

ASTROPHYSIQUE

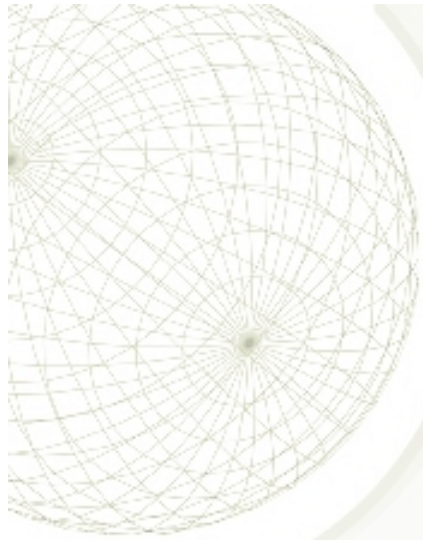
19 – LA FORMATION DES STRUCTURES



Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA





STRUCTURES

HOMOGÉNÉITÉ \Leftrightarrow INHOMOGÉNÉITÉ

- En première approximation, l'univers est homogène et isotrope
c'est le point de départ de la théorie du big bang
- Mais ce n'est évidemment pas vrai à petite échelle : il existe des étoiles, des galaxies, des amas de galaxies et beaucoup de vide(s)
- Deux questions se posent donc :
 - quelle est l'amplitude des fluctuations de densité dans l'univers actuel ?
 - sont-elles indépendantes ou existe-t-il des corrélations entre elles ?
- Il faut **inventorier** la taille et la répartition des structures dans l'univers avant de **comprendre** comment elles se sont formées

⇒ sondages 3D

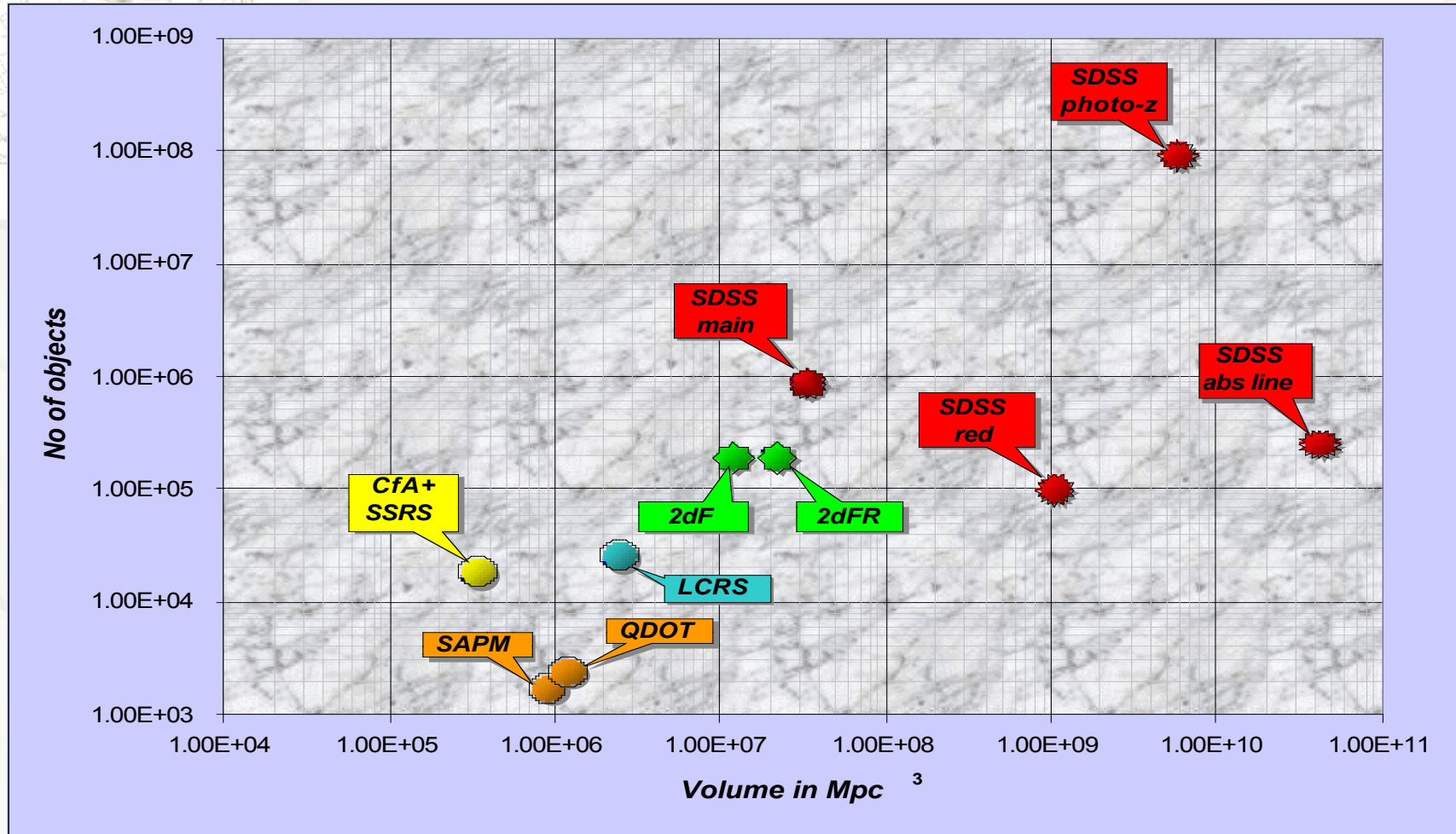


L'ORIGINE DES STRUCTURES

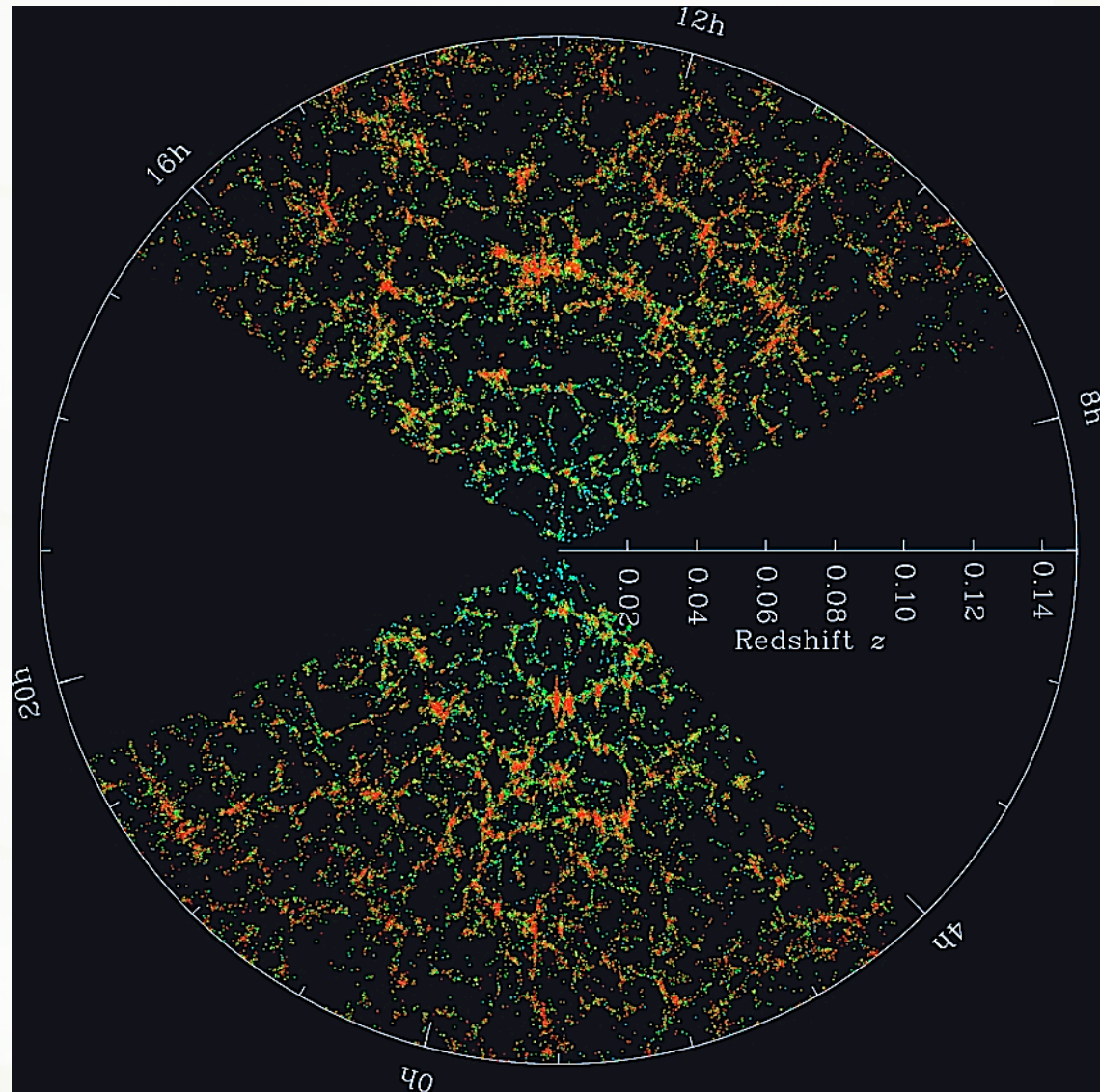
- Problème central en cosmologie dont la solution dépend
 - des processus d'organisation de la matière en galaxies et amas de galaxies (les « grandes » structures)
 - *instabilité gravitationnelle, hydrodynamique...*
 - de l'existence et de la nature de la matière noire
 - *neutrinos, wimps, axions...*
 - de ce qui s'est passé juste après le big bang
 - *inflation, défauts topologiques...*
 - des paramètres cosmologiques fondamentaux
- Problème physique bien posé car
 - les conditions initiales sont **plus ou moins** connues par ailleurs (CMB + théorie du big bang)
 - *fluctuations gaussiennes et spectre de puissance invariant d'échelle*
 - les mécanismes physiques pertinents sont bien connus
 - *gravitation*
 - *dynamique des gaz*
 - *processus radiatifs*

CARTES « 3D »

- Travail de longue haleine !

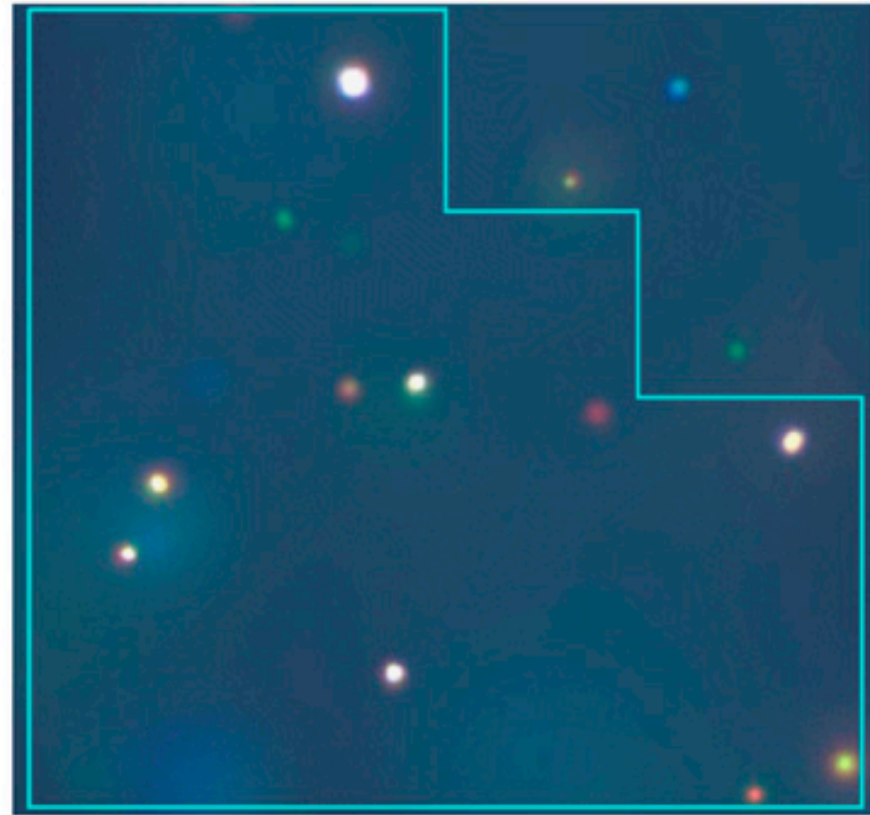
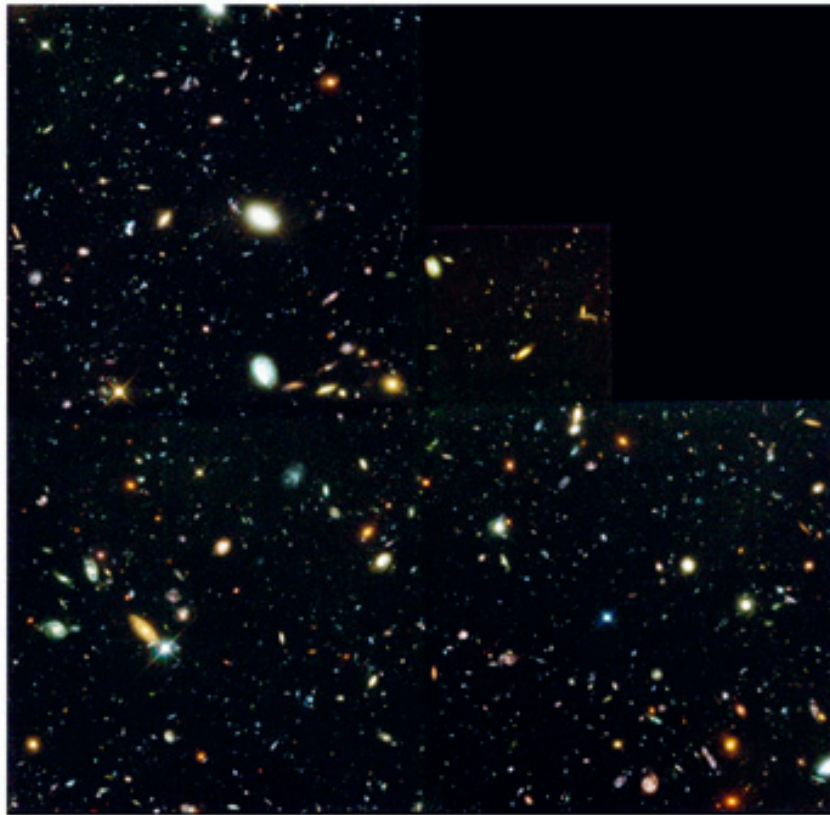


SLOAN DIGITAL SKY SURVEY



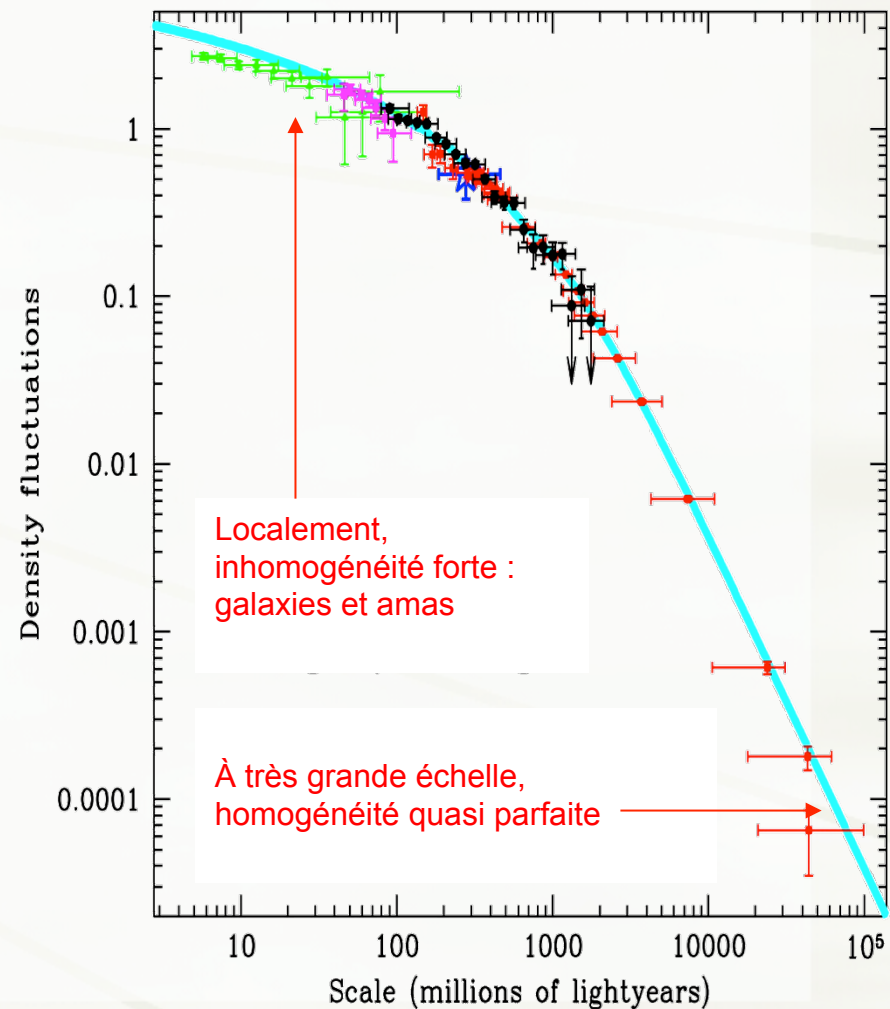
SONDAGES PROFONDS

- Il est aussi possible de n'observer qu'une surface réduite du ciel, mais d'aller très profondément (*pencil beam survey*) → **évolution**
 - Hubble Deep Field et Hubble Ultra Deep Field ($0.5 < z < 5.3$)
 - Chandra Deep Field (en rayons X)



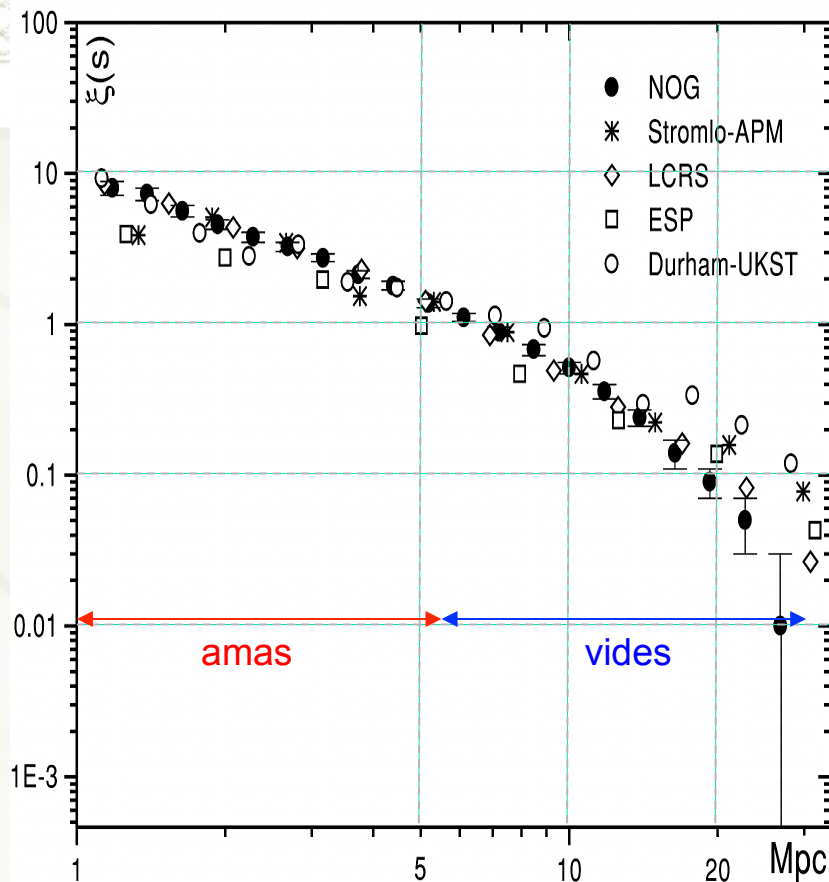
RÉSULTATS DES SONDAGES

- Les galaxies ne sont pas distribuées uniformément
 - structures de plusieurs dizaines de Mpc (murs, filaments...)
 - vides de 50 Mpc à 70 Mpc de diamètre
 - *mais* contrastes de densité **minimes** (la densité moyenne d'un amas n'est que 2 à 3 fois plus dense que la densité moyenne de l'univers)
- Reste à quantifier cette description
 - ⇒ contraste de densité
 - ⇒ fonction de corrélation des galaxies
 - ⇒ spectre de puissance
- Et à expliquer l'origine de ces structures...

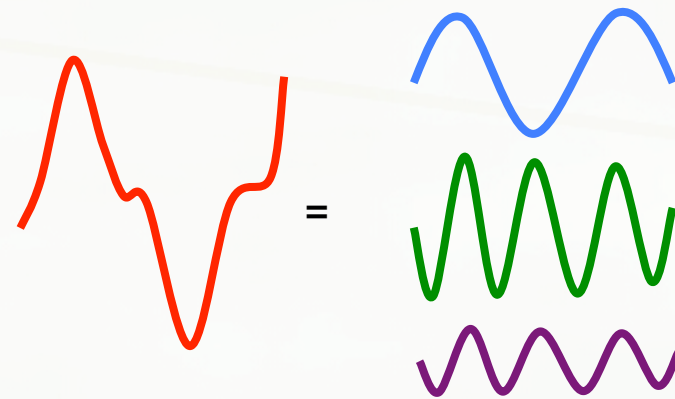


FONCTION DE CORRÉLATION ET SPECTRE DE PUISSANCE

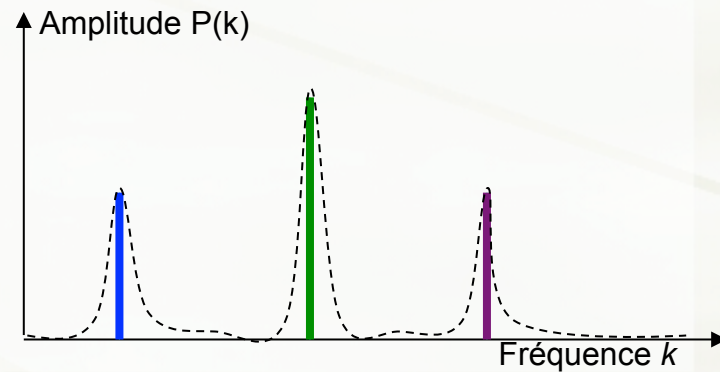
- Fonction de corrélation $\xi(s)$
 - Augmentation de la probabilité de trouver une galaxie à distance s d'une autre % distribution aléatoire



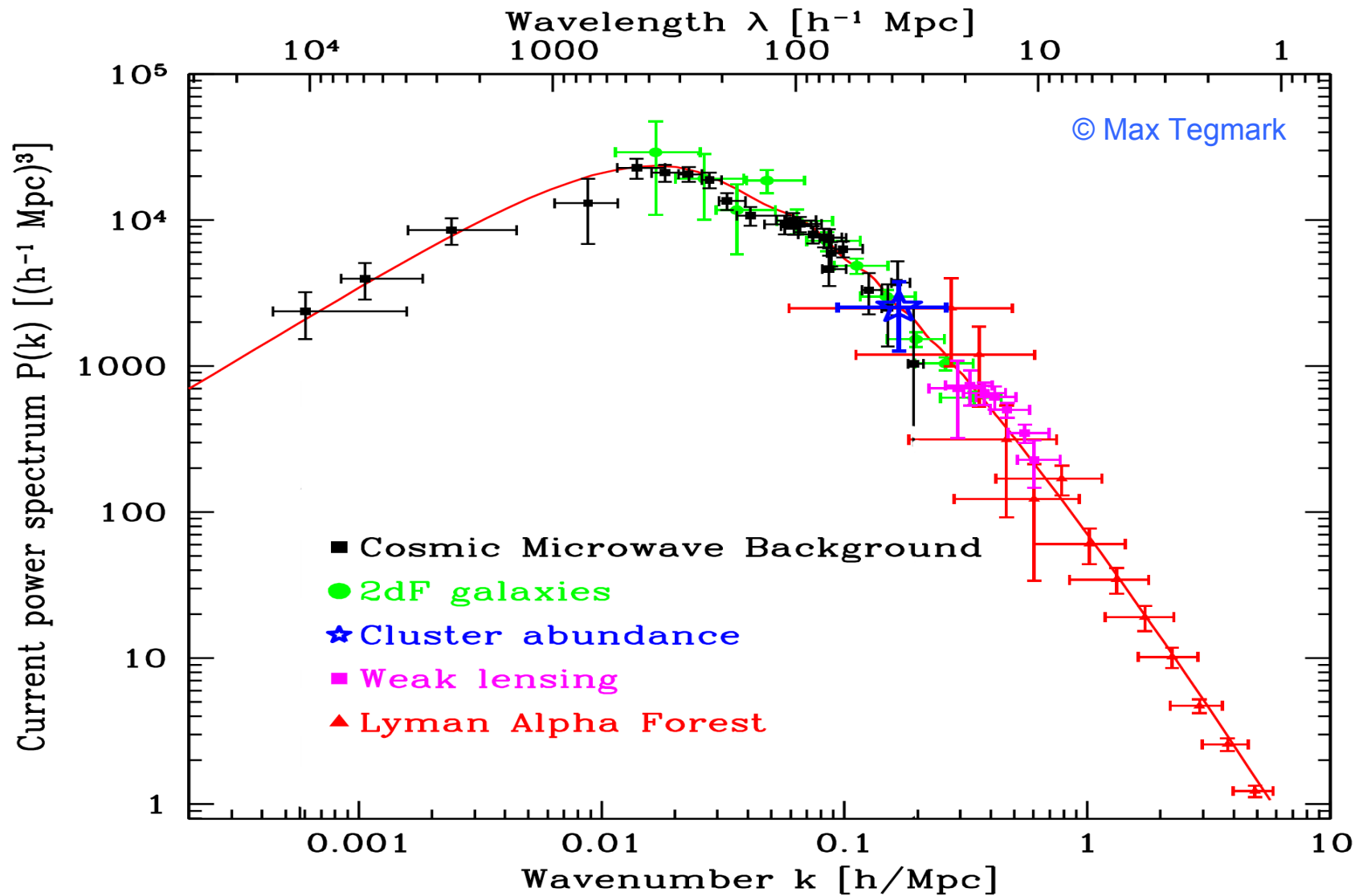
- Spectre de puissance $P(k)$
 - Transformée de Fourier de la distribution de matière

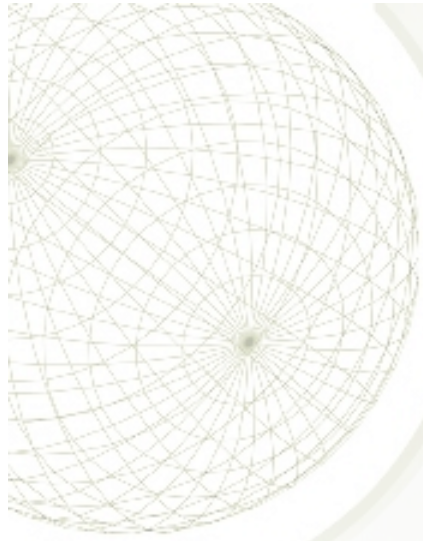


- \Rightarrow spectre



SPECTRE DE PUISSANCE *OBSERVÉ* ➔ À EXPLIQUER !

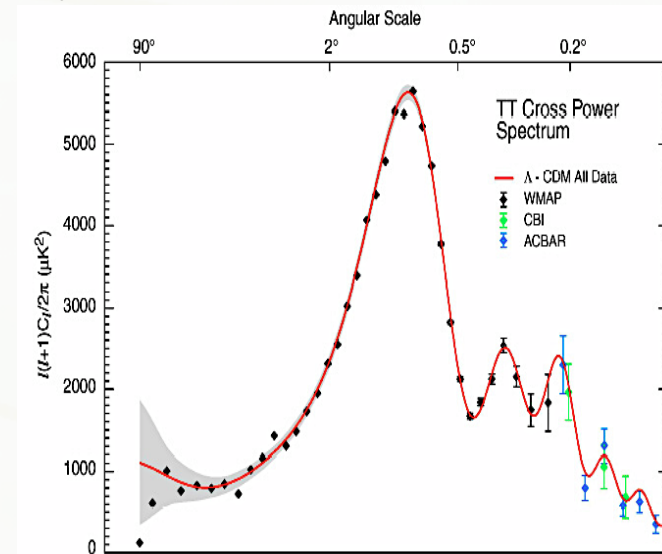
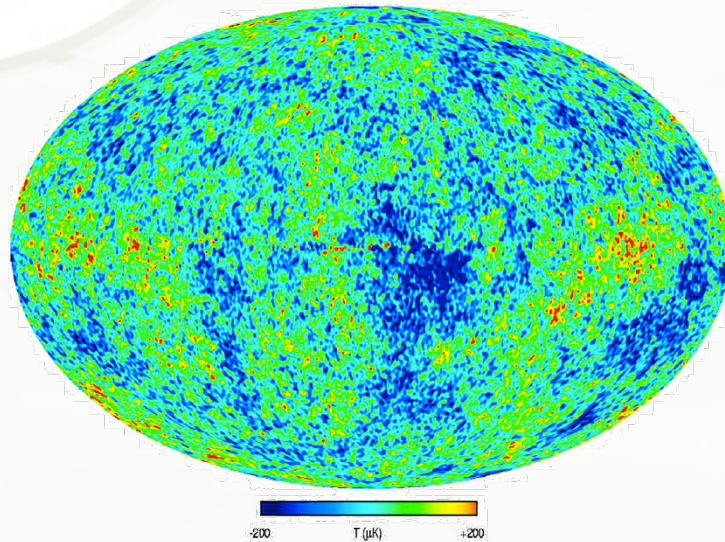




FORMATION DES STRUCTURES

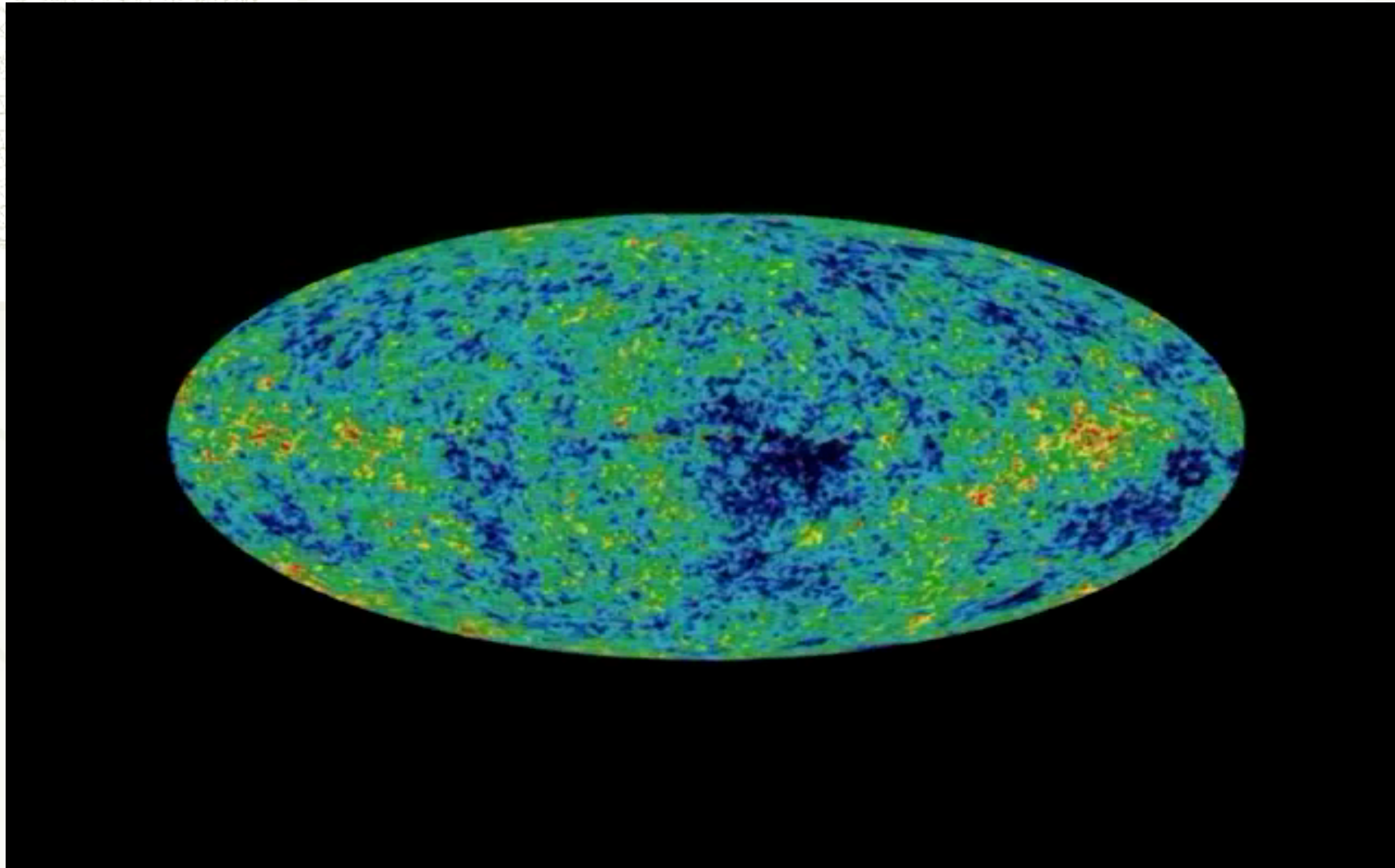
FLUCTUATIONS DE DENSITÉ

- La plus ancienne image de l'univers – le CMB à $z \sim 1100$ – montre des fluctuations de température
 - $\delta T/T < 10^{-4}$
 - de toutes les tailles angulaires (\Leftrightarrow toutes les tailles physiques)
 - mais certaines tailles sont plus fréquentes



- Corrélation densité \Leftrightarrow pression \Leftrightarrow température dans le plasma \Rightarrow fluctuations de densité $\delta\rho/\rho < 10^{-4}$ à $z = 1100$
- Croissance de ces fluctuations par instabilité gravitationnelle $\Rightarrow \delta\rho/\rho > 1$ à $z = 0$

NAISSANCE DES STRUCTURES



EVOLUTION DES FLUCTUATIONS DE DENSITÉ

- Les fluctuations de densité sont modifiées par

- l'instabilité gravitationnelle → croissance
- la pression de rayonnement → masse de Jeans
- la dissipation par rayonnement → masse de Silk

- Ces échelles changent au cours du temps

- la distance sur laquelle peuvent se faire des transferts de matière (horizon du son) augmente
- la vitesse de ces transferts (vitesse du son) chute quand la matière domine le rayonnement
- la pression de rayonnement disparaît à la recombinaison

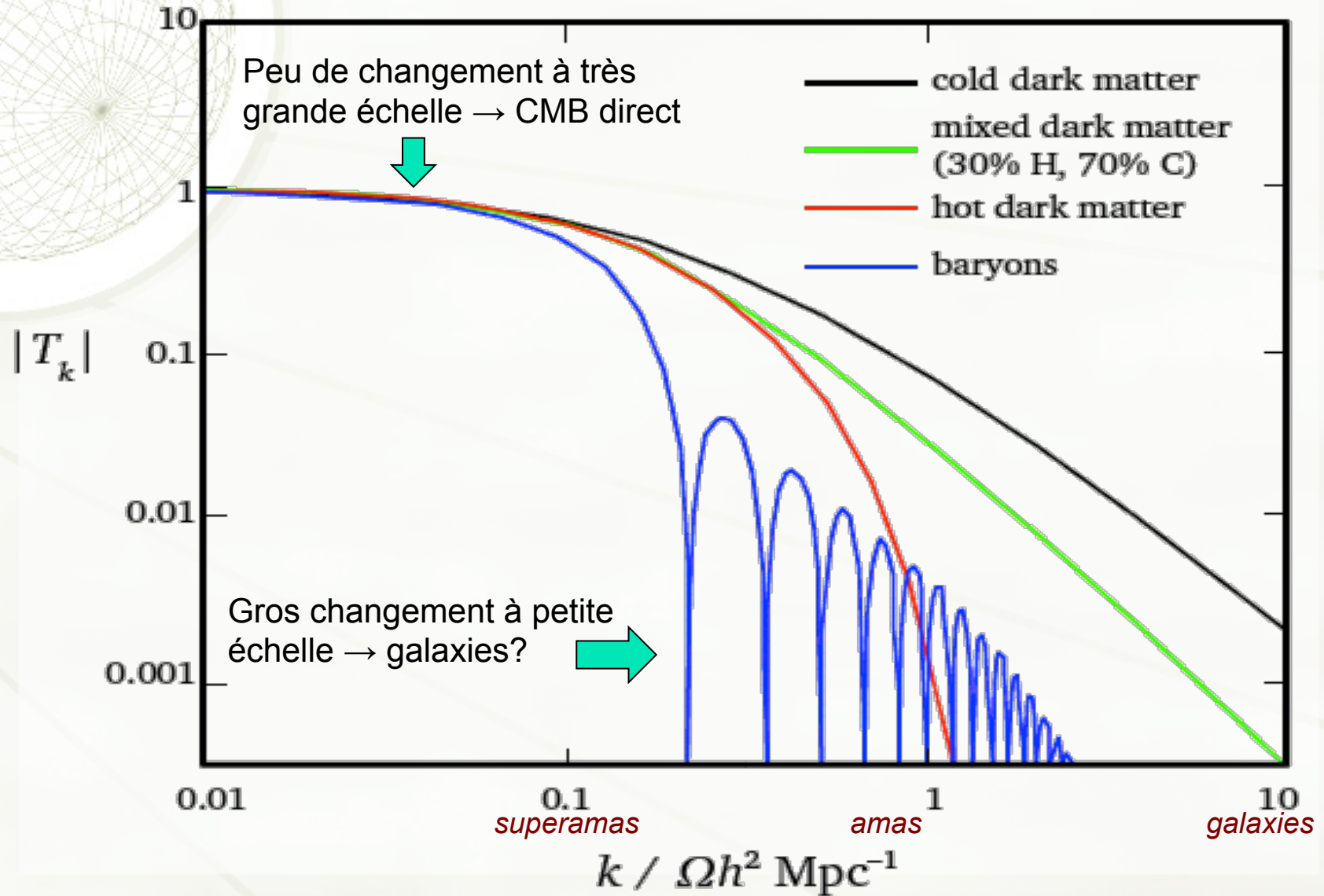
$$P(k,t) = P_0(k) D(t) T(k)$$

Amplitude initiale

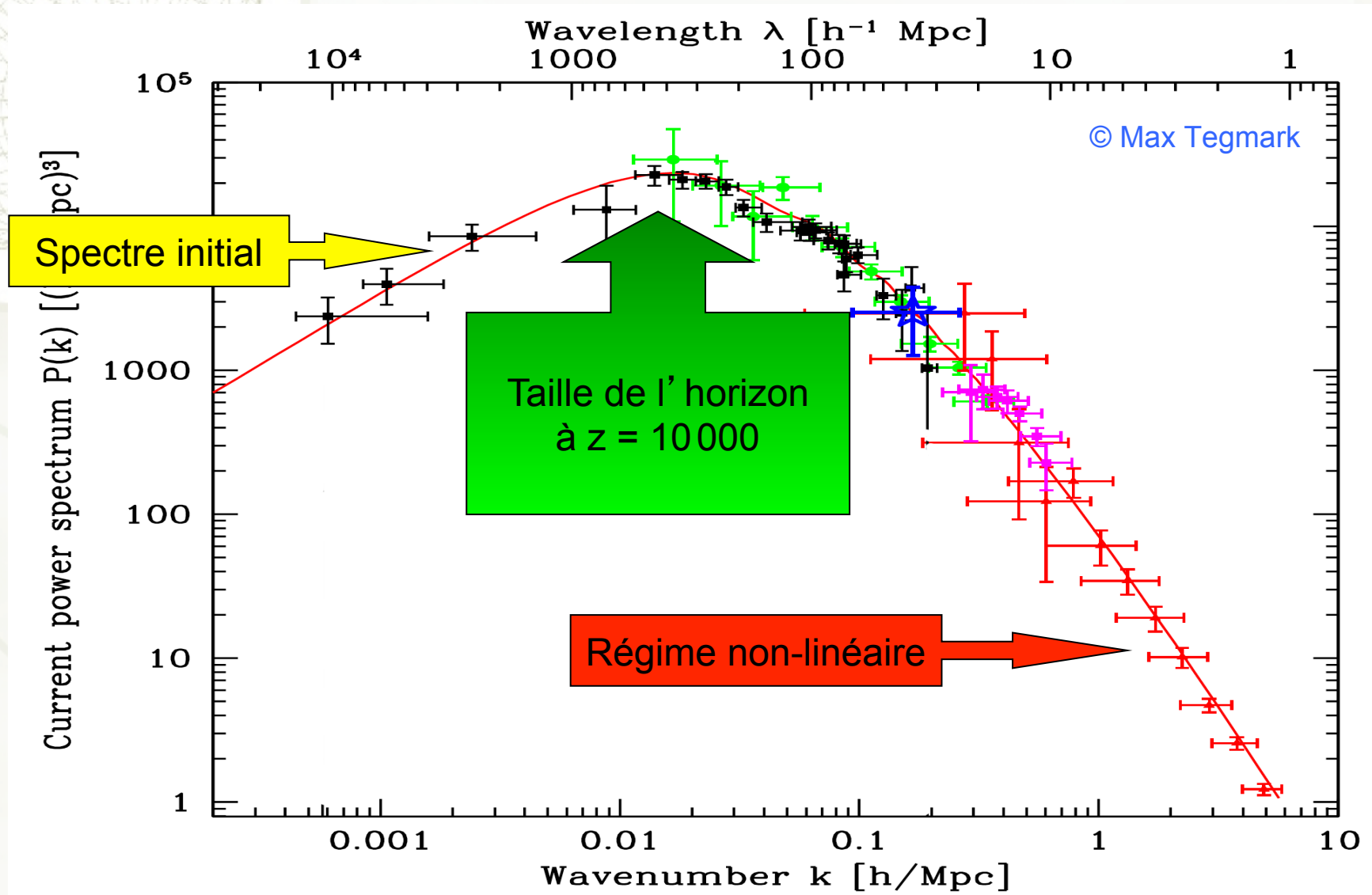
Amplification gravitationnelle

Atténuation

AMORTISSEMENT : FONCTION DE TRANSFERT T(k)

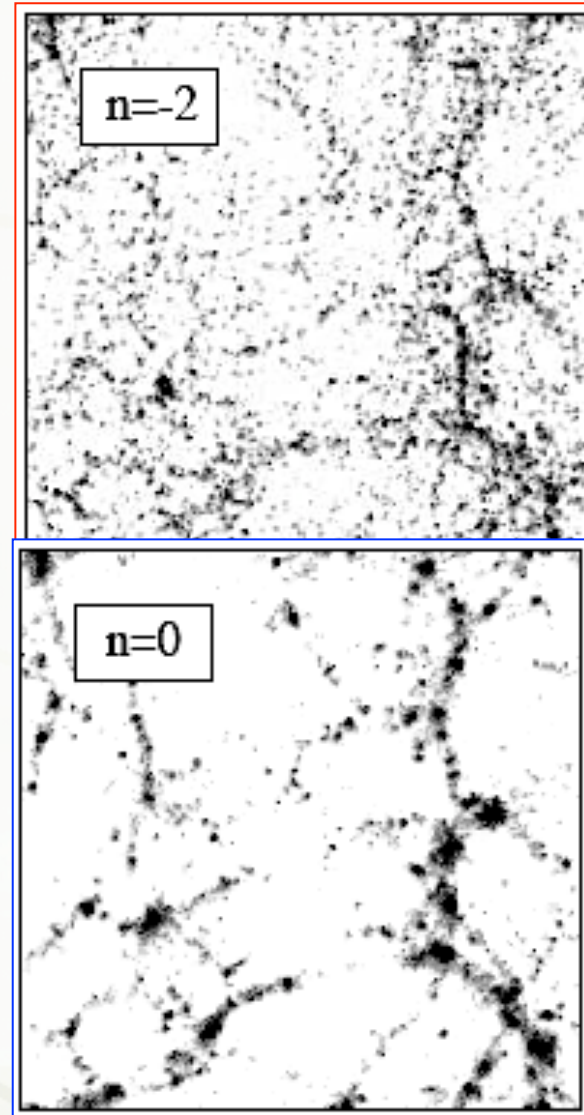
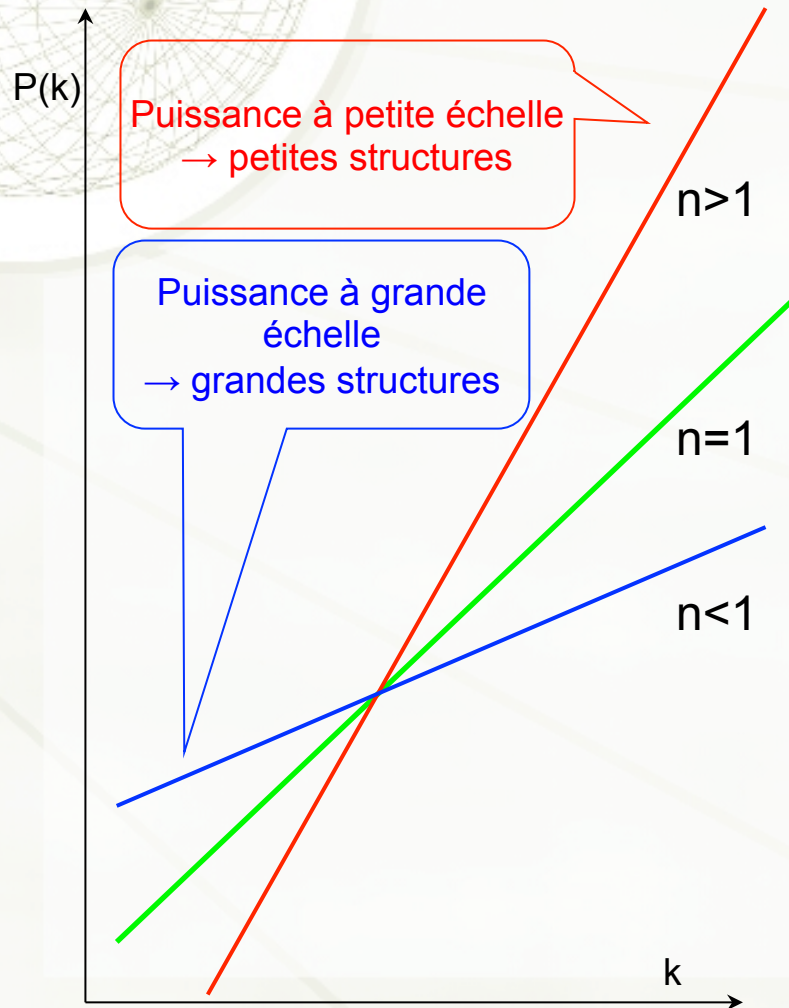


SPECTRE DE PUISSANCE ACTUEL



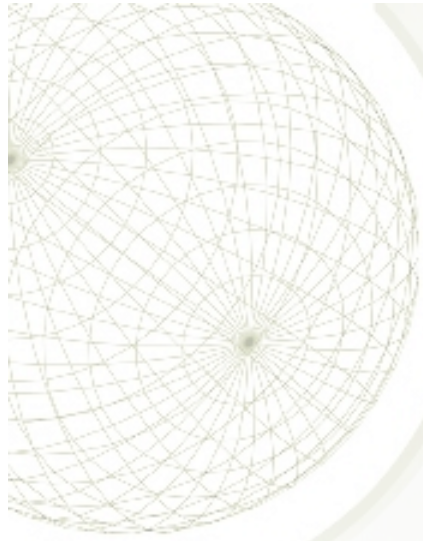
⇒ SPECTRE PRIMORDIAL LINÉAIRE $P(k) \propto k$

- Pas d'échelle privilégiée : $P(k) = A k^n$



MÉDITONS SUR LES MYSTÈRES DE L'UNIVERS...





STRUCTURES ET MATIÈRE NOIRE

L'ÉVOLUTION DES FLUCTUATIONS (EN TRÈS BREF)

- Univers homogène et isotrope en première approximation
métrique de Robertson-Walker
- Fluctuations faibles de la densité, de la courbure, de la métrique
métrique de Robertson-Walker perturbée
évolution quasi-newtonienne pour des fluctuations de densité
 - ◆ $\delta\rho/\rho \ll 1$
 - ◆ et de taille *inférieure* à l' « horizon » $\propto c t$
- \Rightarrow instabilité gravitationnelle
 1. **exponentielle** dans un univers statique
 2. **linéaire** dans un univers en expansion dominé par la matière : $\delta\rho/\rho \propto a = 1/(1+z)$
 3. **figée** quand le rayonnement domine ($t < t_{\text{eq}} \sim 400\,000$ ans, $z_{\text{eq}} \sim 10^4$)
- La pression (de rayonnement) empêche l'effondrement pour des tailles **inférieures** à une taille critique, la longueur de Jeans \Leftrightarrow masse critique, la masse de Jeans

CROISSANCE DES FLUCTUATIONS

Fluctuations primordiales $\delta\rho/\rho \sim 10^{-4}$
rayonnement + matière
(noire et baryonique)

Domination du rayonnement
 $\rho \propto T^4 \propto 1/a^4 \propto (1+z)^4$

Fluctuations « gelées »

$z \sim 10\,000$

Domination de la matière
 $\rho \propto 1/a^3 \propto (1+z)^3$

Découplage matière rayonnement $z \sim 1\,100$

Croissance *linéaire*
des fluctuations

$z \sim 0,5$

Domination de la
cte cosmologique

Matière noire

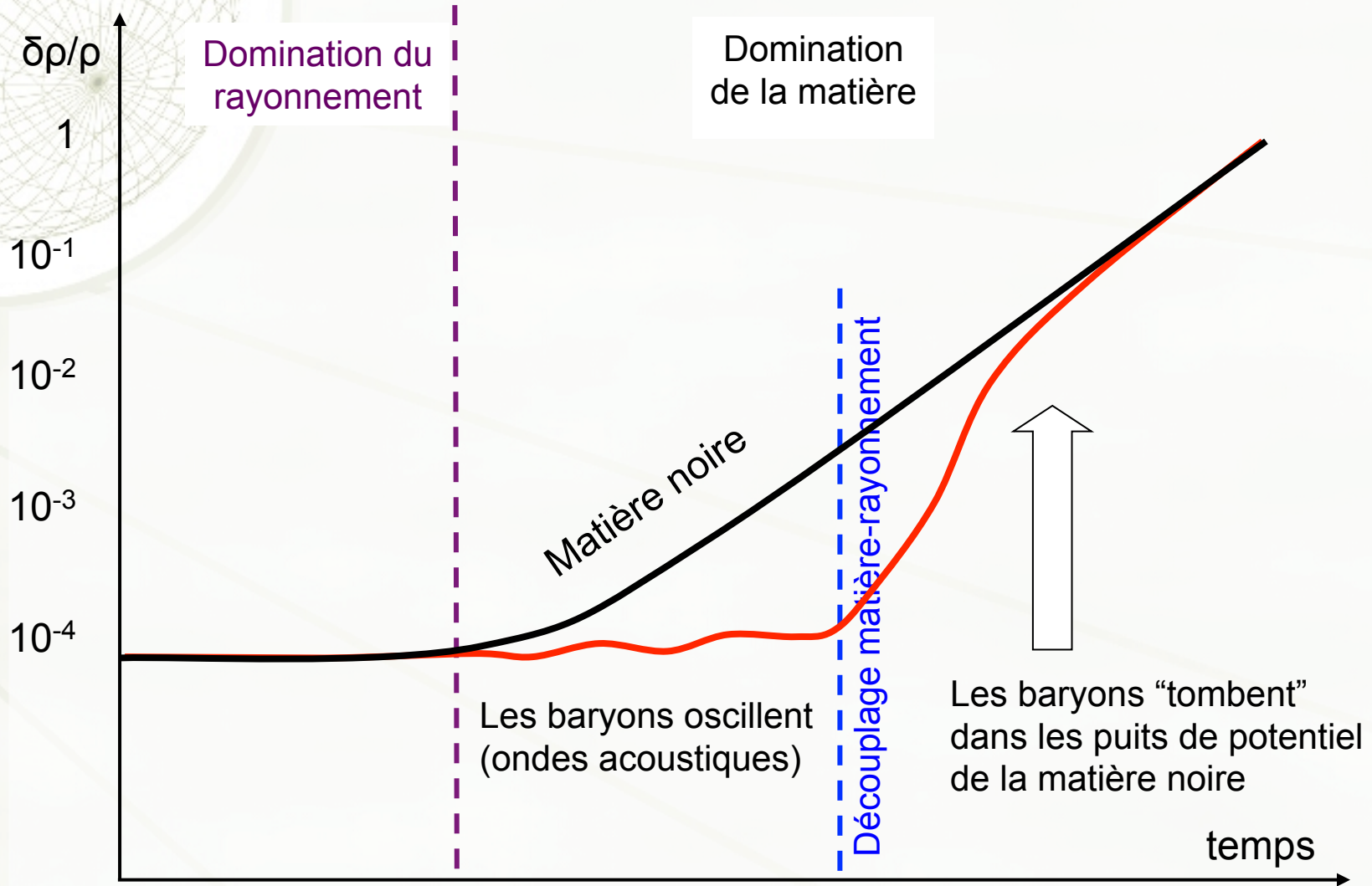
Matière baryonique

$\Rightarrow \delta\rho/\rho \nearrow$ facteur 1100

$\Rightarrow \delta\rho/\rho \sim 0,1$

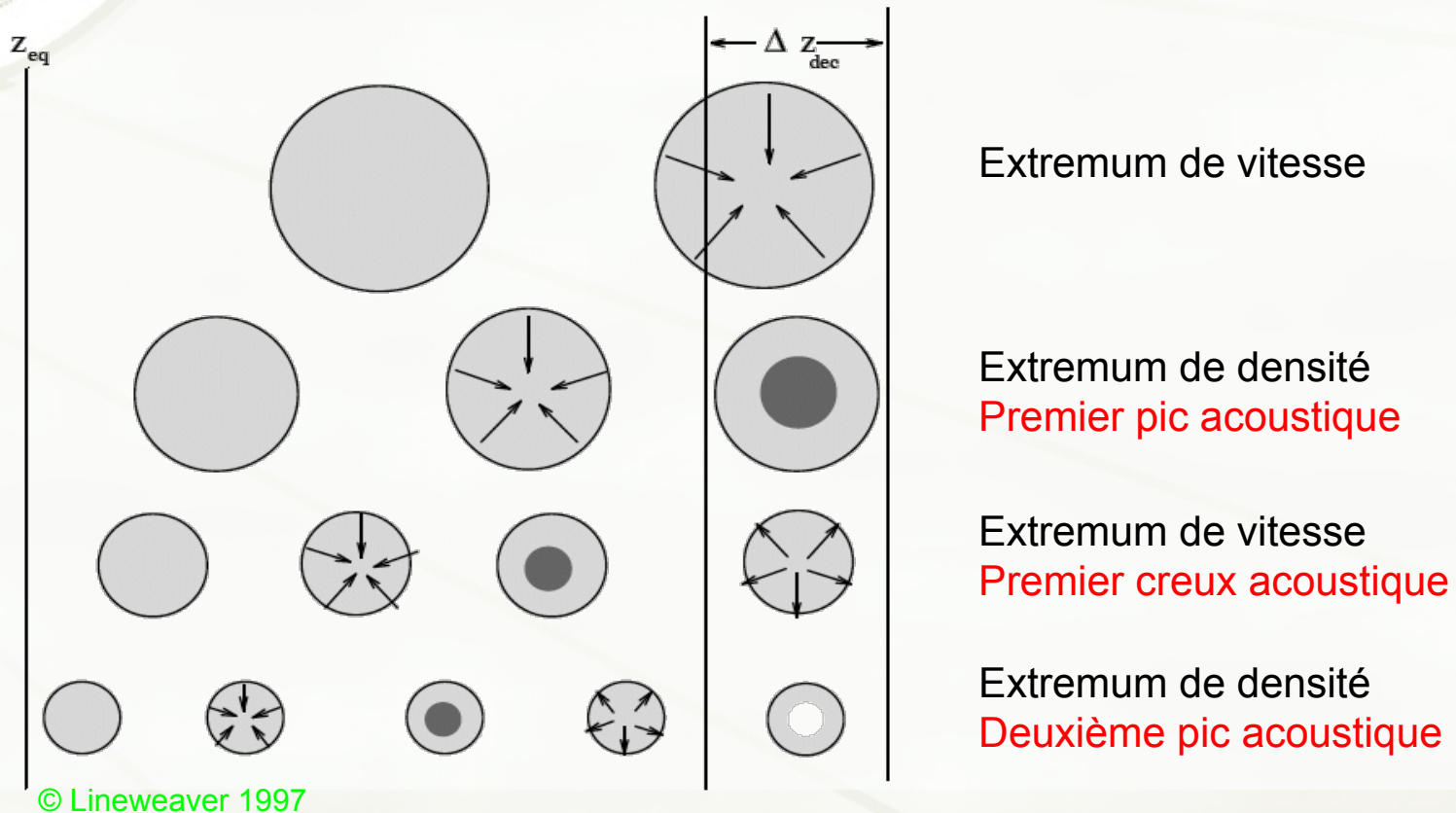


LE « RATTRAPAGE » DES BARYONS

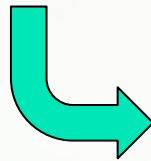
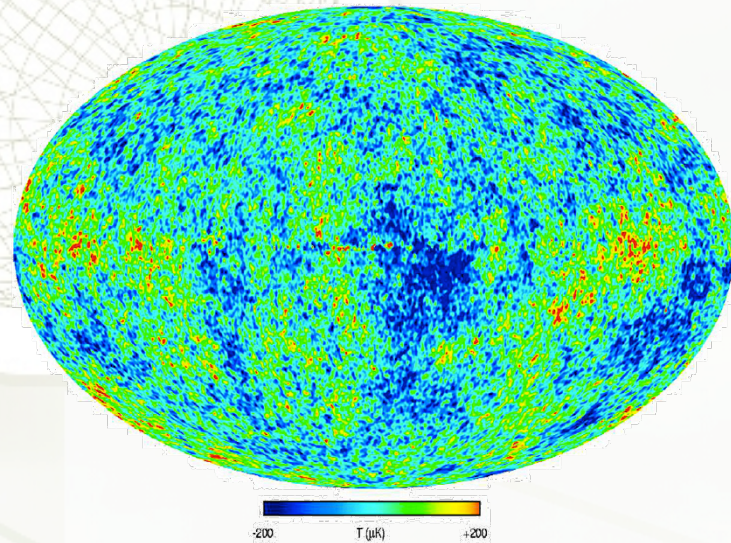


OSCILLATIONS ACOUSTIQUES DES BARYONS

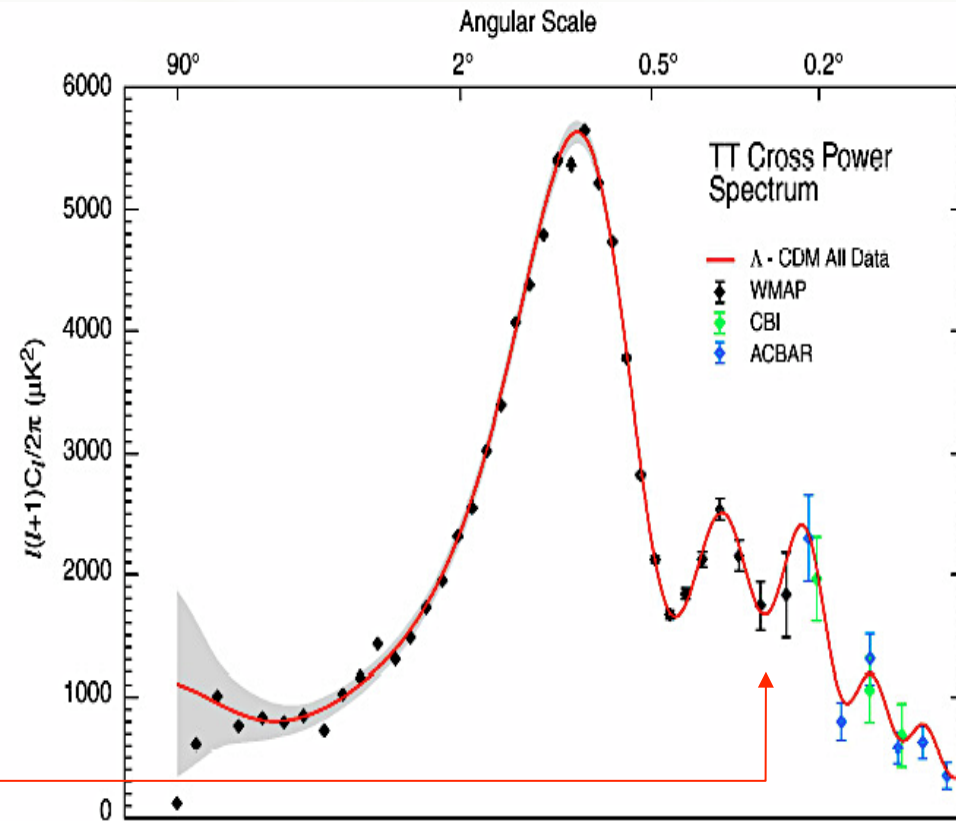
- Oscillations \Leftrightarrow alternance de contractions et de dilatations (\Leftrightarrow réchauffements et refroidissements locaux)
- Toutes les oscillations de taille donnée oscillent exactement **en phase** \rightarrow pics et creux du spectre de puissance du CMB



SPECTRE DE PUISSANCE DU CMB

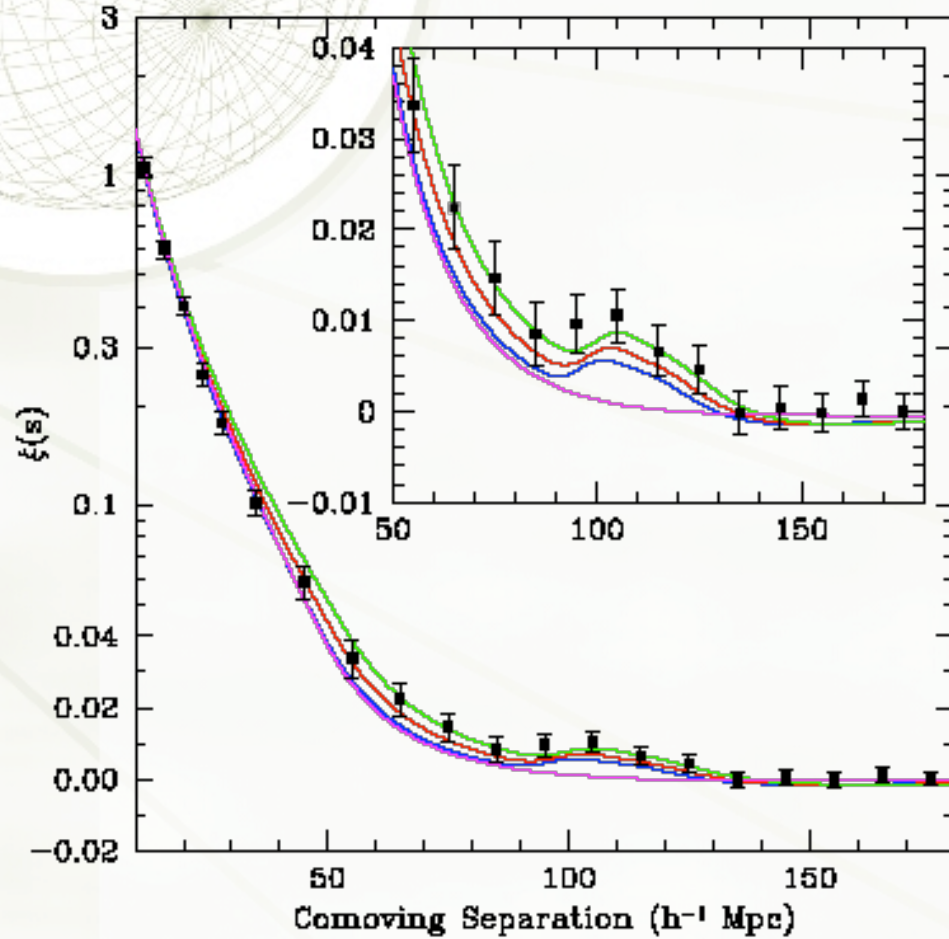


- ✓ Plus il y a de matière noire, plus elle freine les oscillations des baryons et plus les pics sont réduits
- ✗ Plus il y a de baryons, plus les oscillations **successives** sont amorties

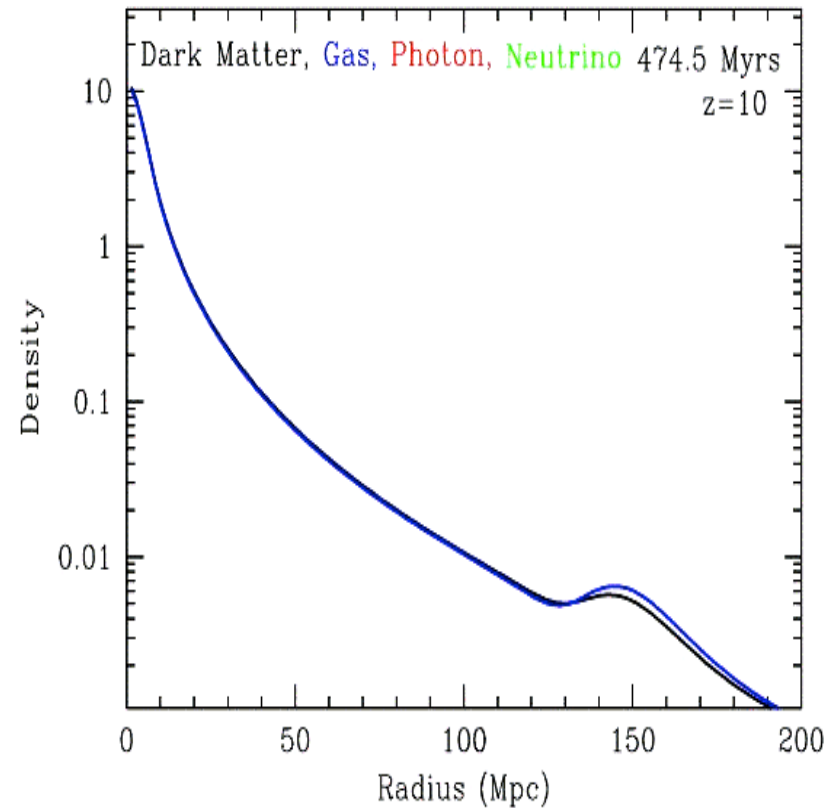


⇒ PIC DANS LA FONCTION DE CORRÉLATION DES GALAXIES

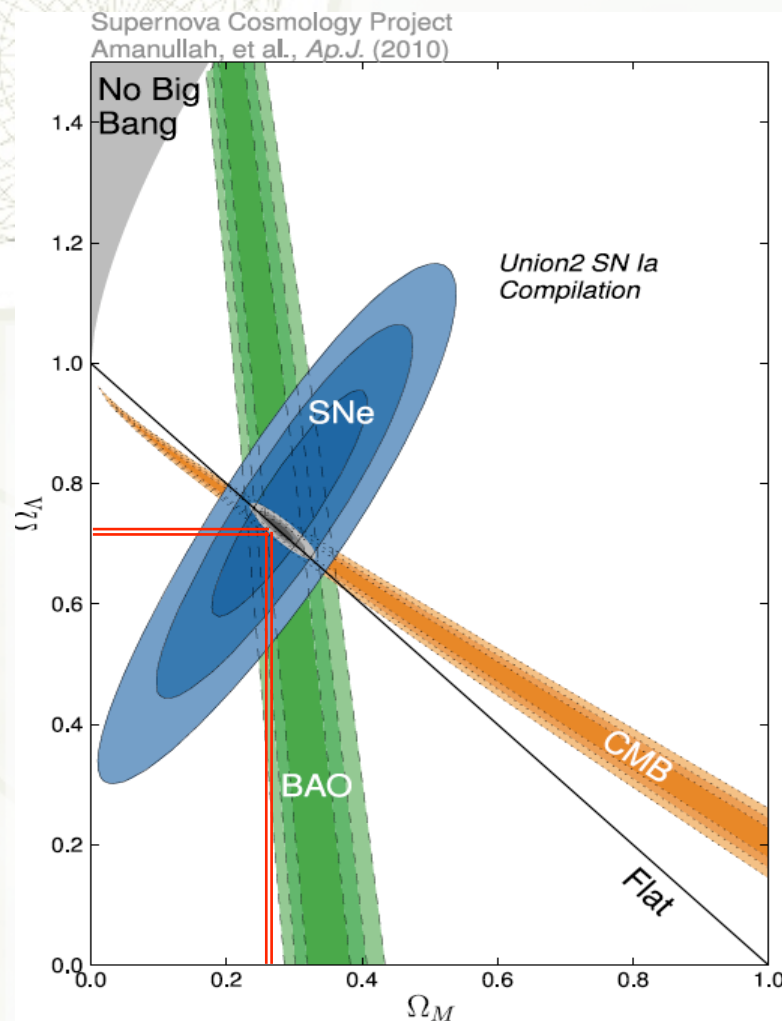
■ (BAO)



Eisenstein & al., Sloan Digital Sky Survey 2005



MATIÈRE NOIRE... ÉNERGIE NOIRE...



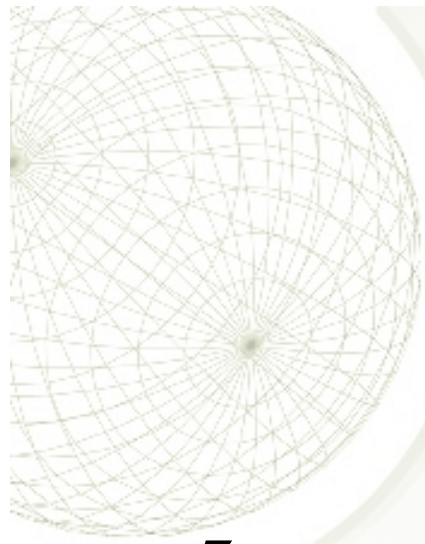
- La position du premier pic acoustique du CMB indique une courbure spatiale Ω_k presque nulle

$$\rightarrow \Omega_\Lambda + \Omega_{mat} \sim 1$$

- L'accélération de l'expansion, indiquée par les supernovae, donne une autre combinaison

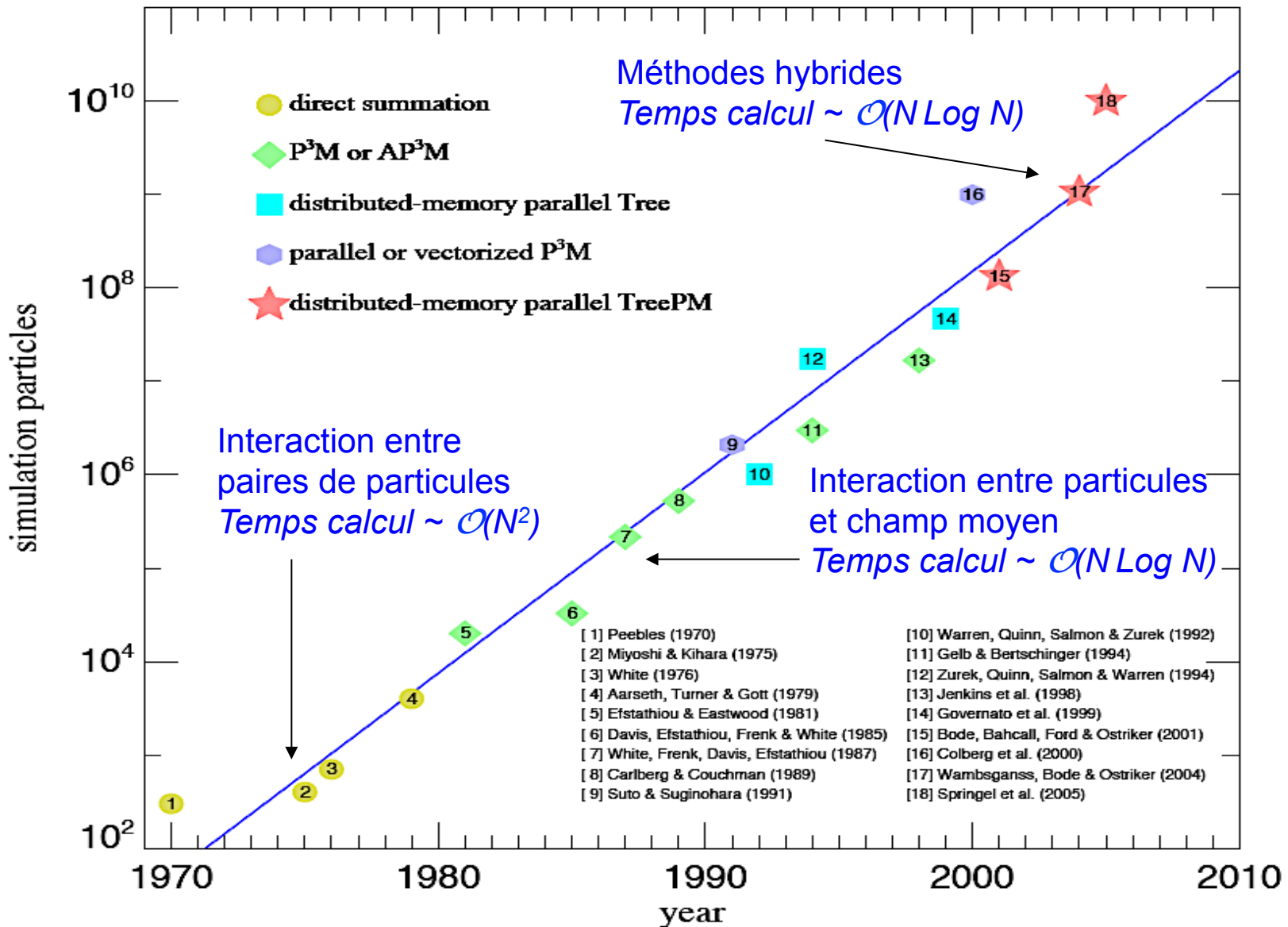
$$\frac{1}{2} \Omega_{mat} - \Omega_\Lambda \sim -0.6$$

- D'où $\Omega_{mat} \sim 0.27 \rightarrow$ matière noire
et $\Omega_\Lambda \sim 0.73 \rightarrow$ énergie noire



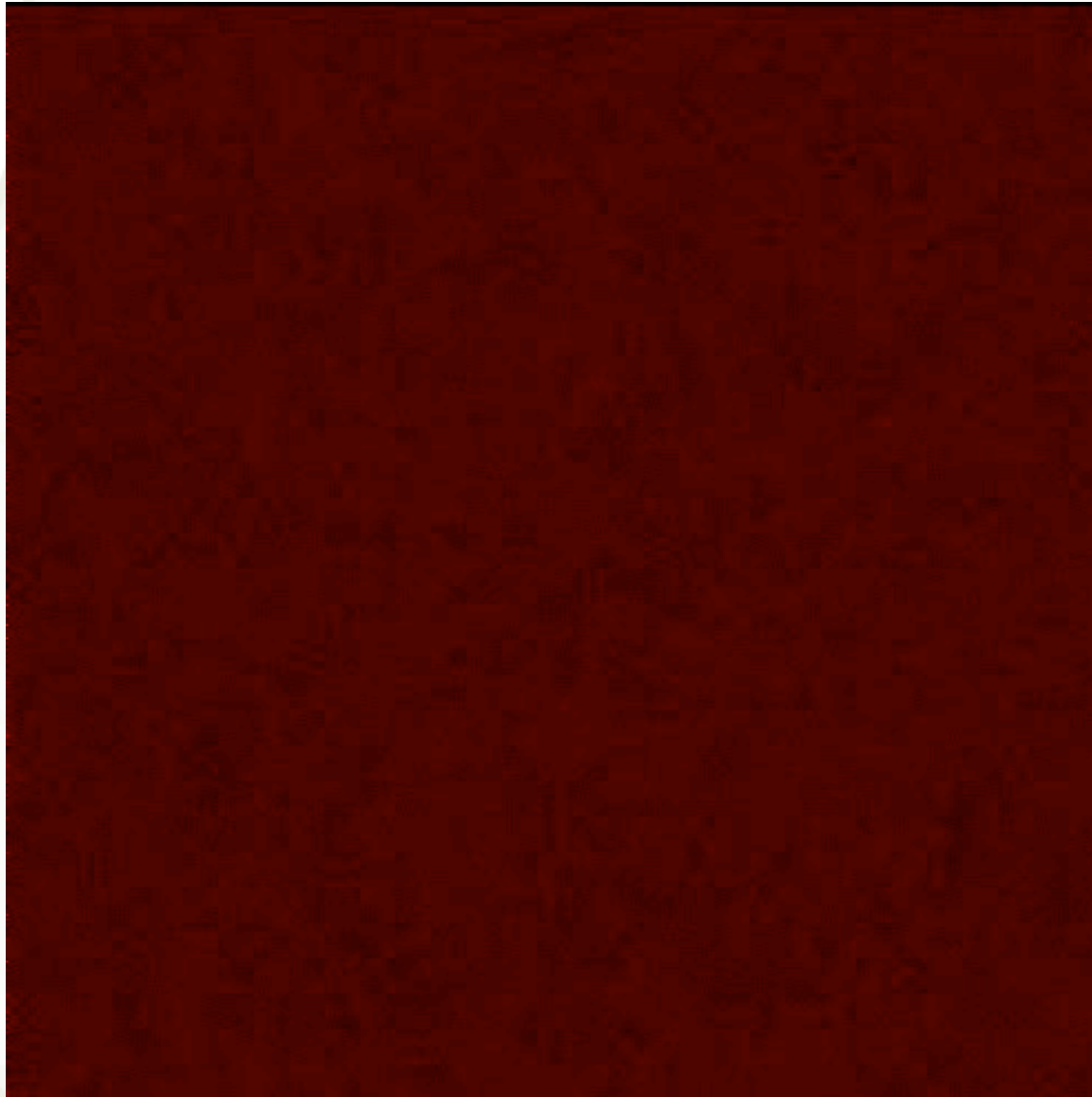
RÉGIME NON-LINÉAIRE ET SIMULATIONS NUMÉRIQUES

LES PROGRÈS EN SIMULATION NUMÉRIQUE



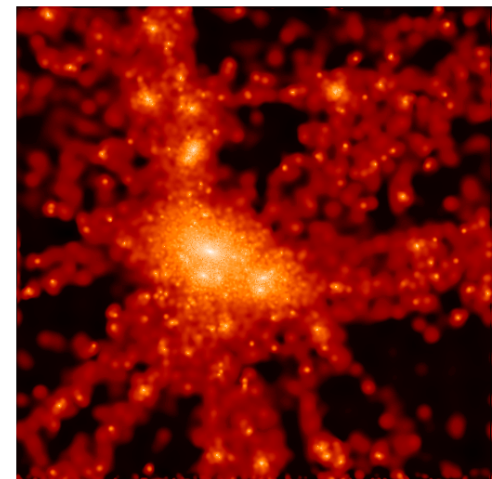
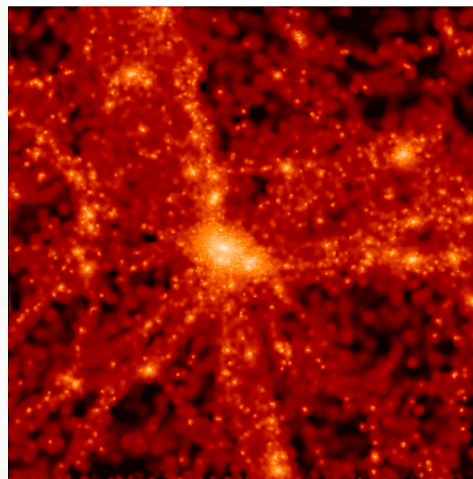
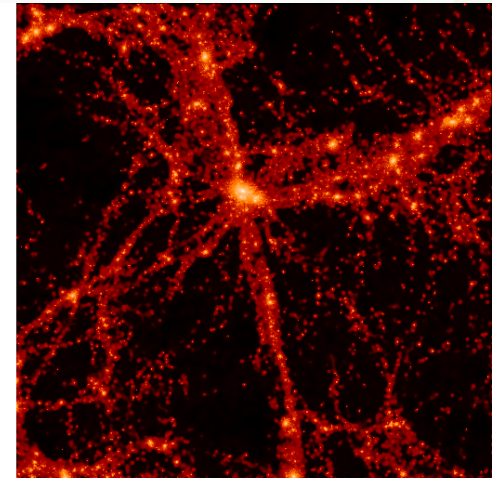
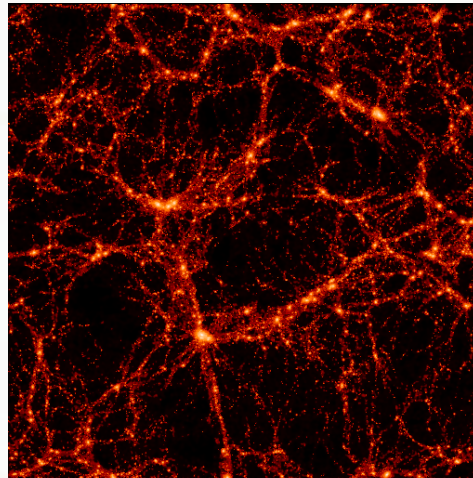


SIMULATIONS NUMÉRIQUES



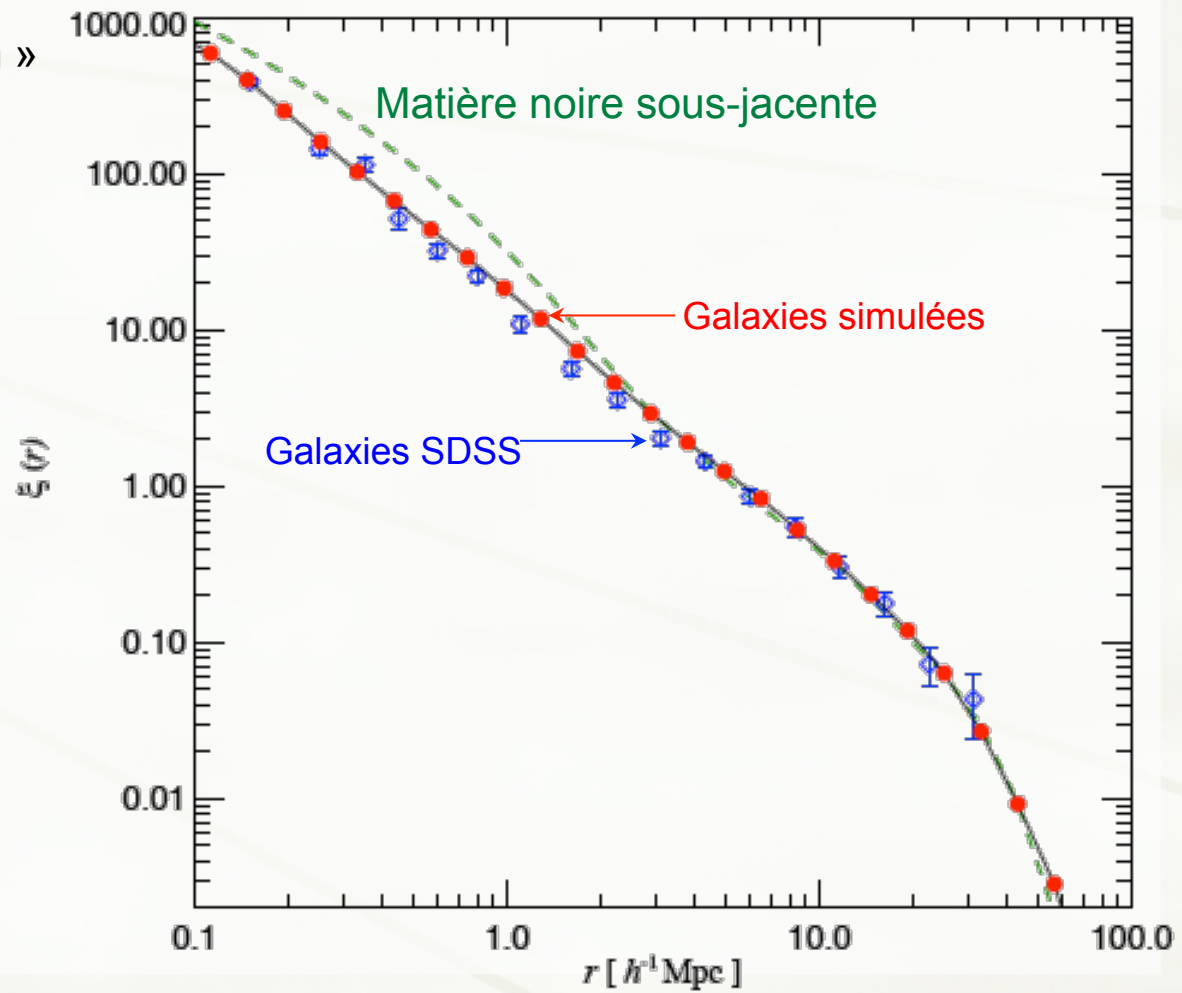
SIMULATIONS NUMÉRIQUES

- Virgo Hubble volume simulation
 - $N = 10^9$ particules
 - Volume de $[3000h^{-1} \text{ Mpc}]^3$
 - [Coma = 500 particules]
 - 512 processeurs parallèles
 - 5 jours de temps CPU
 - 200 Gbytes de données
 - 3000 amas comme Coma
 - un million d'amas (>32 part.)
 - *mais qu'est-ce qu'un « amas »?*



REPRODUIT-ON BIEN L'UNIVERS OBSERVÉ?

- Simulation « Millenium »
(Springer et al. 2005)

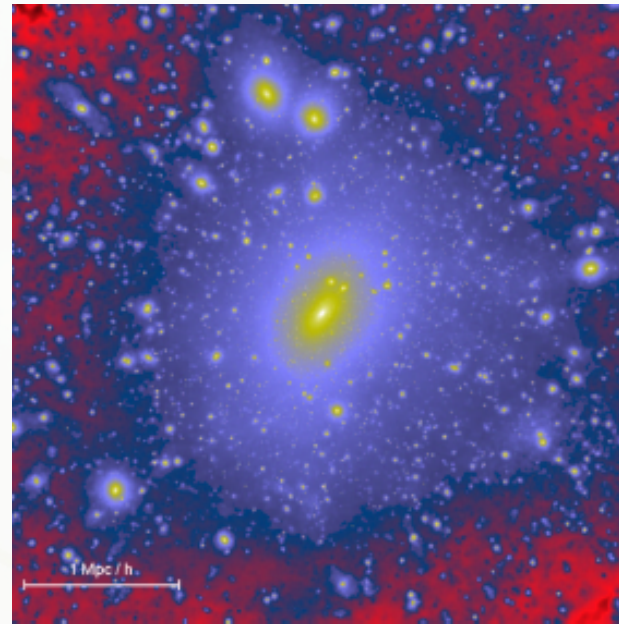


DES HALOS DANS LES HALOS

- Comment isole-t-on une « structure » dans une simulation ? On associe les particules
 - qui sont plus proches qu'un seuil donné
 - qui appartiennent au même « bassin »
 - où le contraste de densité dépasse 200

les amis de mes amis ...
les maxima de densité ...
les surdensités 200 ...

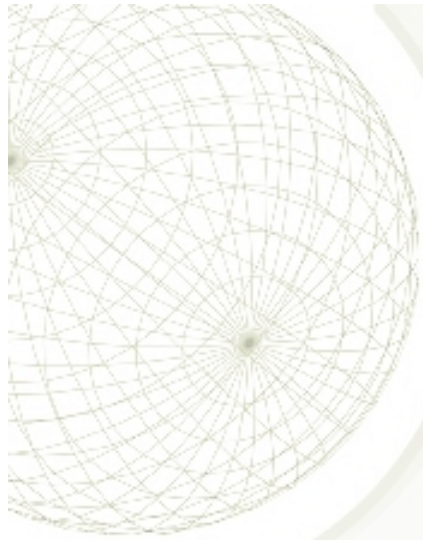
- Souci
 - les simulations donnent un nombre très (trop) élevé de sous-structures : plusieurs centaines pour une galaxie
 - fusions ou déchirements?
 - suppression de la formation d'étoiles?





EN CONCLUSION

- La compréhension de la formation des grandes structures est
 - bien comprise pour la distribution de la **matière noire** à grande échelle, mais on dispose de peu d'observations fiables
 - à peu près comprise pour la structure des amas X ou les forêts Lyman α , et l'accord avec les observations est bon
 - mal comprise à l'échelle des galaxies, où les observations sont nombreuses
- Il reste beaucoup à faire



Merci de votre attention !

