

Nature de l'énergie noire : éléments de réponse dans les simulations cosmologiques

Yann RASERA

LUX/Université Paris Cité/Observatoire de Paris/IUF

6 Janvier 2025

Dans le cadre du cycle de cours de Françoise Combes :

« Le secteur sombre de l'Univers : matière et énergie sombres »



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

- **Simulations et énergie noire : idée générale**
- **Simulations cosmologiques et énergie noire : méthodes**
- **Empreintes de l'énergie noire sur la formation des grandes structures**
- **Empreintes des théories alternatives de la gravité sur la formation des grandes structures**
- **Ouverture**

IDEE GENERALE

DYNAMIQUE DE L'UNIVERS HOMOGENE

RELATIVITE GENERALE
+
PRINCIPE COSMOLOGIQUE
(homogénéité et isotropie)

Rappel:

Equation d'état

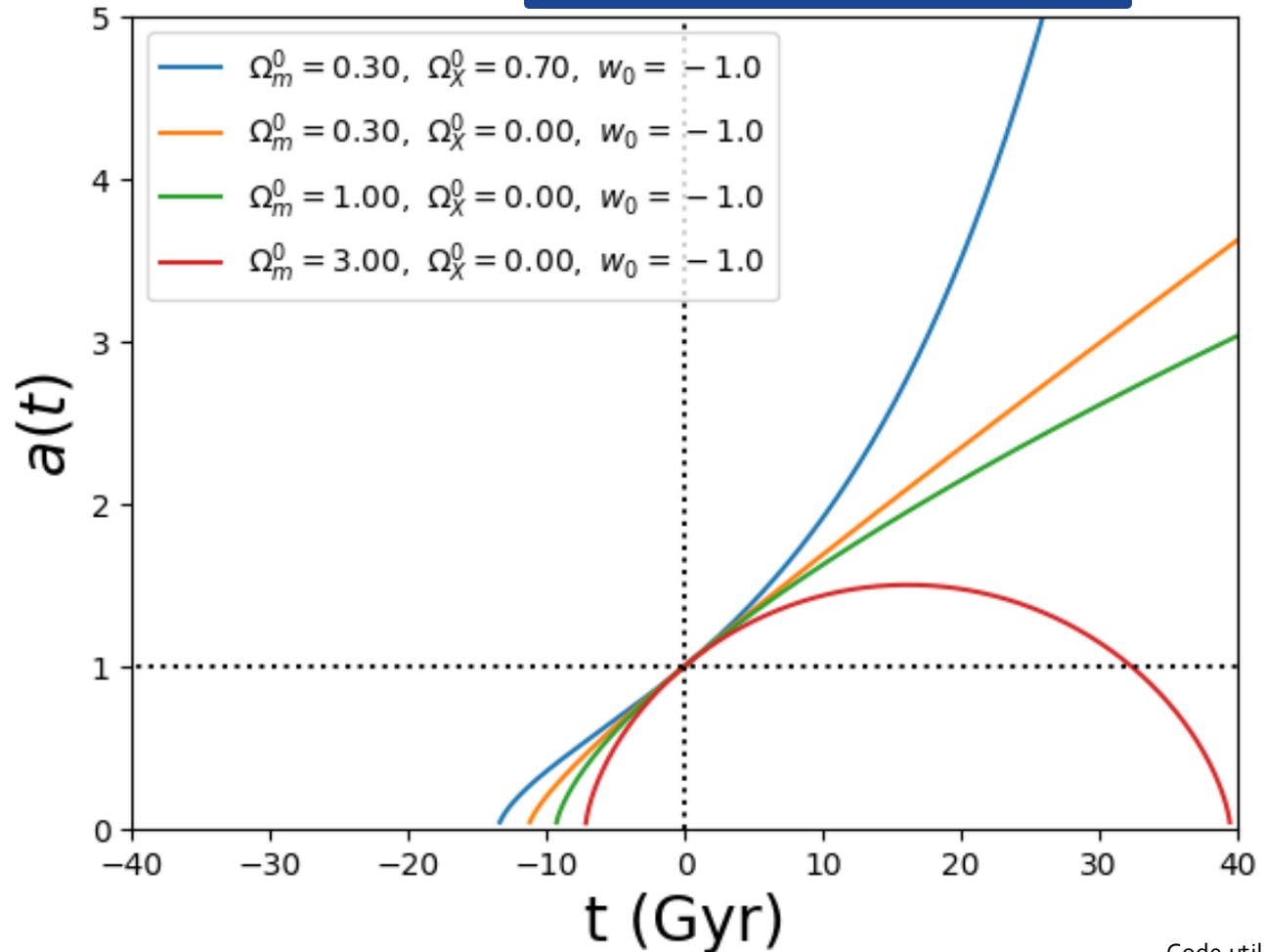
$$w = \frac{P}{\rho c^2}$$

Matière noire
(et ordinaire)

$$w = 0$$

Energie noire

$$w = -1 ?$$



DYNAMIQUE DE L'UNIVERS HOMOGENE

RELATIVITE GENERALE
+
PRINCIPE COSMOLOGIQUE
(homogénéité et isotropie)

Rappel:

Equation d'état

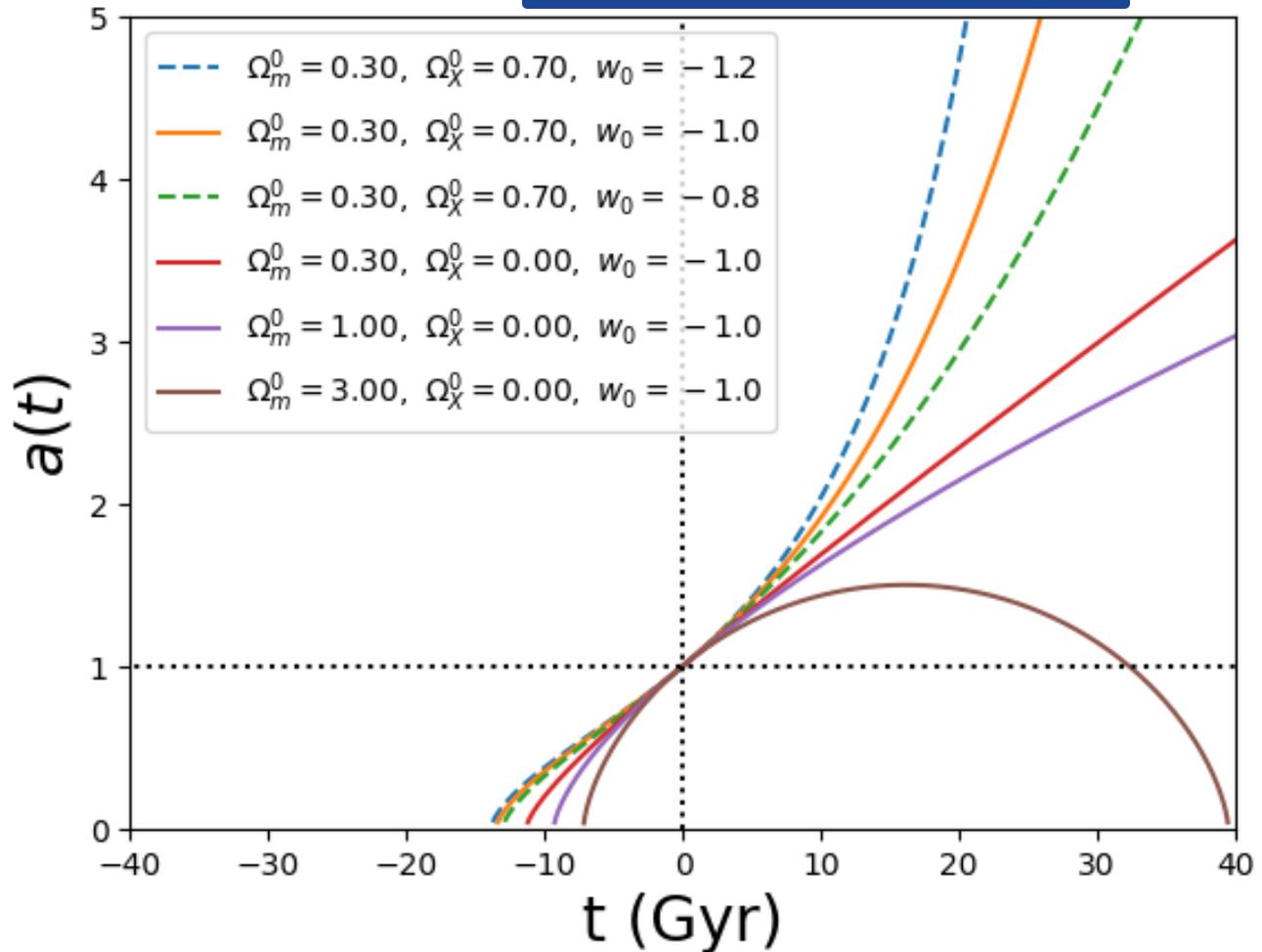
$$w = \frac{P}{\rho c^2}$$

Matière noire
(et ordinaire)

$$w = 0$$

Energie noire

$$w = -1 ?$$



DYNAMIQUE DE L'UNIVERS HOMOGENE

RELATIVITE GENERALE
+
PRINCIPE COSMOLOGIQUE
(homogénéité et isotropie)

Rappel:

Equation d'état

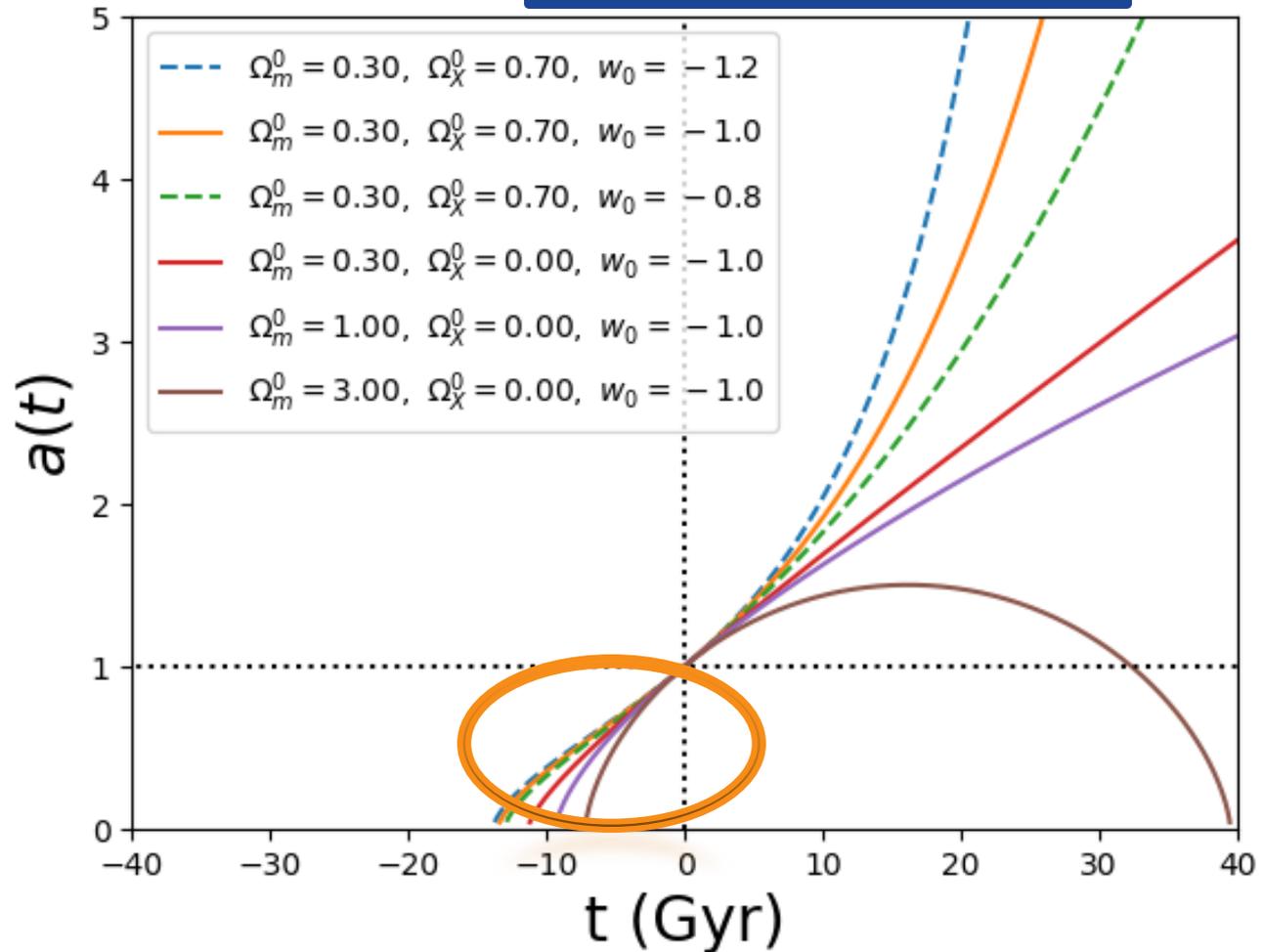
$$w = \frac{P}{\rho c^2}$$

Matière noire
(et ordinaire)

$$w = 0$$

Energie noire

$$w = -1 ?$$



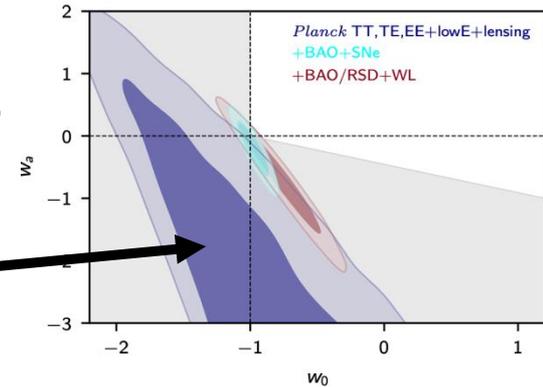
DIFFERENTES SONDES POUR L'ENERGIE NOIRE: DE L'UNIVERS HOMOGENE...

$$w(a) = w_0 + w_a(1 - a)$$

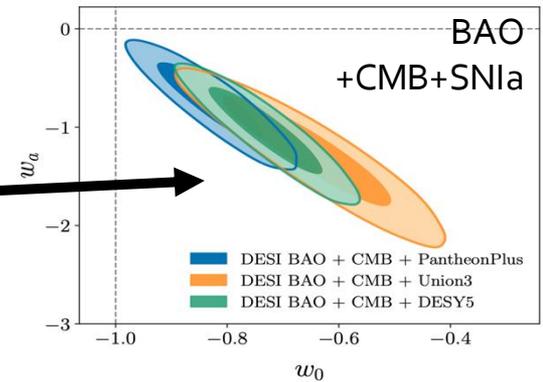
D
I
S
T
A
N
C
E
S

- Univers homogène: Supernovae
- Univers primordial linéaire (fluctuations): Fond diffus cosmologique
- Régime quasi-linéaire : Oscillations acoustiques baryoniques

Planck Collab.
2018



DESI Collab.
2024



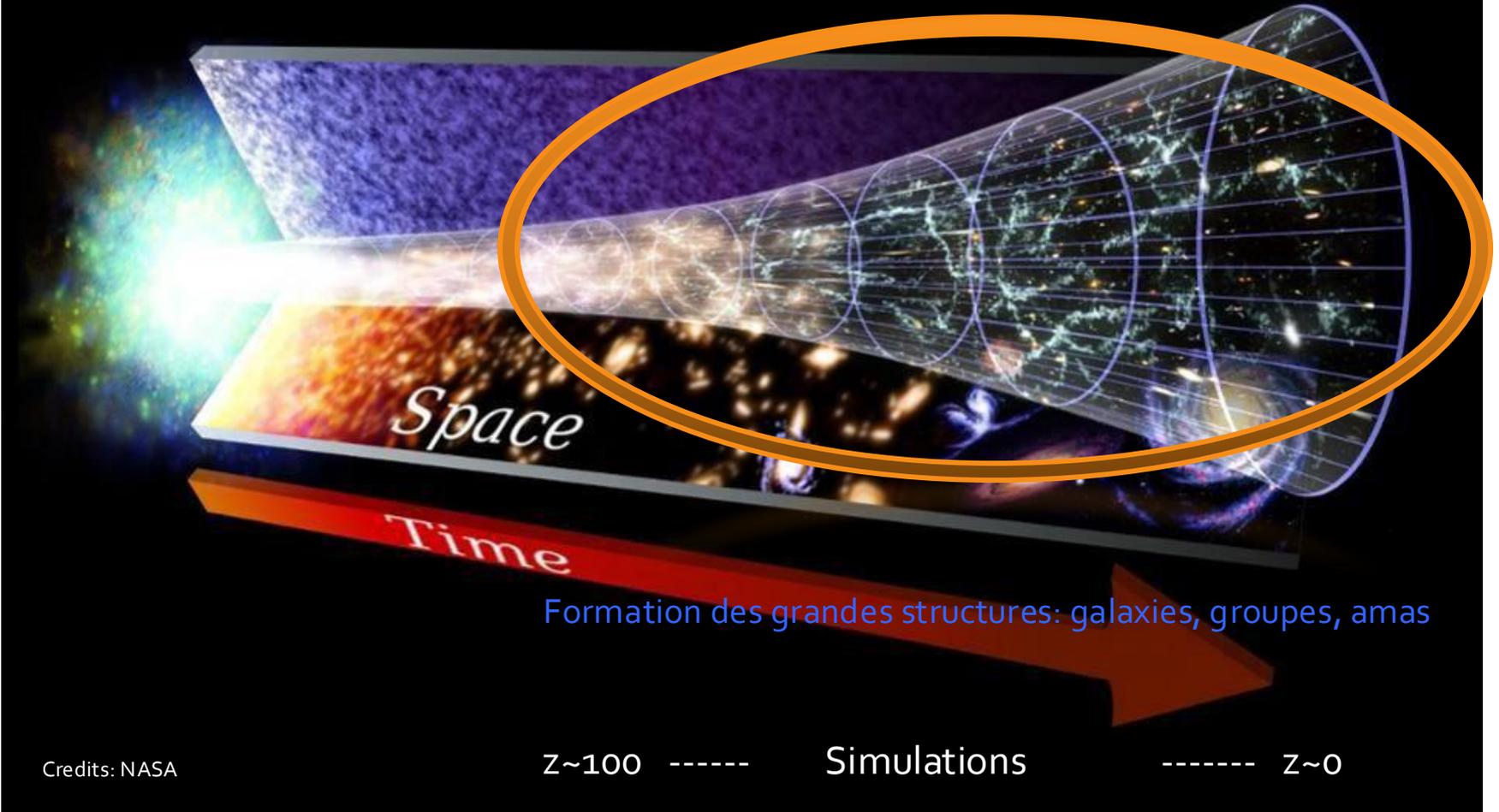
Ere dominée
par la radiation

Ere dominée
par la matière

Ere dominée par
l'énergie noire

Quasi-Homogène
Physique linéaire

Inhomogène
Physique non-linéaire
Problème multi-échelle



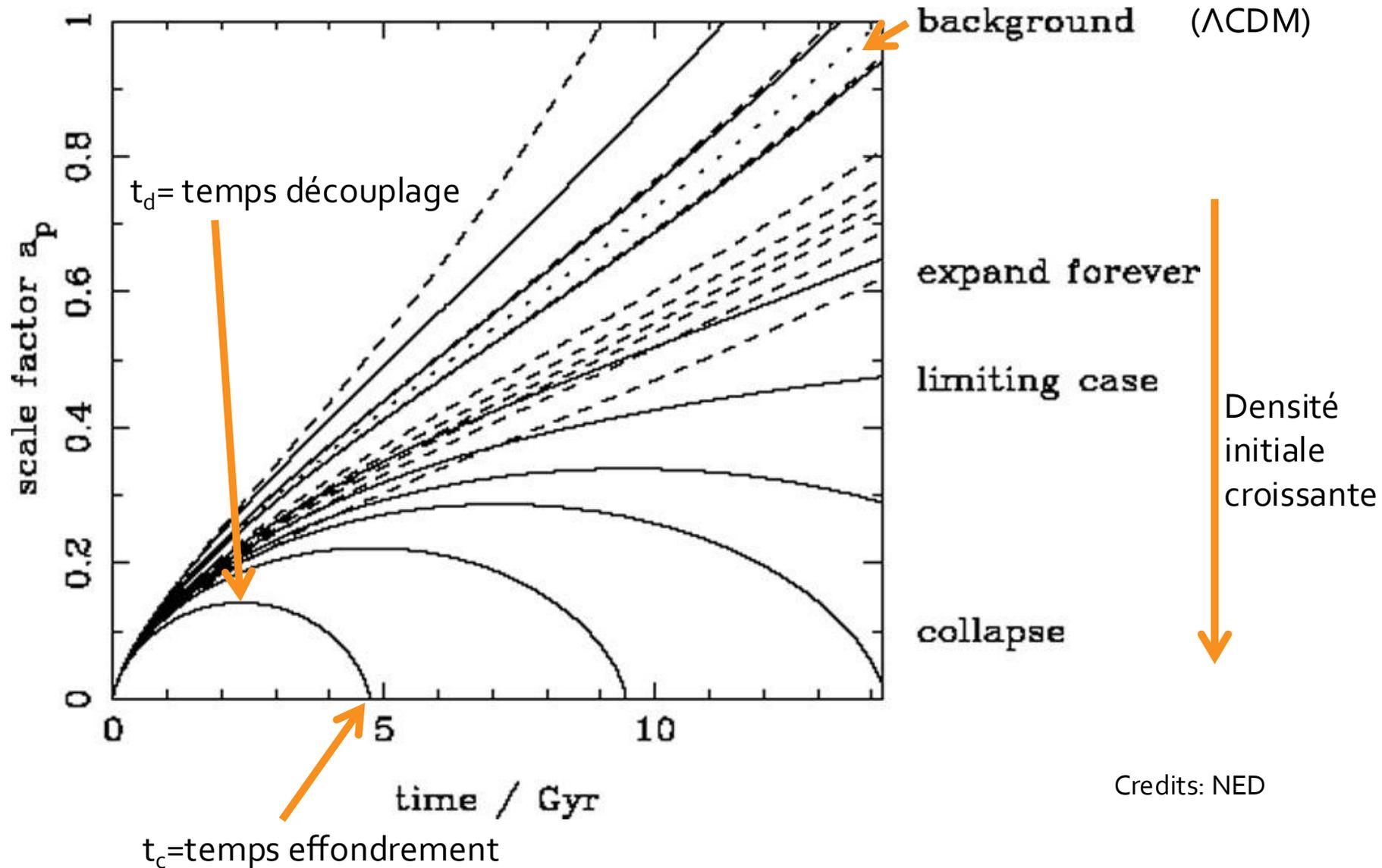
Credits: NASA

$Z \sim 100$ -----

Simulations

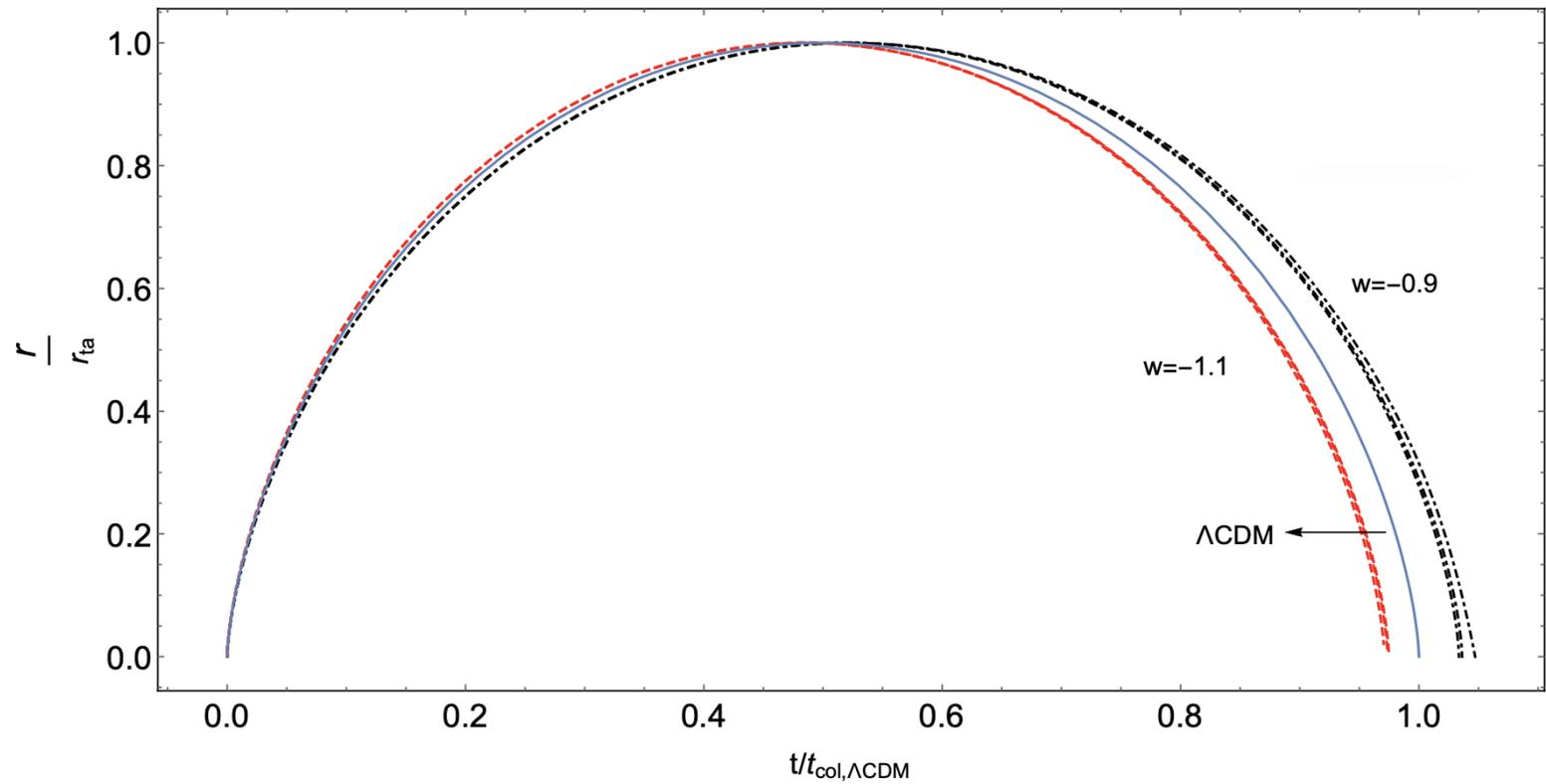
----- $Z \sim 0$

EFFONDREMENT SPHERIQUE



EFFONDREMENT SPHERIQUE

8



Credits: Herrera et al. 2019

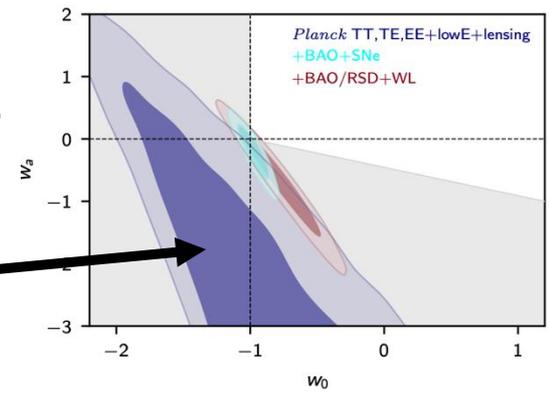
DIFFERENTES SONDRES POUR L'ENERGIE NOIRE: DE L'UNIVERS HOMOGENE AU REGIME NON-LINEAIRE

$$w(a) = w_0 + w_a(1 - a)$$

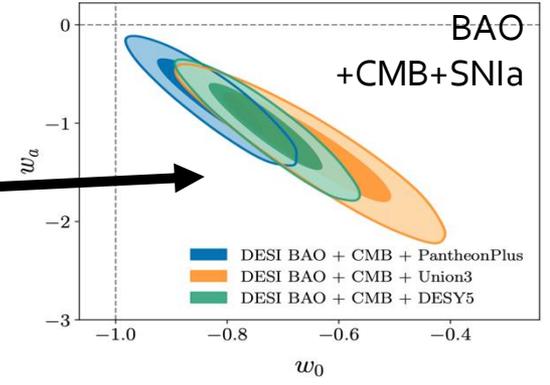
DISTANCES CROISSANCE

- Univers homogène: Supernovae
- Univers primordial linéaire (fluctuations): Fond diffus cosmologique
- Régime quasi-linéaire : Oscillations acoustiques baryoniques
- Régime non-linéaire et grandes structures
 - Distribution des galaxies
 - Lentillage gravitationnel
 - Comptage des amas
 - Profil de densité des amas

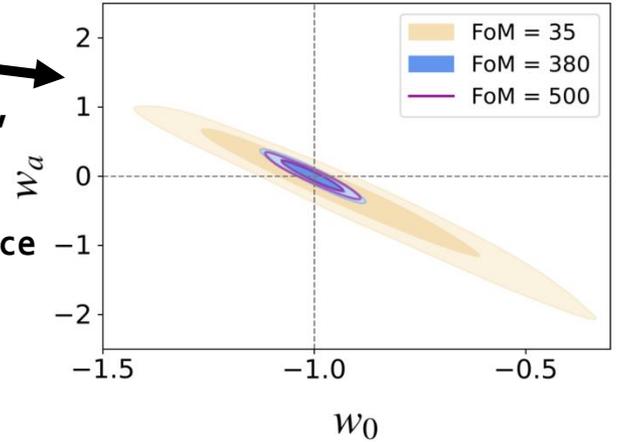
Planck Collab.
2018



DESI Collab.
2024

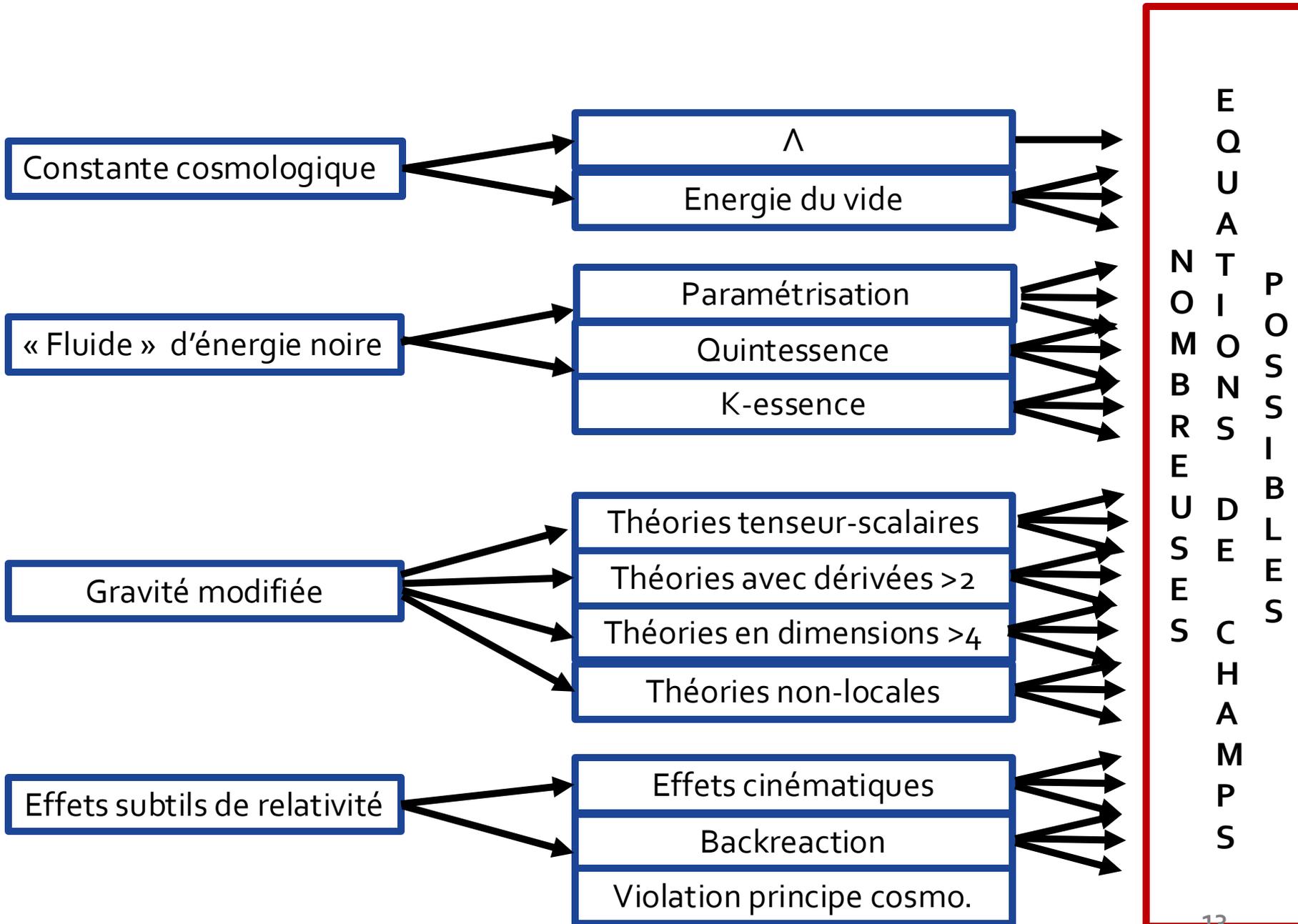


Euclid Collab.,
Mellier et al.,
2024
(ATTENTION ce
sont ici les
contraintes
attendues)



EN PRATIQUE...

NOMBREUSES THEORIES POSSIBLES POUR L'ENERGIE NOIRE



EXEMPLE DE LAGRANGIEN TENSEUR SCALAIRE (DHOST)

$$S_{\text{EFT}} = \int d^4x \left[\frac{M^2 a}{2} \left(\mathcal{L}_2 + \frac{1}{a^2} \mathcal{L}_3 + \frac{1}{a^4} \mathcal{L}_4 \right) + \mathcal{L}_m \right]$$

$$\mathcal{L}_2 = (c_1 \Phi + c_2 \Psi + c_3 \pi) \partial^2 \pi + c_4 \Psi \partial^2 \Phi + c_5 \Psi \partial^2 \Psi \\ + c_6 \Phi \partial^2 \Phi + (c_7 \dot{\Psi} + c_8 \dot{\Phi} + c_9 \dot{\pi}) \partial^2 \pi ,$$

$$\mathcal{L}_3 = -\frac{b_1}{2} (\partial \pi)^2 \partial^2 \pi + (b_2 \Phi + b_3 \Psi) Q_2[\pi, \pi] \\ - \frac{1}{2} (\partial \pi)^2 (b_4 \partial^2 \Psi + b_5 \partial^2 \Phi + b_6 \partial^2 \dot{\pi}) ,$$

$$\mathcal{L}_4 = -\frac{d_1}{2} (\partial \pi)^2 Q_2[\pi, \pi] + \frac{d_2}{4} \partial_k (\partial \pi)^2 \partial_k (\partial \pi)^2 ,$$

EXEMPLE D'EQUATIONS DE CHAMPS TENSEUR SCALAIRE (DHOST)

$$\mathcal{E}_\Phi = C_1 \partial^2 \pi - \frac{c_8}{4} \partial^2 \dot{\pi} + \frac{c_6}{2} \partial^2 \Phi + \frac{c_4}{4} \partial^2 \Psi \\ + \frac{1}{4} \left[\frac{b_2}{a^2} Q_2[\pi, \pi] - \frac{b_5}{a^2} \partial_i (\partial_j \pi \partial_i \partial_j \pi) \right] - \frac{a^2 \delta \rho_m}{2M^2}$$

$$\mathcal{E}_\Psi = C_2 \partial^2 \pi - \frac{c_7}{4} \partial^2 \dot{\pi} + \frac{c_4}{4} \partial^2 \Phi + \frac{c_5}{2} \partial^2 \Psi \\ + \frac{1}{4} \left[\frac{b_3}{a^2} Q_2[\pi, \pi] - \frac{b_4}{a^2} \partial_i (\partial_j \pi \partial_i \partial_j \pi) \right]$$

$$\mathcal{E}_\pi = C_3 \partial^2 \pi + C_4 \partial^2 \dot{\pi} + \frac{c_9}{2} \partial^2 \ddot{\pi} + \frac{c_1}{4} \partial^2 \Phi + \frac{c_8}{4} \partial^2 \dot{\Phi} \\ + \frac{c_2}{4} \partial^2 \Psi + \frac{c_7}{4} \partial^2 \dot{\Psi} + \frac{1}{4a^2} Q_2[\pi, b_1 \pi + 2b_2 \Phi + 2b_3 \Psi] \\ + \frac{1}{4a^2} \partial_i [\partial_i \pi \partial^2 (b_4 \Psi + b_5 \Phi + b_6 \dot{\pi})] \\ + \frac{1}{8aM^2} \frac{d}{dt} \left(\frac{M^2 b_6}{a} \right) \partial^2 (\partial \pi)^2 + \frac{b_6}{4a^2} \partial^2 (\partial_i \pi \partial_i \dot{\pi}) \\ + \frac{d_1}{4a^4} Q_3[\pi, \pi, \pi] + \frac{d_2}{4a^4} \partial_i [\partial_i \pi \partial^2 (\partial \pi)^2] ,$$

Crisostomi et al., 2019

On cherche grâce aux observations à contraindre les coefficients: $c_1, c_2, \dots, d_1, d_2, \dots$



Amas de Persée, vu par Euclid (11/2023)



ESA/Euclid, Euclid Consortium/NASA, CC BY-SA 3.0 IGO. Processing:
Jean-Charles Cuillandre (CEA Paris-Saclay) & Giovanni Anselmi

EXERCICE :
A PARTIR DE CETTE IMAGE (x10000),
TROUVEZ QUELLE EST LA NATURE DE L'ENERGIE NOIRE

A vos stylos...

QUELLE EST LA NATURE DE L'ENERGIE NOIRE ?

Nombreuses hypothèses

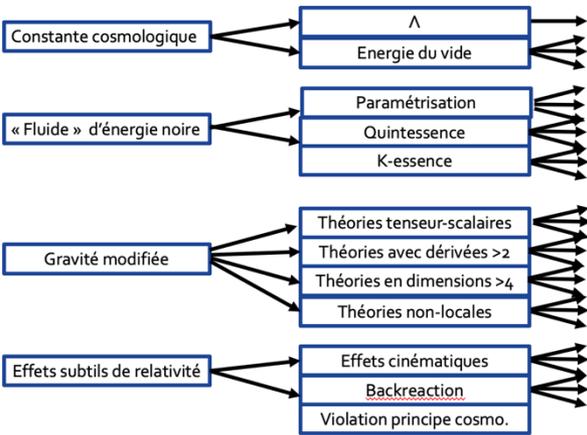
CALCULS ANALYTIQUES

PREDICTIONS APPROXIMATIVES

E
Q
U
A
T
I
O
N
S
P
O
S
S
I
B
L
E
S
D
E
C
H
A
M
P
S



CONTRAINTES FAIBLES



THEORIES

OBSERVATIONS

(calculs analytiques utiles pour une bonne compréhension physique)

**SIMULATIONS COSMOLOGIQUES POUR
MODELISER LE REGIME NON-LINEAIRE DE LA
FORMATION DES GRANDES STRUCTURES**

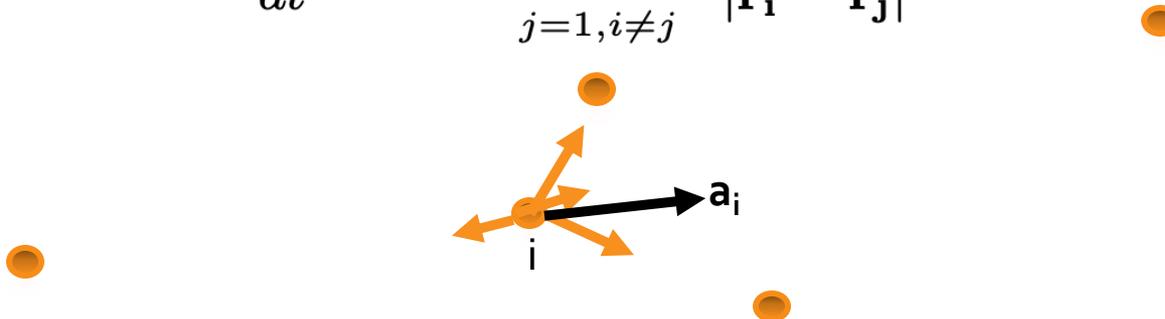
SIMULATIONS N-CORPS DE FORMATION DES GRANDES STRUCTURES

• OBJECTIF ET HYPOTHESES

- But: simuler la formation des grandes structures
- Hyp: Conditions initiales gaussiennes compatibles avec le fond diffus cosmologique
- Hyp: Masse qui domine aux grandes échelles: matière noire (supposée froide ici)
- Hyp: Interaction qui domine : gravité (en champ faible)
- Hyp: Principe fondamental de la dynamique (particules non-relativistes)

$$\frac{\mathbf{F}_{j \rightarrow i}}{m_i} = -G \frac{m_j}{r_{ij}^2} \mathbf{e}_r \quad \mathbf{g}_i = \frac{\mathbf{F}_i}{m_i} = \mathbf{a}_i$$

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = -G \sum_{j=1, i \neq j}^N \frac{m_j (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^3}$$



SIMULATIONS N-CORPS DE FORMATION DES GRANDES STRUCTURES

- **PROBLEME 1: prendre en compte l'expansion de l'univers**
 - La boîte de simulation change de taille au cours du temps

- **PROBLEME 2: trop de particules**
 - 1 particule simulée = 1 particule (microscopique) de matière noire
 - Nombre particules matière noire $N_{DM} > 10^{20}$ dans univers observable (selon masse).

- **PROBLEME 3: beaucoup trop de paires de particules**
 - Calcul de toutes les interactions (approche de type **particule-particule ou PP**)
 - Nombre de paires est donc $N_{\text{paires}} \sim N_{DM}^2$ soit $> 10^{40}$
 - Nombre maximal typique d'interactions supercalculateurs actuels $N_{\text{max}} = 10^{12} - 10^{13}$

- **PROBLEME 4: vaste dynamique spatiale**
 - Portion significative d'univers => échelles simulées $\sim 10^{10}$ années-lumières
 - Taille typique des galaxies (comme la voie Lactée par exemple) $\sim 10^4 - 10^5$ al
 - Le rapport en termes d'échelles est de $\sim 10^6$ et en termes de volume $\sim 10^{18}$

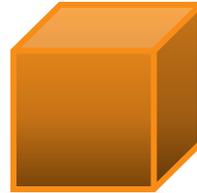
SOLUTION PB₁: COORDONNEES COMOBILES

Idée : découpler calcul expansion de l'univers $a(t)$ du mouvement propre des particules

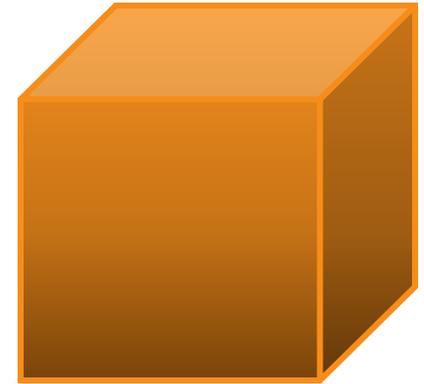
Coordonnées physiques habituelles r : les distances bougent avec le temps => pas pratique



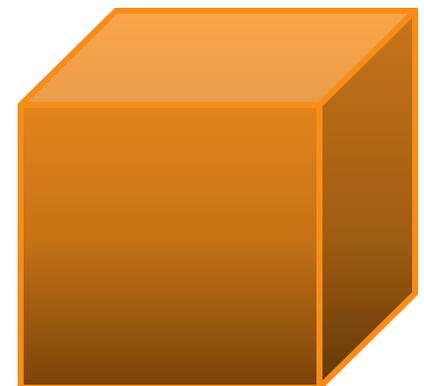
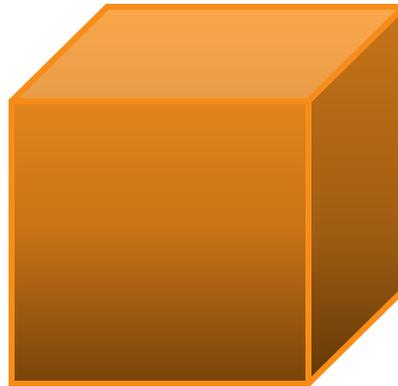
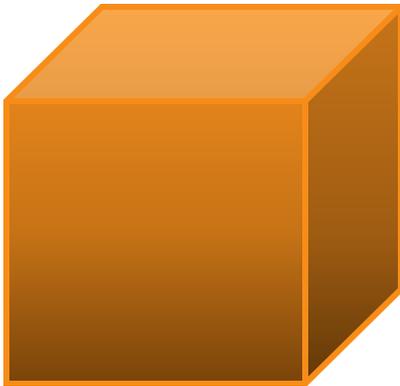
$a=0.25$



$a=0.5$



$a=1$



Coordonnées comobiles $x=r/a(t)$: suivent la matière

=> permet d'étudier les déviations à l'expansion globale de l'univers

SOLUTION PB2: APPROCHE DE TYPE CHAMP MOYEN: EQUATIONS VLASOV-POISSON

Matière noire froide (limite non-collisionnelle $\tau_{\text{relax}} \gg \tau_{\text{dyn}}$) :

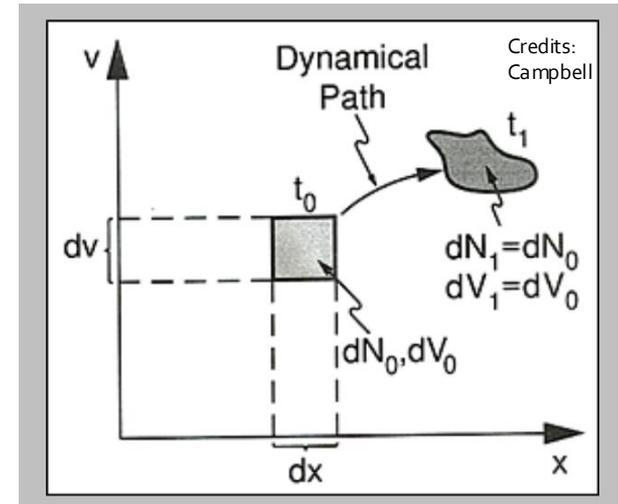
D'après le théorème de Liouville: la densité de particules dans l'espace des phases f est constante (sans collision) le long des trajectoires du système.

$$\frac{df}{dt} = 0$$

D'autre part le potentiel gravitationnel satisfait à l'équation de Poisson

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G a^2 (\rho(\mathbf{x}) - \rho_b)$$

=> Equations de Boltzmann sans collision et équations de Poisson appelées équations de Vlasov-Poisson



Théorème de Liouville

Baryons (limite fortement collisionnelle ($\tau_{\text{relax}} \ll \tau_{\text{dyn}}$) :

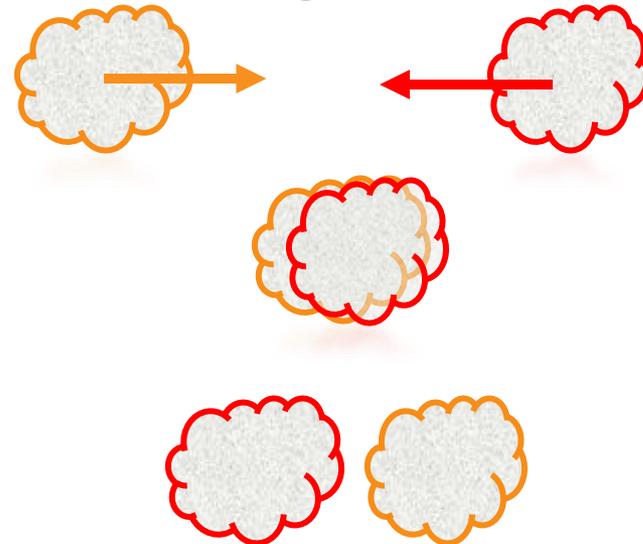
En présence de collisions f tend vers une distribution d'équilibre f_{eq} en un temps typique τ_{relax}

$$\frac{df}{dt} = \frac{f - f_{\text{eq}}}{\tau_{\text{relax}}}$$

La distribution de vitesse tend vers une gaussienne => Equations hydrodynamiques

RESOLUTION NUMERIQUE DES EQUATIONS DE VLASOV-POISSON

- On échantillonne l'espace des phases par des particules (au sens numérique) => chaque particule représente un ensemble (i.e. « un nuage ») de particules élémentaires de matière noire (au sens de la physique des particules)
- Par rapport à un problème N-corps classique :
 1. Il y a beaucoup moins de particules ($\sim 10^8 - 10^{12}$)
 2. Quand deux particules se croisent il n'y a pas de divergence en $1/r^2$: ce sont juste deux nuages qui se croisent



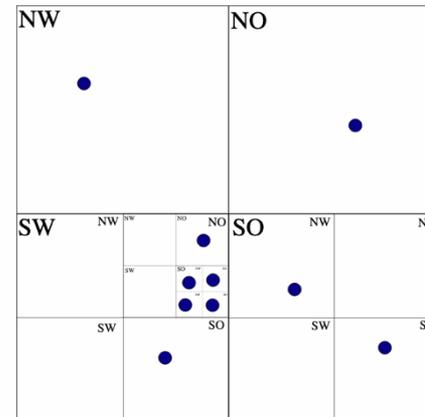
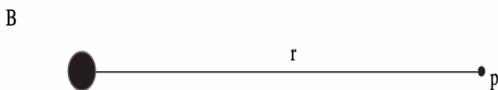
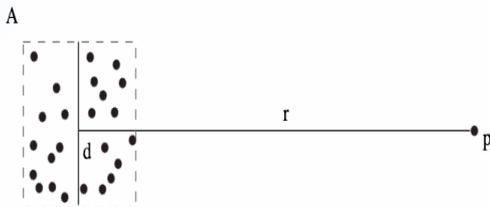
- Equations à résoudre pour les particules:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{v}$$
$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{g}$$

- Intégration temporelle via méthodes qui conservent l'énergie (dites symplectiques).
- La difficulté est le calcul du champ gravitationnel

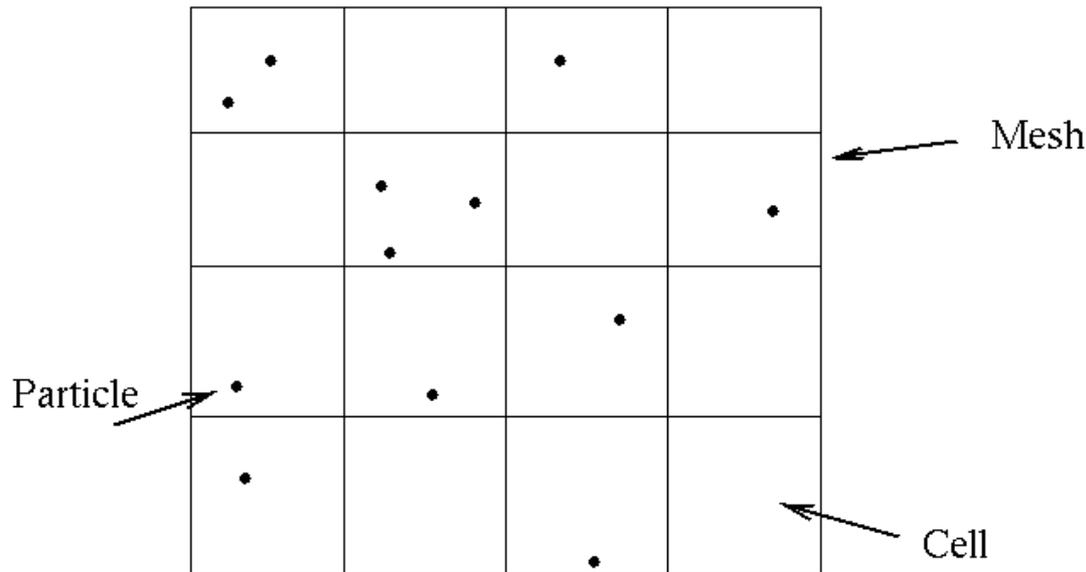
SOLUTION PB3: CALCUL DU CHAMP GRAVITATIONNEL GRACE A UN ARBRE OU UNE GRILLE

- Le temps de calcul est gouverné pas le calcul du champ gravitationnel. Approche PP (particule-particule) encore impossible (max actuel PP $\sim 10^6$)
- Deux méthodes principales (et plein de variantes) en $O(N \ln N)$: **méthodes de type Tree (arbre), méthodes de type PM (particules mailles)**
- Méthodes de type **arbre (Tree)**:
 1. si particules proches méthode PP, si particules éloignées on calcule interaction « Particule – Groupe de particules »
 2. On utilise un arbre pour grouper les particules et calculer les interactions lointaines



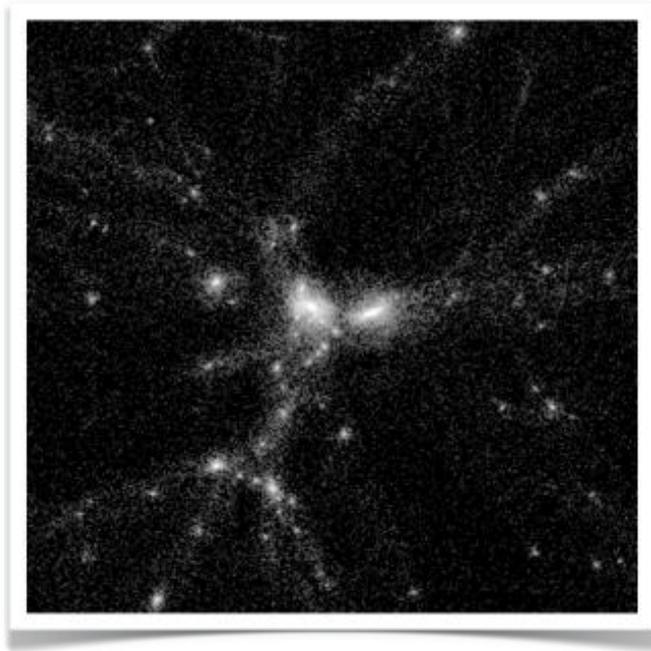
SOLUTION PB3: CALCUL DU CHAMP GRAVITATIONNEL GRACE A UNE GRILLE

- Méthodes de type **particule-maille** (ou particle-mesh en anglais, PM):
 1. Calcul densité sur la grille à partir de la position \mathbf{x} et la masse des particules $\Rightarrow \rho_{\text{grille}}$
 2. Résolution équation de Poisson sur la grille: transformée de Fourier (FFT) ou avec une méthode itérative (multigrille) $\Rightarrow \Phi_{\text{grille}}$
 3. Calcul du gradient du potentiel et donc du champ gravitationnel $\Rightarrow \mathbf{g}_{\text{grille}}$
 4. Interpolation champ gravitationnel au niveau des particules $\Rightarrow \mathbf{g}$

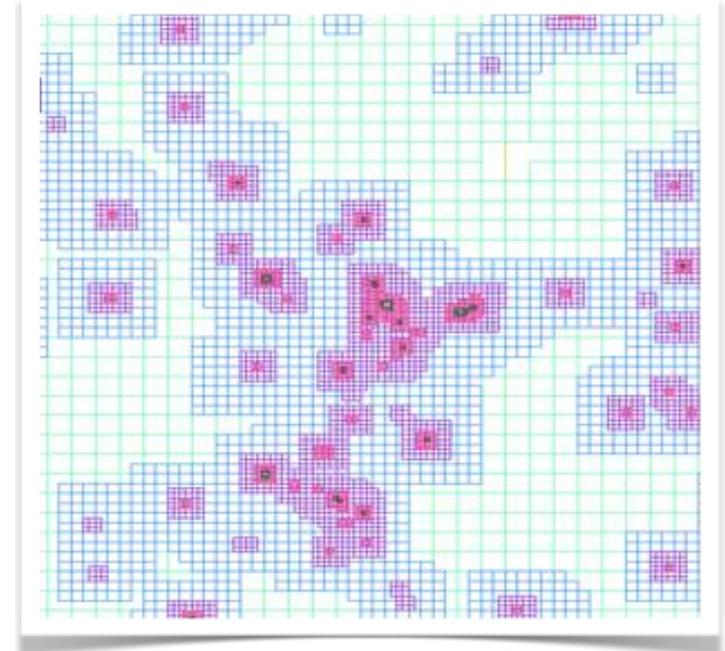


SOLUTION PB₄: CODE ADAPTATIF ET MASSIVEMENT PARALLELE

Exemple du code RAMSES (Teyssier 2002)



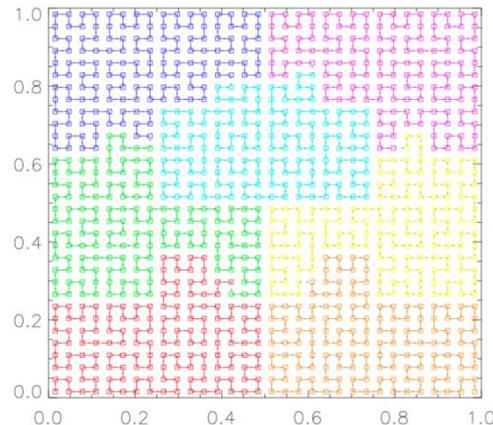
Carte de densité de matière noire



Crédits: J.Courtin

Carte de la grille adaptative

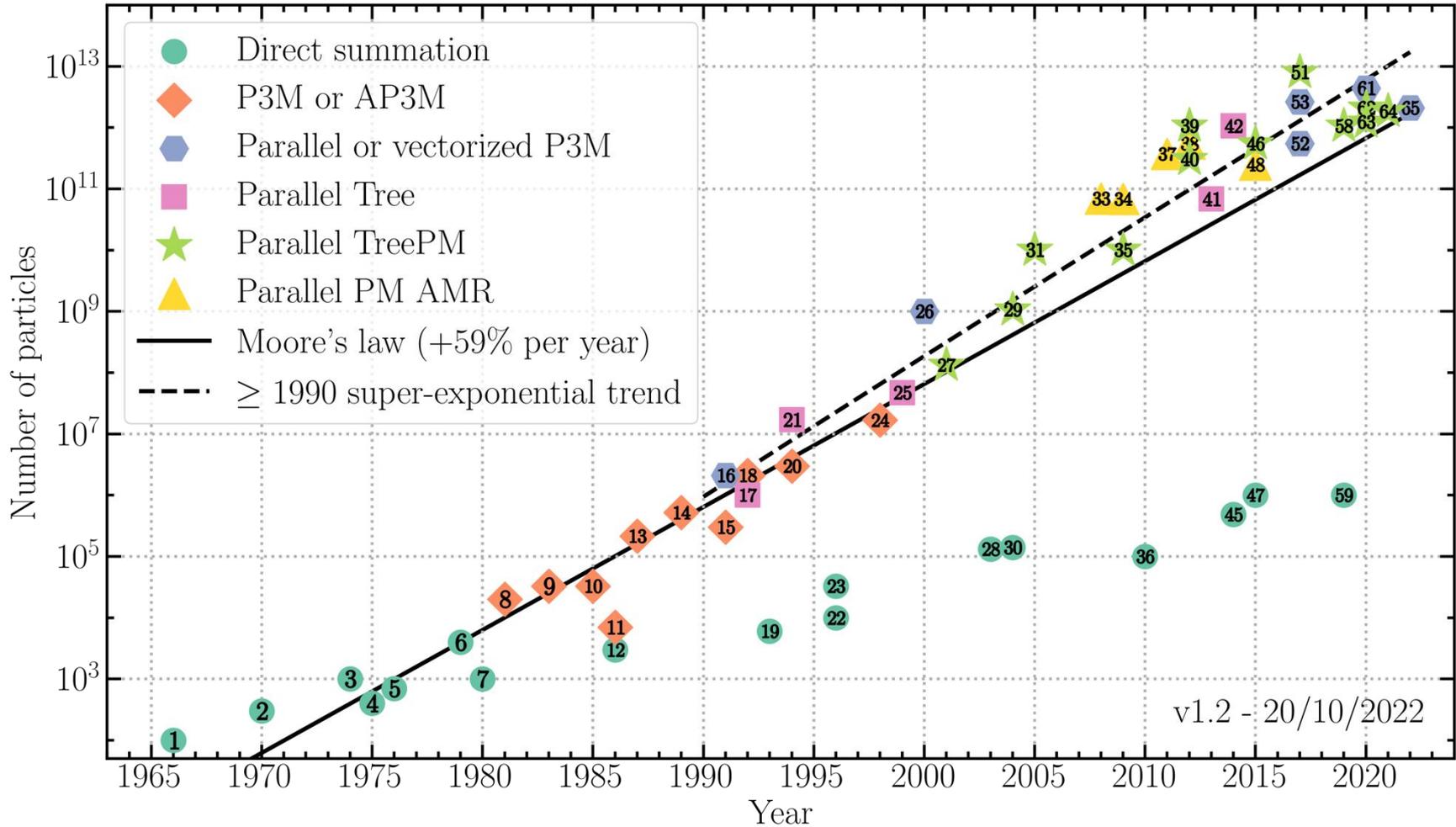
Parallélisation MPI:
1 couleur = 1 processus



Nombre typique de processus:
 10^3 à 10^5

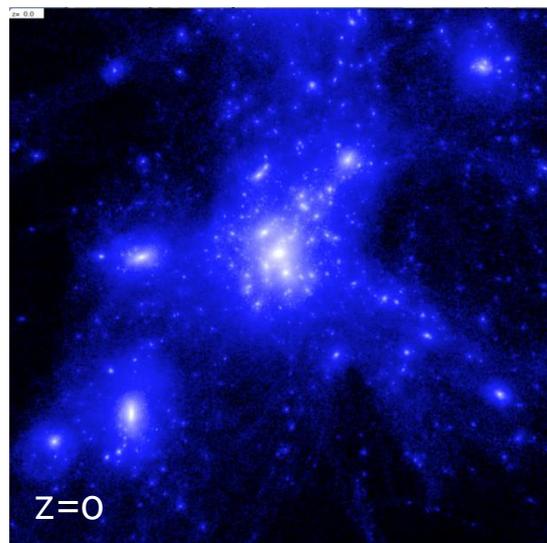
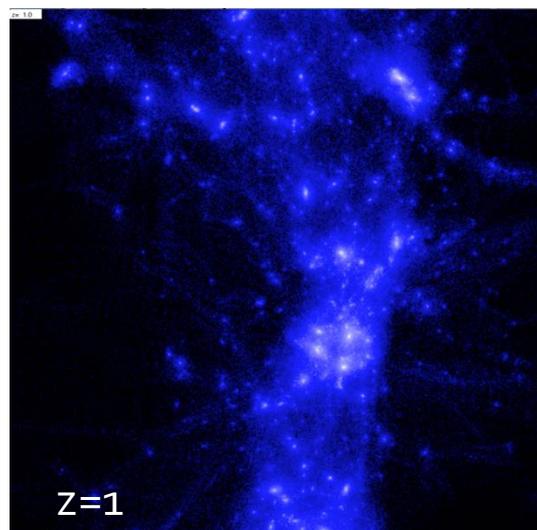
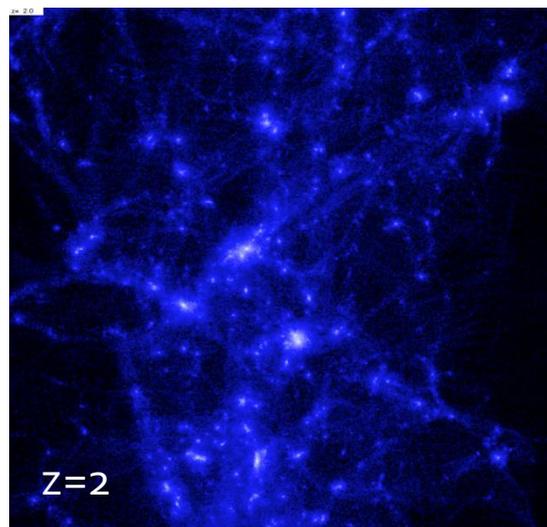
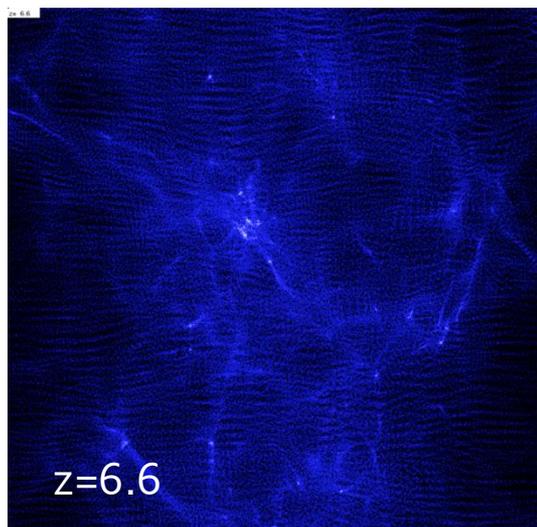
Exemple de centre de calculs nationaux:
TGCC, CINES, IDRIS

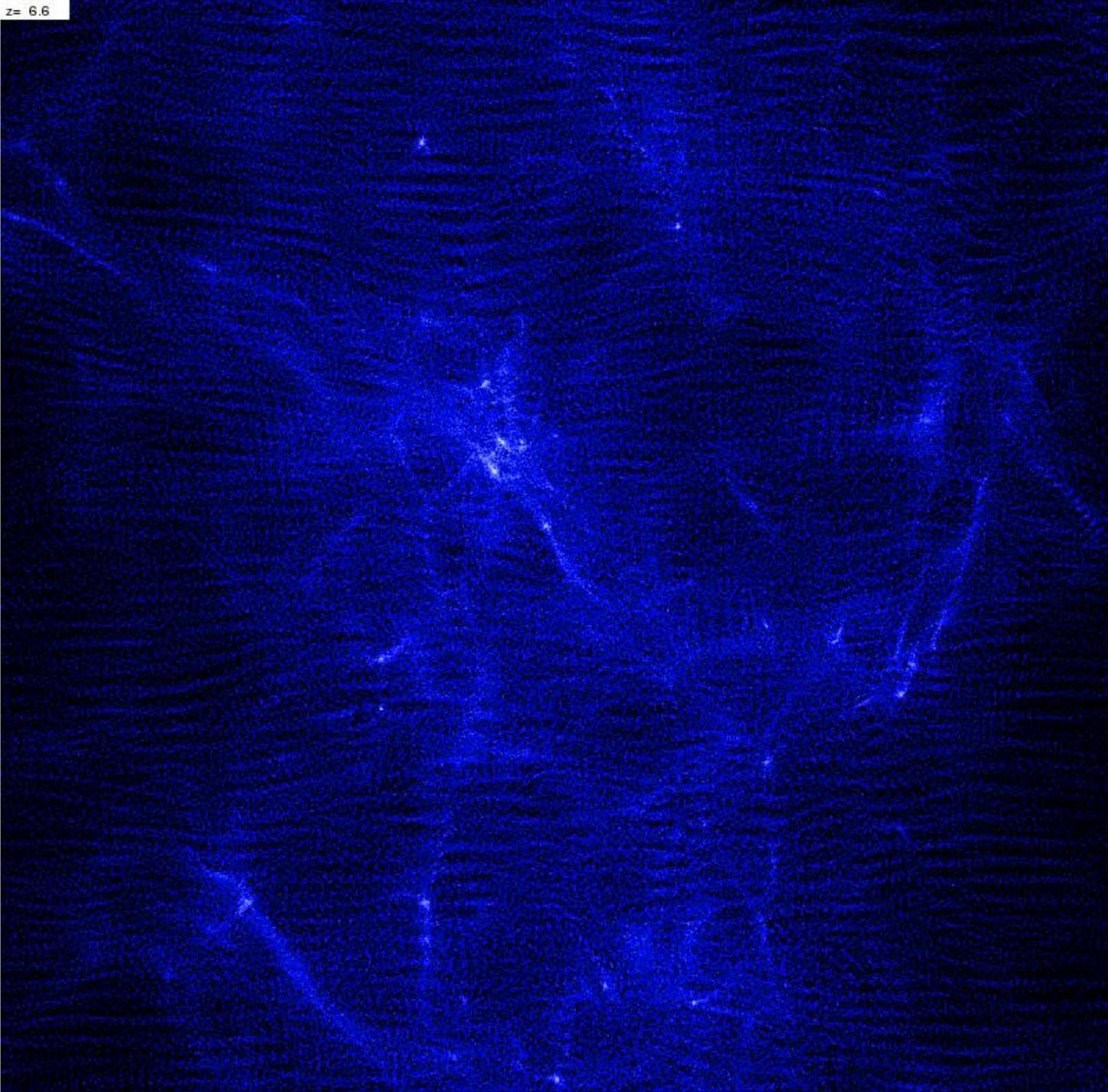
EVOLUTION NOMBRE DE PARTICULES



Credits: <https://www.florent-leclercq.eu/blog.php?page=2>

EXEMPLE DE FORMATION D'UN HALO DE MATIERE NOIRE AU SEIN D'UNE SIMULATION COSMOLOGIQUE N-CORPS





COMMENT PRENDRE EN COMPTE L'ENERGIE NOIRE ?

• Λ

- L'énergie noire est constante dans le temps et l'espace
=> REFERENCE

• Paramétrisation wo-wa

- L'énergie noire évolue dans le temps mais est constante dans l'espace

• Energie noire minimalement couplée (quintessence ou similaire)

- Résolution de l'équation d'évolution pour le champs scalaire
- Pas d'effondrement aux échelles non-linéaire => change les conditions initiales
=> CHANGEMENT EXPANSION GLOBALE ET CONDITIONS INITIALES GRANDE ECHELLE

• Gravité modifiée (theories tenseurs-scalaires ou similaires)

- Résolution de l'équation "de Poisson" pour le champ scalaire (=>force additionnelle)
- Les équations sont non-linéaires (transformée de Fourier ne marche pas)
- Utilisation des méthodes de relaxation type multigrille
- La simulation est plus lourde (facteur 2 à 10 en temps de calcul)
=>CHANGEMENT EQUATION DE POISSON ET INTERACTION GRAVITATIONNELLE

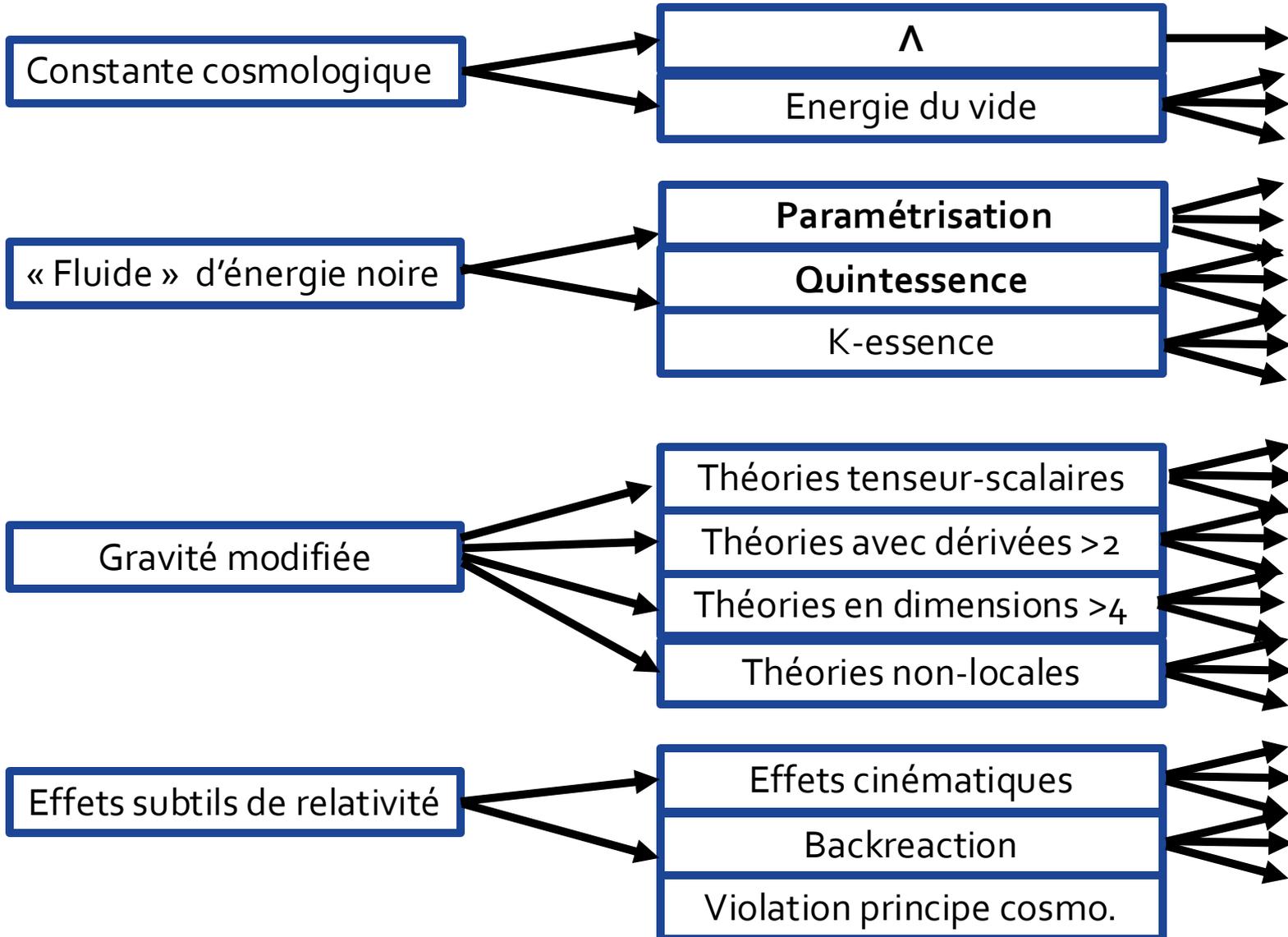
ILLUSTRATIONS SUR QUELQUES EXEMPLES

DES ECHELLES COSMOLOGIQUES AUX ECHELLES GALACTIQUES :

EMPREINTES DE L'ENERGIE NOIRE

SUR LA FORMATION DES GRANDES STRUCTURES

NOMBREUSES THEORIES POSSIBLES POUR L'ENERGIE NOIRE



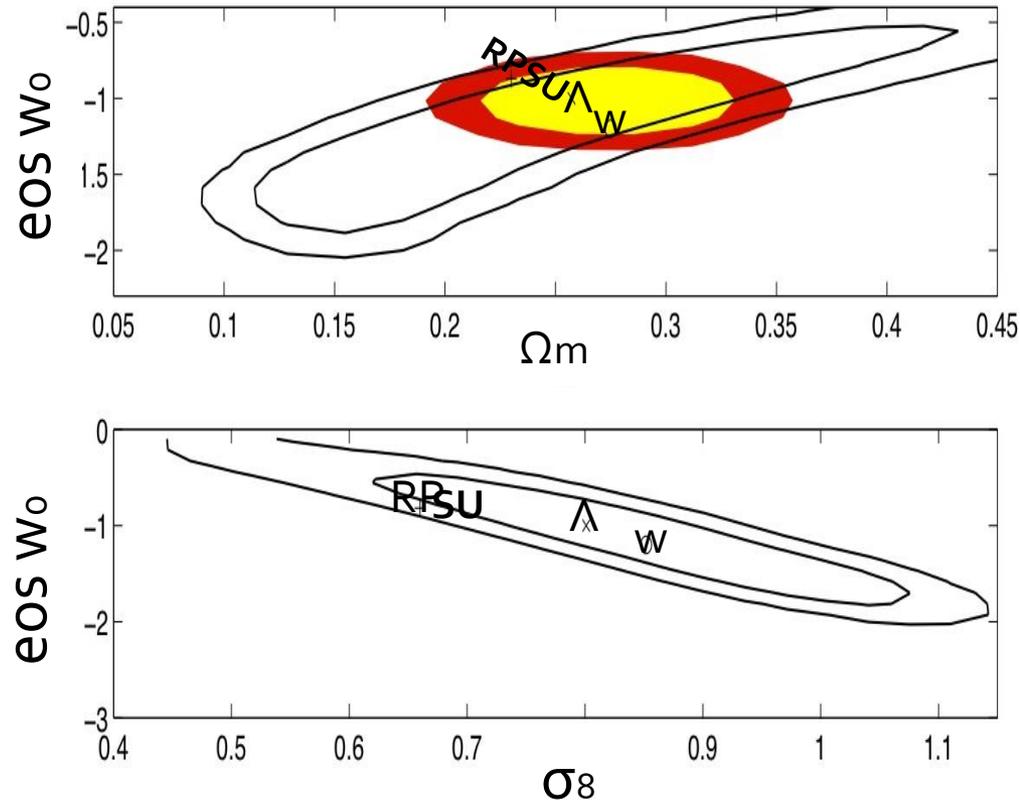
E
Q
U
A
T
I
O
N
S
P
O
S
S
I
B
L
E
S

C
H
A
M
P
S

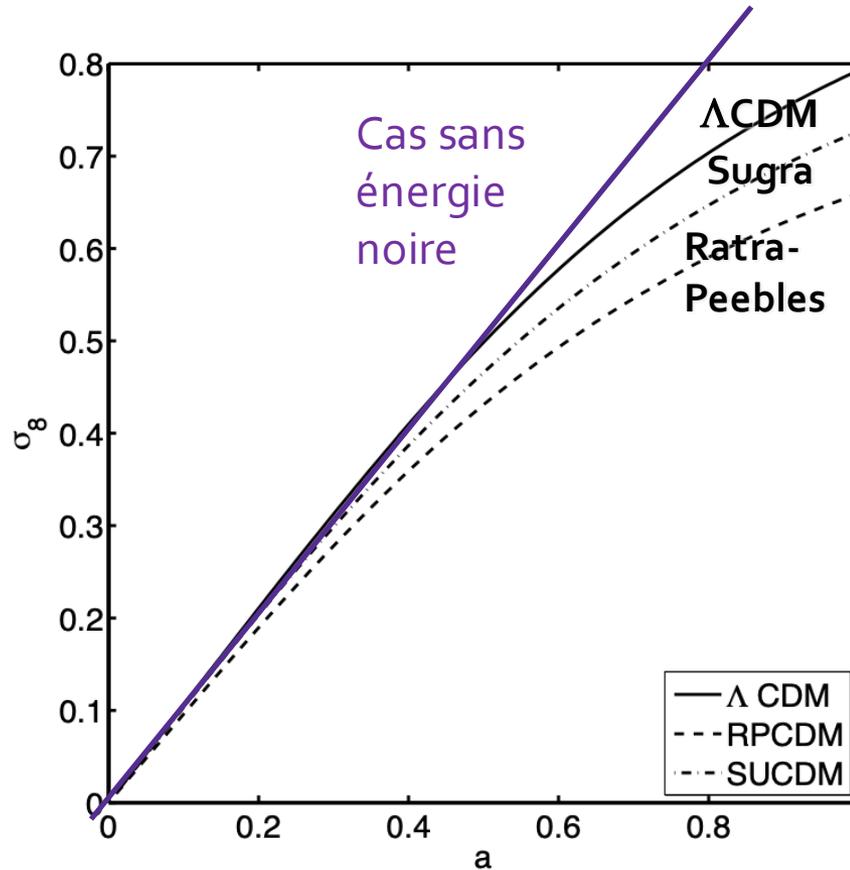
ENERGIE NOIRE

PRE-SELECTION DE MODELES D'ENERGIE NOIRE REALISTES

- **4 modèles**
 - Λ -CDM ($w=-1$)
 - Modèle de quintessence avec un potentiel de Ratra-Peebles RP-CDM ($w(z)>-1$)
 - Modèle de quintessence avec un potentiel SUGRA SU-CDM ($w(z)>-1$)
 - Modèle fantôme w-CDM ($w=-1.2$, $w_a=0$)
- **Pré-sélection de modèles réalistes:**
 - Compatibilité avec les analyses de type CMB et SNIa
- **Changer les équations d'état implique**
 - Plus petite quantité de matière si w moins négatif
 - Plus petite normalisation du spectre de puissance si w moins négatif



CALCUL ANALYTIQUE LINEAIRE

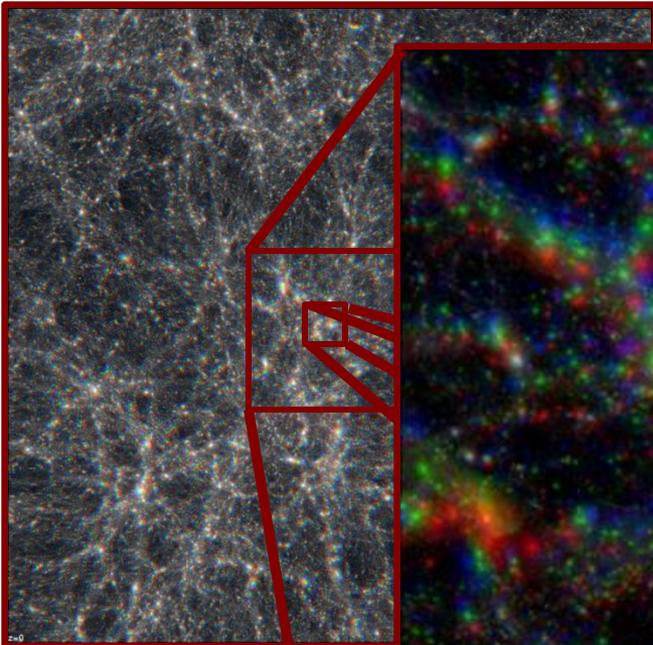


↓ w augmente
(devient moins négatif)

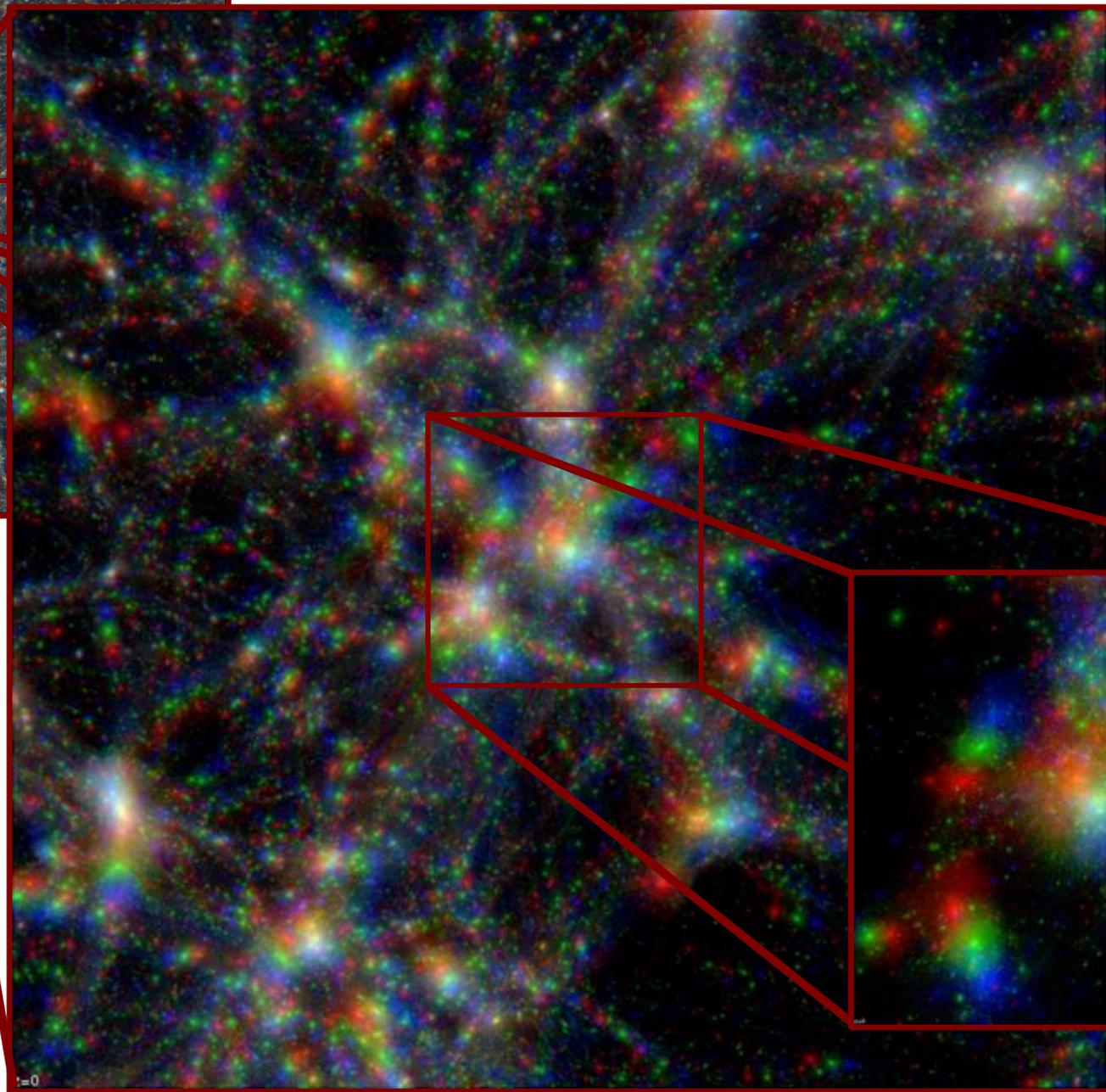
Alimi et al., 2010

- **Effet de l'énergie noire**

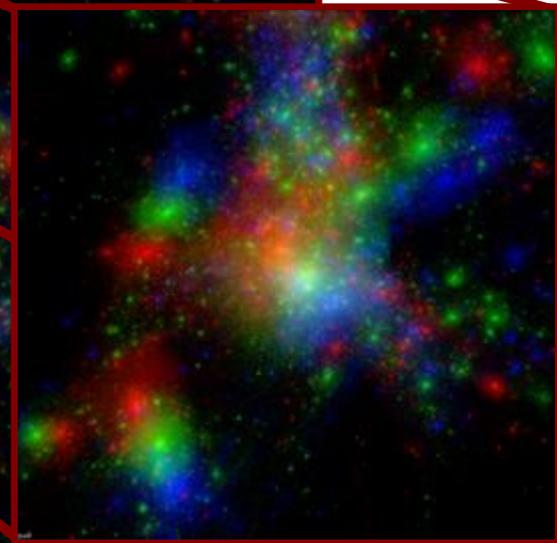
- Plus la quantité d'énergie noire est importante plus le taux de croissance linéaire est ralenti
- Plus l'équation d'état de l'énergie noire augmente plus le ralentissement arrive tôt



734 Mal



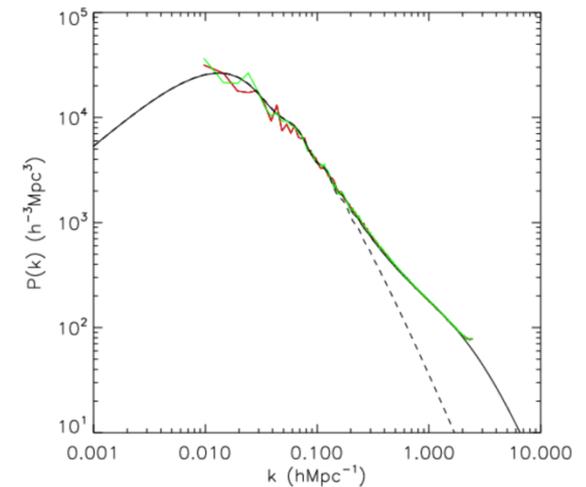
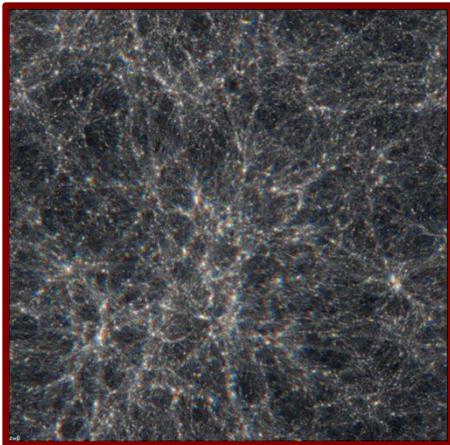
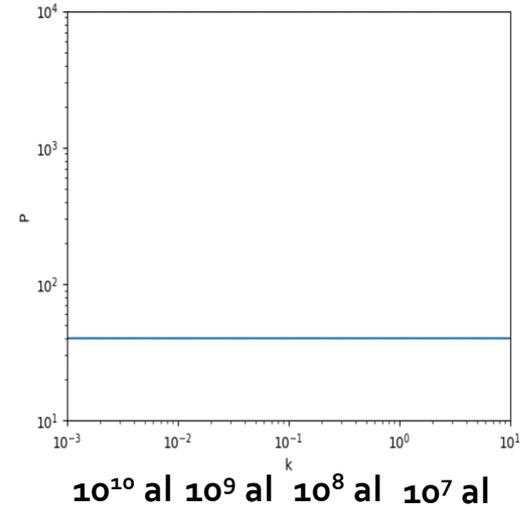
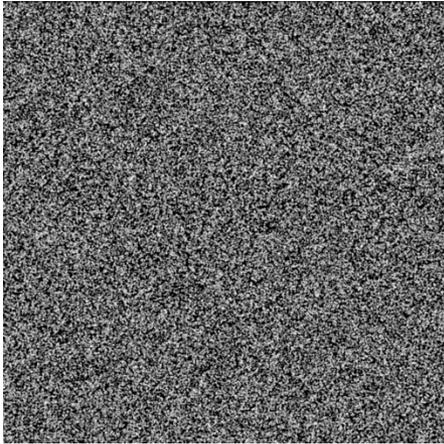
183 Mal



46 Mal

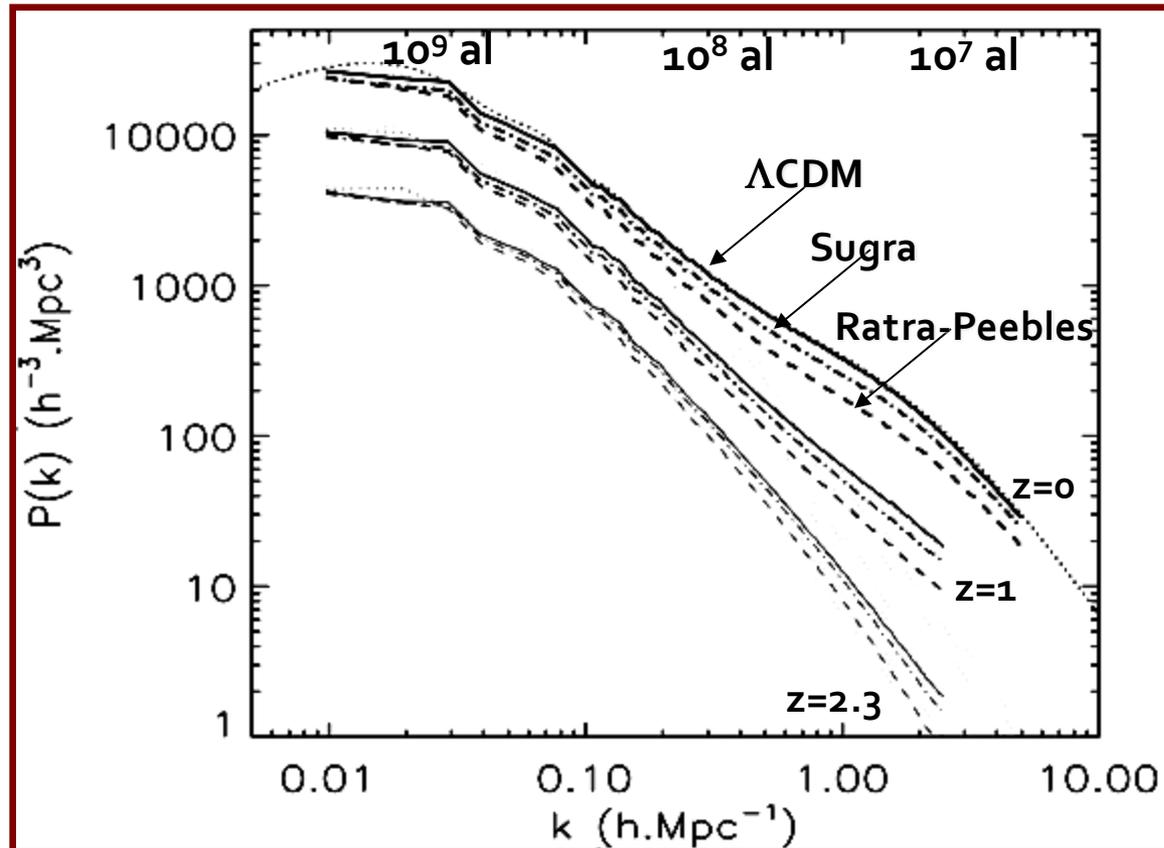
Λ CDM
Sugra
Ratra-Peebles

CARACTERISATION STATISTIQUE DE LA DISTRIBUTION DE MATIERE: LE SPECTRE DE PUISSANCE



- Le spectre donne la puissance du signal à une échelle donnée
- Il caractérise l'écart à une distribution aléatoire (i.e. de Poisson)

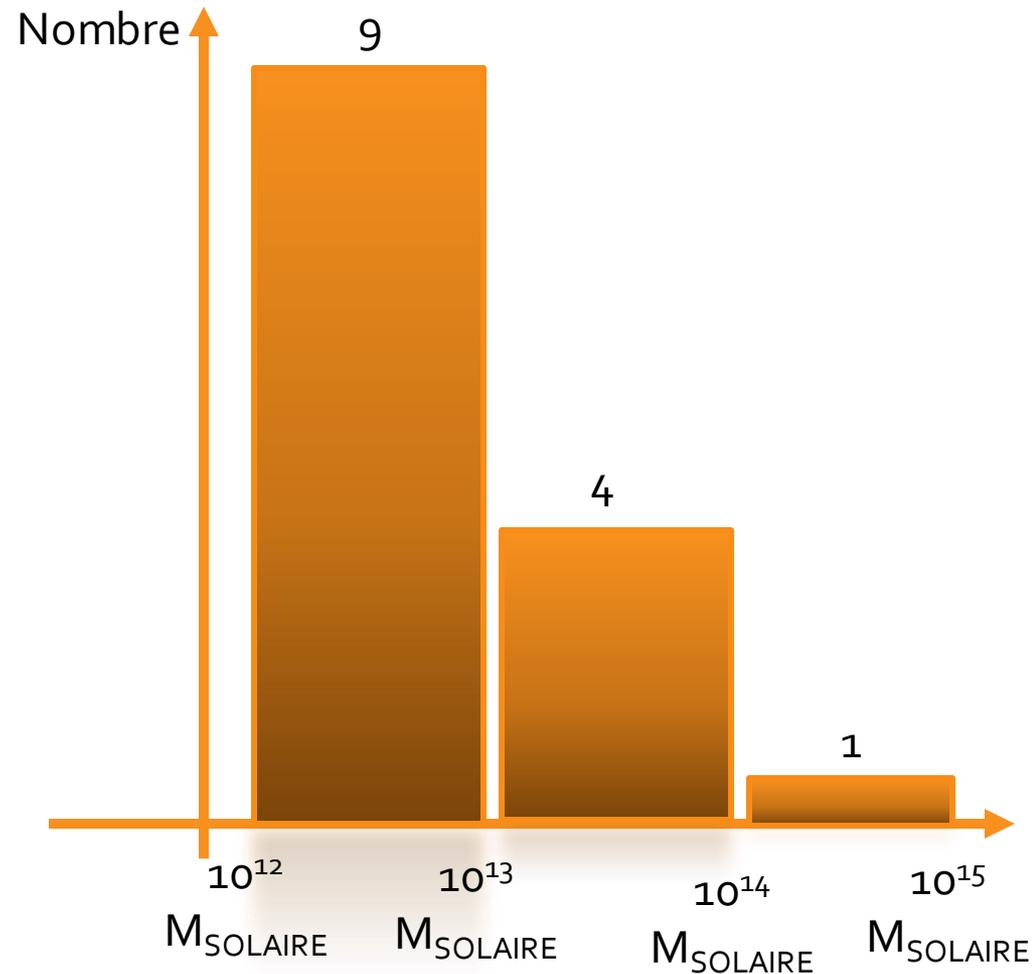
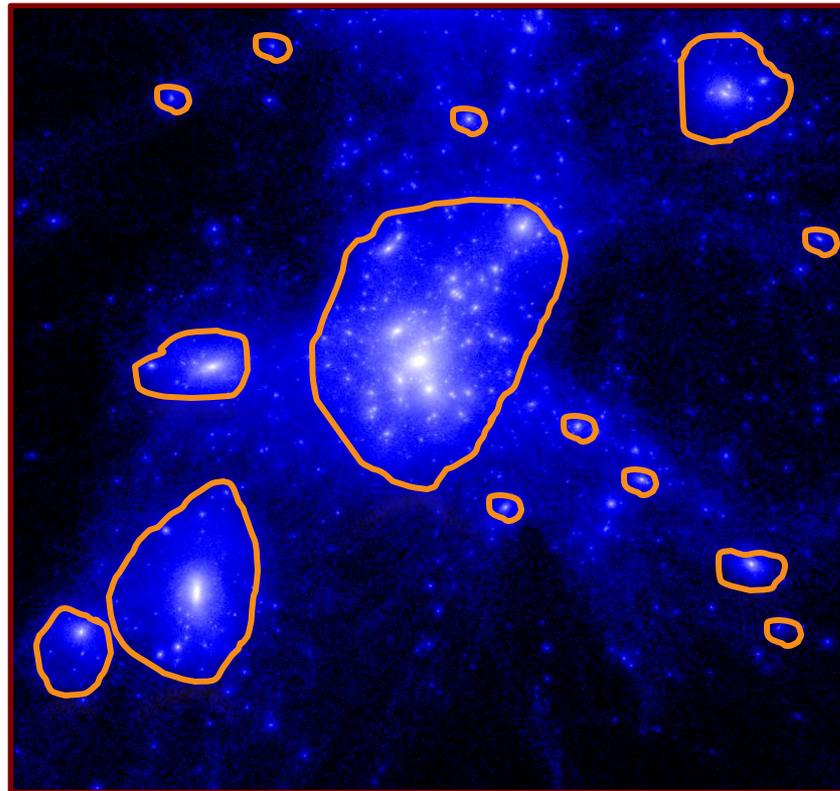
EMPREINTES DE L'ENERGIE NOIRE SUR LE SPECTRE DE PUISSANCE DE LA DENSITE DE MATIERE



Alimi et al.,
2010

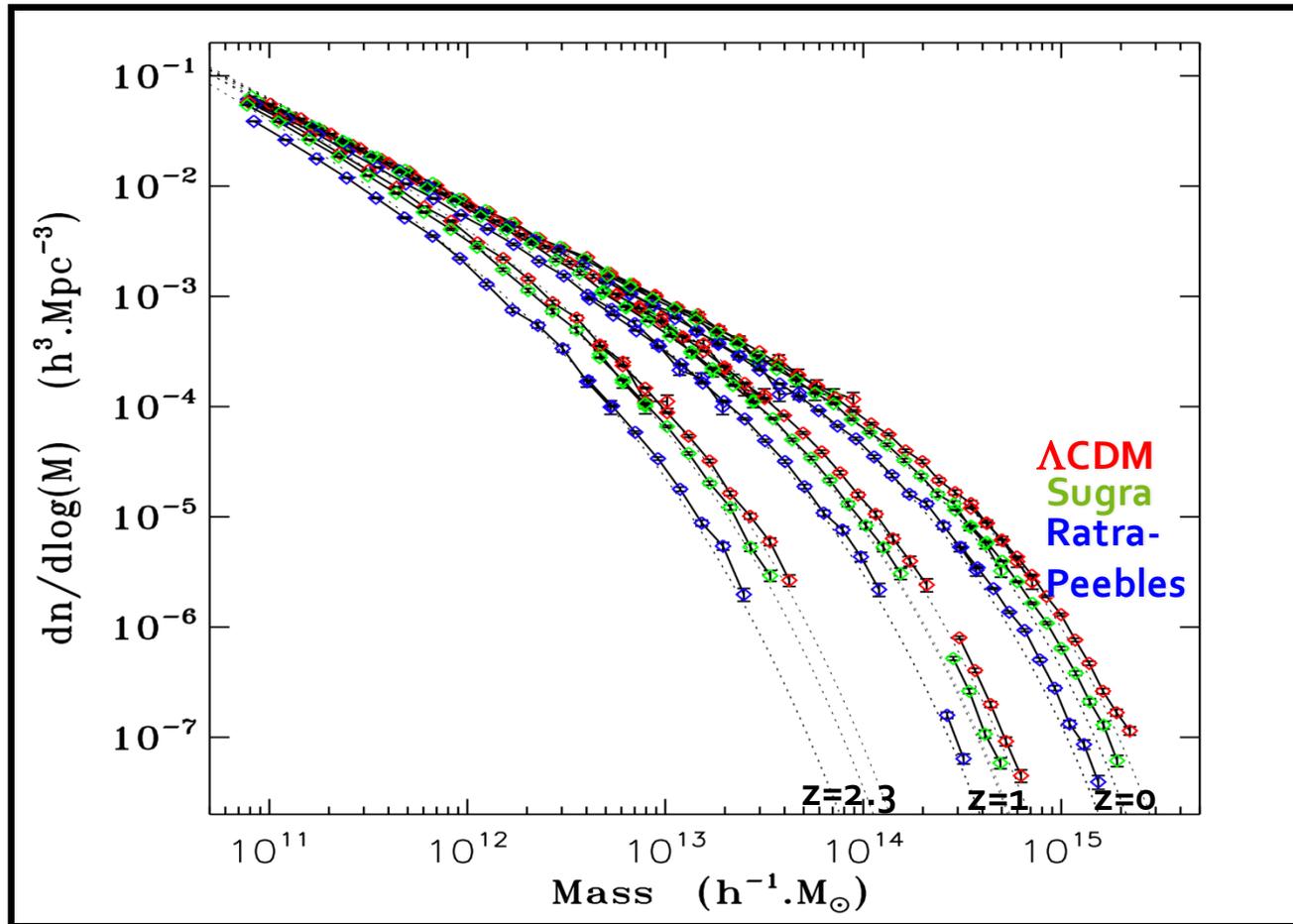
- Dans le régime linéaire (grandes échelles) => prédictions linéaires correctes
- Dans le régime non-linéaire (petites échelles) => différences amplifiées

CARACTERISATION STATISTIQUE DE LA DISTRIBUTION EN MASSE DES GROUPES DE PARTICULES APPELES HALOS



- Les halos sont détectés par une méthode de percolation ("amis-d'amis")
- Histogramme: nombre de halos par bin logarithmique de masse par unite de volume

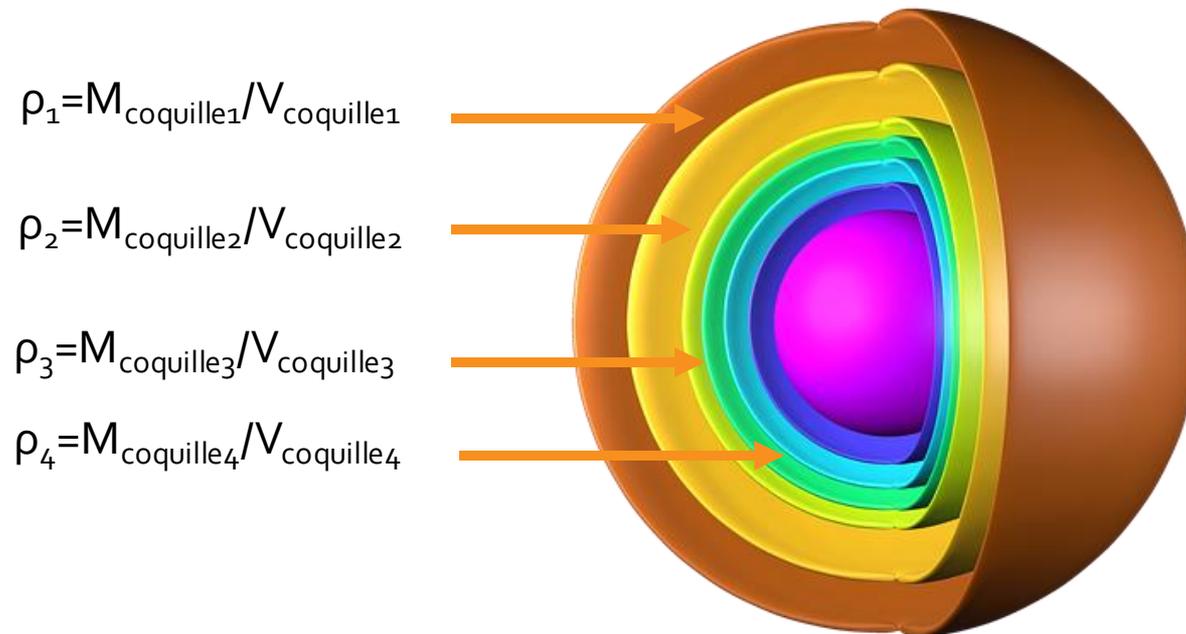
IMPACT DE L'ÉNERGIE NOIRE SUR LA FONCTION DE MASSE DES AMAS



Courtin et al., 2011

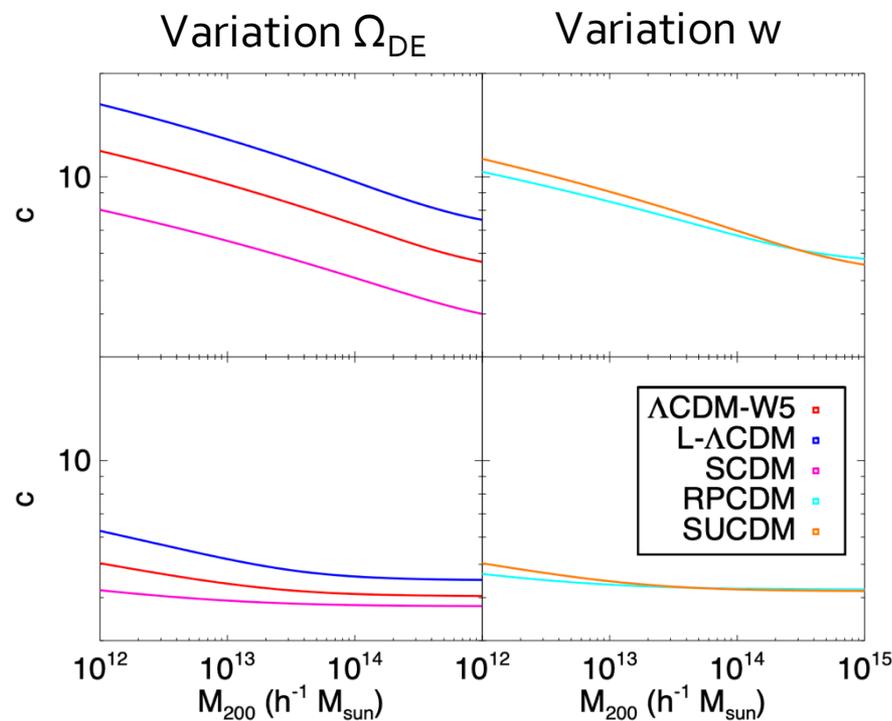
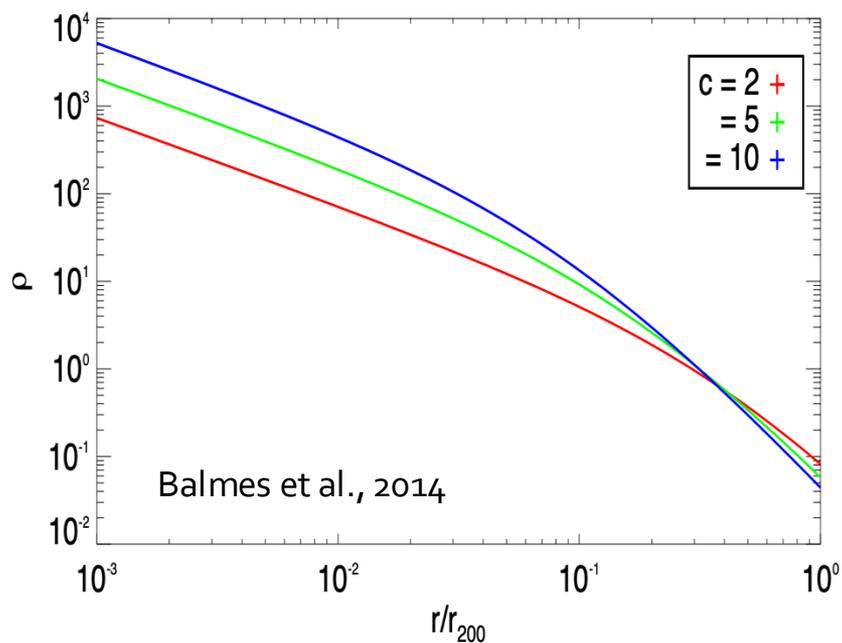
- L'énergie noire fait chuter la fonction de masse
- La partie à haute masse (amas de galaxies) est la plus sensible

PROFIL DES HALOS DE MATIERE NOIRE



Crédits: pixabay

IMPACT DE L'ÉNERGIE NOIRE SUR LE PROFIL DE DENSITÉ



- Concentration c : plus la masse est au centre plus la concentration est haute
- Concentration depend de quantité et nature de l'énergie noire
- Le profil enregistre l'histoire passée de la formation des grandes structures : c'est donc un fossile pour déterminer la nature de l'énergie noire...

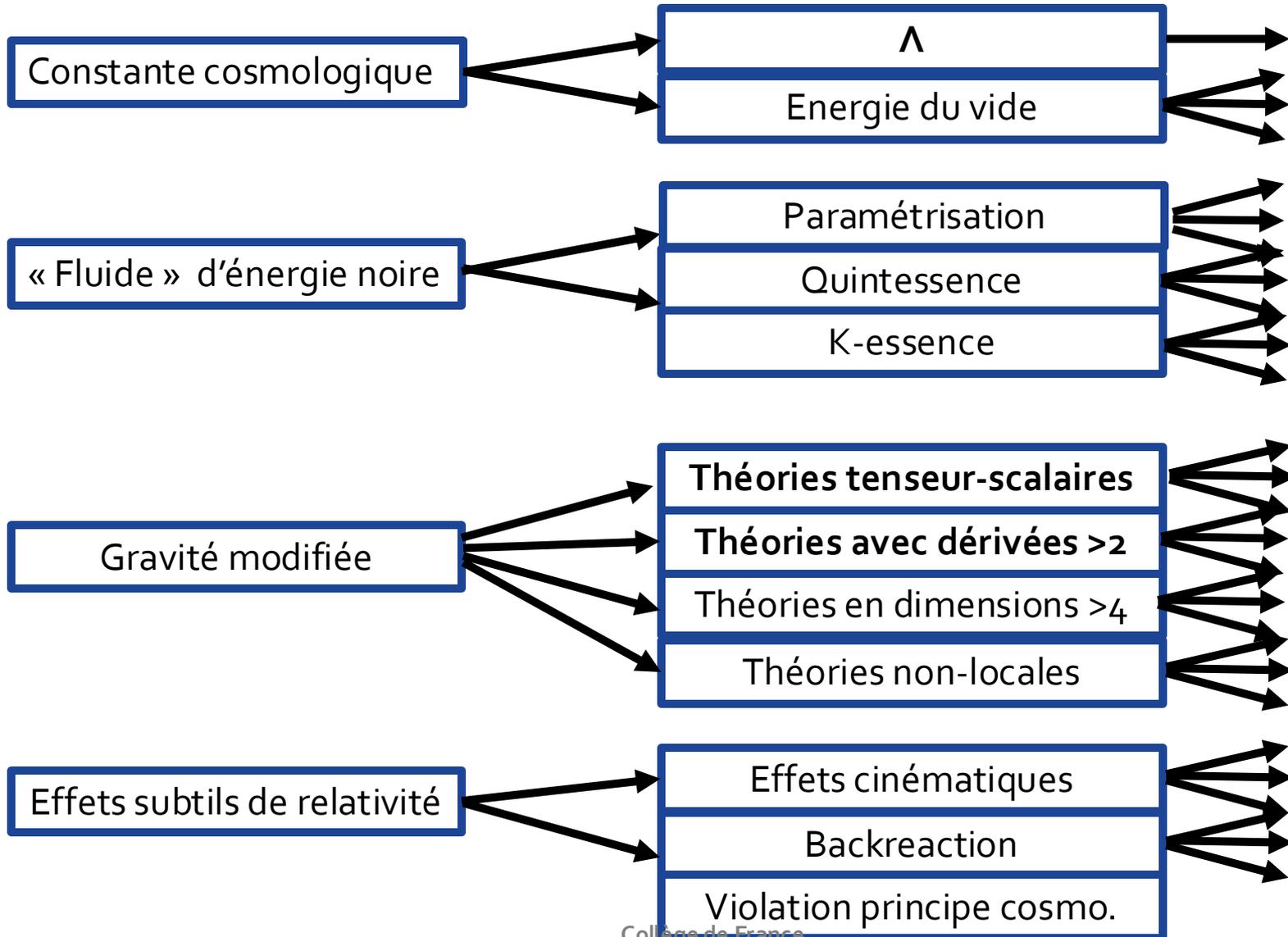
ILLUSTRATIONS SUR QUELQUES EXEMPLES

DES ECHELLES COSMOLOGIQUES AUX ECHELLES GALACTIQUES :

EMPREINTES DES THEORIES ALTERNATIVES DE LA GRAVITE

SUR LA FORMATION DES GRANDES STRUCTURES

NOMBREUSES THEORIES POSSIBLES POUR L'ENERGIE NOIRE



IMPACT DE LA GRAVITE MODIFIEE

- Modèle simple de gravité modifiée $f(R)$:

$$S_{\text{EH}} = \frac{c^4}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} [R - 2\Lambda] \longrightarrow \frac{c^4}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} [R + f(R)]$$

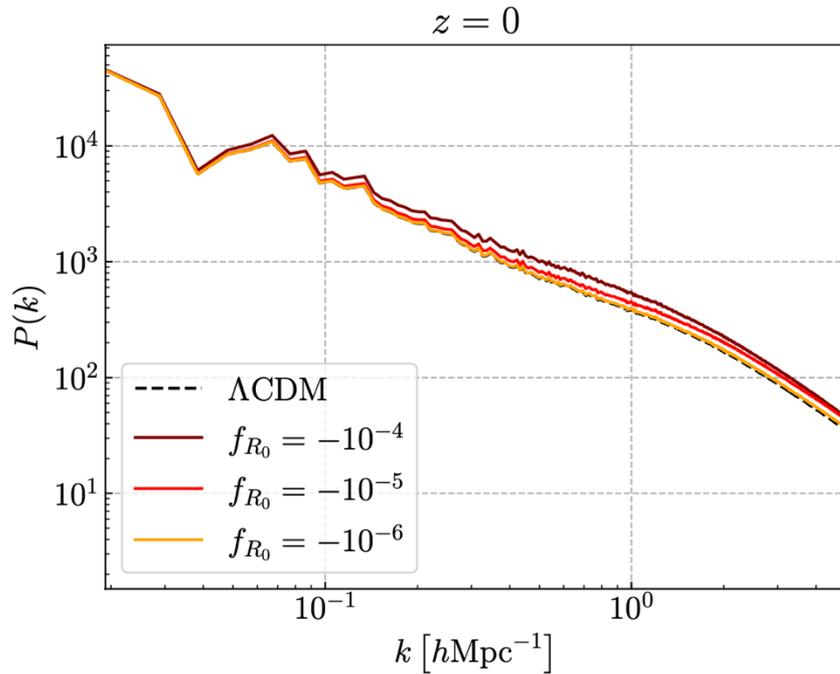
- Forme fonctionnelle: Hu & Sawicki => Ecrantage: permet de retrouver la relativité générale dans les régions dense (système solaire, etc) et pour le fond diffus cosmologique

$$f(R) \simeq -2\Lambda + \frac{f_{R_0}}{n} \frac{R_0^{n+1}}{R^n} \xrightarrow{R \gg R_0} -2\Lambda$$

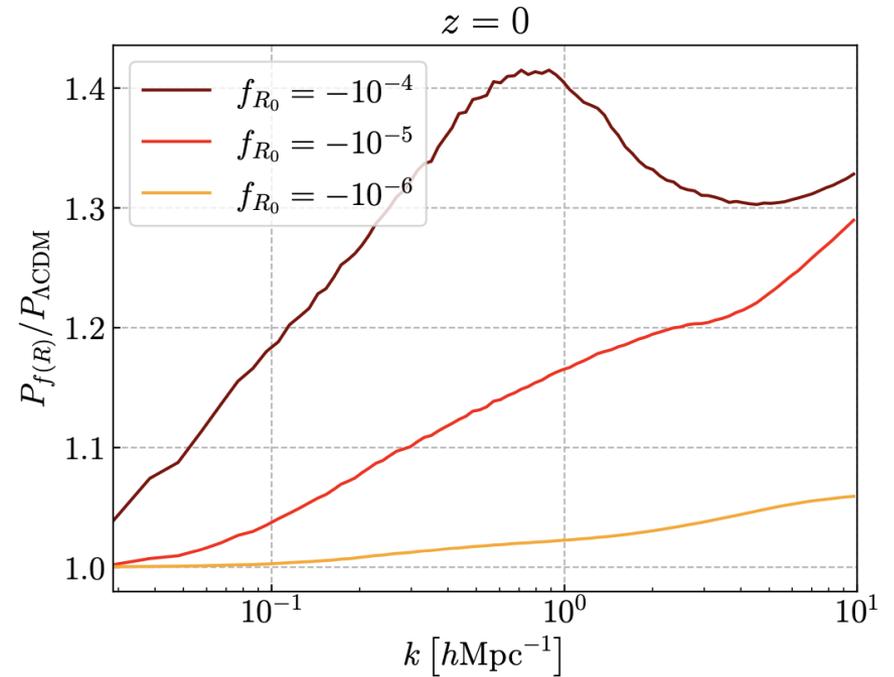
- Le paramètre principal est fR_0 qui caractérise l'intensité de la déviation à la relativité générale
- Résolution de « l'équation de Poisson » pour le champ scalaire

IMPACT DE LA GRAVITE MODIFIEE SUR LE SPECTRE DE PUISSANCE

Credits: Saez-Casares+23



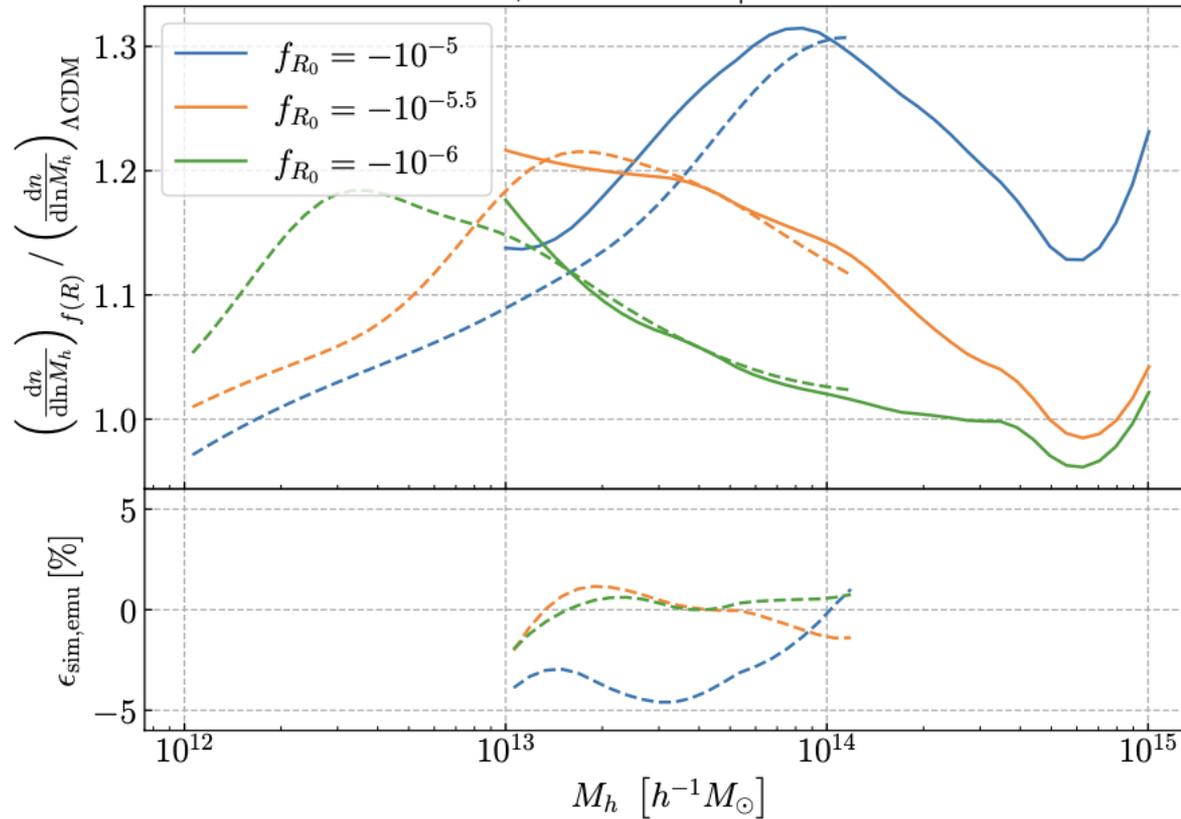
Gauche: spectre de puissance



Droite: facteur d'amplification $P_{f(R)}/P_{\Lambda\text{CDM}}$

- Amplification du spectre de puissance à petite échelle

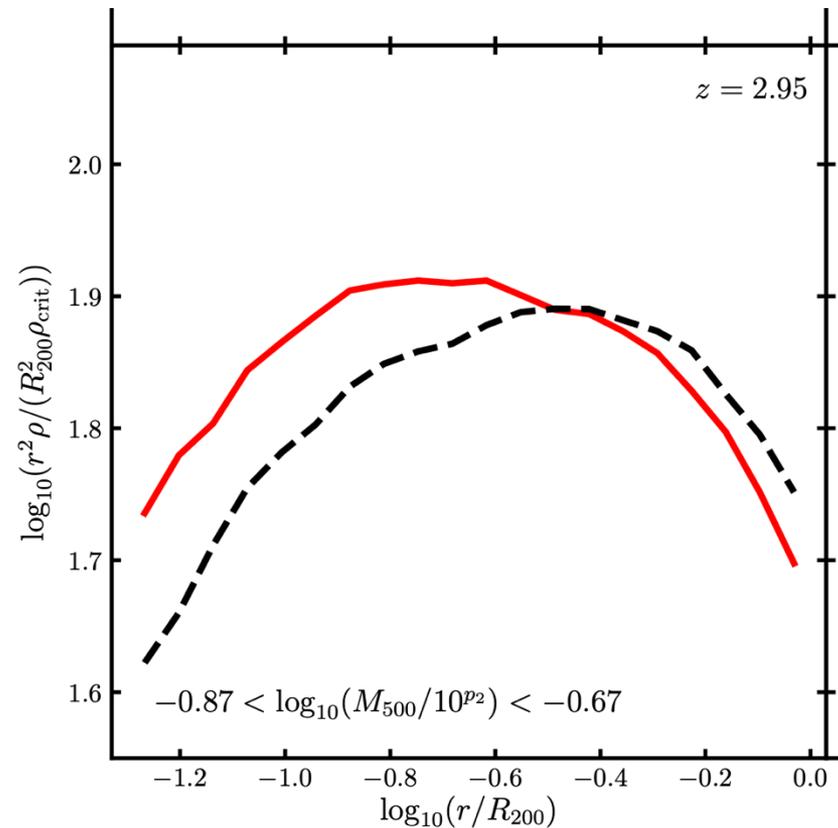
IMPACT DE LA GRAVITE MODIFIEE SUR LA FONCTION DE MASSE



Credits: Saez-Casares+24

- Amplification de la fonction de masse
- Signature non triviale du fait de l'écrantage plus important dans les grands halos

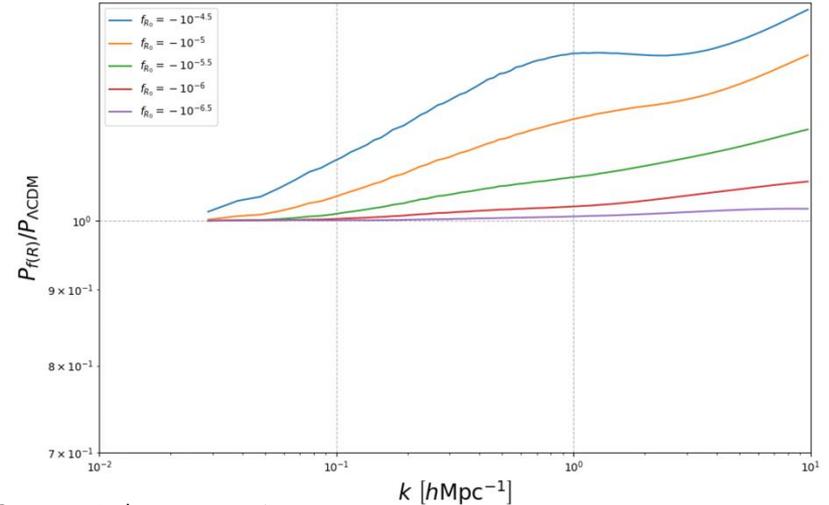
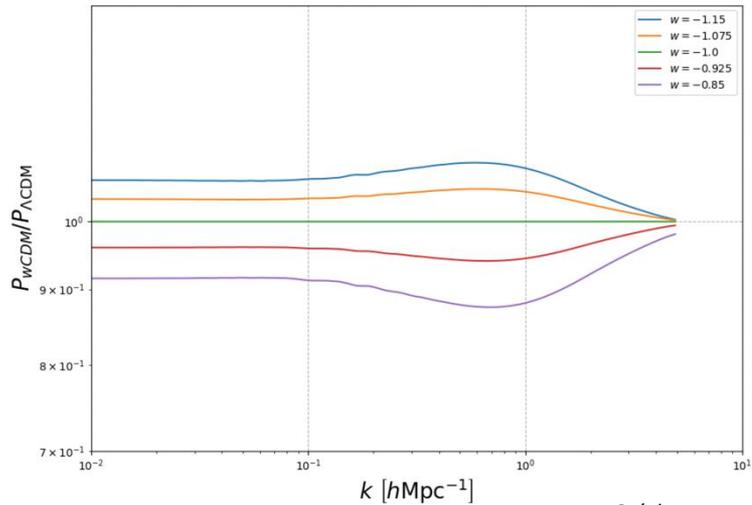
IMPACT DE LA GRAVITE MODIFIEE SUR LE PROFIL



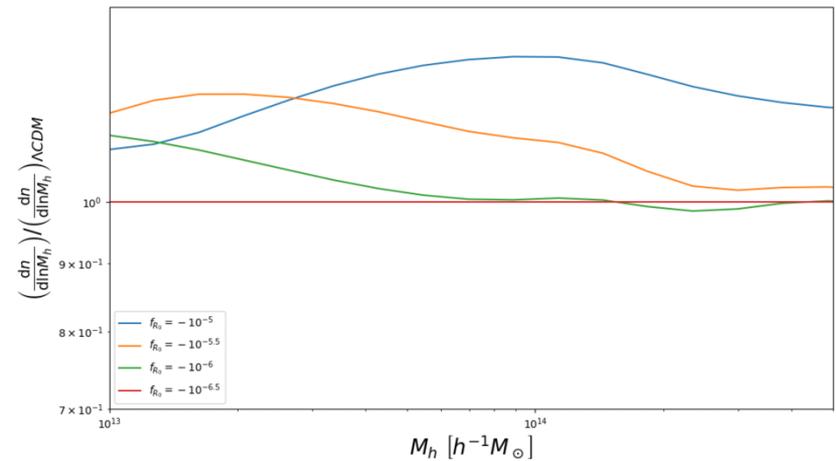
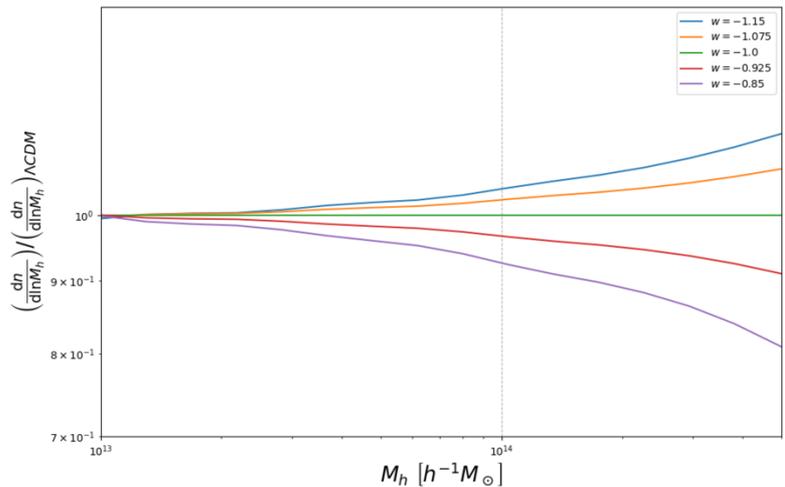
Mitchell et al., 2020

- Profil plus piqué au centre
- L'effet dépend de la masse du halo car les halos plus massifs sont écrantés

RESUME: IMPACT ENERGIE NOIRE ET GRAVITE MODIFIEE SUR LE SPECTRE DE PUISSANCE ET LA FONCTION DE MASSE



Crédits: e-MANTIS (Saez-Casares et al. 2023, 2024)

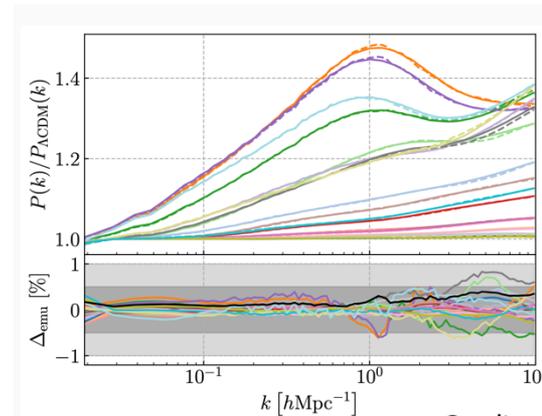
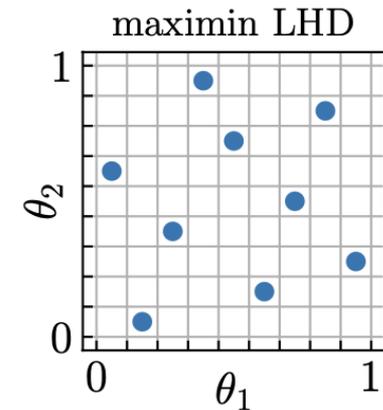
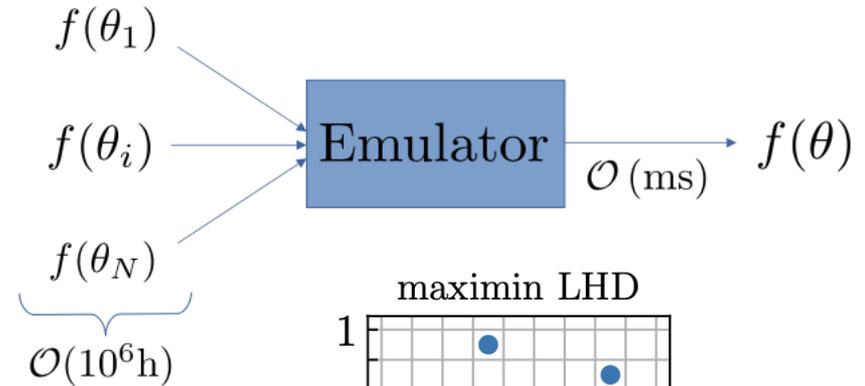


- L'énergie noire et la gravité modifiée présentent des signatures différentes qui pourront être recherchées dans les relevés en cours et à venir : DESI, Euclid, Rubin LSST,...

OUVERTURE: QUELQUES SUJETS DE RECHERCHE ACTUELS POUR ALLER PLUS LOIN

COMMENT EXPLORER EFFICACEMENT L'ESPACE DES PARAMETRES AVEC UN EMULATEUR ?

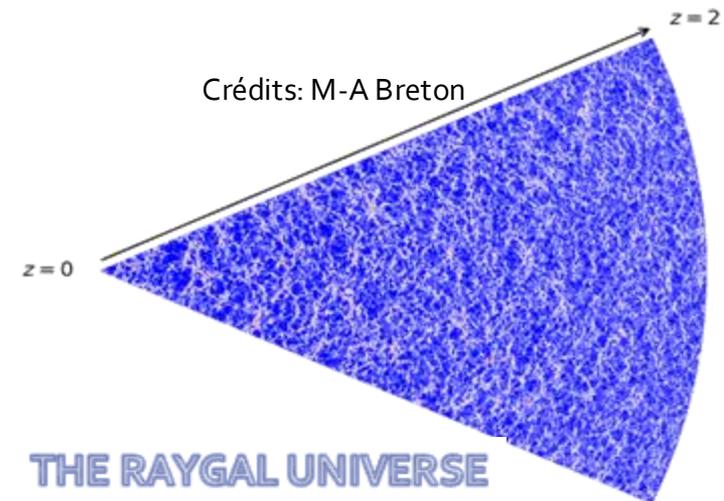
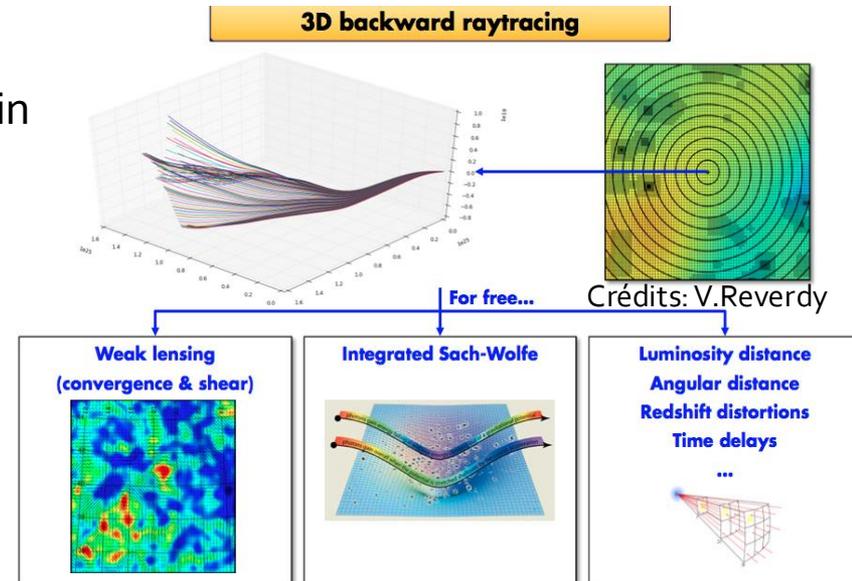
- Simulations très longues => émulateur (=interpolateur avancé, s'approche des techniques de « machine learning »)
- Paver l'espace des paramètres: quand les chercheurs s'inspirent du sudoku...
- Précision atteinte de qq% en qq ms



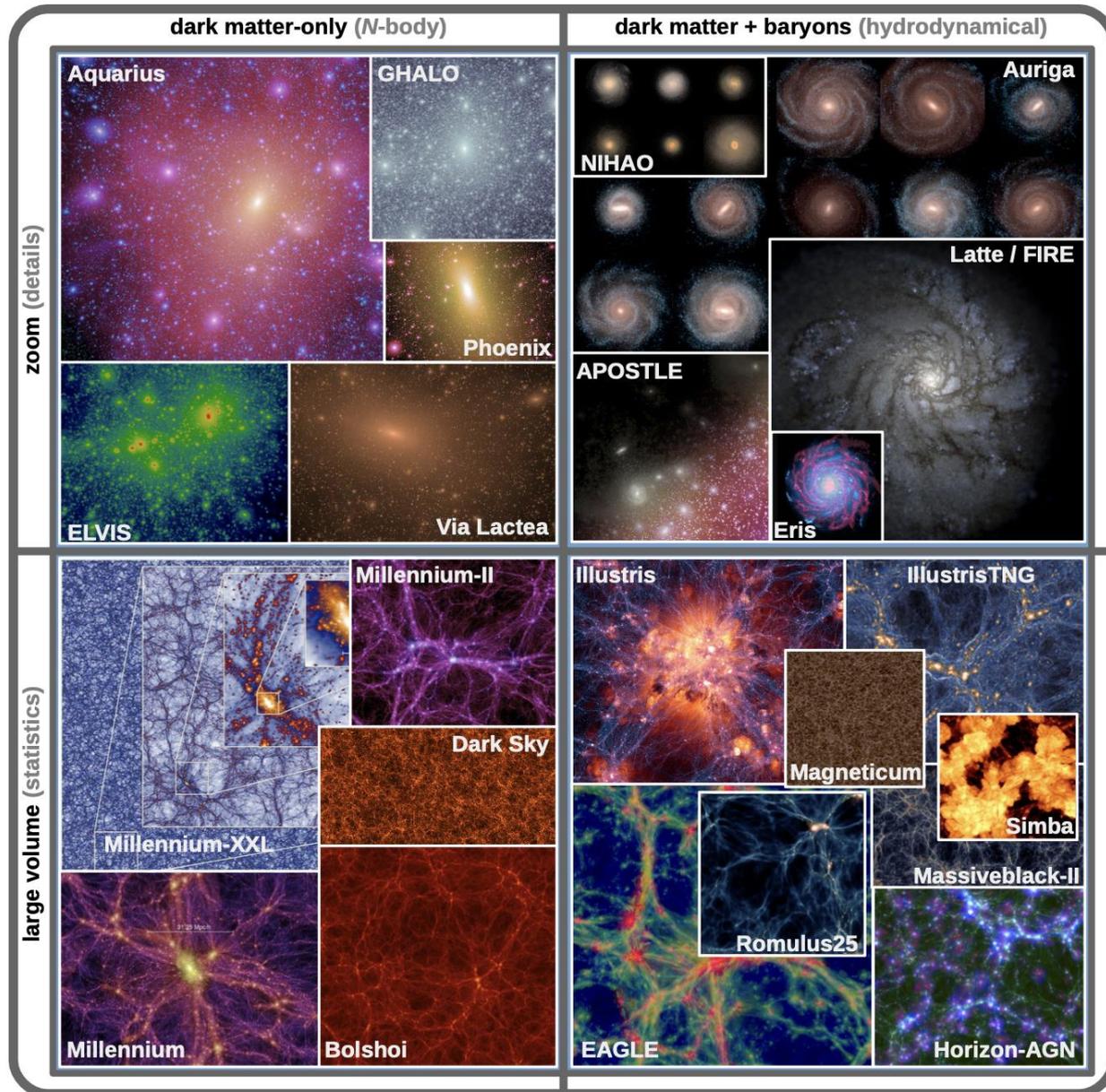
Credits: Saez-Casares+23

QUEL EST LE LIEN ENTRE L'UNIVERS REEL ET L'UNIVERS OBSERVE ?

- Méthode: un observateur virtuel est placé au sein de la simulation
- Lancer de rayons: Propagation de milliards de rayons selon équations relativité générale
- Toutes les sources sont replacées telles que vu par un observateur virtuel
- Calcul fin des différents effets: lentilles gravitationnelles, distortions de l'espace des redshifts, etc.



COMMENT PRENDRE EN COMPTE L'EFFET DES BARYONS AUX ECHELLES GALACTIQUES?



Credits:
Vogelsberger et al.,
2020

EUCLID ET AUTRES PERSPECTIVES

COURS

16:45 - 17:45 ⌚

Perspectives à dix ans

Françoise Combes

13
JAN
2025

📖 Le secteur sombre de l'Univers : matière et énergie noires

📍 Amphithéâtre Marguerite de Navarre, Site Marcelin Berthelot

SÉMINAIRE

17:45 - 18:45 ⌚

L'énergie noire avec Euclid

Florent Leclercq

13
JAN
2025

📖 Le secteur sombre de l'Univers : matière et énergie noires

📍 Amphithéâtre Marguerite de Navarre, Site Marcelin Berthelot

CONCLUSION

PROBLEMATIQUE:

- Nombreuses théories pour l'énergie noire: Λ , fluide d'énergie noire, gravité modifiée, ...
- Nombreux relevés de galaxies en cours et à venir : DESI, Euclid, Rubin LSST, ...
- Simulations cosmologiques: nécessaire pour construire un pont entre théorie et observations

SIMULATIONS:

- A grande échelle matière noire et gravité dominant=> simulation N-corps (Vlasov-Poisson)
- Optimisations & calcul haute performance => grand nombre de part. ($>10^{12}$) + exploration espace des théories

EMPREINTES ENERGIE NOIRE ET GRAVITE MODIFIEE SUR GRANDES STRUCTURES:

- Energie noire: impact sur grandes échelles (cosmiques) qui cascade aux petites échelles (galactiques)
- Gravité modifiée: impact sur échelles intermédiaires et petites + effet non-trivial écrantage

OUVERTURE:

- Exploration de l'espace des paramètres: émulateurs et « sudoku »
- Lien entre univers réel et univers observé: lancer de milliards de rayons
- Effet des baryons aux échelles galactiques: vers les simulations hydrodynamiques pour différents modèles d'énergie noire...
- Euclid et autres perspectives (la semaine prochaine...)

MERCI DE VOTRE ATTENTION