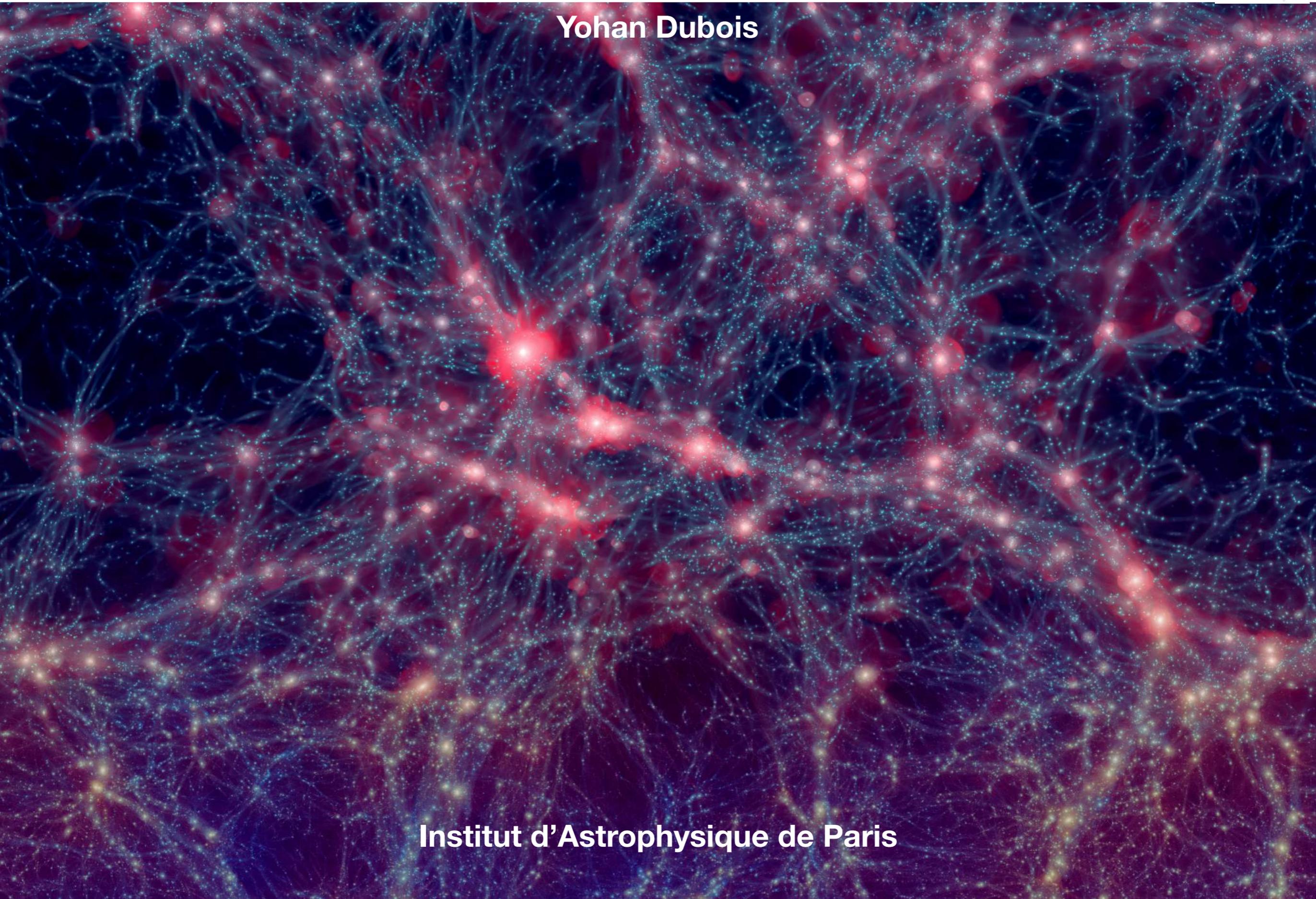


Yohan Dubois



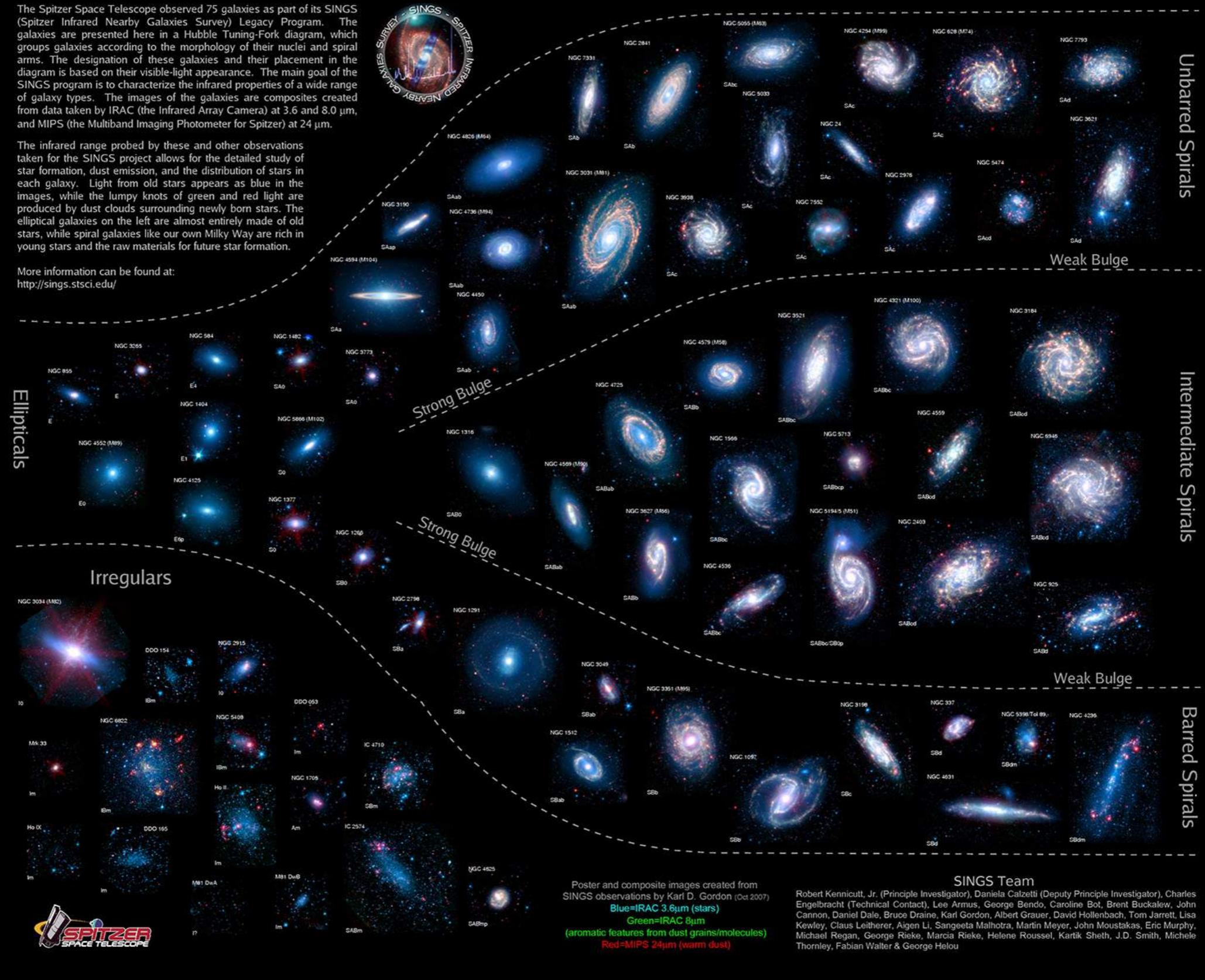
Pouvons-nous comprendre la variété morphologique des galaxies ?

The Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey (SINGS) Hubble Tuning-Fork

The Spitzer Space Telescope observed 75 galaxies as part of its SINGS (Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey) Legacy Program. The galaxies are presented here in a Hubble Tuning-Fork diagram, which groups galaxies according to the morphology of their nuclei and spiral arms. The designation of these galaxies and their placement in the diagram is based on their visible-light appearance. The main goal of the SINGS program is to characterize the infrared properties of a wide range of galaxy types. The images of the galaxies are composites created from data taken by IRAC (the Infrared Array Camera) at 3.6 and 8.0 μm , and MIPS (the Multiband Imaging Photometer for Spitzer) at 24 μm .

The infrared range probed by these and other observations taken for the SINGS project allows for the detailed study of star formation, dust emission, and the distribution of stars in each galaxy. Light from old stars appears as blue in the images, while the lumpy knots of green and red light are produced by dust clouds surrounding newly born stars. The elliptical galaxies on the left are almost entirely made of old stars, while spiral galaxies like our own Milky Way are rich in young stars and the raw materials for future star formation.

More information can be found at:
<http://sings.stsci.edu/>



Poster and composite images created from SINGS observations by Karl D. Gordon (Oct 2007)
 Blue=IRAC 3.6 μm (stars)
 Green=IRAC 8 μm (aromatic features from dust grains/molecules)
 Red=MIPS 24 μm (warm dust)

SINGS Team

Robert Kennicutt, Jr. (Principle Investigator), Daniela Calzetti (Deputy Principle Investigator), Charles Engelbracht (Technical Contact), Lee Armus, George Bendo, Caroline Bot, Brent Buckalew, John Cannon, Daniel Dale, Bruce Draine, Karl Gordon, Albert Grauer, David Hollenbach, Tom Jarrett, Lisa Kewley, Claus Leitherer, Aigen Li, Sangeeta Malhotra, Martin Meyer, John Moustakas, Eric Murphy, Michael Regan, George Rieke, Marcia Rieke, Helene Roussel, Kartik Sheth, J.D. Smith, Michele Thornley, Fabian Walter & George Helou





L'une est le ciel réel
L'autre est un ciel factice produit par une simulation (celle de la vidéo)

Pourquoi des simulations numériques pour comprendre l'Univers ?

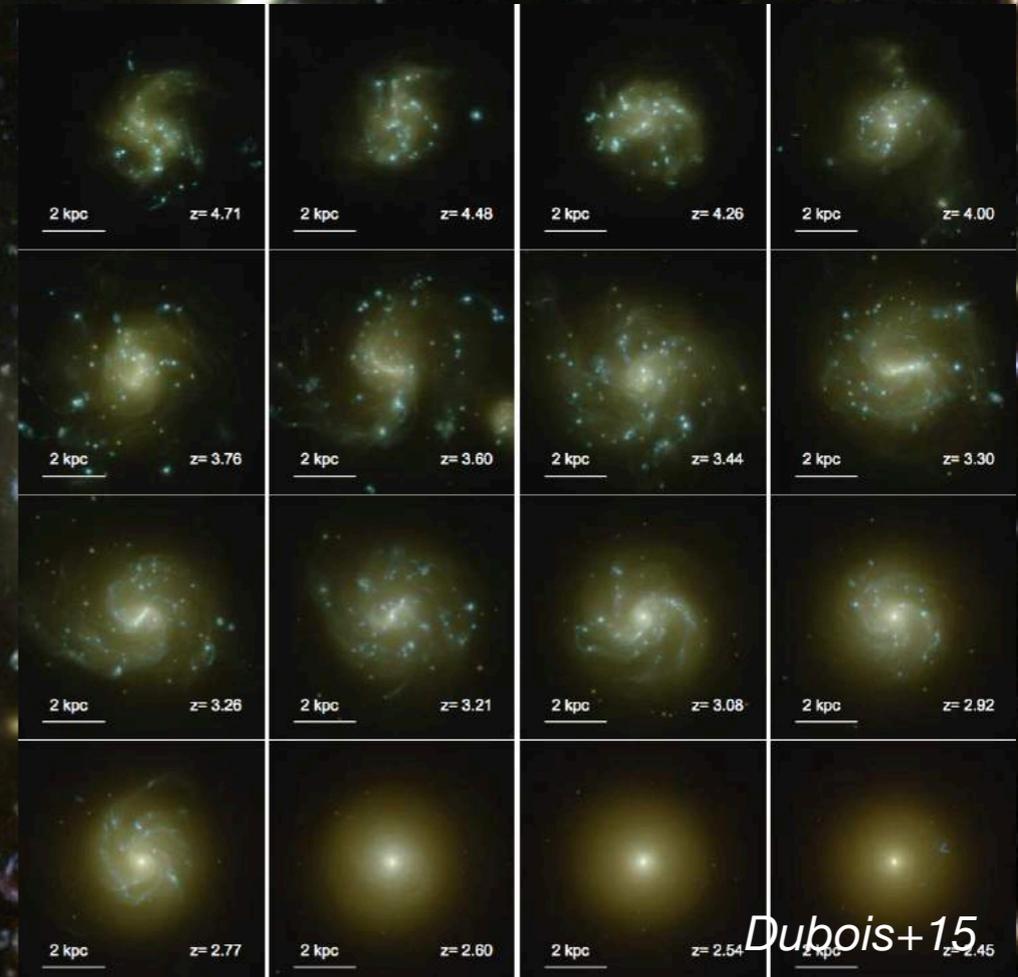
Les galaxies évoluent sur quelques dizaines ou centaines de millions d'années

Une galaxie observée aujourd'hui, demain ou dans 1 siècle aura le même aspect

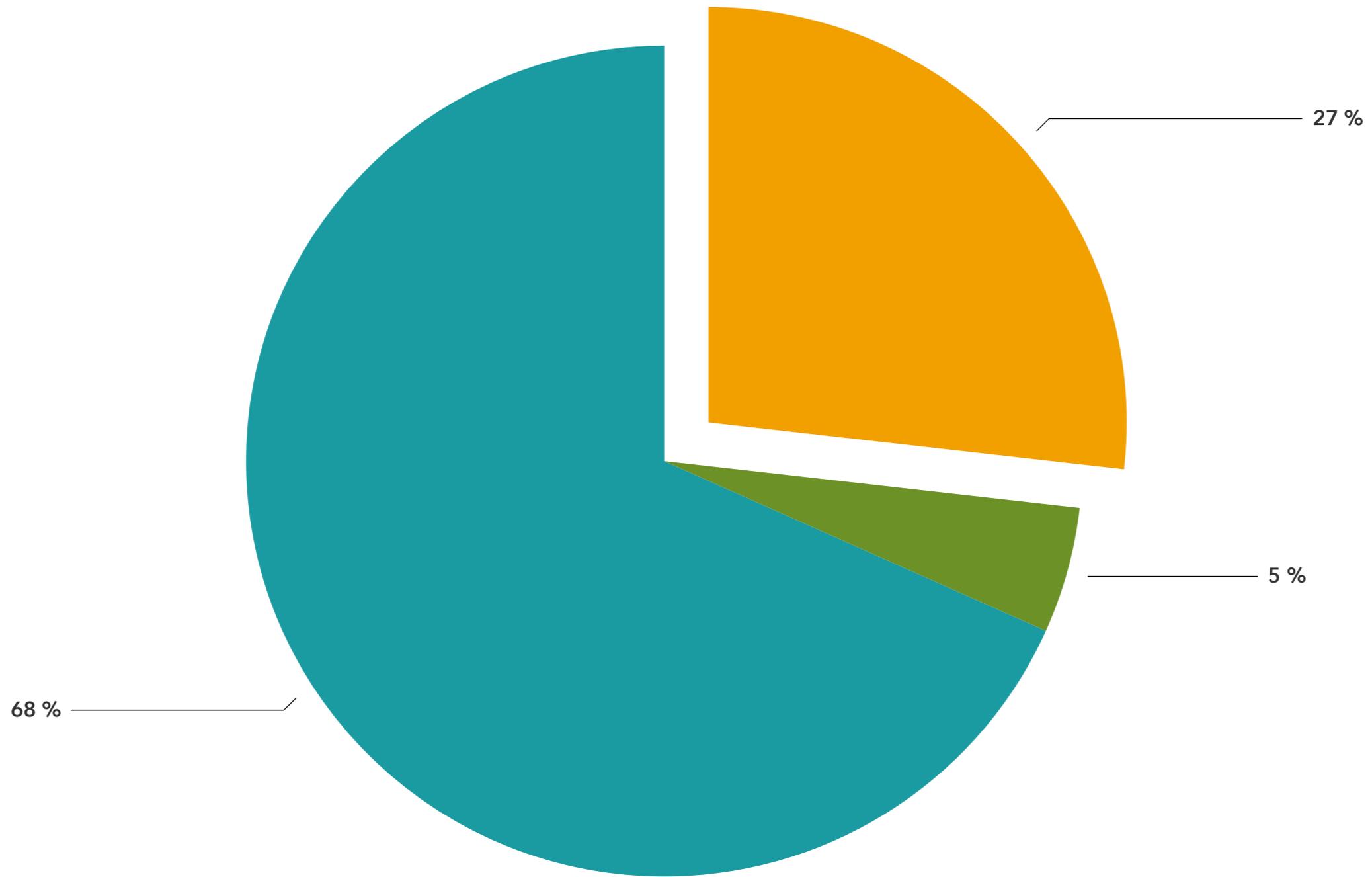
-> L'observation des galaxies est une photographie du ciel

Comprendre l'évolution des galaxies en prenant de multiples photographies des galaxies pour comprendre leur évolution

Et faire des simulations numériques de leur évolution pour interpréter ce qu'on observe

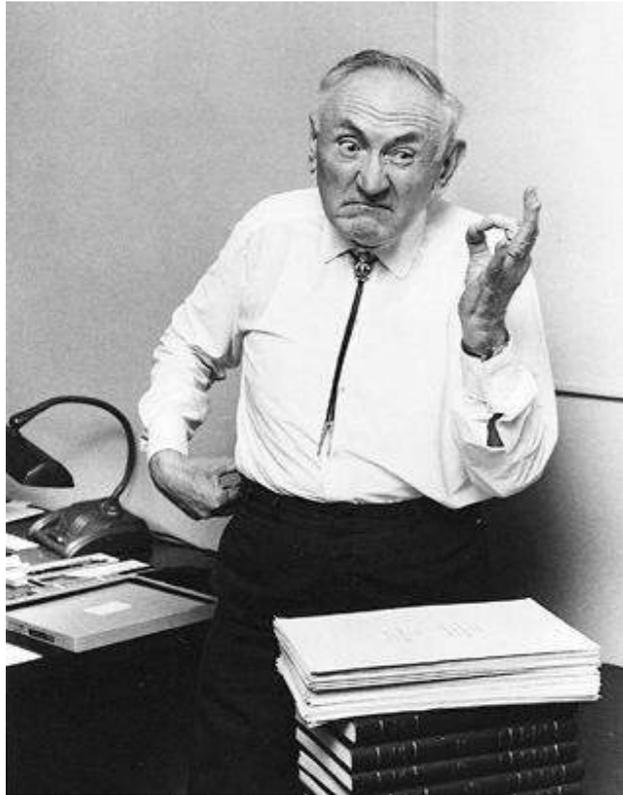


Bilan en énergie de l'Univers



● Matière noire ● Matière ordinaire ● Energie noire

Première preuve observationnelle de la matière noire



Découverte par Zwicky en 1933

En mesurant la vitesse des galaxies d'un amas, je peux connaître la quantité de masse totale dans cet amas...

$$\begin{array}{l} \text{constante} \\ \text{gravitationnelle} \\ \downarrow \\ \text{masse} \\ \text{vitesse} \\ V^2 = \frac{GM}{R} \\ \text{distance} \end{array}$$

Amas de galaxies Coma



La masse dans l'amas de Coma vaut 5 fois la masse d'étoiles que je peux observer

Où est le reste ???

Puis ce résultat fantastique a été ignoré pendant 40 ans...

« Des affirmations extraordinaires nécessitent des preuves extraordinaires »

C. Sagan

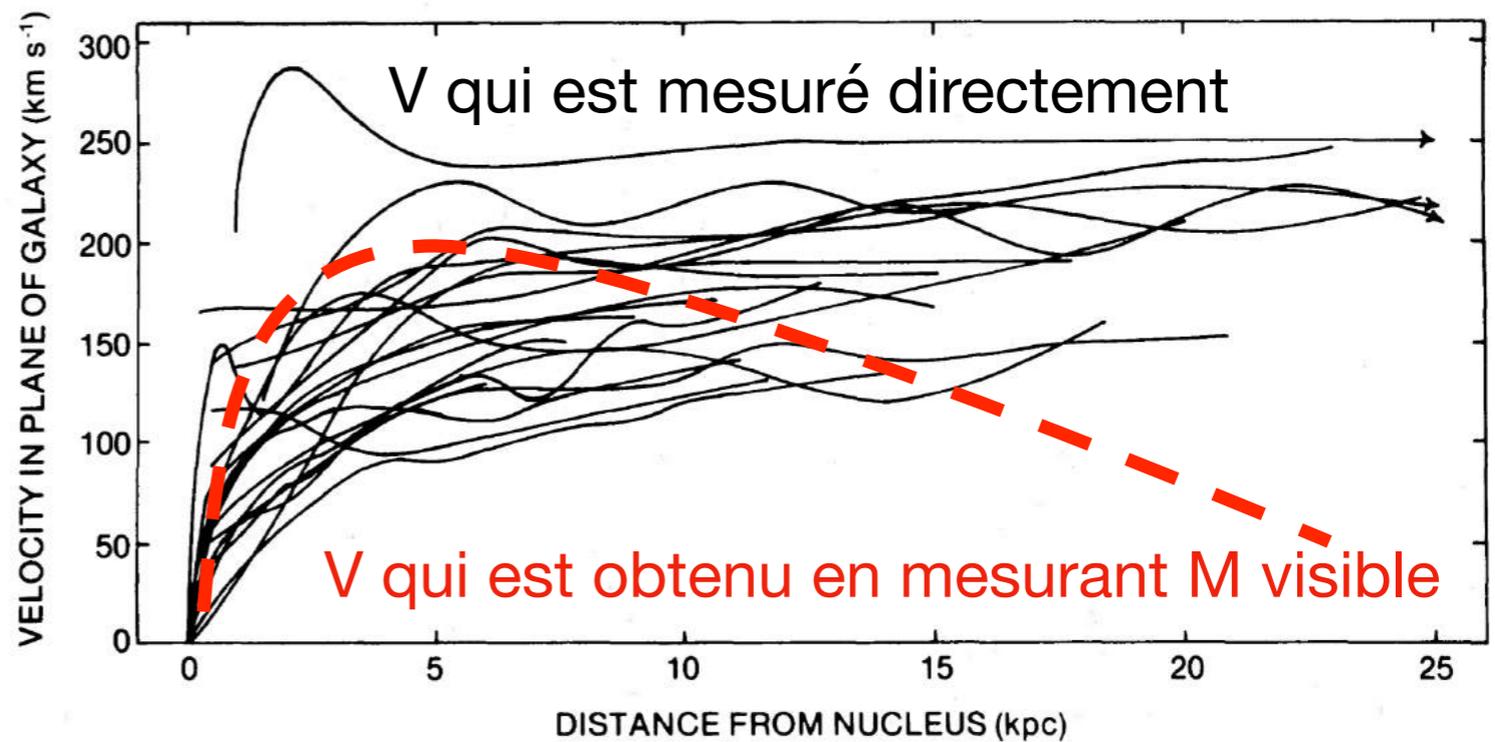
Mesure des courbes de rotation des galaxies et matière noire



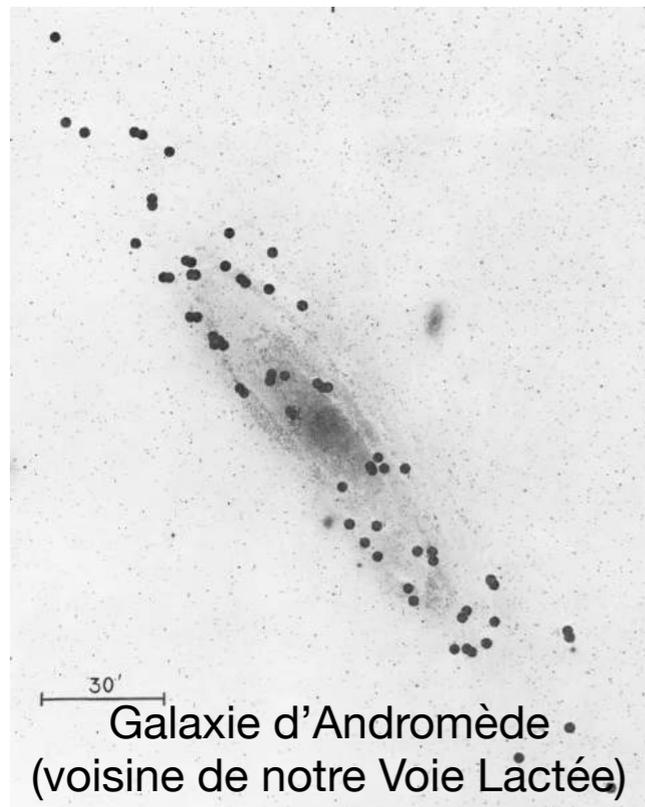
Rubin+ 1970

En mesurant la courbe de rotation dans les galaxies, je peux connaître la distribution de masse totale

$$V^2 = \frac{GM}{R}$$



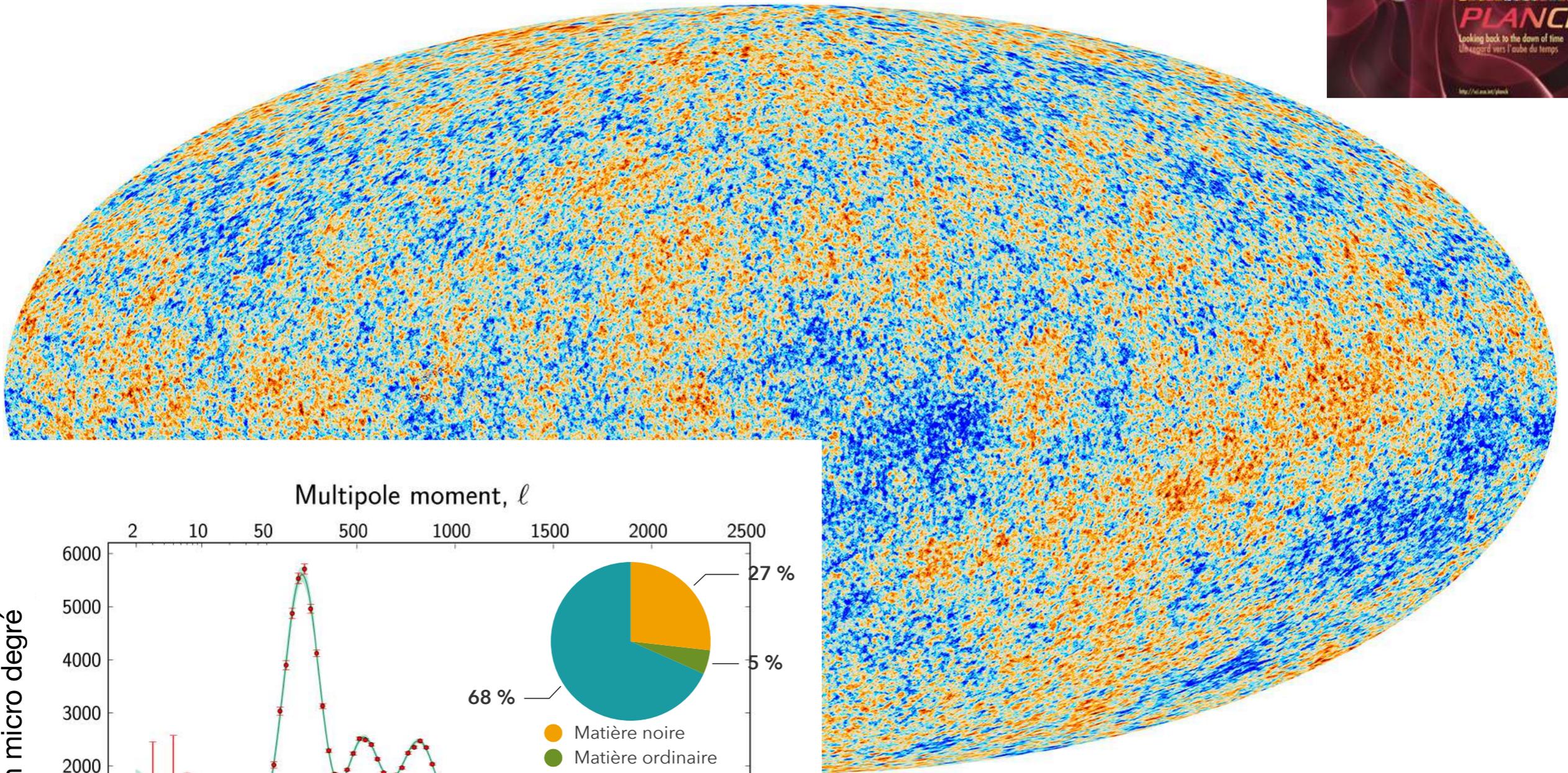
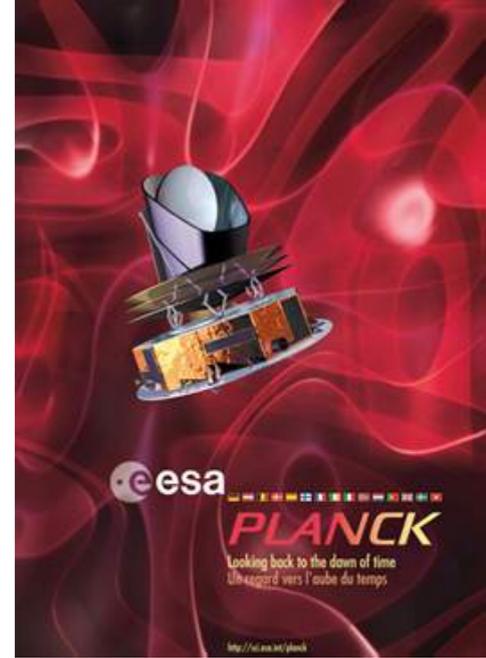
Il y a plus de masse que la seule masse visible !



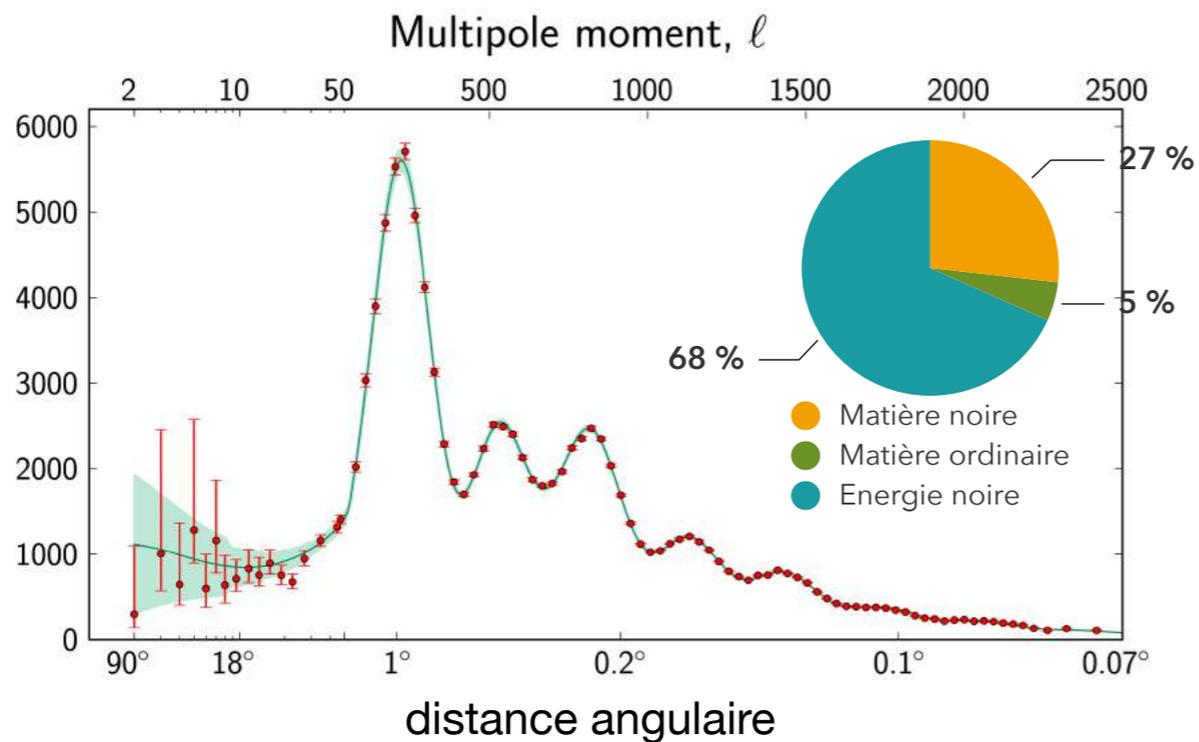
Galaxie d'Andromède •
(voisine de notre Voie Lactée)

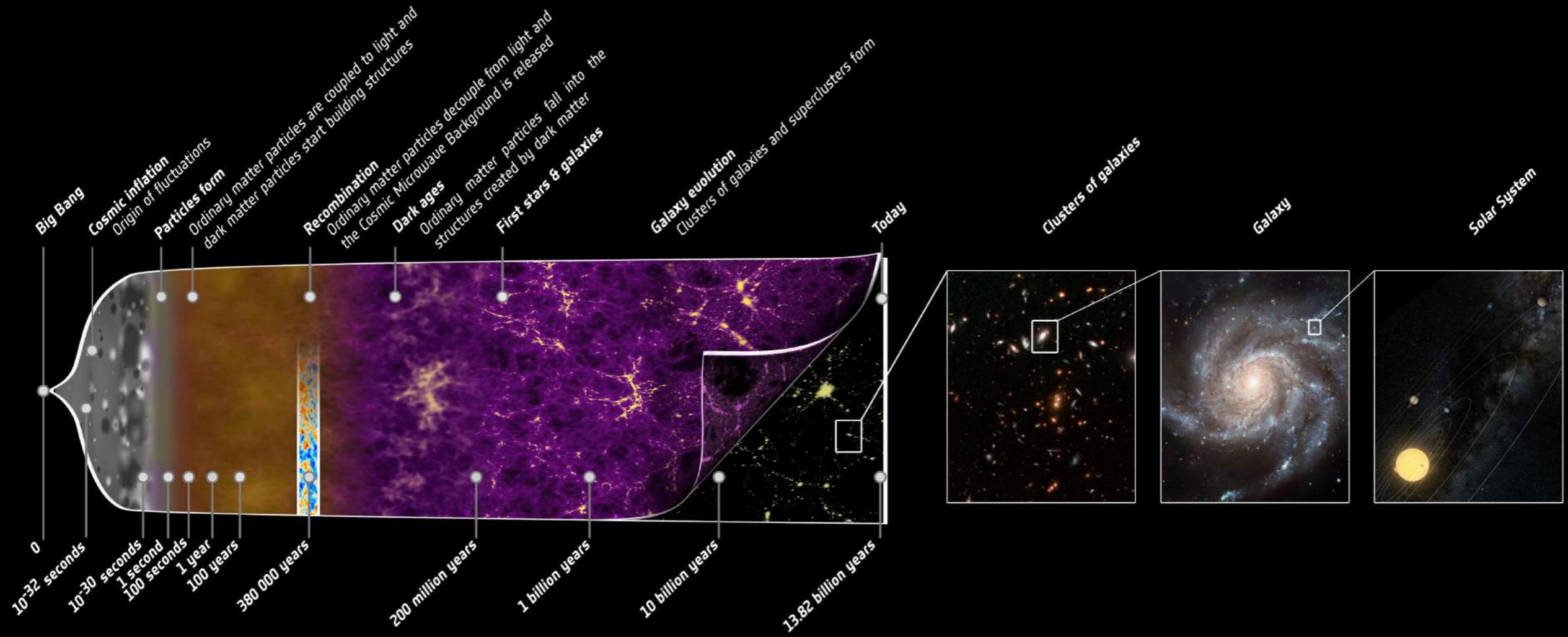
Première lumière visible de notre Univers

A ses débuts l'Univers est incroyablement homogène
Variation de température de l'ordre de 0.001%



fluctuations de température
en micro degré

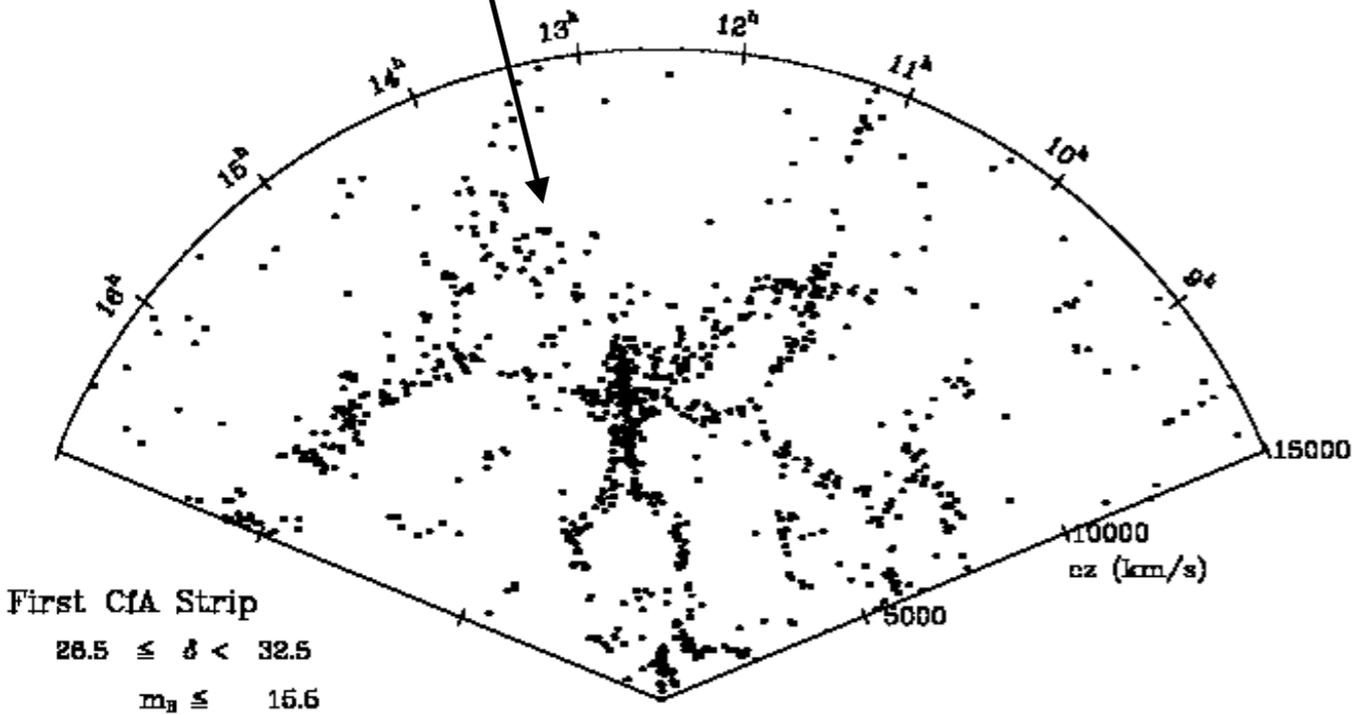




La distribution des galaxies aux grandes échelles n'est pas uniforme

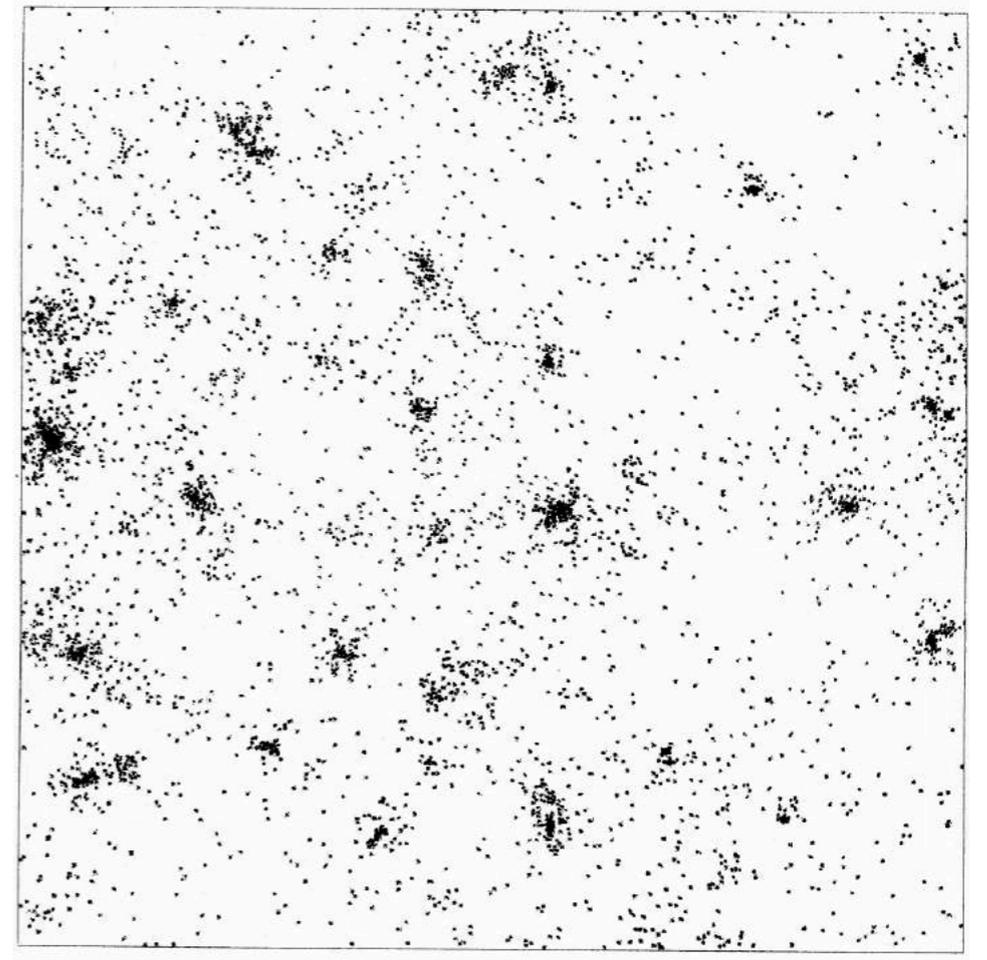


Chaque point est une galaxie !



De Lapparent+ 86

Chaque point est un élément de résolution (« particule numérique »)



Klypin & Shandarin 83

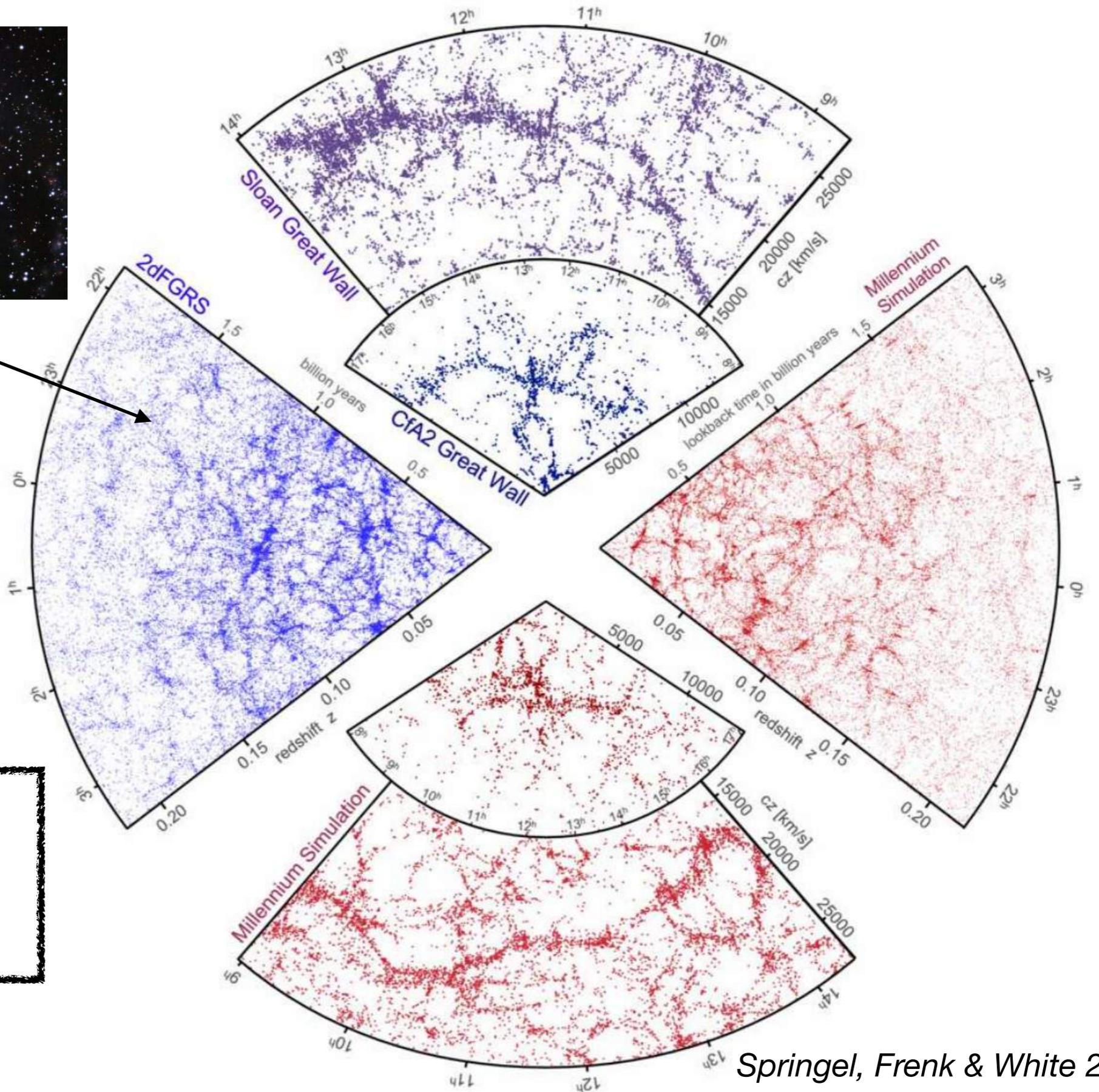
Simulation avec 4 000 particules

Maintenant les simulations ont jusqu'à 1 000 000 000 000 (10¹²) de particules

La distribution des galaxies aux grandes échelles n'est pas uniforme



Chaque point est une galaxie !

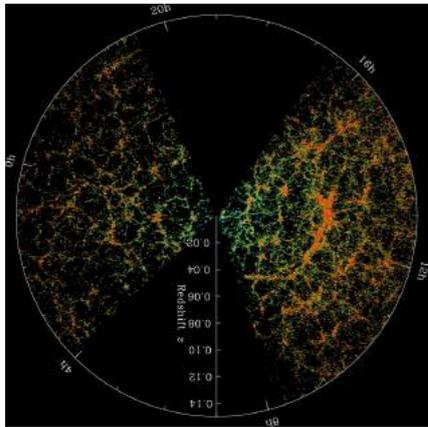


L'Univers présente une structure filamentaire

TOILE COSMIQUE

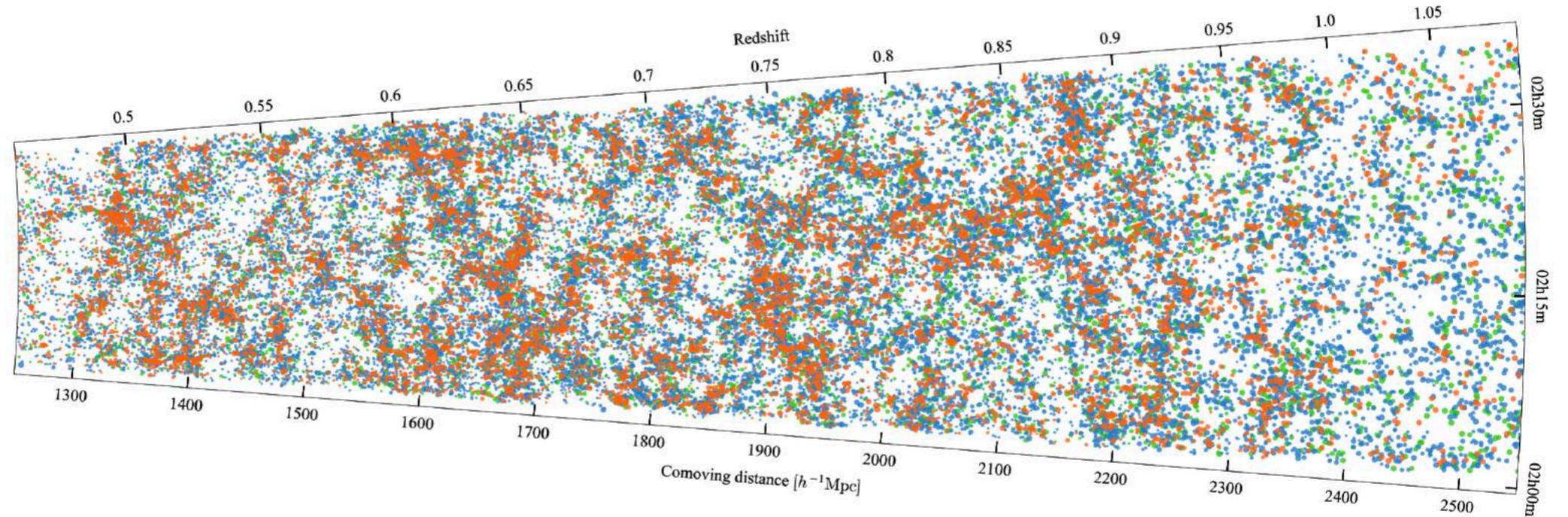
La distribution des galaxies aux grandes échelles n'est pas uniforme

Univers proche



SDSS

Univers lointain



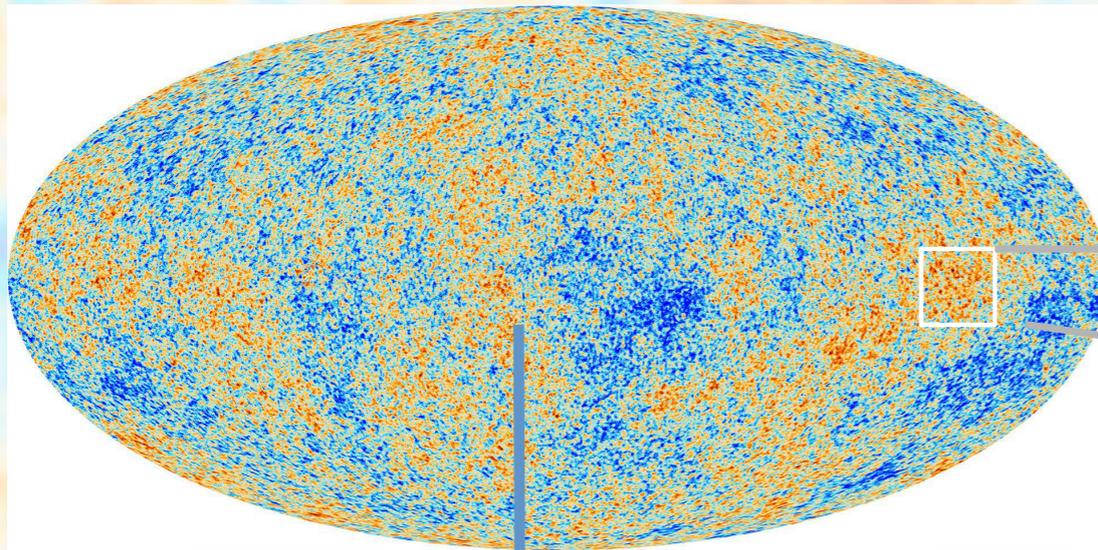
Scodeggio+ 2016

Relevé VIPERS autour de la moitié de l'âge de l'Univers

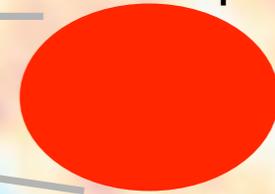
L'Univers présente une structure filamentaire

TOILE COSMIQUE

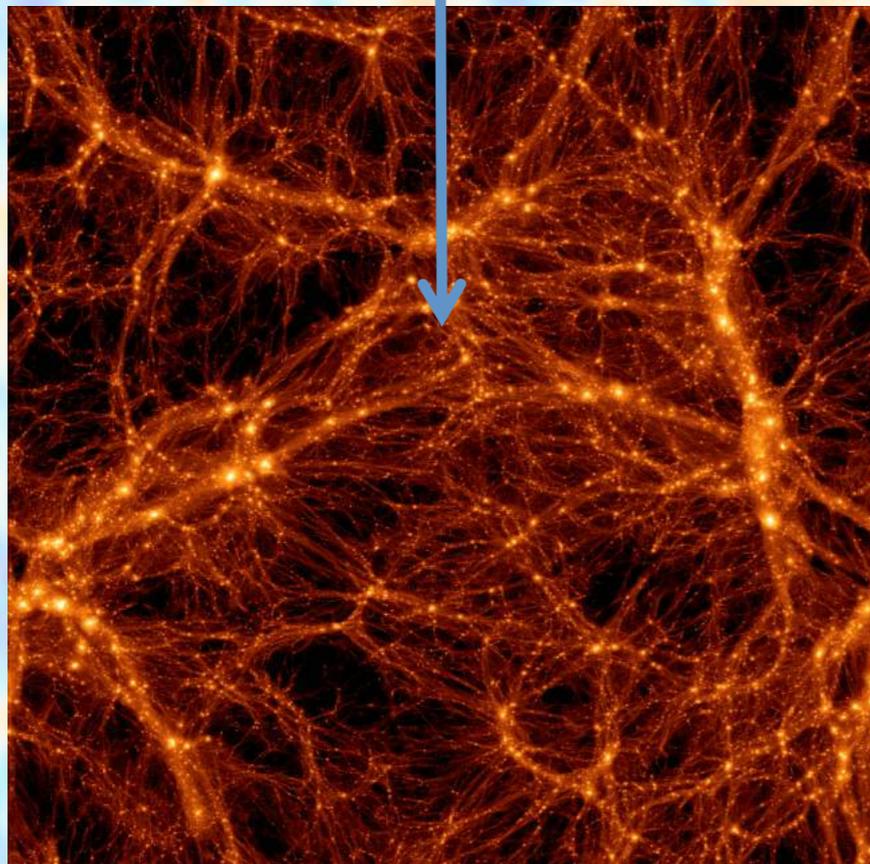
Un effondrement en trois temps (tri-dimensionnel)



les fluctuations de matière sont localement non sphériques



Quelques milliards d'années plus tard...



première direction d'effondrement



formation des murs pancake de Zel'dovich

deuxième direction d'effondrement



formation des filaments



troisième direction d'effondrement



formation des halos de matière noire

Pourquoi a t-on besoin de simulations numériques ?

La formation des galaxies est un problème multi-échelle et multi-physique :

- difficile de rendre compte de toute la complexité de l'Univers avec uniquement des calculs analytiques
- multi-échelle : résoudre les sites de formation des étoiles (10^{16} m) et les grandes structures (10^{22} m).

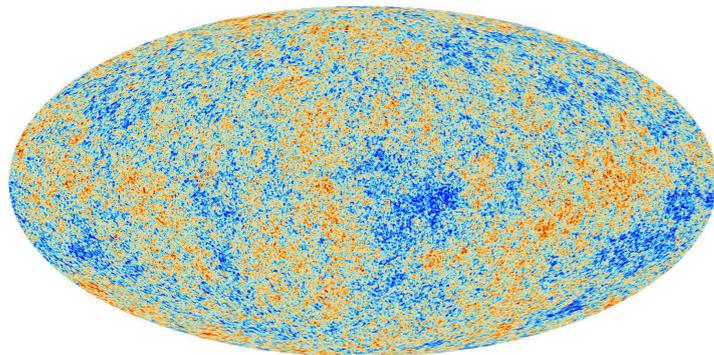
(Equivalent à simuler le fonctionnement du corps humain en suivant chacune de ses cellules !)

- multi-physique : **la gravité, la dynamique des gaz**, le couplage du rayonnement avec le gaz, la dynamique des poussières, les réactions chimiques dans le gaz, le champ magnétique, etc.

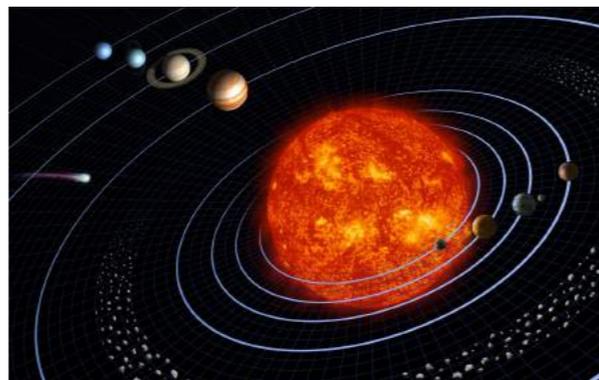
Les simulations numériques nous permettent d'appréhender globalement le problème de la formation des galaxies *ab initio* :

à partir des conditions initiales et des processus physiques pertinents

conditions initiales

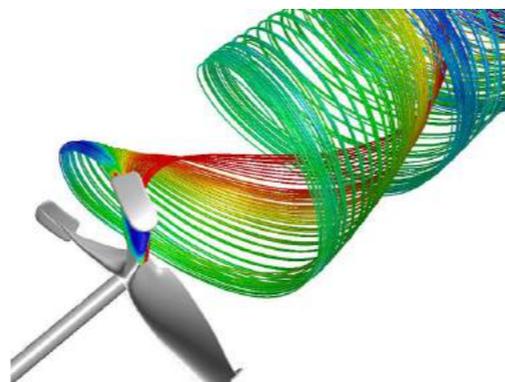


+



La gravitation

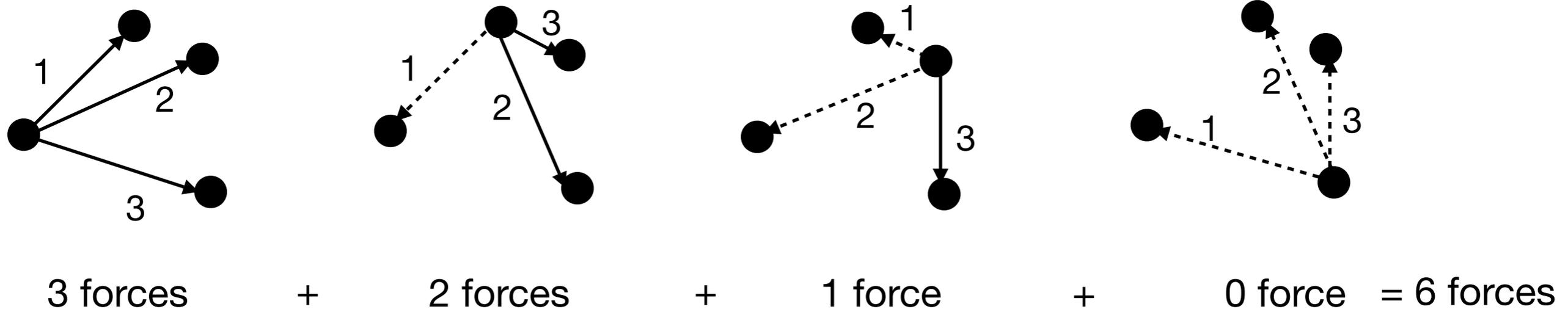
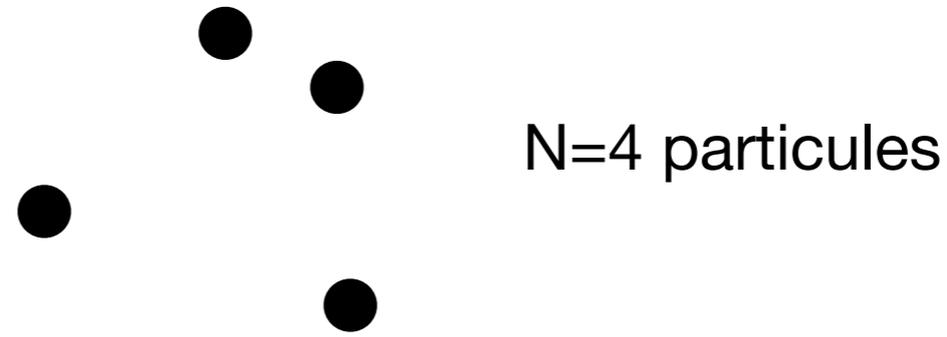
et plus...



La dynamique des gaz

Calculer l'interaction gravitationnelle est conceptuellement simple

- 1) Mettre une distribution de « particules » (éléments de résolution) qui rend compte de la distribution de matière des débuts de l'Univers, 2) calculer la force gravitationnelle, 3) déplacer les particules selon cette force



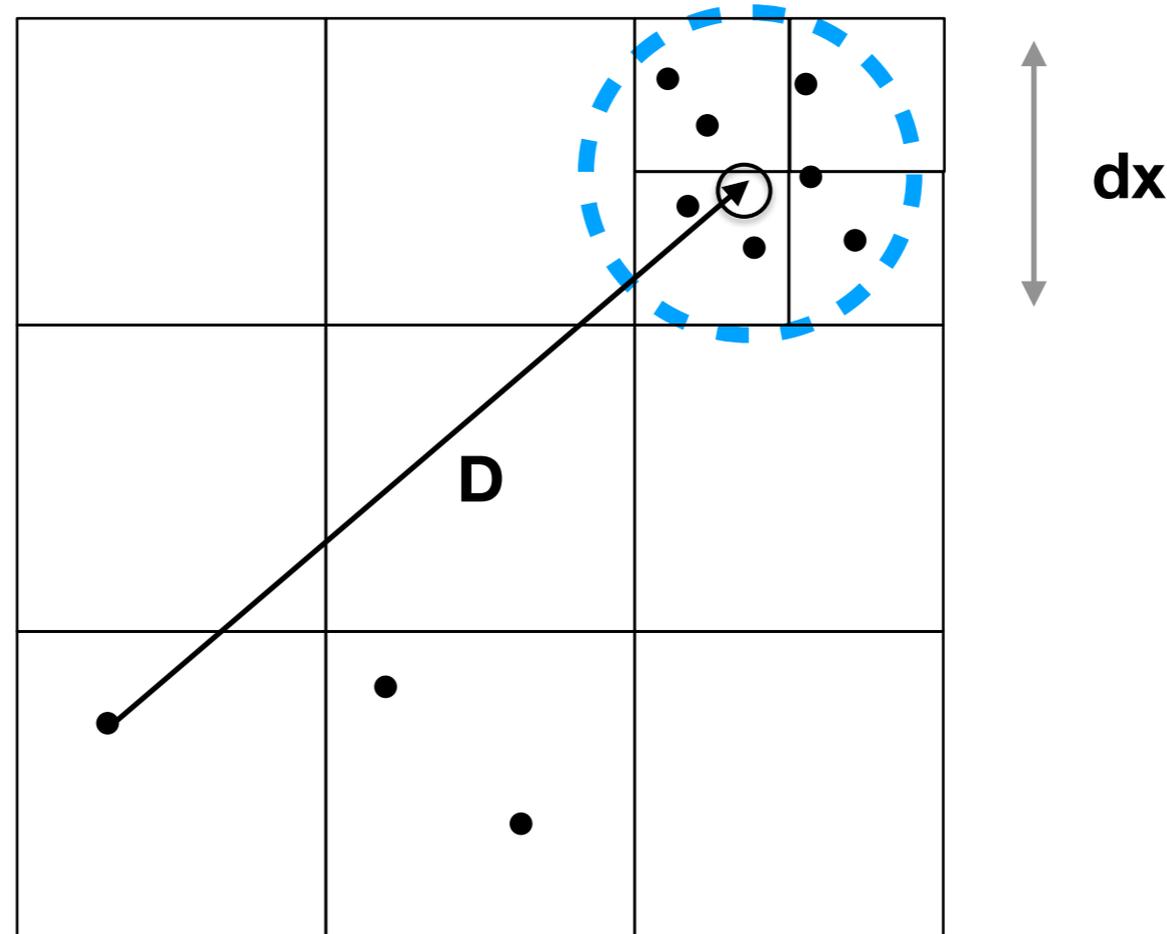
$$N \times (N-1) / 2 = 4 \times 3 / 2 = 6 \text{ forces}$$

Si $N=10^9$ (un milliard) alors $N \times (N-1) / 2 \sim 5 \times 10^{17}$

Aujourd'hui seulement $N=10^6$ (un million) maximum en calcul direct

Diviser pour régner

Et si on réunissait les particules par paquets lorsqu'elles sont suffisamment éloignées ?



Si dx/D suffisamment petit alors on regroupe les particules de la cellule dans une seule force

Méthode « code-arbre » (*Barnes & Hut 1986*)
(cellules feuilles, noeuds, branches, etc.)

Seulement $N \log(N)$ forces à calculer

Si $N=10^9$ alors $N \log(N) \sim 10^{10}$

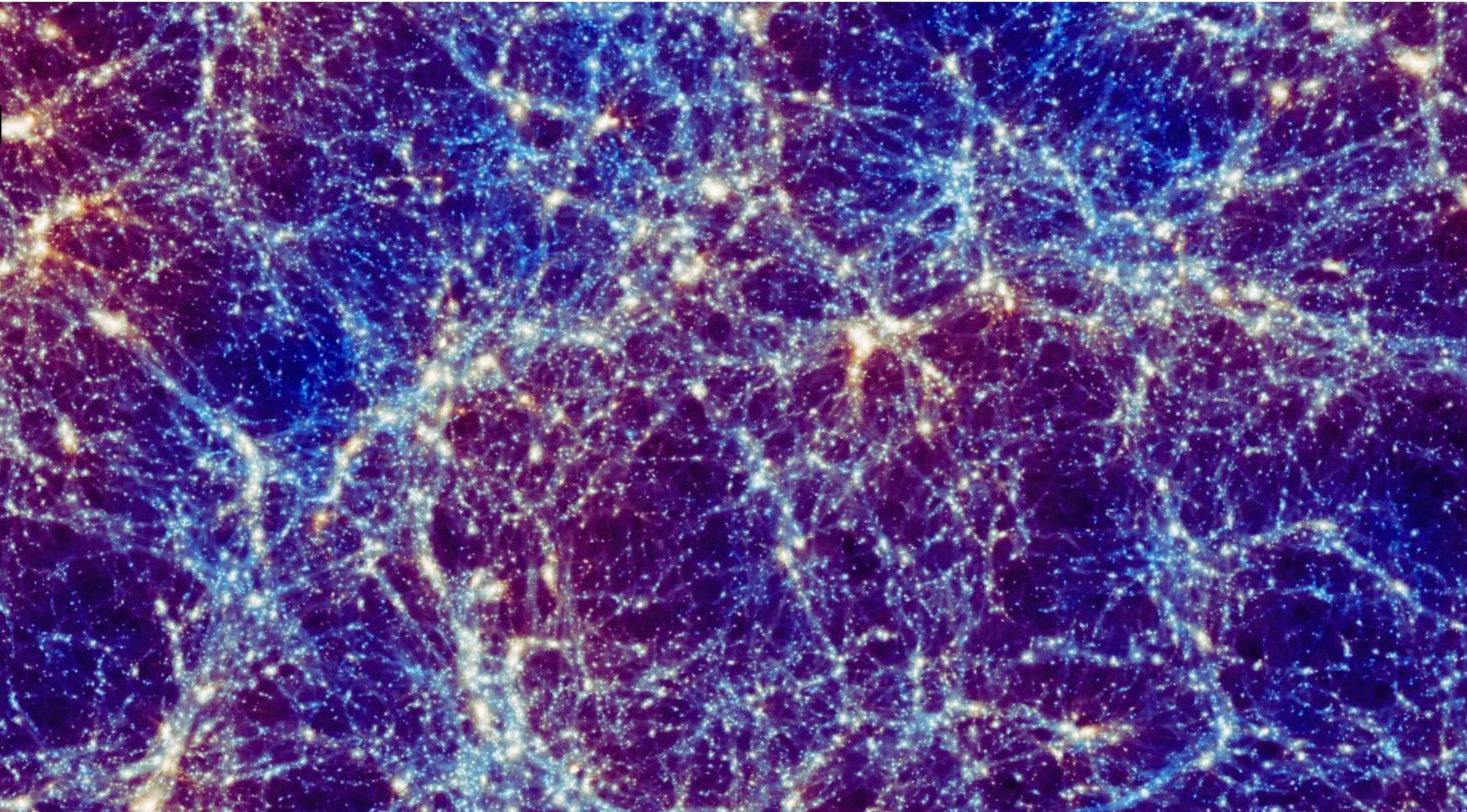
Avant: (Si $N=10^9$ alors $N(N-1)/2 \sim 5 \times 10^{17}$)

Une autre approche consiste à projeter la masse des particules sur une grille et de calculer le potentiel (puis l'accélération) grâce à l'équation de Poisson (code dit « Particle-Mesh »)

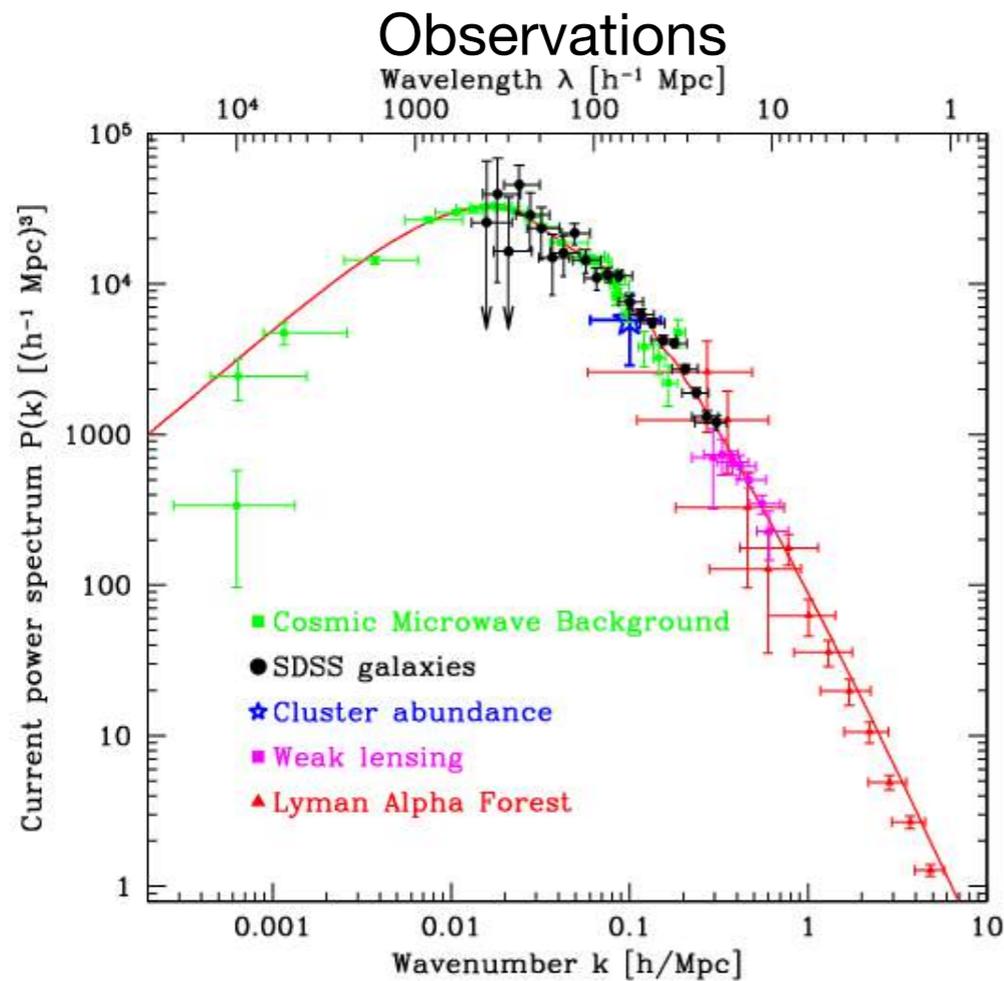
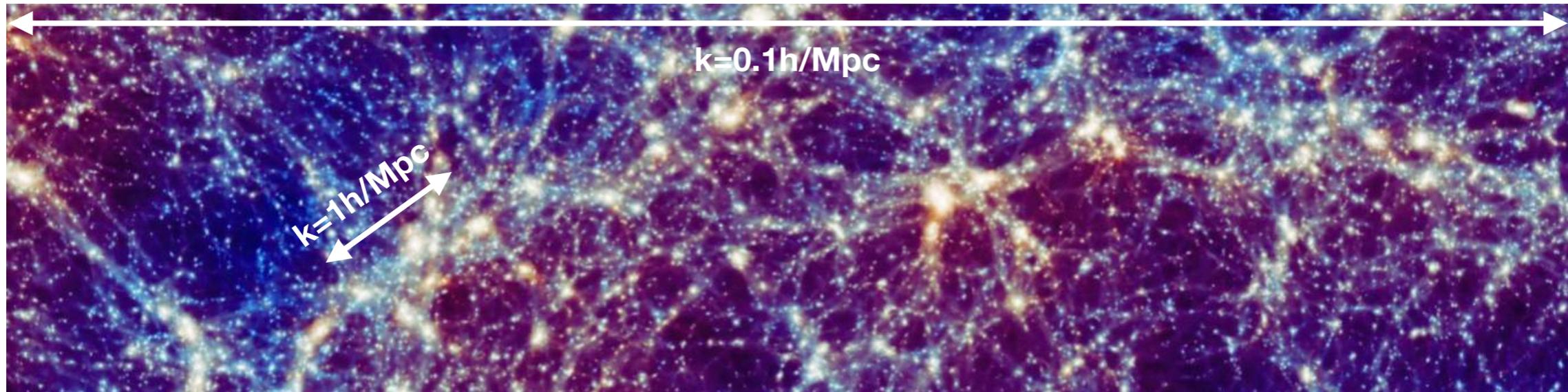
$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho \longrightarrow \vec{a} = \vec{\nabla} \Phi$$

potentiel masse volumique accélération

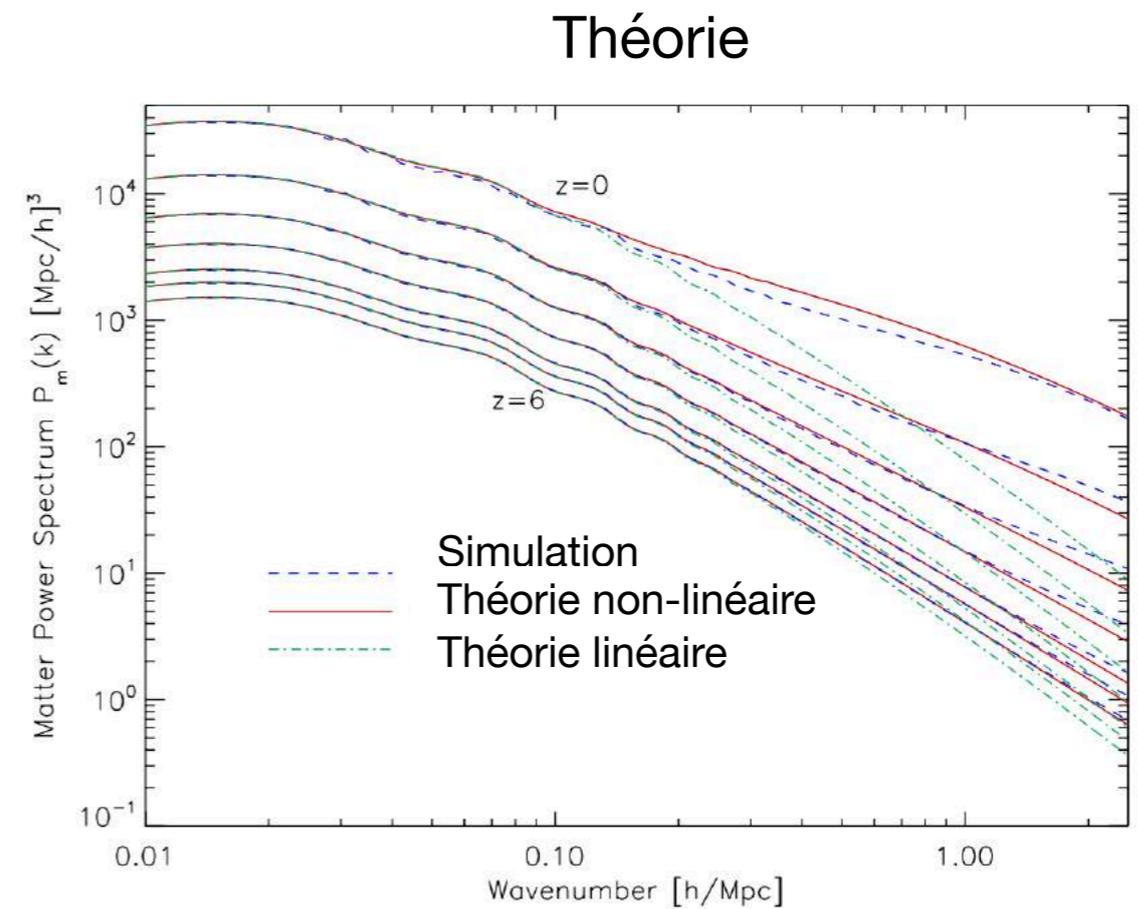
Ici $N=10^{10}$ avec l'approche code en arbre



Predictions pour le spectre de puissance de la matière



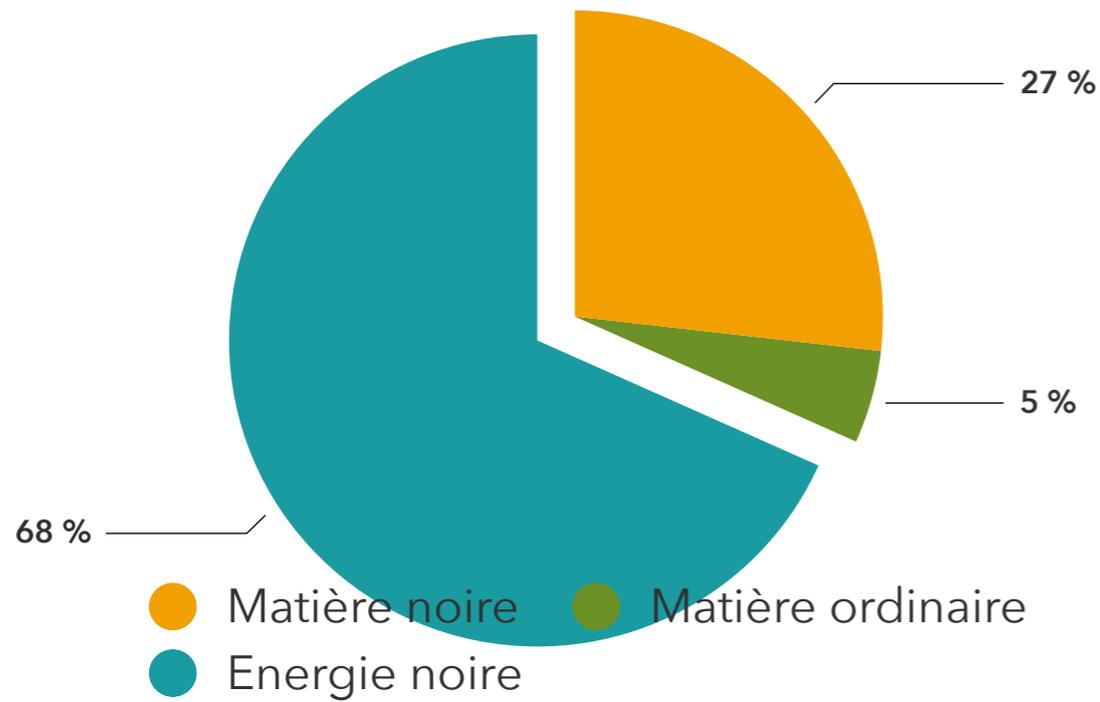
Tegmark+ 2004



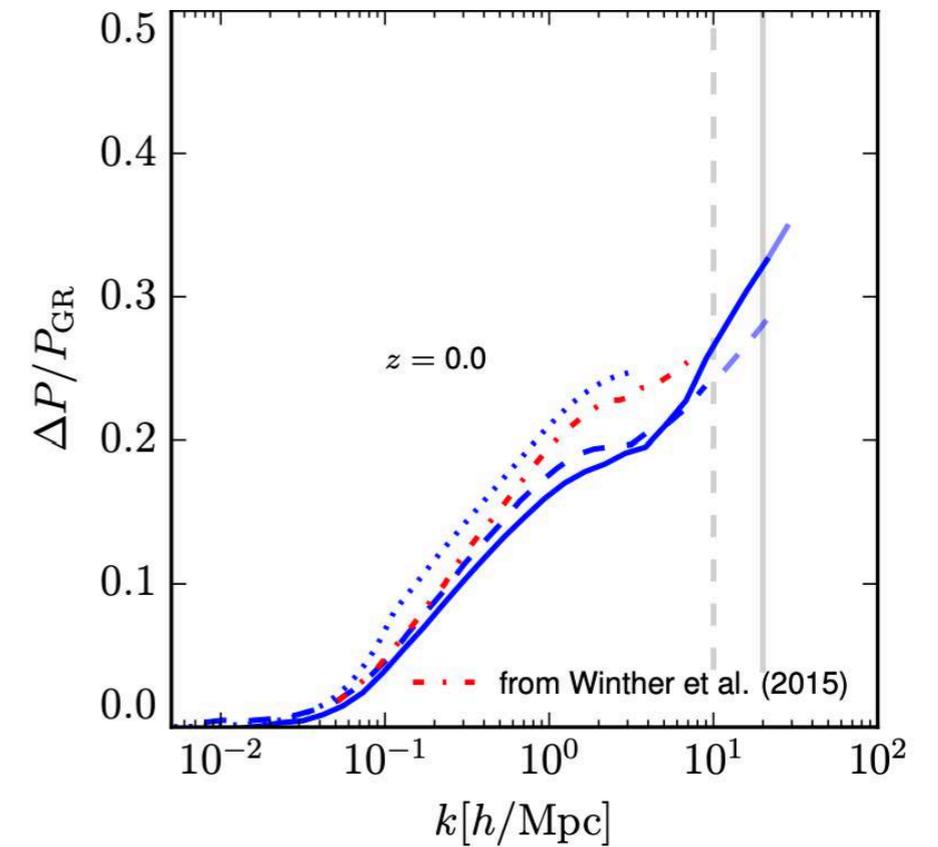
Jeong & Komatsu 2009

Pour une revue de la théorie perturbative voir *Bernardeau+ 2002*

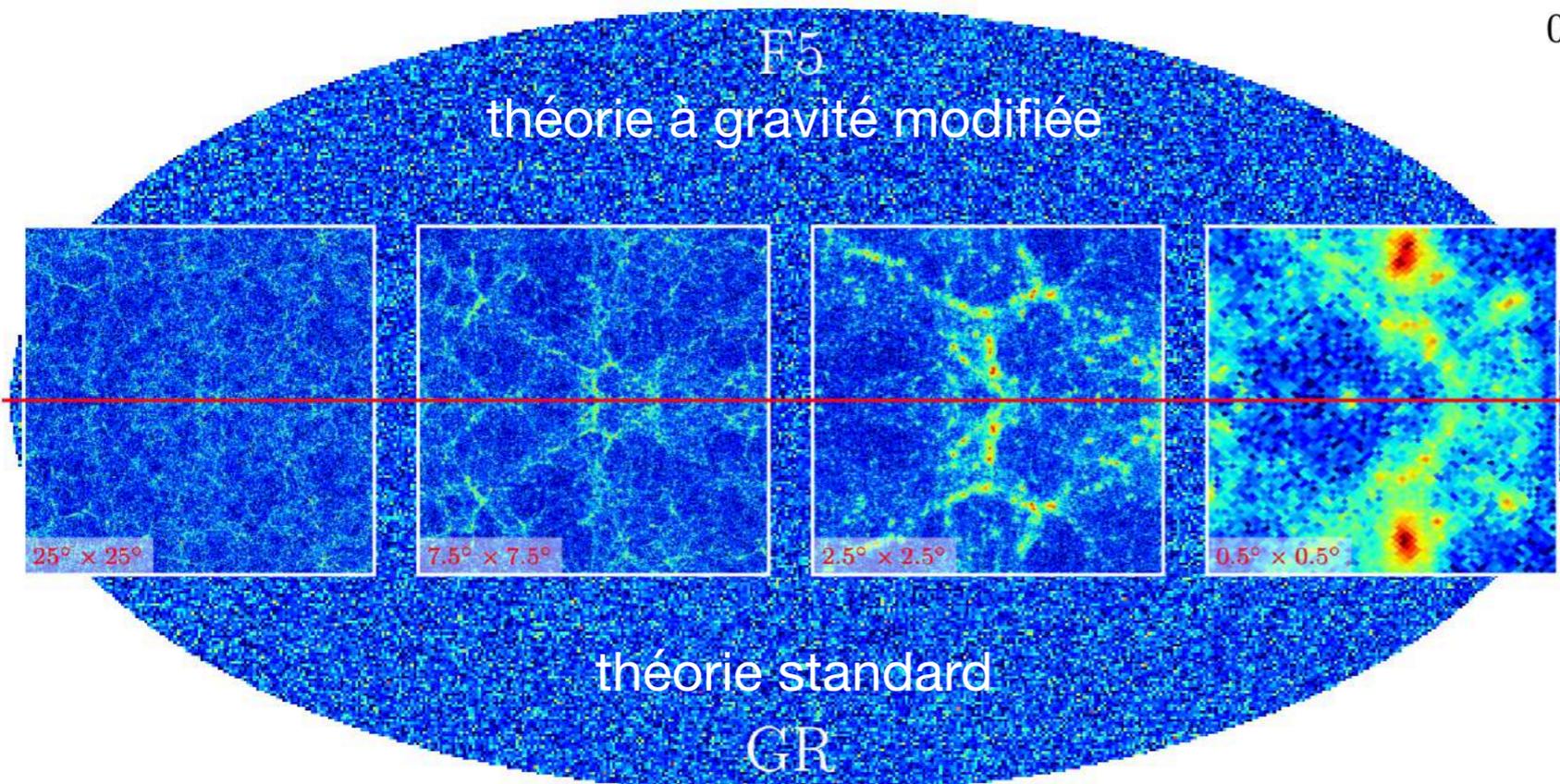
Un outil pour sonder la nature de la gravitation et de l'énergie noire



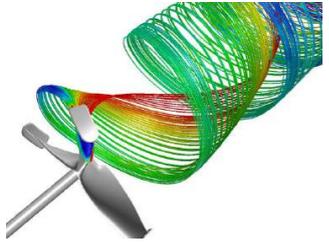
Déviations du spectre de puissance à la prédiction standard



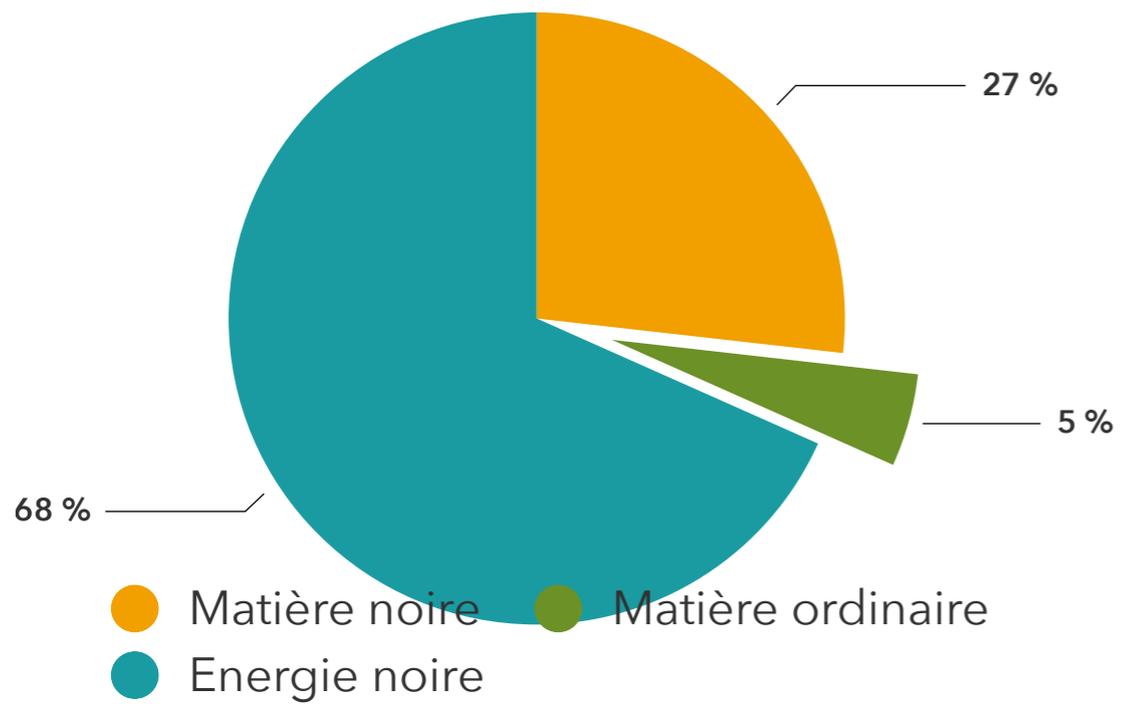
Arnold, Fosalba+ 2018



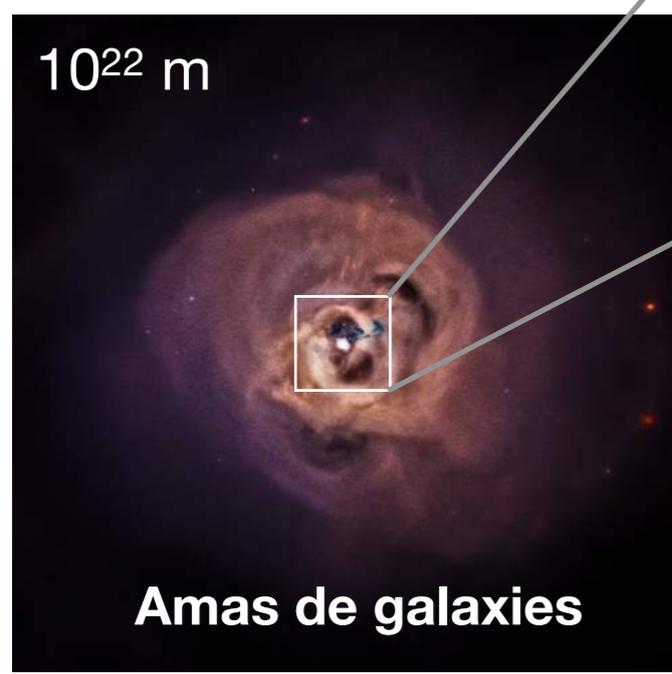
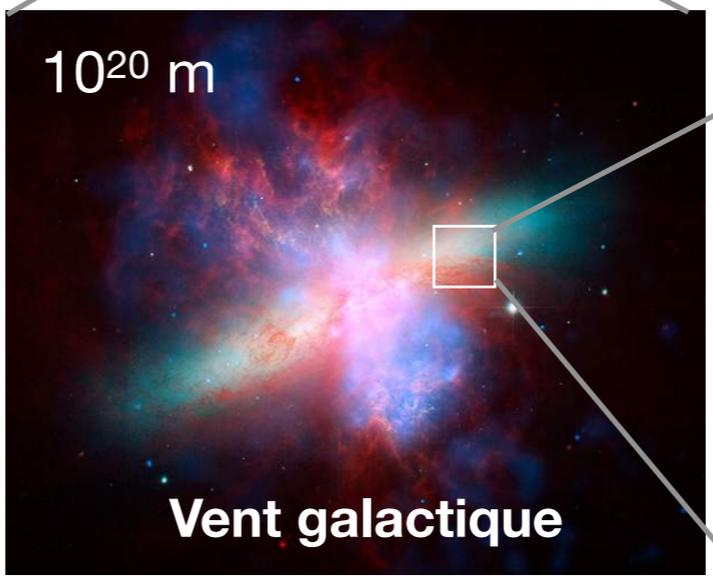
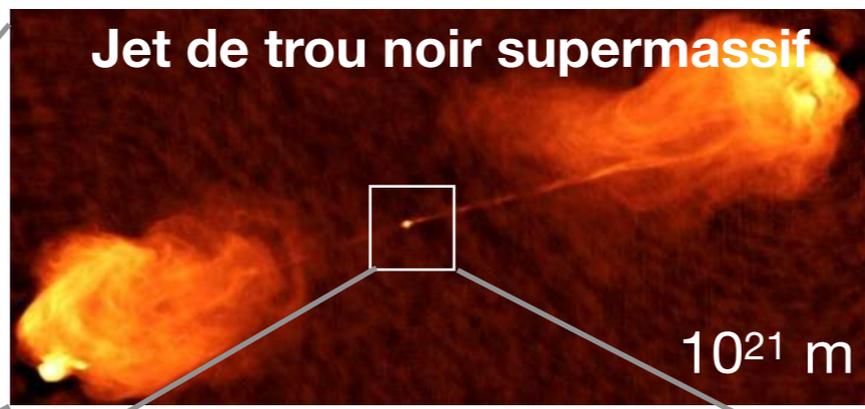
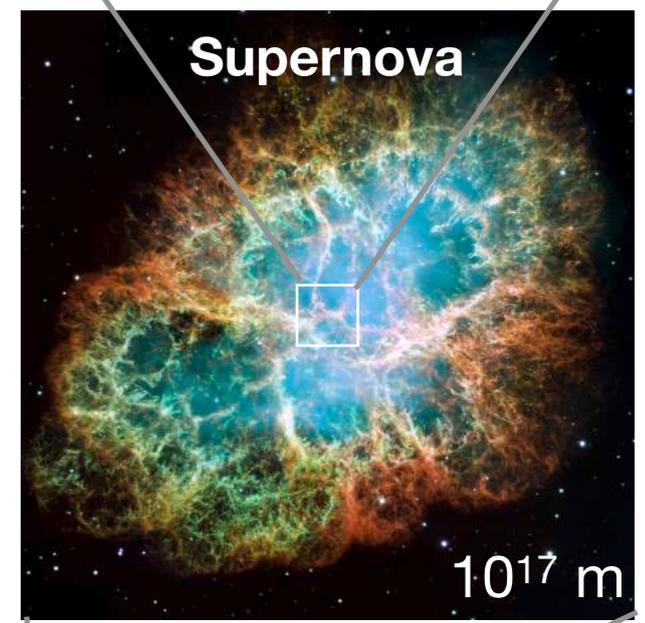
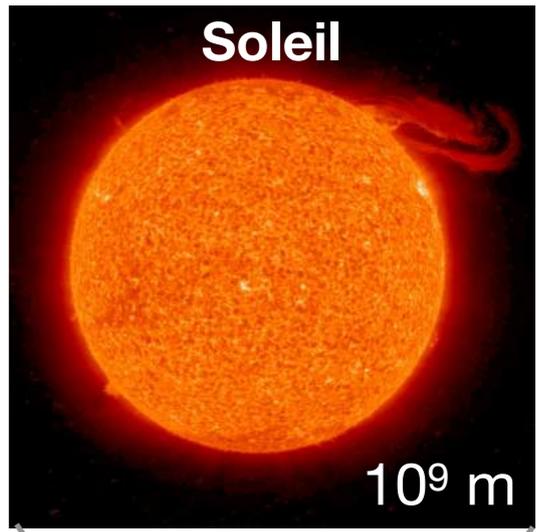
Voir aussi :
Puchwein+ 2013
Llinares+ 2014
Winther+ 2015

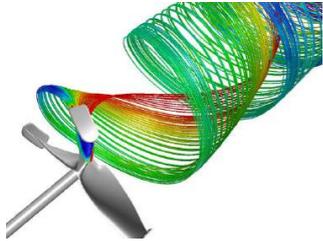


La matière visible (« ordinaire »)

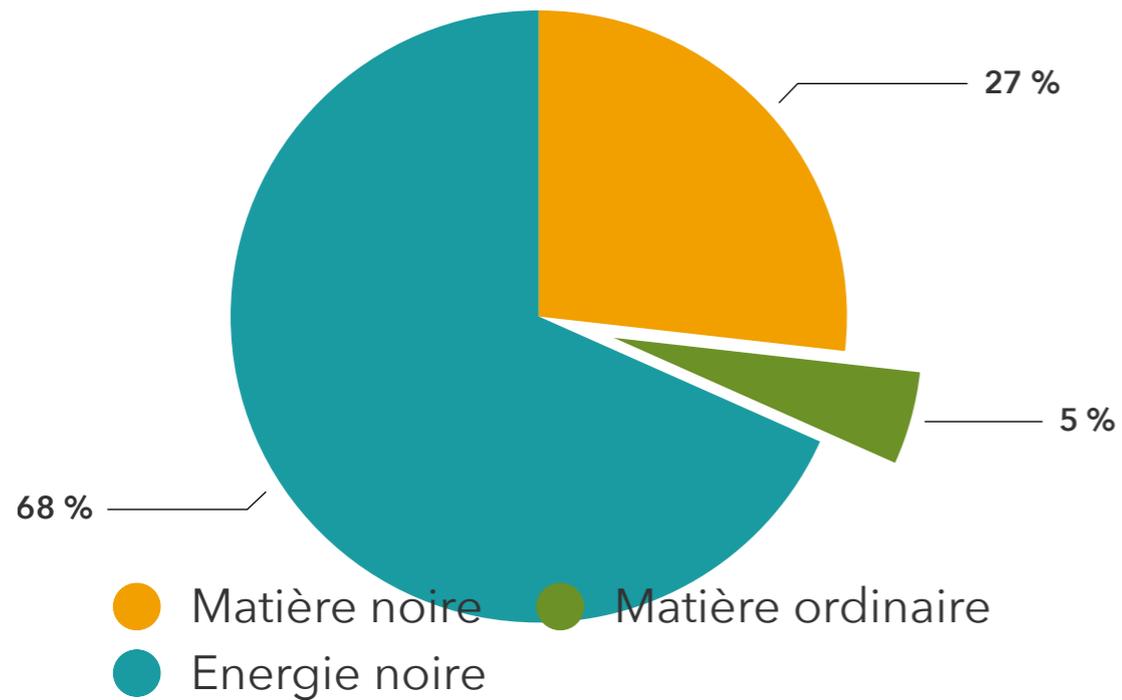


tout ce qui n'est pas la matière noire : essentiellement du gaz





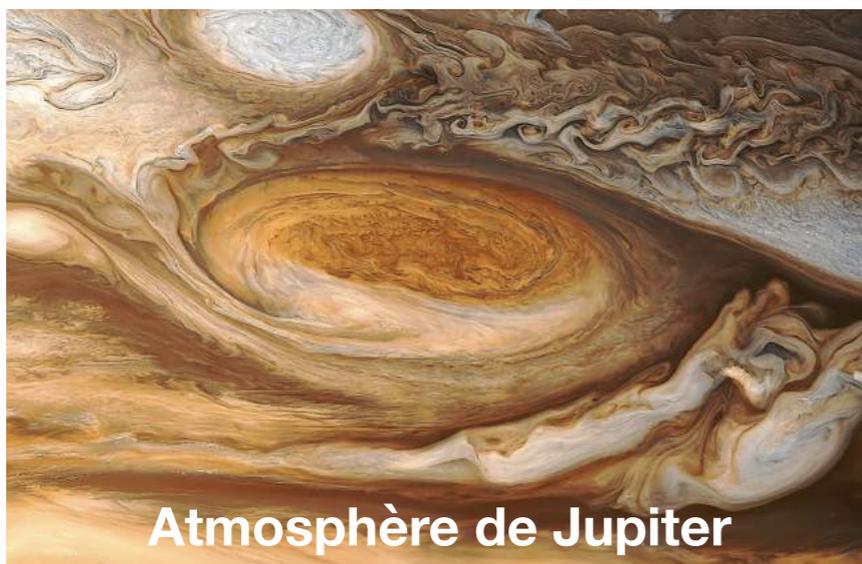
La matière visible (« ordinaire »)



tout ce qui n'est pas la matière noire : essentiellement du gaz

*Le gaz dans les galaxies contient moins d'1 atome par cm^3 .
Sur Terre, l'air qu'on respire contient environ 10^{20} atomes (molécules) par cm^3 .*

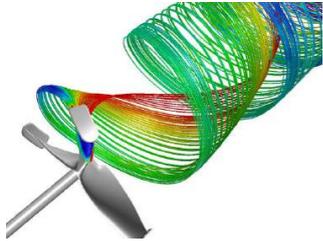
Le gaz est dit « collisionnel » : deux couches de gaz qui se rencontrent, se percutent et se mélangent et/ou produisent des ondes de choc



Atmosphère de Jupiter



Mur du son



Résoudre les équations de la dynamique des fluides

Equations de Navier-Stokes

masse par unité de volume

vitesse

pression

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \vec{x}} \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

Conservation de la masse

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \frac{\partial}{\partial \vec{x}} \cdot (\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) + \frac{\partial p}{\partial \vec{x}} = 0$$

Conservation de l'impulsion
(masse x vitesse)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon) + \frac{\partial}{\partial \vec{x}} \cdot [\vec{u} (\epsilon + p)] = 0$$

Conservation de l'énergie

énergie par unité de volume

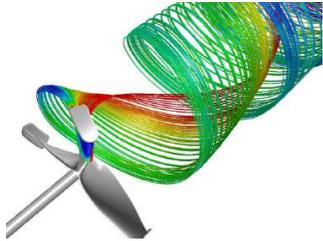
$$p = (\gamma - 1) \epsilon$$

Equation d'état d'un gaz parfait

$\frac{\partial}{\partial t}$: variation par rapport au temps

$\nabla = \frac{\partial}{\partial \vec{x}}$: variation par rapport à l'espace

L'évolution temporelle des propriétés d'un gaz est régie par ses fluctuations spatiales



Résoudre les équations de Navier-Stokes

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho \vec{u} \\ \epsilon \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{masse} \\ \text{impulsion} \\ \text{énergie} \end{array}$$

F : flux de (masse, impulsion, énergie)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \vec{x}} \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

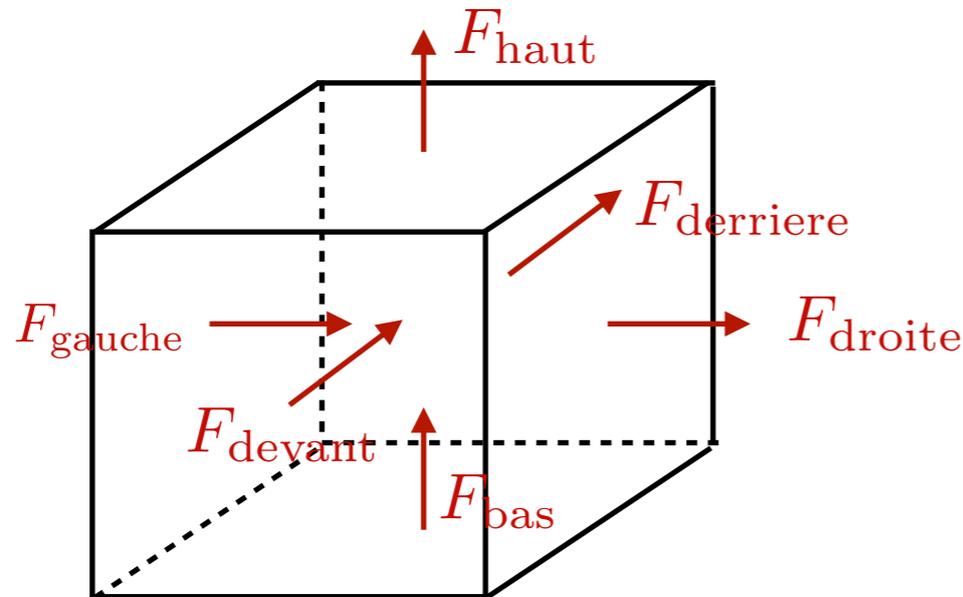
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \frac{\partial}{\partial \vec{x}} \cdot (\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) + \frac{\partial p}{\partial \vec{x}} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon) + \frac{\partial}{\partial \vec{x}} \cdot [\vec{u} (\epsilon + p)] = 0$$



$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla F(U) = 0$$

$$\nabla F(U) = \frac{F_{\text{droite}}(U) - F_{\text{gauche}}(U)}{\Delta x} + \frac{F_{\text{haut}}(U) - F_{\text{bas}}(U)}{\Delta x} + \frac{F_{\text{derriere}}(U) - F_{\text{devant}}(U)}{\Delta x}$$

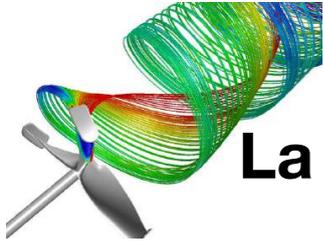


La variation temporelle de U correspond à la différence des flux entrants et sortants

$\frac{\partial}{\partial t}$: variation par rapport au temps

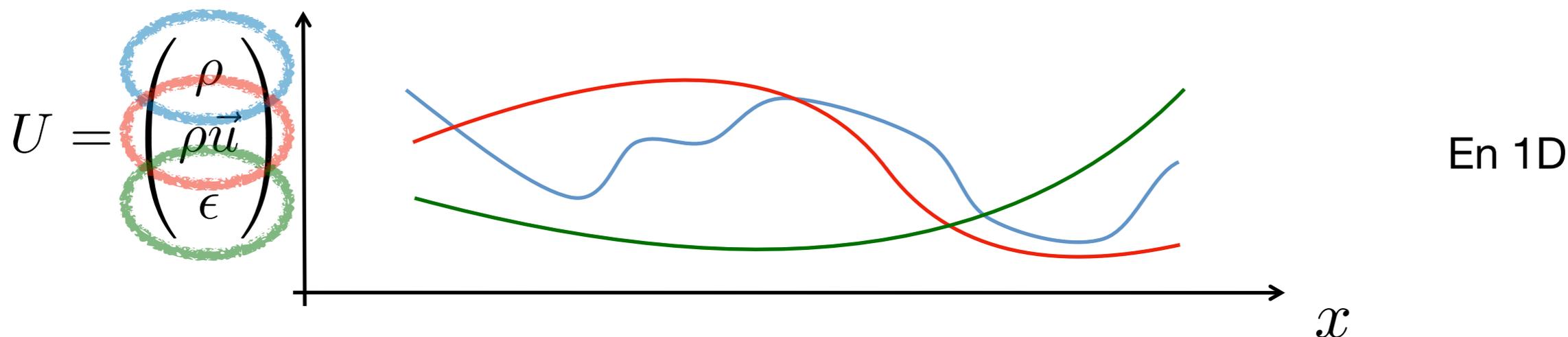
$\nabla = \frac{\partial}{\partial \vec{x}}$: variation par rapport à l'espace

L'évolution temporelle des propriétés d'un gaz est régie par ses fluctuations spatiales

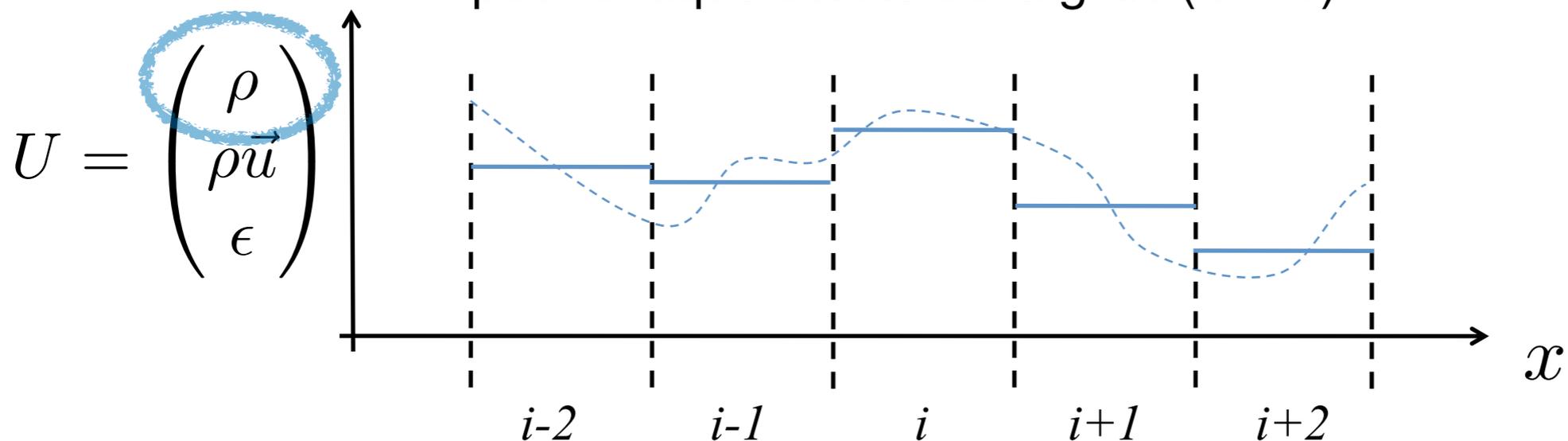


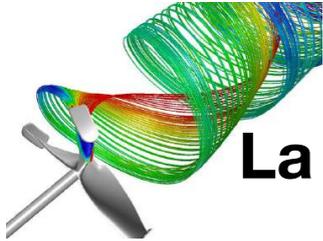
La philosophie derrière la résolution numérique de la dynamique des gaz

La masse volumique, la vitesse ou la pression sont décrites par des courbes



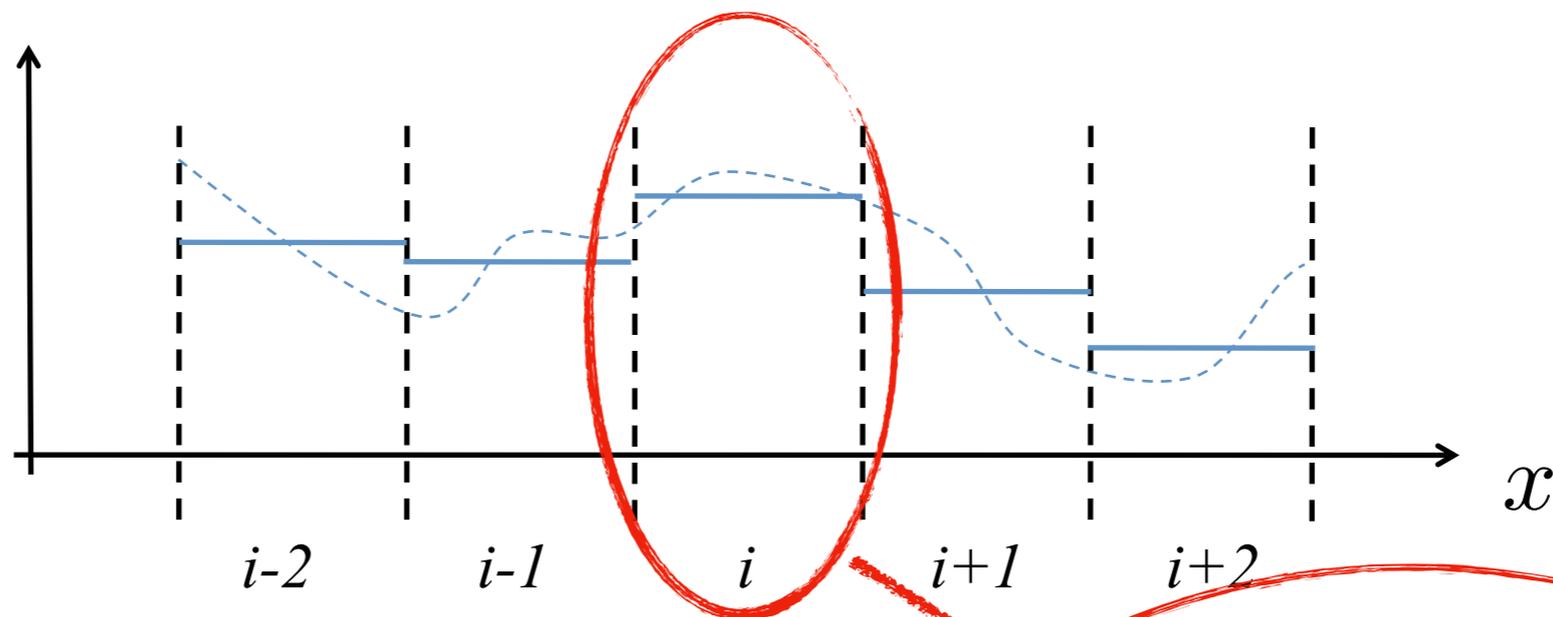
On échantillonne ces valeurs par une représentation constante par morceaux pour chaque cellule de la grille (ici 1D)





La philosophie derrière la résolution numérique de la dynamique des gaz

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho \vec{u} \\ \epsilon \end{pmatrix}$$



Equations de Navier-Stokes :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla F(U) = 0$$

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} + \frac{F_{\text{droite}}(U) - F_{\text{gauche}}(U)}{\Delta x} = 0$$

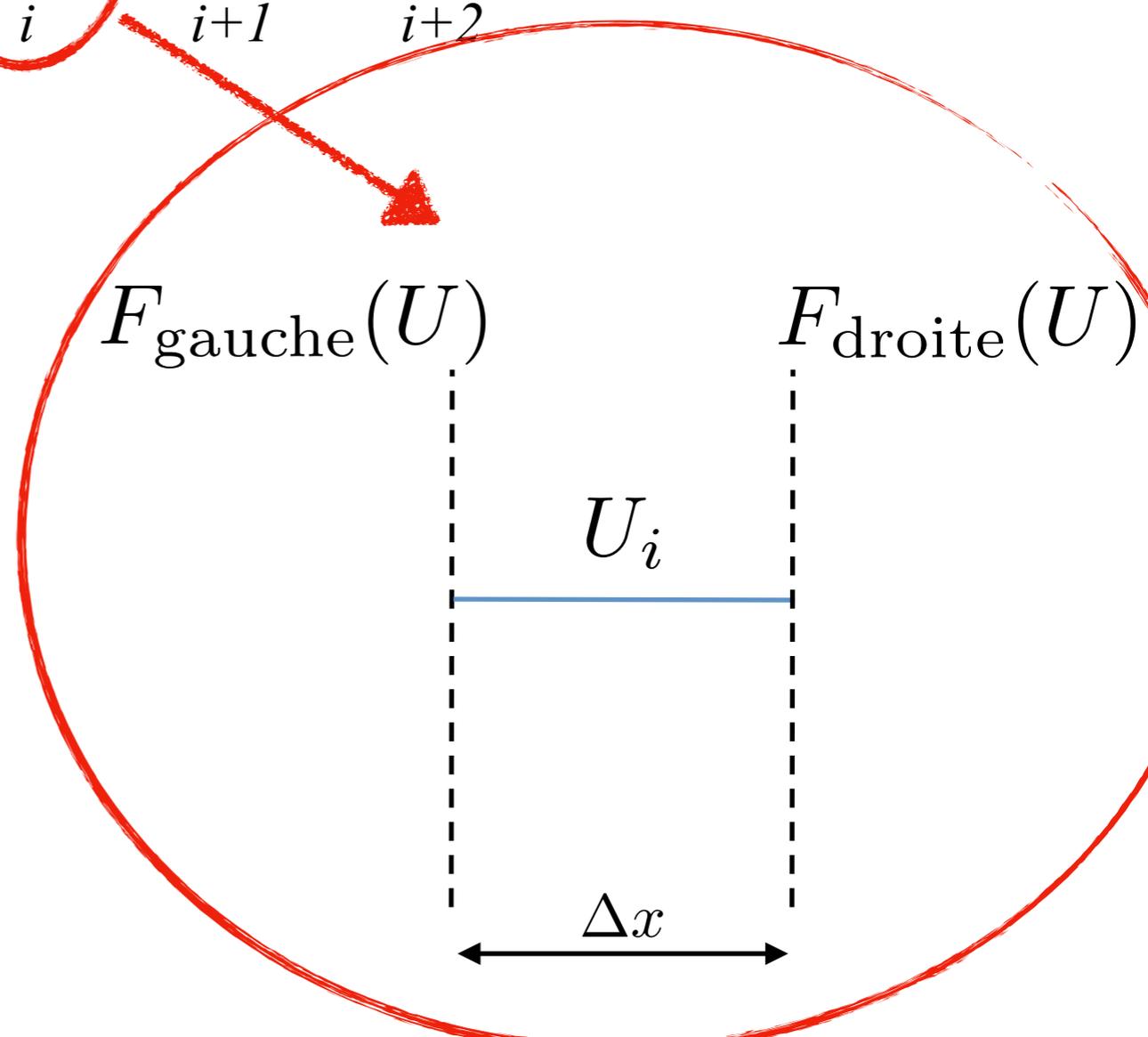
$$\Delta U = \frac{\Delta t}{\Delta x} [F_{\text{gauche}}(U) - F_{\text{droite}}(U)]$$

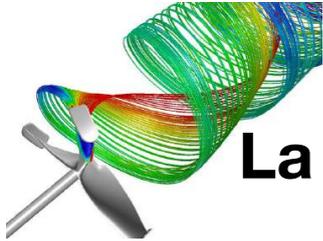
$F_{\text{gauche}}(U)$

$F_{\text{droite}}(U)$

U_i

Δx





La philosophie derrière la résolution numérique de la dynamique des gaz

$$\Delta U = \frac{\Delta t}{\Delta x} [F_{\text{gauche}}(U) - F_{\text{droite}}(U)]$$

$F_{\text{gauche}}(U)$ $F_{\text{droite}}(U)$

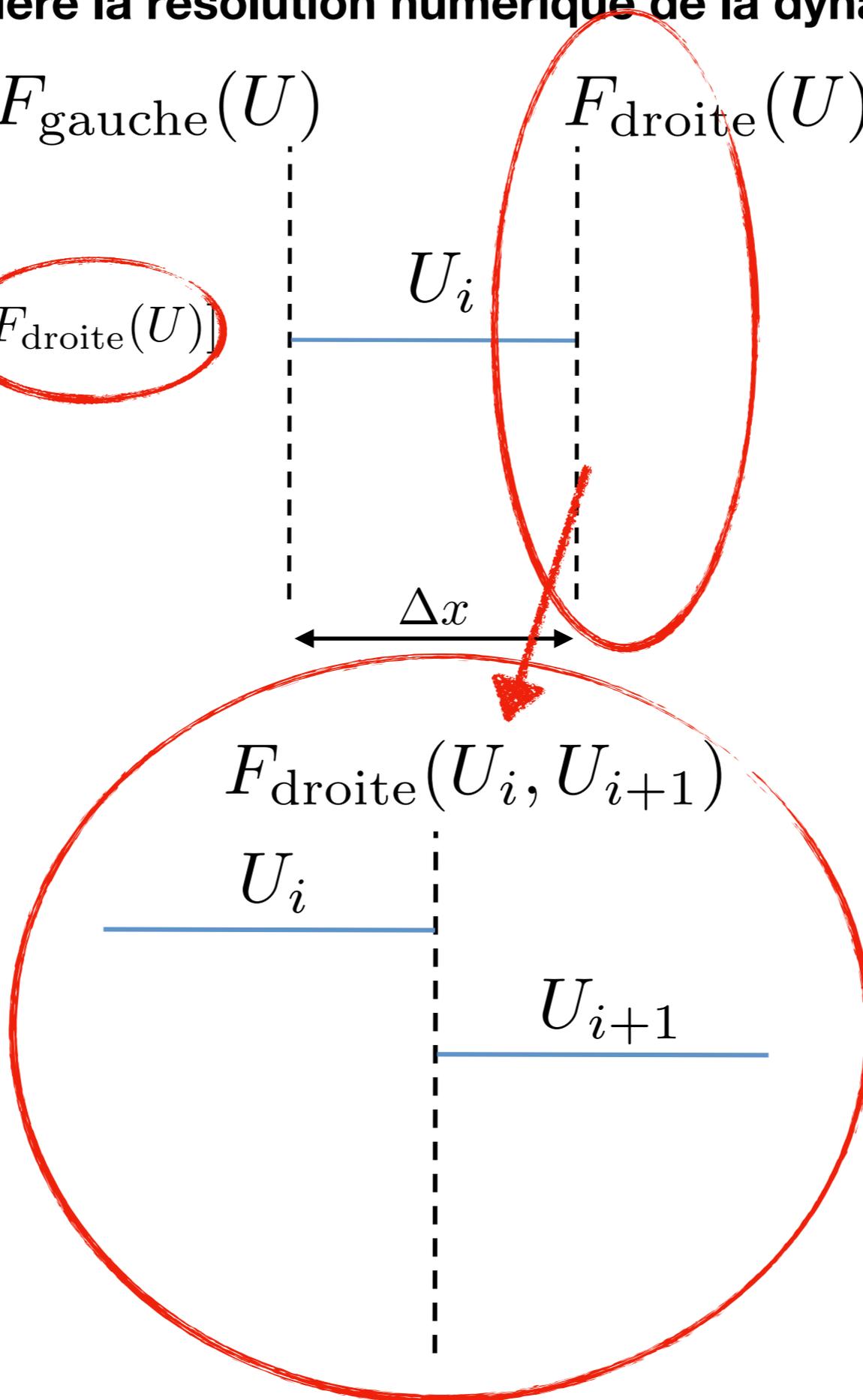
U_i

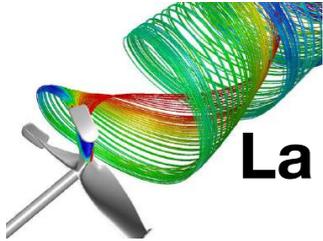
Δx

$F_{\text{droite}}(U_i, U_{i+1})$

U_i

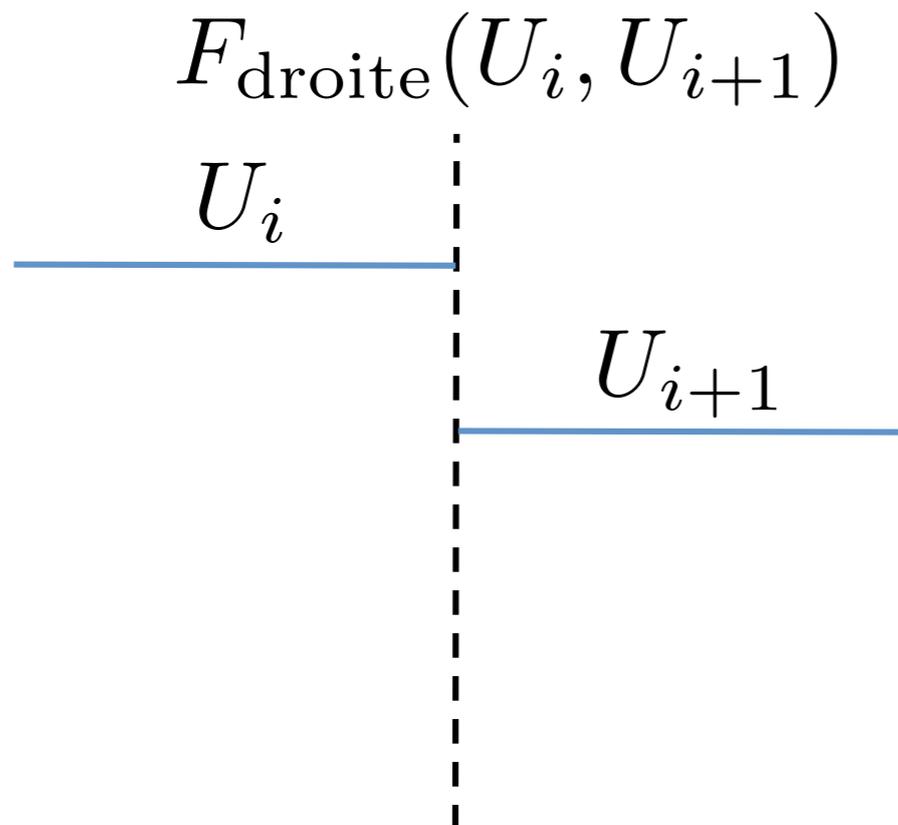
U_{i+1}





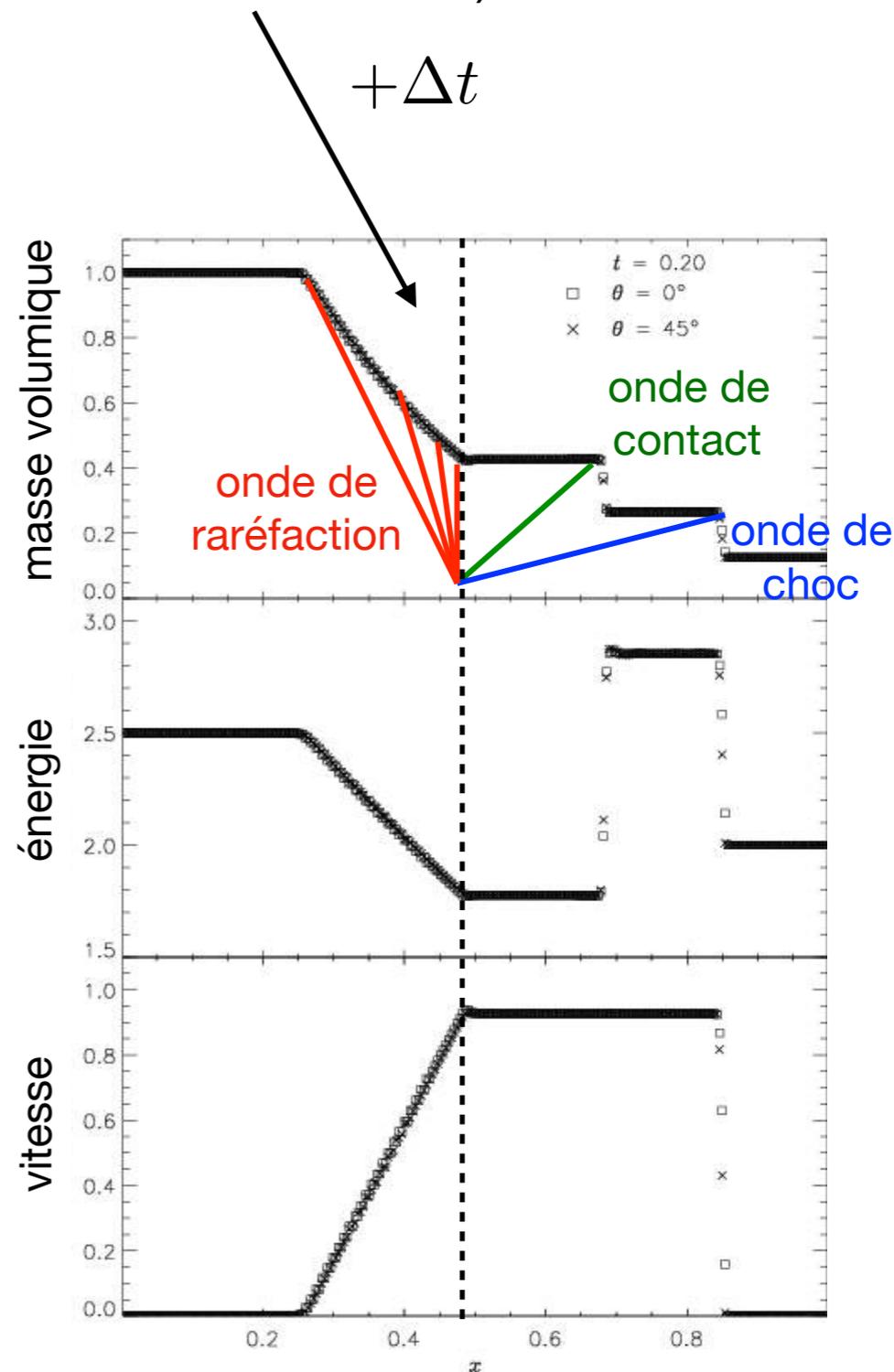
La philosophie derrière la résolution numérique de la dynamique des gaz

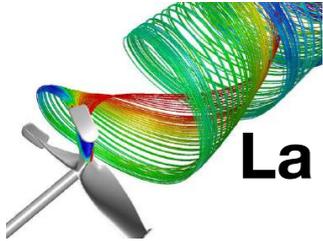
La solution de ce problème avec un état U à gauche et un état U à droite de l'interface est connue (solution du problème de Riemann)



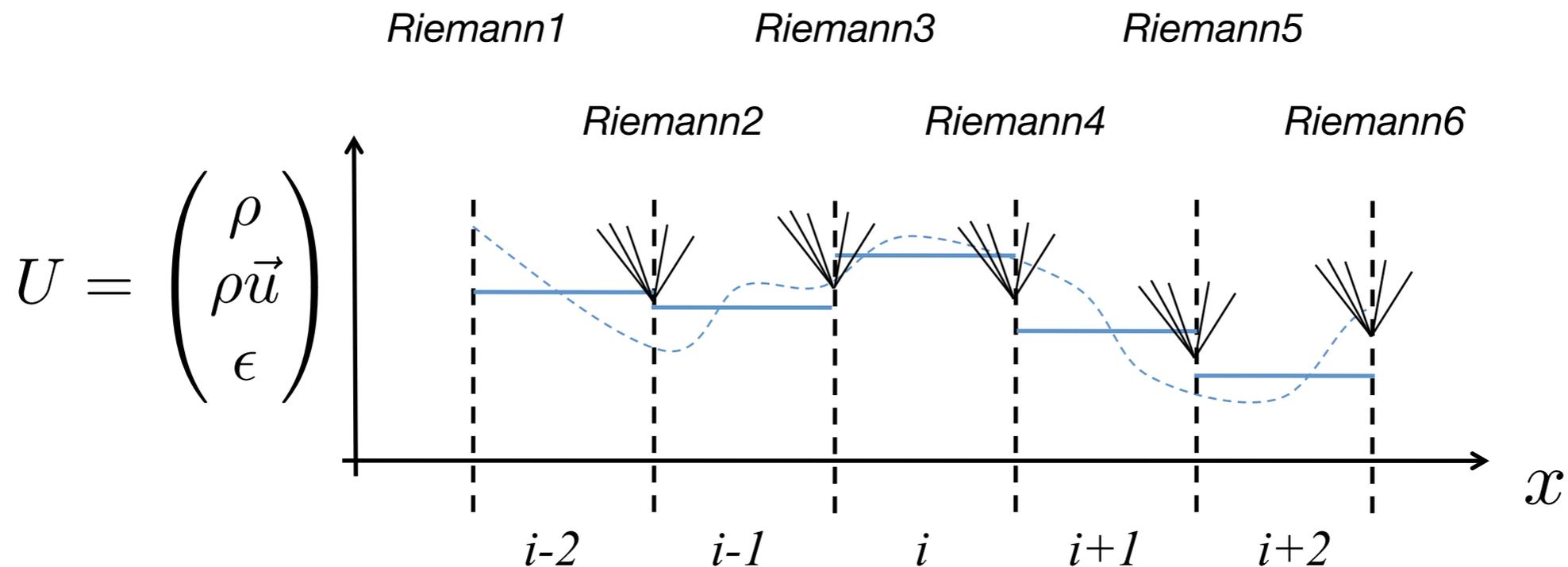
On peut obtenir le flux qui servira à obtenir la variation ΔU

$$\Delta U = \frac{\Delta t}{\Delta x} [F_{\text{gauche}}(U) - F_{\text{droite}}(U)]$$





La philosophie derrière la résolution numérique de la dynamique des gaz

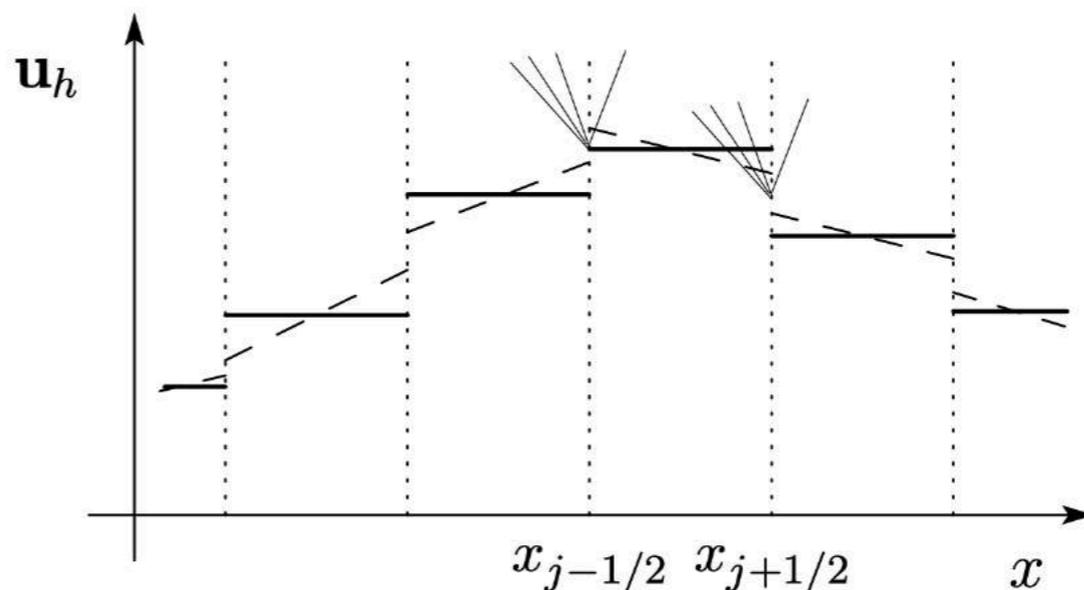


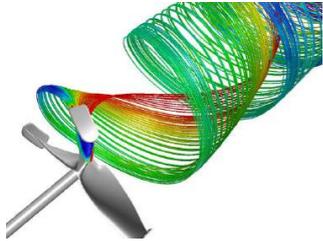
La dynamique des fluides revient à résoudre $N+1$ problèmes de Riemann pour N cellules

Reconstruction linéaire des variables :

Plus précis mais attention à ne pas rompre la monotonie de la solution !

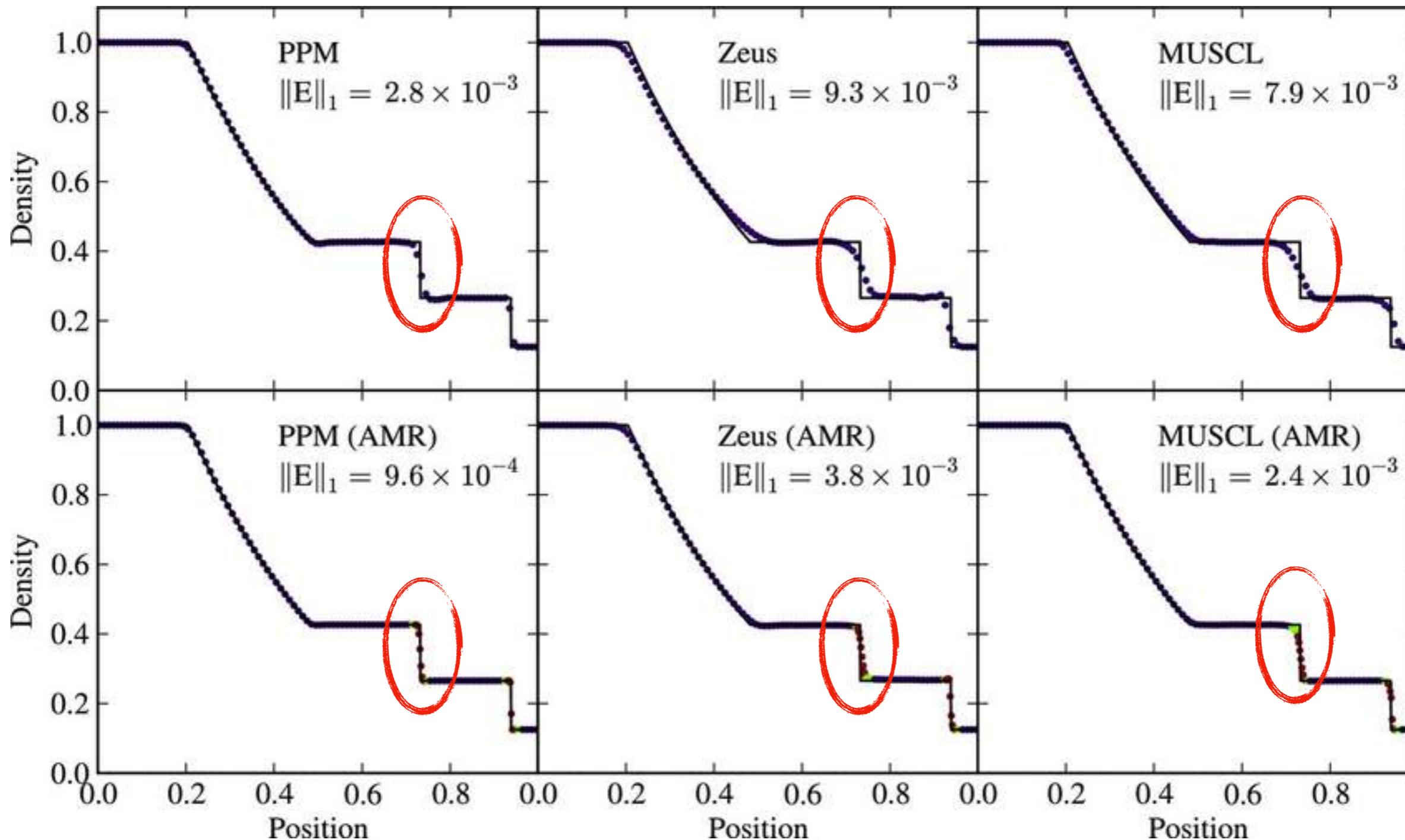
-> utilisation de limiteurs de pente (van Leer 1979, Harten 1983)





Résolution numérique de la dynamique des gaz est un champ de recherche en soi

Trouver des méthodes plus rapides, plus précises, avec un bon comportement numérique dans tous les types de régimes, etc.

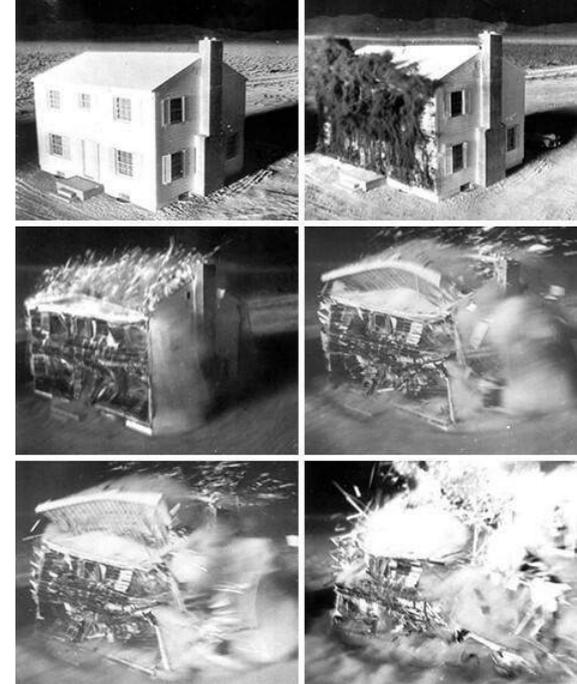
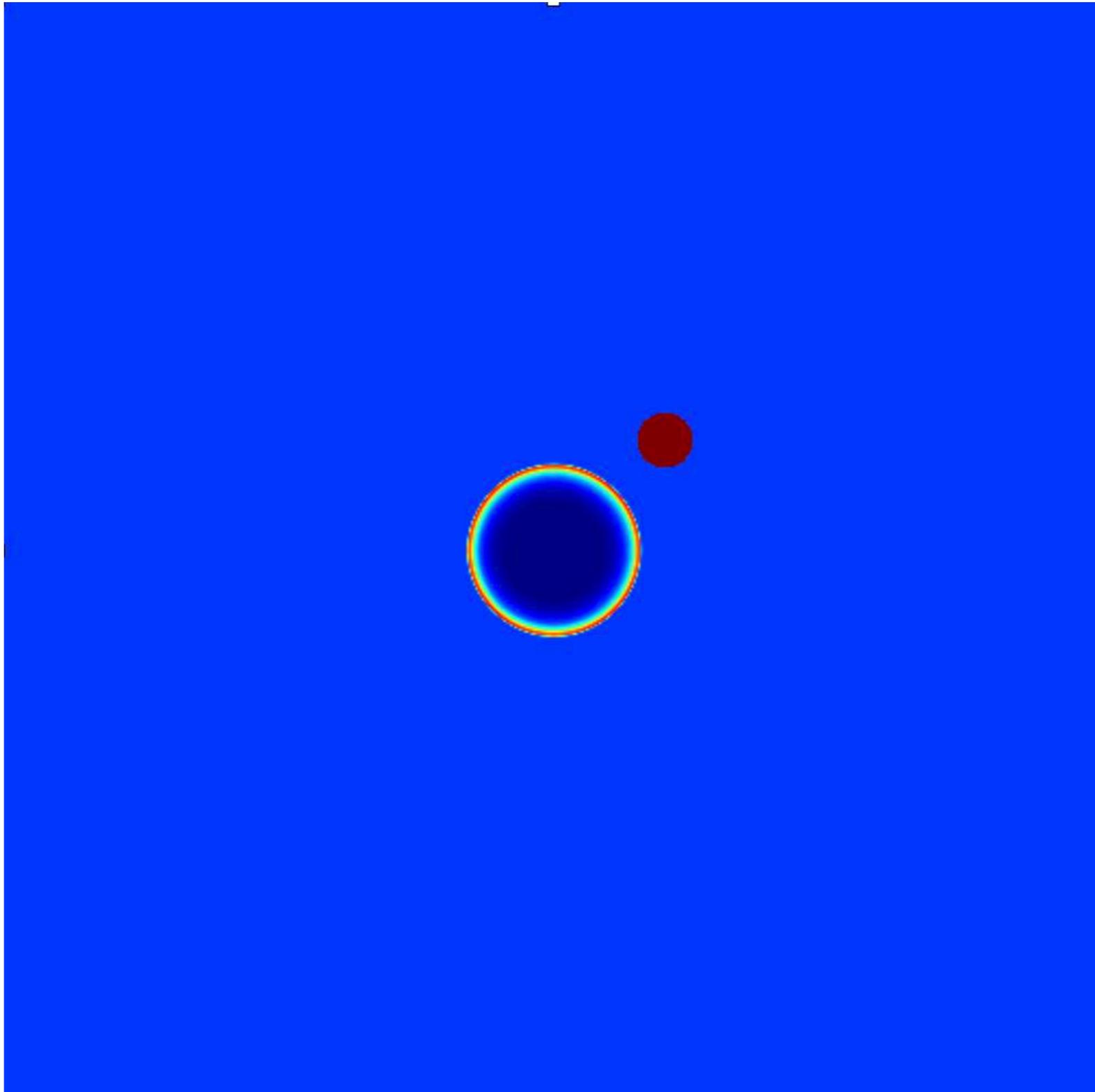


Bombe H « Castle Romeo »
1954



Cas de l'explosion de supernova

Pic d'énergie libérée par l'explosion d'une étoile massive dans un milieu gazeux

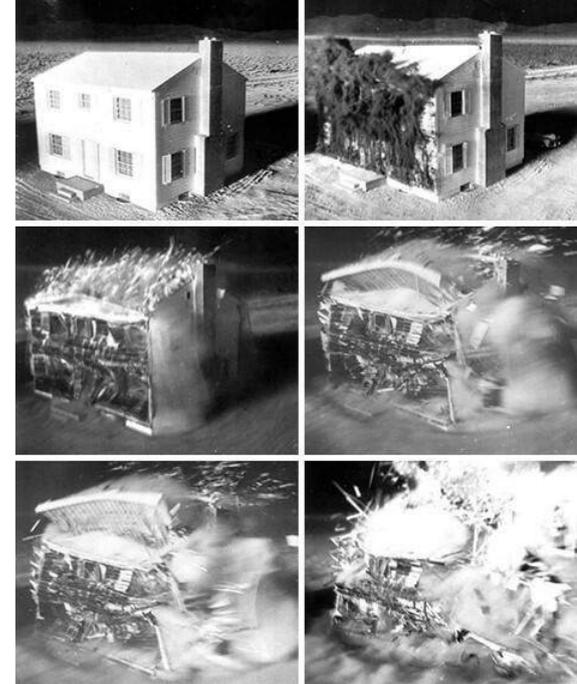
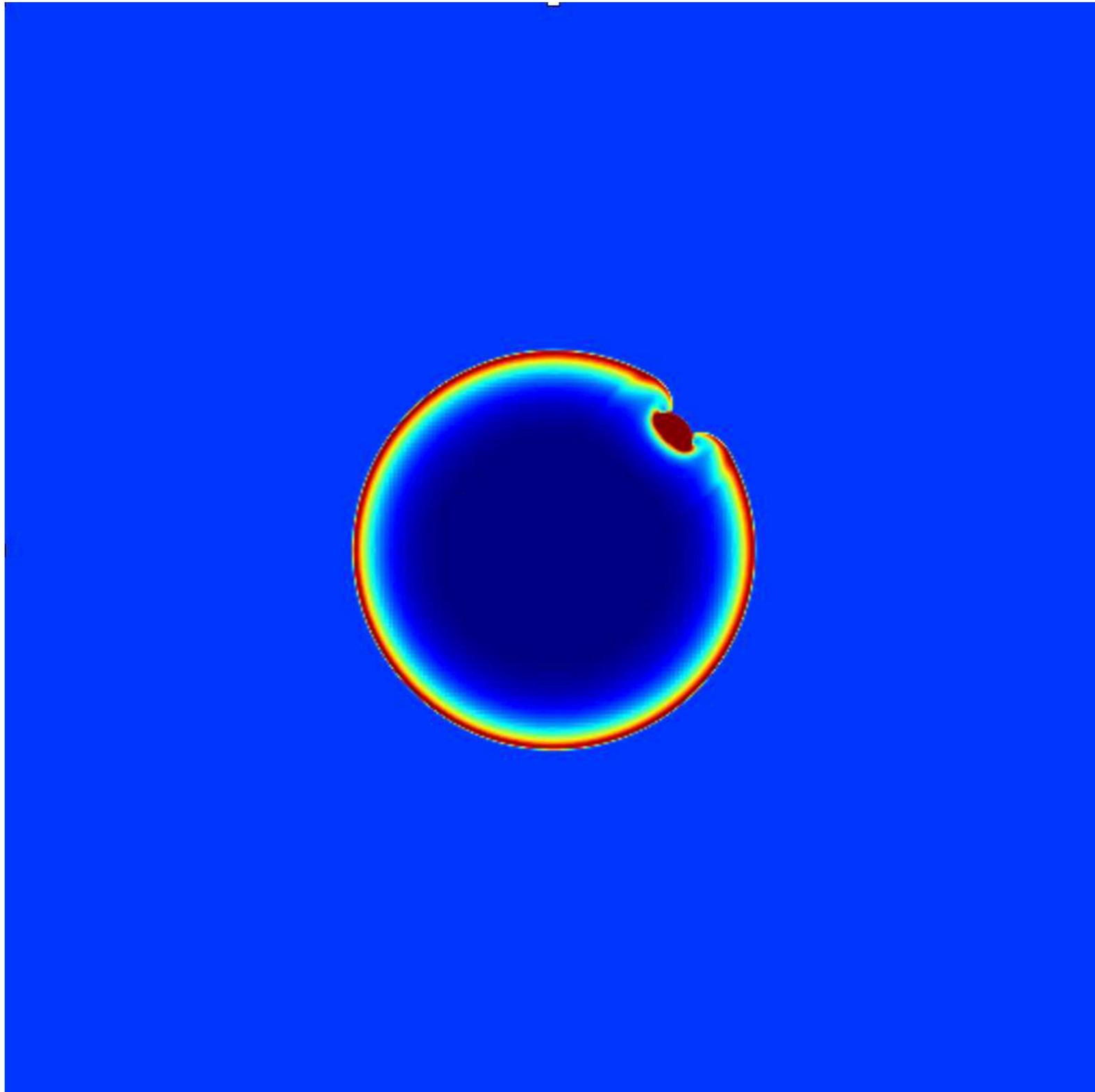


Bombe H « Castle Romeo »
1954



Cas de l'explosion de supernova

Pic d'énergie libérée par l'explosion d'une étoile massive dans un milieu gazeux

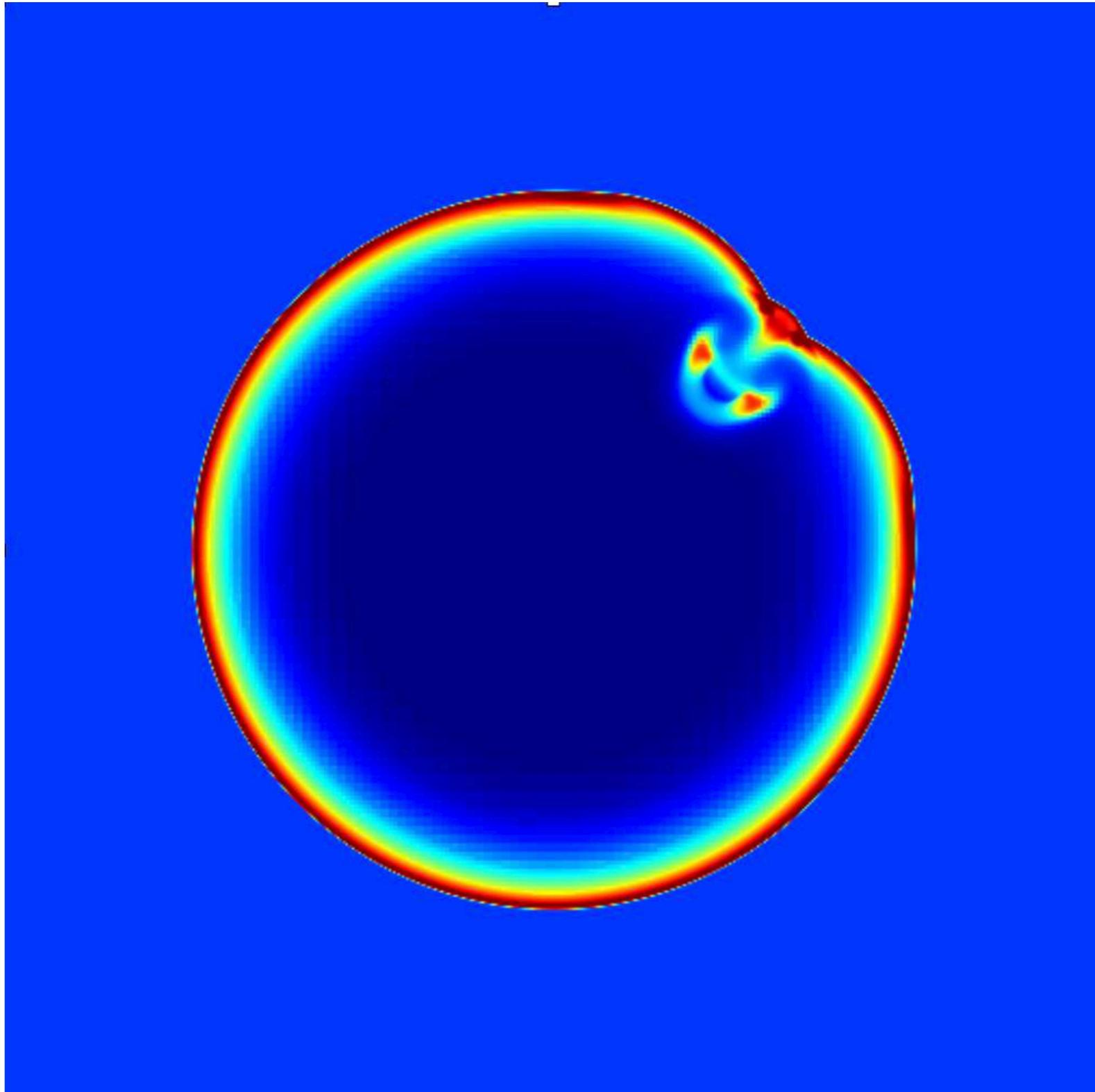
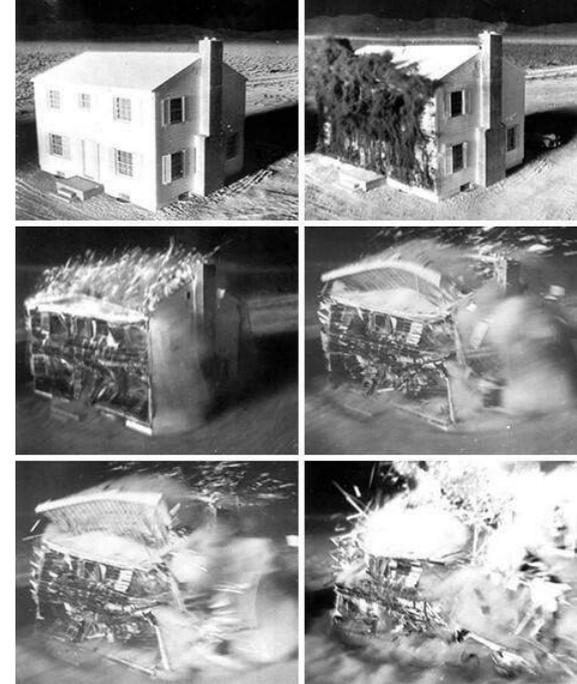


Bombe H « Castle Romeo »
1954



Cas de l'explosion de supernova

Pic d'énergie libérée par l'explosion d'une étoile massive dans un milieu gazeux

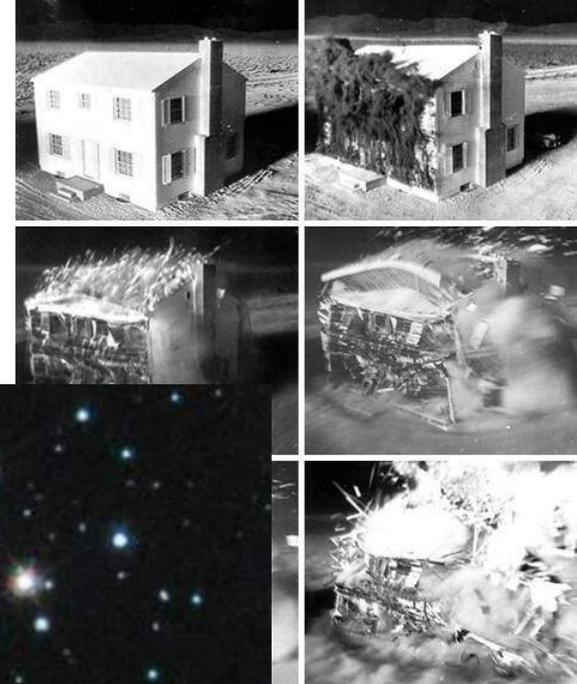


Bombe H « Castle Romeo »
1954



Cas de l'explosion de supernova

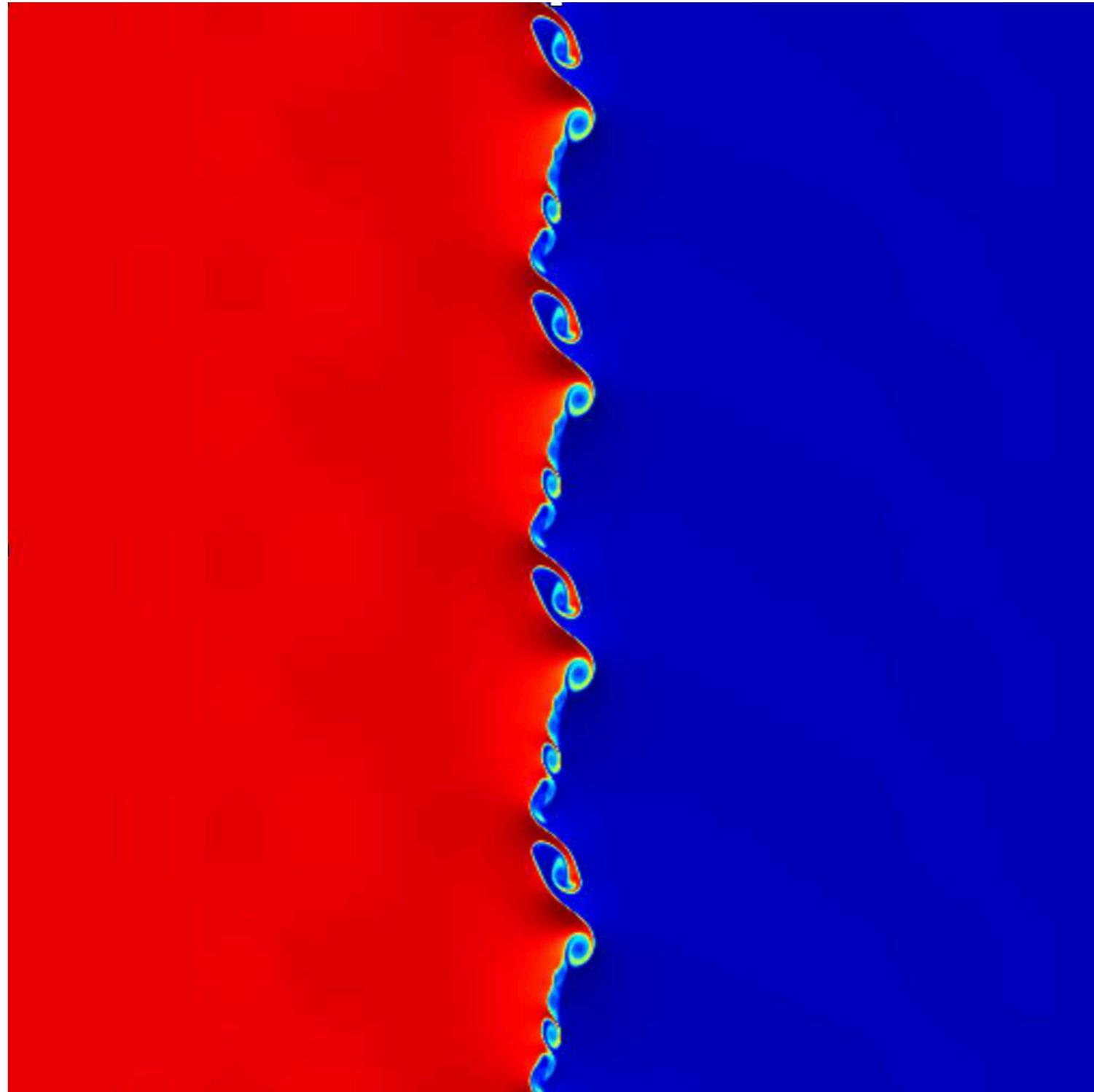
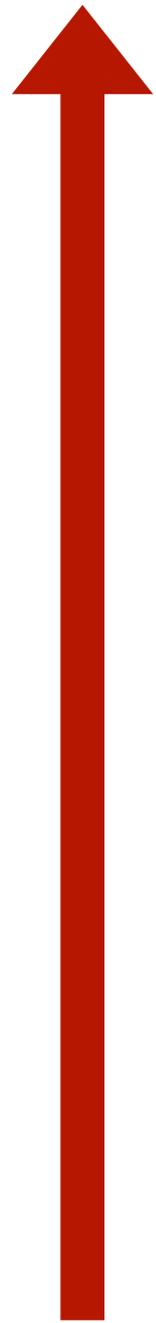
Pic d'énergie libérée par l'explosion d'une étoile massive dans un milieu gazeux





Instabilité de Kelvin-Helmoltz

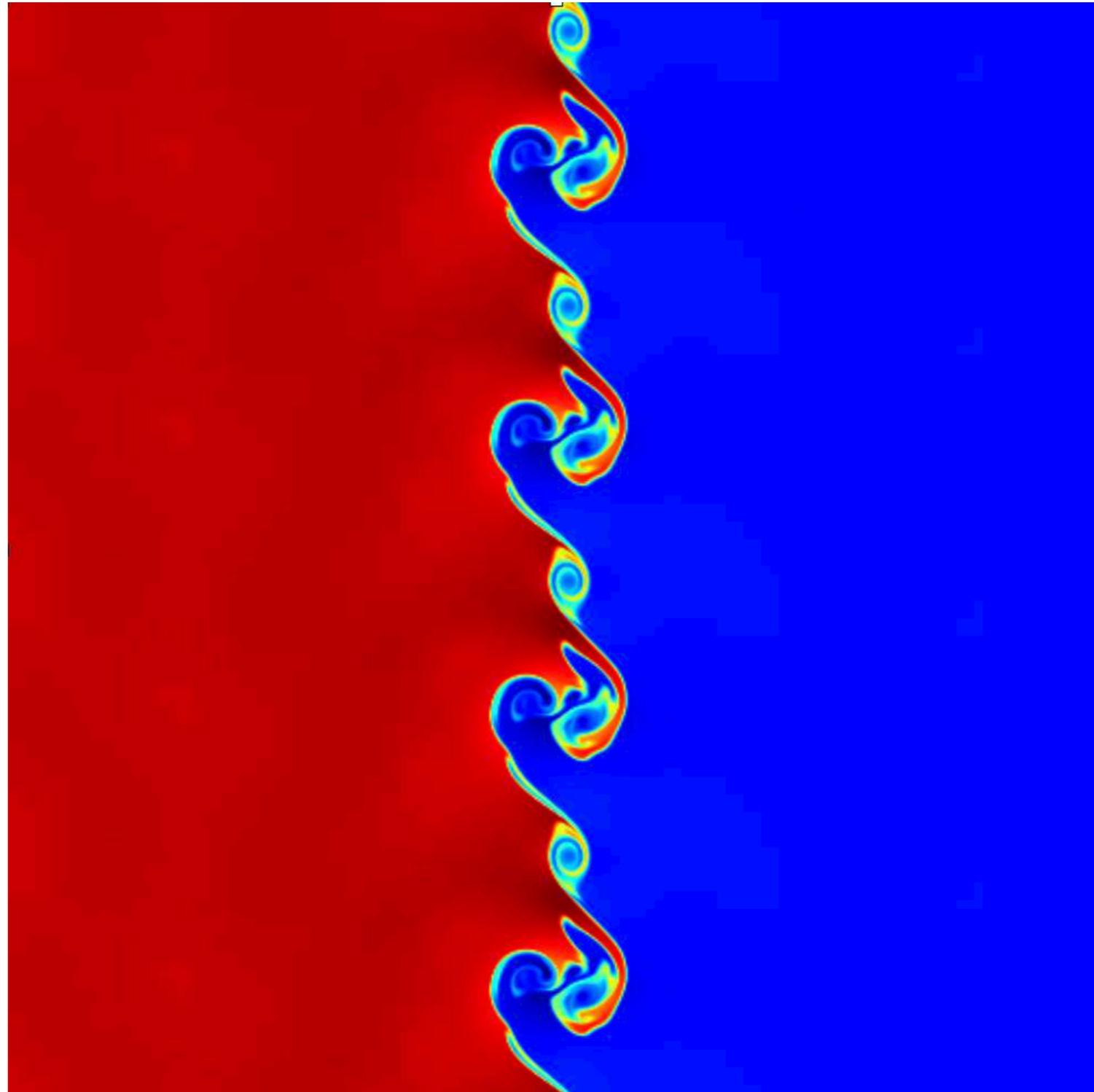
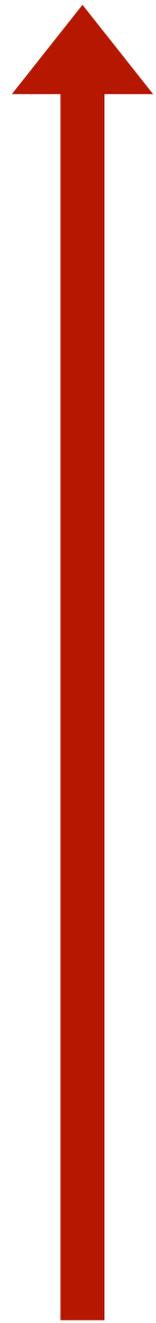
2 couches de gaz en cisaillement





Instabilité de Kelvin-Helmoltz

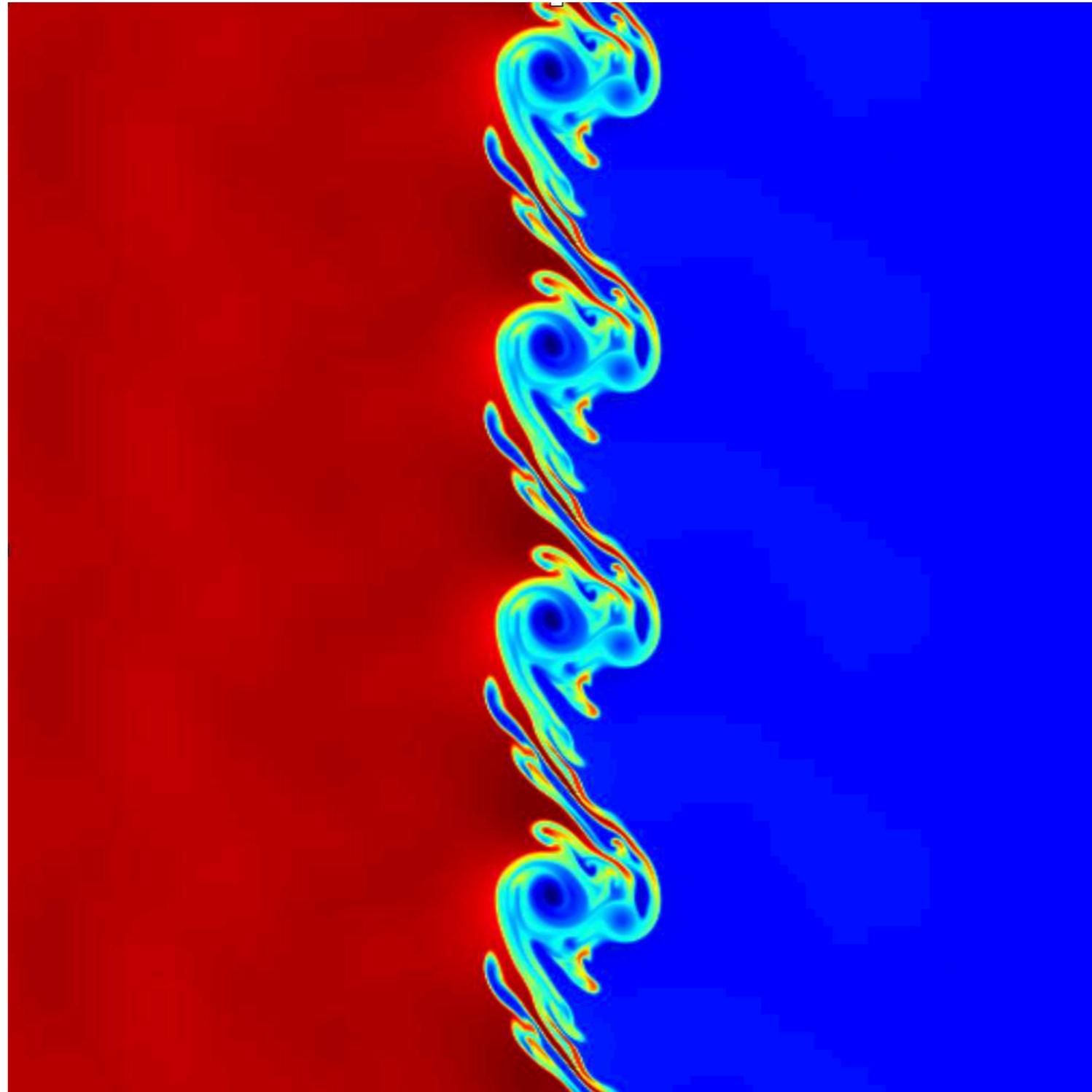
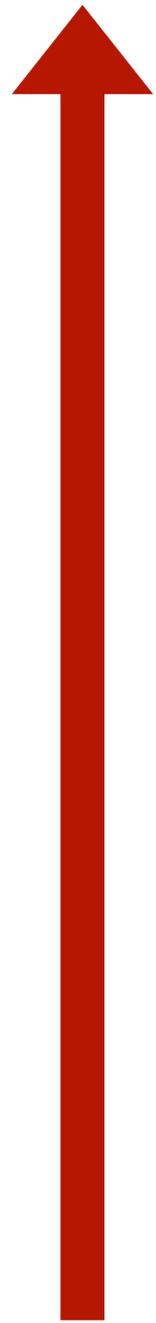
2 couches de gaz en cisaillement





Instabilité de Kelvin-Helmoltz

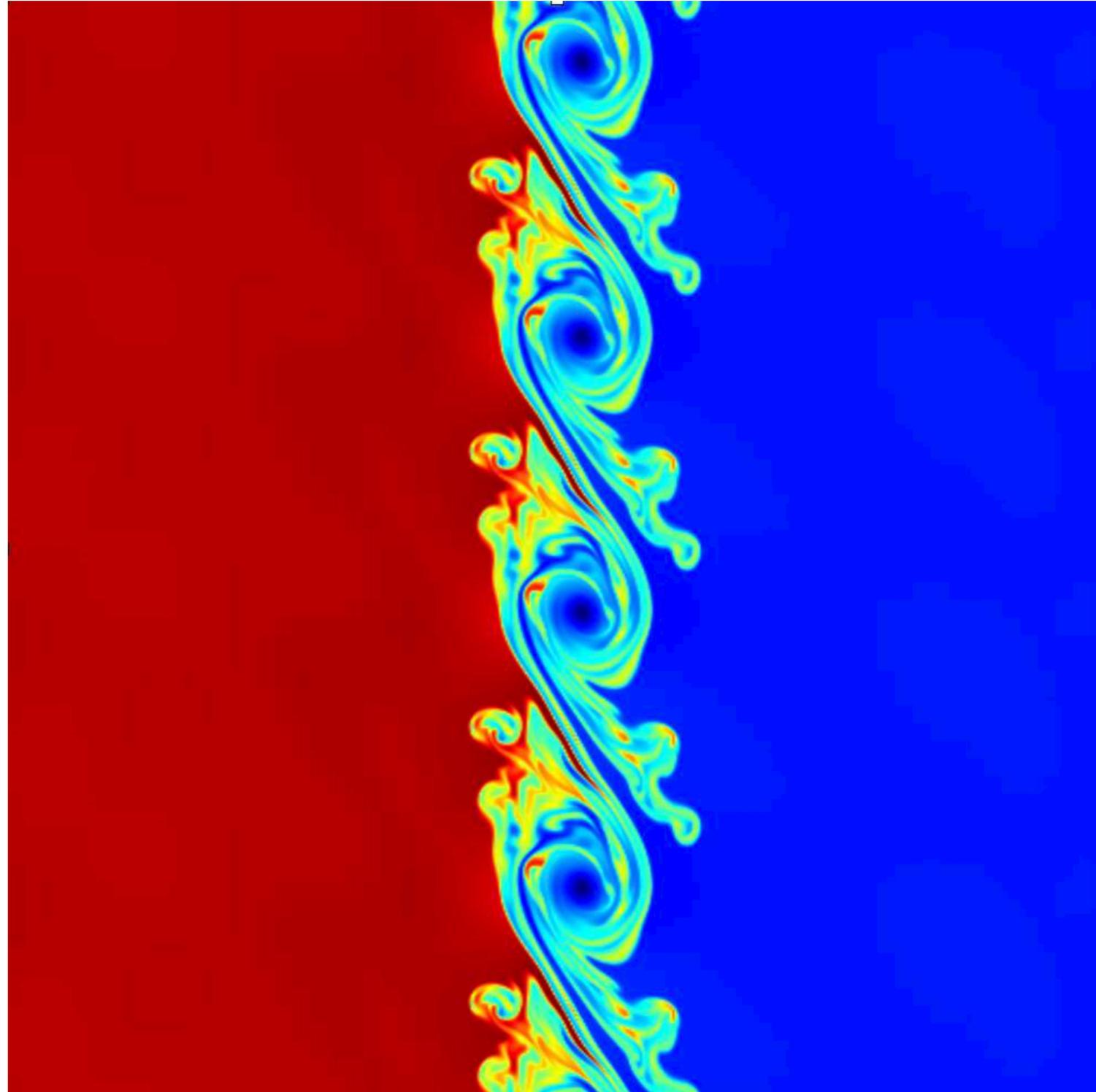
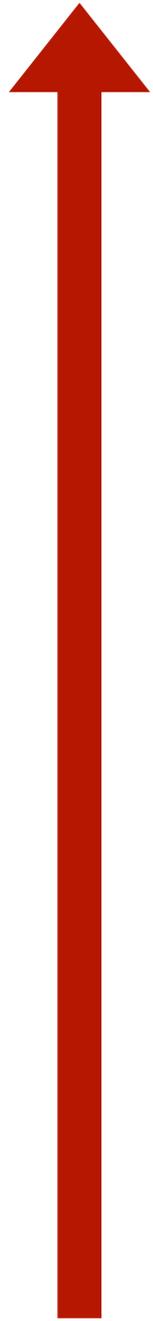
2 couches de gaz en cisaillement



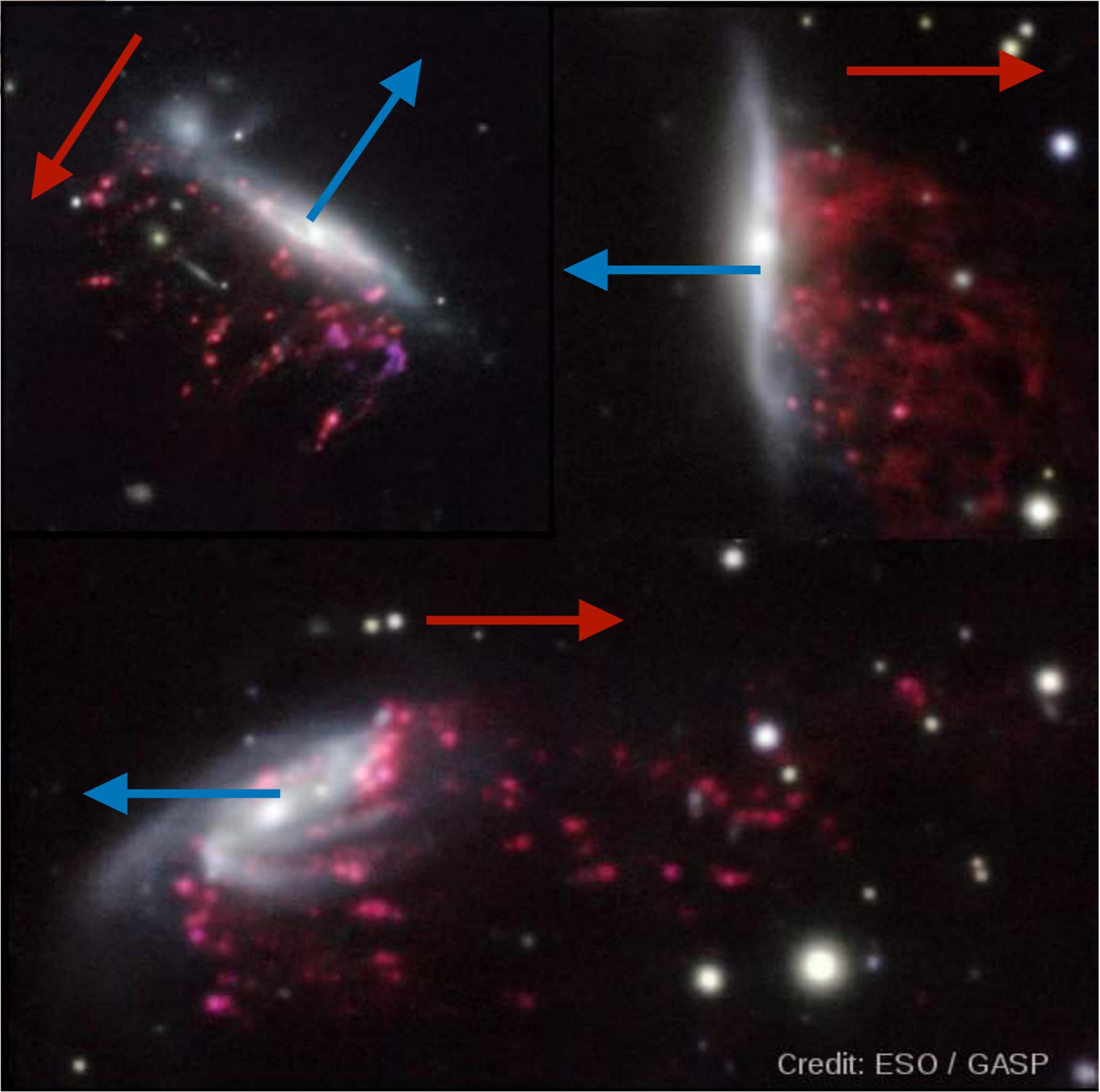


Instabilité de Kelvin-Helmoltz

2 couches de gaz en cisaillement



Instabilité de Kelvin-Helmoltz

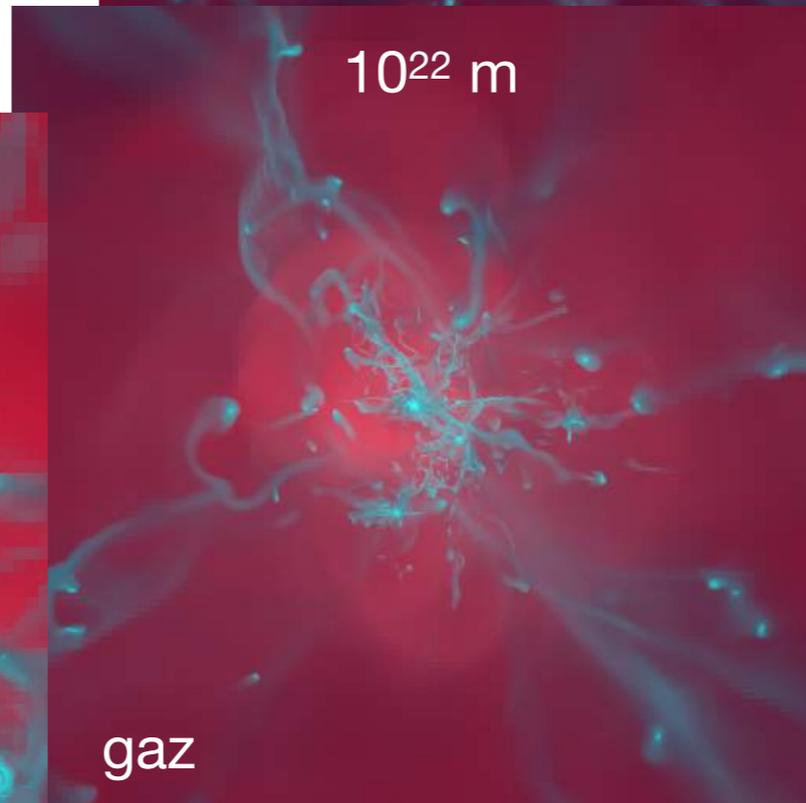
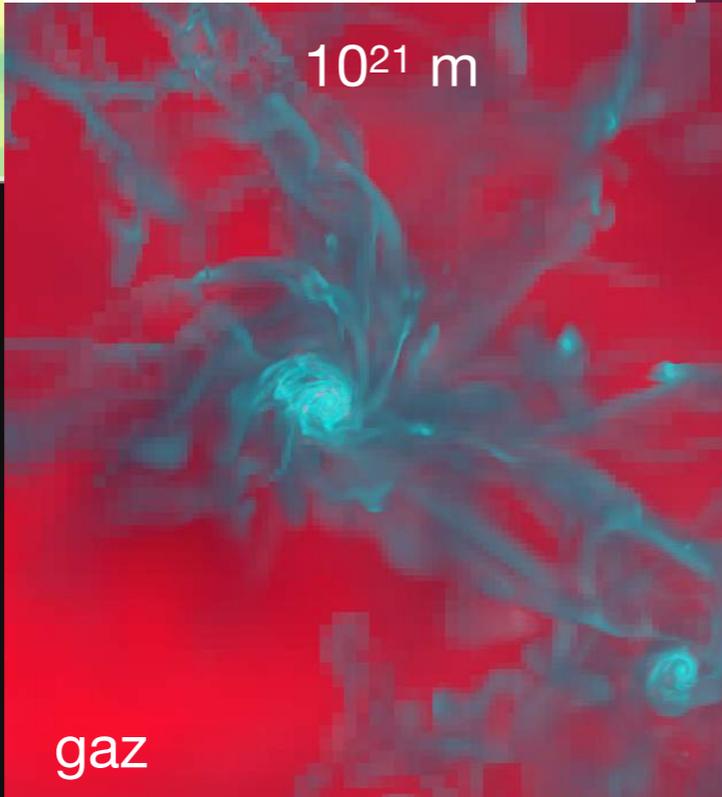
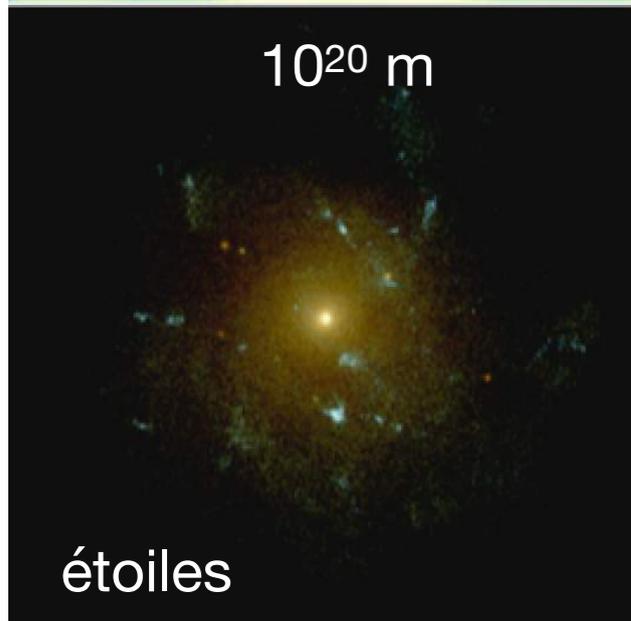
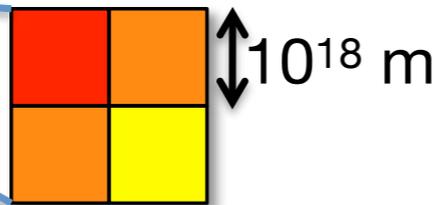
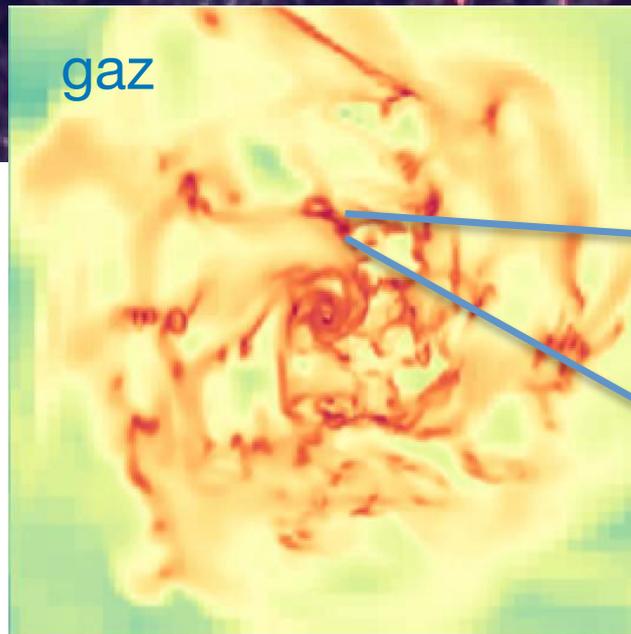
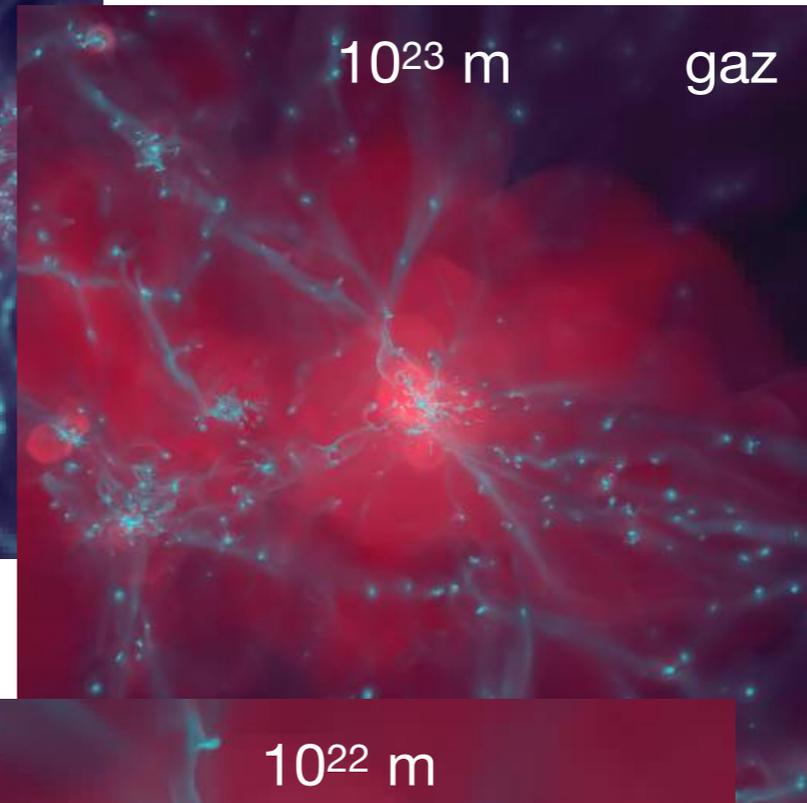
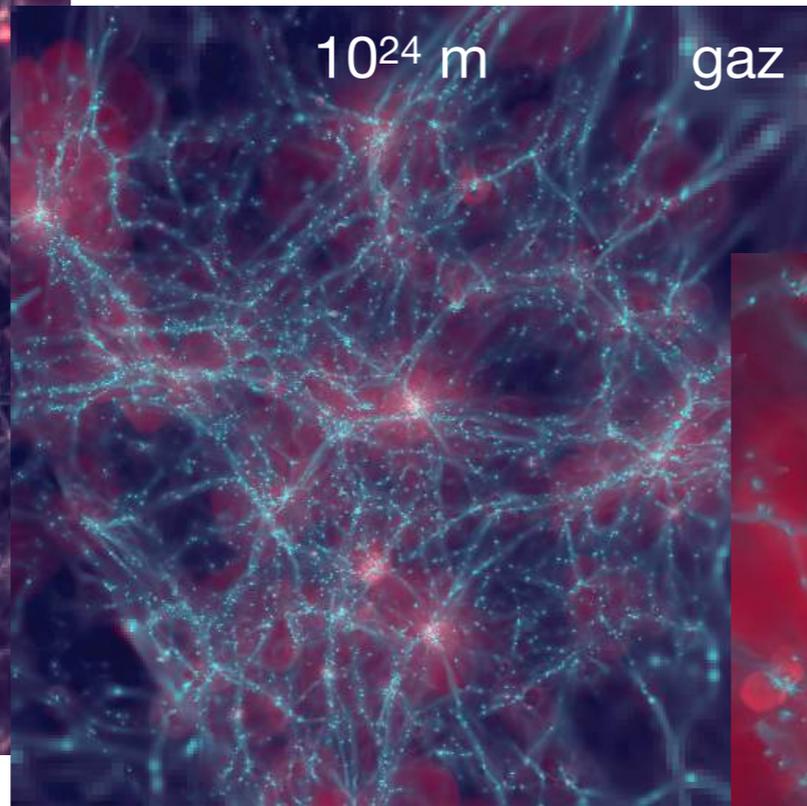
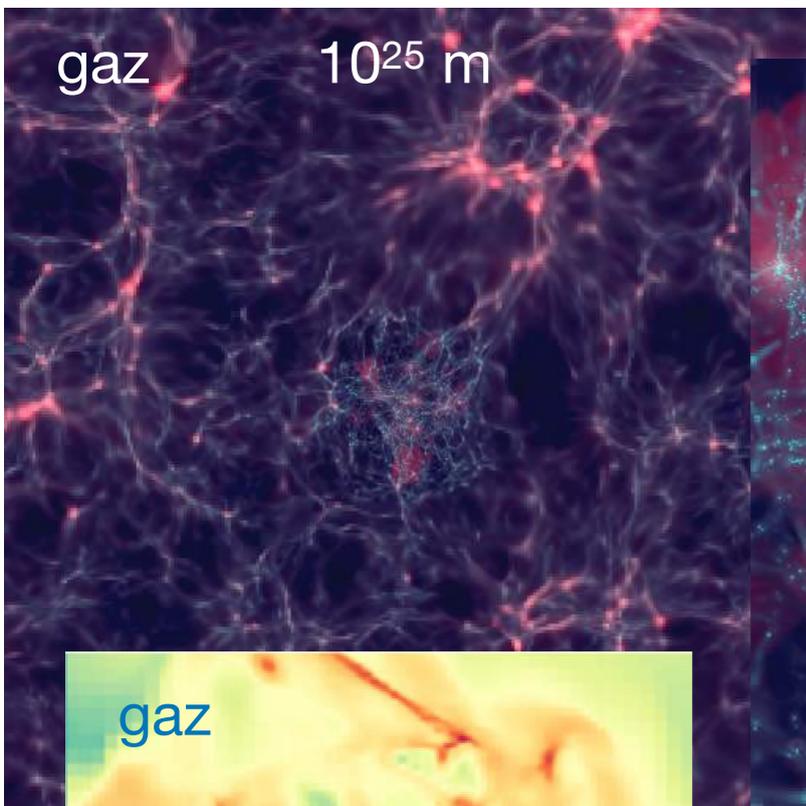


Comment gérer la multitude d'échelles ?

Combien de cellules ?

1D $\frac{10^{25}}{10^{18}} = 10^7$

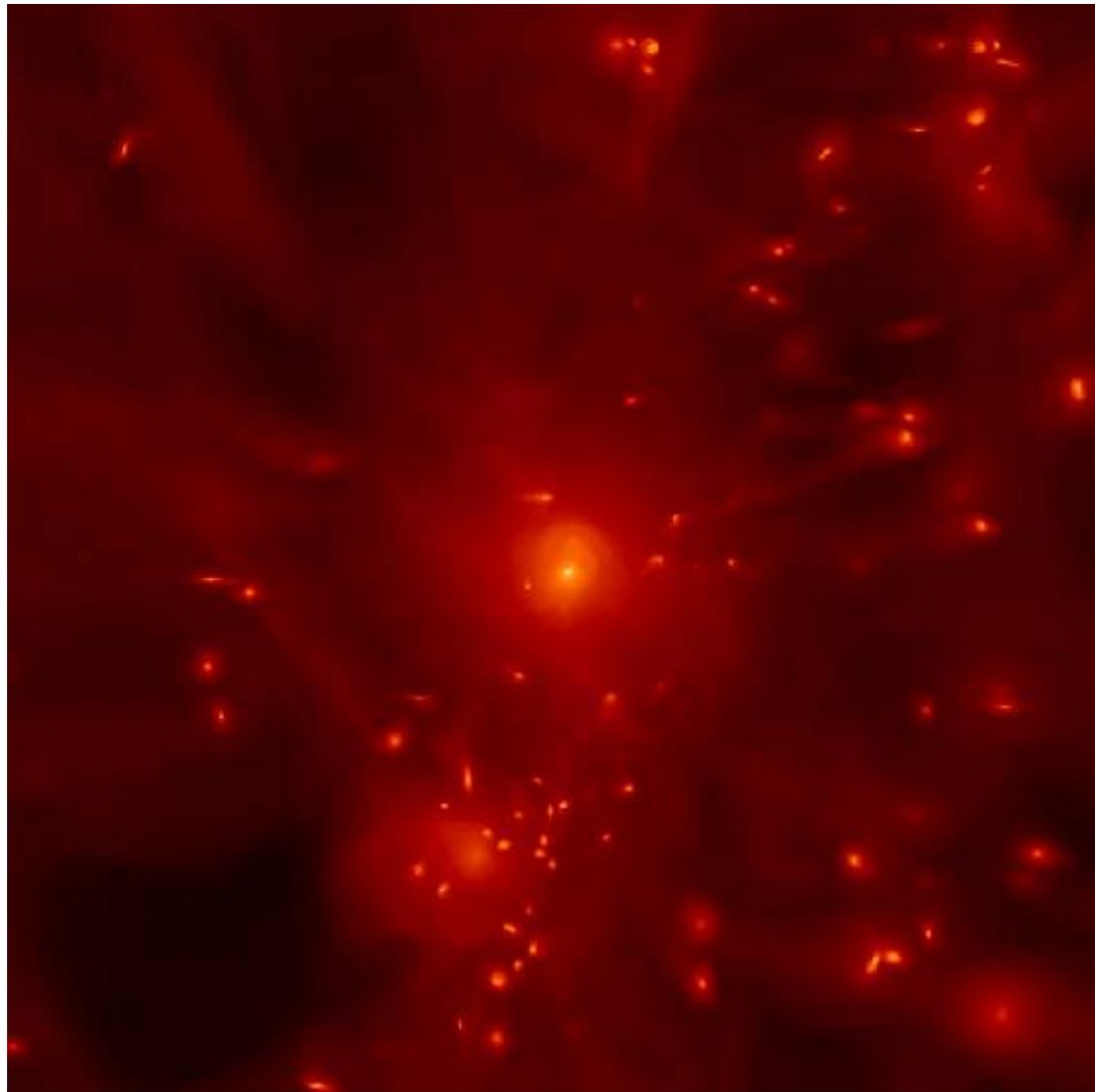
3D $10^7 \times 10^7 \times 10^7 = 10^{21}$



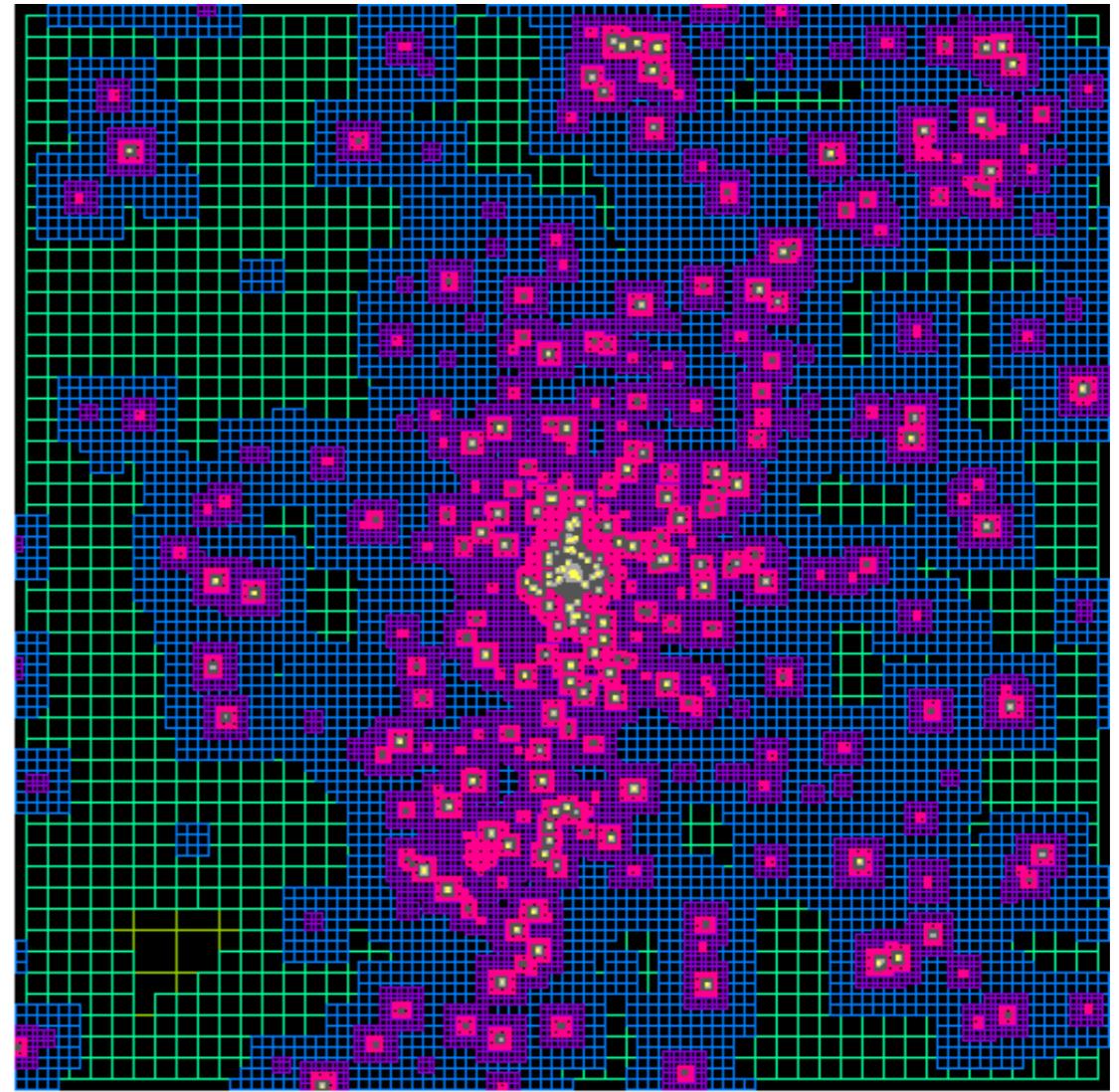
Raffinement adaptatif de maille

On met la résolution là où est la masse

gain en résolution aux échelles pertinentes et gain de temps aux échelles inutiles



distribution de matière



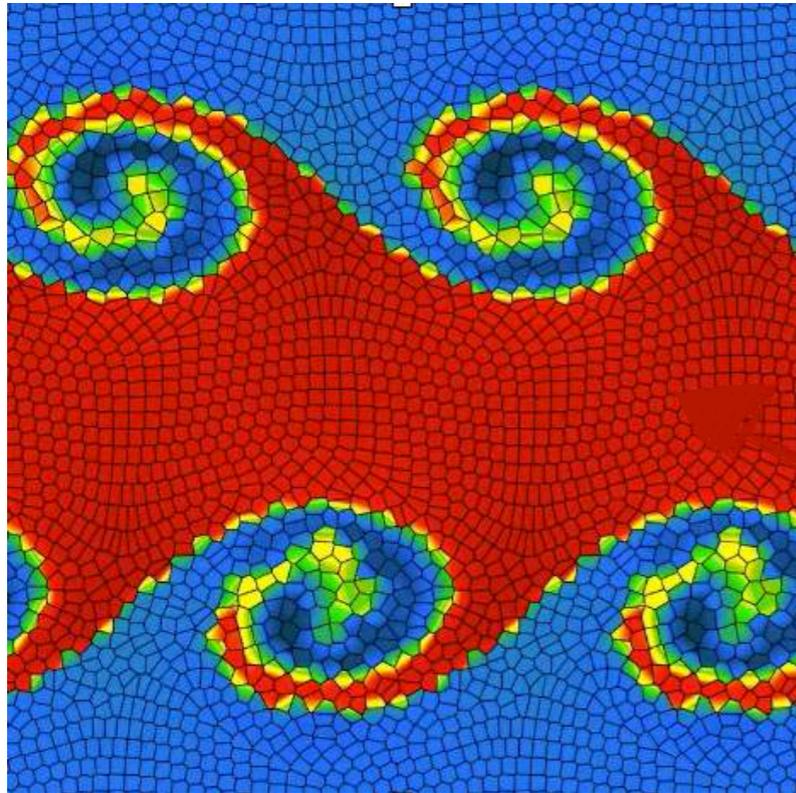
distribution du maillage

Codes : Ramses (Teyssier 2002), Enzo (Bryan+ 2013), Athena++ (White, Stone & Gammie 2016), etc.

Approches alternatives aux codes grilles

Moving Mesh

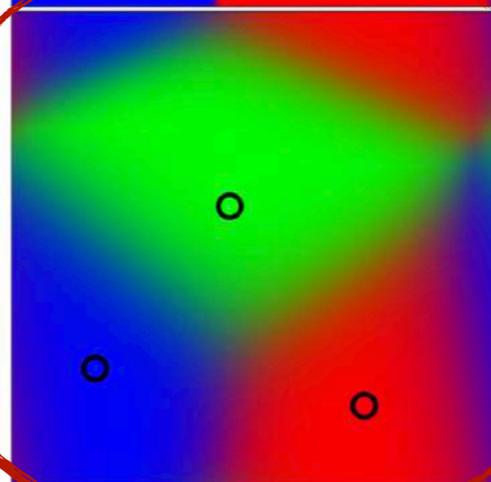
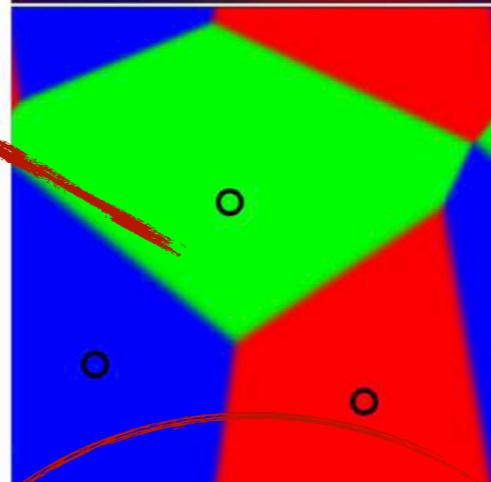
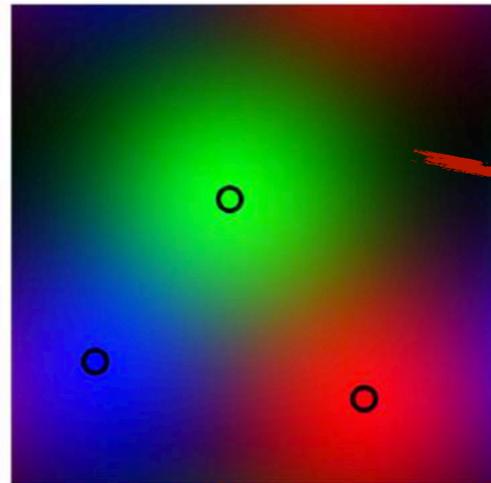
Code Arepo



Springel 2009

Riemann sans la grille

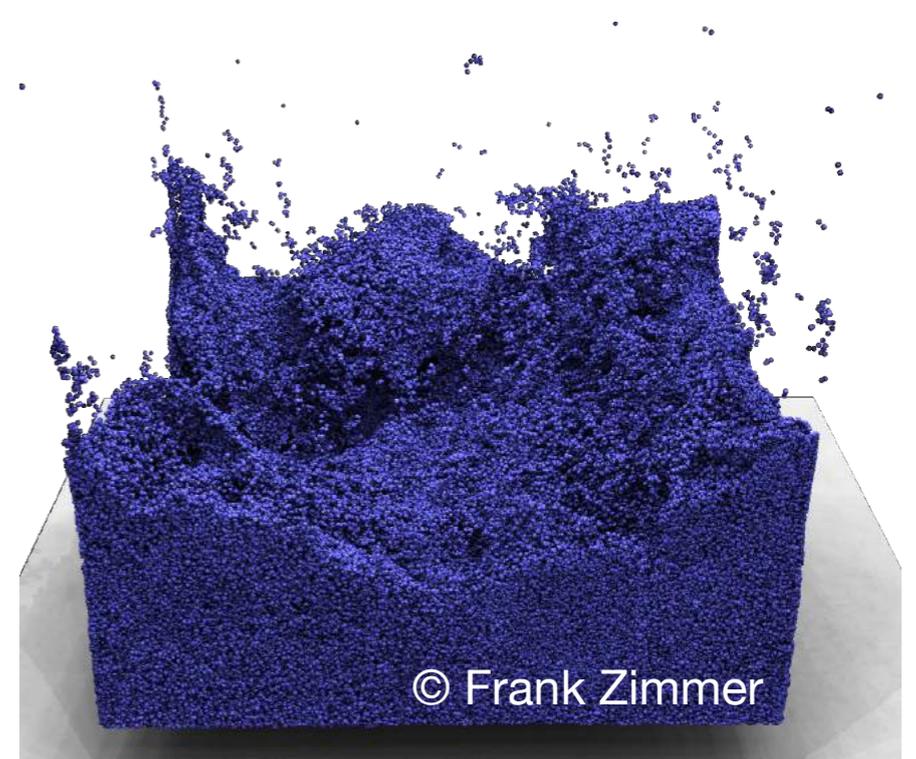
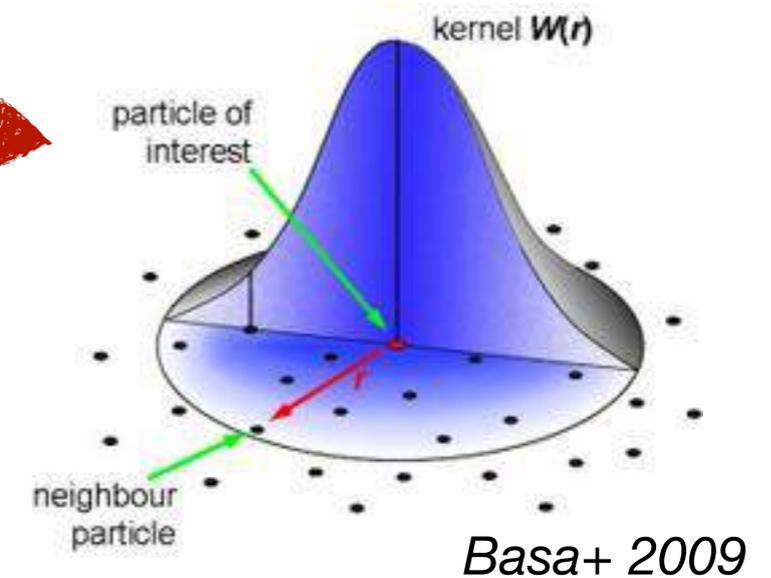
Code Gizmo



Hopkins 2015

Smoothed Particle Hydrodynamics

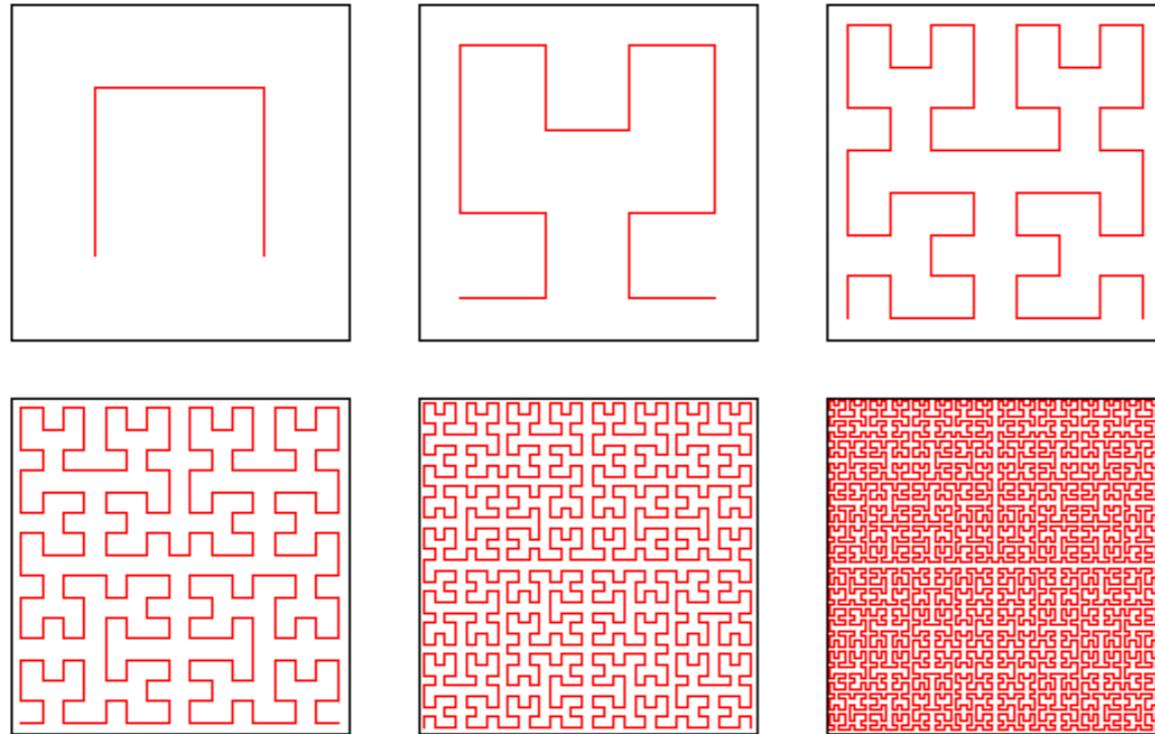
Codes: Gadget (Springel+ 2002),
Gasoline2 (Wadsley+ 2017)



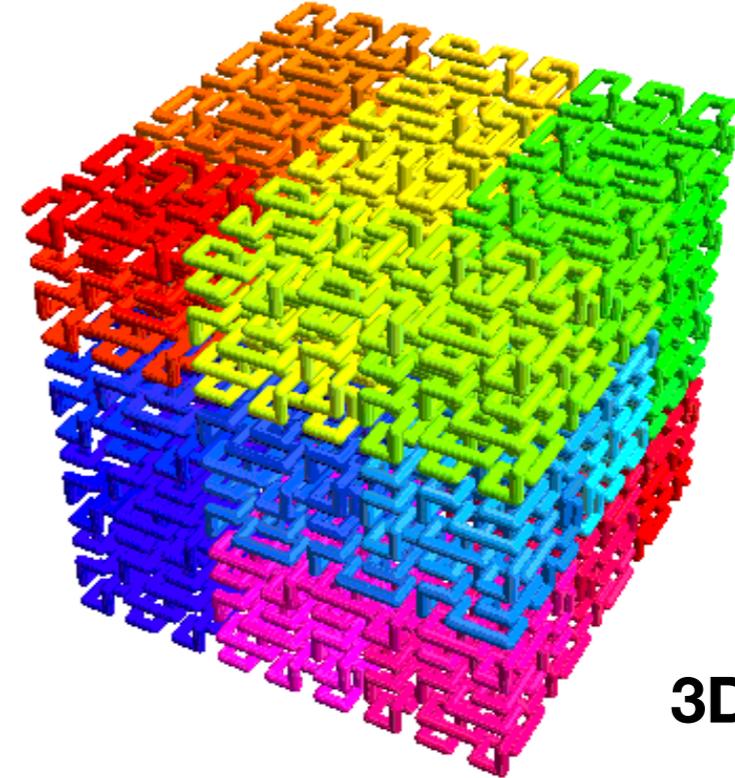
© Frank Zimmer

Pour être plus efficace, on partage le travail

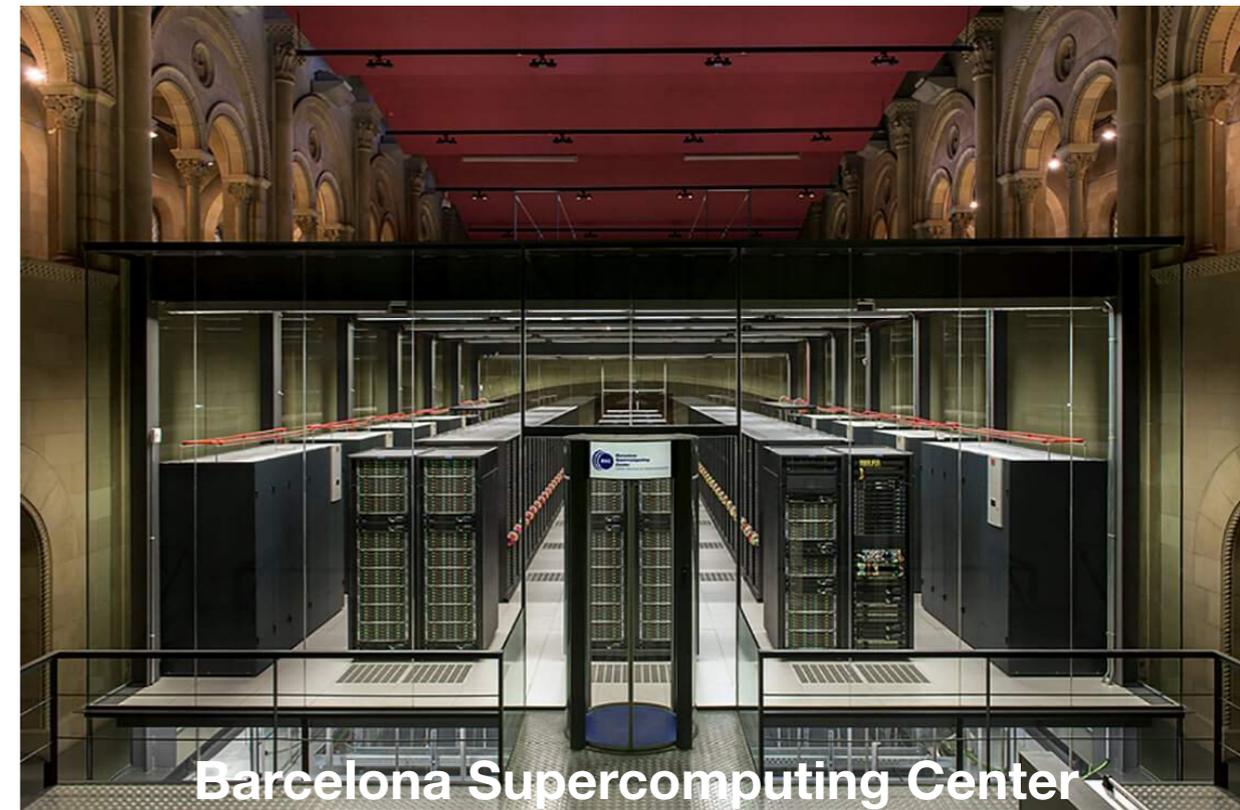
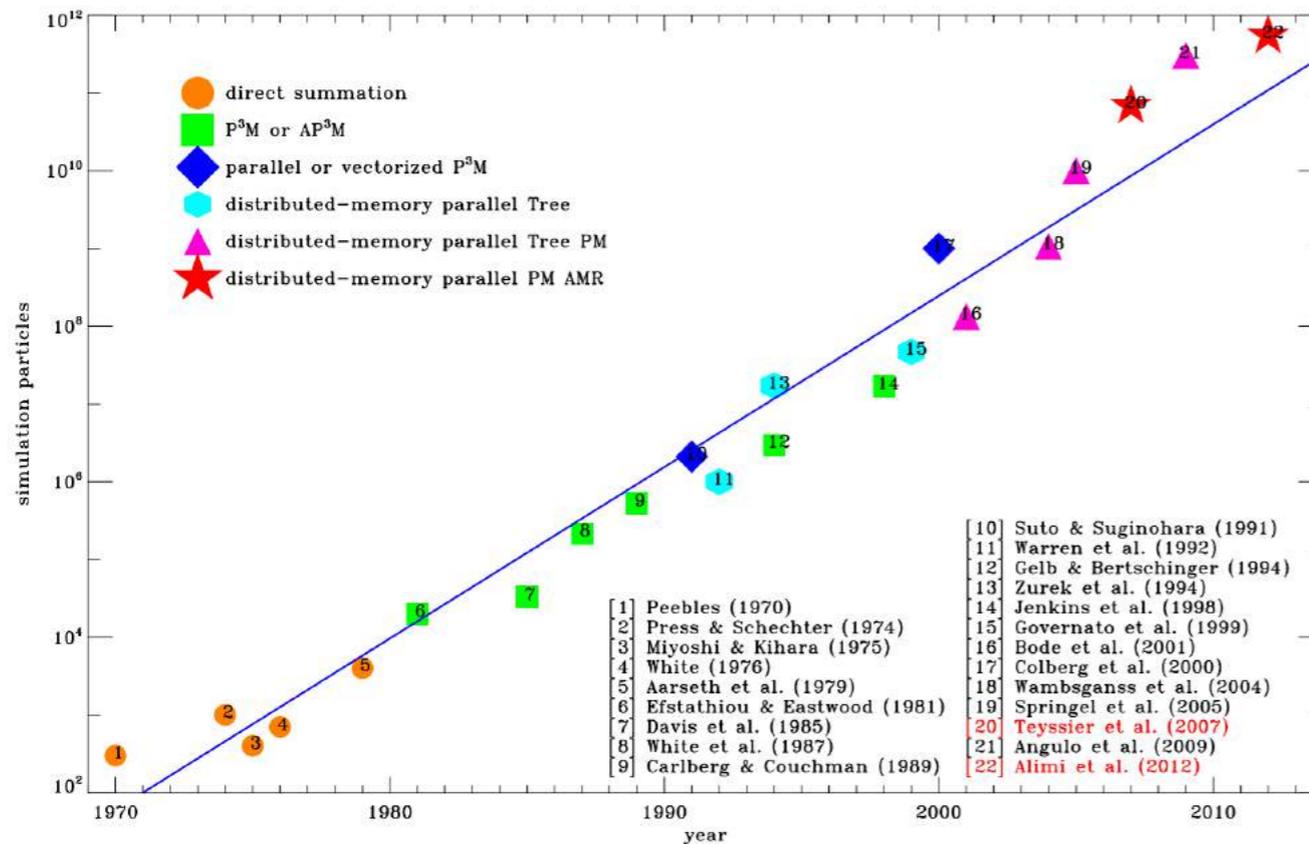
Une simulation peut utiliser + de 10 000 processeurs



2D



3D

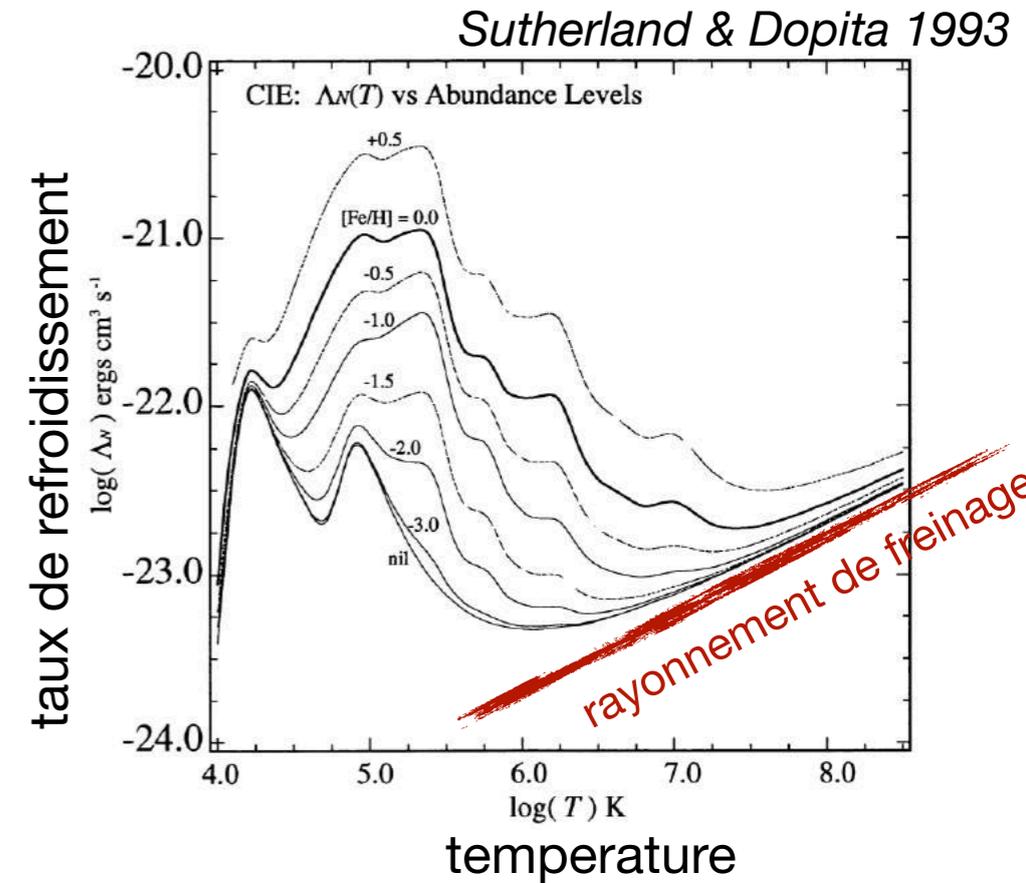


Le refroidissement du gaz

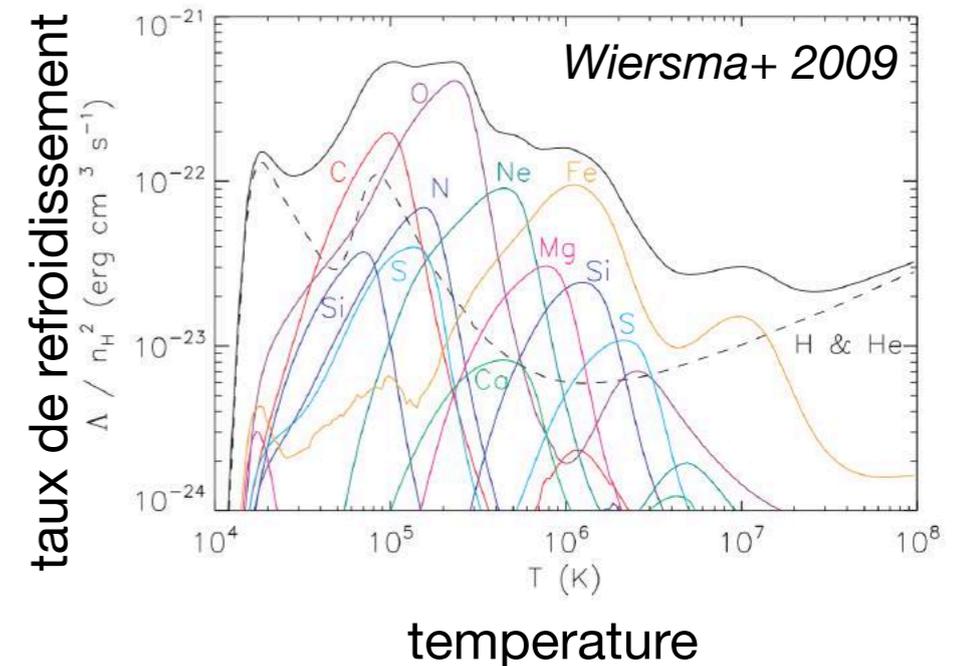
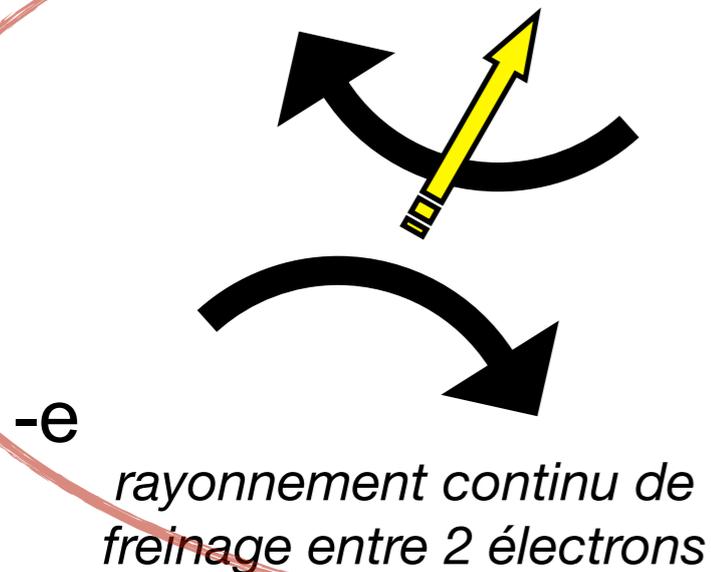
Dans un gaz les particules (atomes, électrons, photons) interagissent entre eux

Ce qui fait émettre du rayonnement (photon):

- c'est ainsi qu'on peut observer le gaz
- ce photon emporte de l'énergie avec lui, donc le gaz perd cette même énergie



exemple: émet des photons $h\nu$



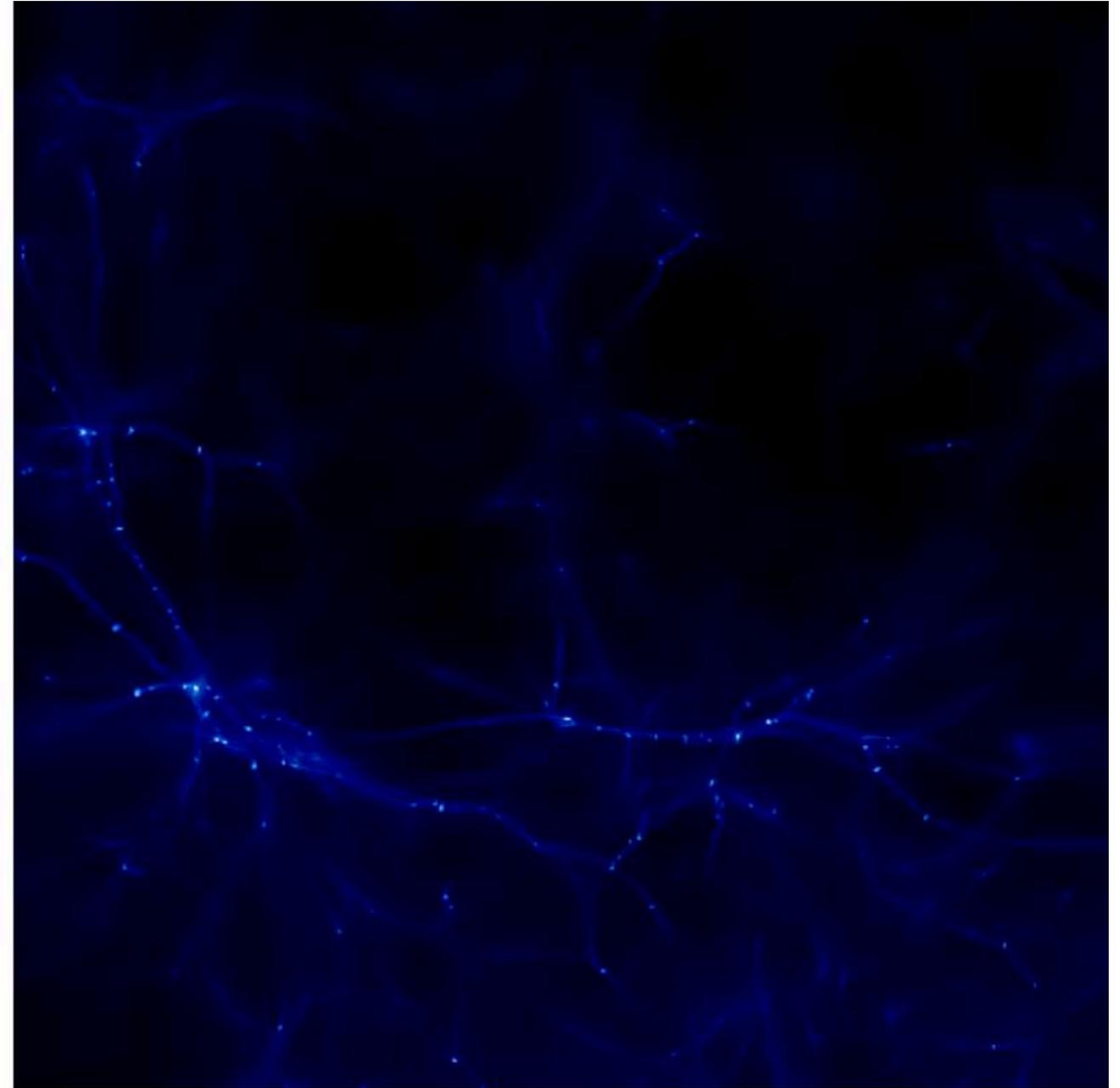
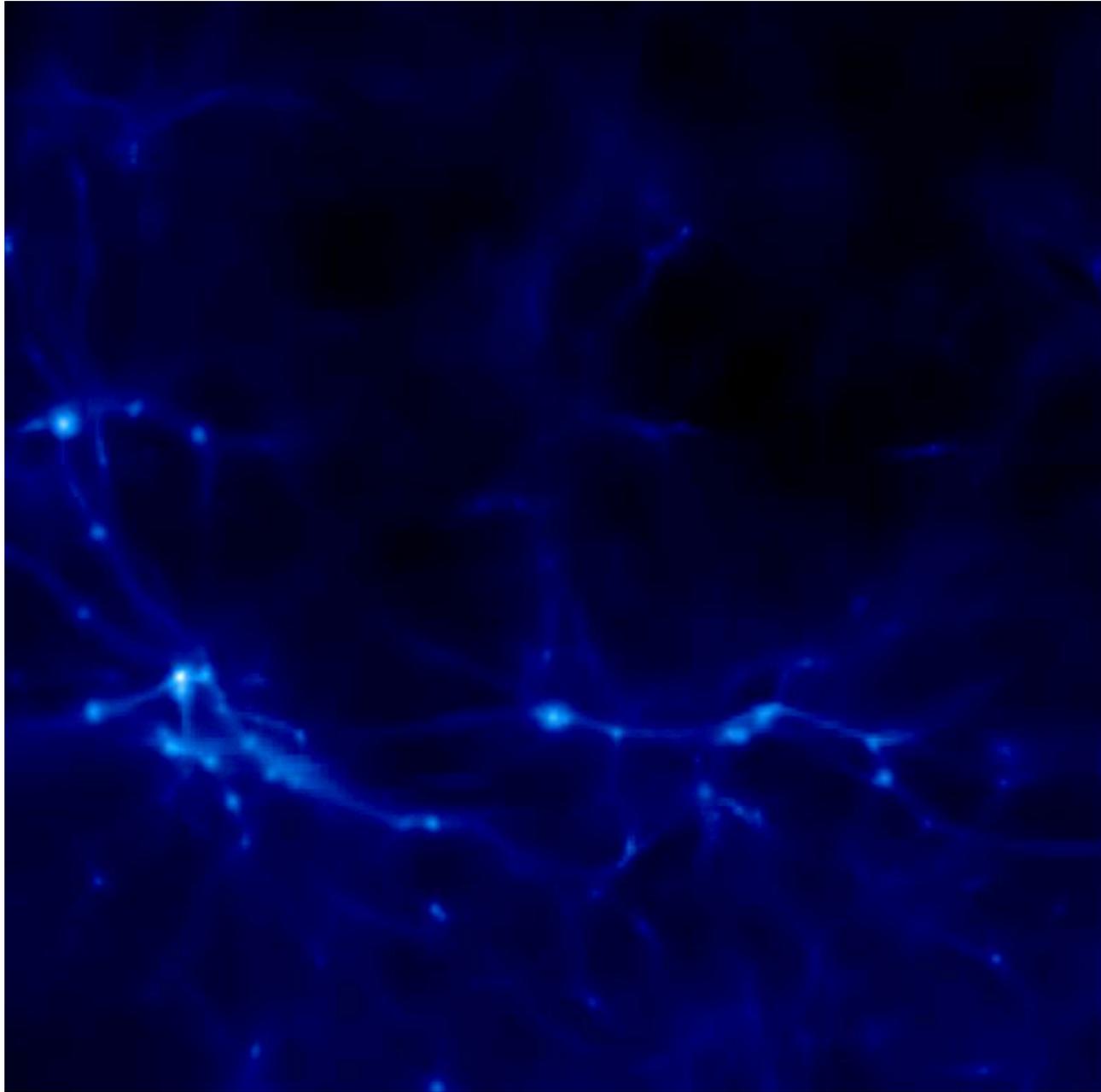
Contrairement à la matière noire le gaz peut refroidir

Le refroidissement du gaz

Densité de gaz

sans refroidissement

avec refroidissement



10 Mpc

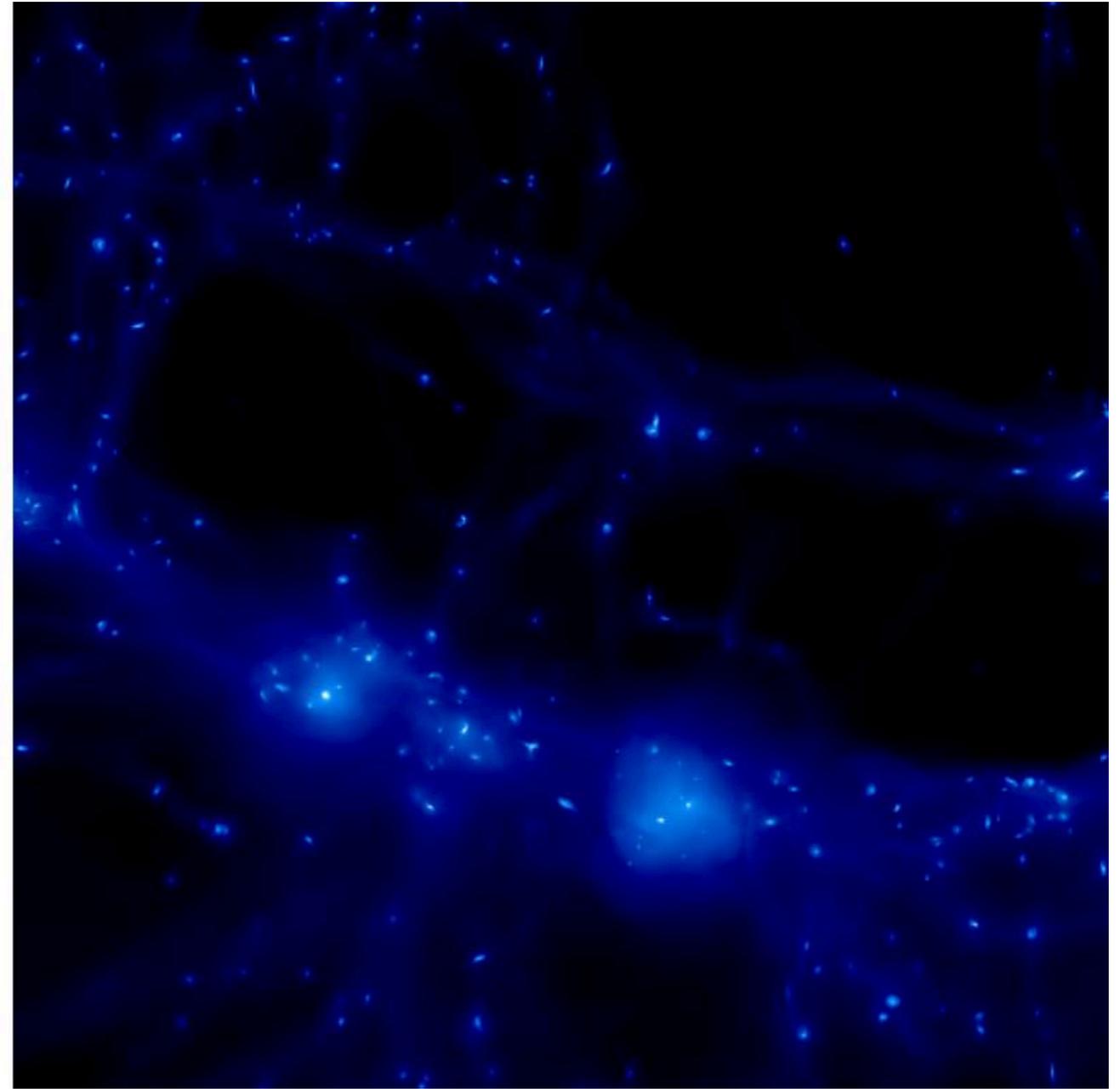
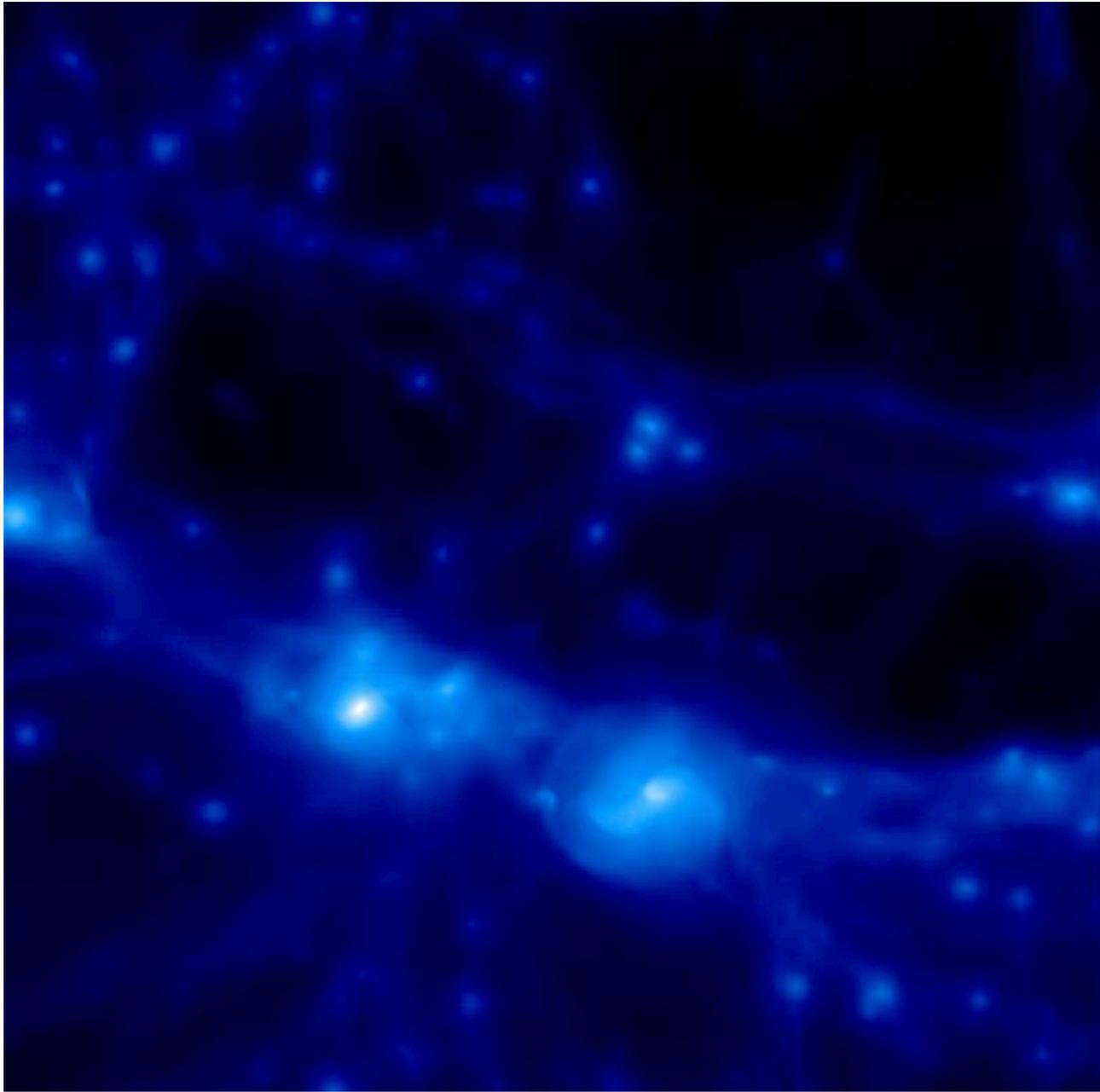
10 Mpc

Le refroidissement du gaz

Densité de gaz

sans refroidissement

avec refroidissement



10 Mpc

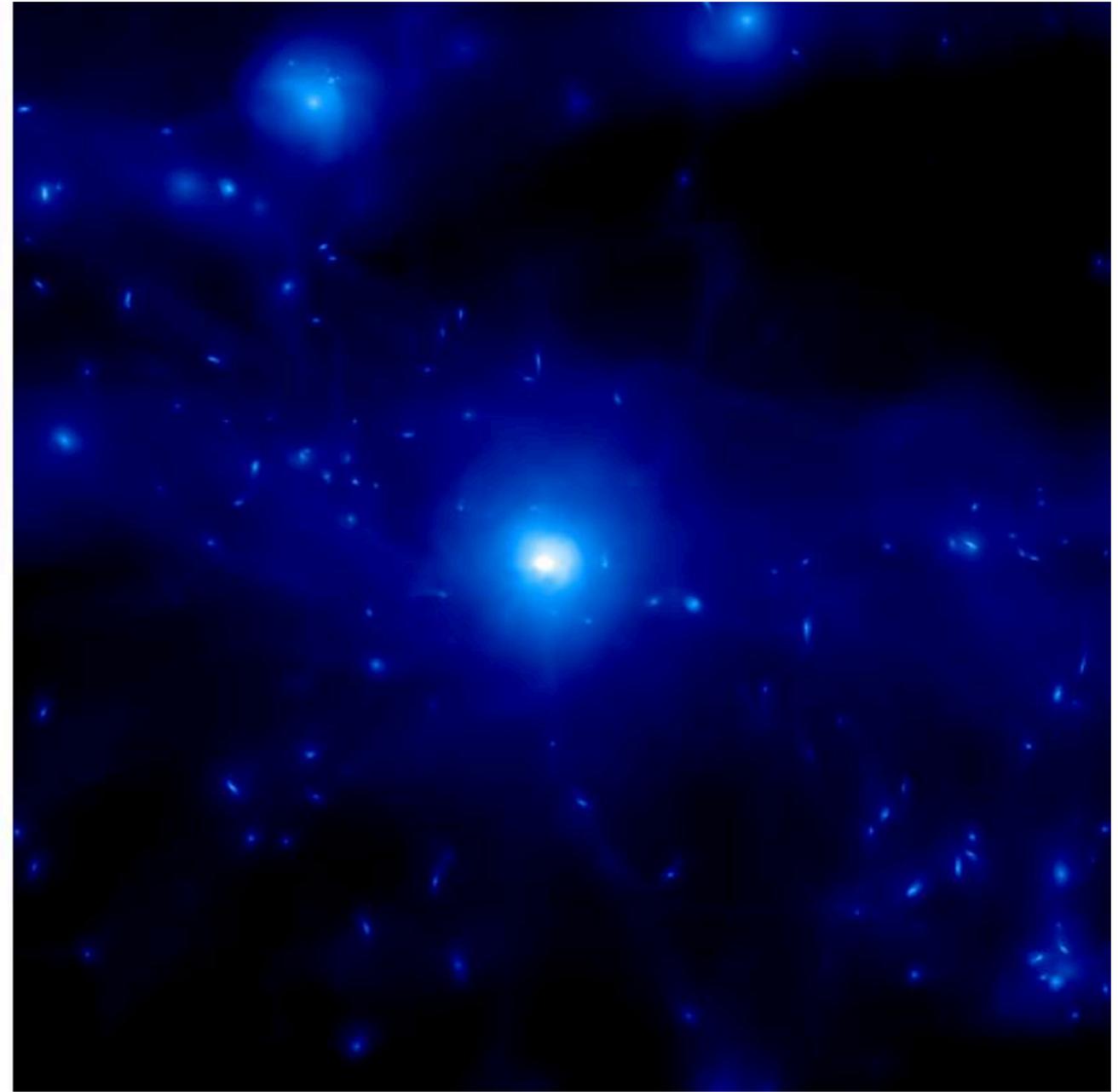
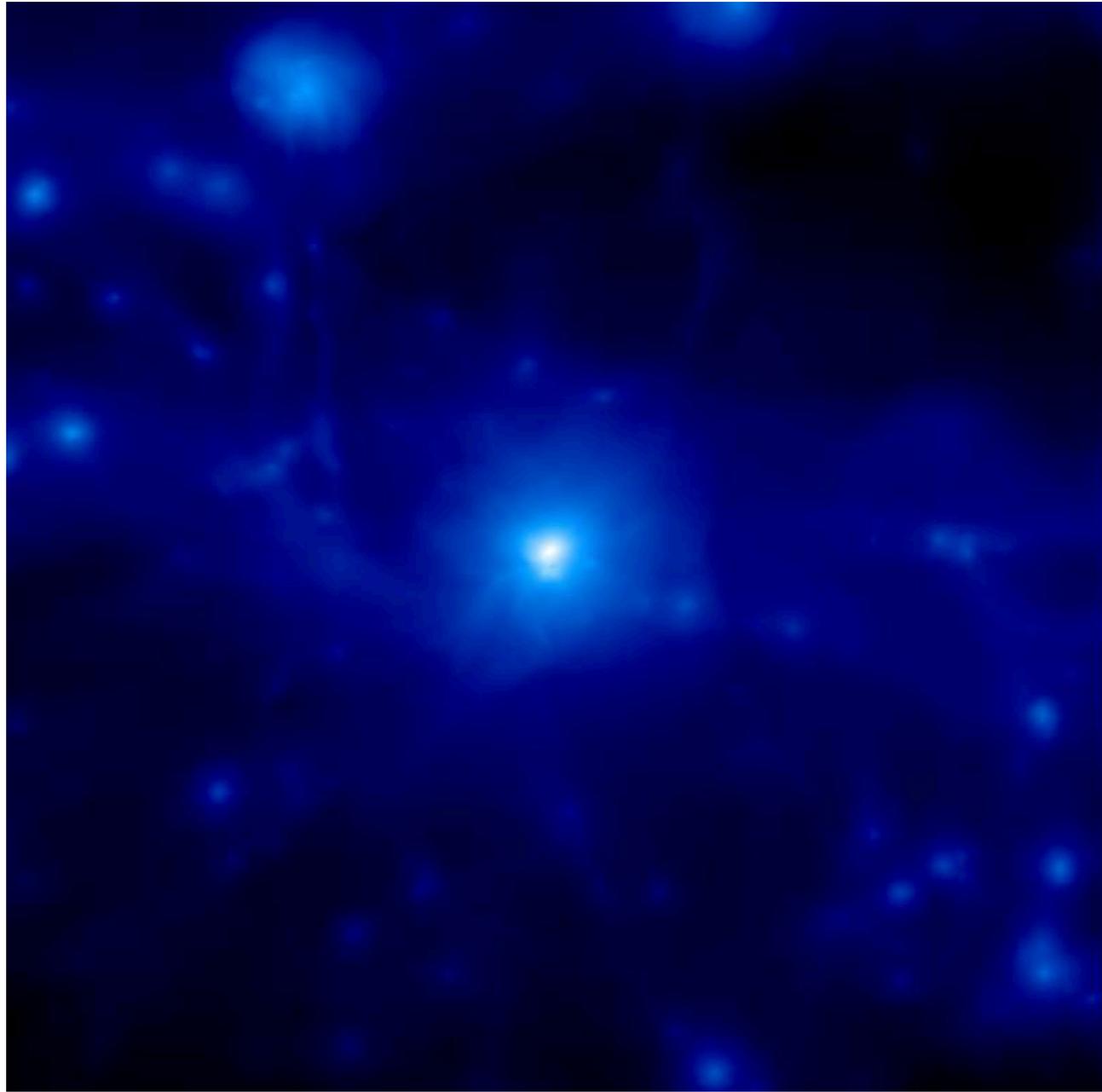
10 Mpc

Le refroidissement du gaz

Densité de gaz

sans refroidissement

avec refroidissement



10 Mpc

10 Mpc

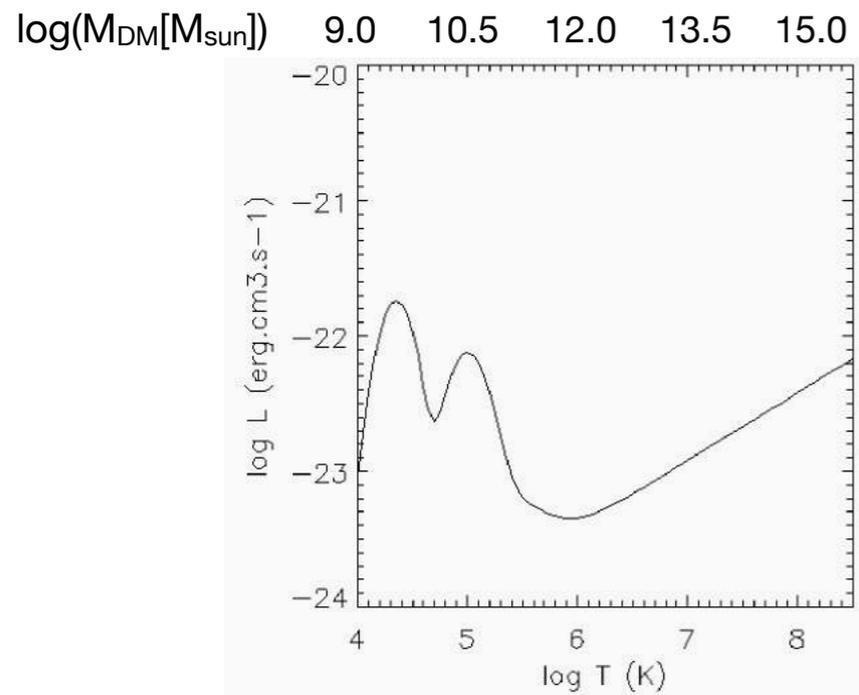
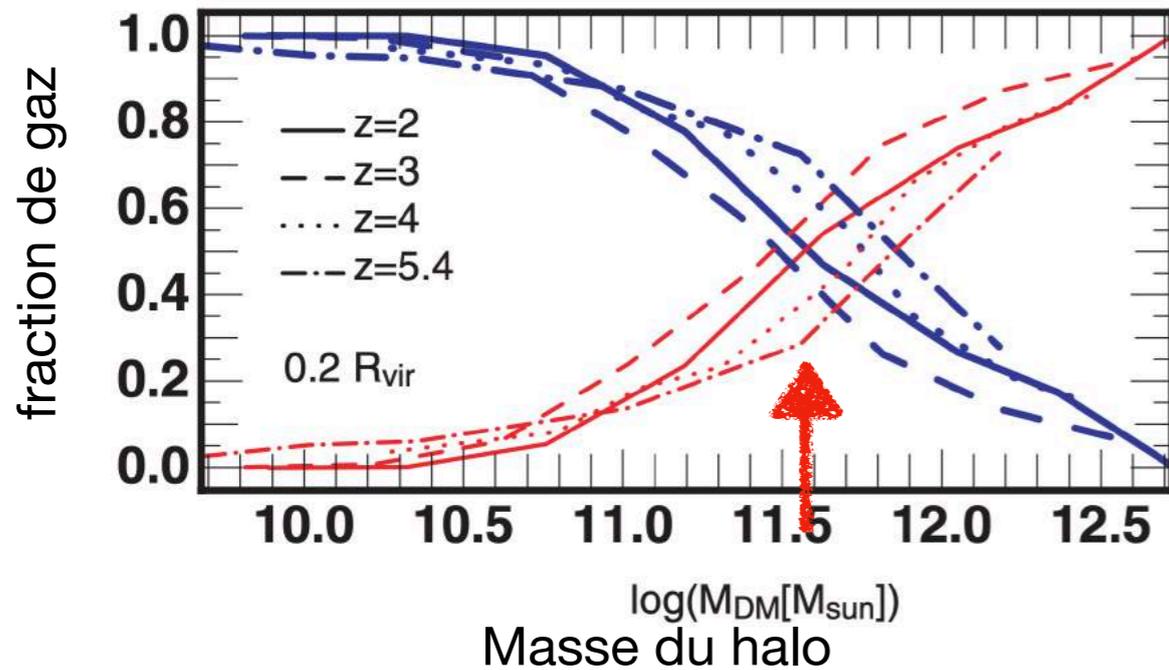
La nature de l'accrétion de gaz sur les galaxies dépend de la masse

Le temps caractéristique de refroidissement du gaz est plus petit que le temps de compression

Le temps caractéristique de refroidissement du gaz est plus grand que le temps de compression

accrétion froide

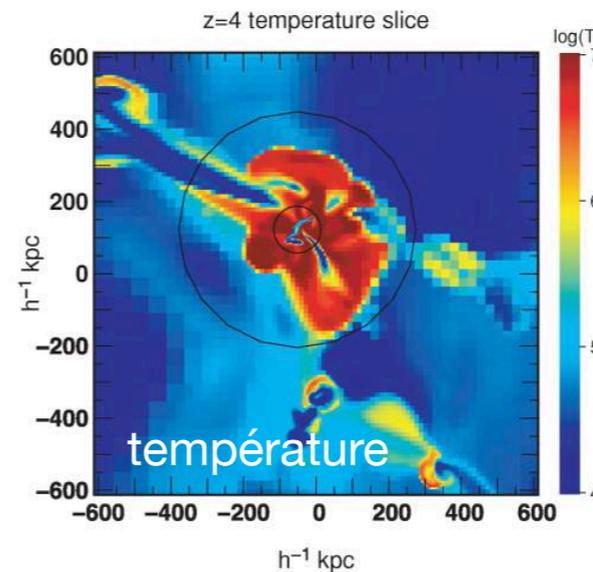
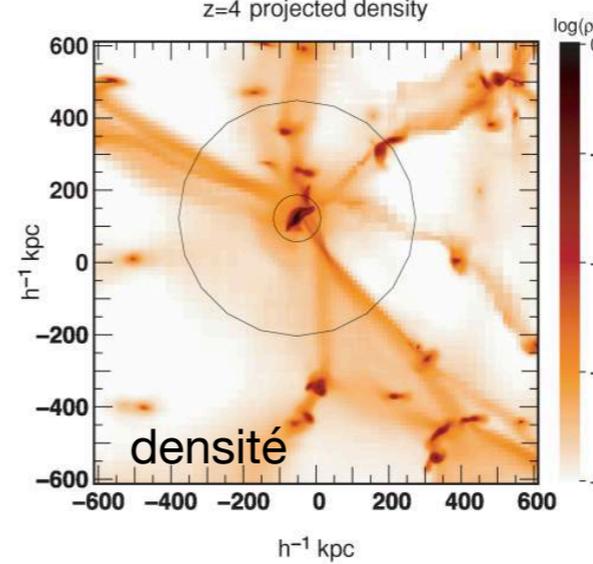
accrétion chaude



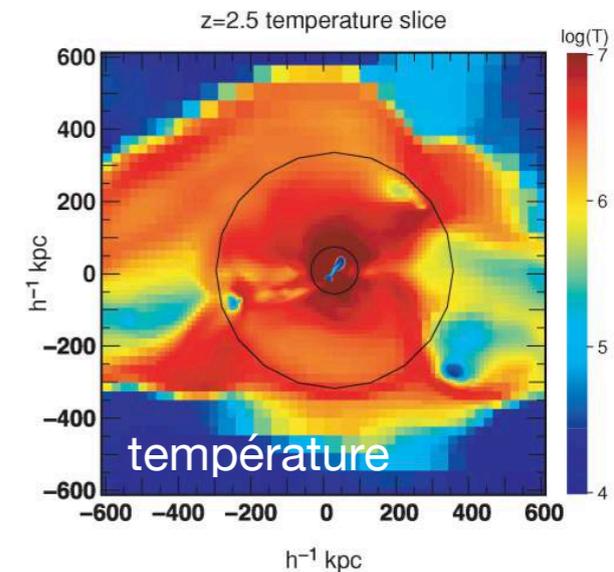
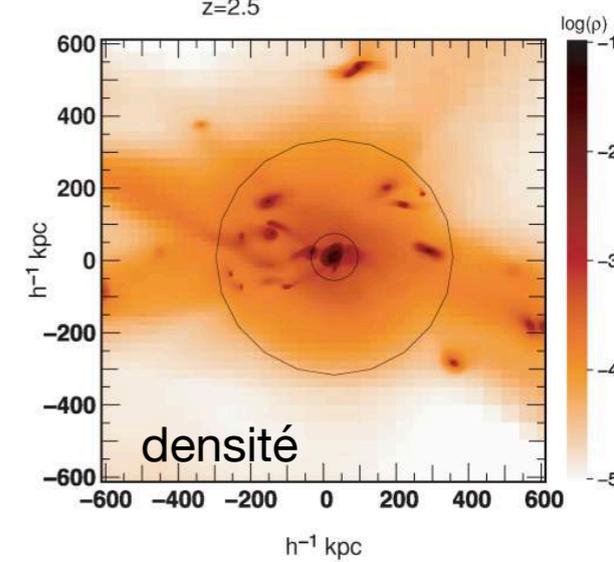
$$t_{\text{cool}} \propto T/\Lambda$$

si $t_{\text{cool}} < \sim 1$ Gyr
alors accrétion froide

accrétion froide



accrétion chaude



Ocvirk, Pichon & Teyssier 2008

Birnboim & Dekel 2003

Keres+ 2005

Dekel & Birnboim 2006

Dekel+ 2009

Nelson+ 2013

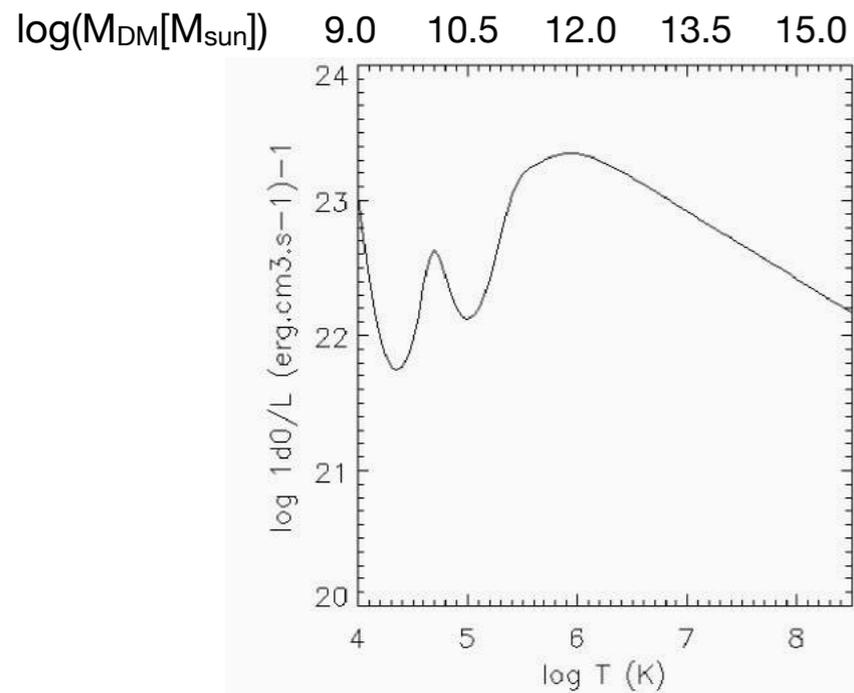
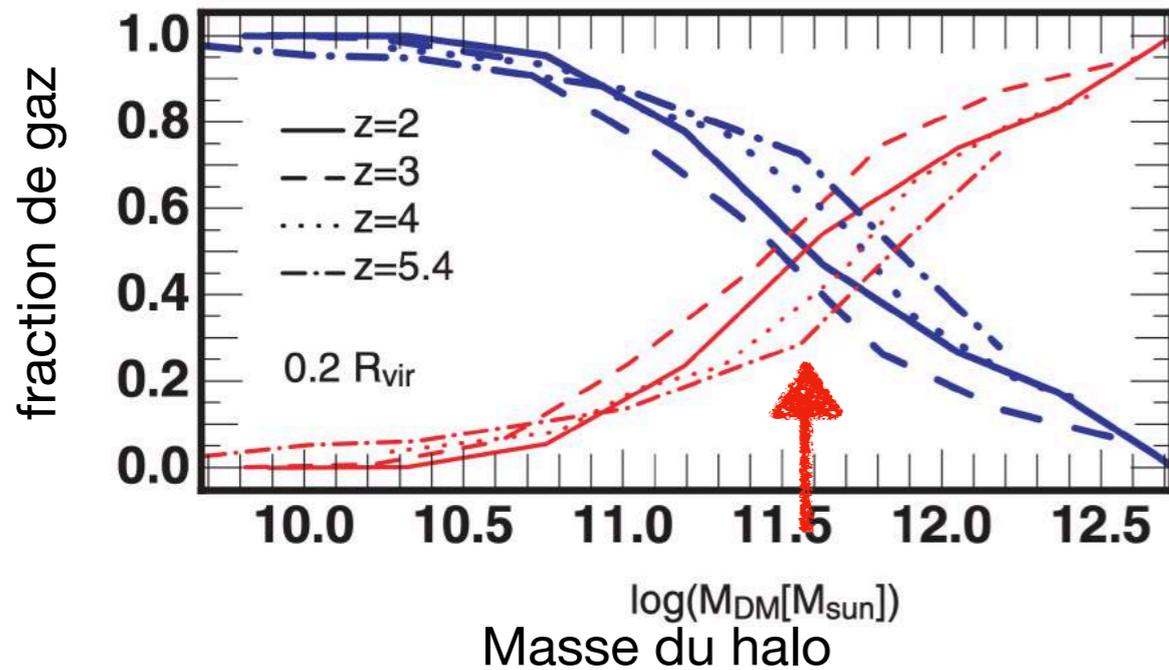
La nature de l'accrétion de gaz sur les galaxies dépend de la masse

Le temps caractéristique de refroidissement du gaz est plus petit que le temps de compression

Le temps caractéristique de refroidissement du gaz est plus grand que le temps de compression

accrétion froide

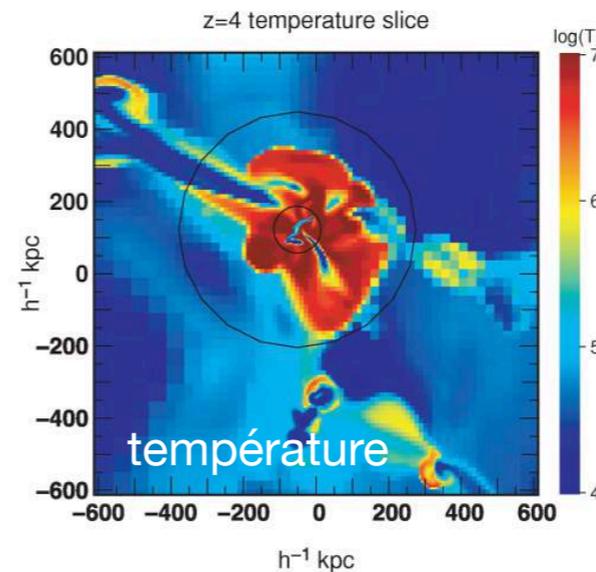
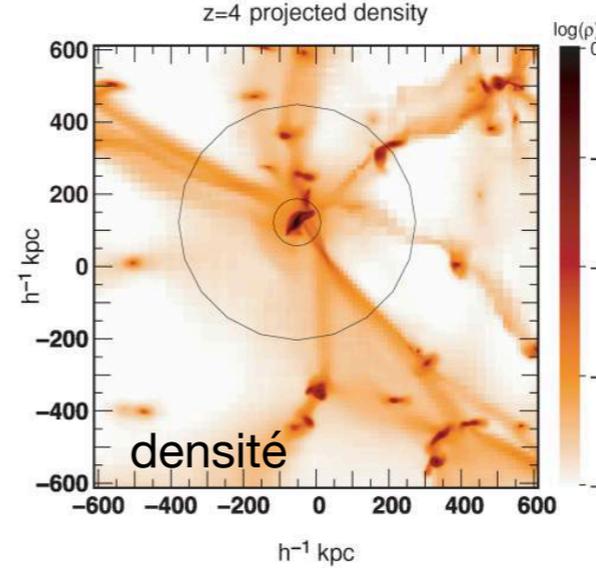
accrétion chaude



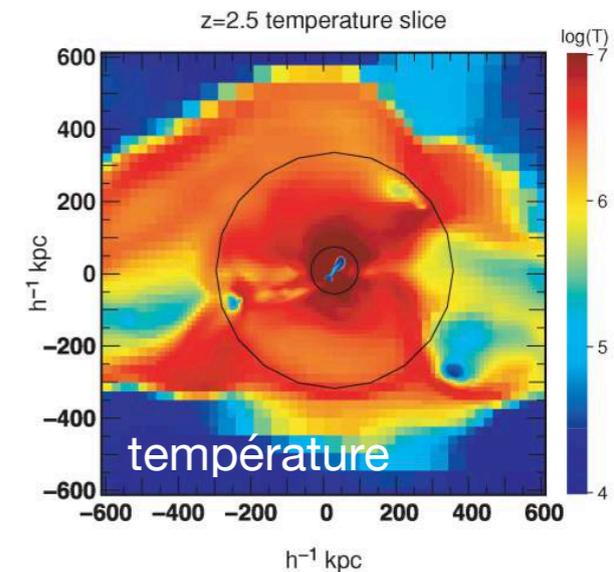
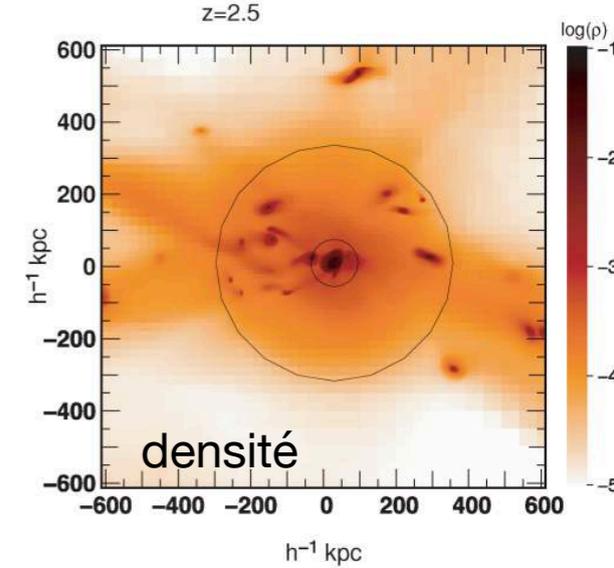
$$t_{\text{cool}} \propto T/\Lambda$$

si $t_{\text{cool}} < \sim 1$ Gyr
alors accrétion froide

accrétion froide



accrétion chaude



Ocvirk, Pichon & Teyssier 2008

Birnboim & Dekel 2003

Keres+ 2005

Dekel & Birnboim 2006

Dekel+ 2009

Nelson+ 2013

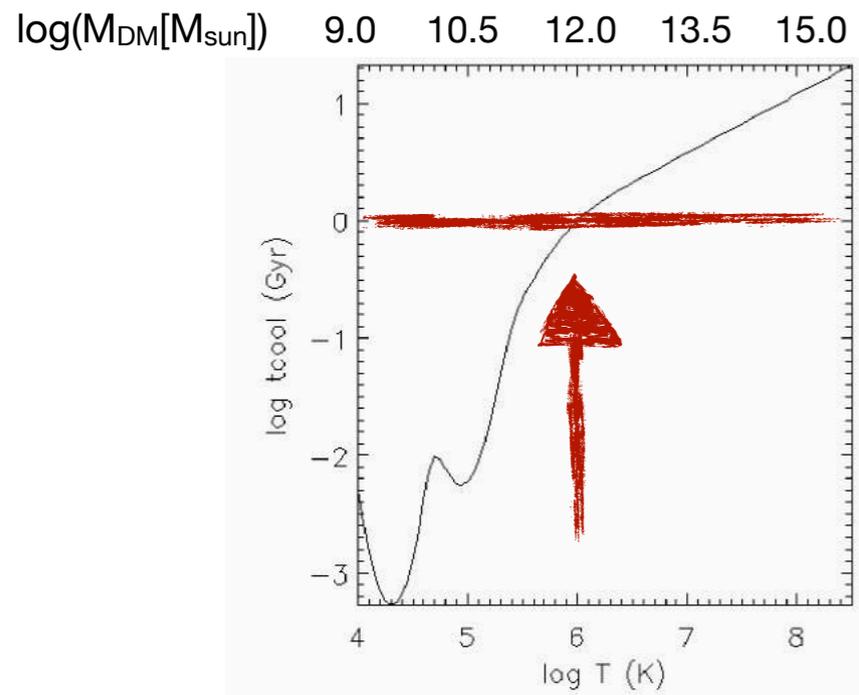
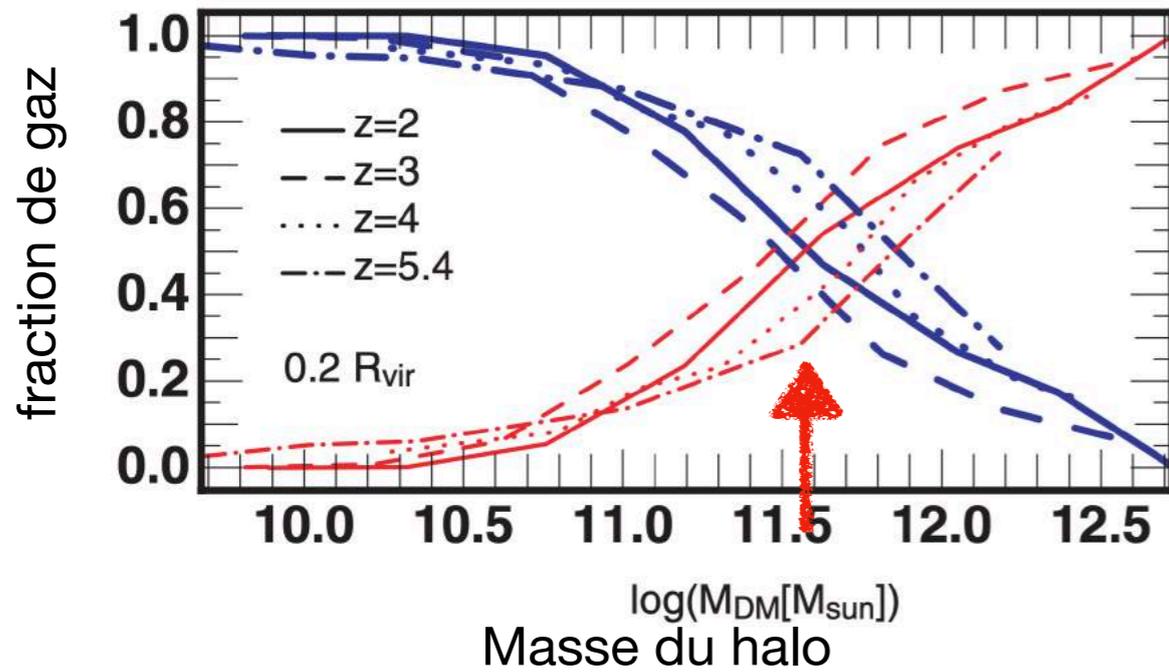
La nature de l'accrétion de gaz sur les galaxies dépend de la masse

Le temps caractéristique de refroidissement du gaz est plus petit que le temps de compression

Le temps caractéristique de refroidissement du gaz est plus grand que le temps de compression

accrétion froide

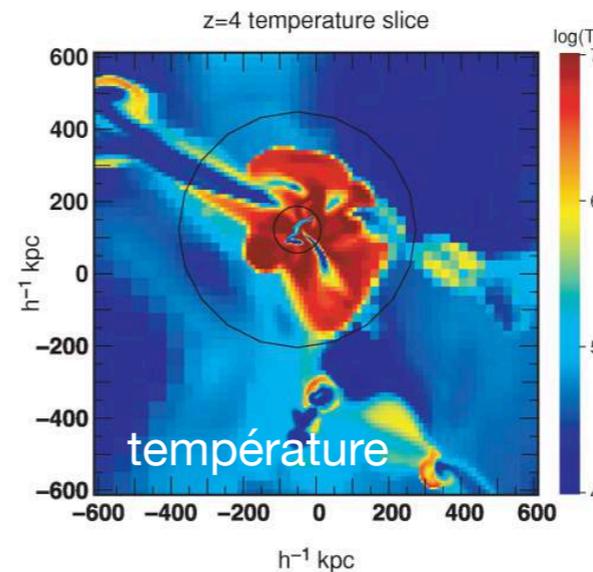
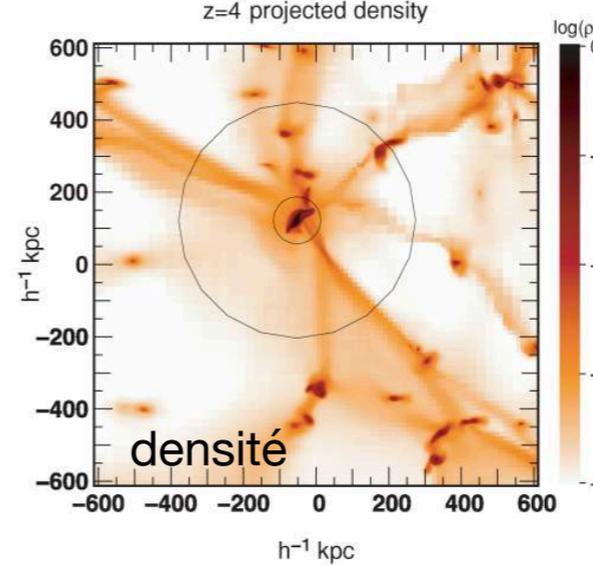
accrétion chaude



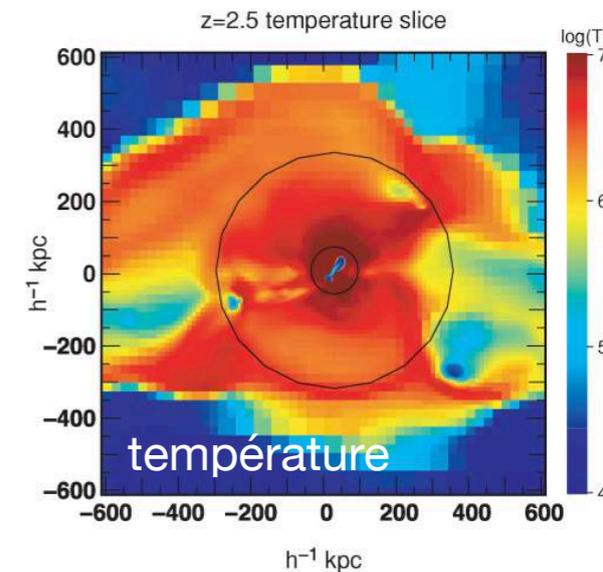
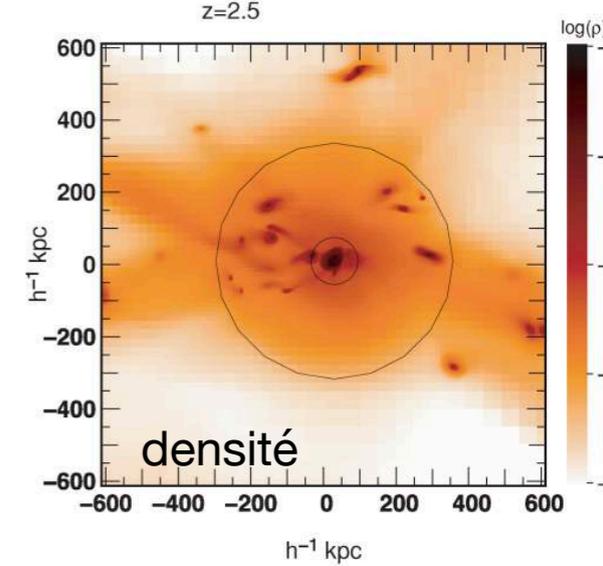
$$t_{\text{cool}} \propto T/\Lambda$$

si $t_{\text{cool}} < \sim 1$ Gyr
alors accrétion froide

accrétion froide



accrétion chaude



Ocvirk, Pichon & Teyssier 2008

Birnboim & Dekel 2003

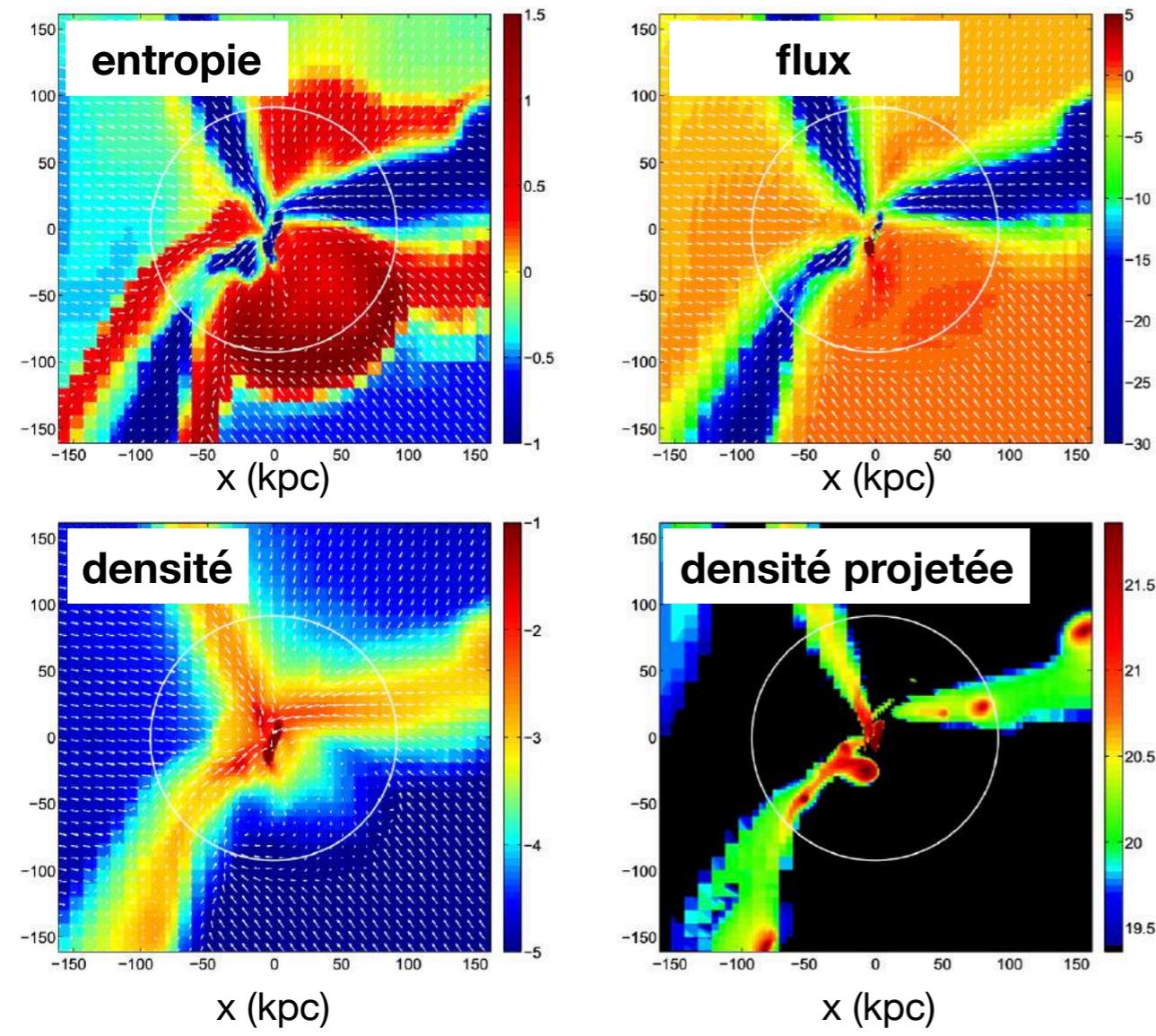
Keres+ 2005

Dekel & Birnboim 2006

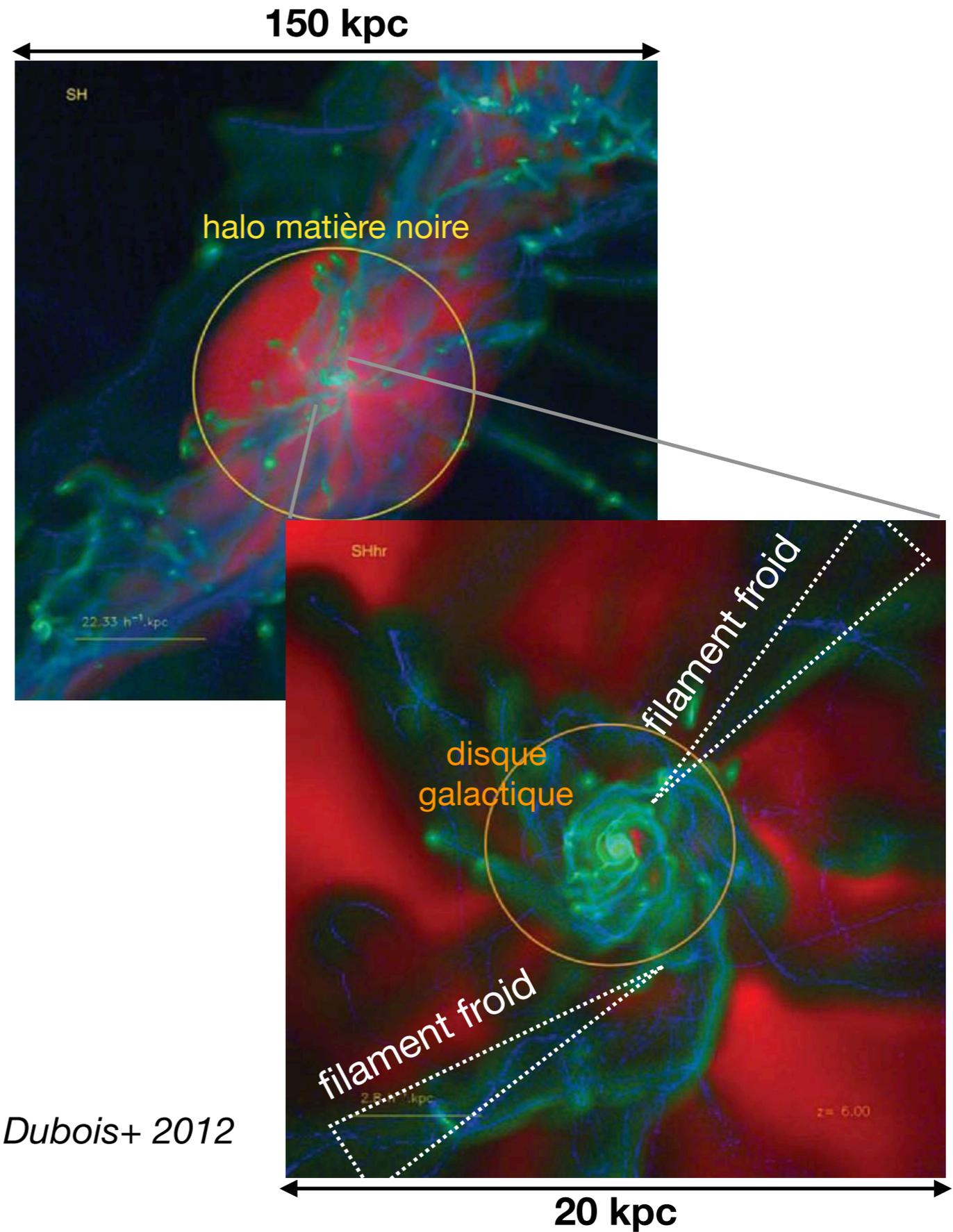
Dekel+ 2009

Nelson+ 2013

Une accrétion filamentaire et froide nourrissant efficacement les disques



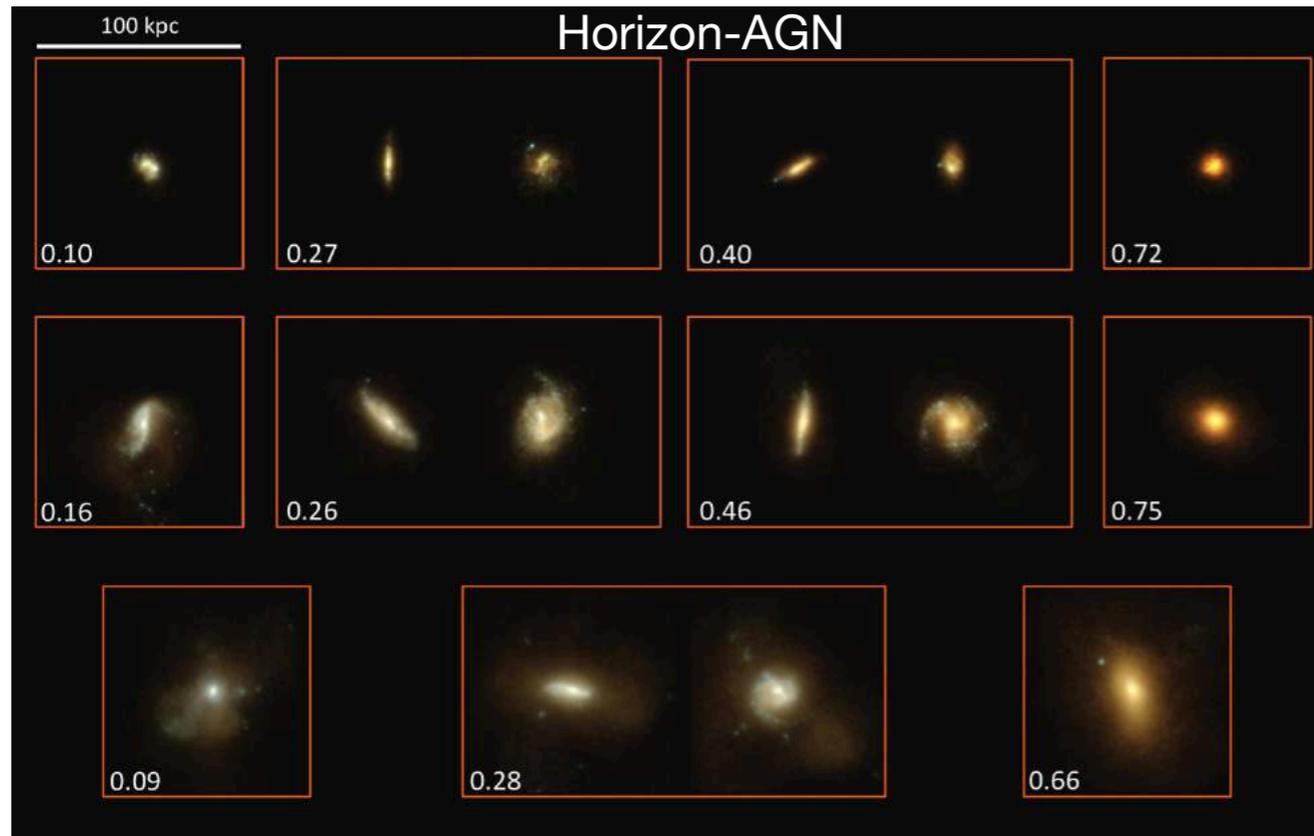
Dekel+ 2009



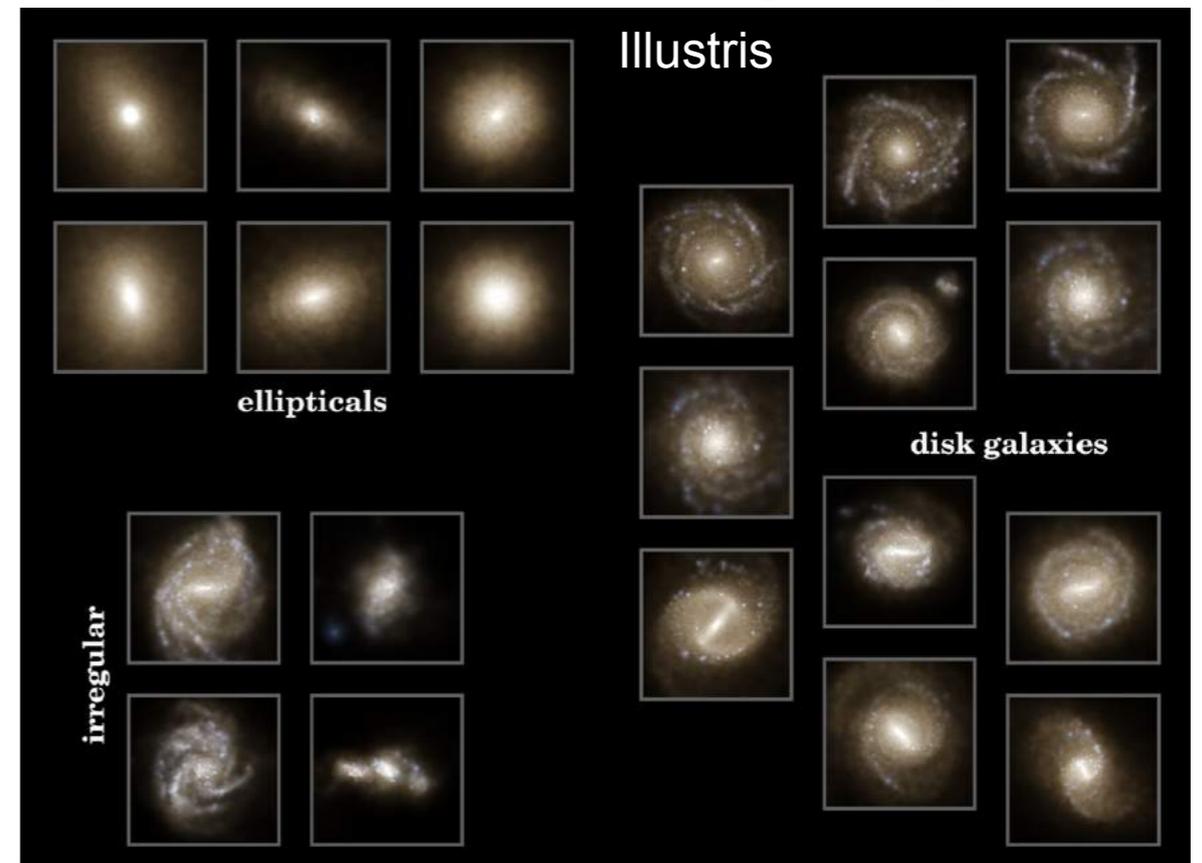
Dubois+ 2012

Les galaxies simulées montrent une variété morphologique

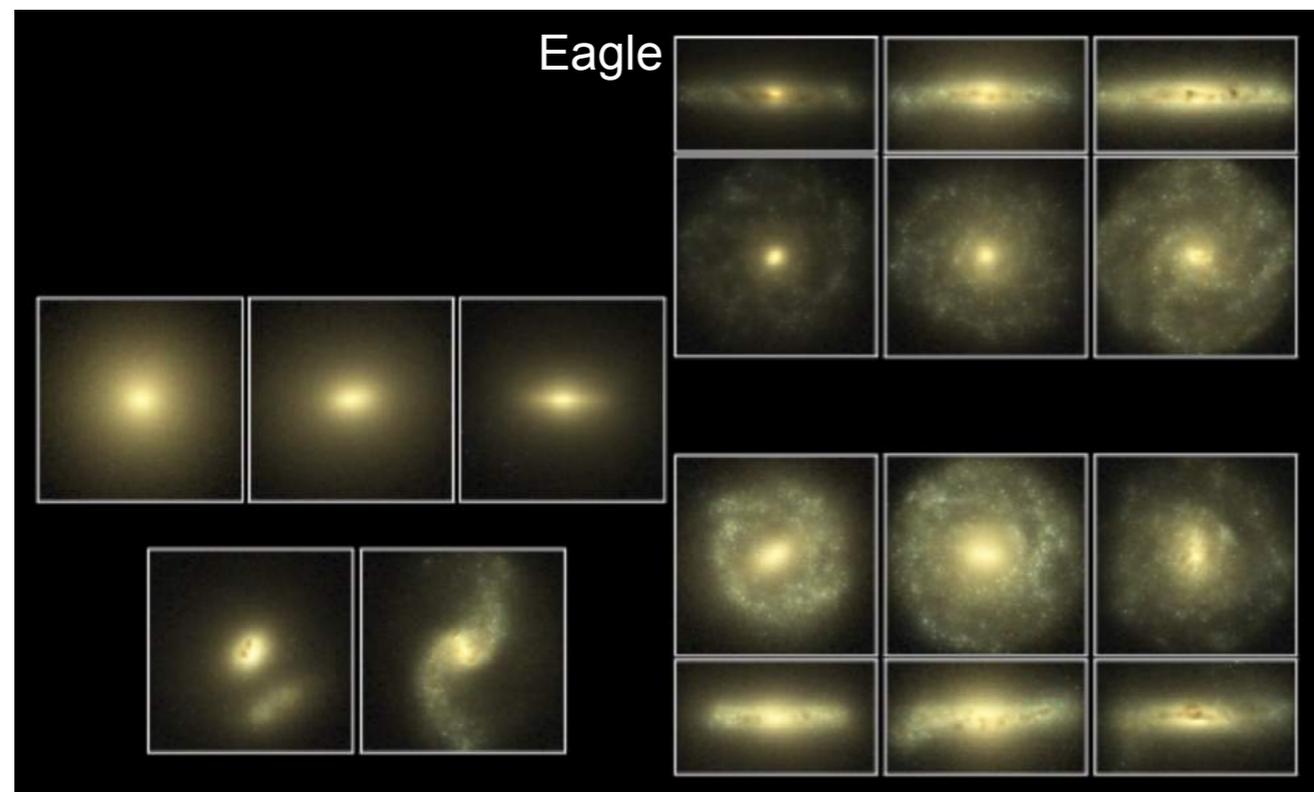
Dubois+ 2014



Vogelsberger+ 2014

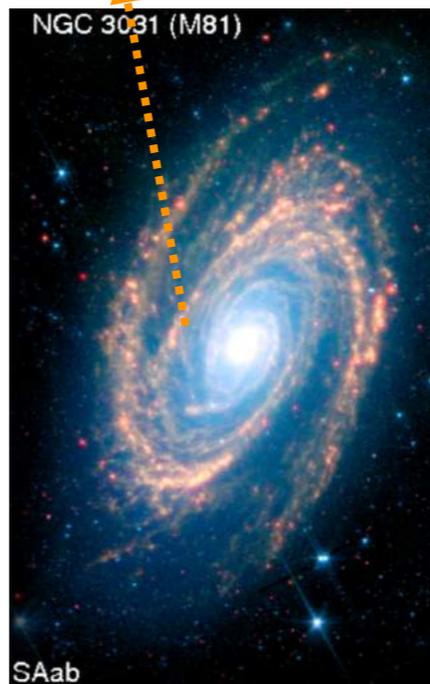
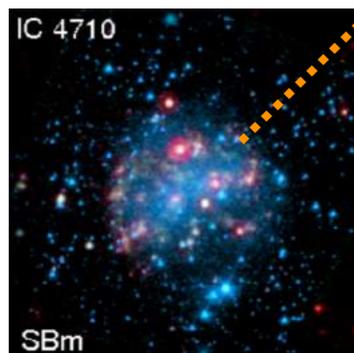
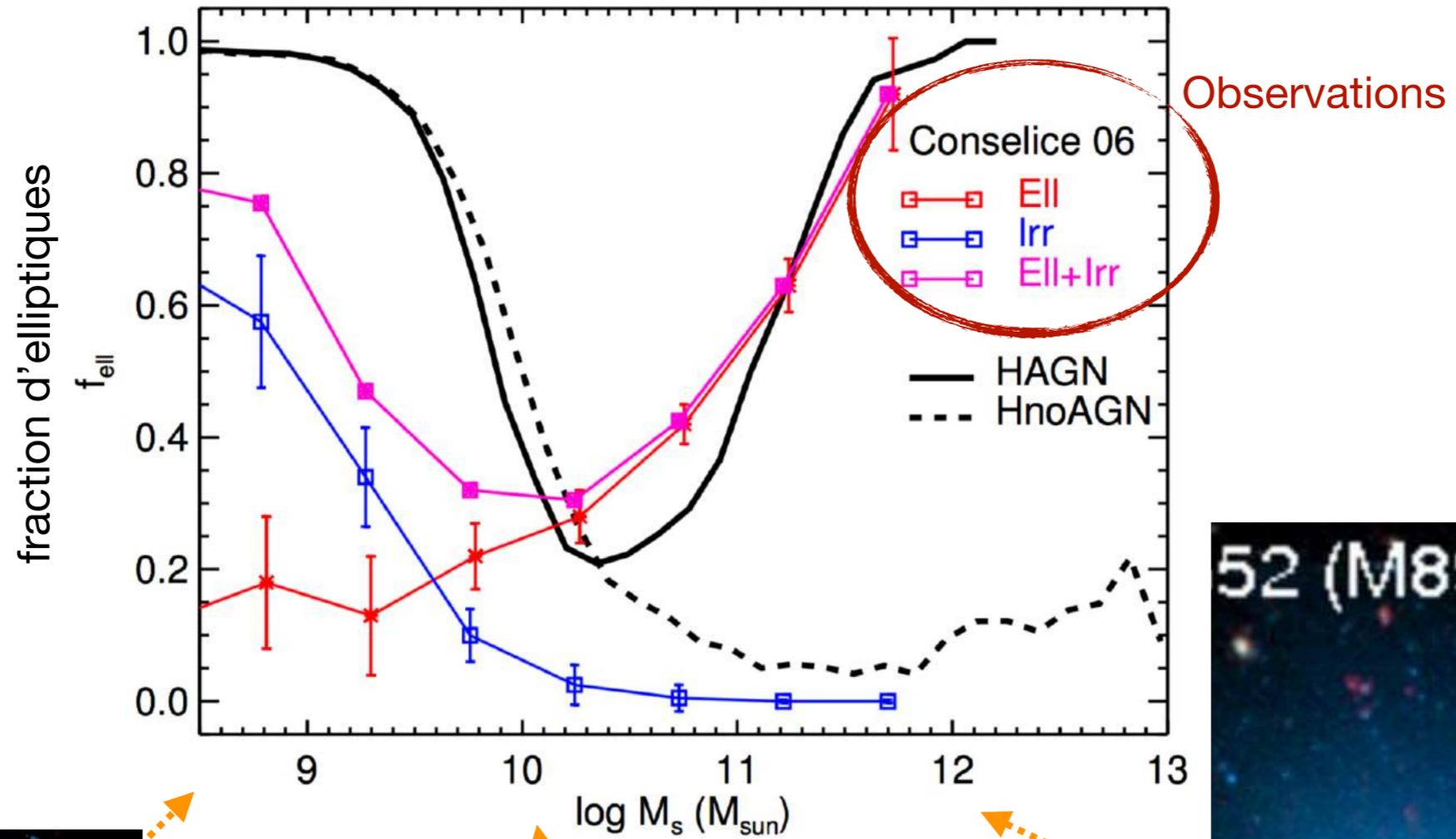


Eagle

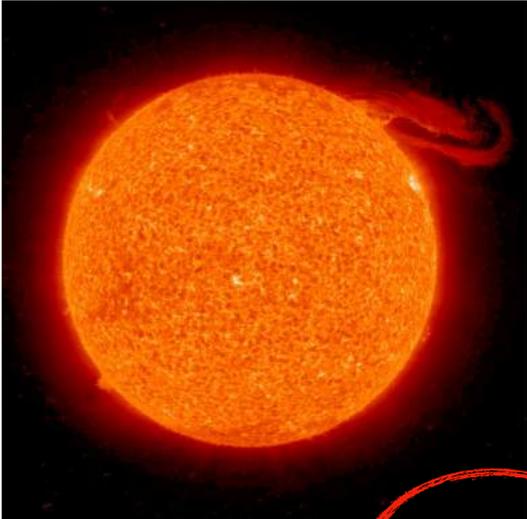
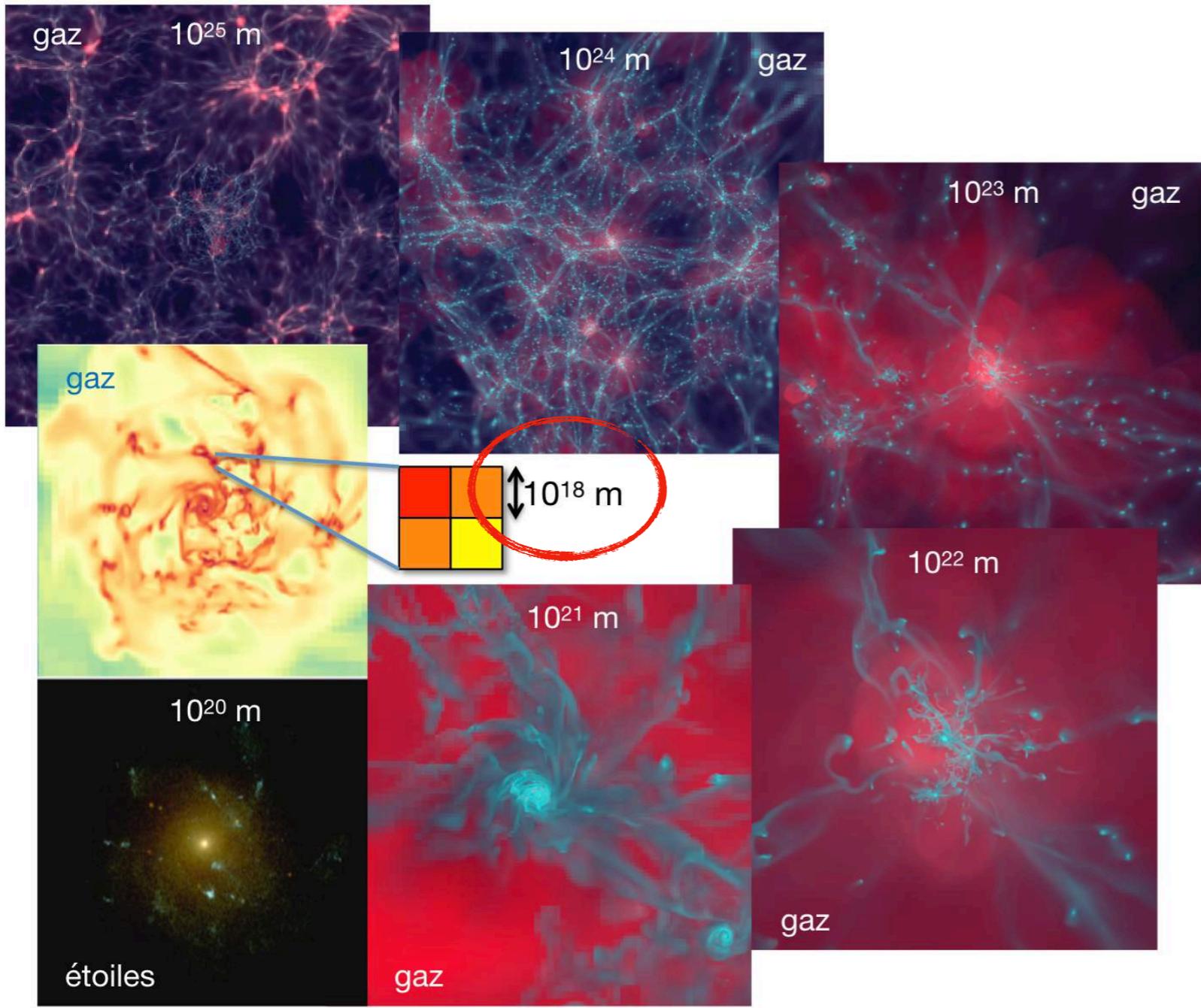


Schaye+ 2014

Une ségrégation morphologique



Sauf à avoir une puissance de calcul infinie, impossible de résoudre toutes les échelles



Taille du soleil = 10^9 m

La physique sous-grille

C'est tout ce qui se passe sous l'échelle de résolution de la grille

Les 3 modèles sous-grille essentiels à la formation des galaxies

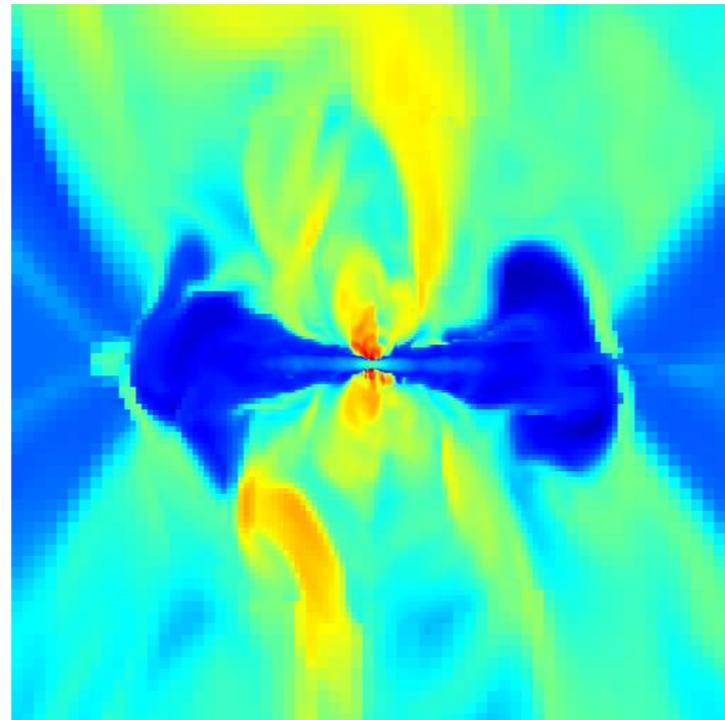
la formation d'étoiles



les galaxies et leurs étoiles

+

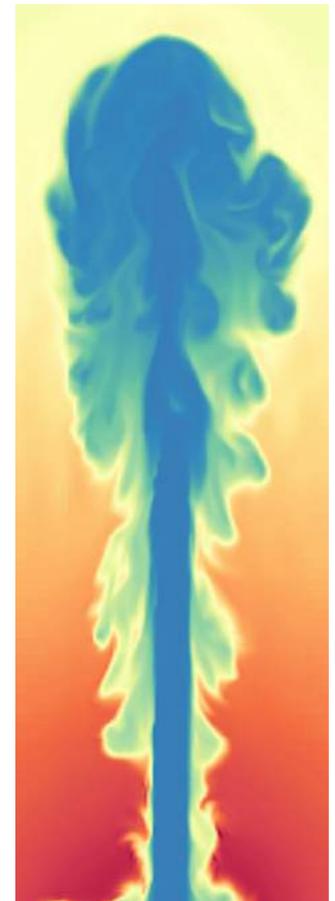
les explosions de supernova



les vents galactiques

+

les trous noirs supermassifs



les jets de noyaux actifs

Accretion de Bondi-Hoyle-Littleton

masse volumique ρ

vitesse V

$$\dot{M} \propto \rho V R^2 \propto \rho G^2 M^2 / V^3$$

La vitesse relative du gaz peut être remplacée par la vitesse du son du gaz*

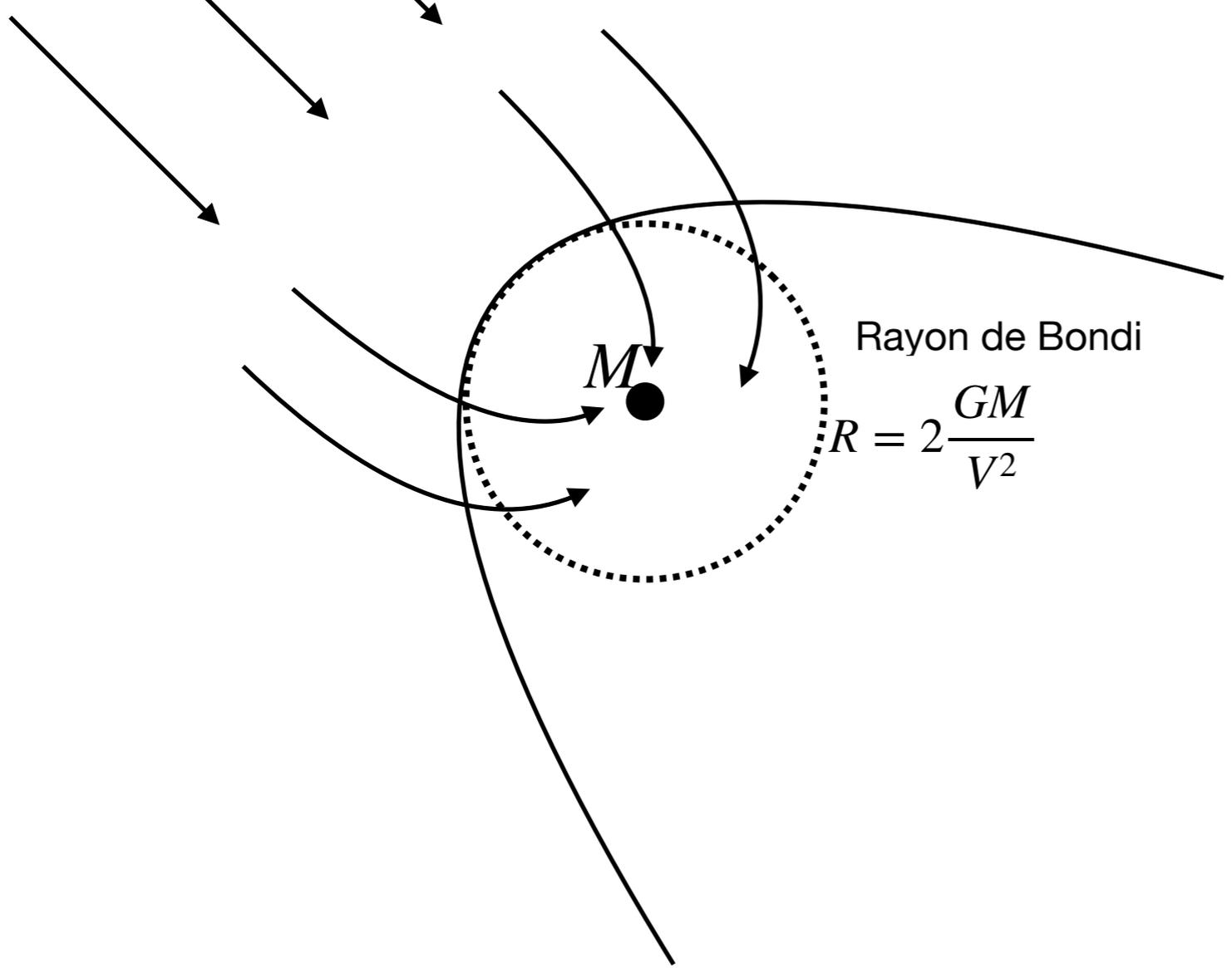
L'énergie libérée est proportionnelle au taux d'accrétion

$$\dot{E} = \epsilon \dot{M} c^2$$

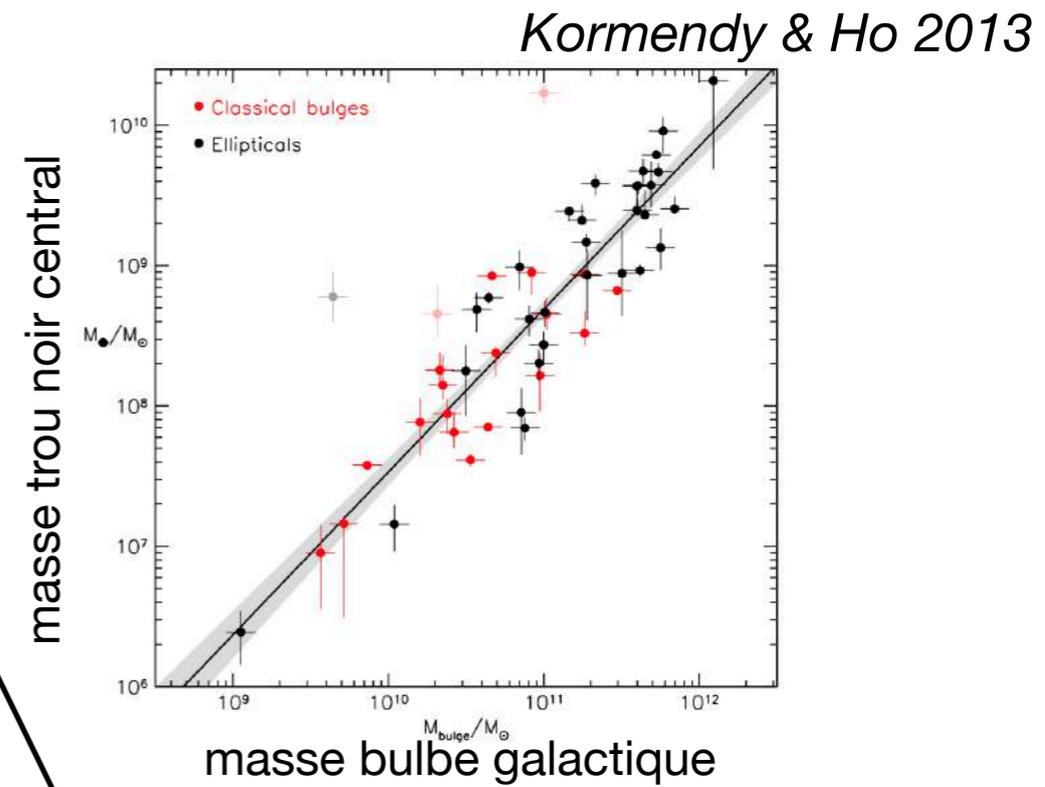
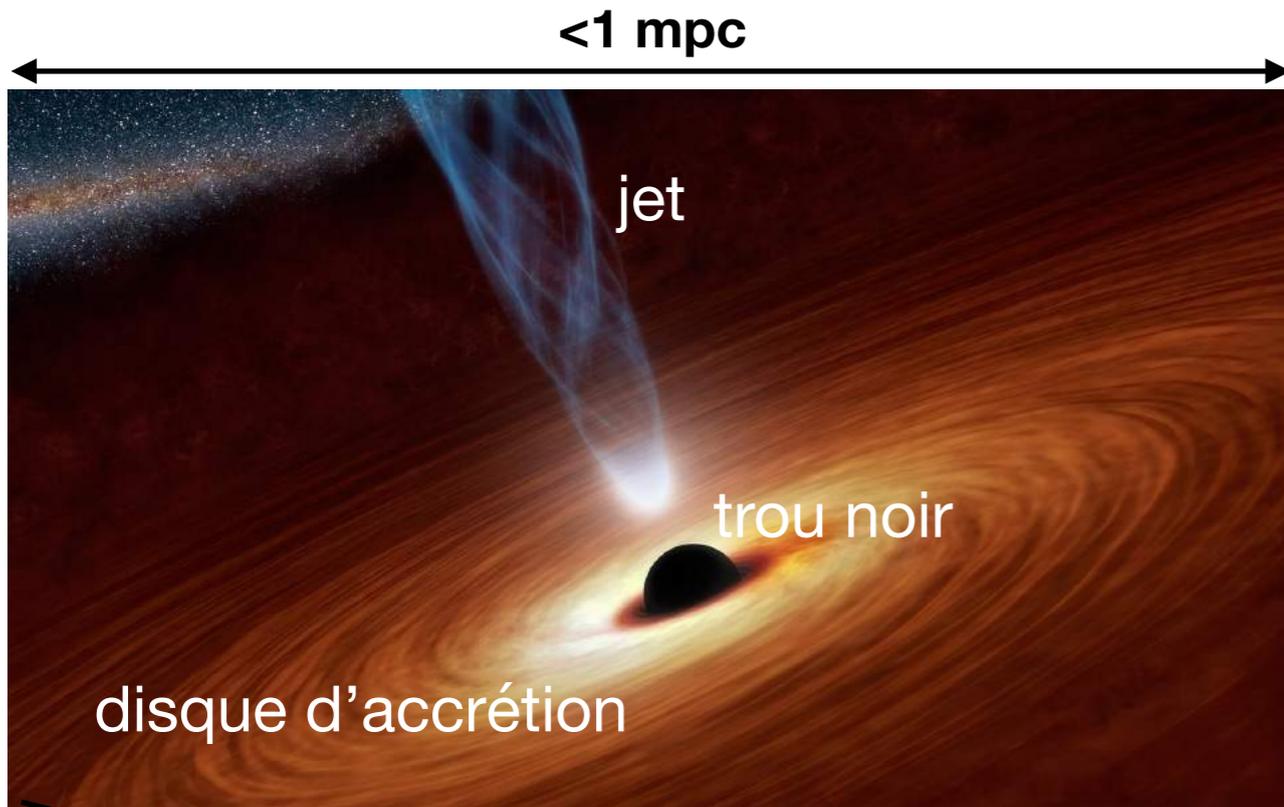
dont l'efficacité dépend de la physique du disque d'accrétion à petite échelle (couplage rayonnement matière, mécanismes d'extraction des jets)

La rétroaction du trou noir sur le gaz est d'autant plus forte que le gaz est dense et froid

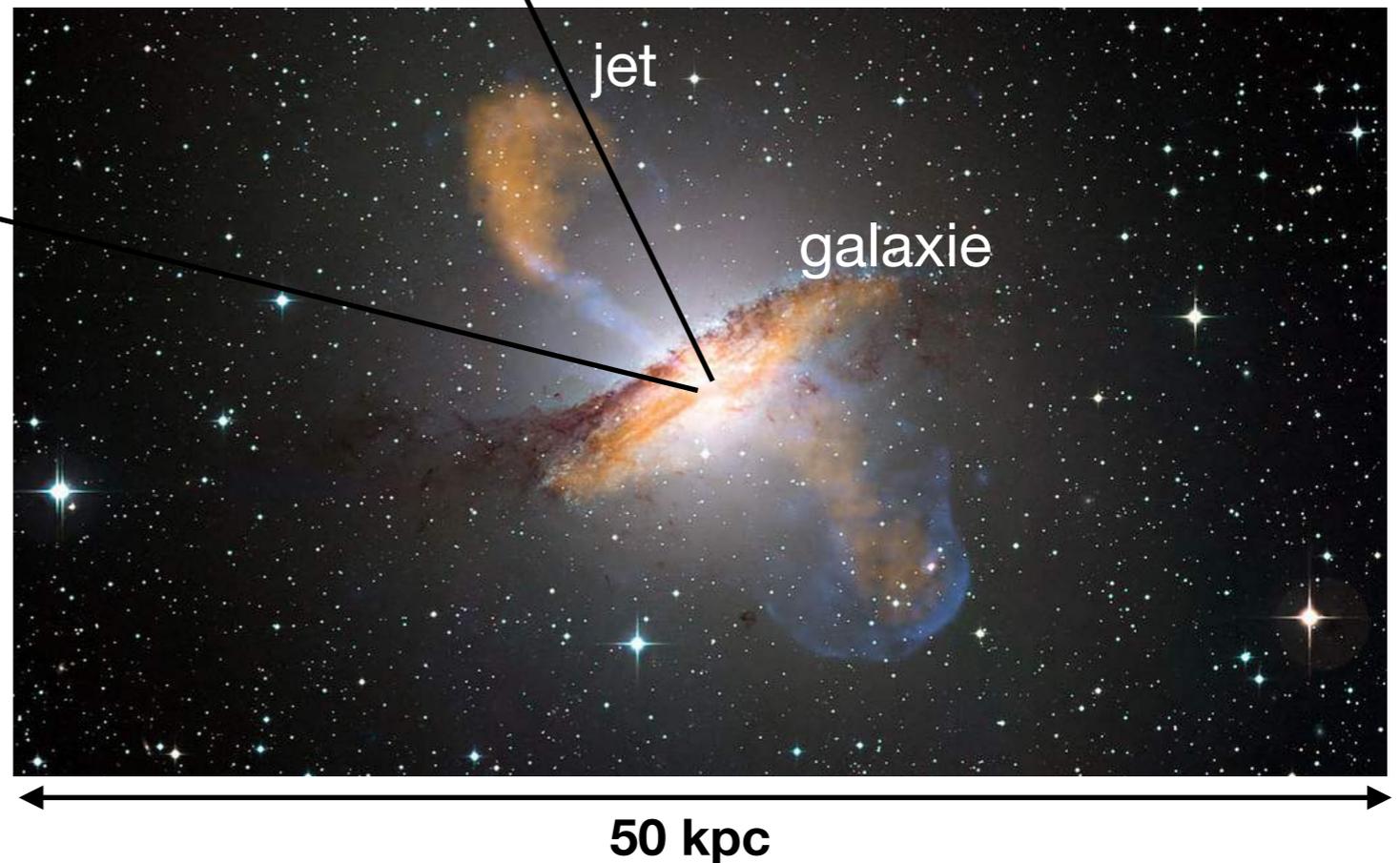
*modulo un changement de pré-facteur



Les trous noirs supermassifs et leur Noyau Actif de Galaxie (AGN)



10^6 plus petit

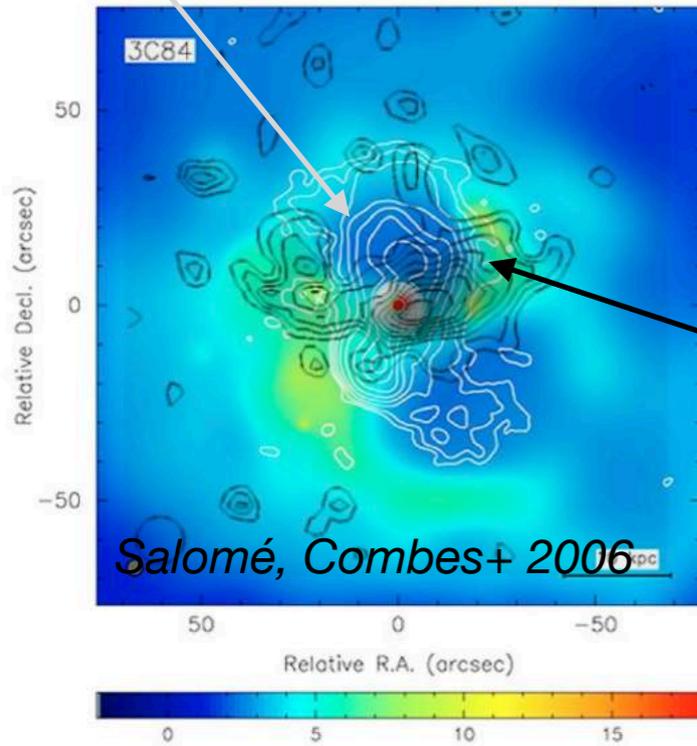


Les jets les plus puissants ont une puissance équivalente à la lumière de dix mille milliards de soleils

Les trous noirs supermassifs et leurs jets

émission
radio AGN

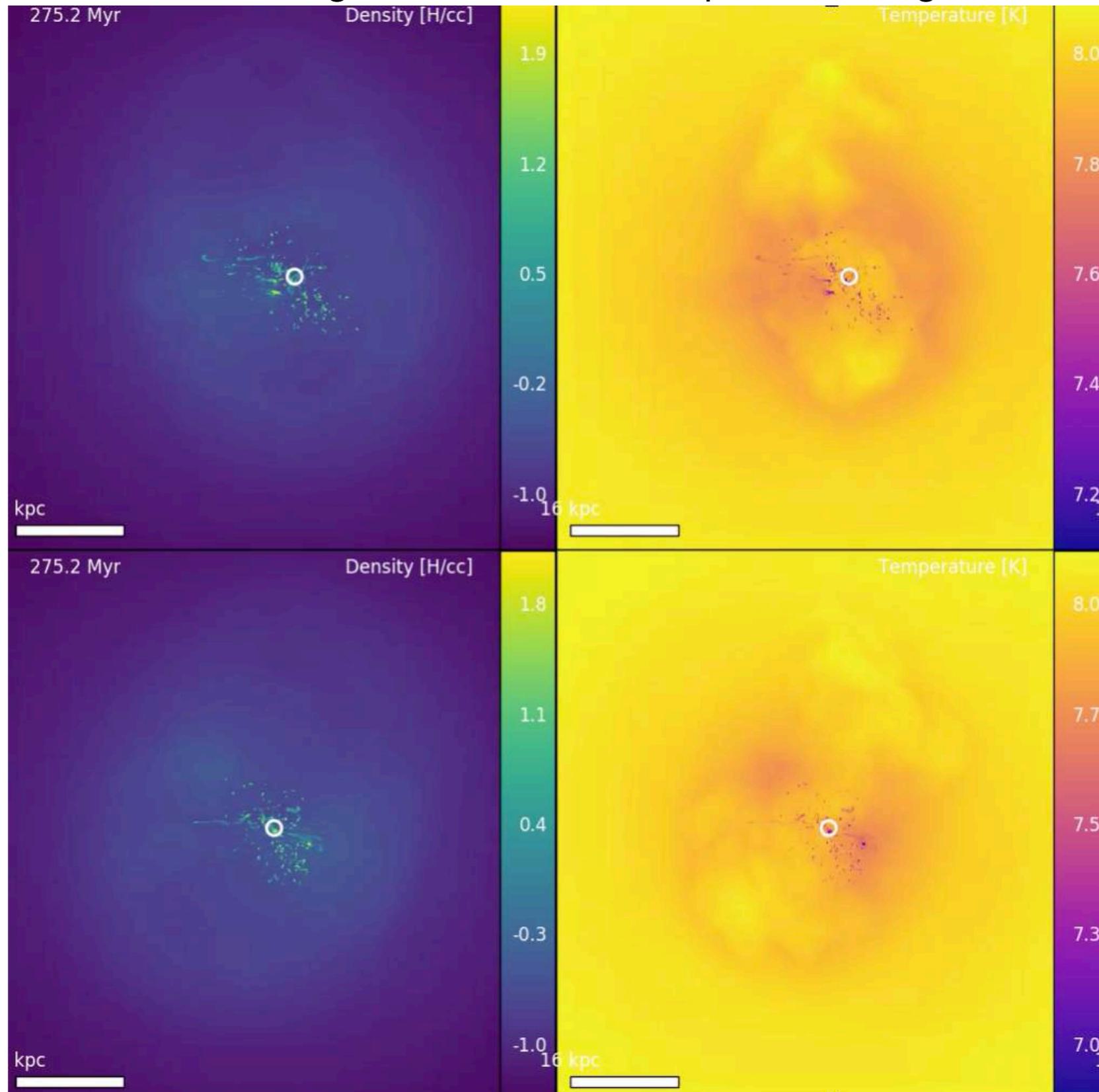
Observations



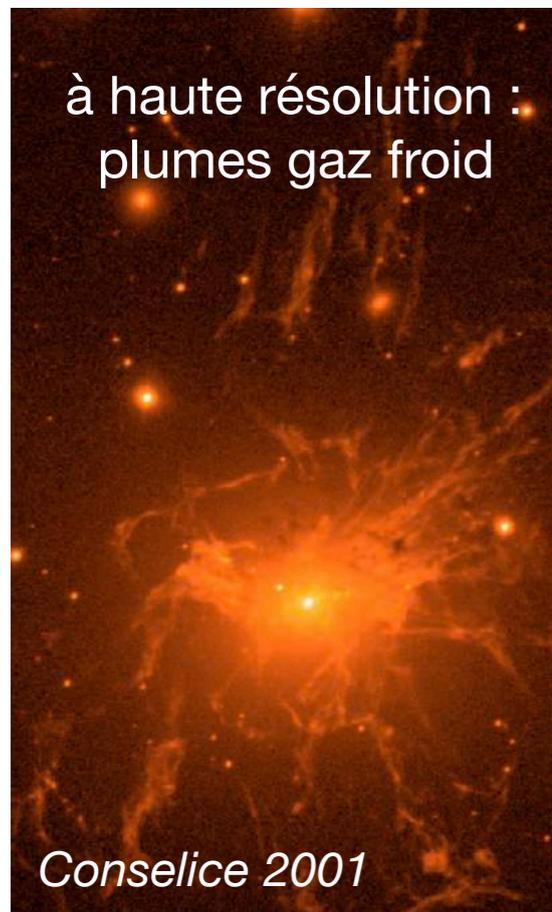
émission
gaz froid
moléculaire

Densité du gaz

Température du gaz



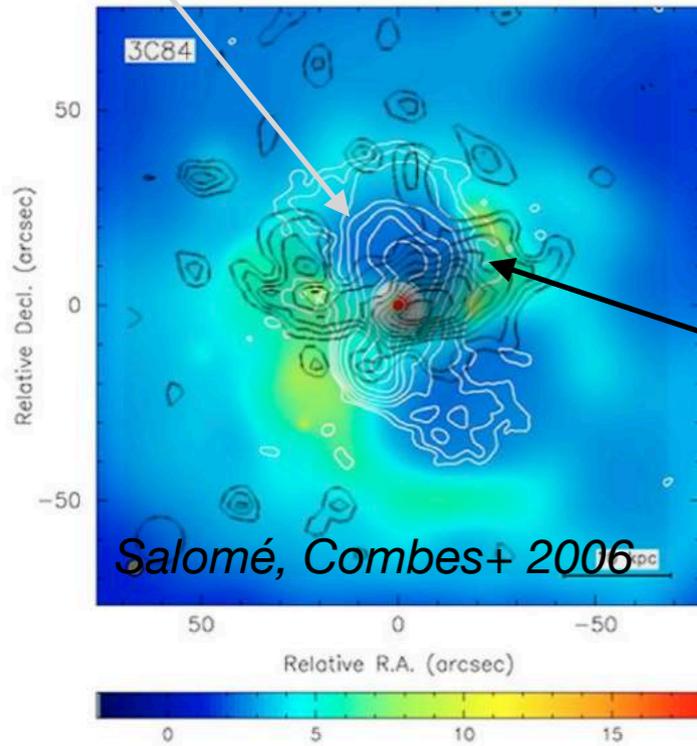
à haute résolution :
plumes gaz froid



Les trous noirs supermassifs et leurs jets

émission
radio AGN

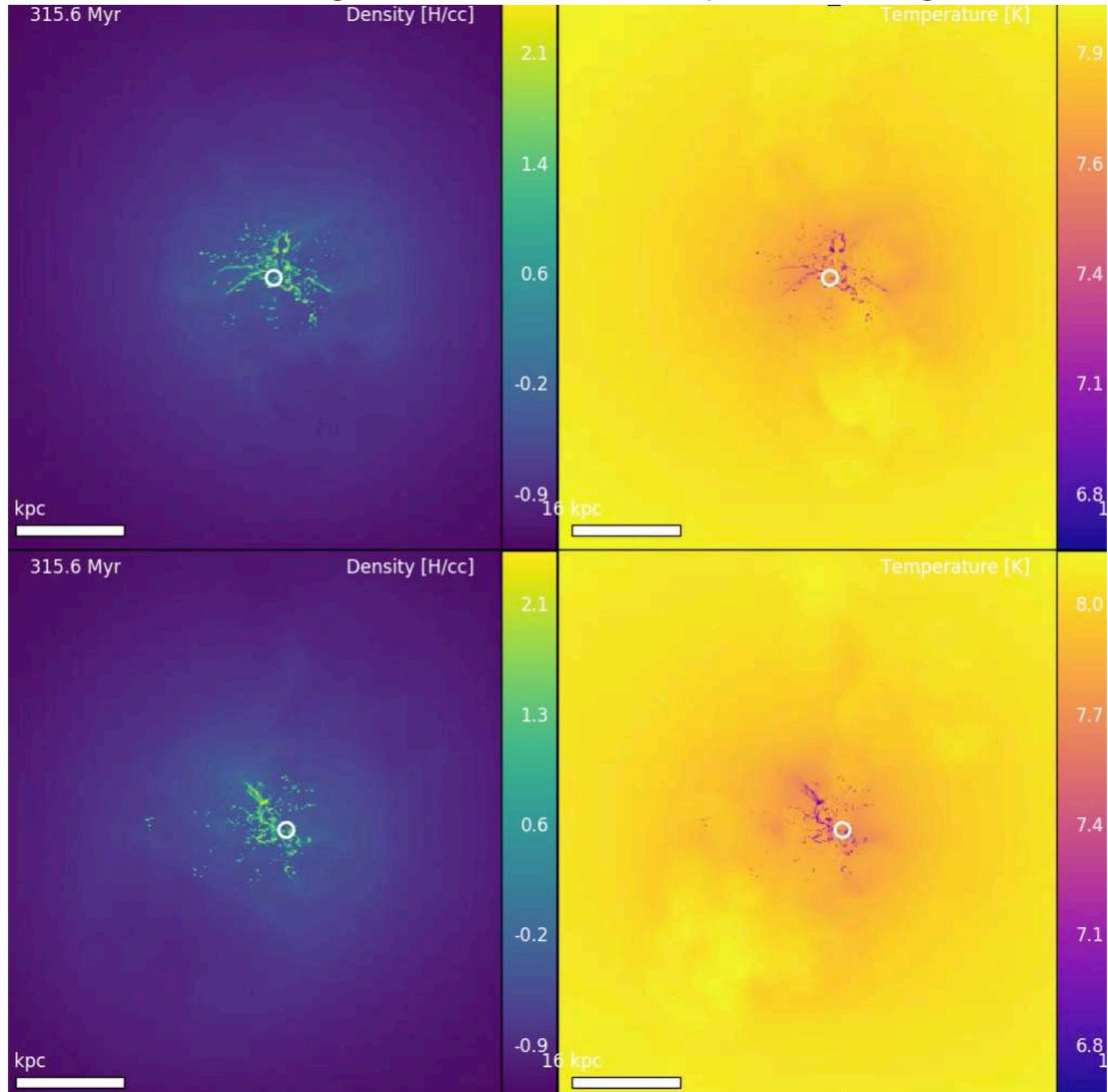
Observations



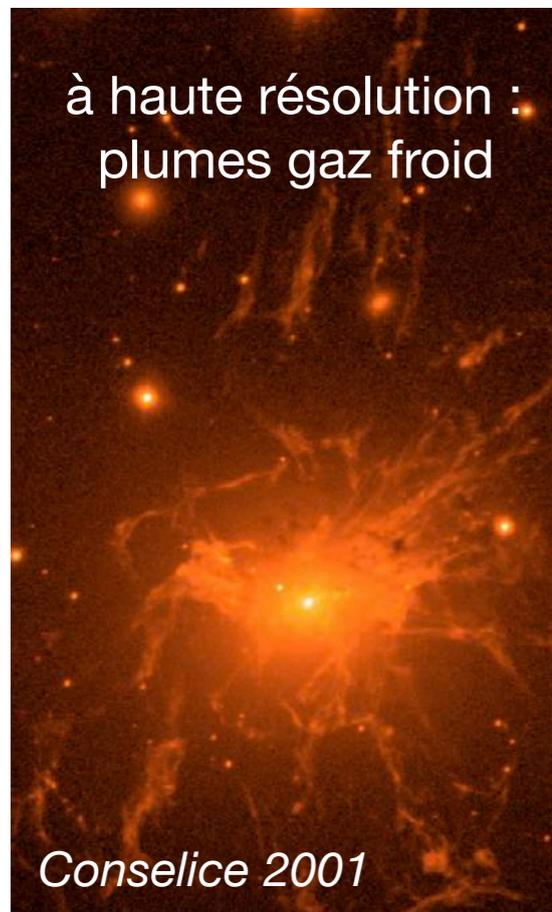
émission
gaz froid
moléculaire

Densité du gaz

Température du gaz

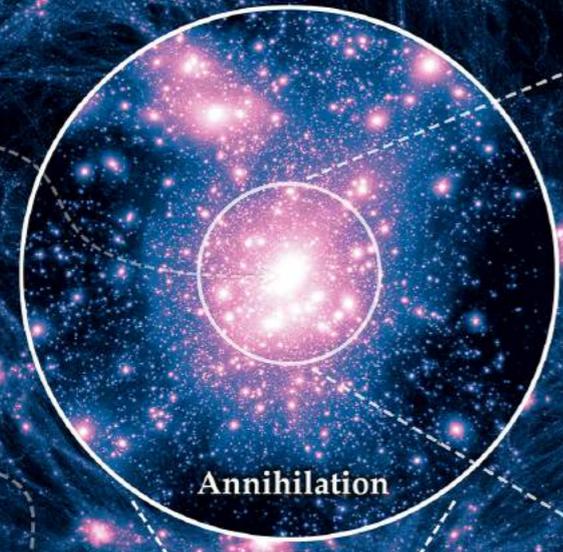
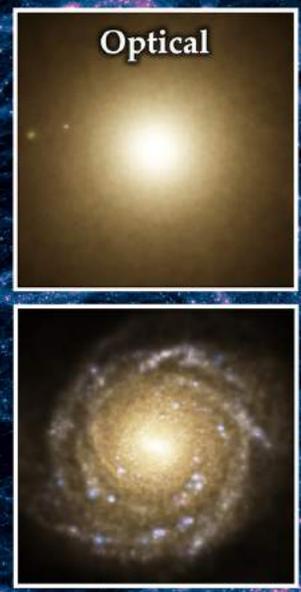


à haute résolution :
plumes gaz froid

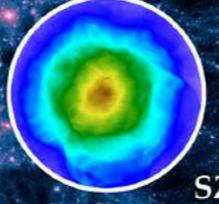


The Illustris Simulation

M. Vogelsberger S. Genel V. Springel P. Torrey D. Sijacki D. Xu G. Snyder S. Bird D. Nelson J. Hernquist



X-Ray



SZ-y

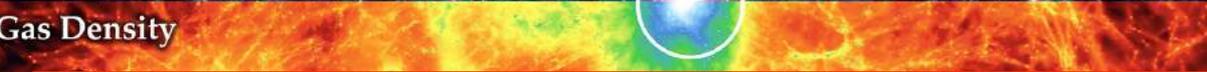
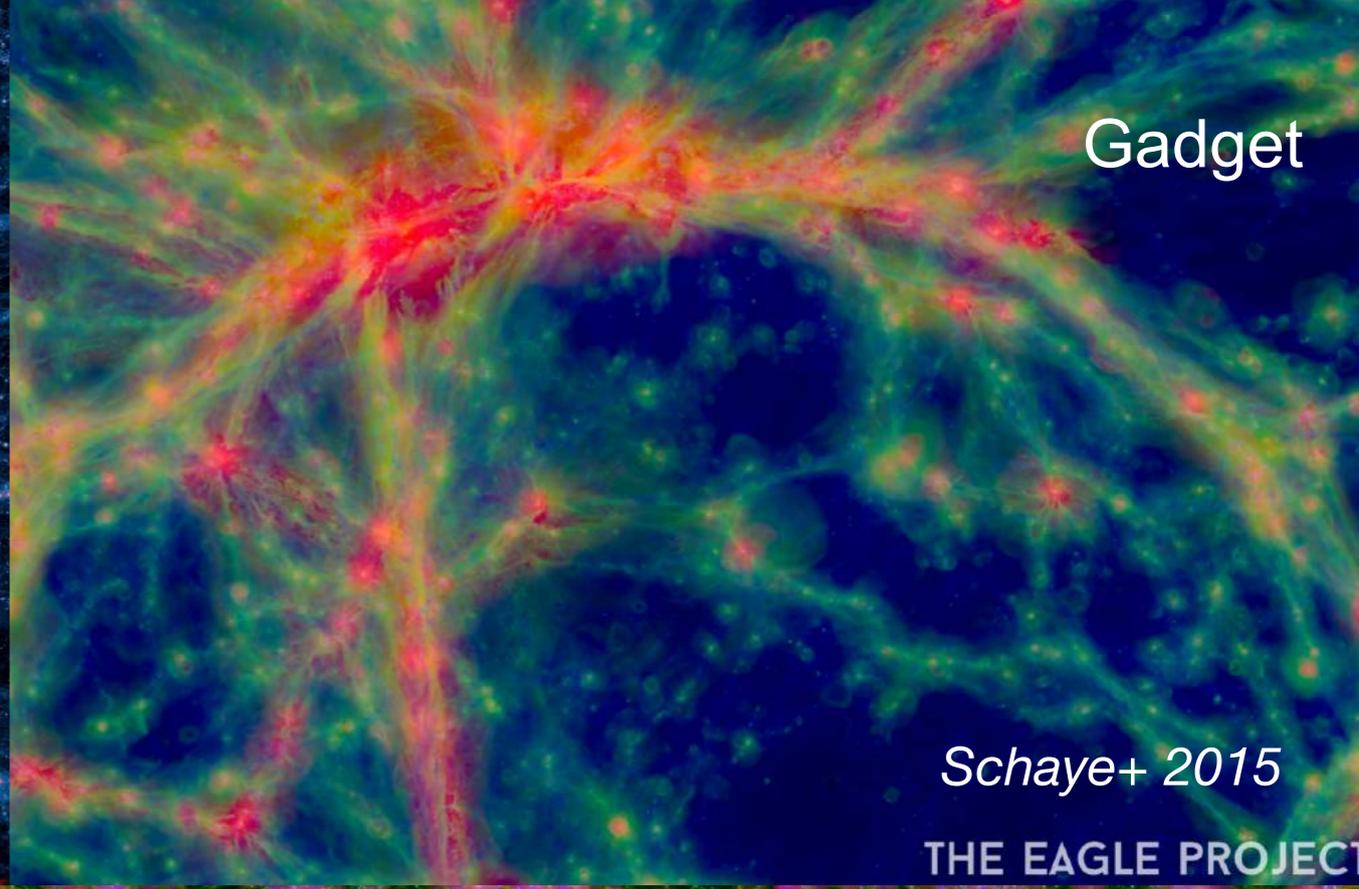


Metal

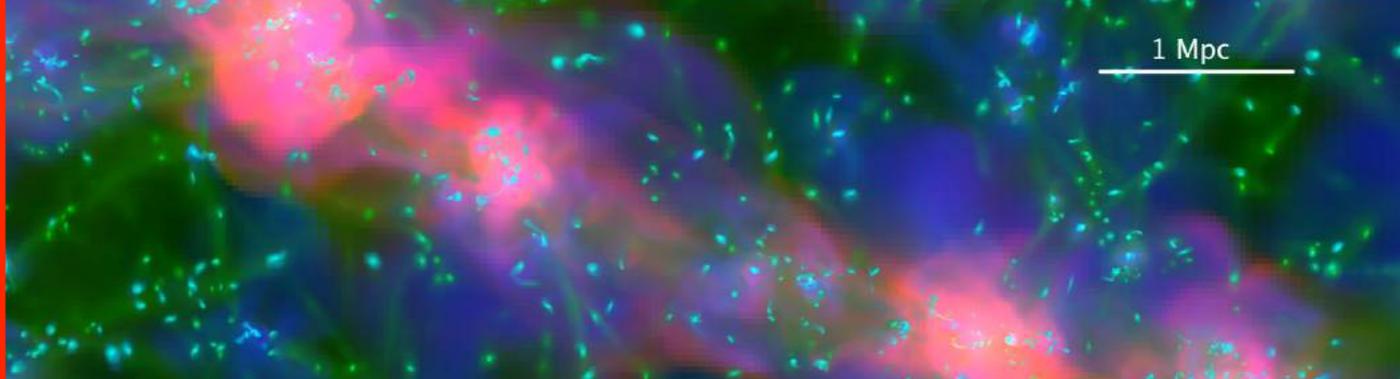
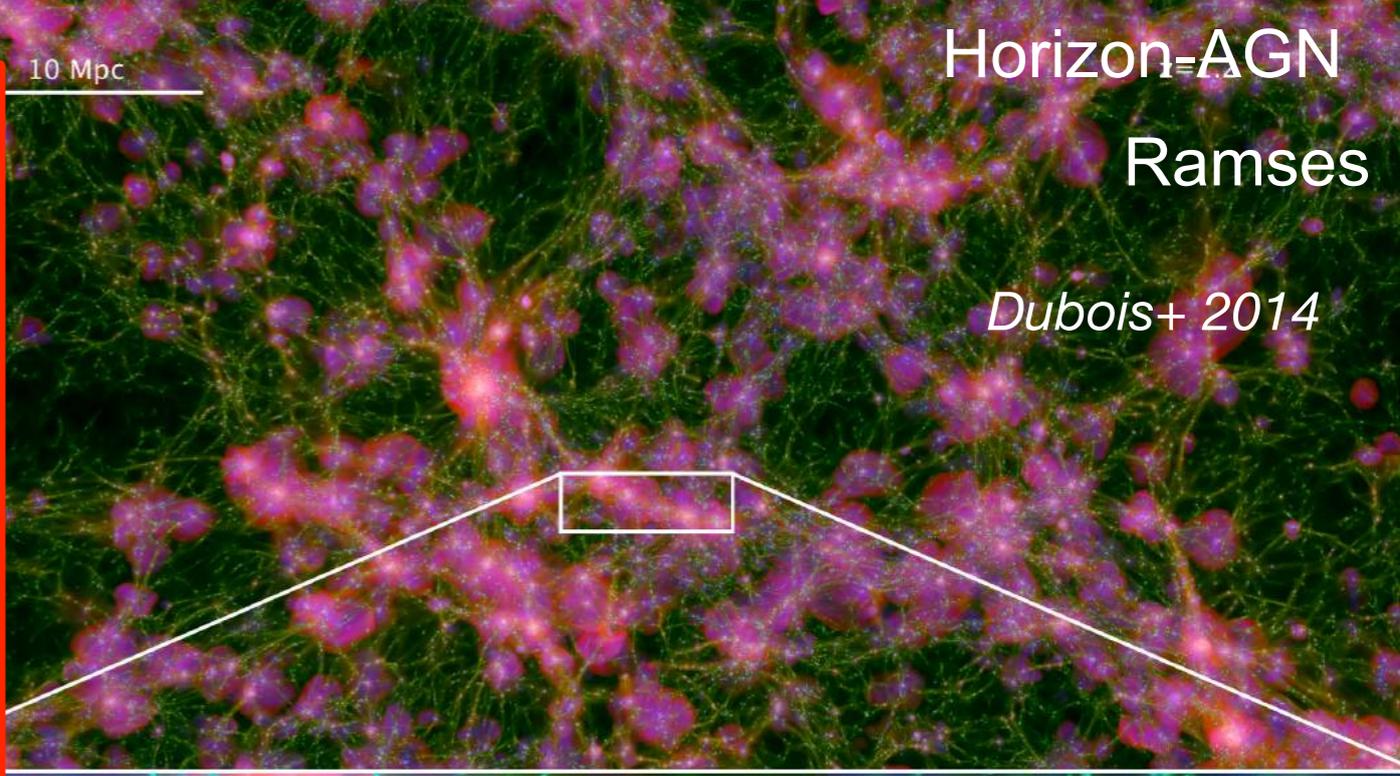
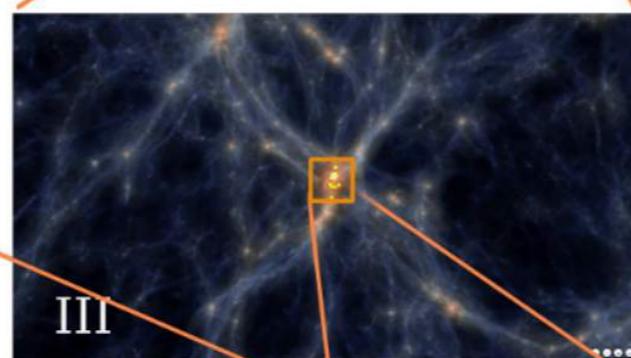
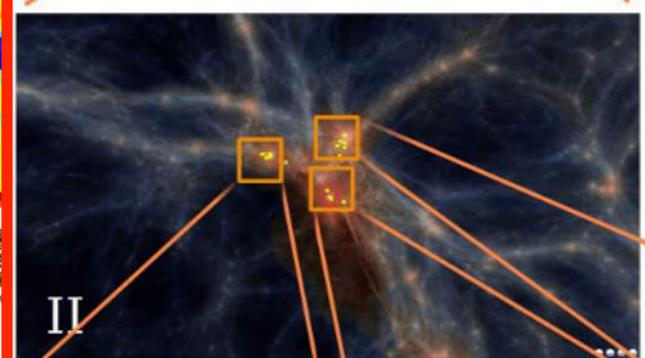
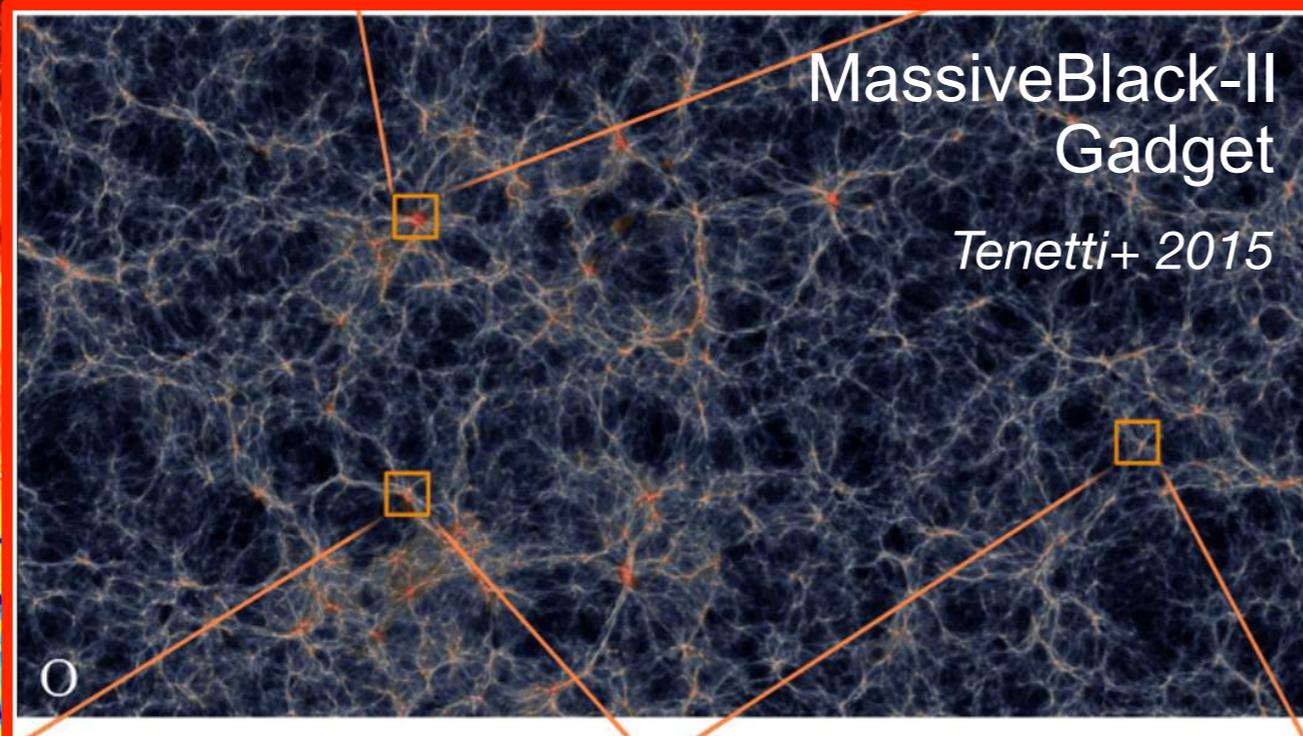
Vogelsberger+ 2015

Arepo

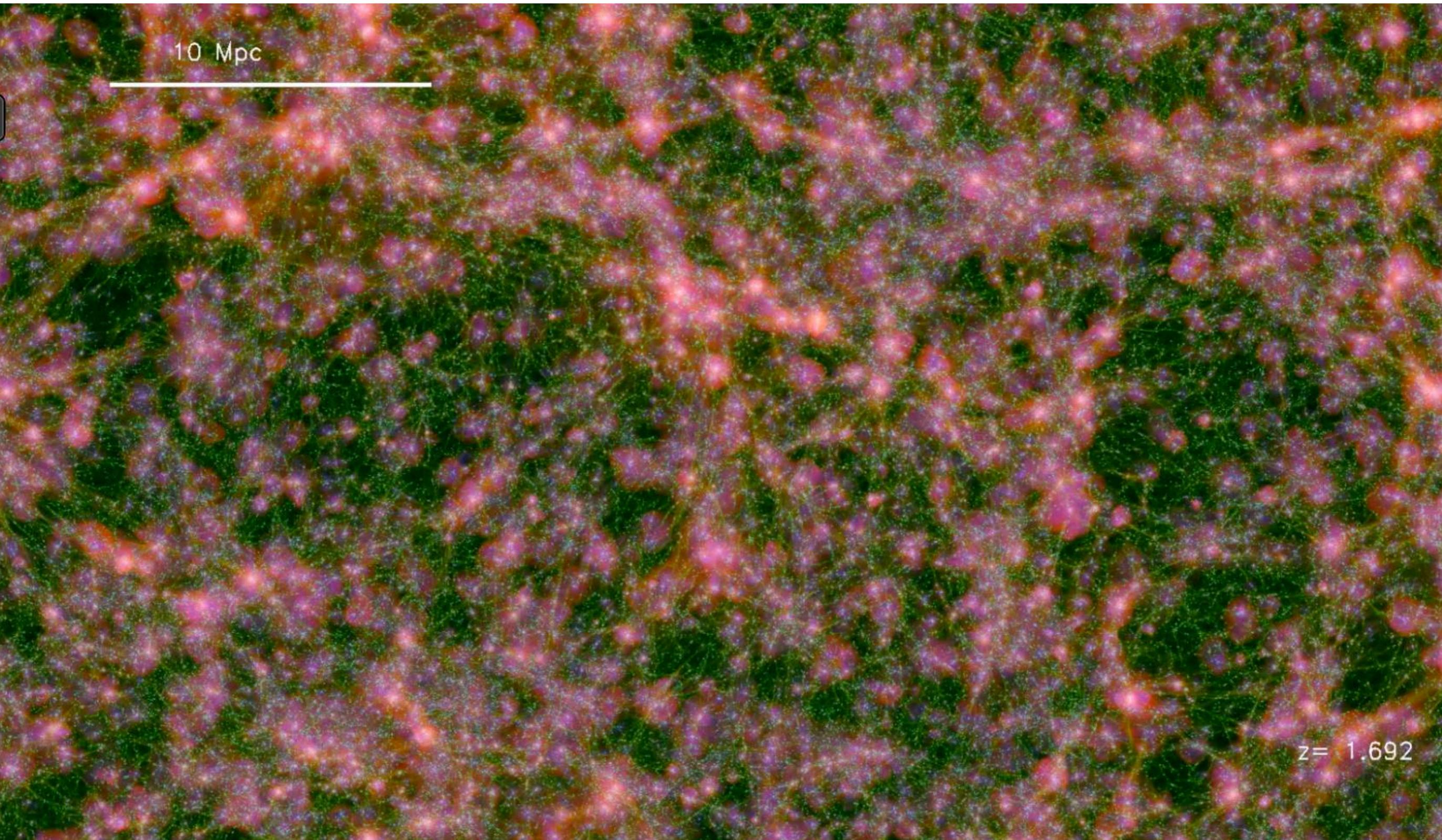
Gadget



Gas Density

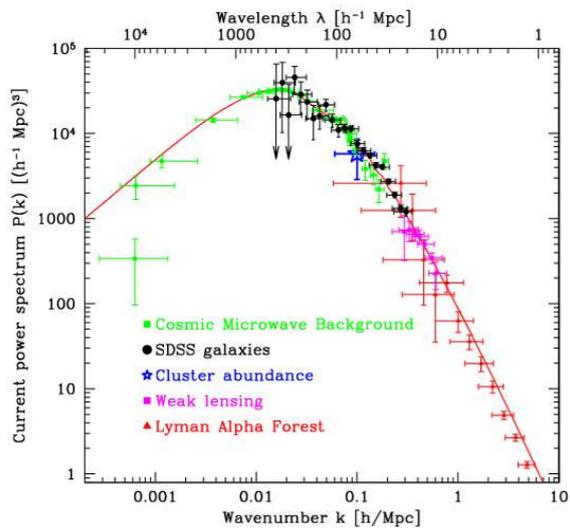


https://www.youtube.com/watch?v=N-IGQVpevAc&ab_channel=yohandubois



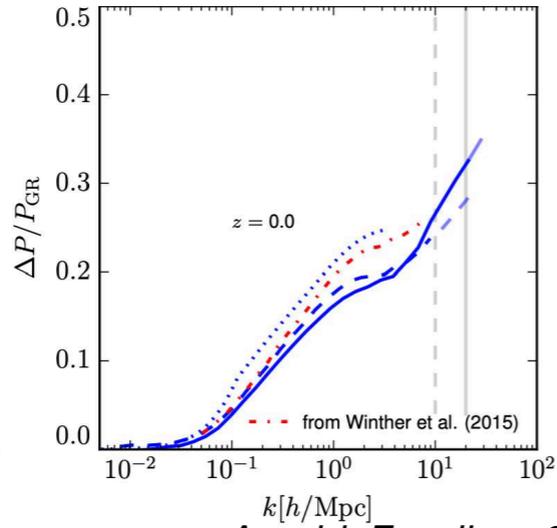
La physique des baryons modifie la distribution de la matière

Observations



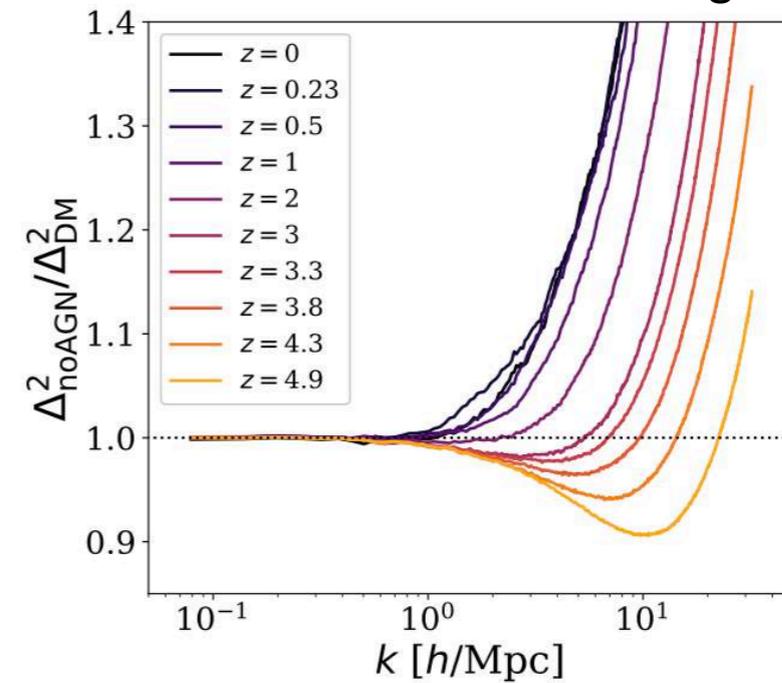
Tegmark+ 2004

Déviaton cosmologie non-standard

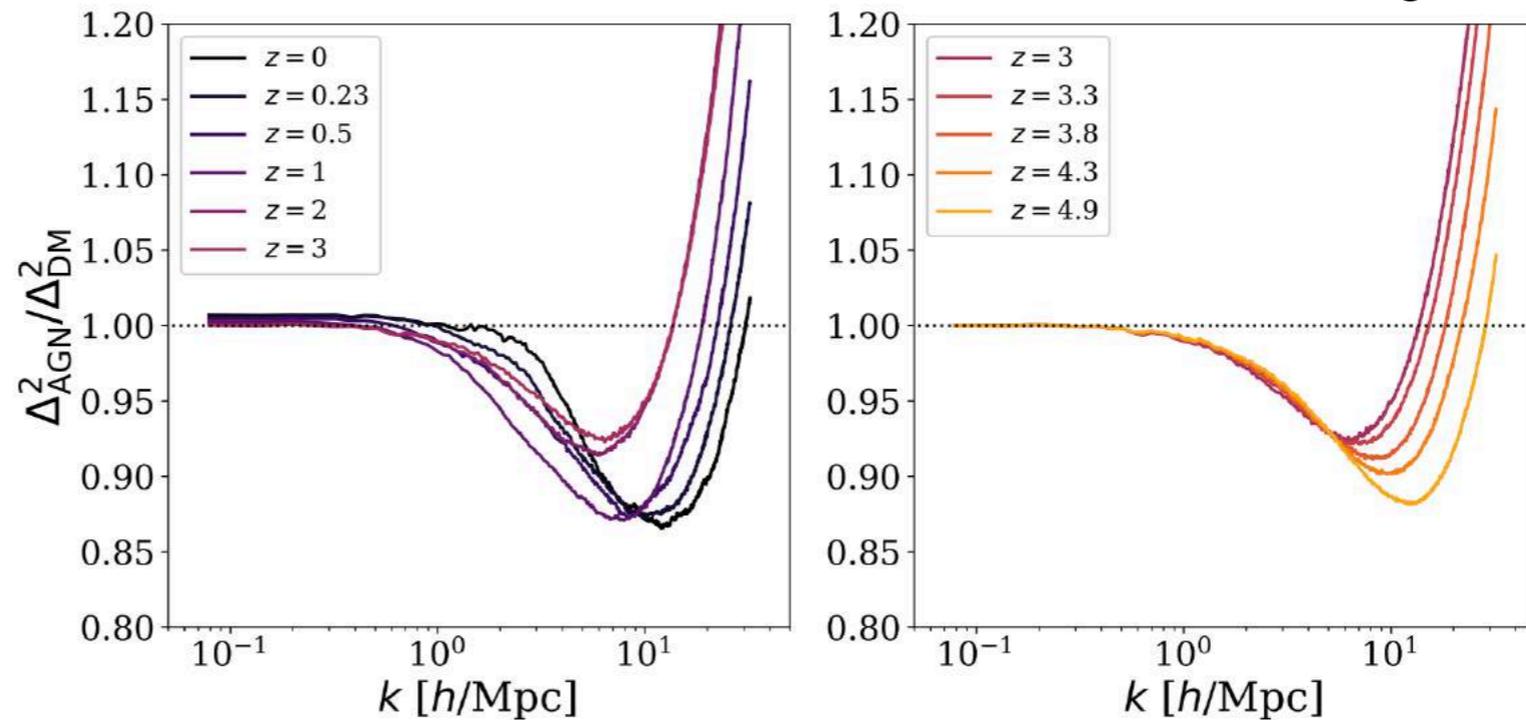


Arnold, Fosalba+ 2018

Simulation sans AGN versus simulation sans gaz



Simulation avec des AGN versus simulation sans gaz



Chisari+ 2018

voir aussi :

van Daalen+ 2011

Vogelsberger+ 2014

Hellwing+ 2016

Springel+ 2017

Les AGN changent la morphologie des galaxies ?

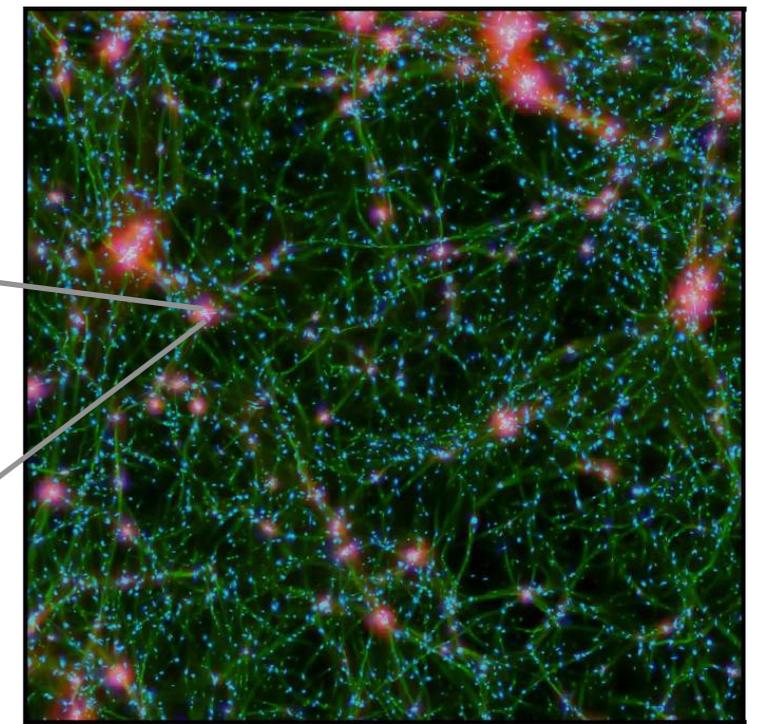
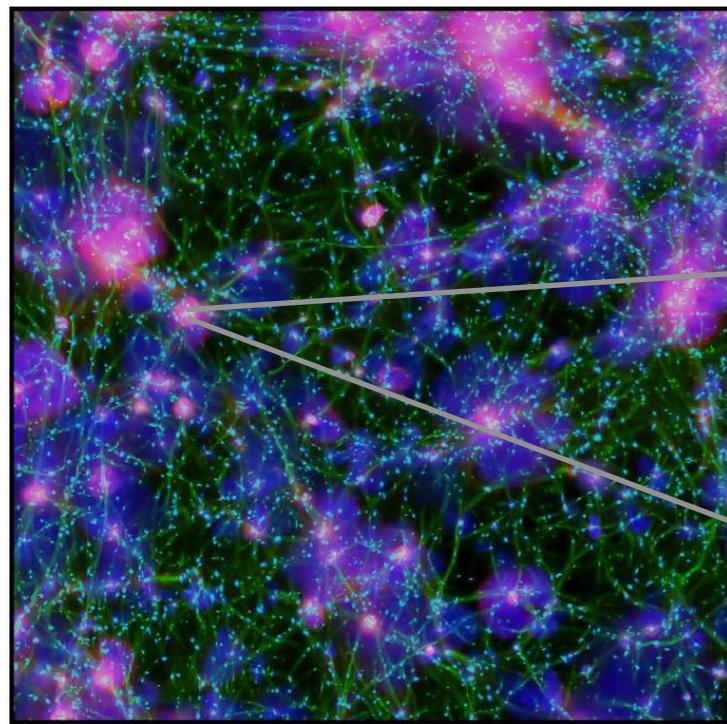
Les mêmes galaxies simulées

avec AGN

sans AGN

avec AGN
(cas réaliste d'un univers
avec trous noirs)

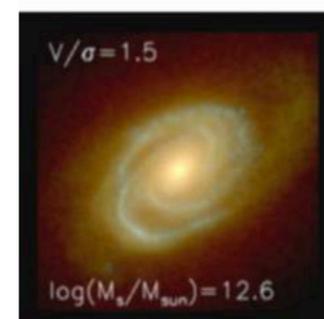
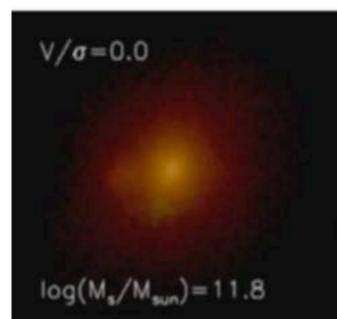
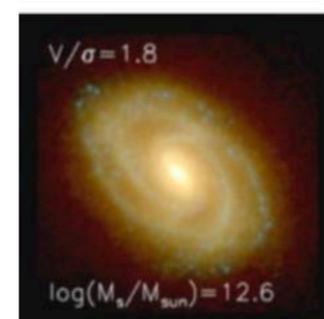
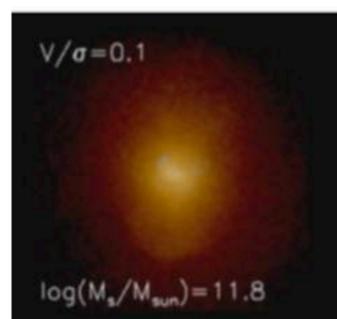
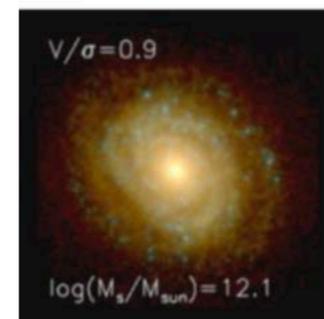
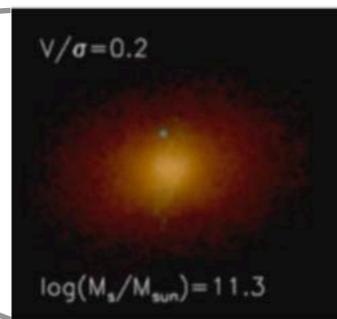
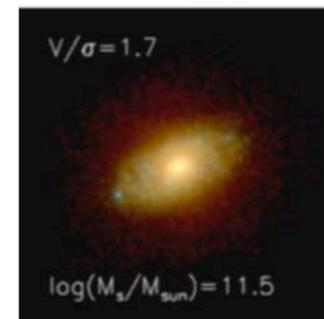
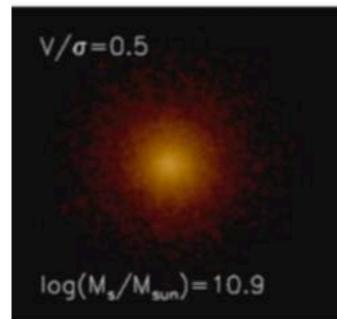
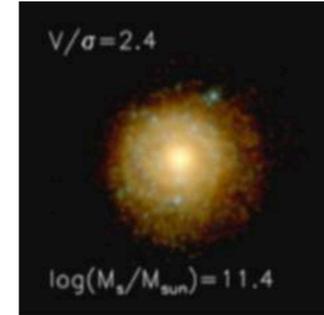
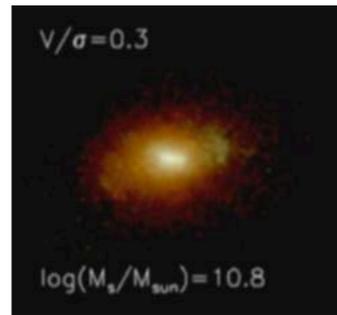
sans AGN
(cas non réaliste d'un
univers sans trous noirs)



25 Mpc

25 Mpc

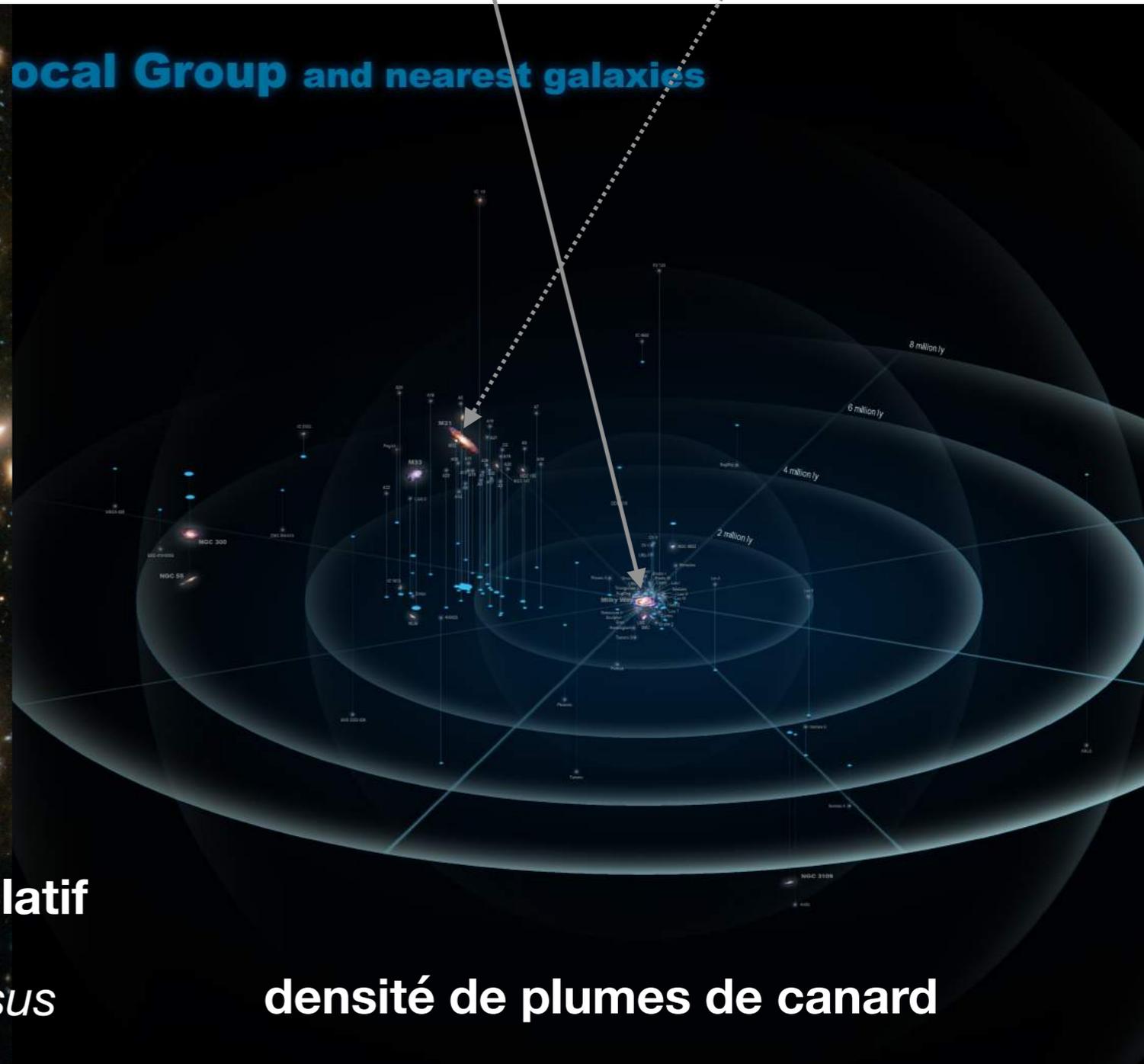
100 kpc



La densité de galaxies est plus grande autour des galaxies massives

Un amas de galaxies

La Voie Lactée et Andromède



densité du plomb

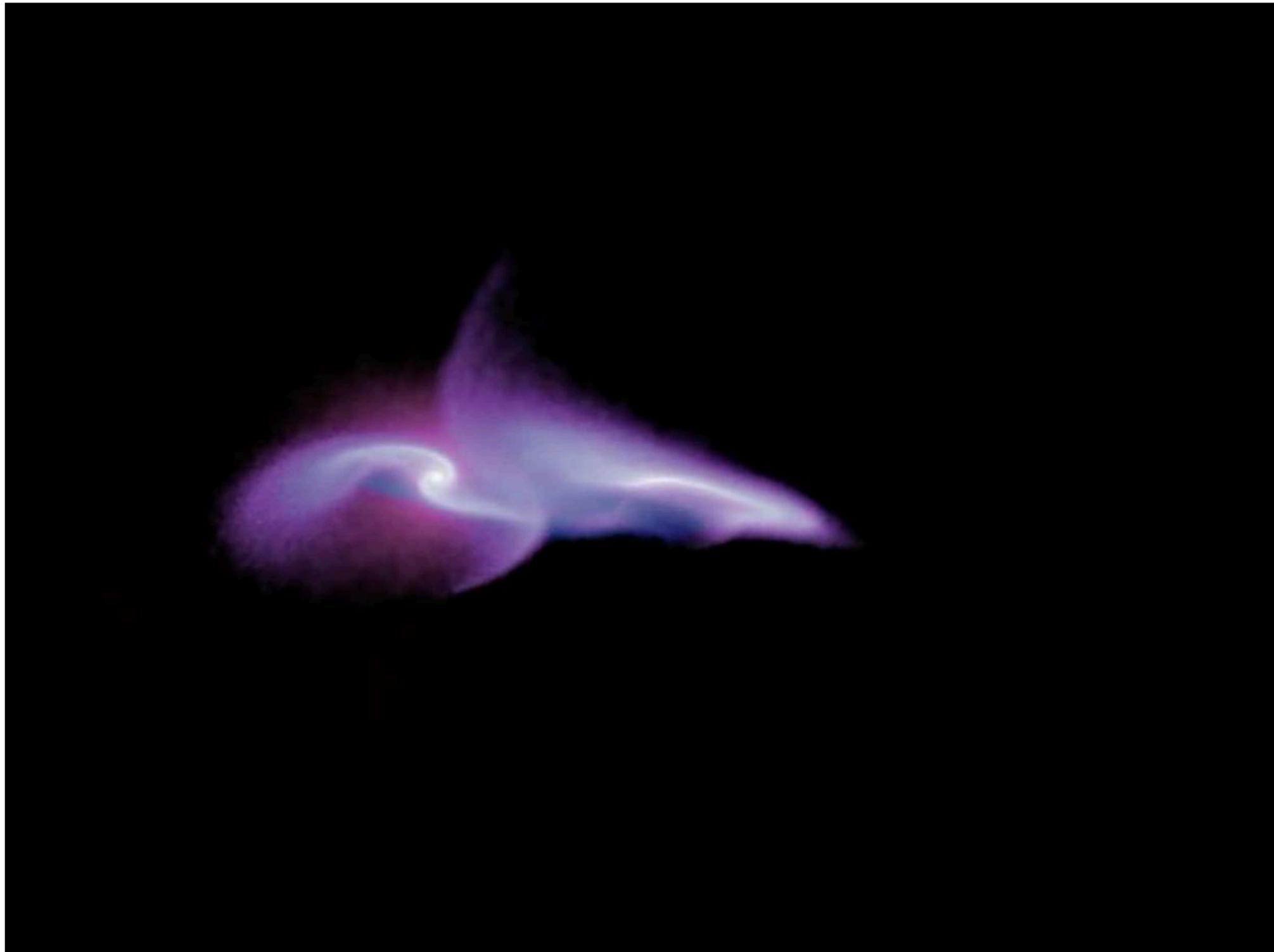
en relatif

versus

densité de plumes de canard

Les fusions entre galaxies y
sont plus nombreuses

Les fusions de galaxies transforment les disques en sphéroïdes



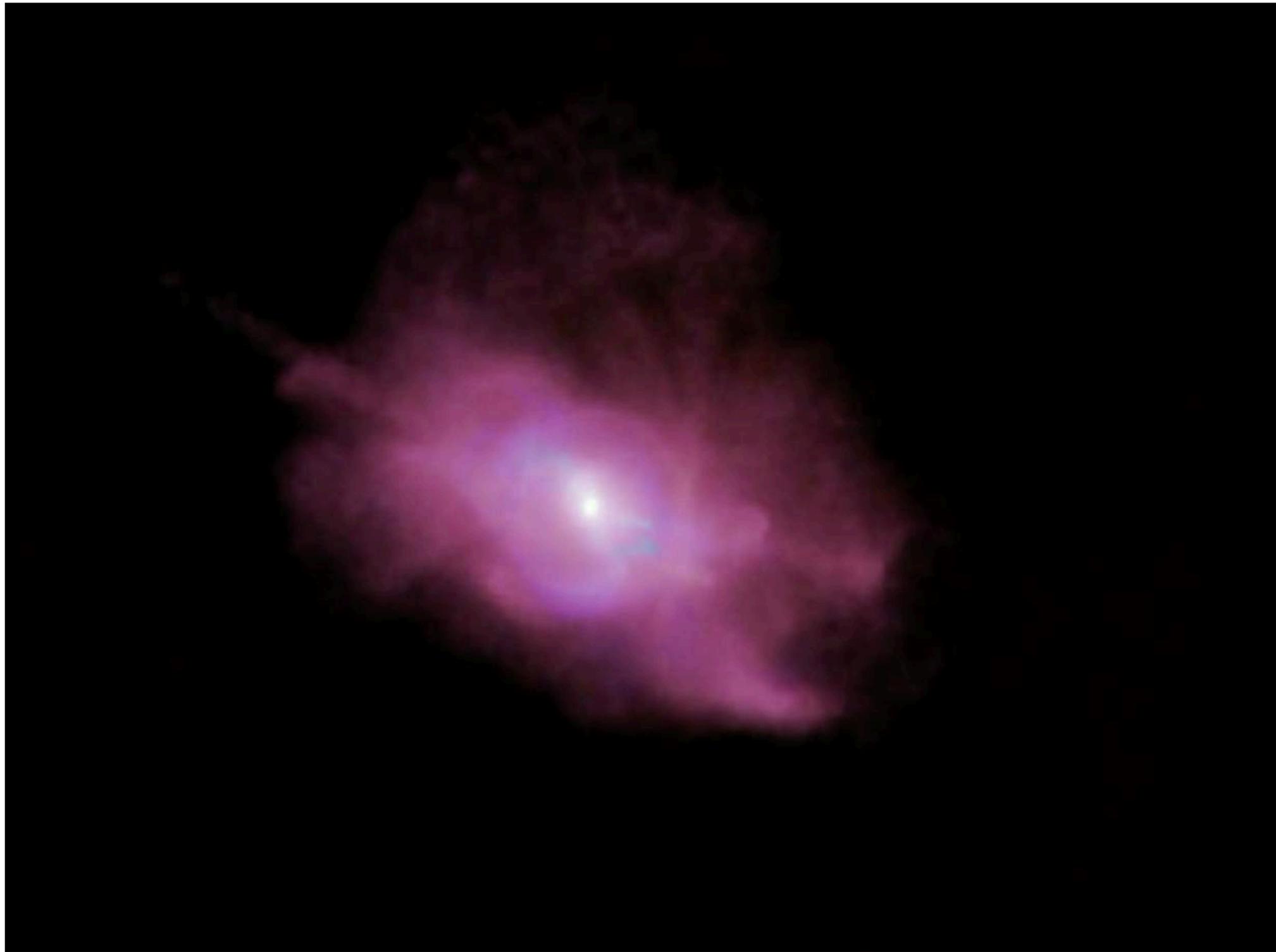
Crédits : V. Springel

Les fusions de galaxies transforment les disques en sphéroïdes



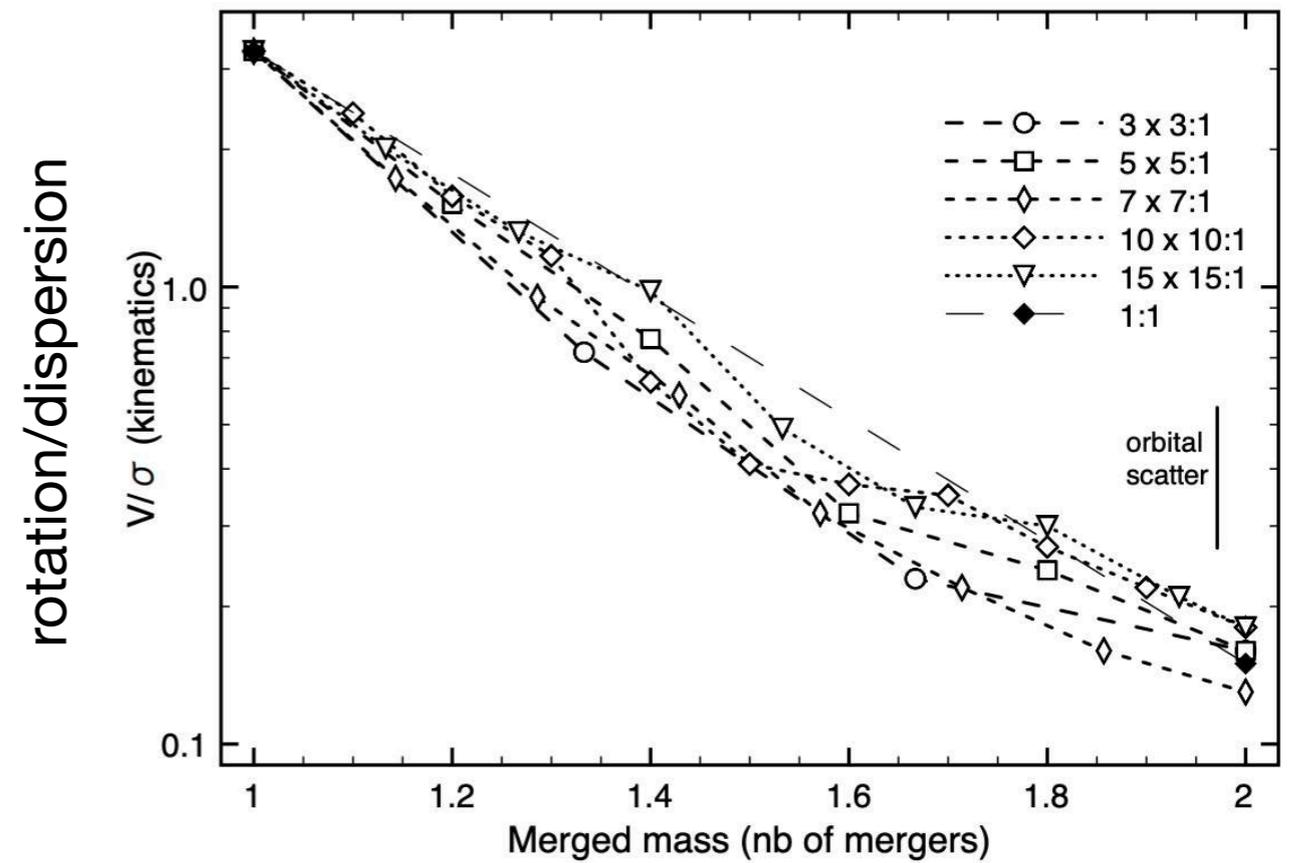
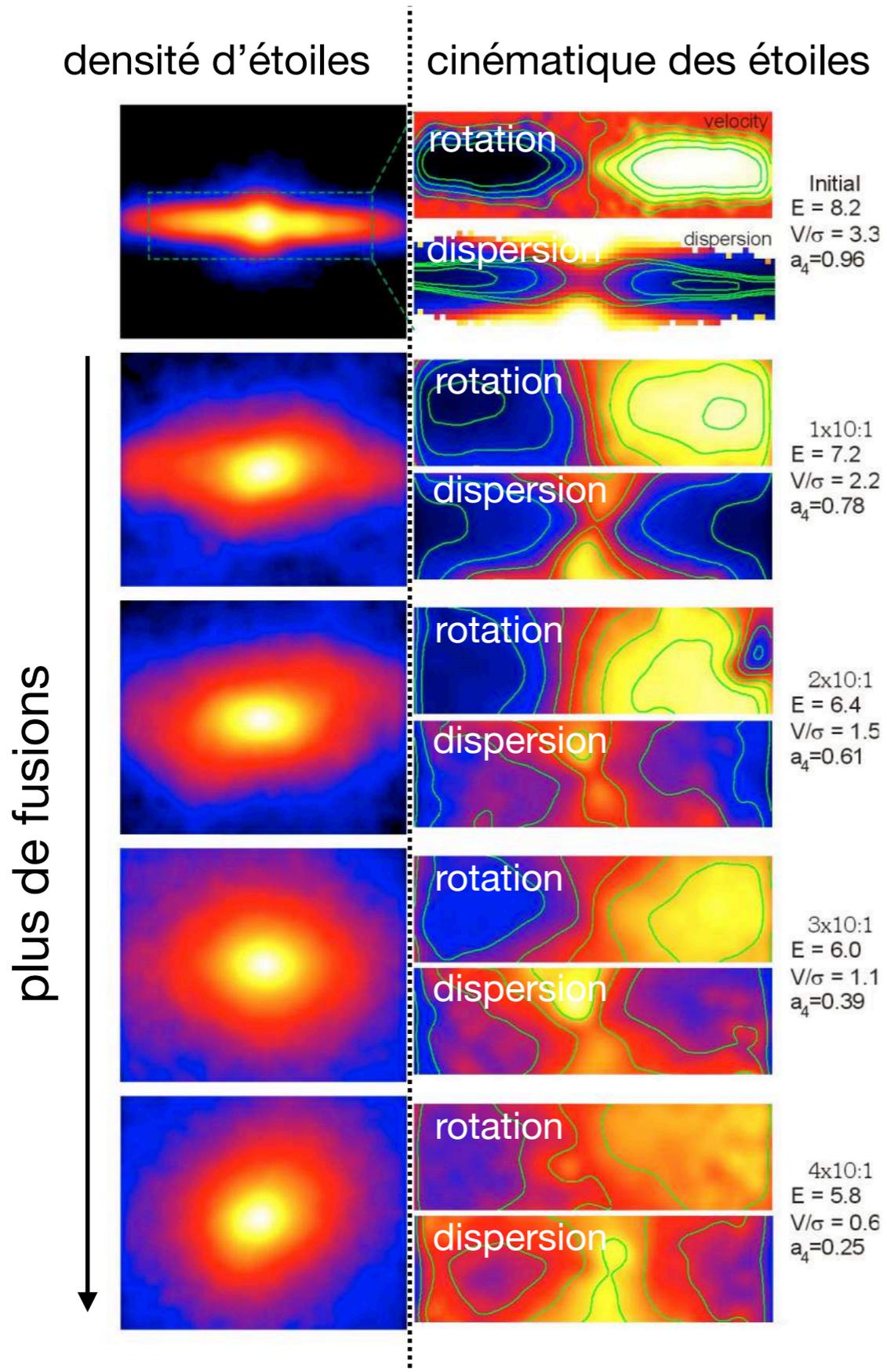
Crédits : V. Springel

Les fusions de galaxies transforment les disques en sphéroïdes

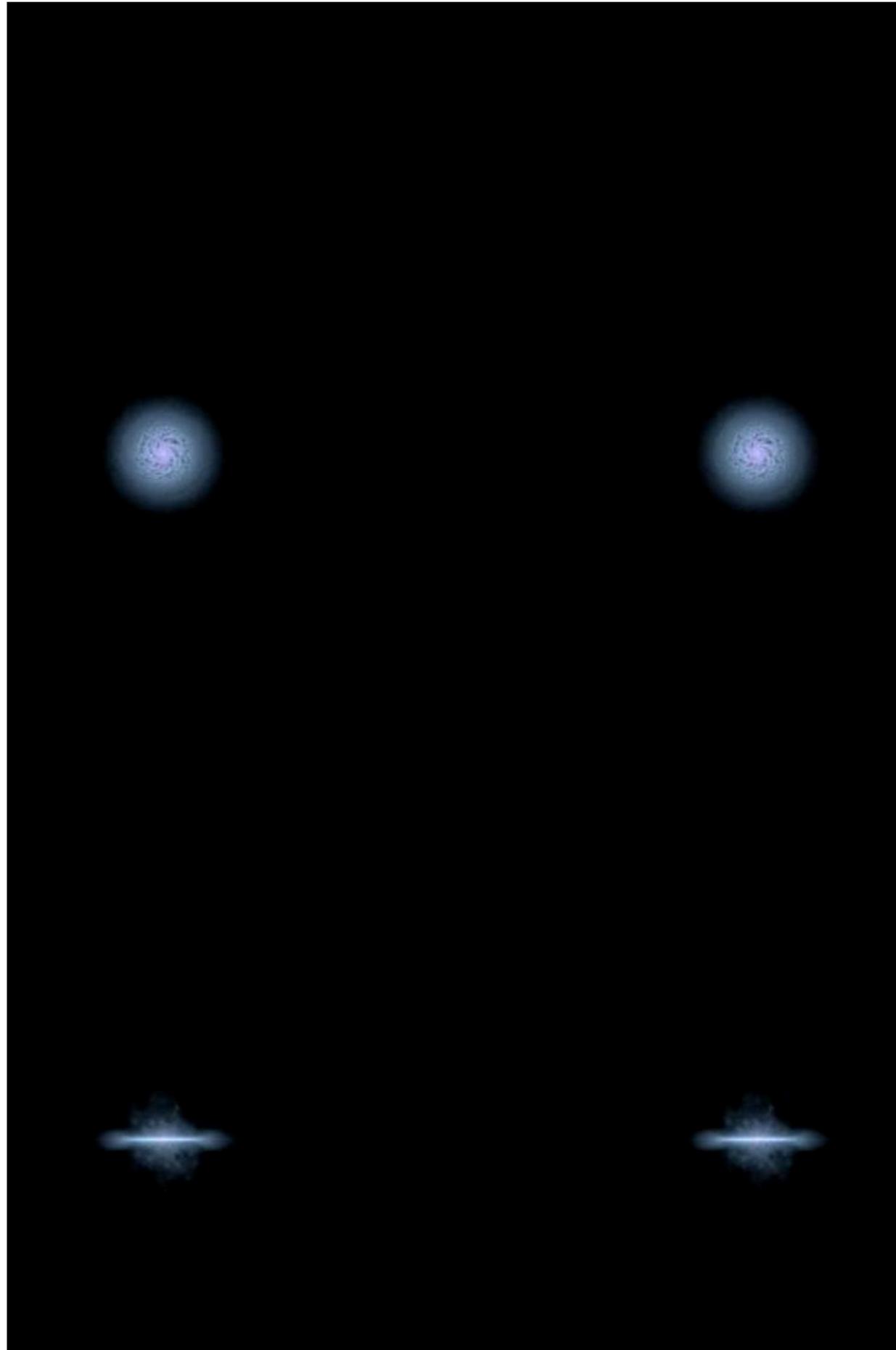


Crédits : V. Springel

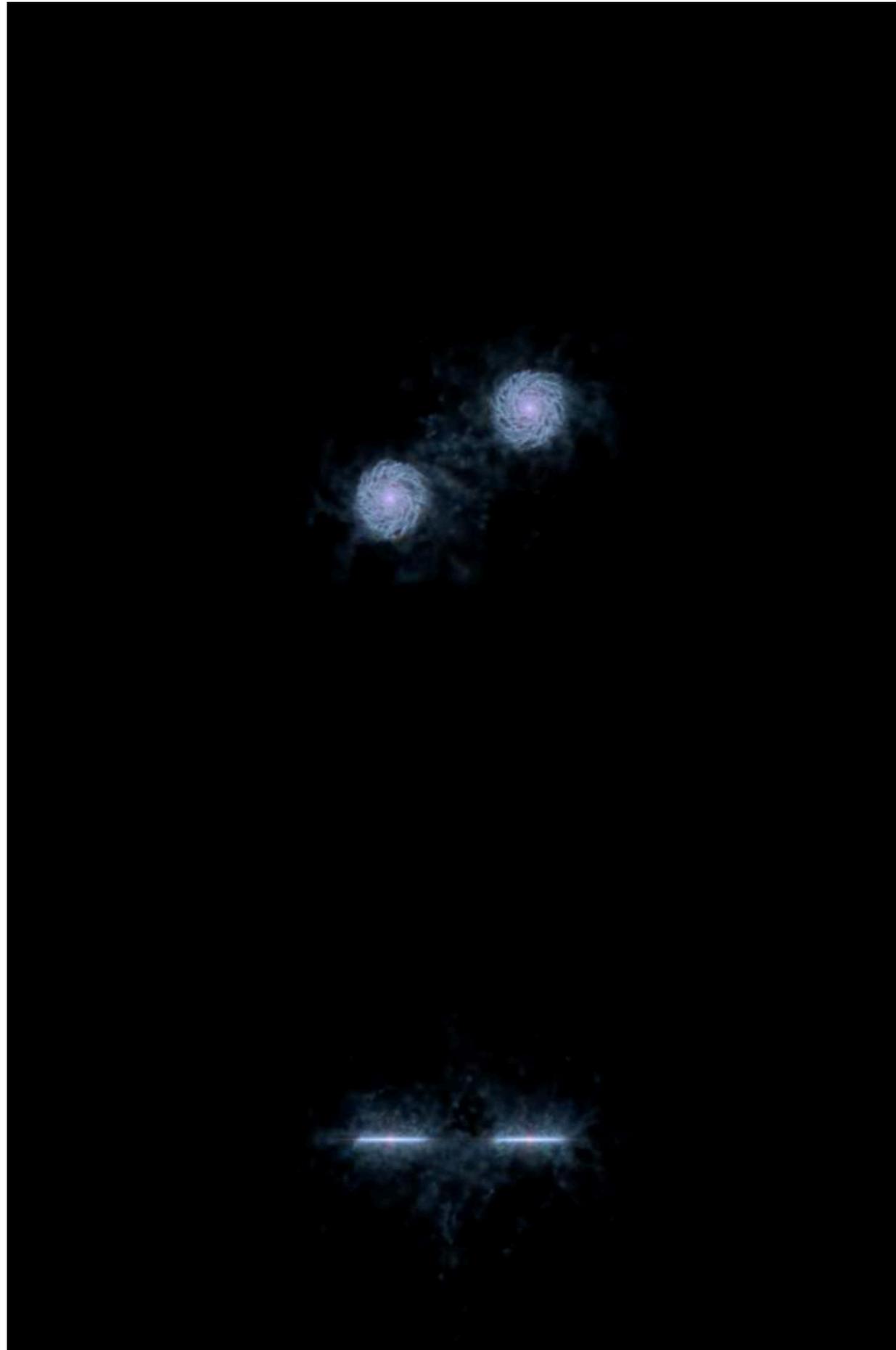
Plus de masse fusionnée = plus de changement morphologique



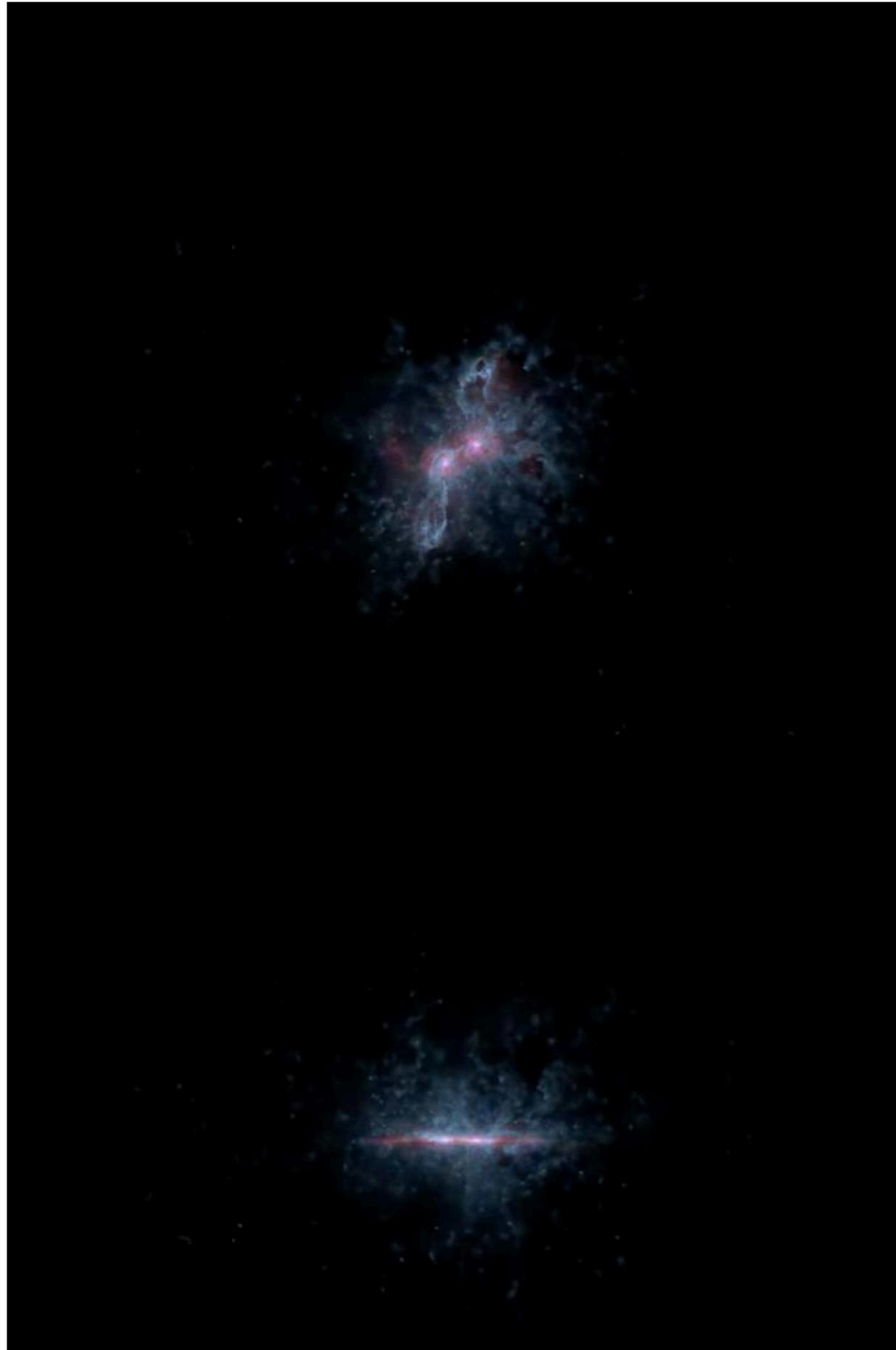
Les fusions déclenchent l'activité du trou noir central



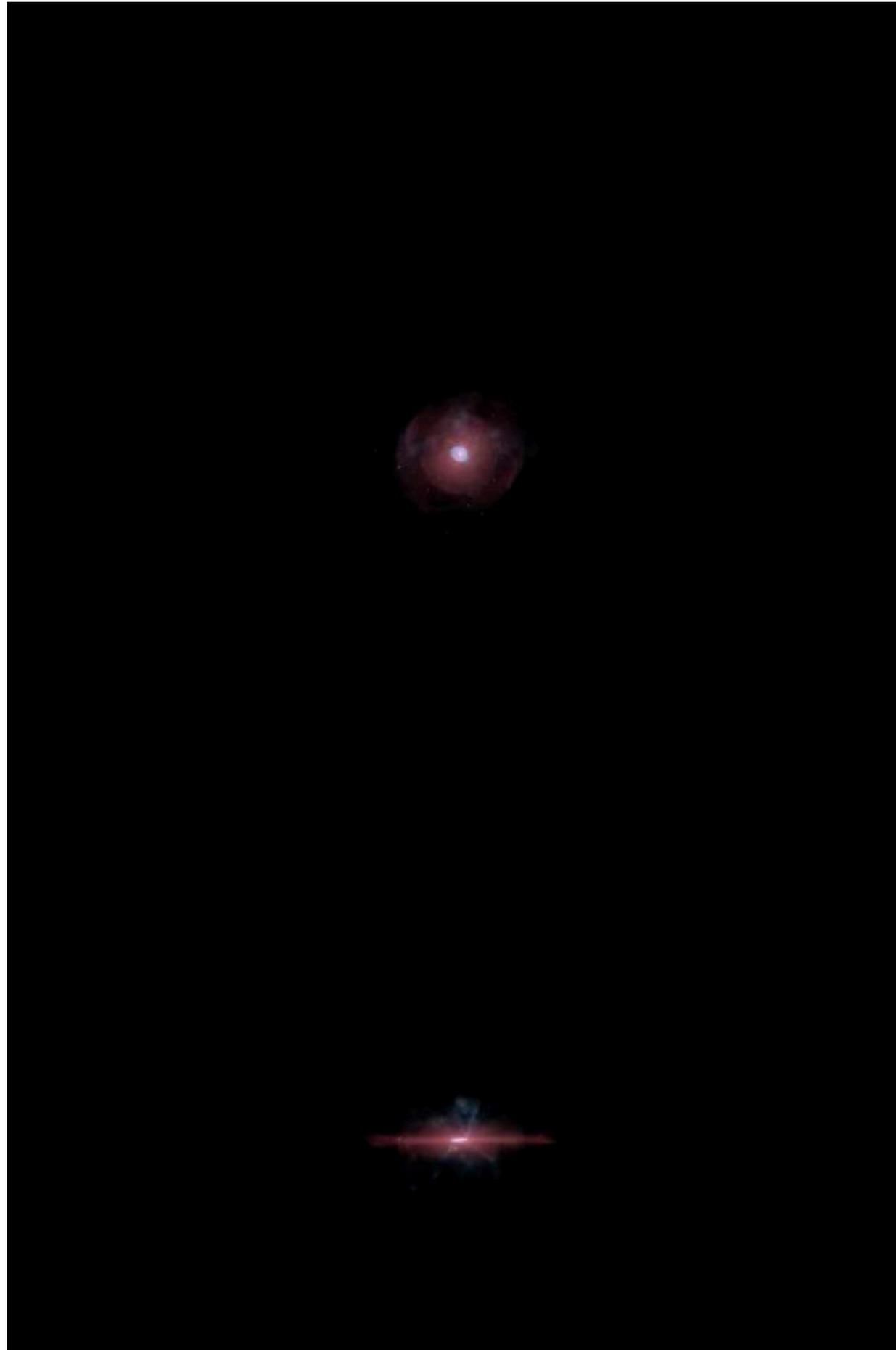
Les fusions déclenchent l'activité du trou noir central



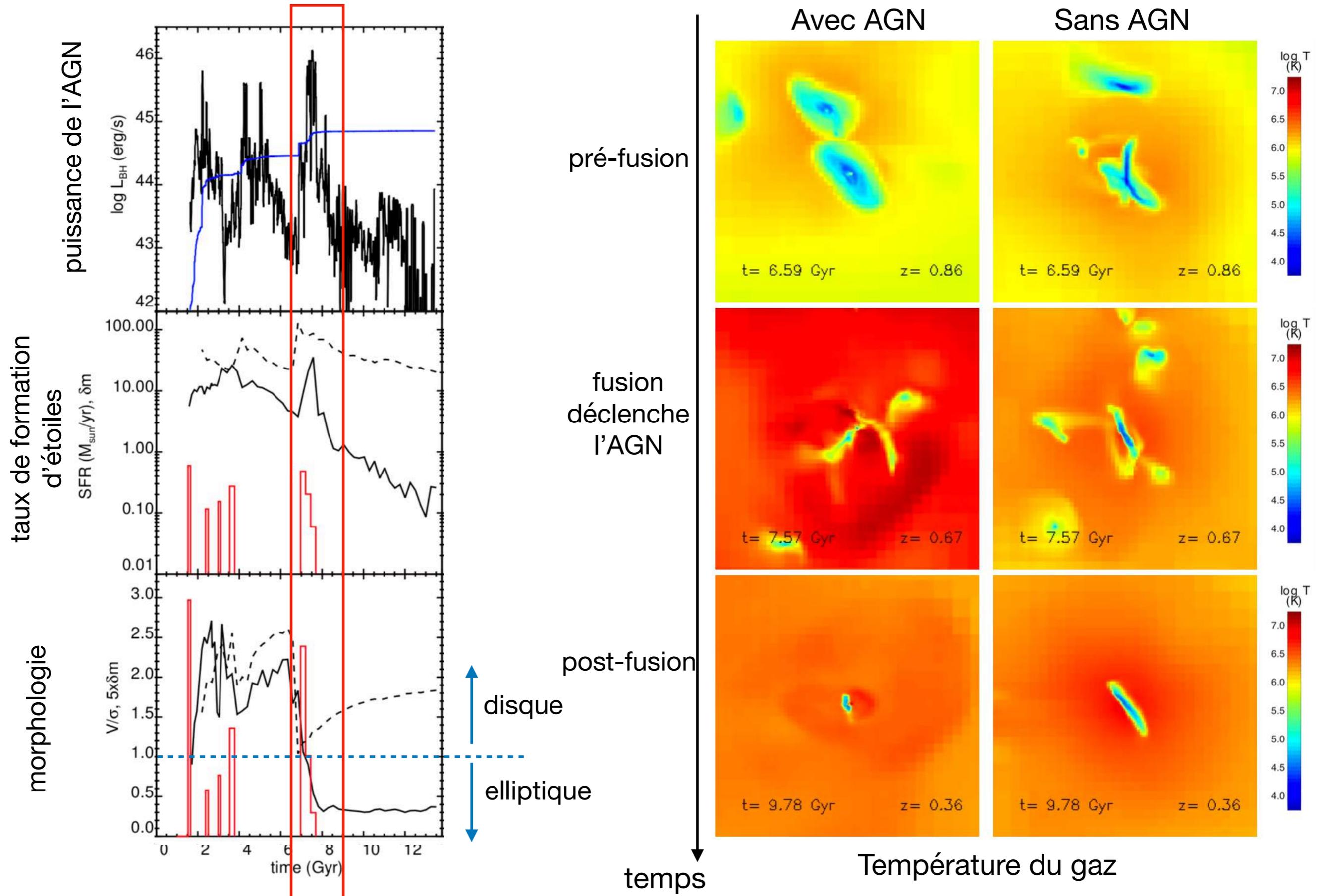
Les fusions déclenchent l'activité du trou noir central



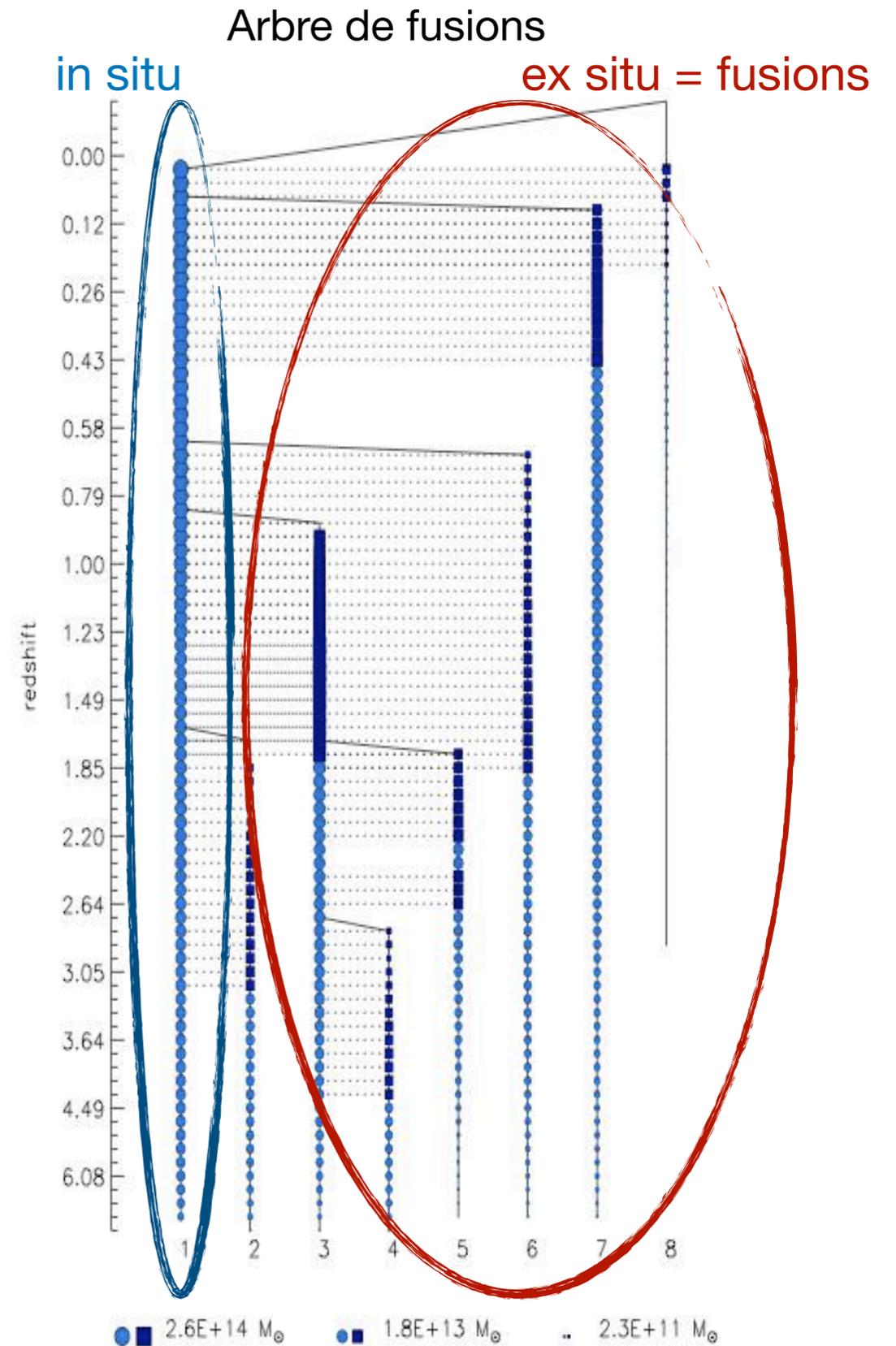
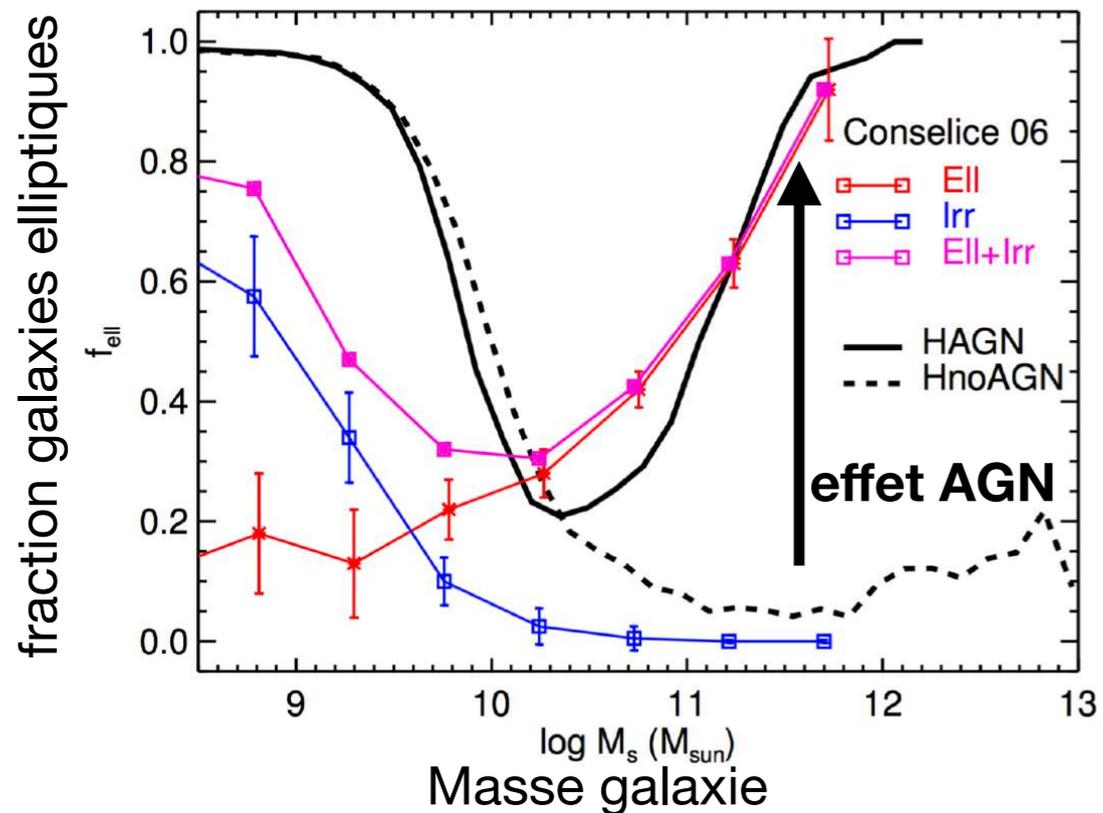
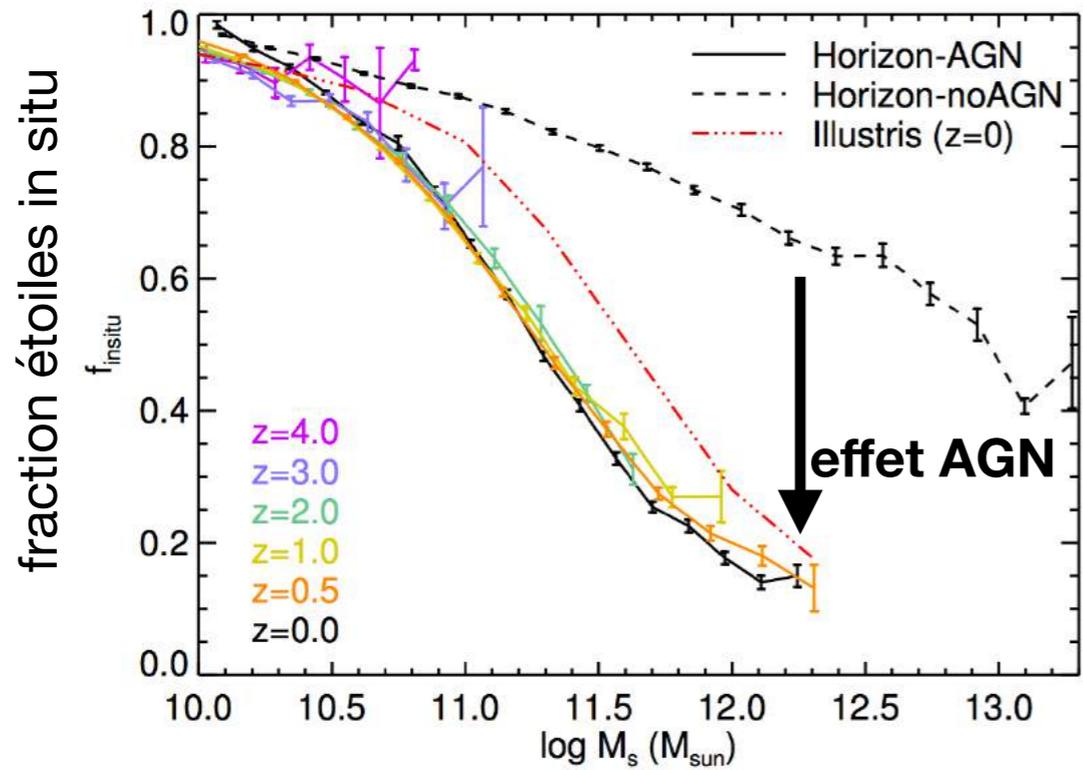
Les fusions déclenchent l'activité du trou noir central

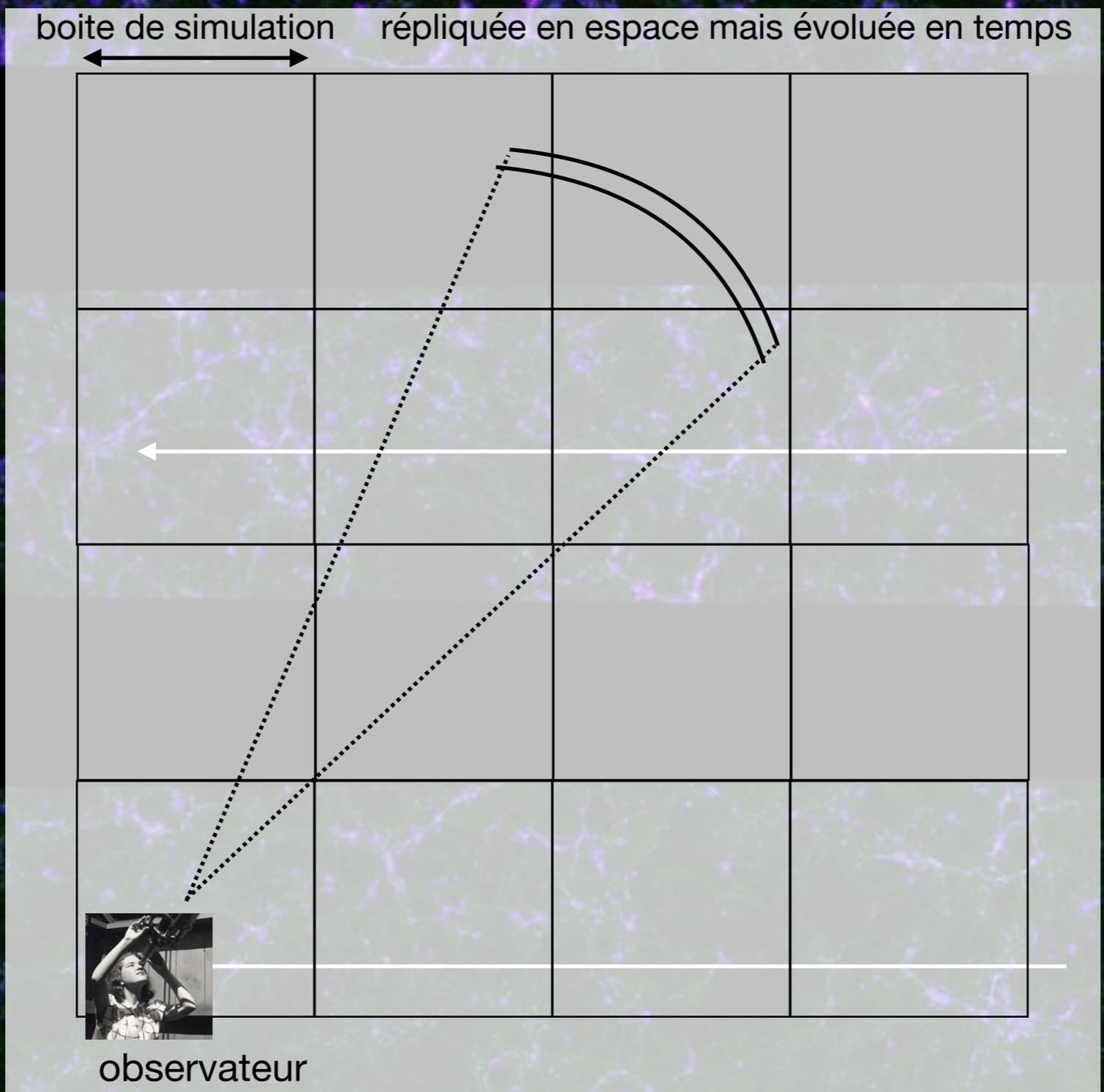


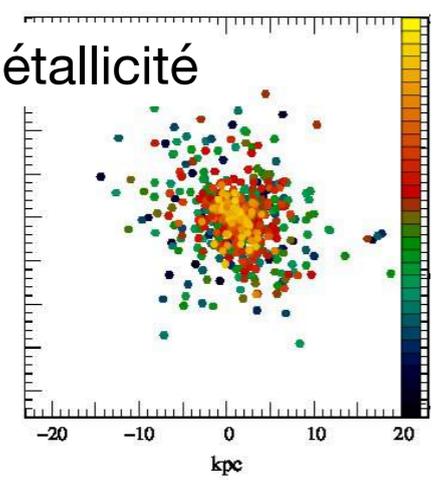
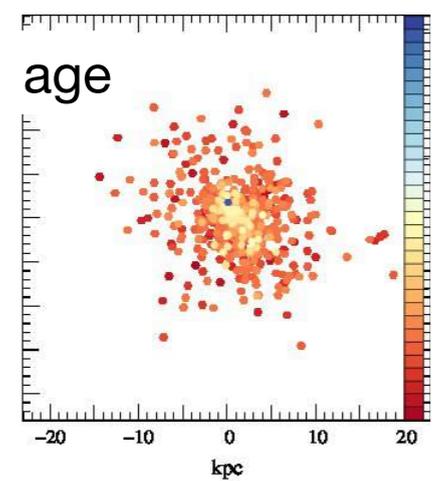
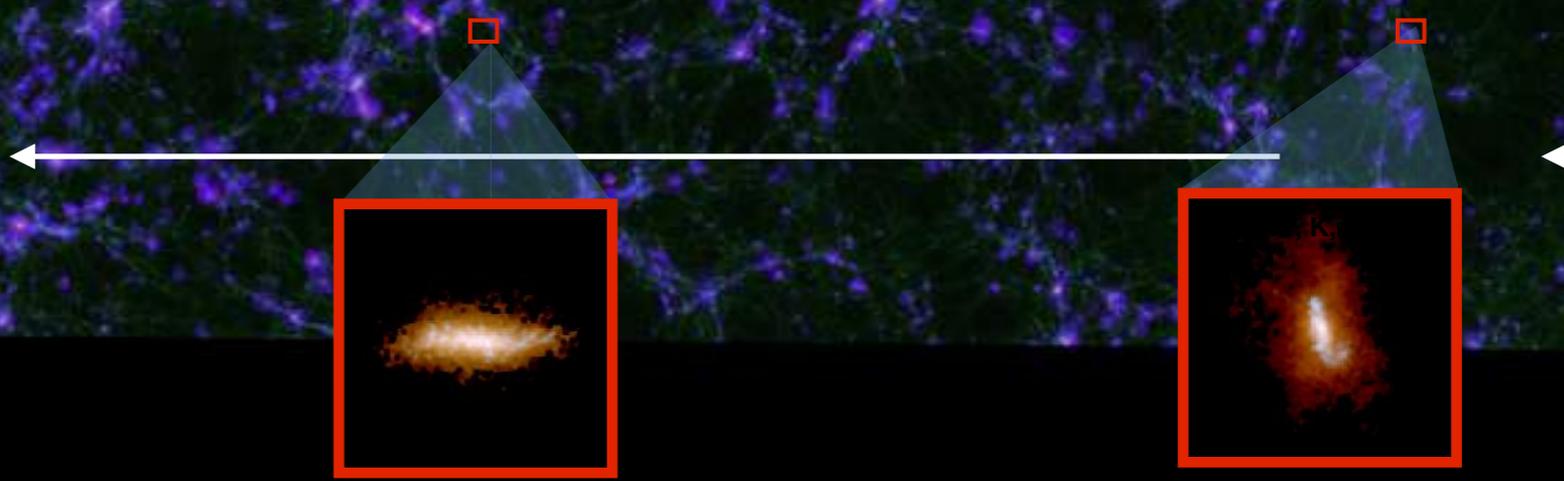
Les fusions changent la morphologie. Les AGN rendent ce changement durable.



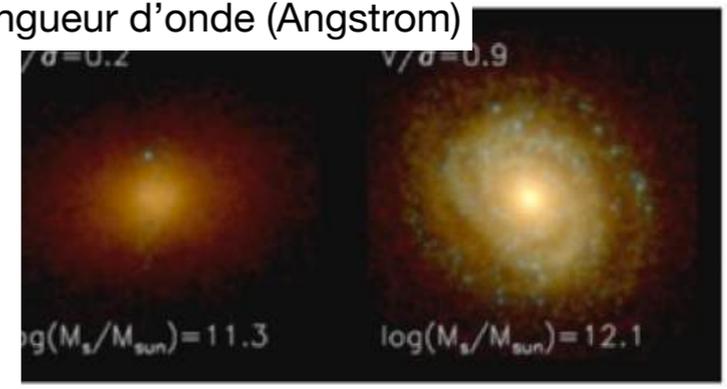
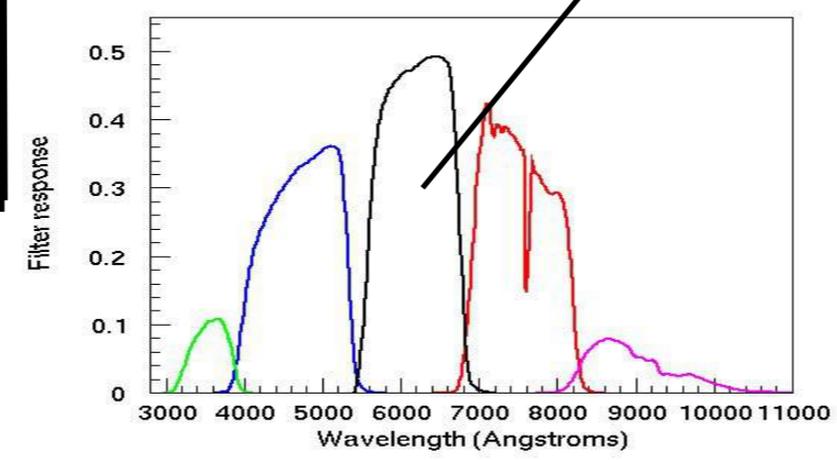
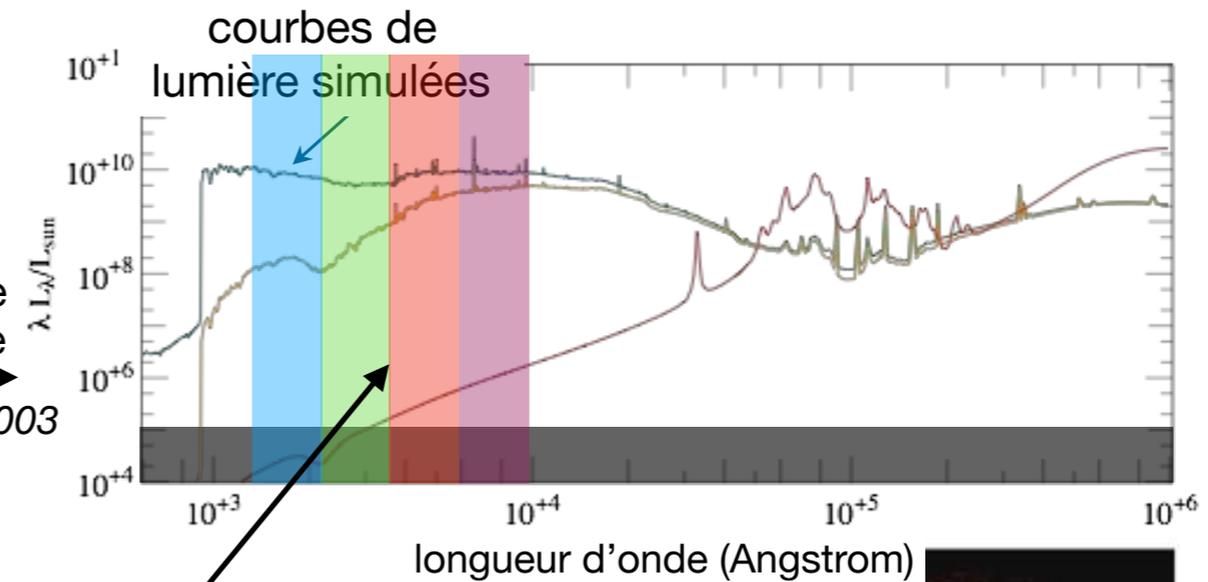
Les fusions changent la morphologie. Les AGN rendent ce changement durable.







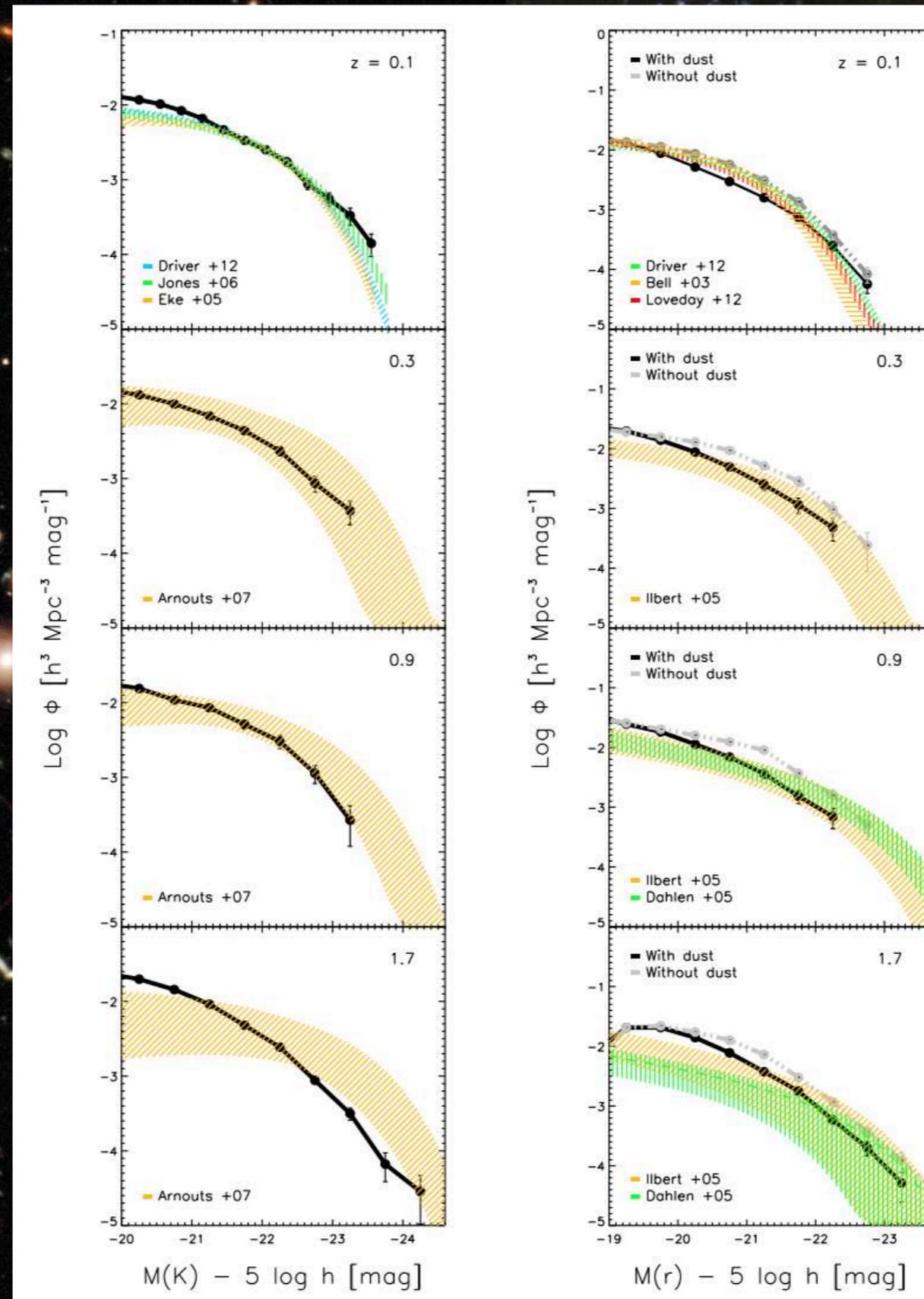
synthèse spectrale
population stellaire
Bruzual & Charlot 2003



Kaviraj, Laigle+ 2017

Laigle 2017

Prédiction des fonctions de luminosités des galaxies

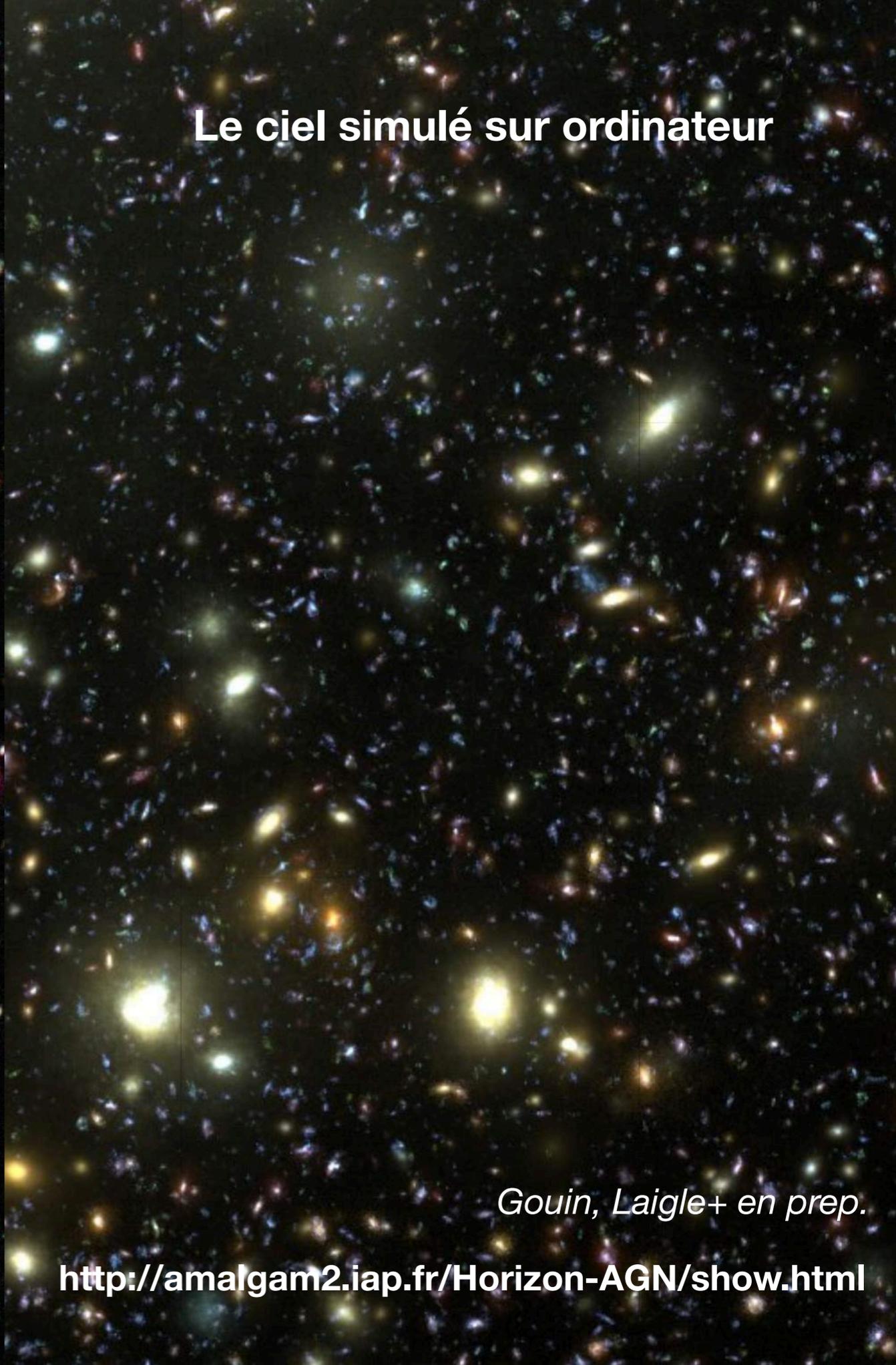


Le ciel observé



Telescope spatial Hubble

Le ciel simulé sur ordinateur



Gouin, Laigle+ en prep.

<http://amalgam2.iap.fr/Horizon-AGN/show.html>