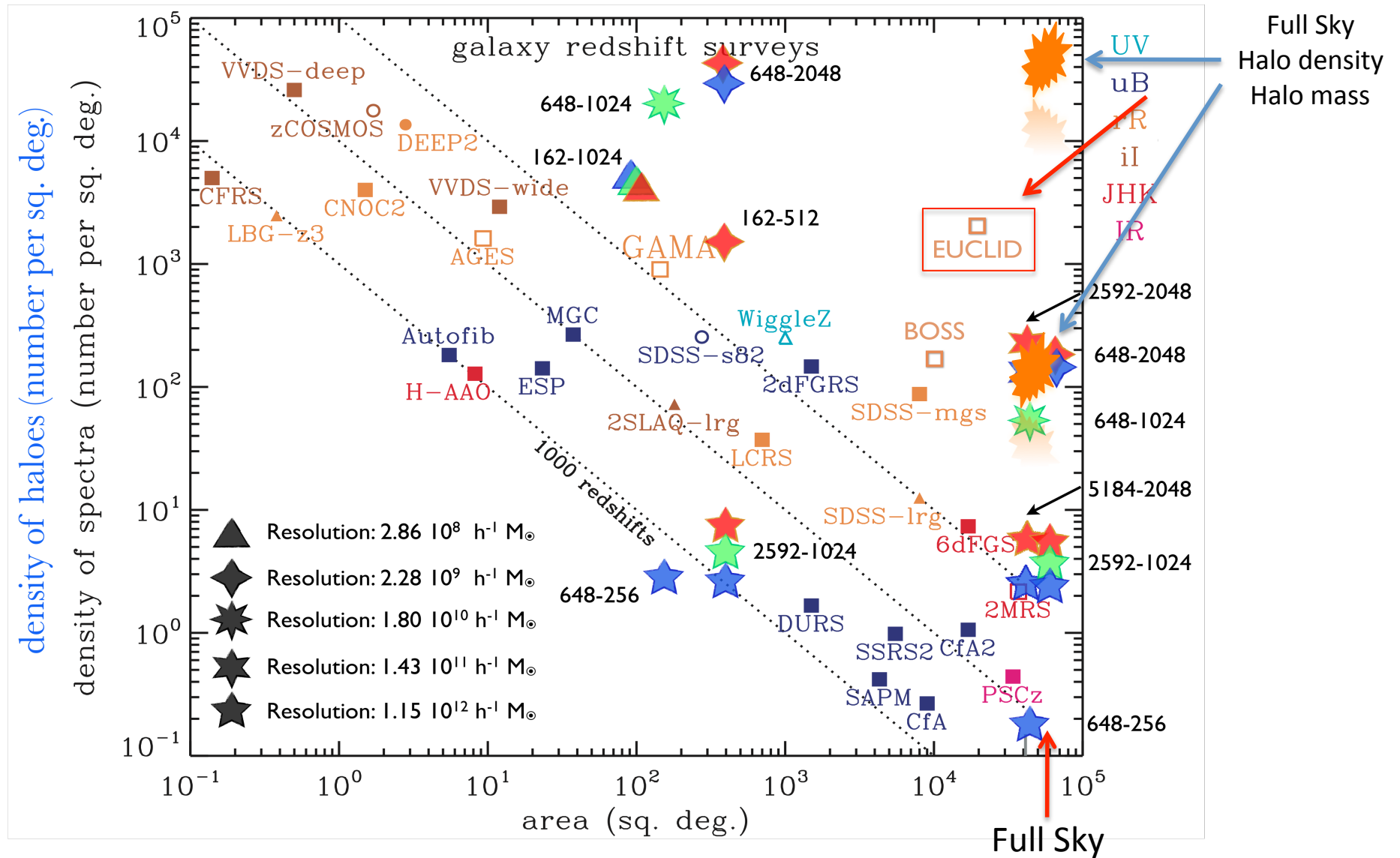
Reconstruire la distribution de matière vue dans les télescopes, espace des « redshifts » .

## Le cône de lumière à l'issue de la simulation

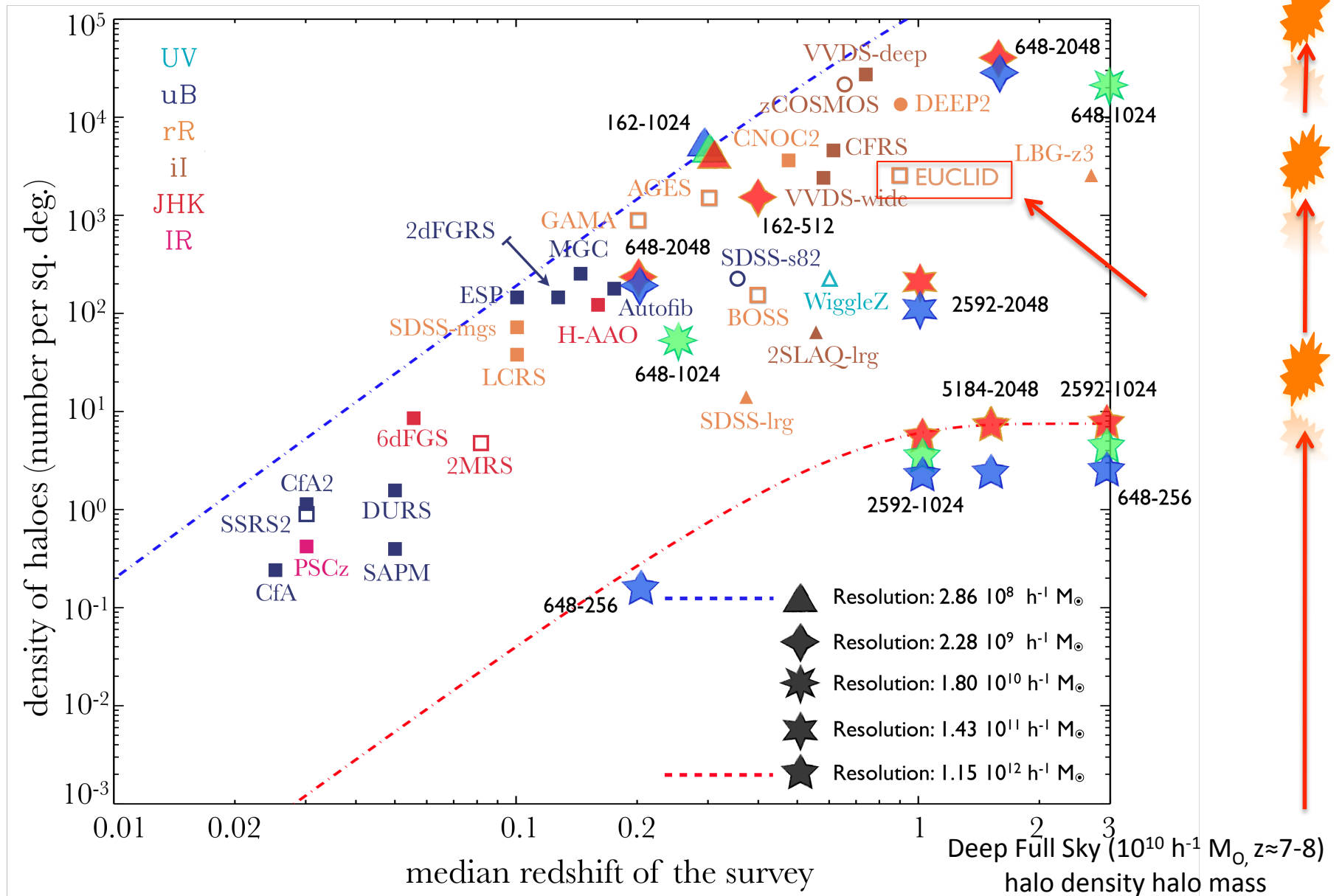
- L'évolution des particules se déroule dans un volume comobile
- A chaque pas de temps, pour un observateur donné, une coquille du cône de lumière est extraite.
- Le cône est reconstruit en additionnant toutes les coquilles à la fin de la simulation (particules et champs).
- Les corrections relativistes dues aux lentilles gravitationnelles sont implémentées (*DEUS Reverdy et al 2013*)



# Observational motivations for DEUS FUR : Redshift Space



# Observational motivations for DEUS FUR : Redshift Space





# Accéder à la distribution de matière dans tout l'Univers Observable !

---

## Comparaison des trois modèles d'énergie noire



# **QUELQUES RÉSULTATS (QUANTITATIFS) PRÉLIMINAIRES**

# Evolution Non linéaire des « BAO » : Sonde de l'énergie noire

« Perturbation theory reloaded. II Nonlinear bias, baryon acoustic oscillations, and **Millenium Simulation** in real space », D. Jeong and E. Komatsu, ApJ, 691:569–595, 2009 January 20

Statistical Variance = Cosmic Variance  
dans la simulation « DEUS FUR »

$$\sigma(k) \propto \sqrt{\frac{1}{N_k}} \propto \sqrt{\left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2} \propto \frac{1}{kL_{Box}}$$

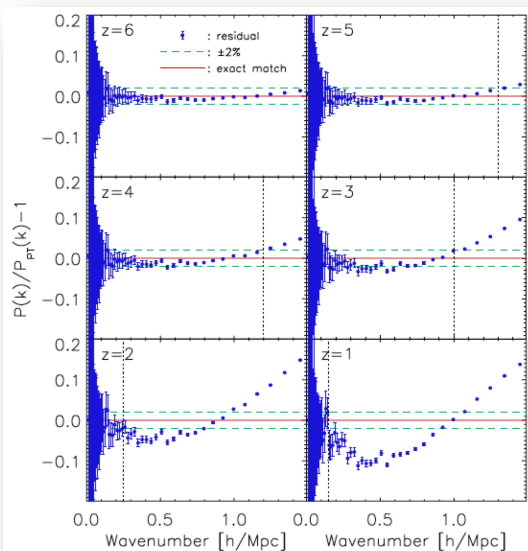
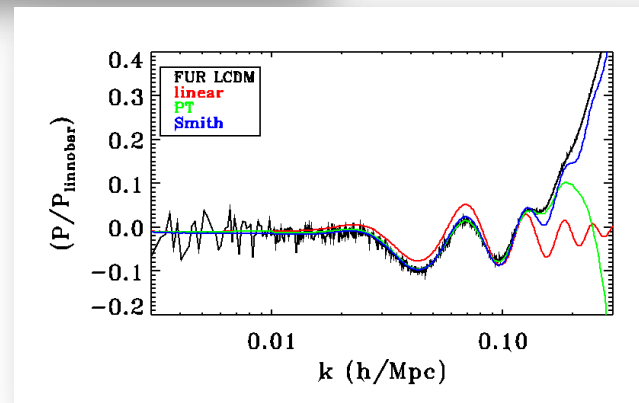
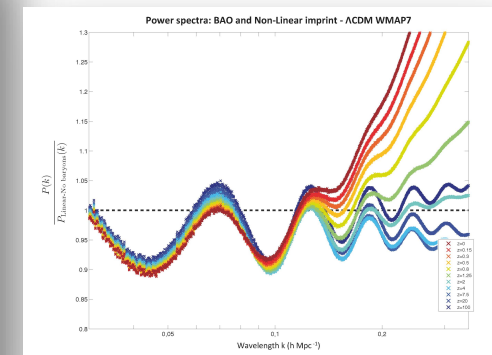
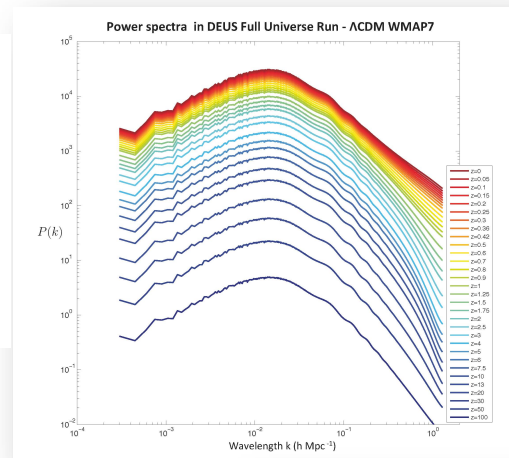
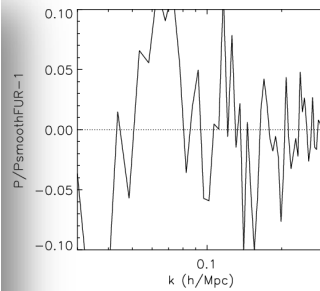
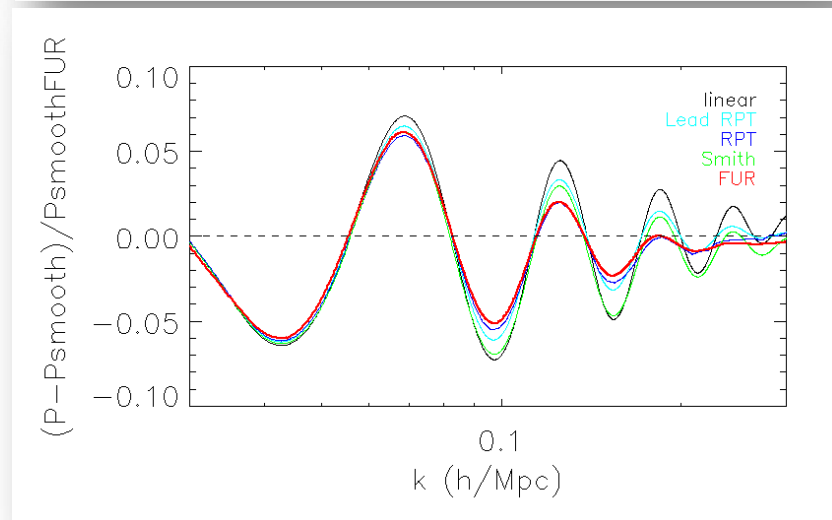
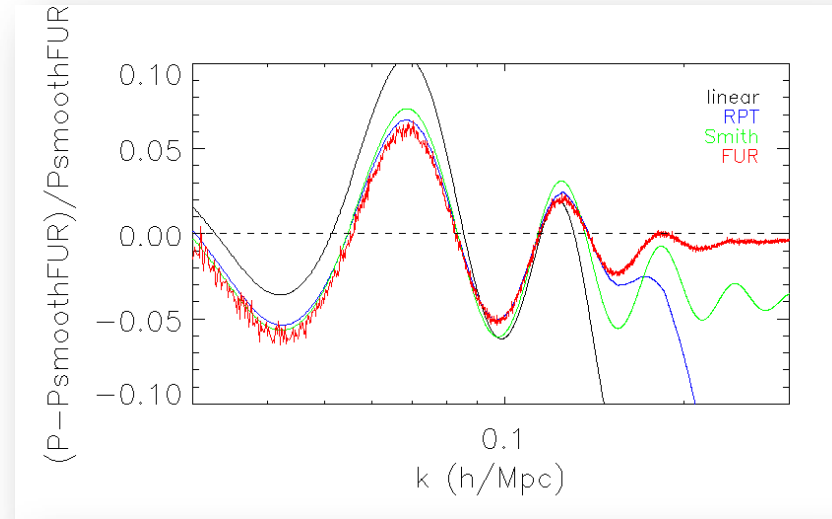


Figure 3. Fractional difference between the matter power spectra from the third-order PT and that from the Millennium Simulation,  $P_m^{sim}(k)/P_m^{PT} - 1$  (dots with error bars). The solid lines show the perfect match, while the dashed lines show  $\pm 2\%$  accuracy. We also show  $k_{max}(z)$ , below which we trust the prediction from the third-order PT, as a vertical dotted line.



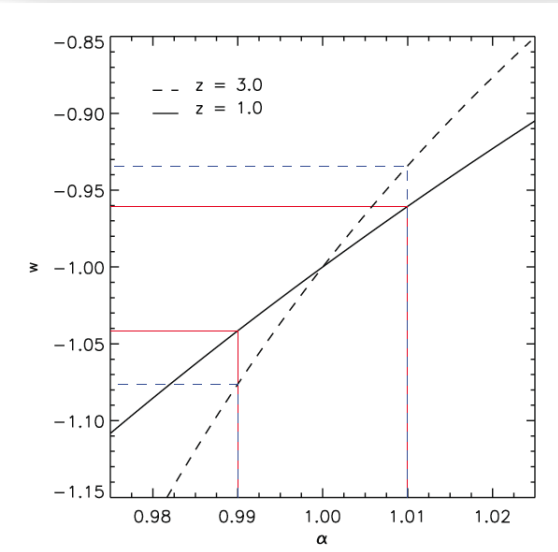
# Evolution non linéaire des « BAO » : Sonde de l'énergie noire



Un décalage des pics de l'ordre de 0.5%  
mais qui de plus semble dépendre de  $k$

*DEUS: Rasera, et al 2013*

« The detectability of BAO in future galaxy survey », R.E. Angulo, C.M. Baugh, C.S. Frenk & C.G Lacey, MNRAS, 383:755-776, 2008

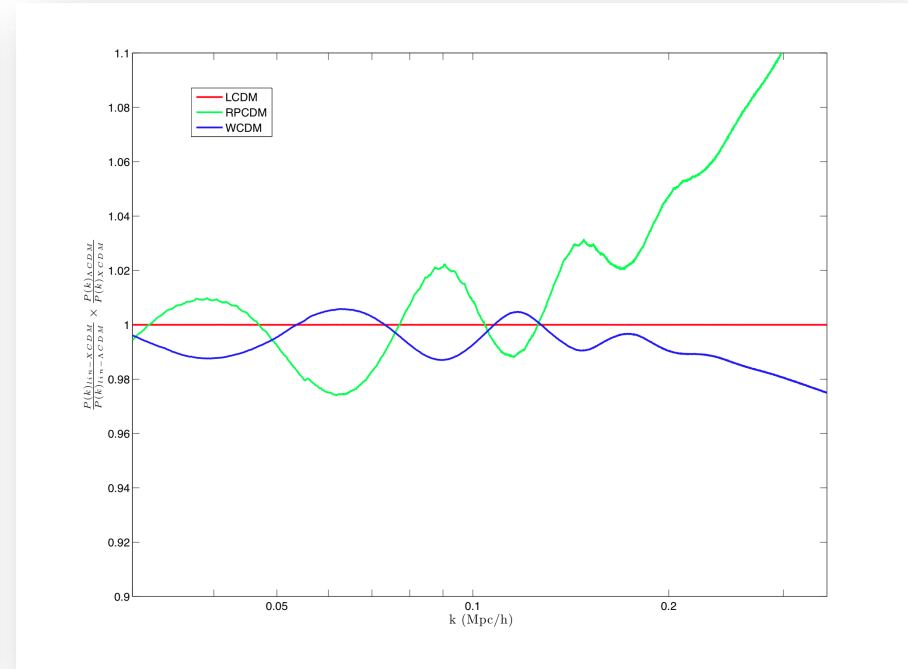
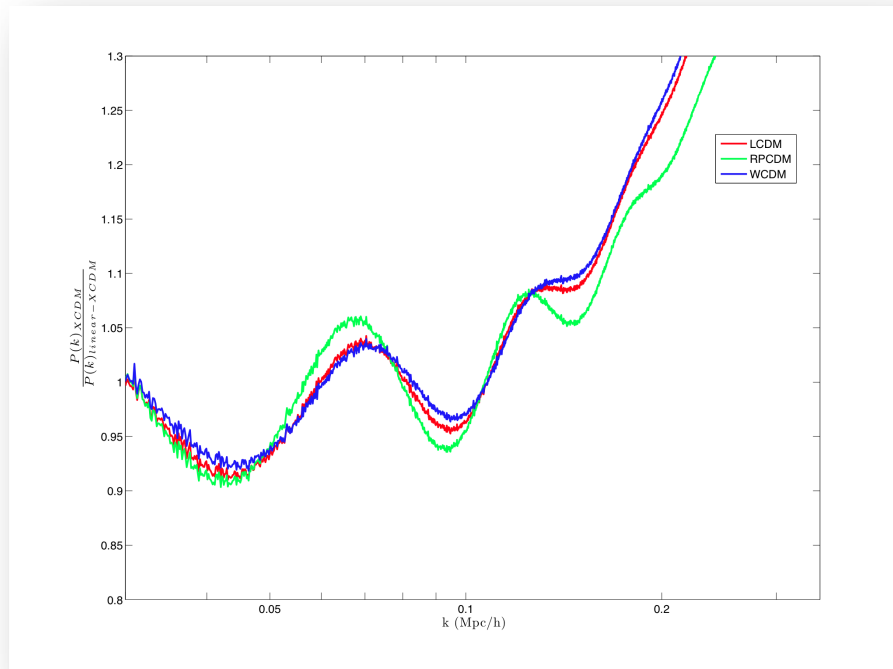


Un décalage des pics ( $\alpha$ ) (supposé constant)  
entraîne une erreur sur la mesure de distance  
et par conséquent sur le paramètre  
d'équation d'état de l'énergie noire  $w$

Une erreur de 1% entraîne une erreur de 4%  
environ sur  $w$

# Evolution on linéaire des « BAO » : Sonde de l'énergie noire

## Comparaison des BAO pour différents modèles d'énergie noire

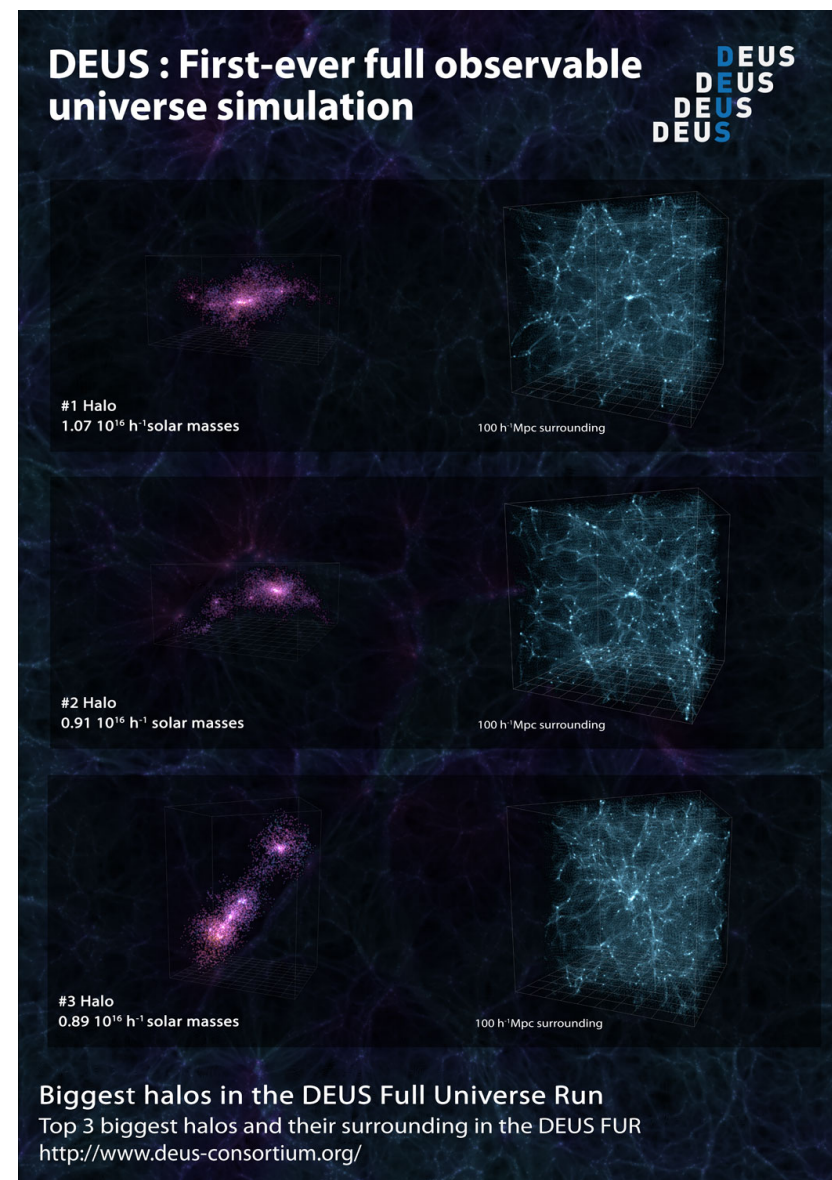
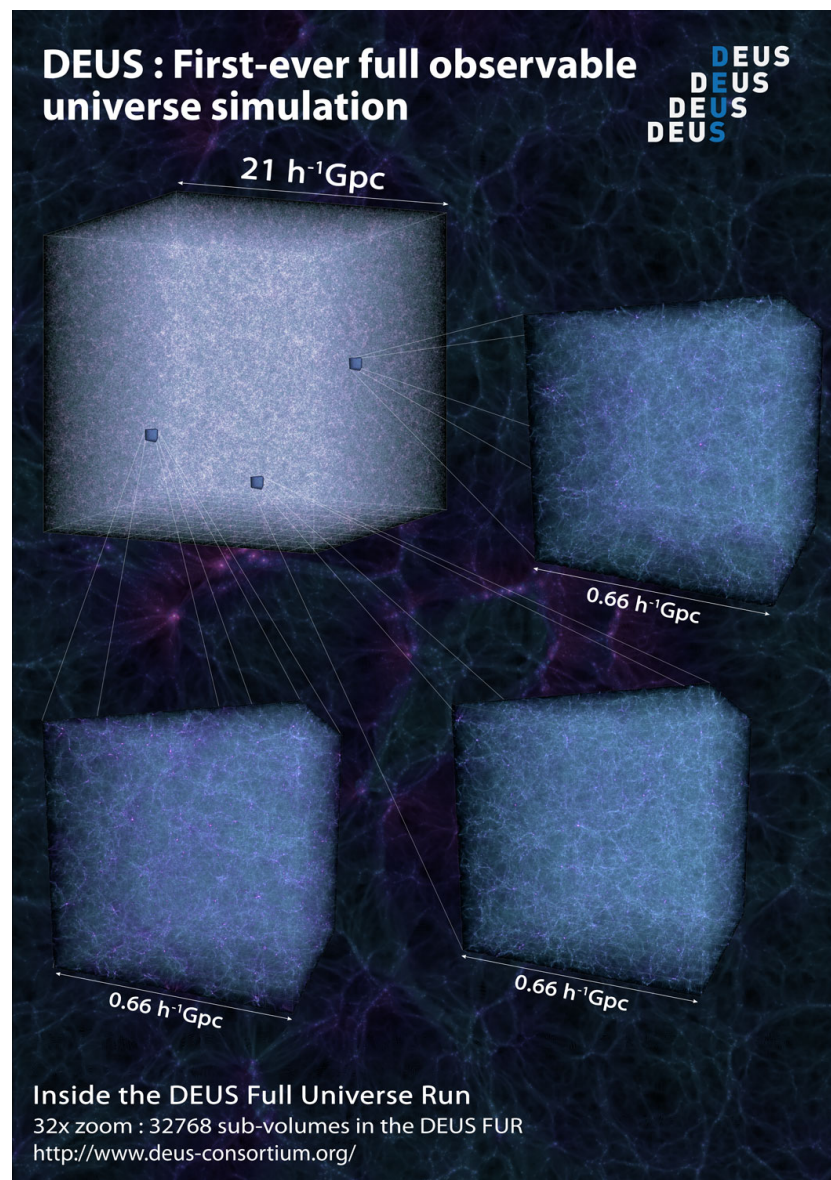


$$\frac{P_{XCDM}(k)}{P_{XCDM-linear\_no\_baryon}(k)}$$

$$\frac{P_{\Lambda CDM}(k)}{P_{XCDM}(k)} \frac{P_{XCDM-linear\_no\_baryon}(k)}{P_{\Lambda CDM-linear\_no\_baryon}(k)}$$

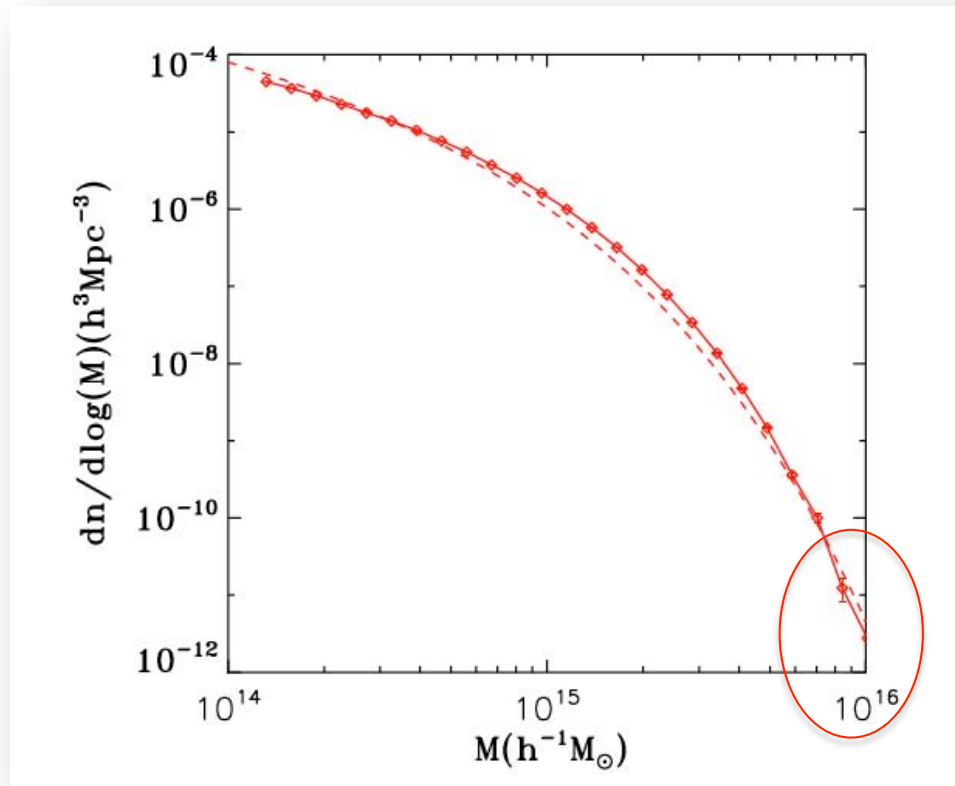
Nous comparons 3 modèles cosmologiques réalistes,  
c'est à dire indistinguables sur les données observationnelles présentes (SN, CMB...)

# DEUS Full Universe Run: Highest resolution in space and mass

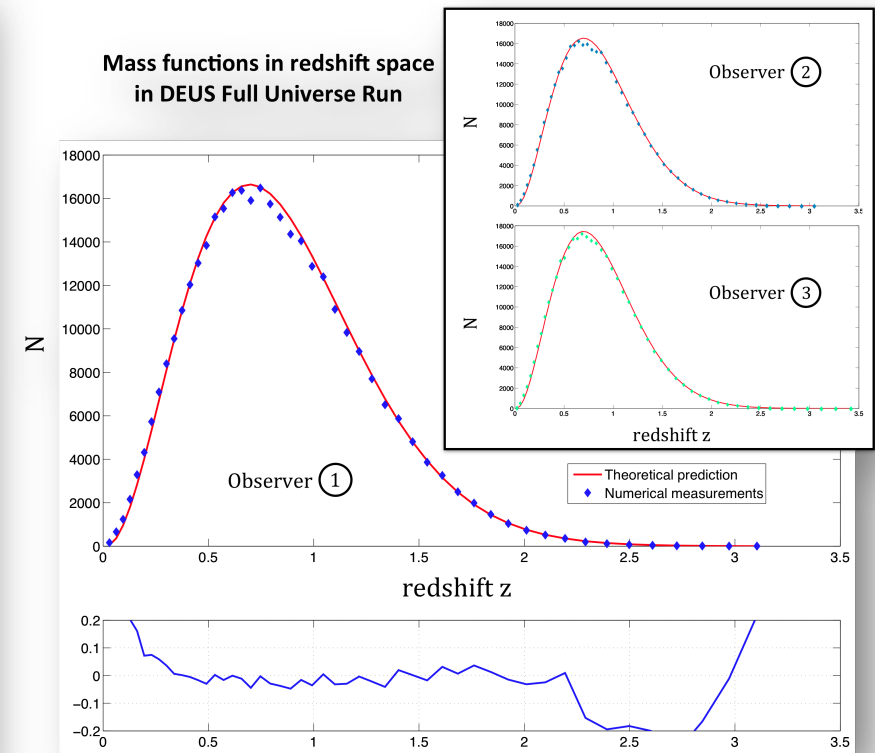


# Fonction de masse des halos dans l'espace physique et dans l'espace des « redshifts »

Dans la distribution de matière nous reconnaissons des halos



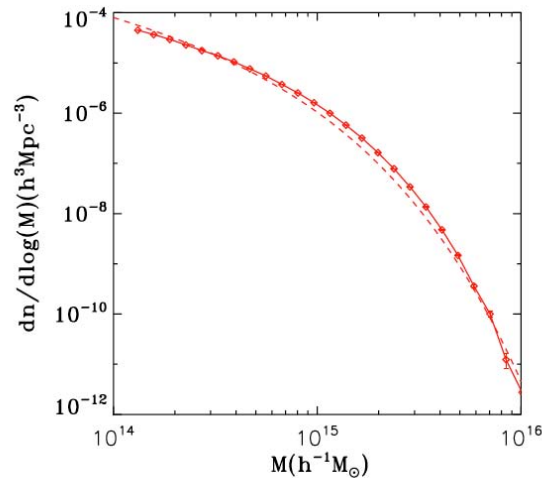
$\Lambda$ CDM  
Dans l'espace Physique



$\Lambda$ CDM  
Dans l'espace des « redshifts »  
Pour 3 différents observateurs dans l'Univers  
(5 au total)

# Fonction de masse des halos dans l'espace physique et empreinte de l'énergie noire

## Dans la distribution de matière nous reconnaissons des halos



### Fonction de multiplicité

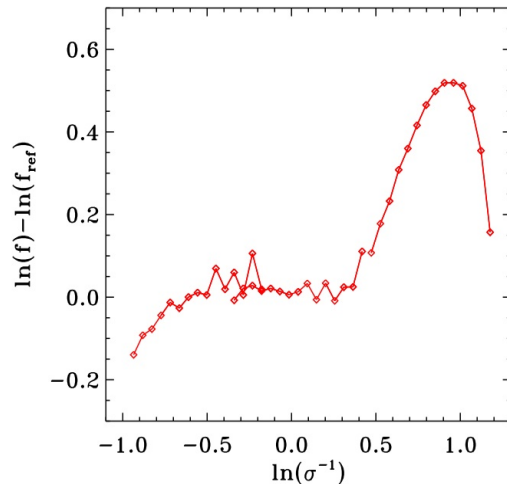
code la dynamique gravitationnelle universelle ?!

(Tinker et al 2008)

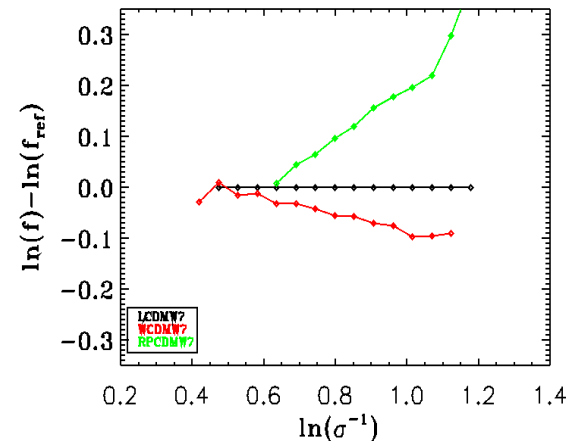
$$f(\ln(\sigma^{-1})) = F(M, z) \frac{M}{\rho_m(z)} \frac{d\text{Log}(M)}{d\ln(\sigma^{-1})}$$

$$\sigma^2(M, z) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\infty k^2 P(k) W^2(k, R(M)) dk$$

Brisure de l'Universalité (Courtin et al 2010)



Signature cosmologique (DEUS Corasaniti et al 2013)



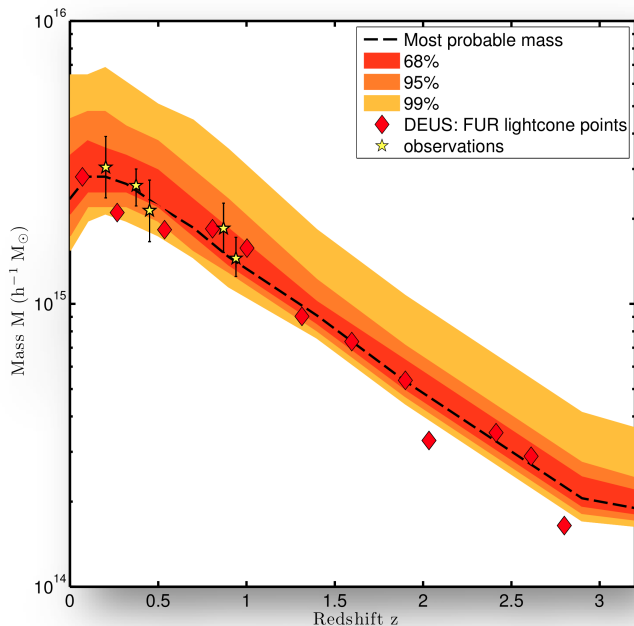
Nous comparons 3 modèles cosmologiques réalistes, c'est à dire indistinguables sur les données observationnelles présentes (SN, CMB...)



# Evènements rares aux valeurs extrêmes, les amas de plus grandes masses

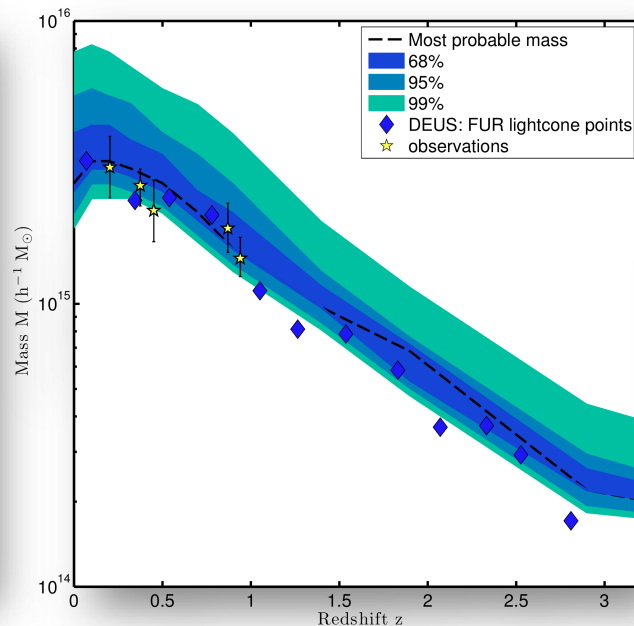
La distribution (pdf) du halo le plus massif à un « redshift » donné dans une cosmologie donnée

Seulement accessible dans une simulation de Tout l'Univers



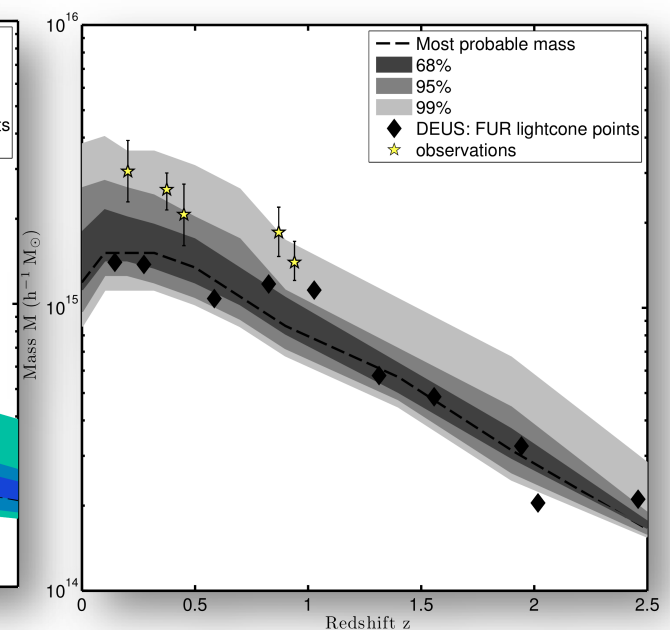
$\Lambda$ CDM

Constante Cosmologique



WCDM

Modèle fantôme



RPCDM !!!

Modèle de quintessence

*DEUS: Alimi, et al 2013*

Réelles difficultés pour RPCDM (interprétation microscopique)

# Evènements rares aux valeurs extrêmes, la vitesses des paires: Applications au Bullet Cluster



$$M_1 = 10^{14} h^{-1} M_S, M_2 = 10^{15} h^{-1} M_S$$

$$Z = 0.296$$

$$V_{\text{front de choc}} \sim 4700 \text{ km/s}$$

Mastropietro & Burkert 2008  
CI à un tel événement

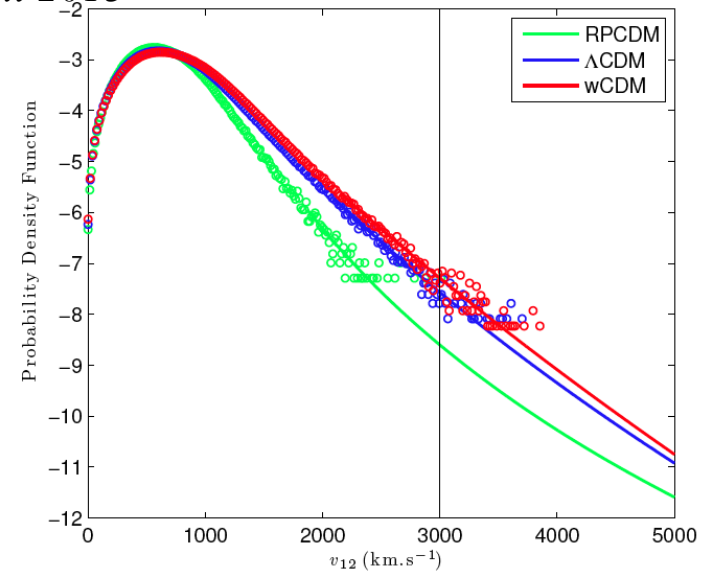
$$M_1 = 10^{14} h^{-1} M_S, M_2 = 10^{15} h^{-1} M_S$$

$$z = 0.489 (0.5)$$

$$d_{12} \sim 5 h^{-1} \text{ Mpc}$$

$$v_{12} \sim 3000 \text{ km/s}$$

*Bouillot et Alimi 2013*



**Figure 11.** Pairwise velocity distribution (separation  $d_{12} < 10 h^{-1} \text{ Mpc}$ ) for halo pairs with masses above  $10^{14} h^{-1} M_{\odot}$  in  $\Lambda\text{CDM}$  model (blue),  $w\text{CDM}$  scenario (red) and Ratra-Peebles quintessence (green) at a redshift of  $z = 0.5$ . The colored circles represent  $v_{12}$  PDF data whereas lines correspond to the generalized Pareto distribution fit on the data with a threshold indicated by the start of the curve. The accurate modeling of the tail of the distribution leads to higher probability of producing a halo pair matching the assumed initial conditions of the Bullet Cluster than the gaussian expectation.

$$P_{\text{LCDM}} = 6.4 \cdot 10^{-6}$$

Sous estimé par 2 ordres de grandeurs par Thompson & Nagamine 2012

$$P_{\text{wCDM}} = 1.7 \cdot 10^{-5} \quad P_{\text{RPCDM}} = 9.7 \cdot 10^{-8}$$

**Nouvelles difficultés pour RPCDM (interprétation microscopique)**

# Conclusion Scientifique.

---

## DEUS FUR

- **Premières Simulations de TOUT l'Univers Observable avec énergie noire au delà de  $\Lambda$ CDM.**
  - **Tout l'Univers Observable donne accès à la mesure des BAO avec une erreur statistique minimale. Le suivi dynamique des simulations DEUS permet sur l'échelle des BAO une erreur inférieure au 1%.**
  - **Simulation référence pour tester les effets non-linéaires sur les BAO,**
  - **Possibilité de discriminer entre les modèles.**
  
  - **Nombreux autres effets à tester: la distortion dans l'espace des redshifts**
  - **Autres mesures de BAO par exemple à partir des amas de galaxies.**
  
  - **Accès aux événements rares aux valeurs extrêmes:**
    - **Halos (Amas) le plus massif,**
    - **Vitesse de paires (Bullet Cluster)**
- Difficultés pour un modèle avec  $-1 < w < -1/3$  (RP, interprétation microscopique)**  
**Semble favoriser un modèle avec  $w \leq -1$  ( $w < -1$  modification de la gravité)**

**Nombreuses autres analyses scientifiques sont possibles.**

---

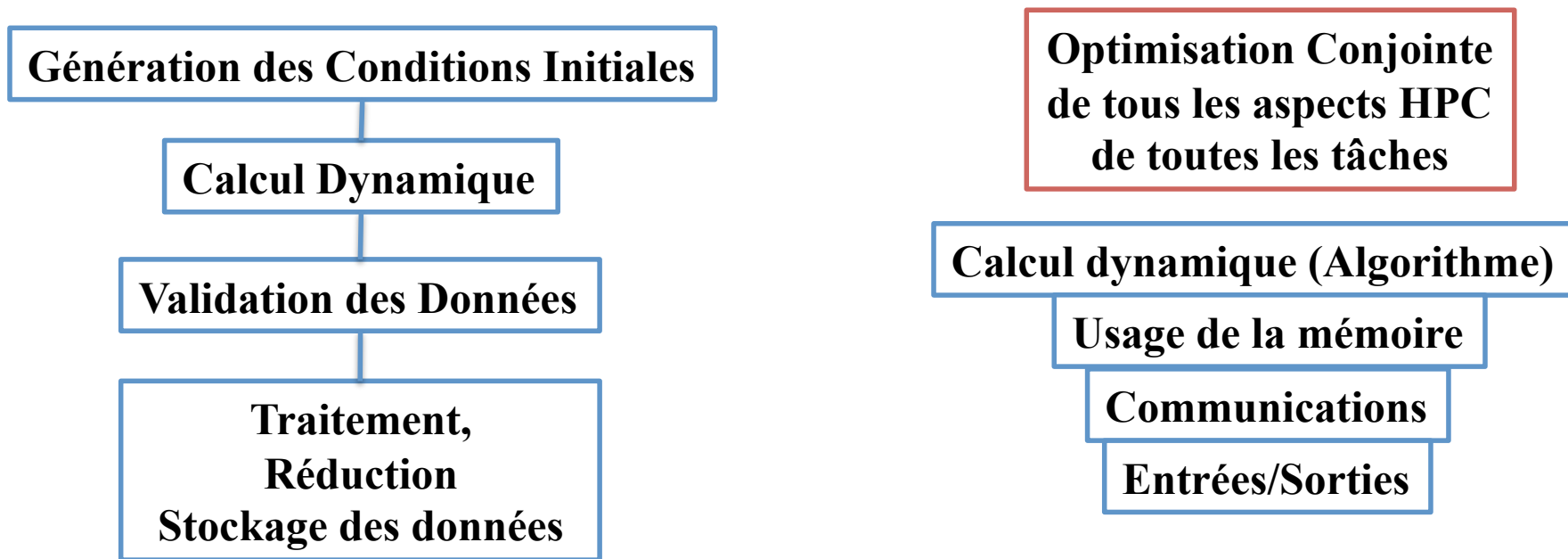
# Au-delà de la Cosmologie Numérique. Quelles leçons pour le HPC ?

---

## La réalisation du projet DEUS:

**Cosmologie, Astrophysique mais également Science du Climat, Dynamique des Fluides, Physique des Plasmas ... (Dynamique, grand volume de données...)**

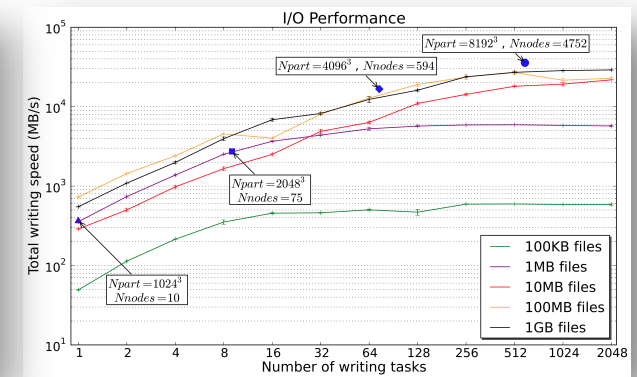
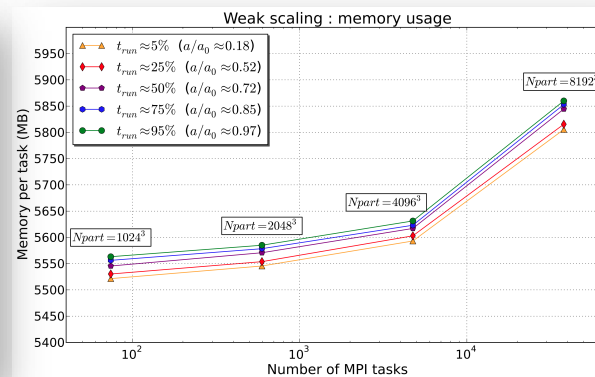
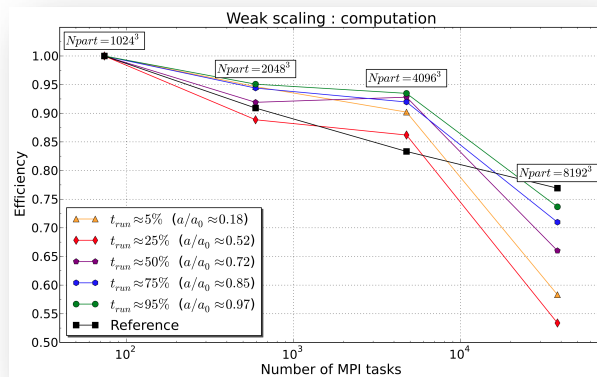
**Absolute nécessité: Développement d'une application globale (chaque élément de la simulation ne peut plus être pensé séparément) capable de traiter tous les aspects de la simulation - Saturation des ressources**



# Au-delà de la Cosmologie Numérique. Quelles leçons pour le HPC ?

## Application globale:

« Scalabilité » efficace pour tous les aspects d'optimisation jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de cœurs (supercalculateur, Curie (77184))



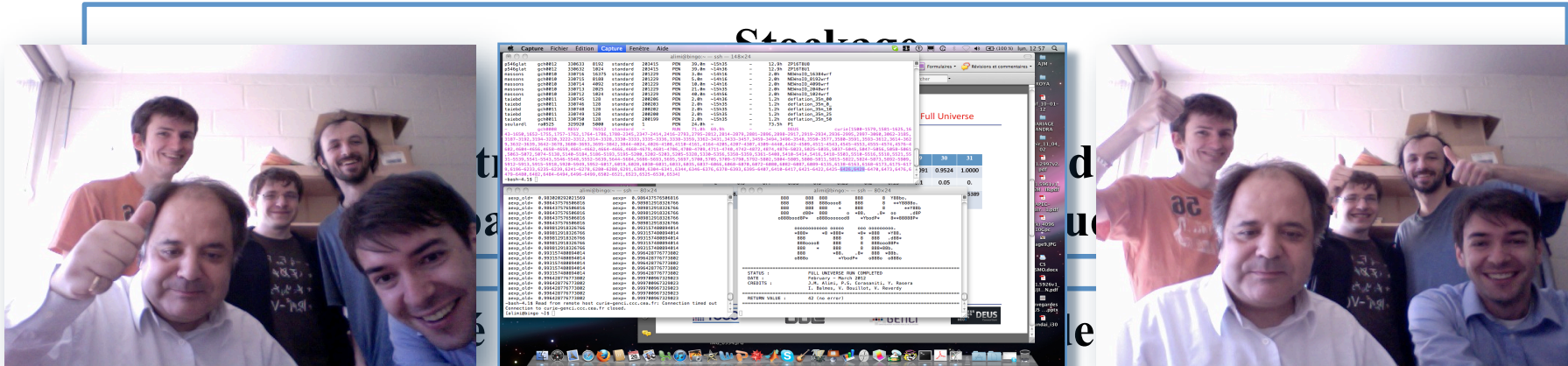
## Aspect général / Aspect spécifique au supercalculateur utilisé des procédés d'optimisation

Procédés originaux  
de traitement d'entrée sorties  
(systèmes de tickets dynamiques):  
« benchmark » des systèmes de  
disques

Procédés originaux de  
communications locales et globales:  
« benchmark » des systèmes de  
communications

# Au-delà de la Cosmologie Numérique. Quelles leçons pour le HPC ?

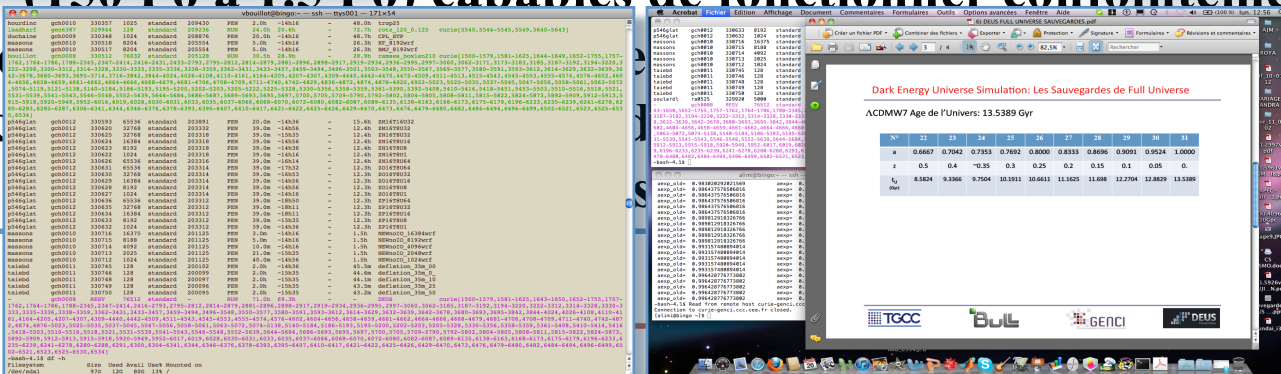
## DEUS illustre le problème critique du Big Data:



(150 Po à 1.5 Po) capables de fonctionner conjointement (le plus

fic

générant des pas débord

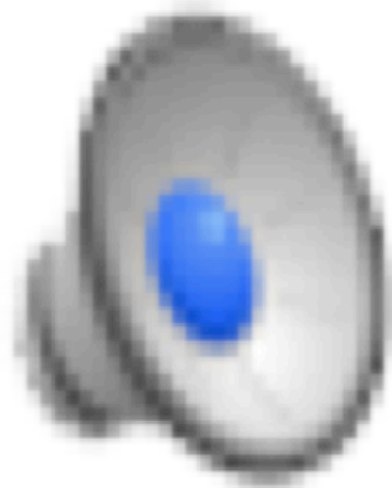


Formidable aventure humaine

P.-S. Corasaniti, Y. Rasera, V. Bouillot, V. Reverdy, I. Balmes, S. Requena (GENCI), X. Delaruelle, J.N. Richet (TGCC)...

# Nature de l'énergie noire et structuration de l'Univers

**Je vous remercie de votre attention.**



**Distribution de matière tri-dimensionnelle de maintenant à la surface de dernière diffusion (première image de l'Univers)**