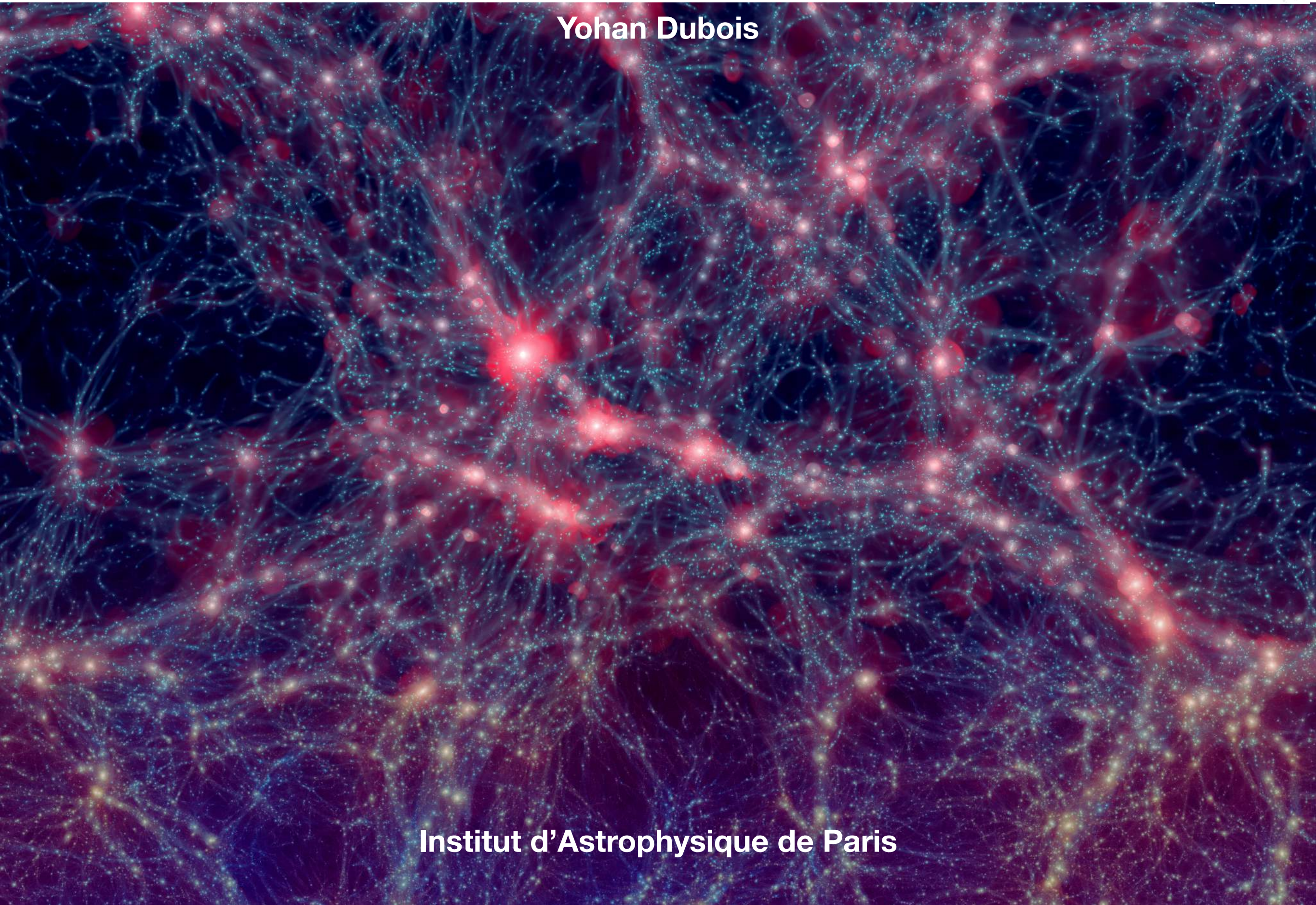


# Les simulations cosmologiques (pour comprendre la formation des galaxies)

Yohan Dubois

Institut d'Astrophysique de Paris





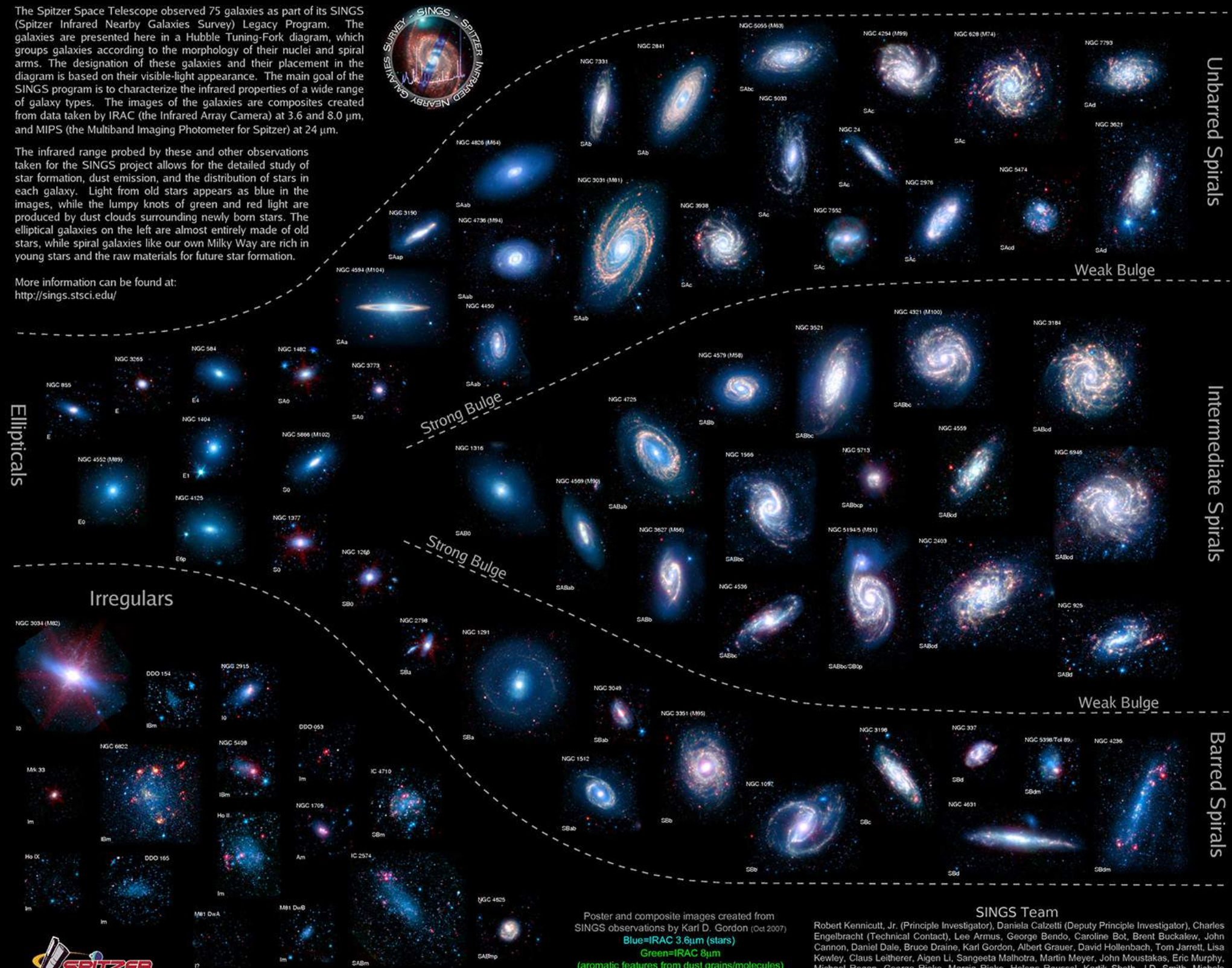
# Pouvons-nous comprendre la variété morphologique des galaxies ?

## 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  $\mu\text{m}$ , and MIPS (the Multiband Imaging Photometer for Spitzer) at 24  $\mu\text{m}$ .

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 $\mu\text{m}$  (stars)  
Green=IRAC 8 $\mu\text{m}$  (aromatic features from dust grains/molecules)  
Red=MIPS 24 $\mu\text{m}$  (warm dust)

### SINGS Team

Robert Kennicutt, Jr. (Principal Investigator), Daniela Calzetti (Deputy Principal 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 ?

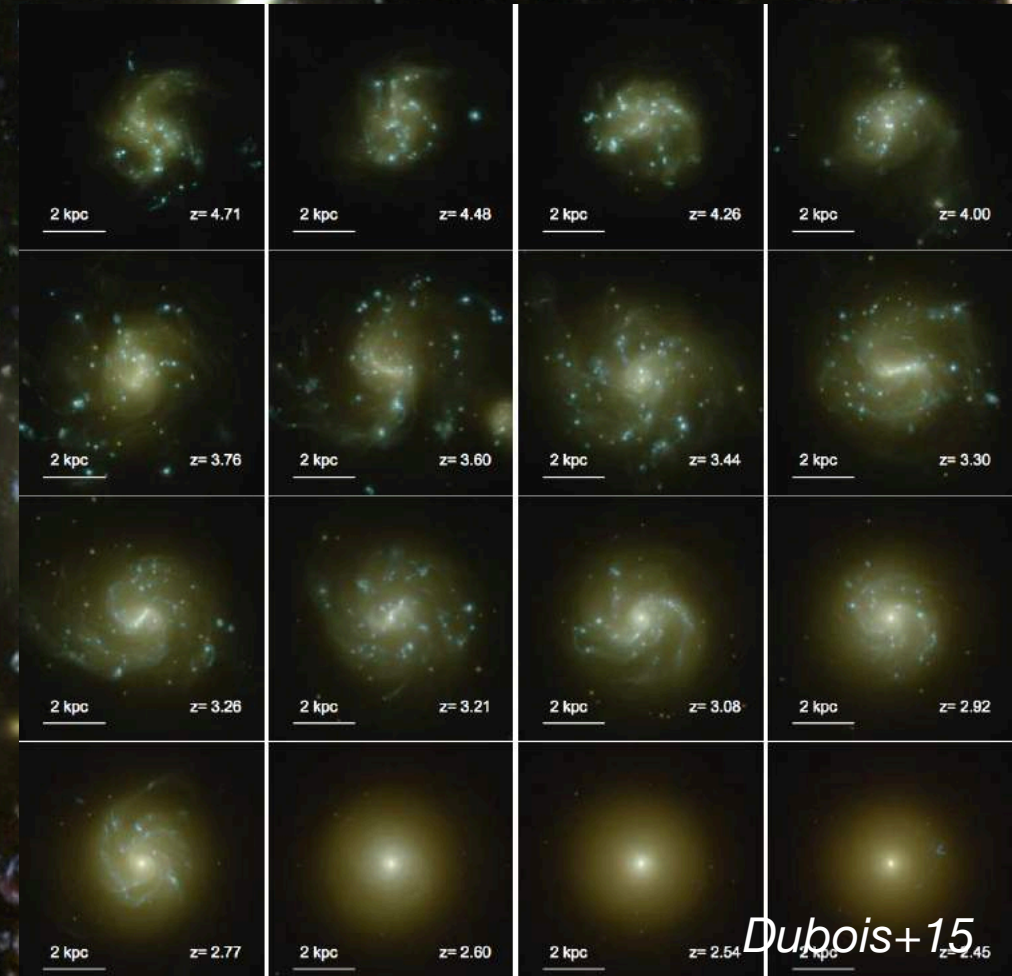
Les galaxies évoluent sur quelques dizaines ou centaines de millions d'années

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

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

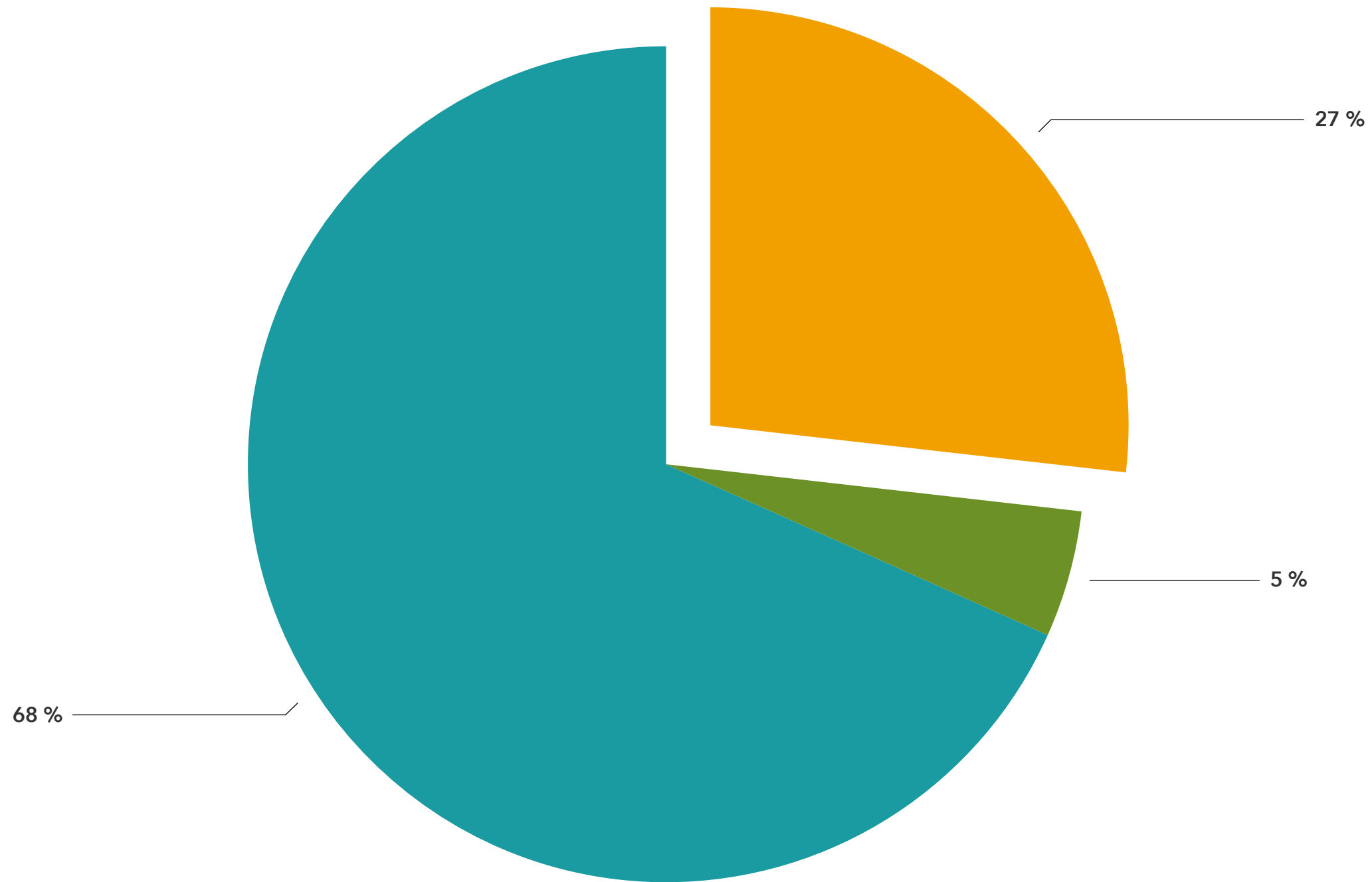
Comprendre l'évolution des galaxies en prenant de multiples photographies des galaxies pour comprendre leur évolution

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





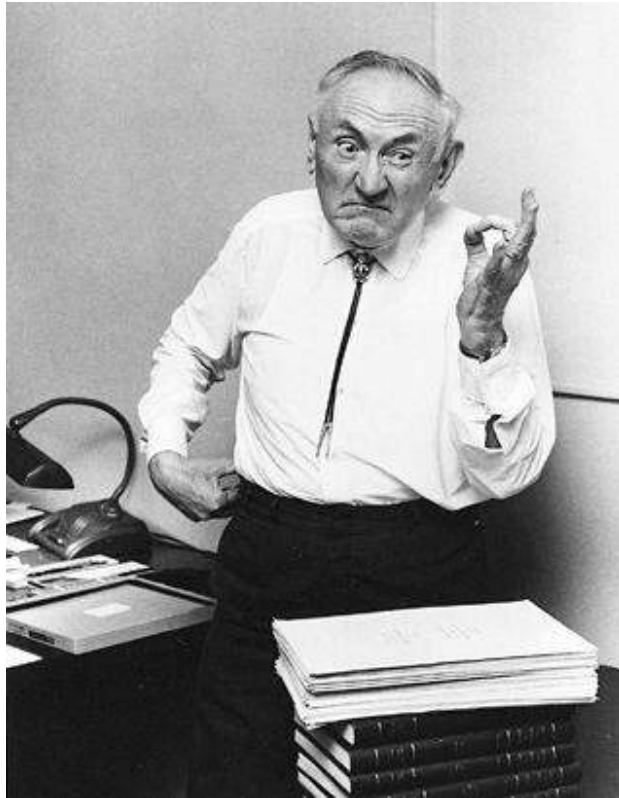
## Bilan en énergie de l'Univers



● 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...

$$\overset{\text{vitesse}}{V^2} = \frac{\overset{\substack{\text{constante} \\ \text{gravitationnelle}}}{G} \overset{\text{masse}}{M}}{\underset{\text{distance}}{R}}$$

## 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*



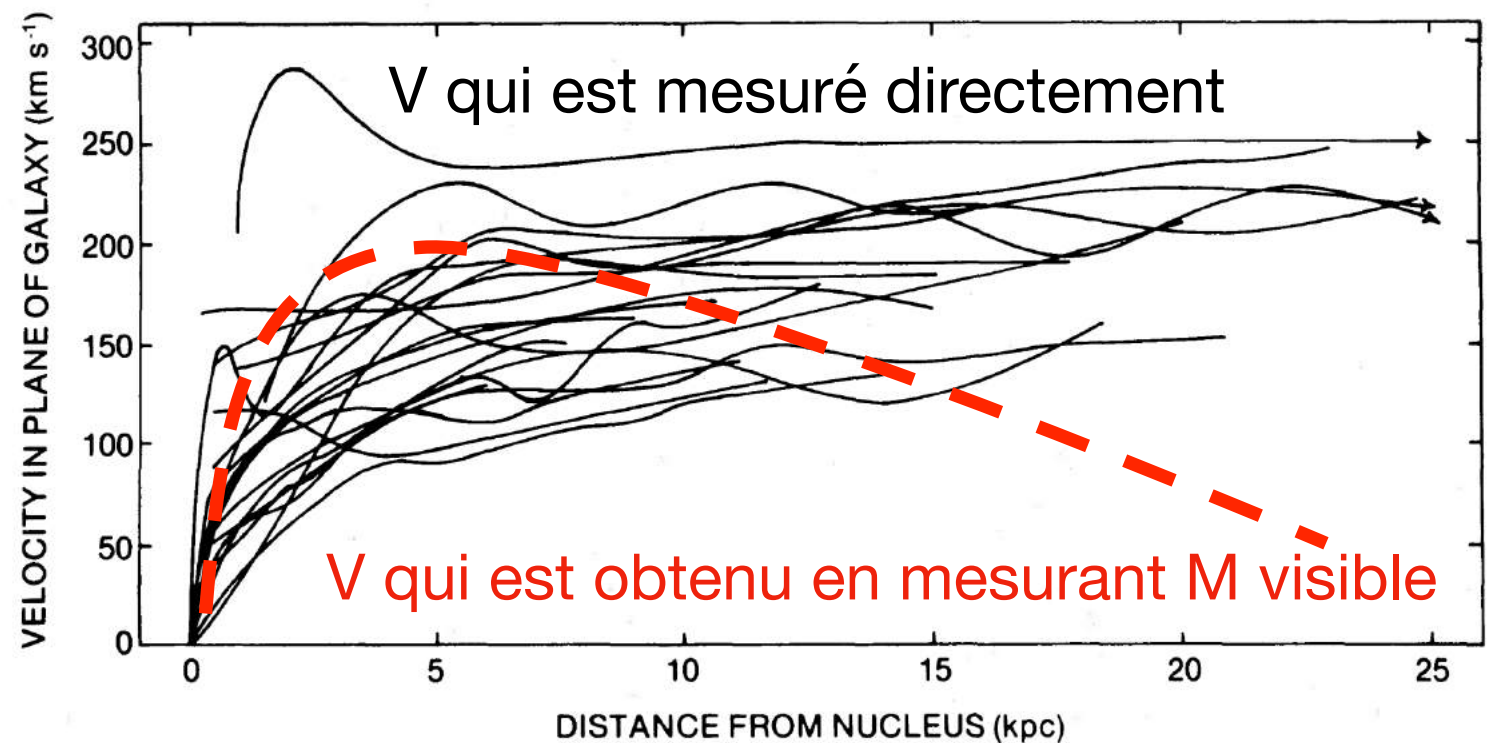
# Mesure des courbes de rotation des galaxies et matière noire



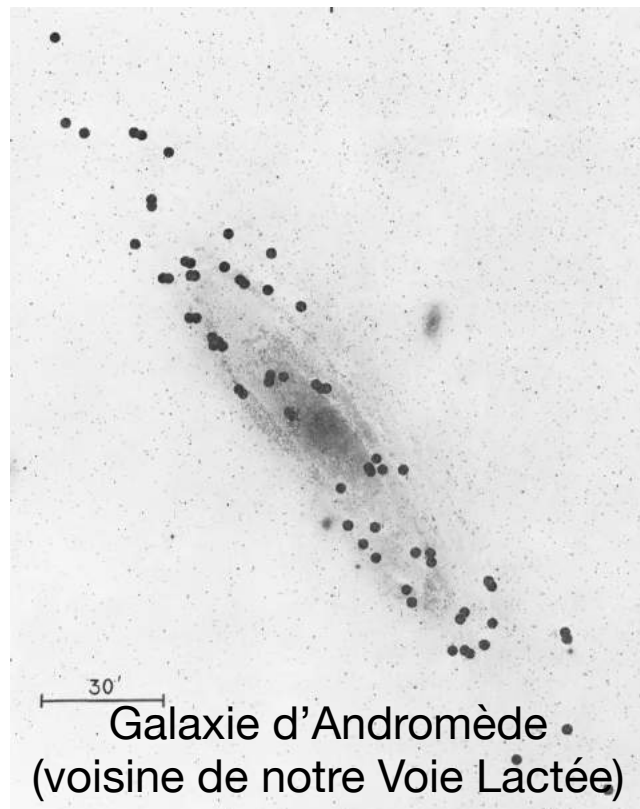
*Rubin+ 1970*

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

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



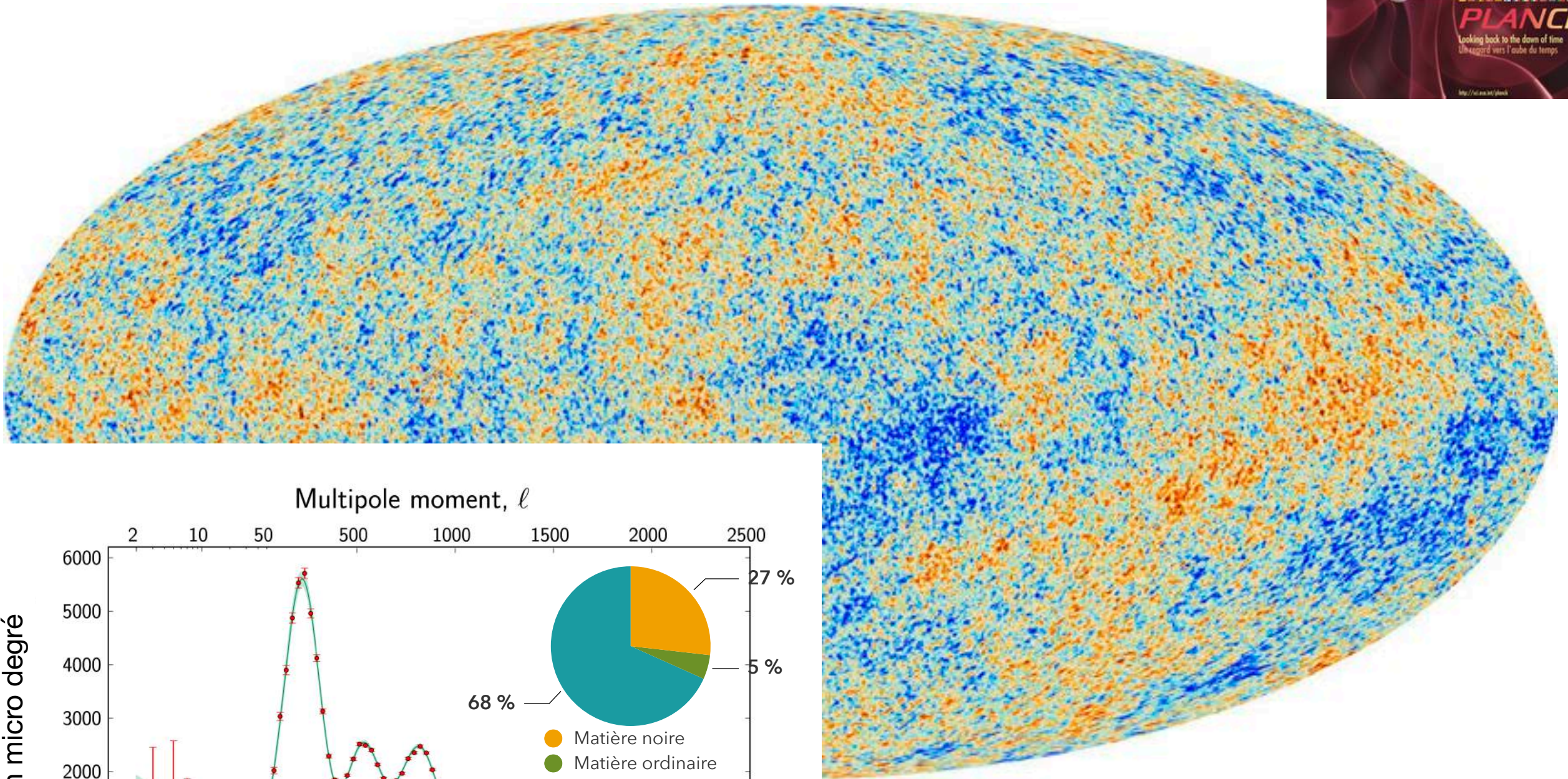
Il y a plus de masse que la seule masse visible !



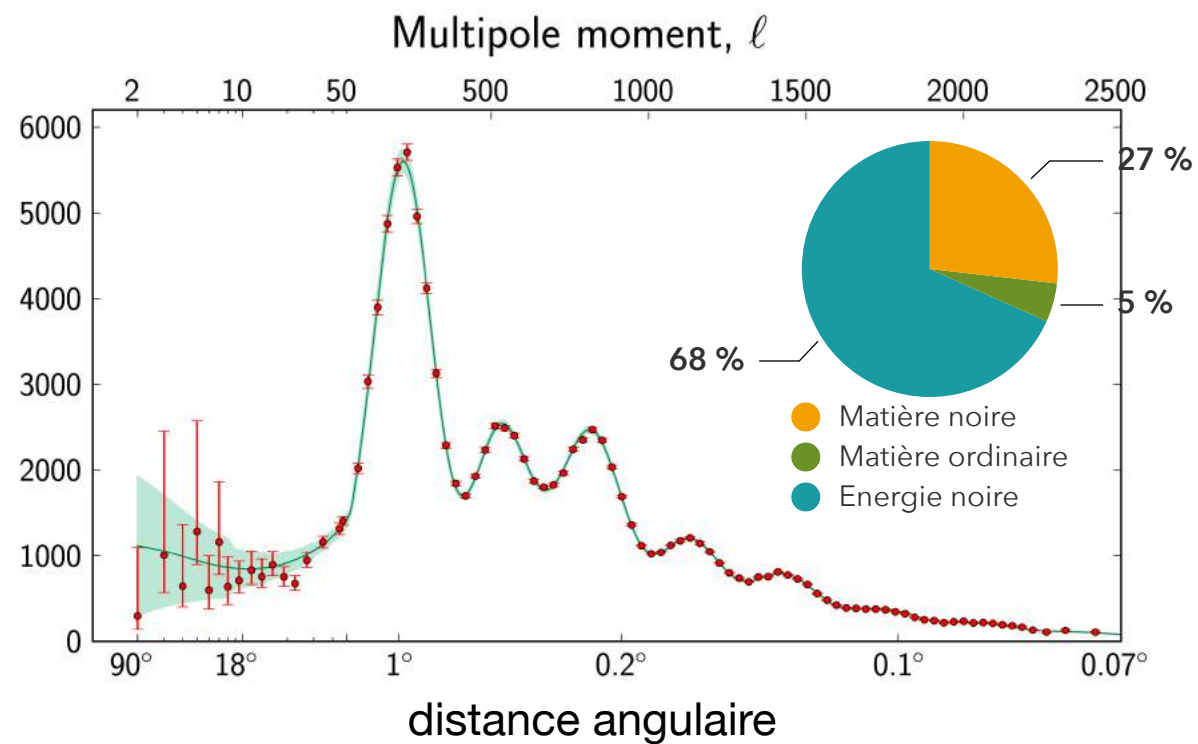


# Première lumière visible de notre Univers

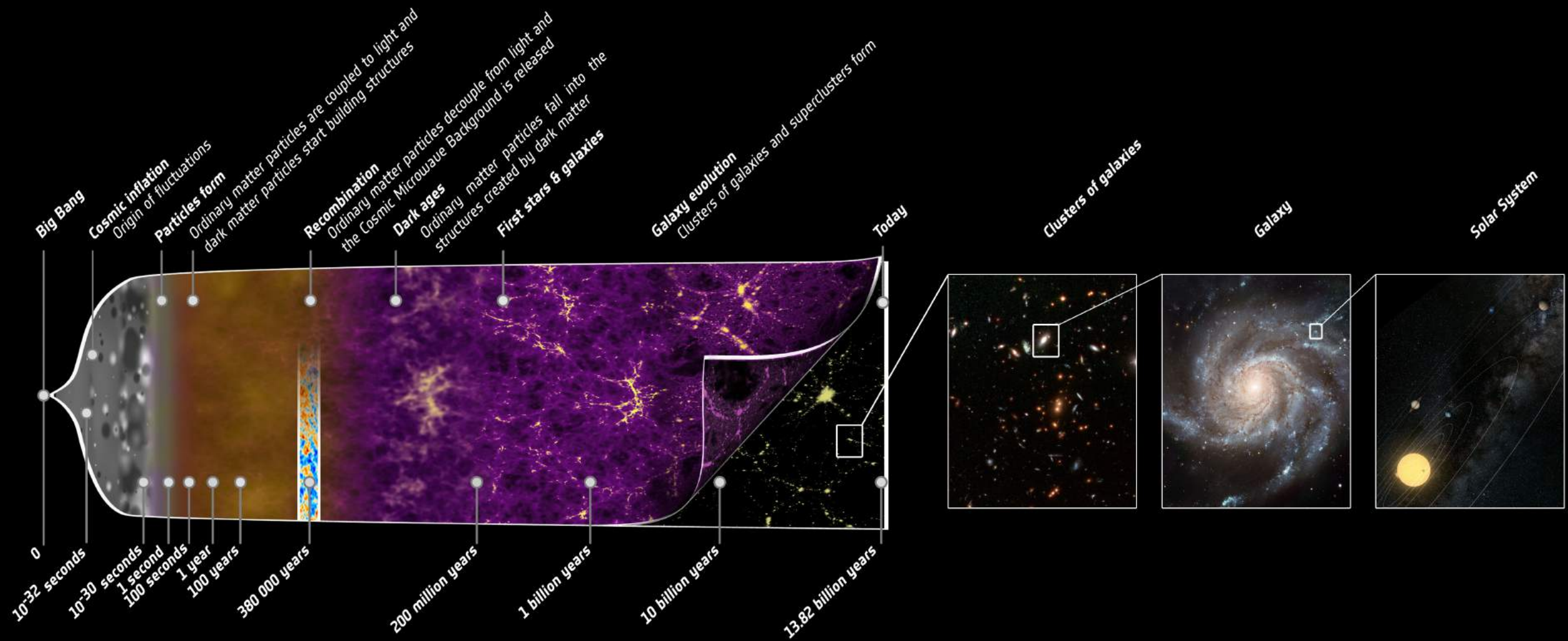
A ses débuts l'Univers est incroyablement homogène  
Variation de température de l'ordre de 0.001 %



fluctuations de température  
en micro degré





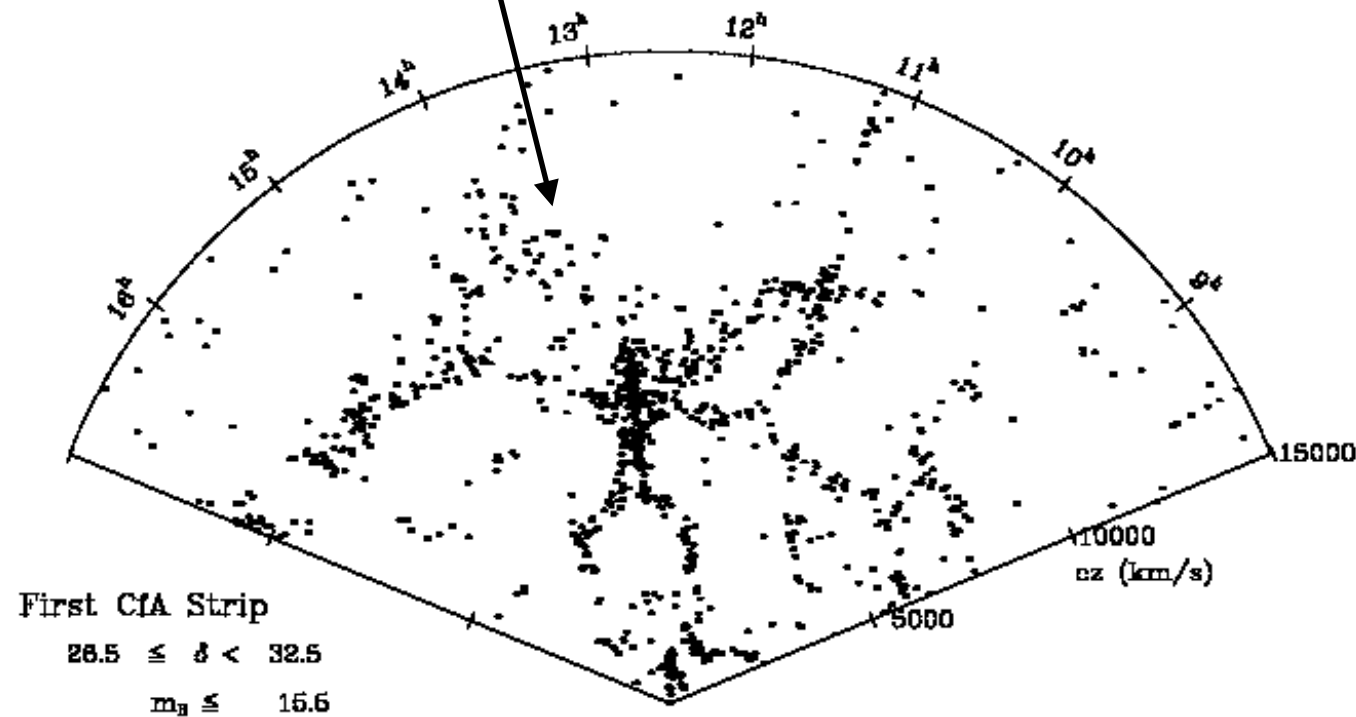




# La distribution des galaxies aux grandes échelles n'est pas uniforme

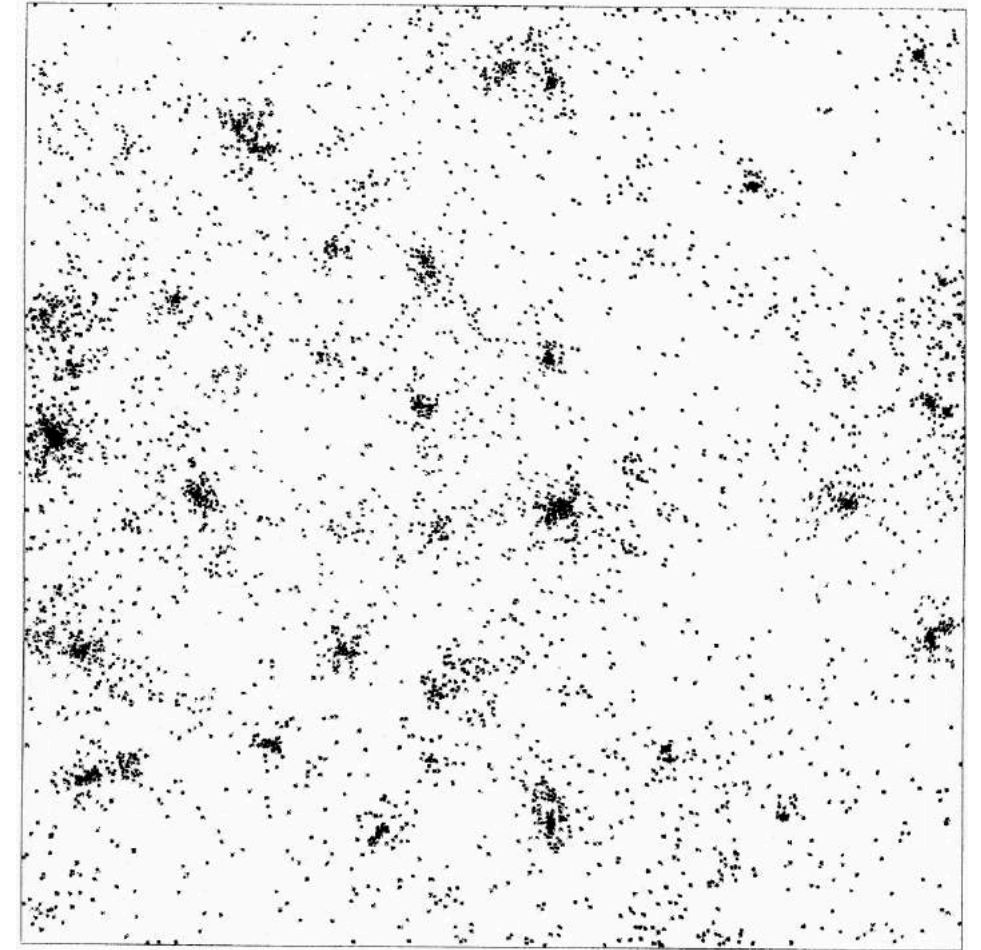


Chaque point est une galaxie !



*De Lapparent+ 86*

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



*Klypin & Shandarin 83*

Simulation avec 4 000 particules

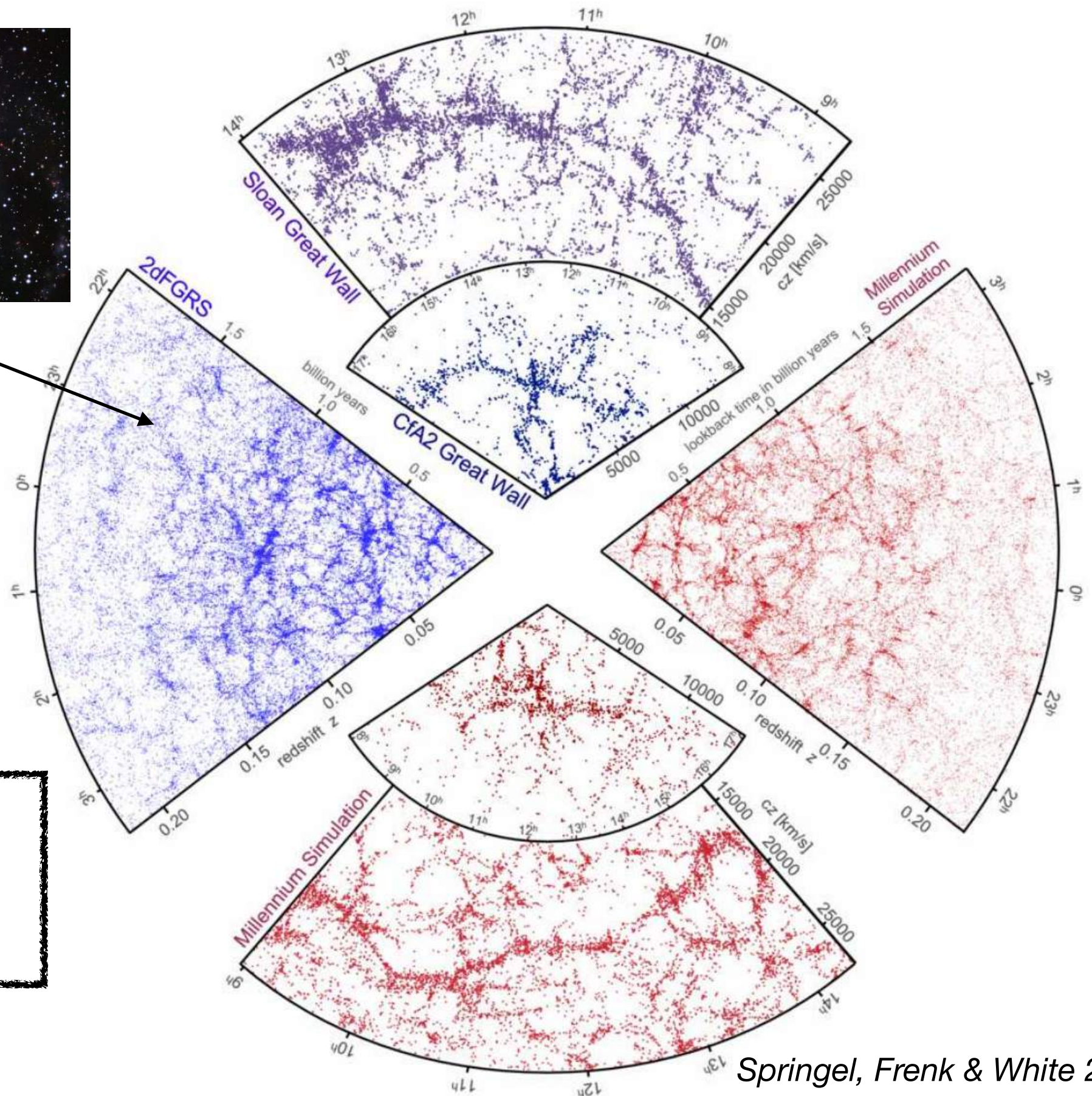
Maintenant les simulations ont jusqu'à  
1 000 000 000 000 ( $10^{12}$ ) de particules



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



Chaque point est  
une galaxie !



L'Univers présente une  
structure filamentaire

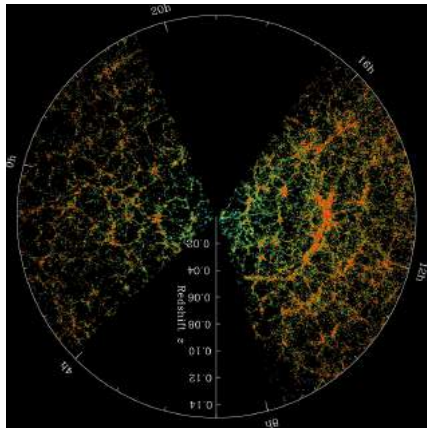
**TOILE COSMIQUE**

*Springel, Frenk & White 2006*



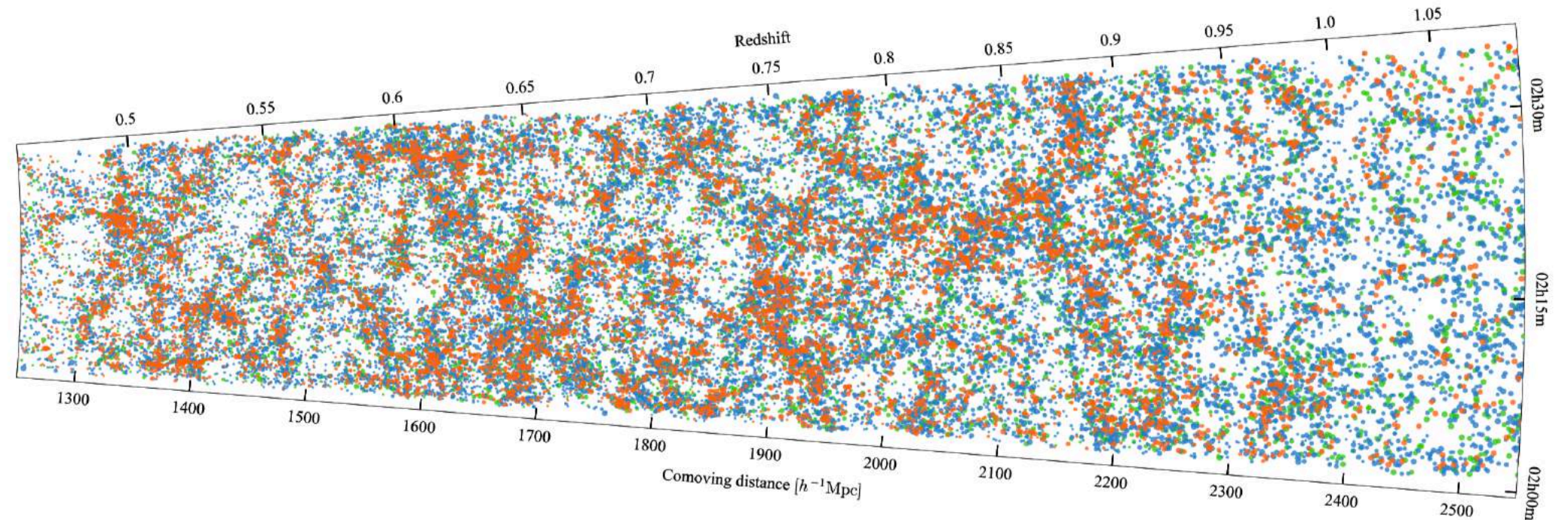
# La distribution des galaxies aux grandes échelles n'est pas uniforme

Univers proche



SDSS

Univers lointain



*Scodeggio+ 2016*

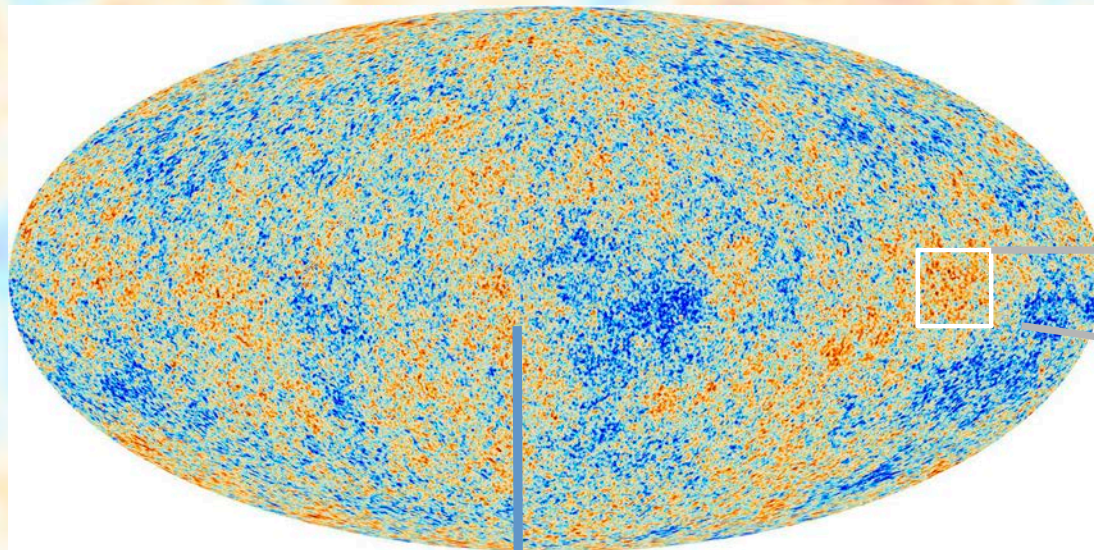
Relevé VIPERS autour de la moitié de l'âge de l'Univers

L'Univers présente une  
structure filamentaire

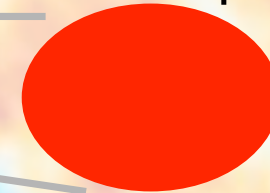
**TOILE COSMIQUE**



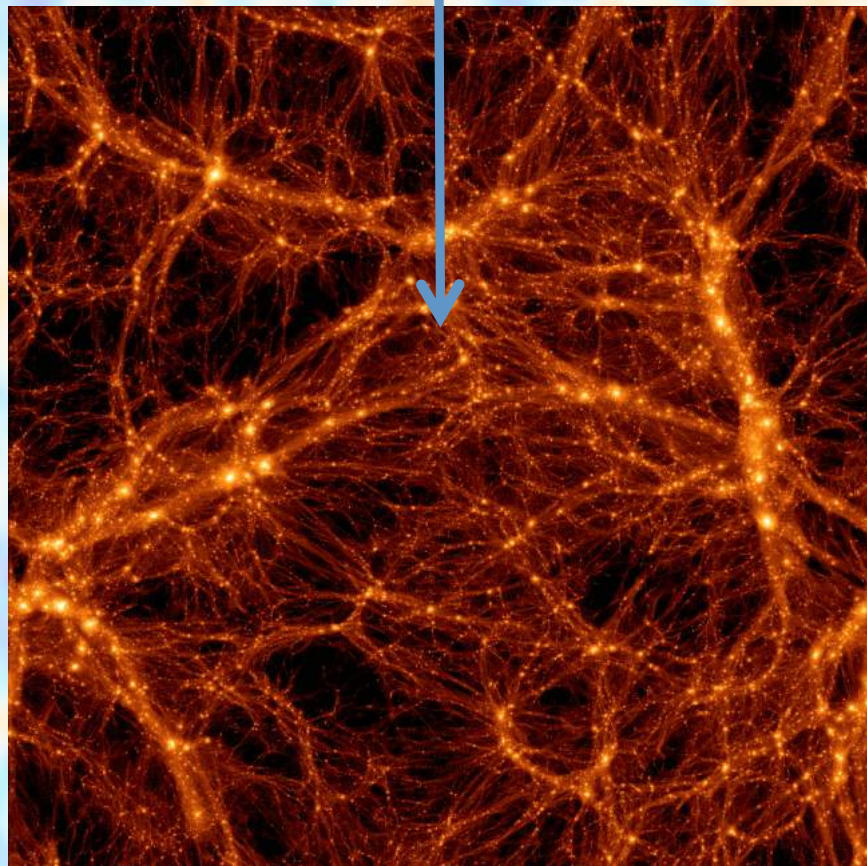
# Un effondrement en trois temps (tri-dimensionnel)



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 :

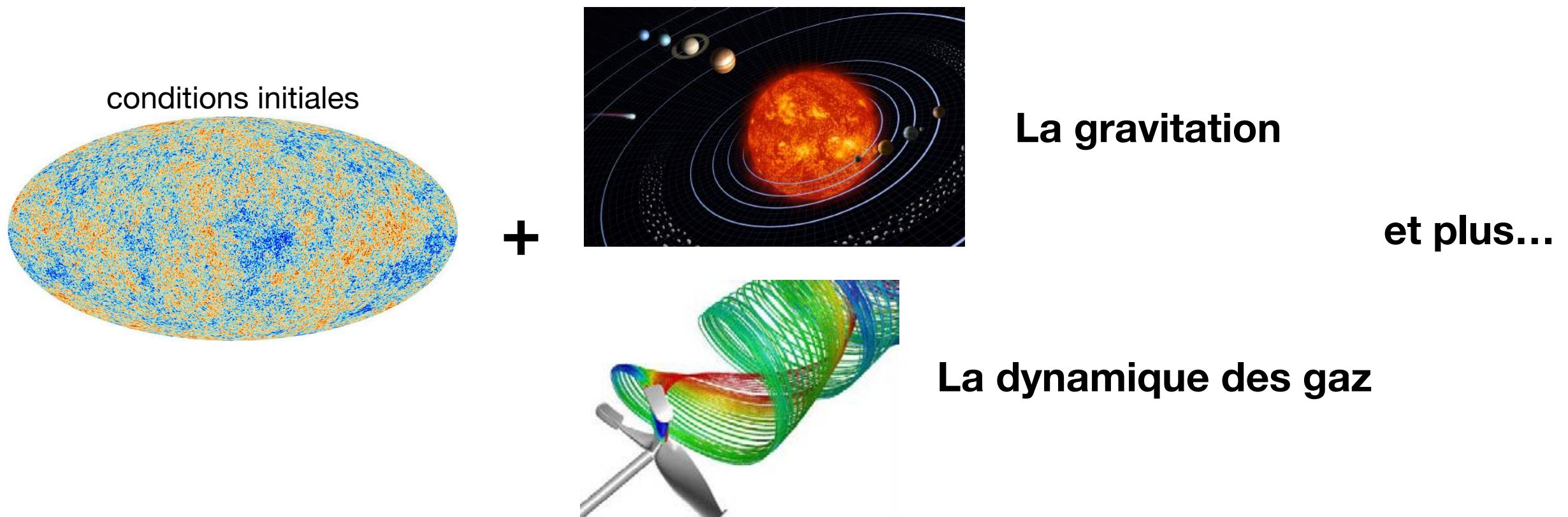
- difficile de rendre compte de toute la complexité de l'Univers avec uniquement des calculs analytiques
- multi-échelle : résoudre les sites de formation des étoiles ( $10^{16}$  m) et les grandes structures ( $10^{22}$  m).

*(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, les rayons cosmiques, etc.

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

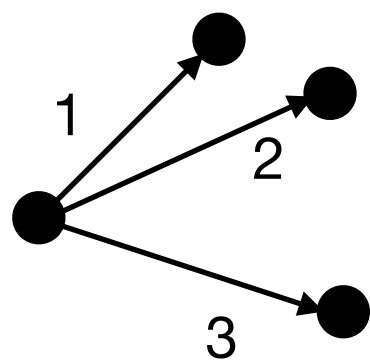
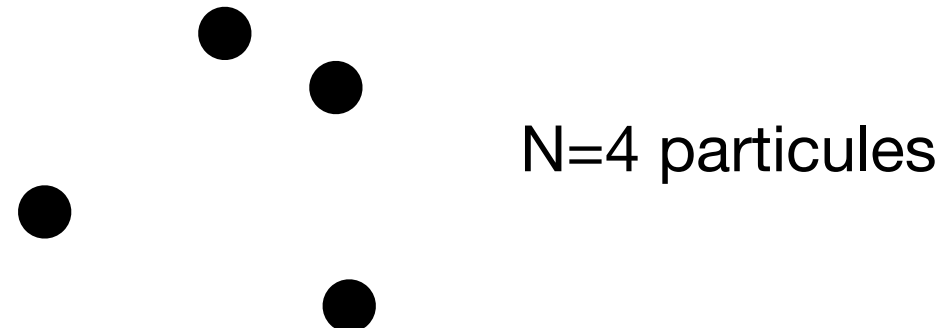
à partir des conditions initiales et des processus physiques pertinents





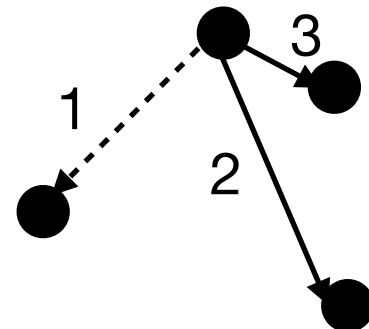
# Calculer l'interaction gravitationnelle est conceptuellement simple

- 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



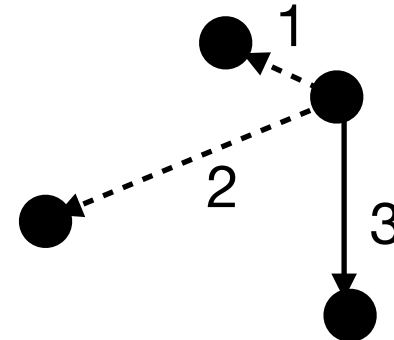
3 forces

+



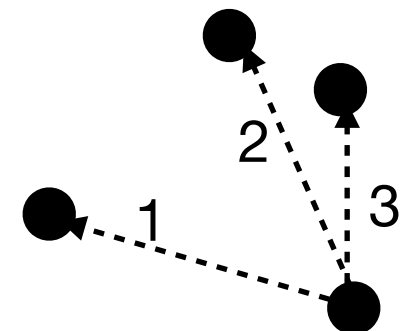
2 forces

+



1 force

+



0 force = 6 forces

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

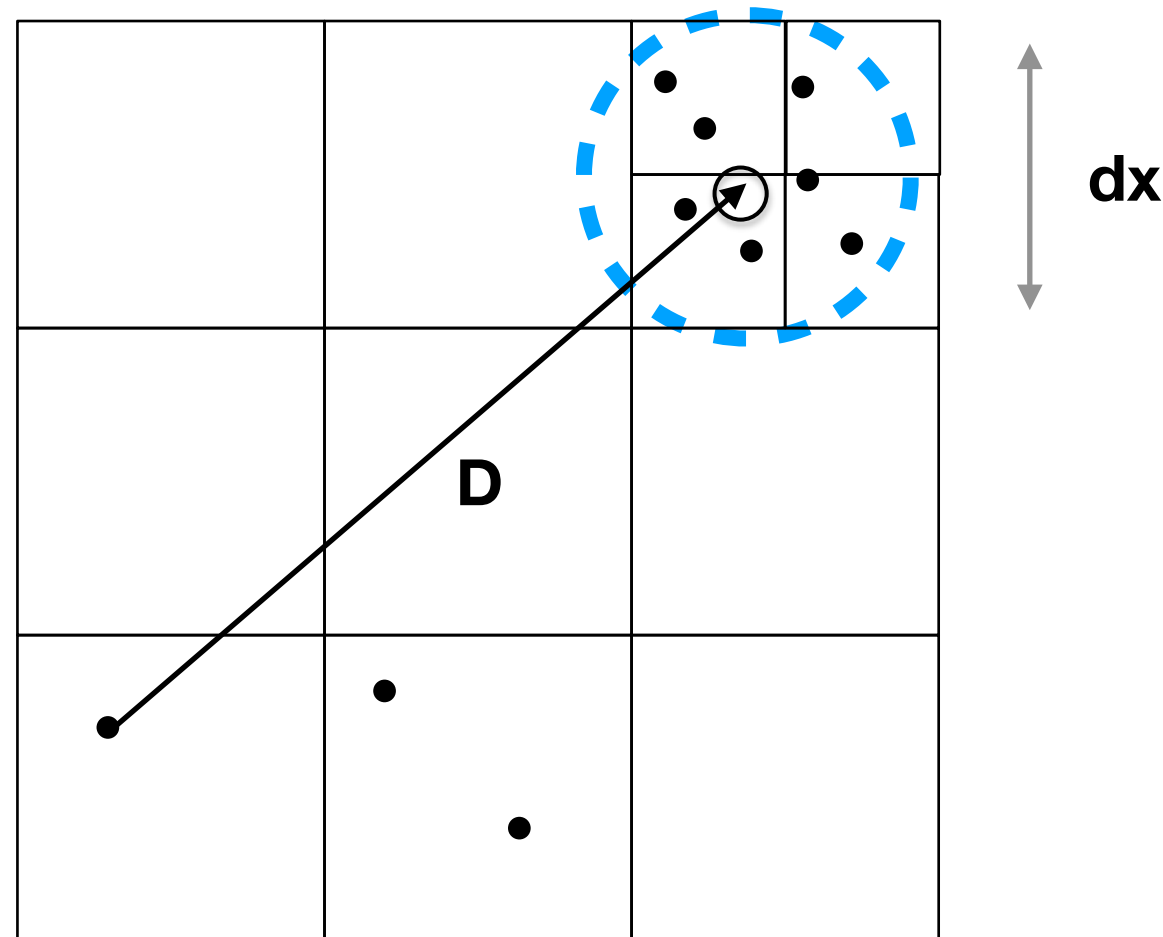
Si  $N=10^9$  (un milliard) alors  $N \times (N-1) / 2 \sim 5 \times 10^{17}$

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  $N \log(N) \sim 10^{10}$

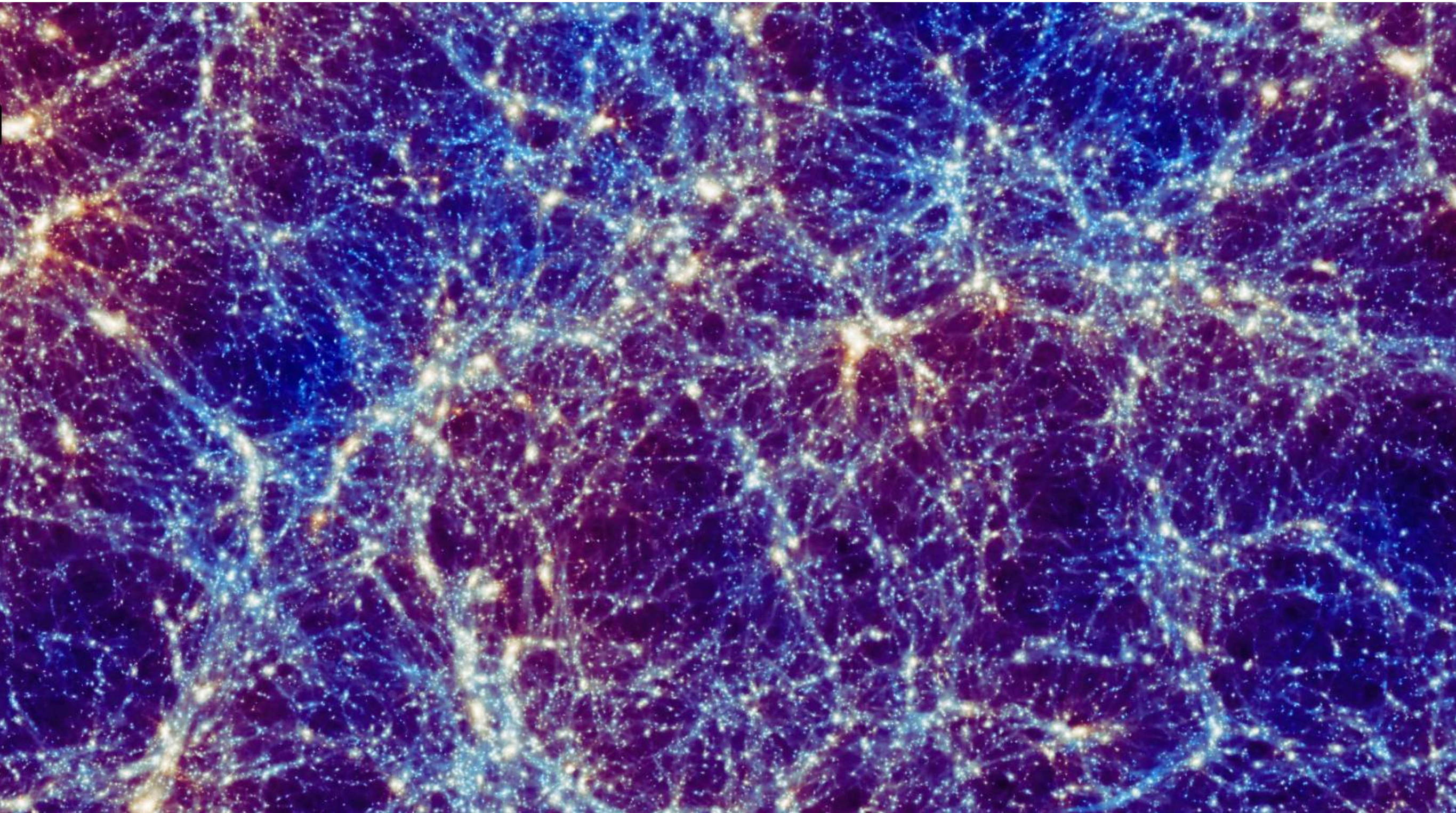
Avant: (Si  $N=10^9$  alors  $N(N-1)/2 \sim 5 \times 10^{17}$ )

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 »)

$$\underbrace{\nabla^2 \Phi}_{\text{potentiel}} = 4\pi G \underbrace{\rho}_{\text{masse volumique}} \longrightarrow \underbrace{\vec{a} = \vec{\nabla} \Phi}_{\text{accélération}}$$

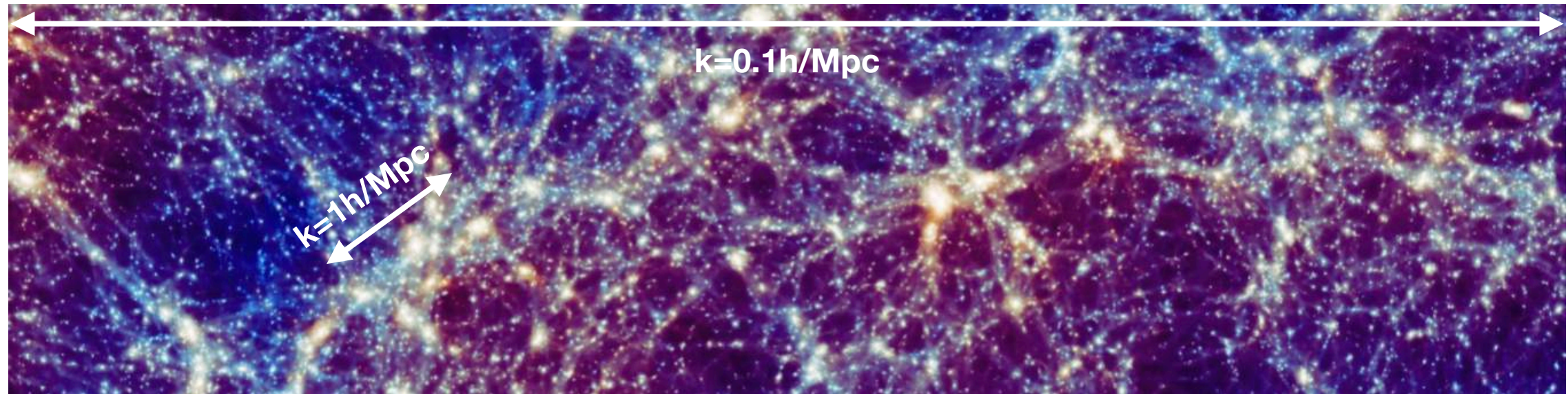


Ici  $N=10^{10}$  avec l'approche code en arbre

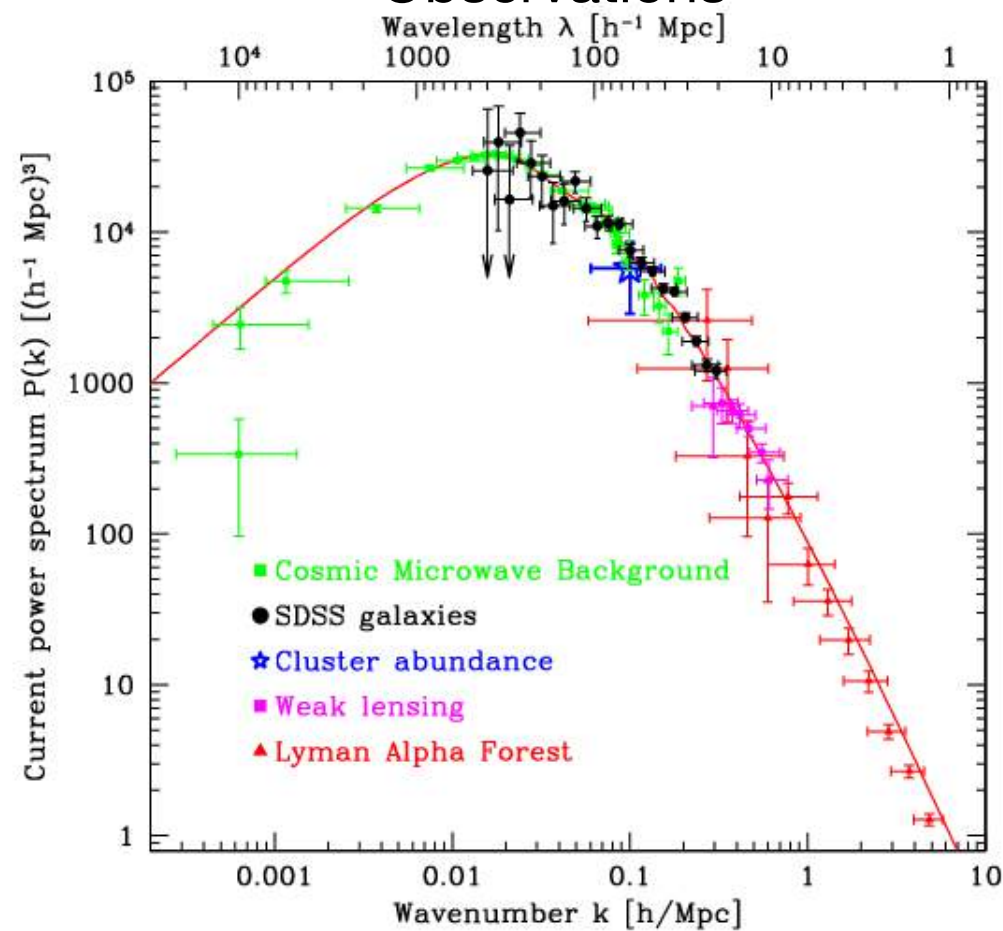




# Predictions pour le spectre de puissance de la matière

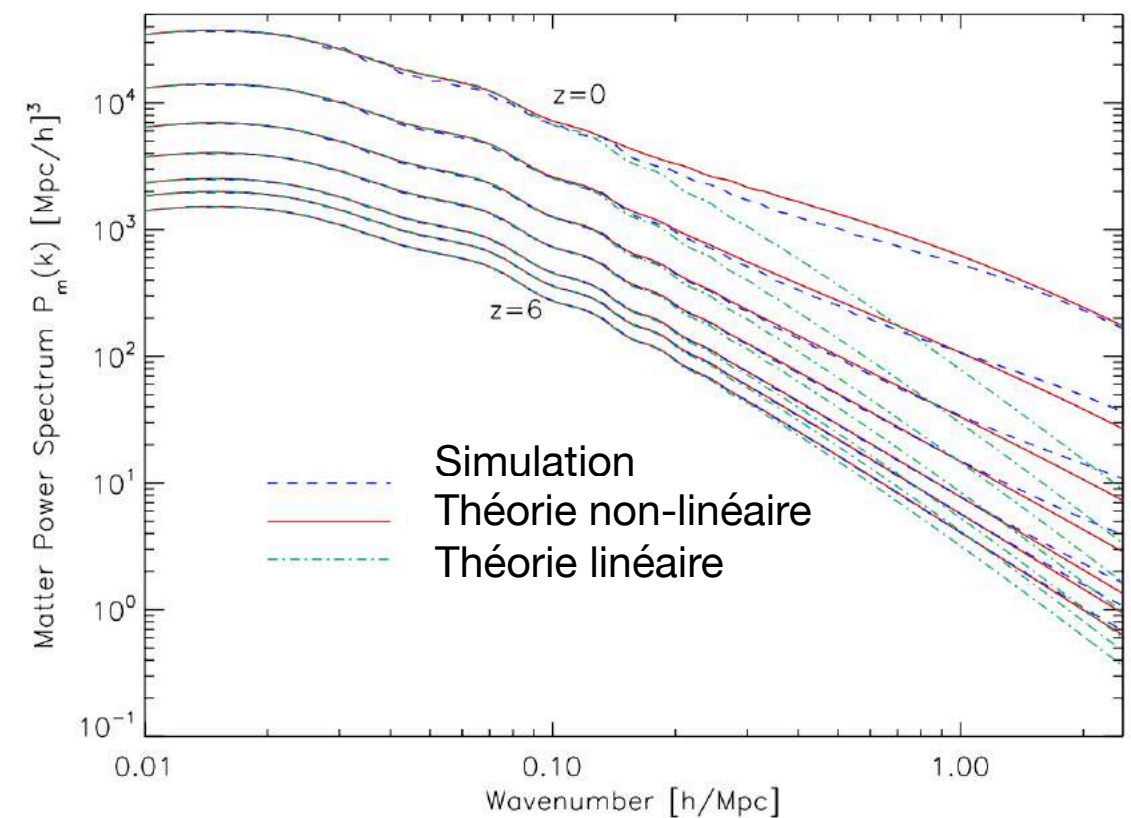


## Observations



Tegmark+ 2004

## Théorie

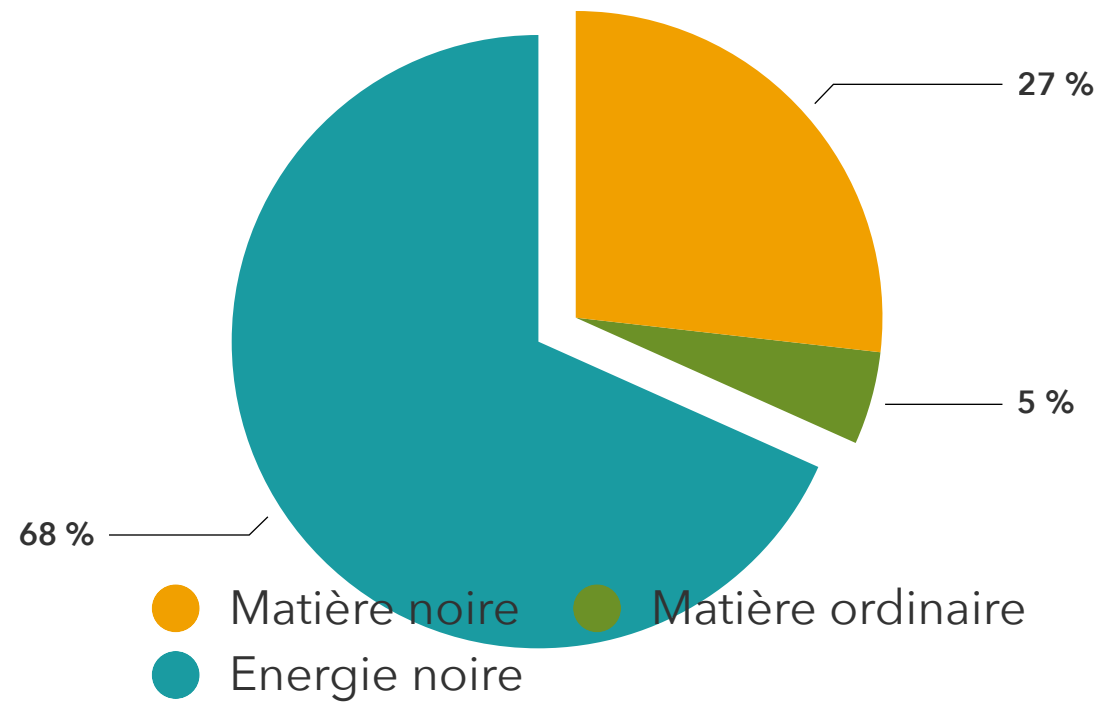


Jeong & Komatsu 2009

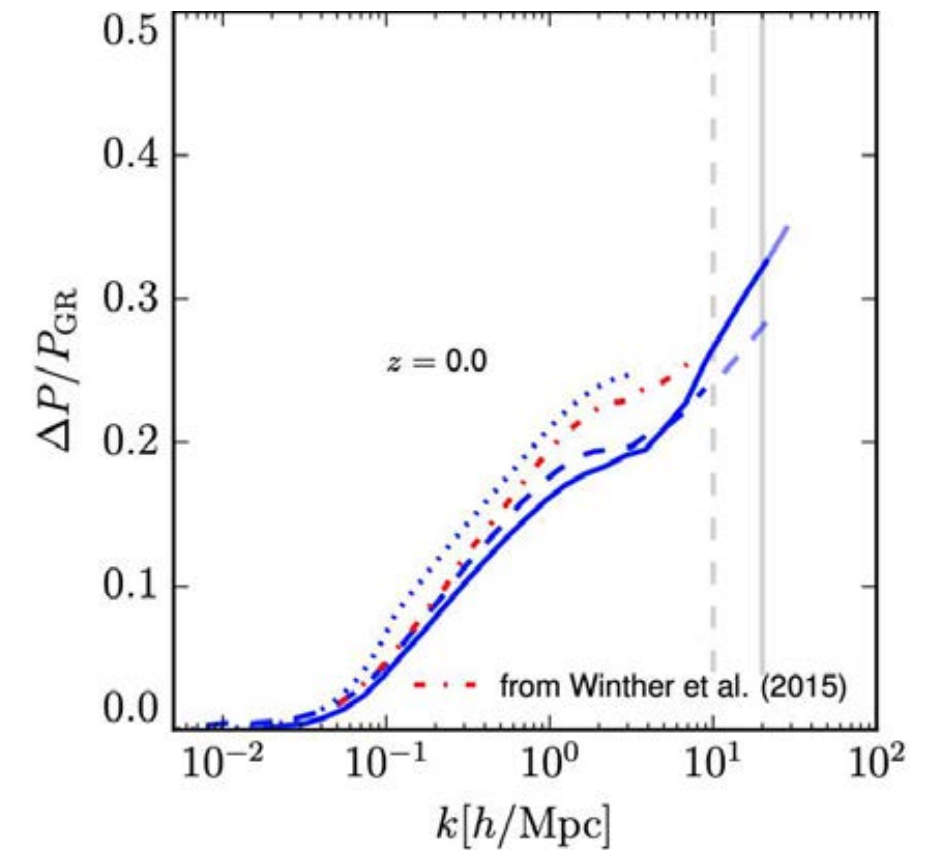
Pour une revue de la théorie perturbative voir *Bernardeau+ 2002*



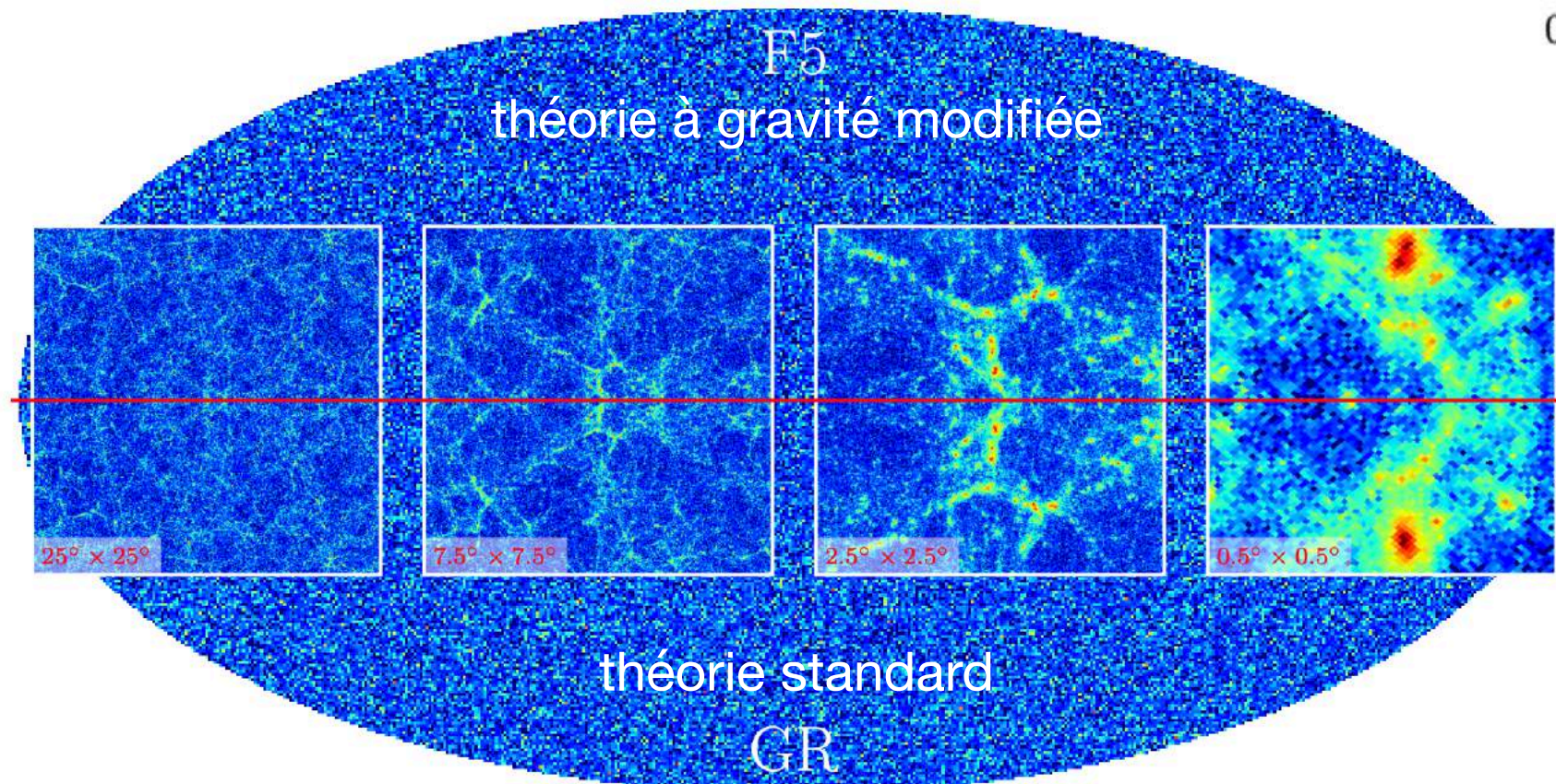
# Un outil pour sonder la nature de la gravitation et de l'énergie noire



Déviaton du spectre de puissance à la prédiction standard

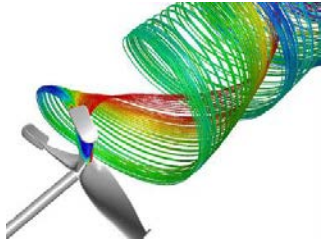


Arnold, Fosalba+ 2018

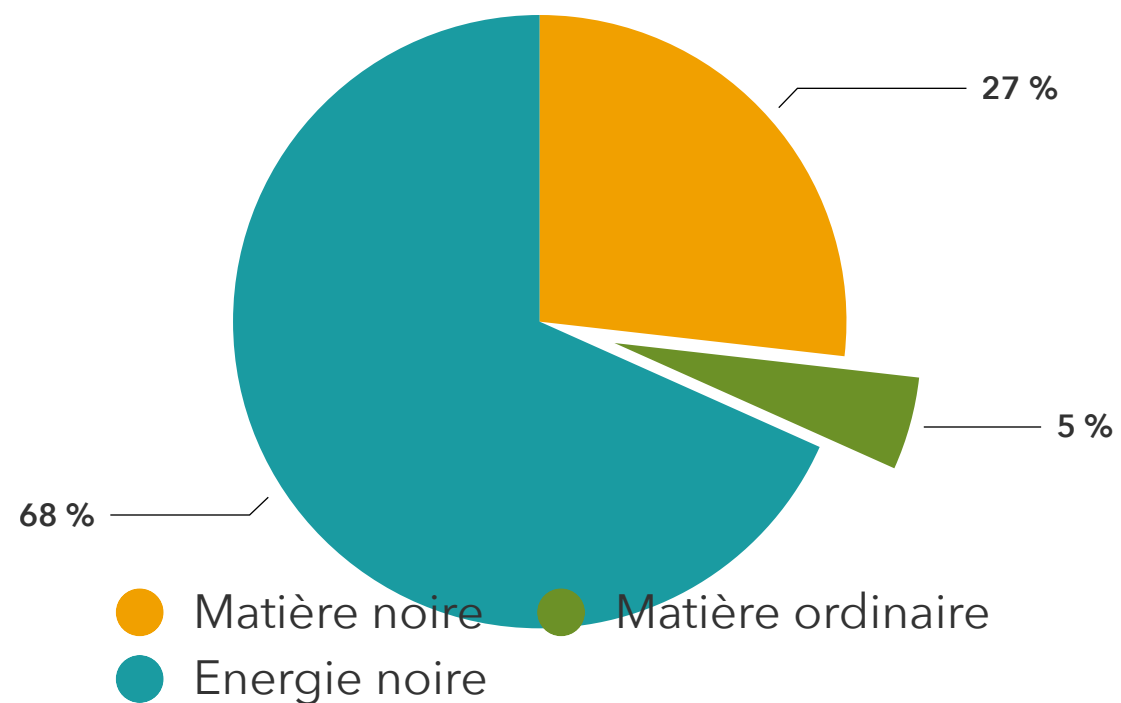


Voir aussi :  
Puchwein+ 2013  
Llinares+ 2014  
Winther+ 2015

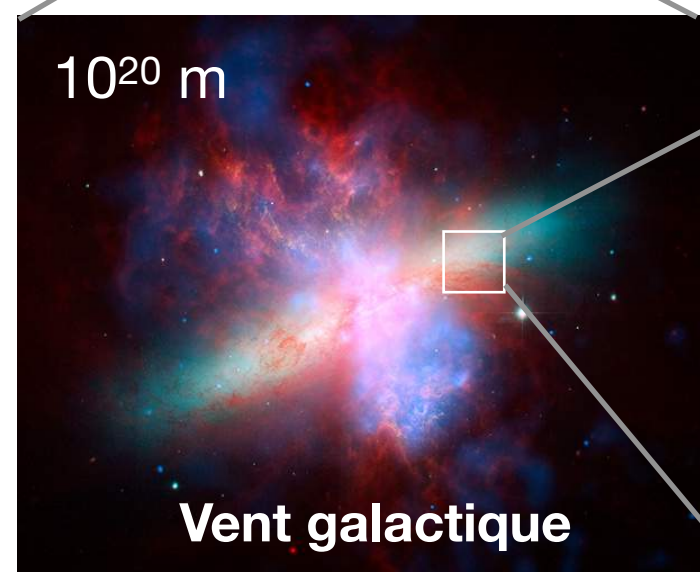
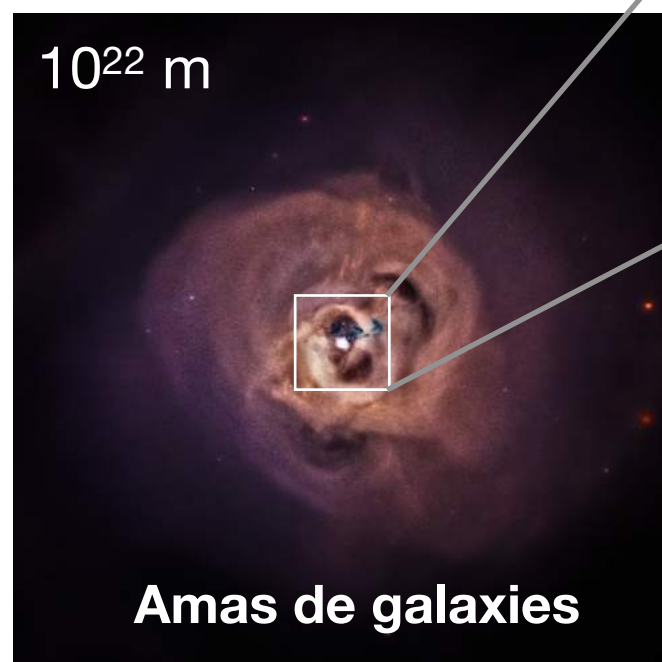
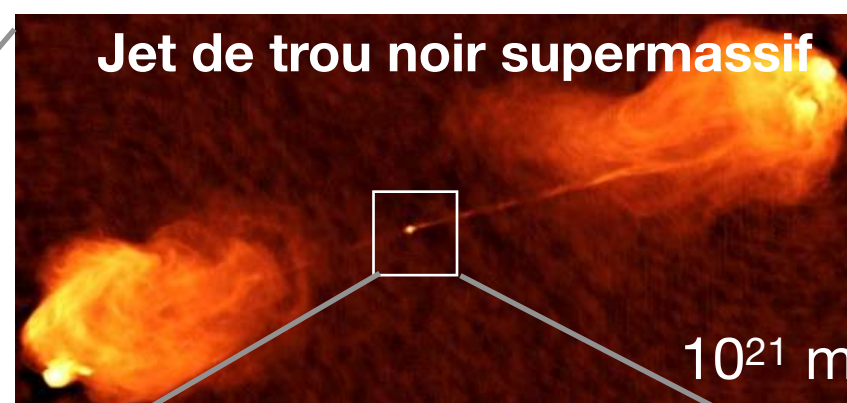
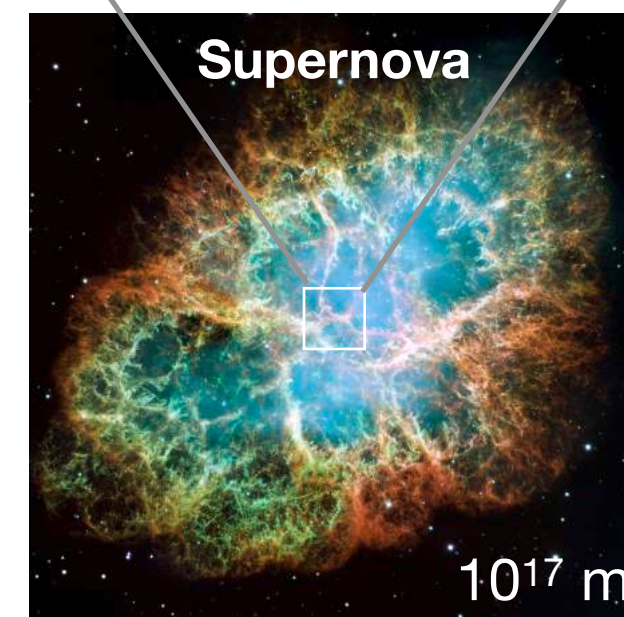
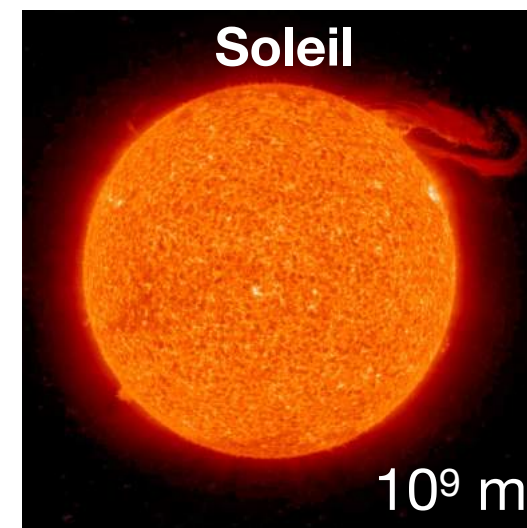




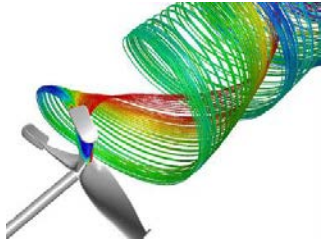
## La matière visible (« ordinaire »)



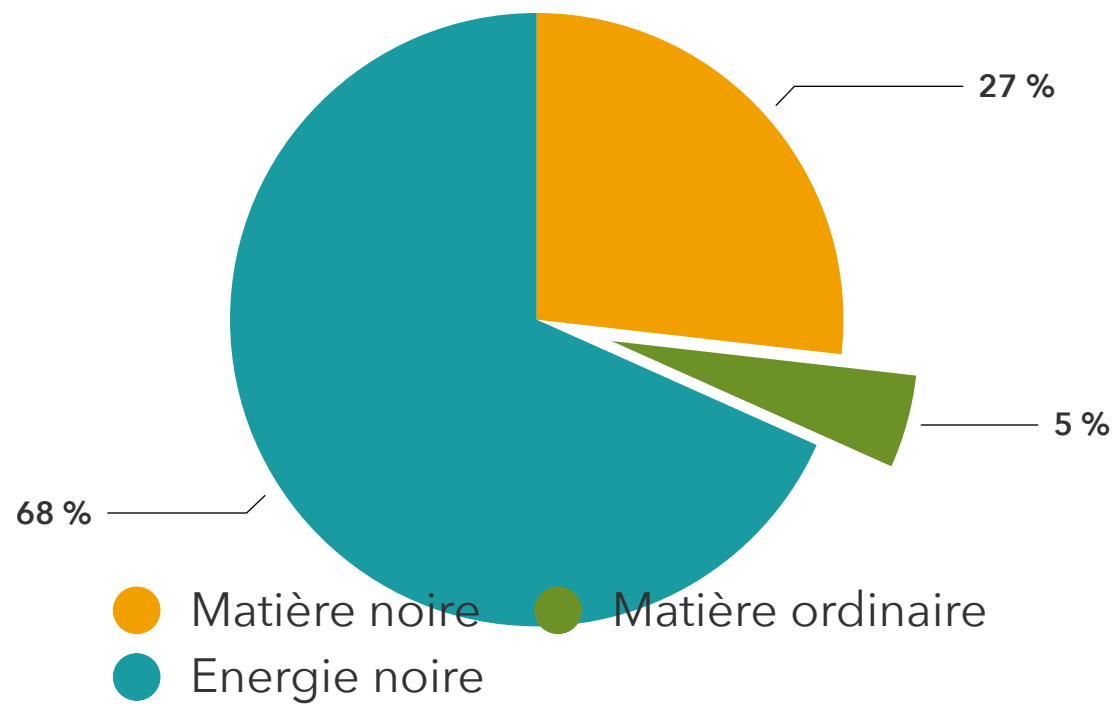
tout ce qui n'est pas la  
matière noire :  
essentiellement du gaz







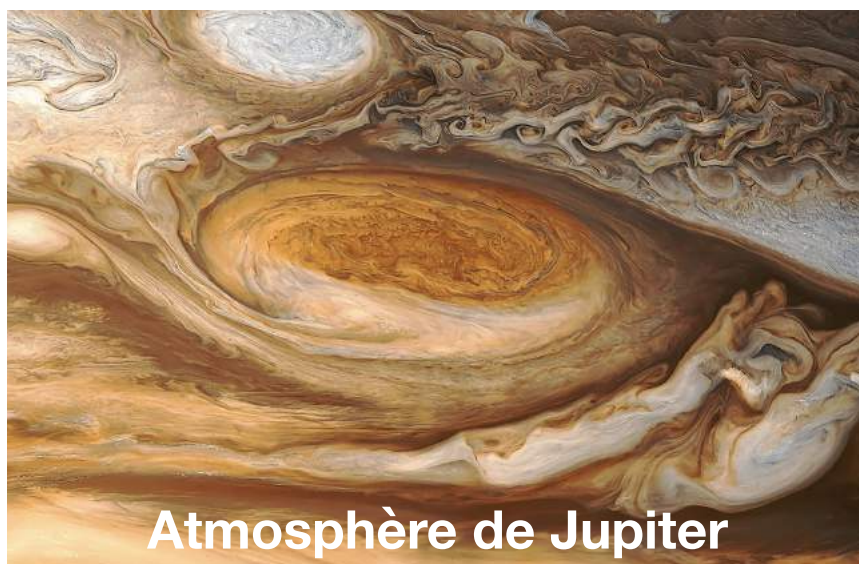
## La matière visible (« ordinaire »)



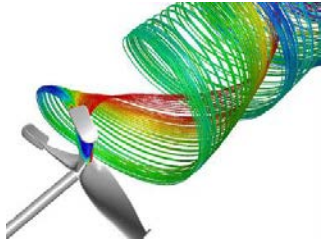
tout ce qui n'est pas la  
matière noire :  
essentiellement du gaz

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

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







# 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

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

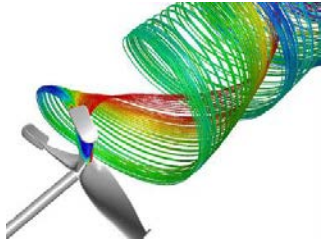
Equation d'état d'un gaz parfait

$\frac{\partial}{\partial t}$  : 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

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

$F$  : flux de (masse, impulsion, énergie)

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

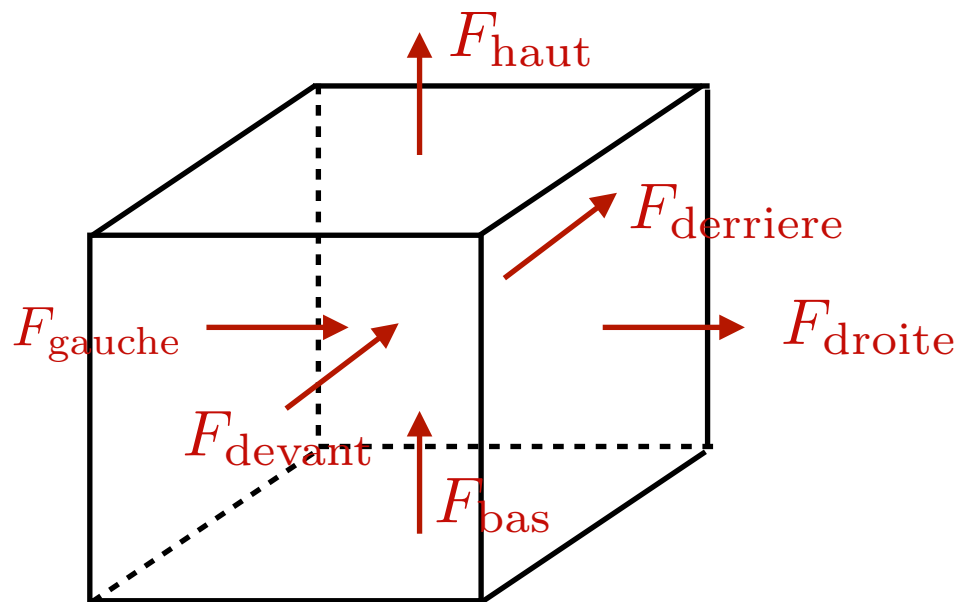
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \frac{\partial}{\partial \vec{x}} \cdot (\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) + \frac{\partial p}{\partial \vec{x}} = 0$$

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



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

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



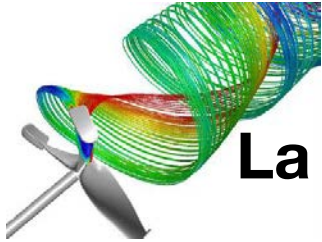
**La variation temporelle de  $U$  correspond à la différence des flux entrants et sortants**

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

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

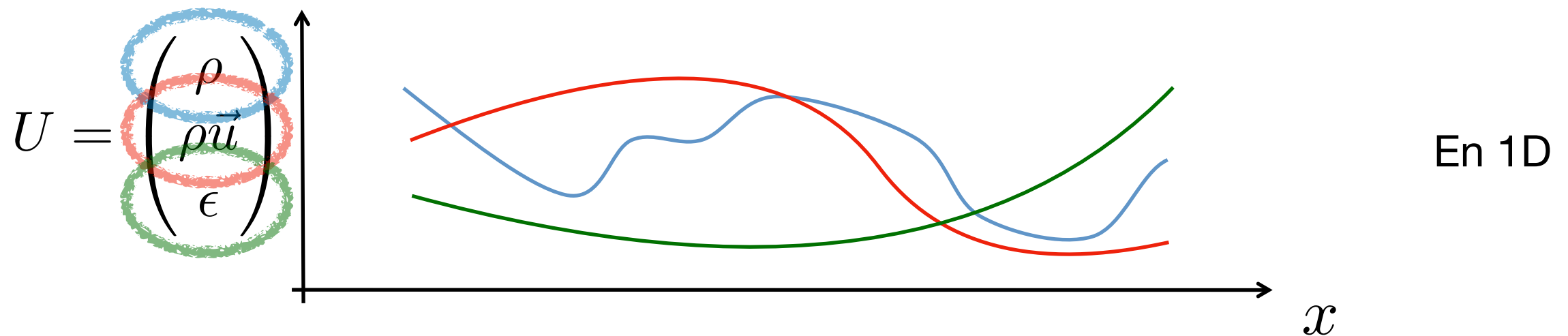
**L'évolution temporelle des propriétés d'un gaz est régie par ses fluctuations spatiales**



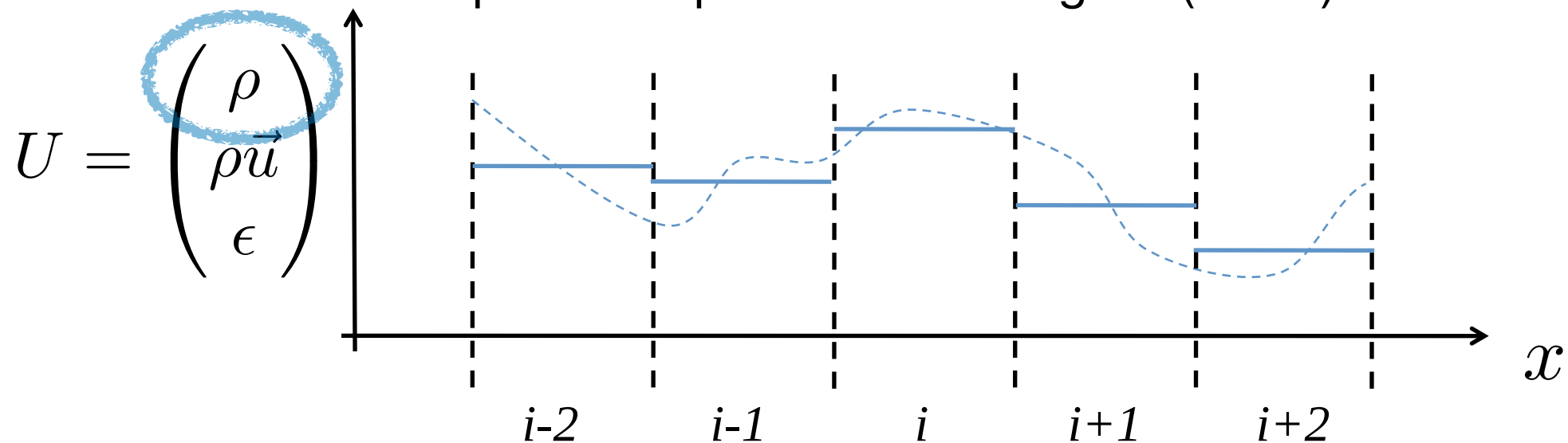


# La philosophie derrière la résolution numérique de la dynamique des gaz

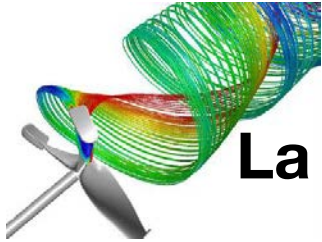
La masse volumique, la vitesse ou la pression sont décrites par des courbes



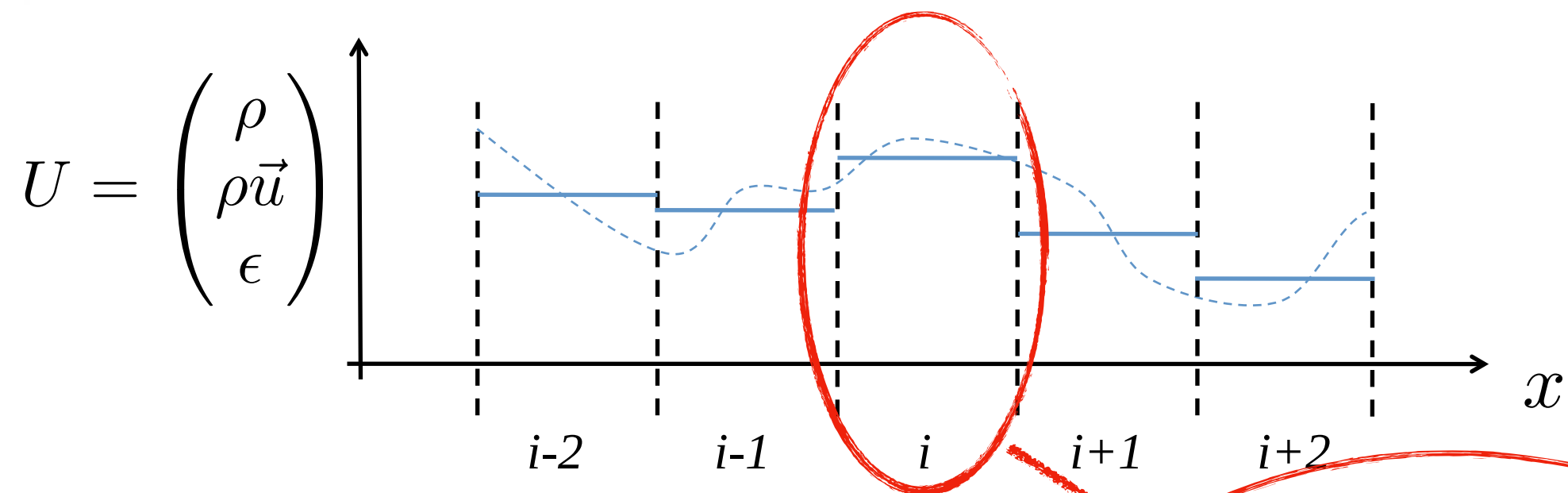
On échantillonne ces valeurs par une représentation constante par morceaux pour chaque cellule de la grille (ici 1D)







# La philosophie derrière la résolution numérique de la dynamique des gaz



Equations de Navier-Stokes :

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

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

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

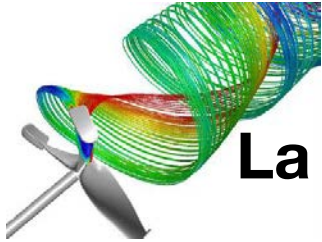
$F_{\text{gauche}}(U)$

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

$U_i$

$\Delta x$





# La philosophie derrière la résolution numérique de la dynamique des gaz

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

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

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

$U_i$

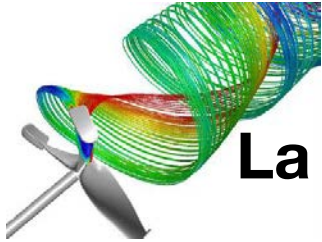
$\Delta x$

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

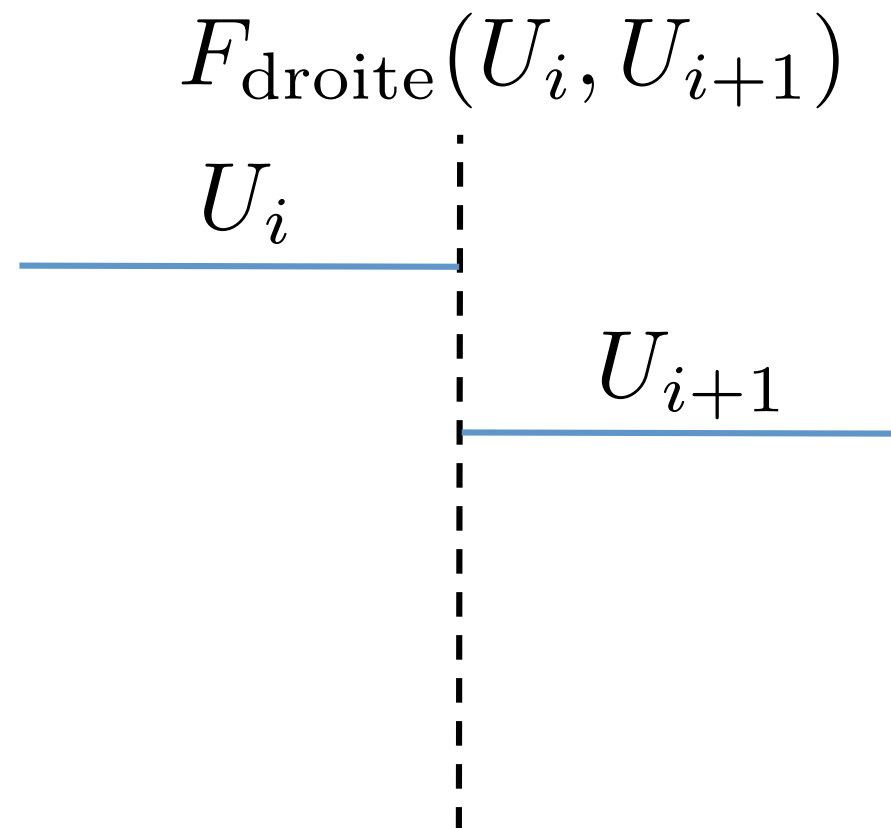
$U_i$

$U_{i+1}$





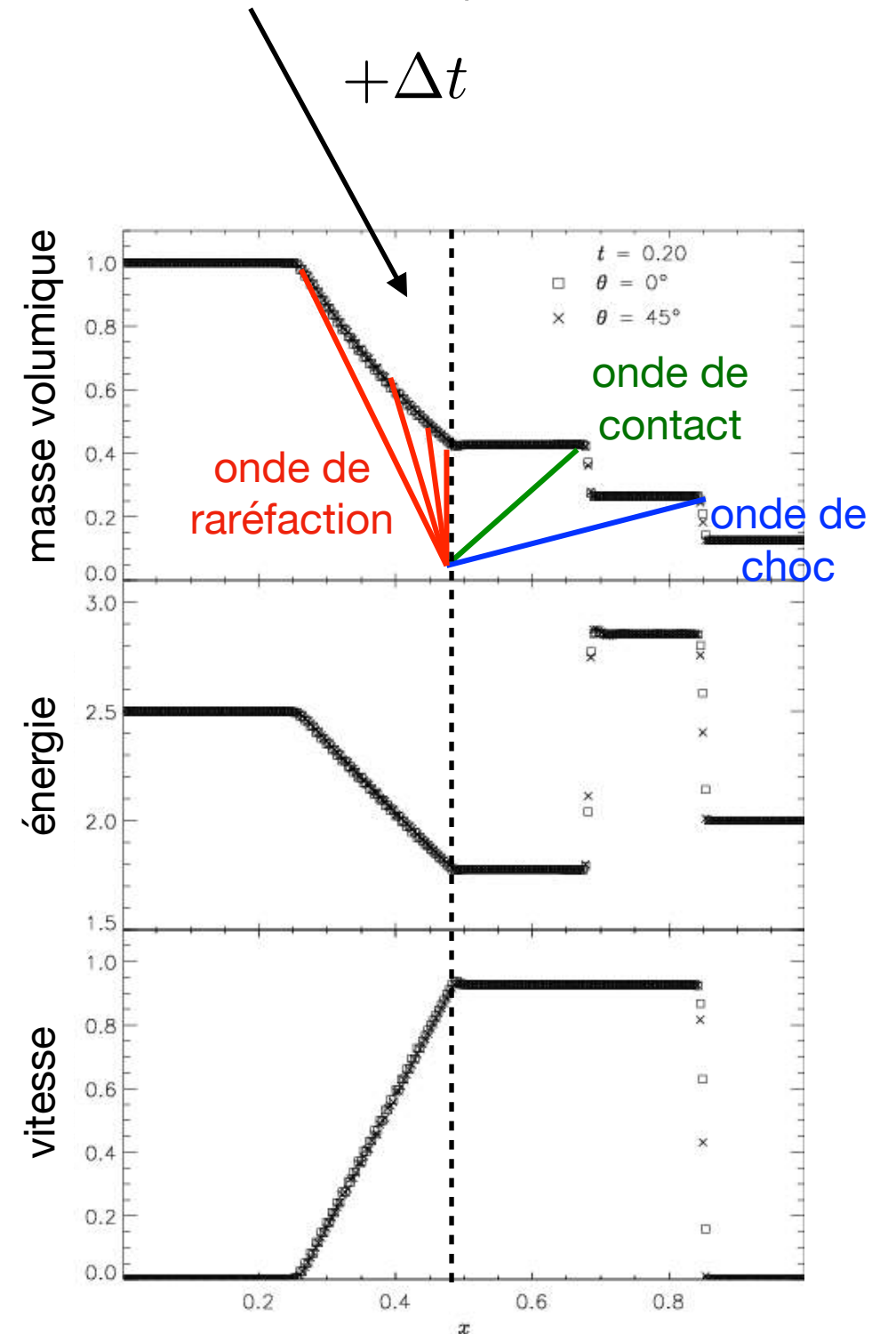
# La philosophie derrière la résolution numérique de la dynamique des gaz



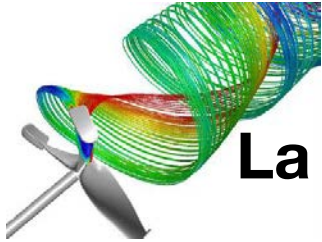
La solution de ce problème avec un état  $U$  à gauche et un état  $U$  à droite de l'interface est connue (solution du problème de Riemann)

On peut obtenir le flux qui servira à obtenir la variation  $\Delta U$

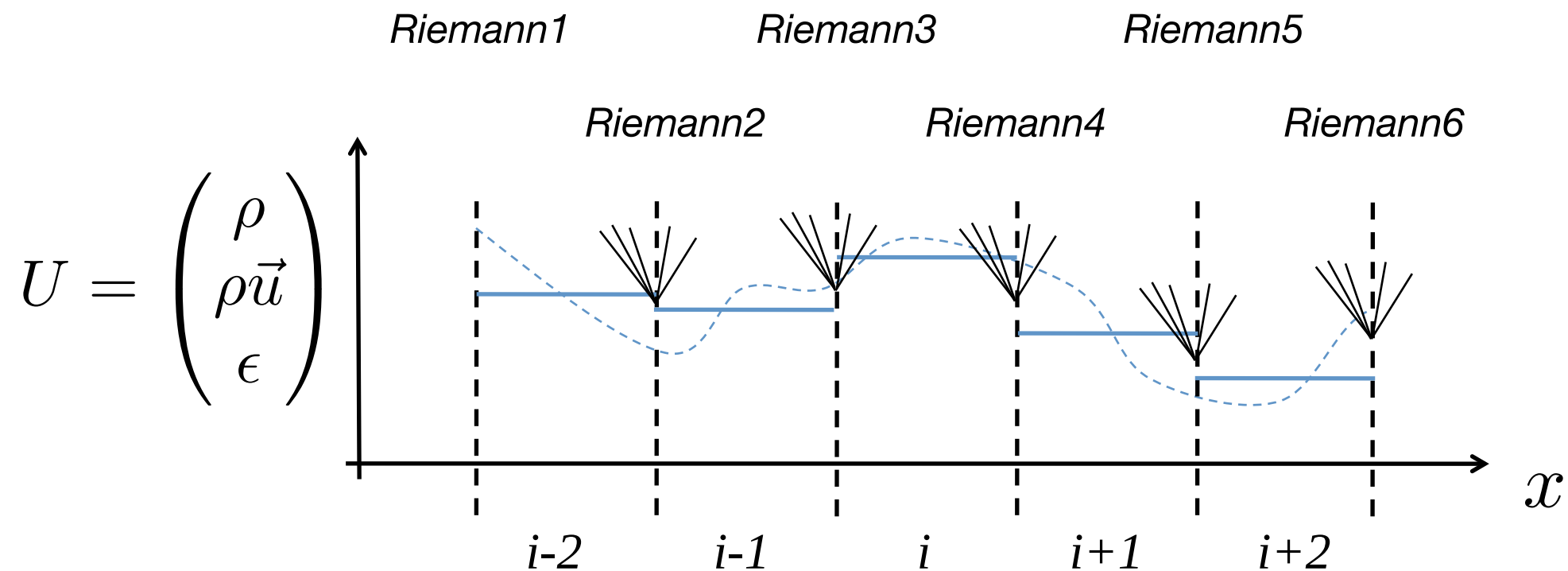
$$\Delta U = \frac{\Delta t}{\Delta x} [F_{\text{gauche}}(U) - F_{\text{droite}}(U)]$$







# La philosophie derrière la résolution numérique de la dynamique des gaz

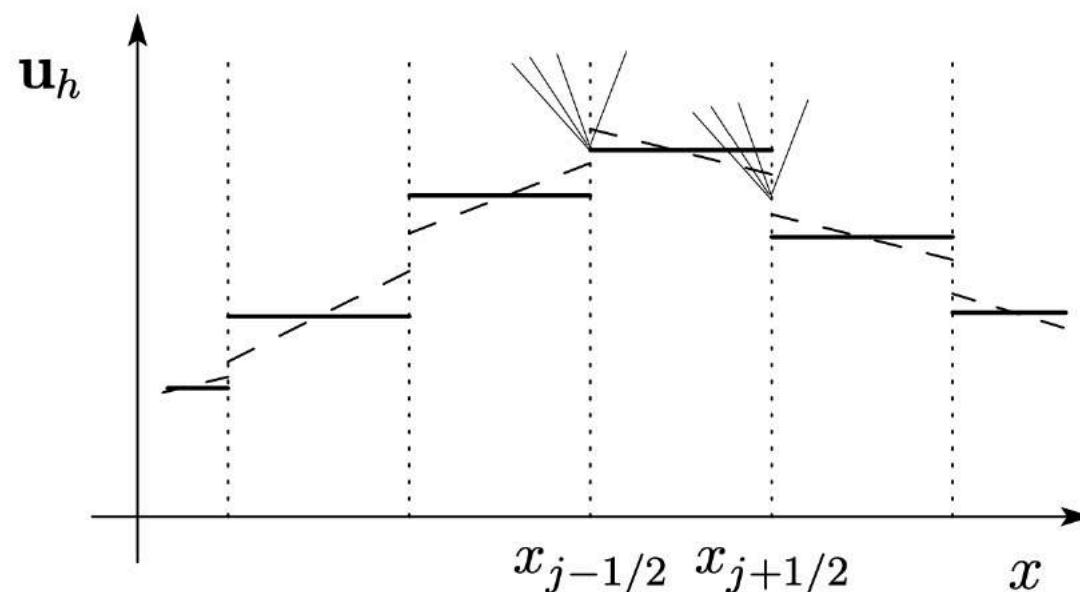


La dynamique des fluides revient à résoudre  $N+1$  problèmes de Riemann pour  $N$  cellules

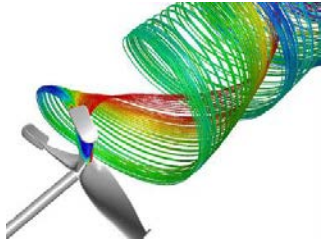
Reconstruction linéaire des variables :

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

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

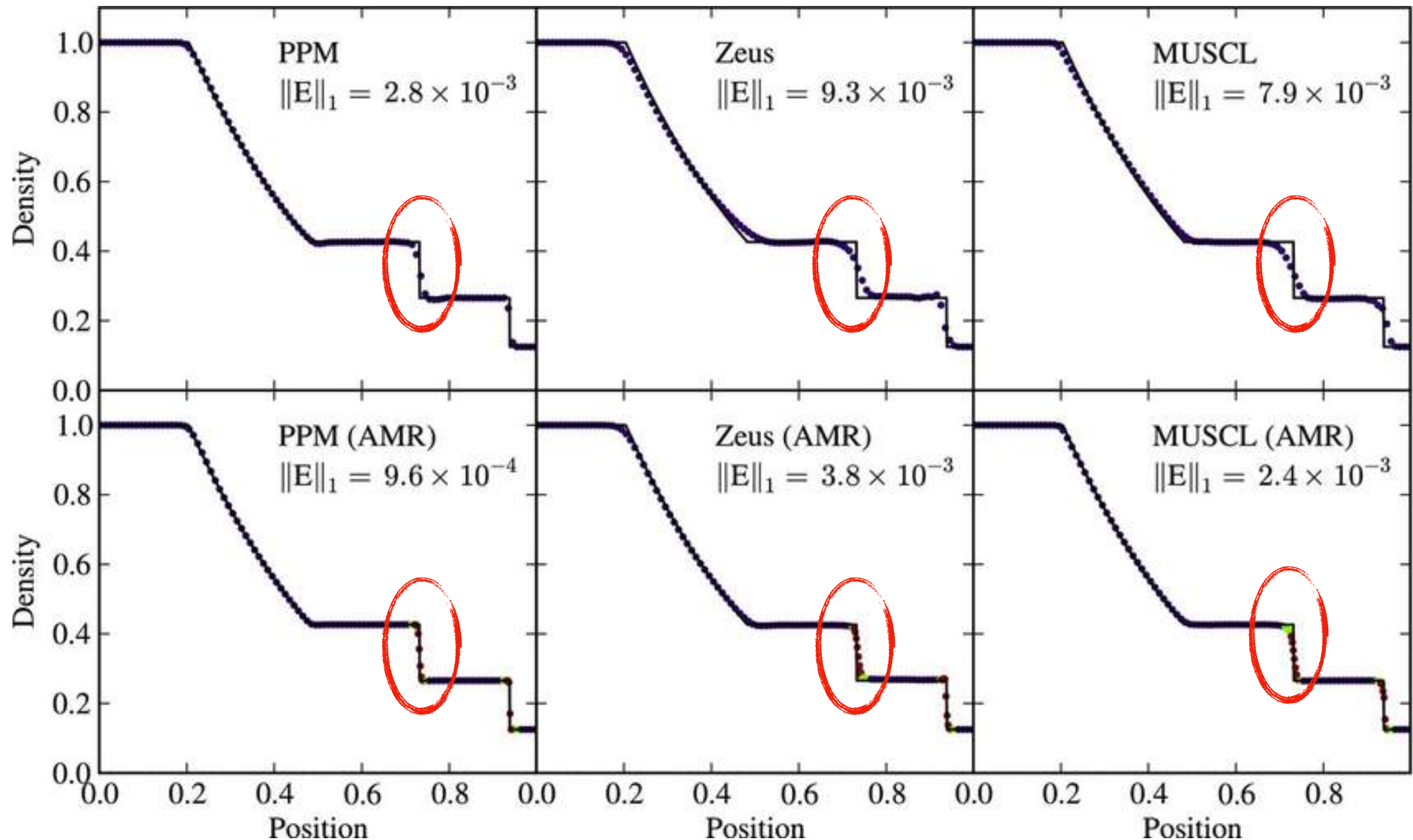






# Résolution numérique de la dynamique des gaz est un champ de recherche en soi

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



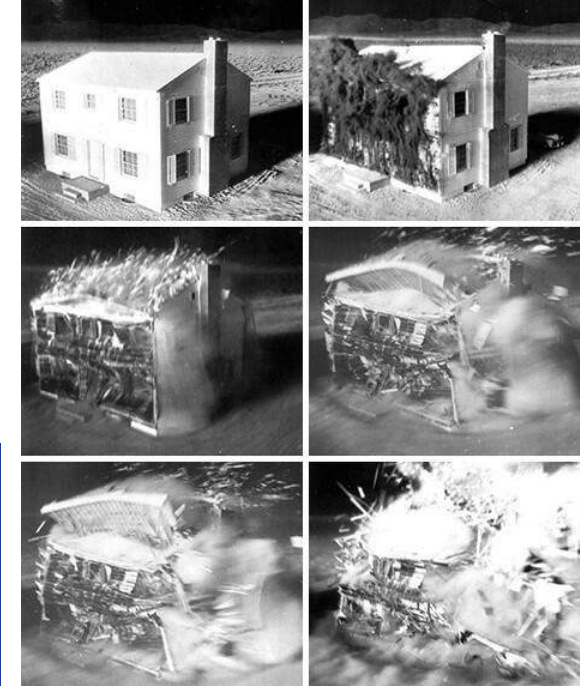
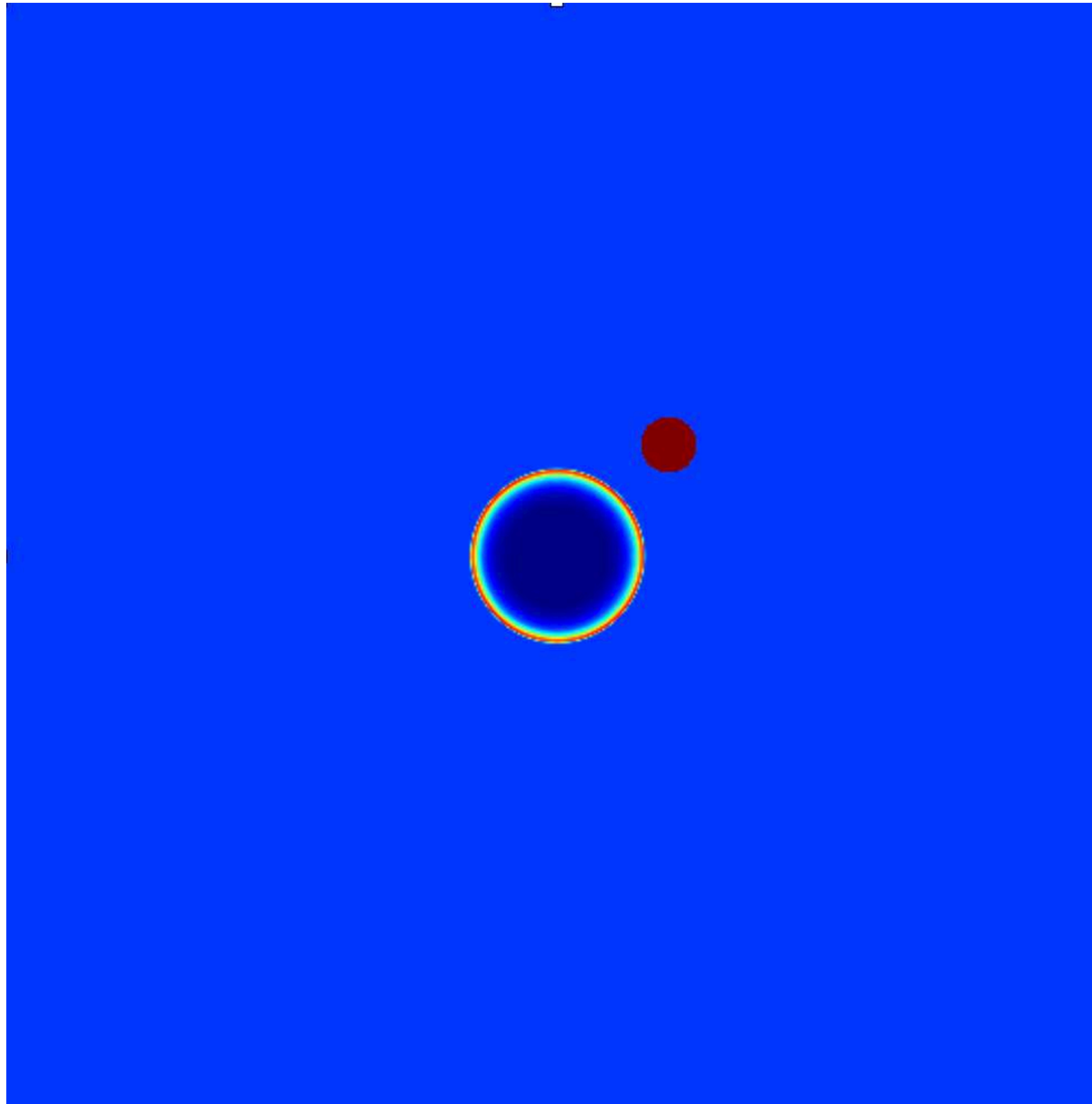


Bombe H « Castle Romeo »  
1954



## Cas de l'explosion de supernova

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



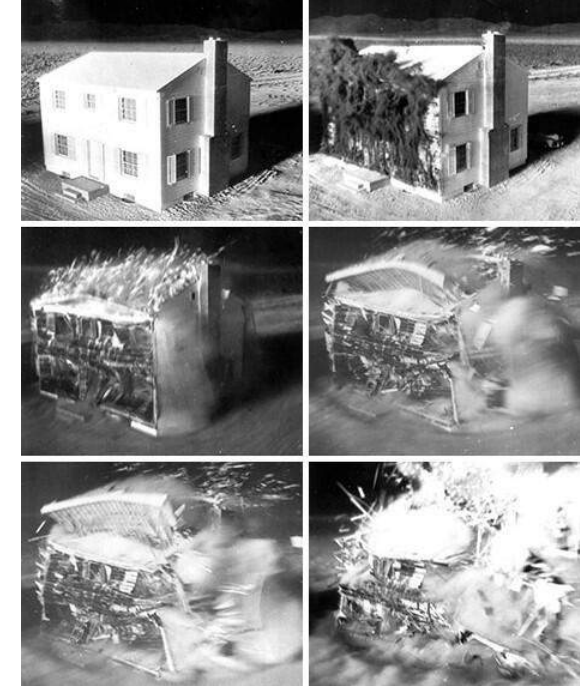
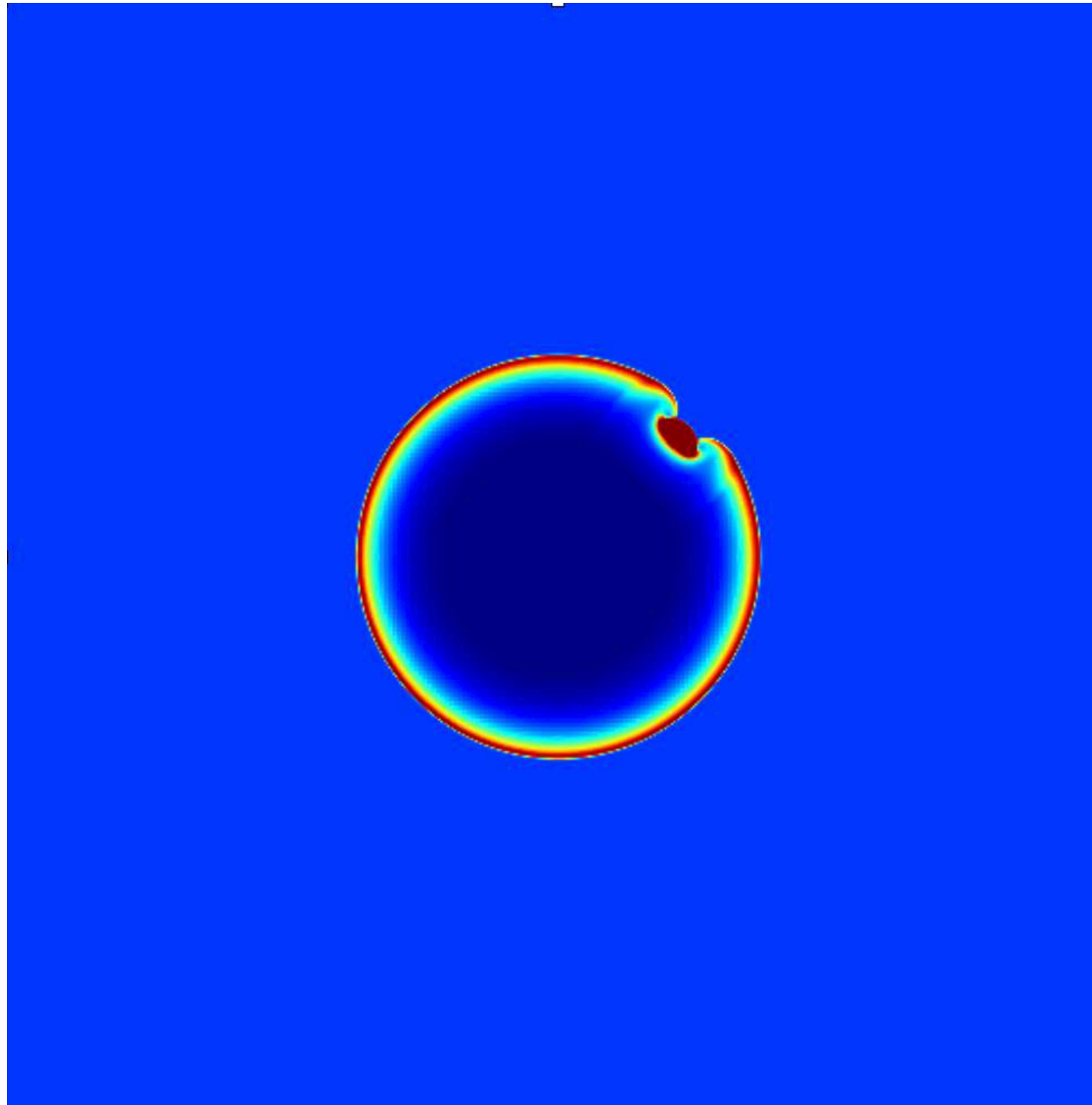


Bombe H « Castle Romeo »  
1954



## Cas de l'explosion de supernova

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



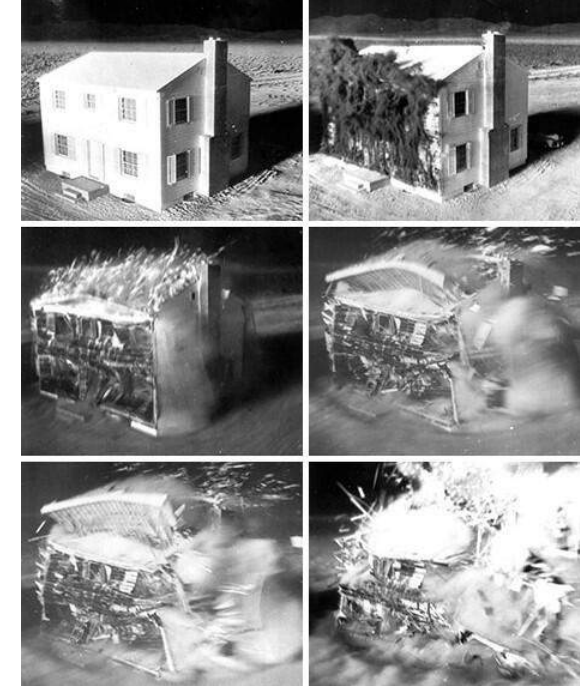
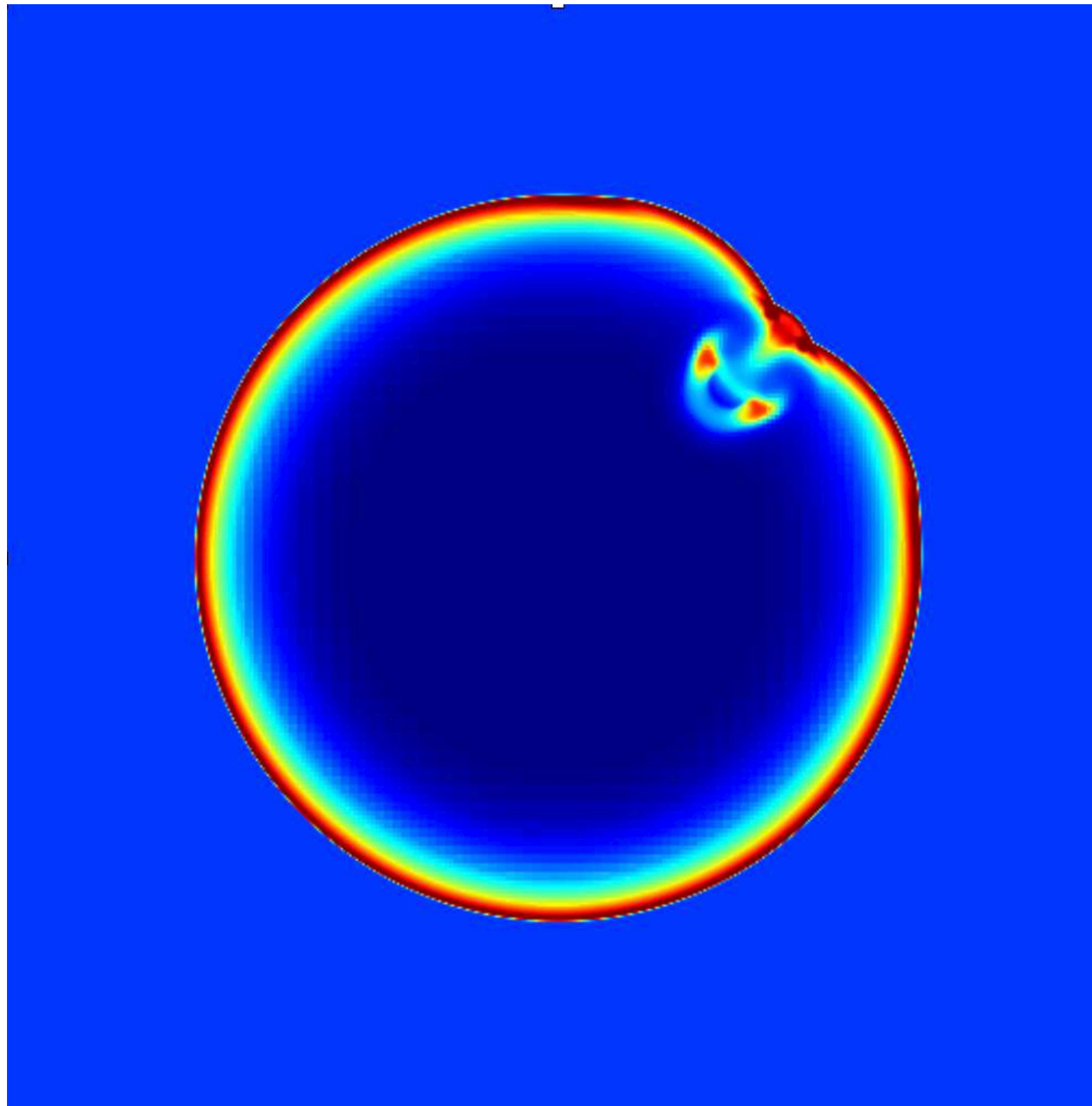


Bombe H « Castle Romeo »  
1954



## Cas de l'explosion de supernova

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

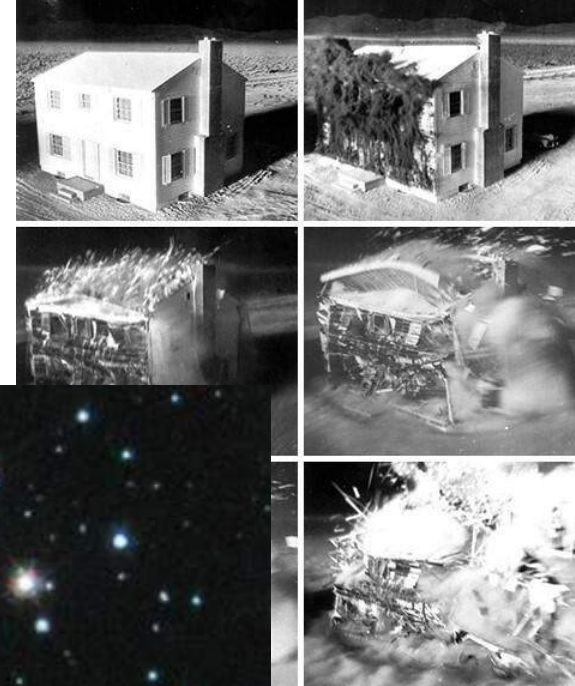




Bombe H « Castle Romeo »  
1954

## Cas de l'explosion de supernova

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

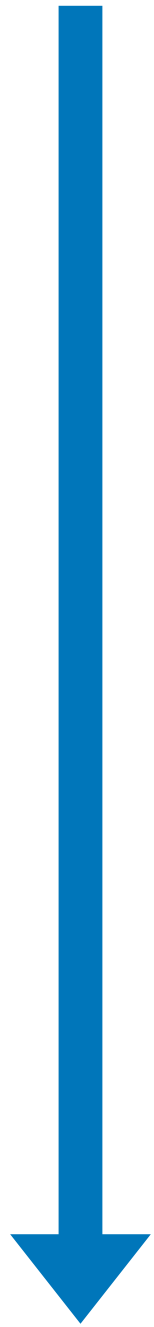
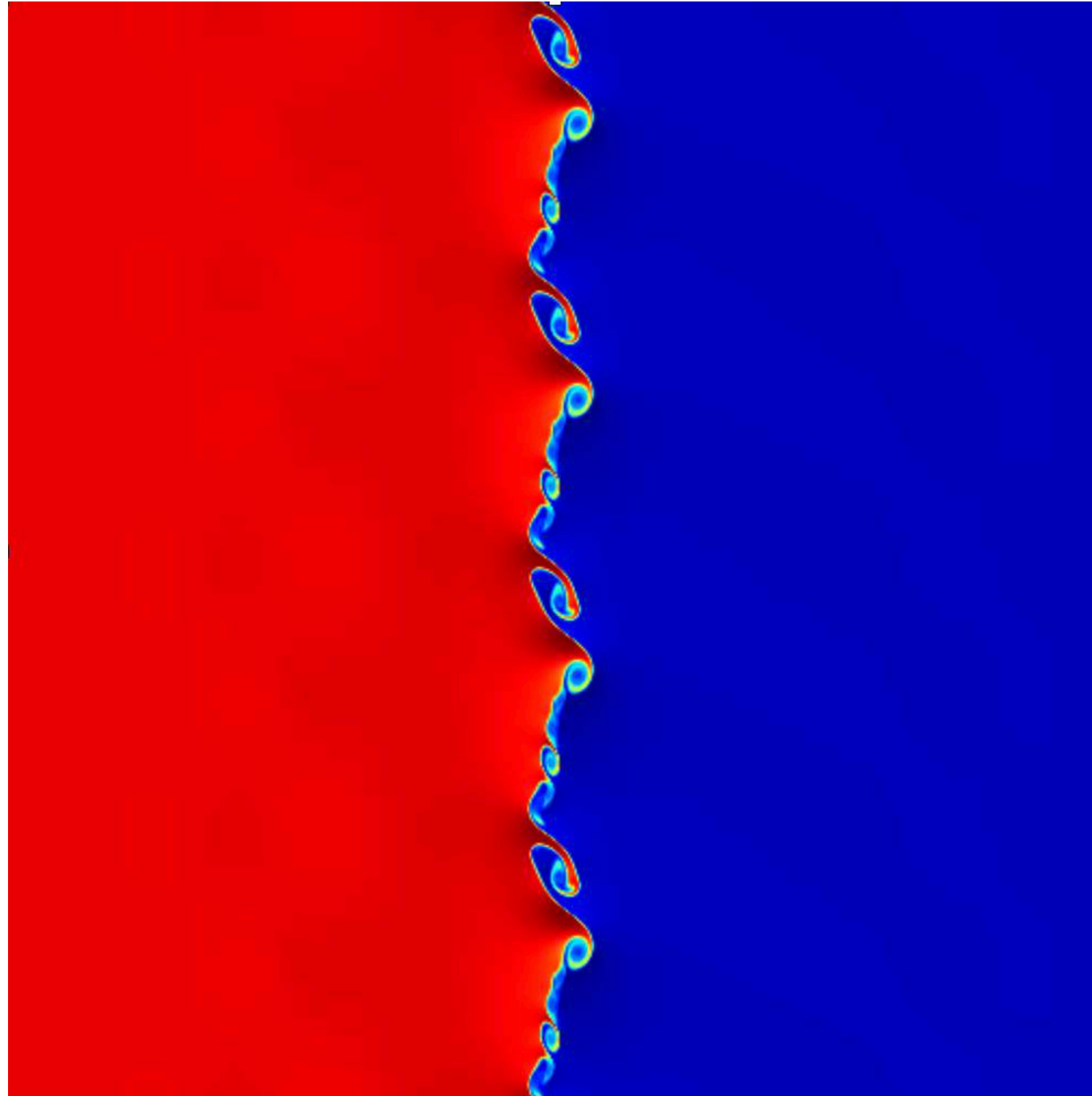






# Instabilité de Kelvin-Helmoltz

2 couches de gaz en cisaillement

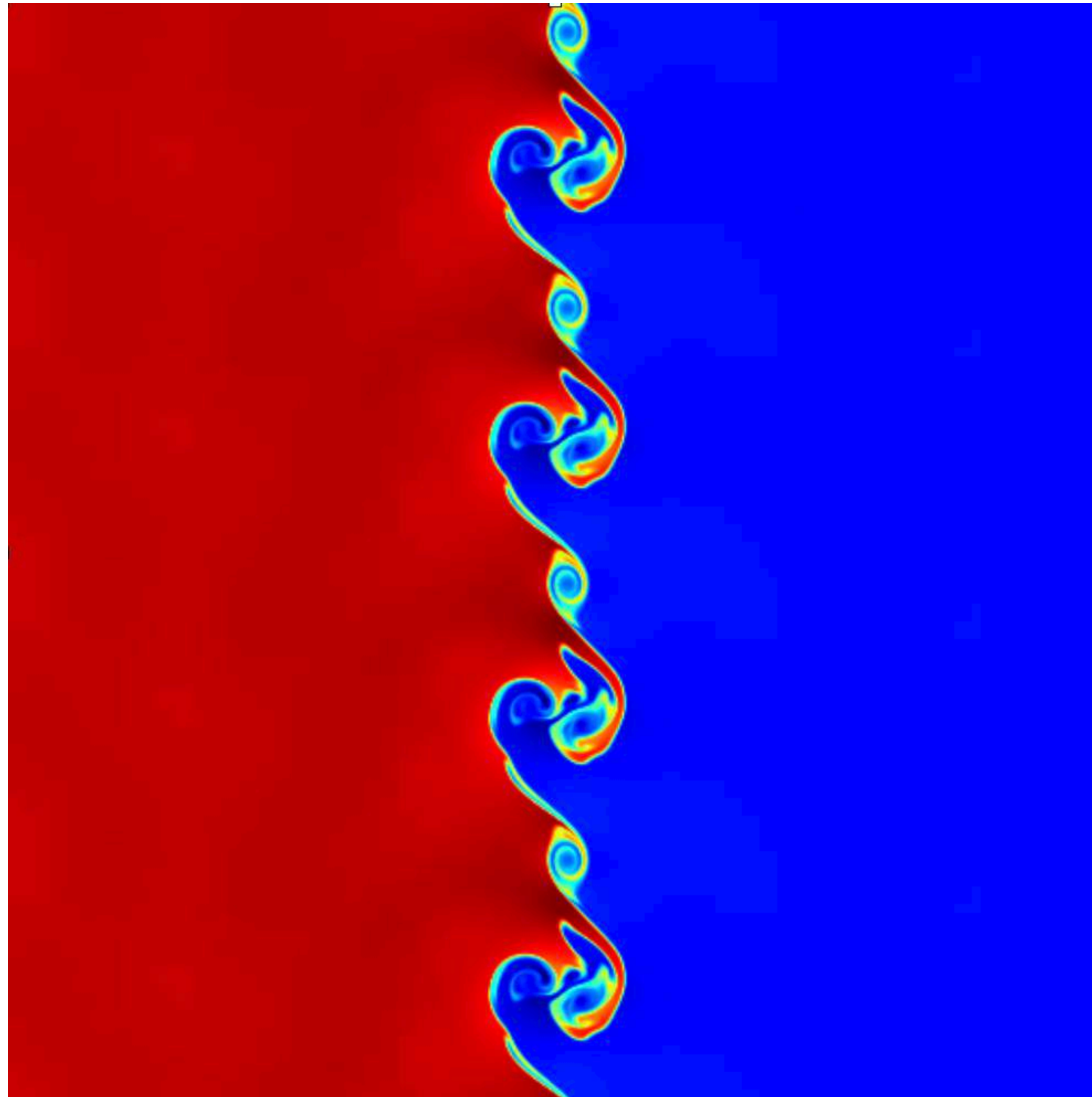
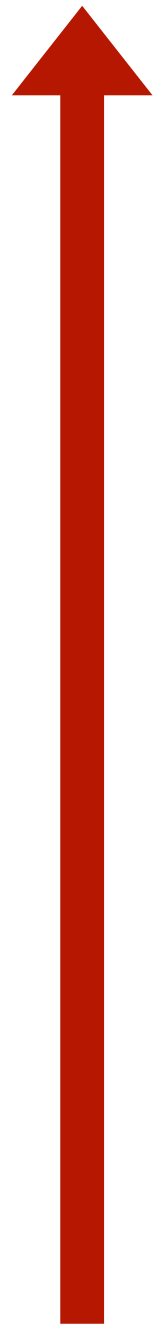






# Instabilité de Kelvin-Helmoltz

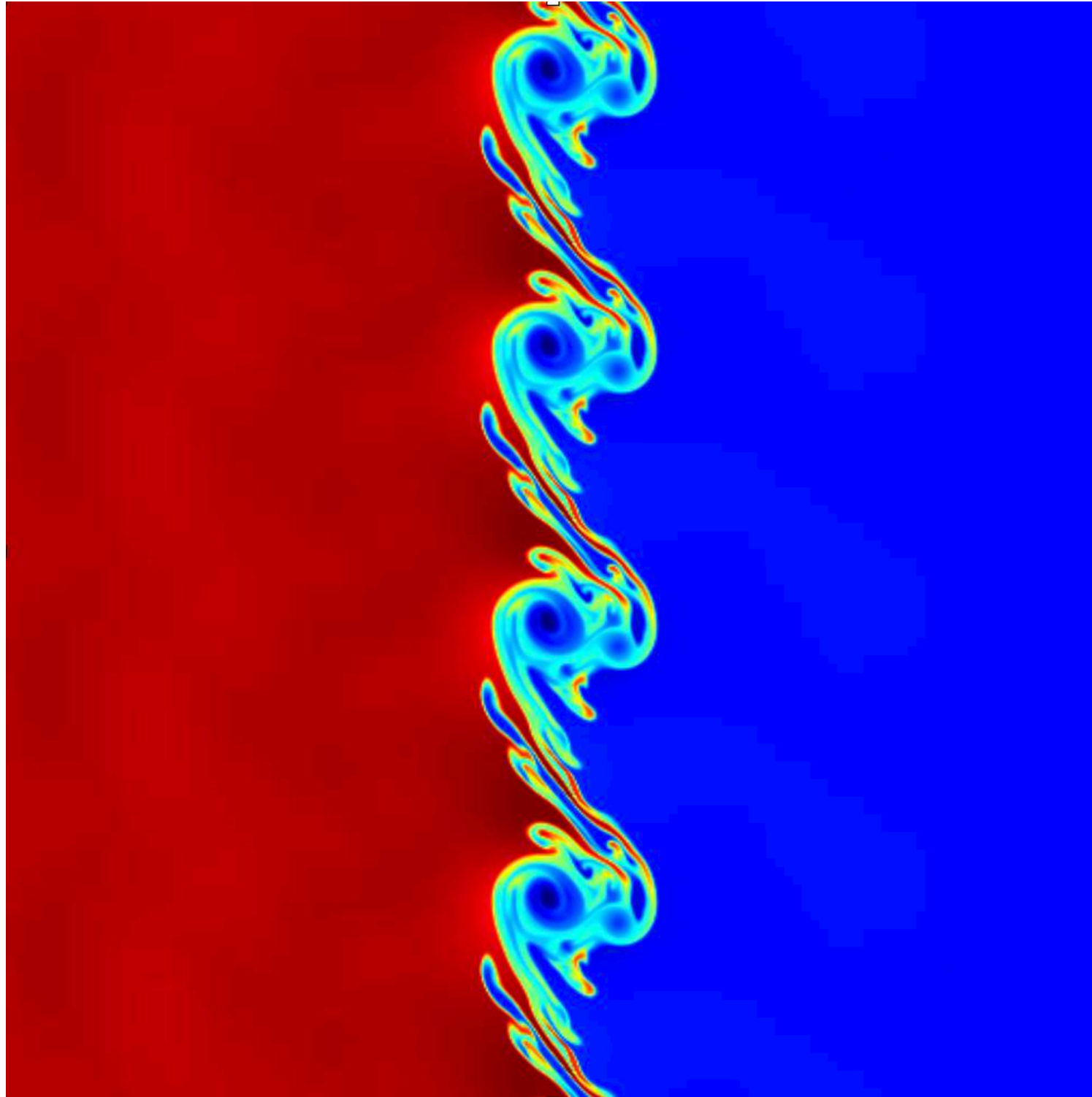
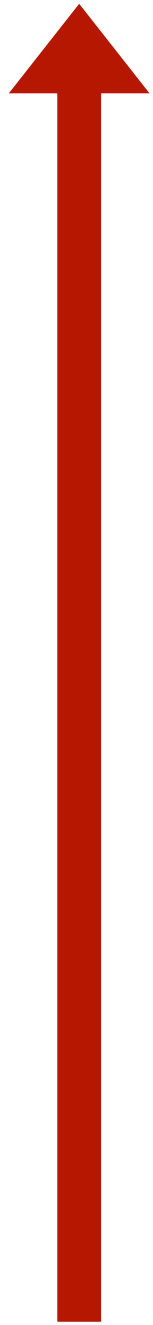
2 couches de gaz en cisaillement





# Instabilité de Kelvin-Helmoltz

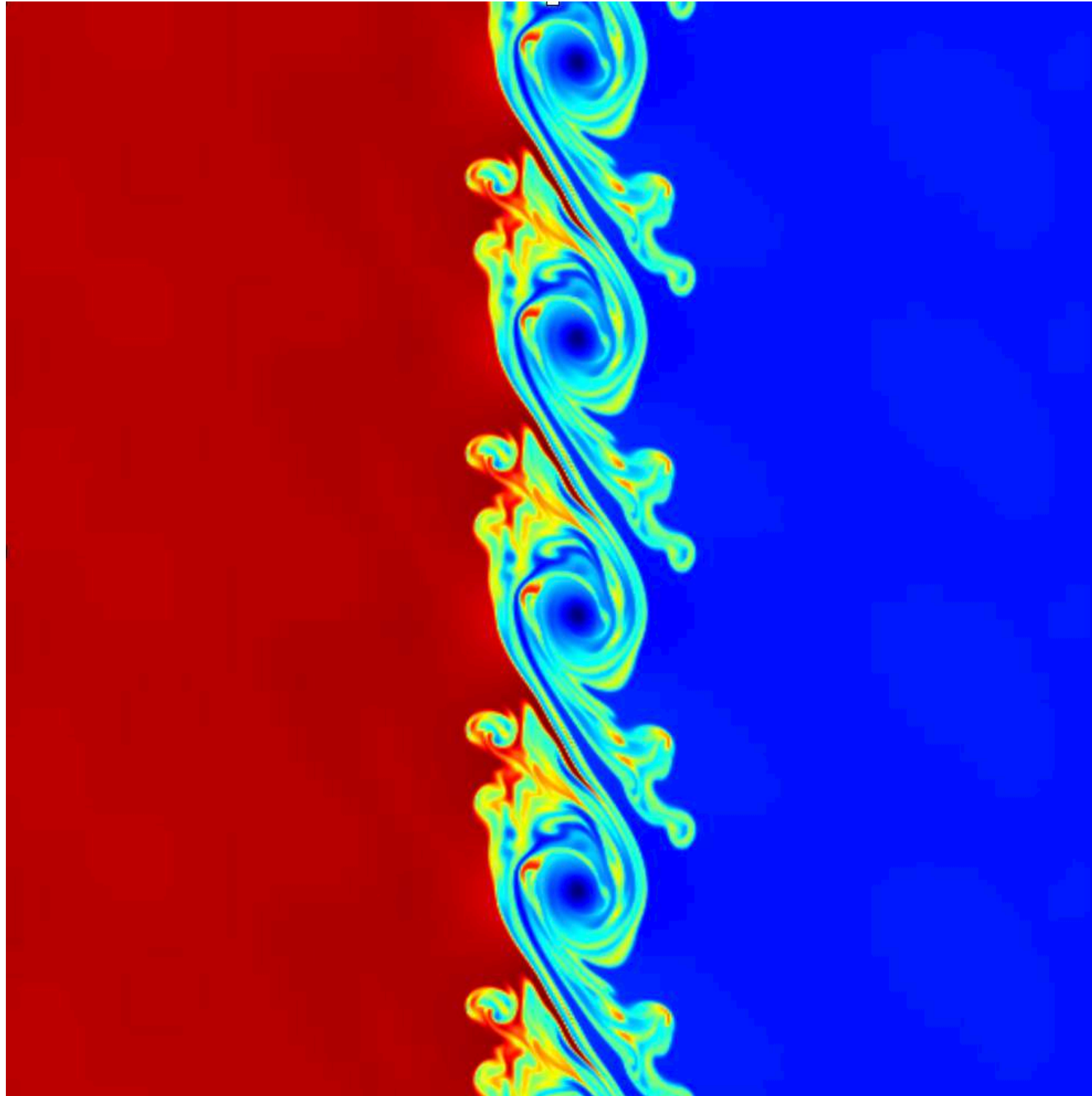
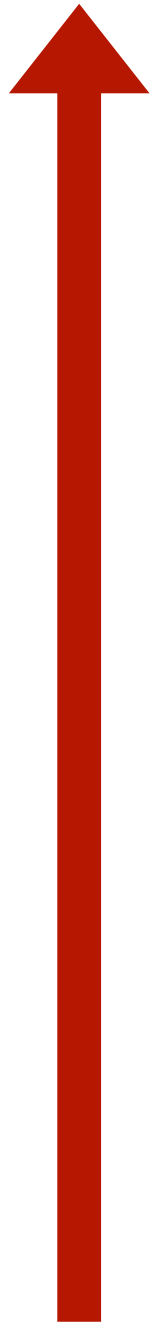
2 couches de gaz en cisaillement





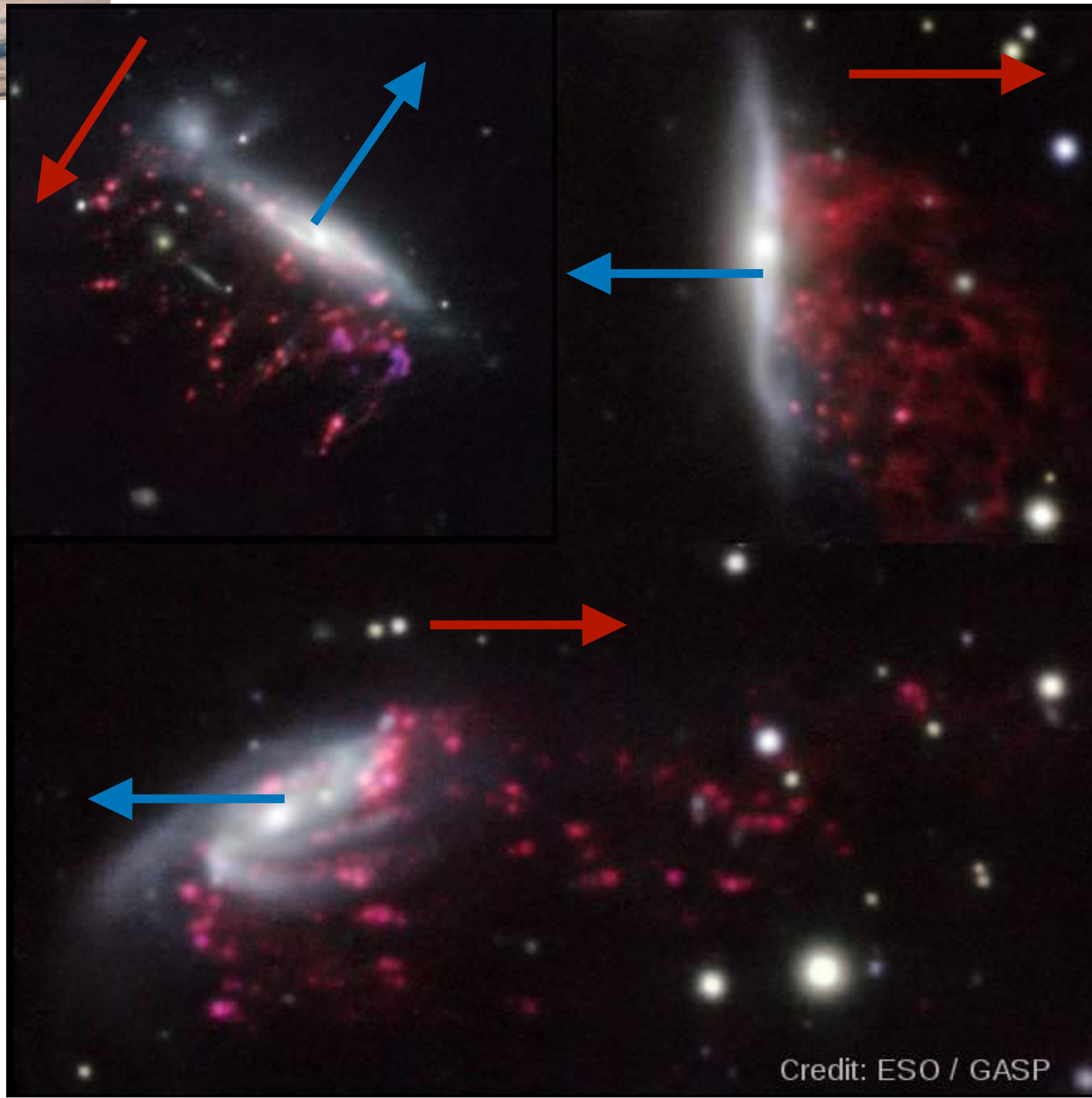
## Instabilité de Kelvin-Helmoltz

2 couches de gaz en cisaillement





# Instabilité de Kelvin-Helmoltz



Credit: ESO / GASP

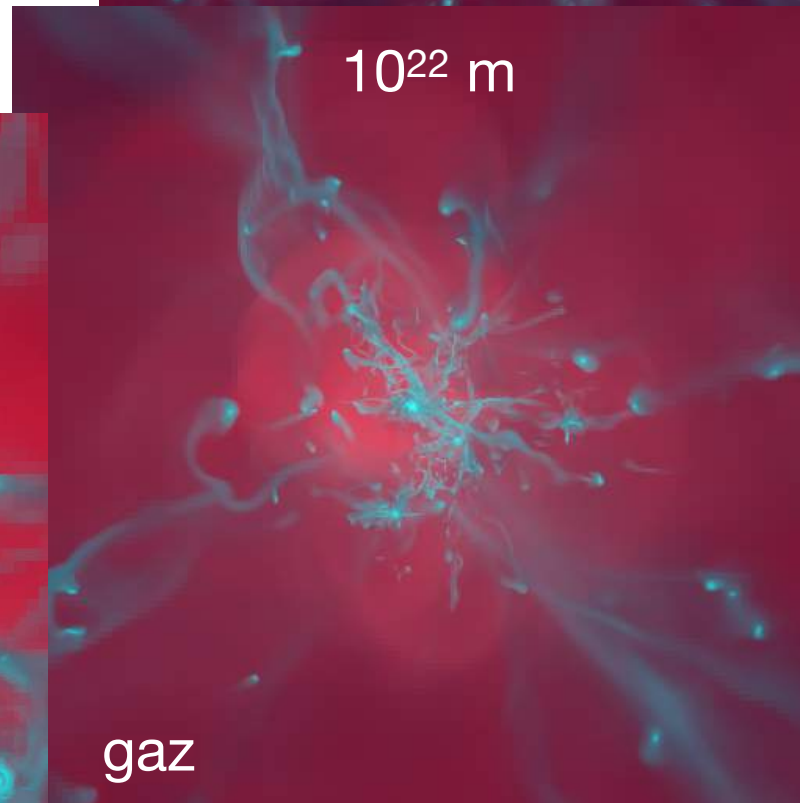
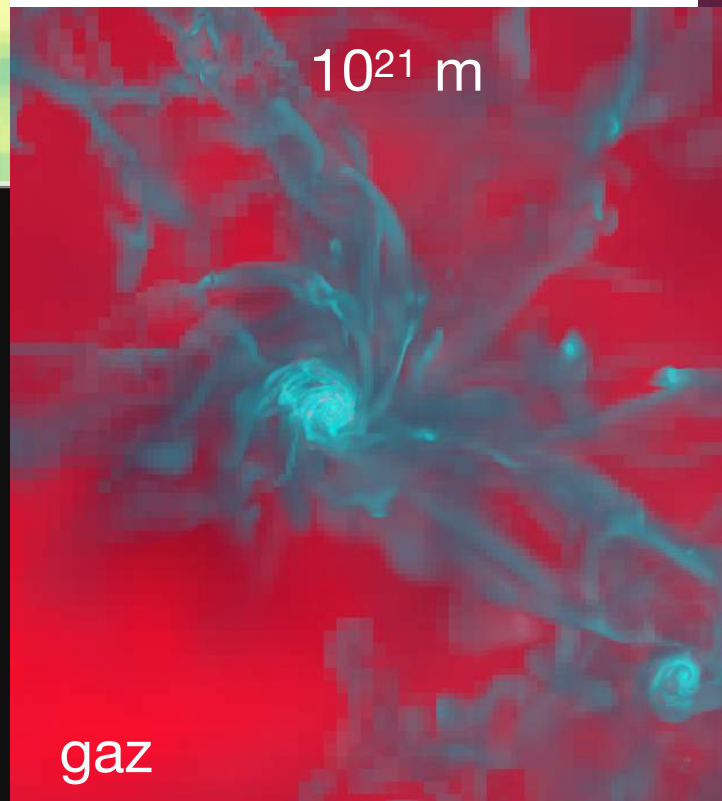
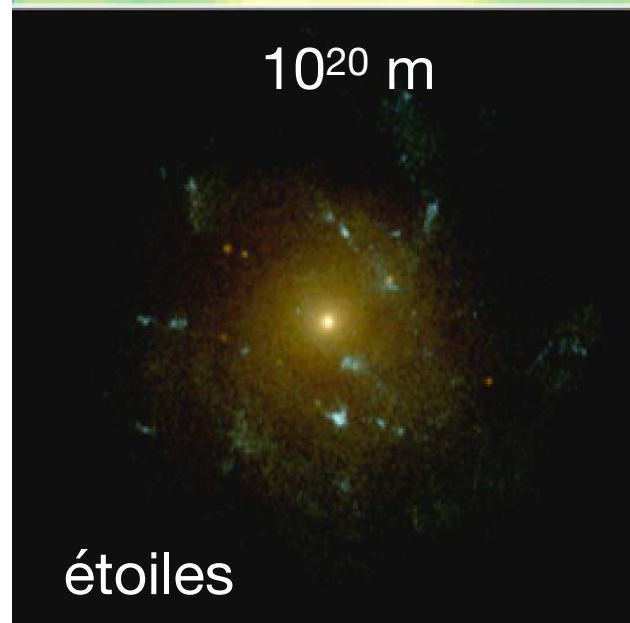
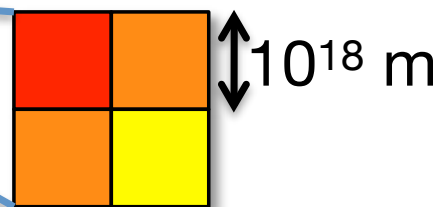
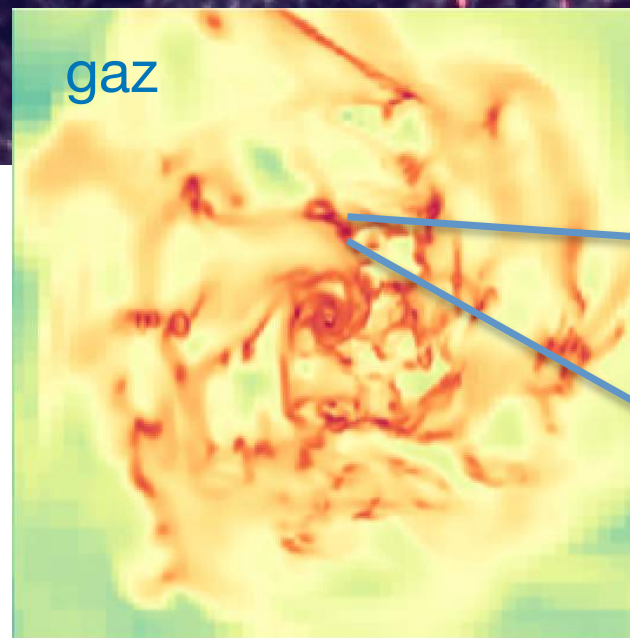
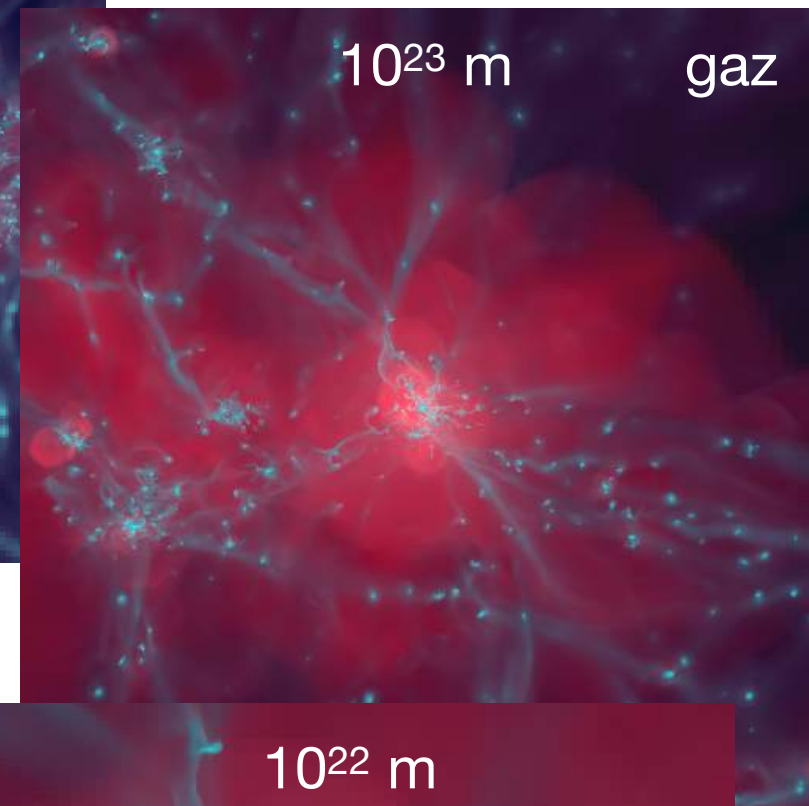
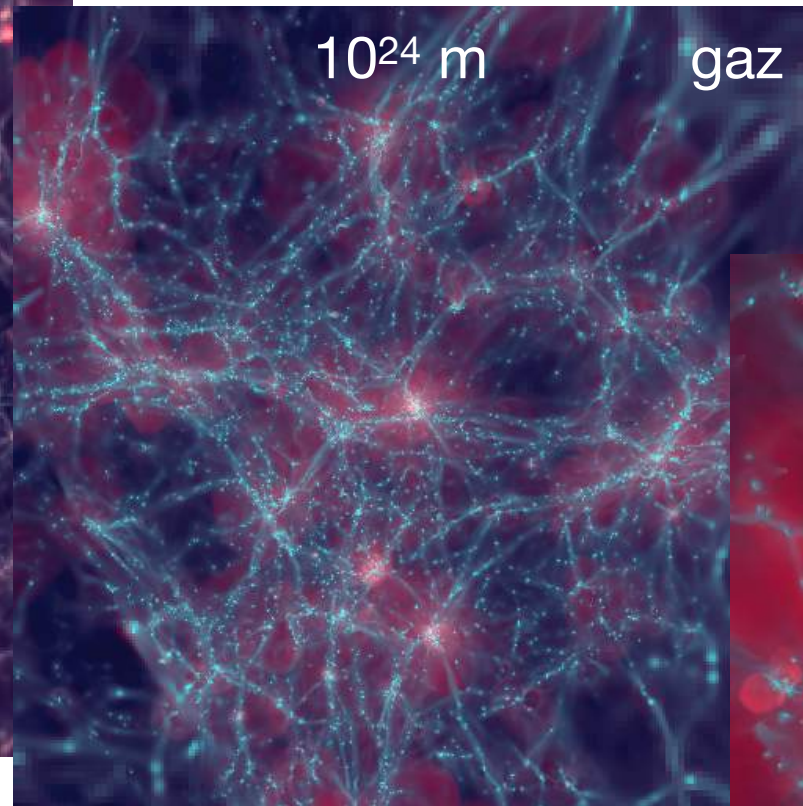
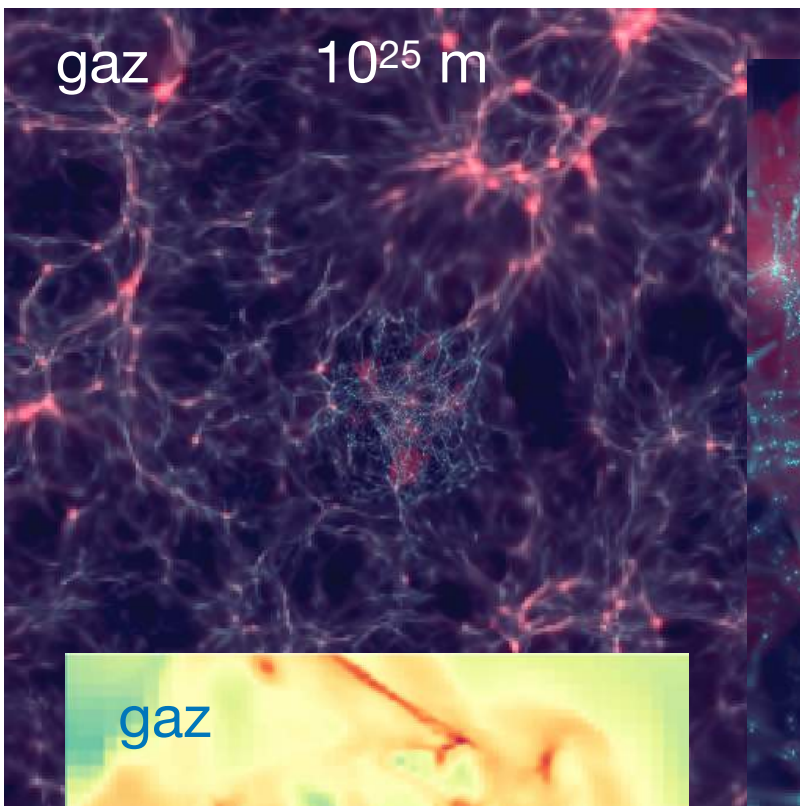


# Comment gérer la multitude d'échelles ?

Combien de cellules ?

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

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

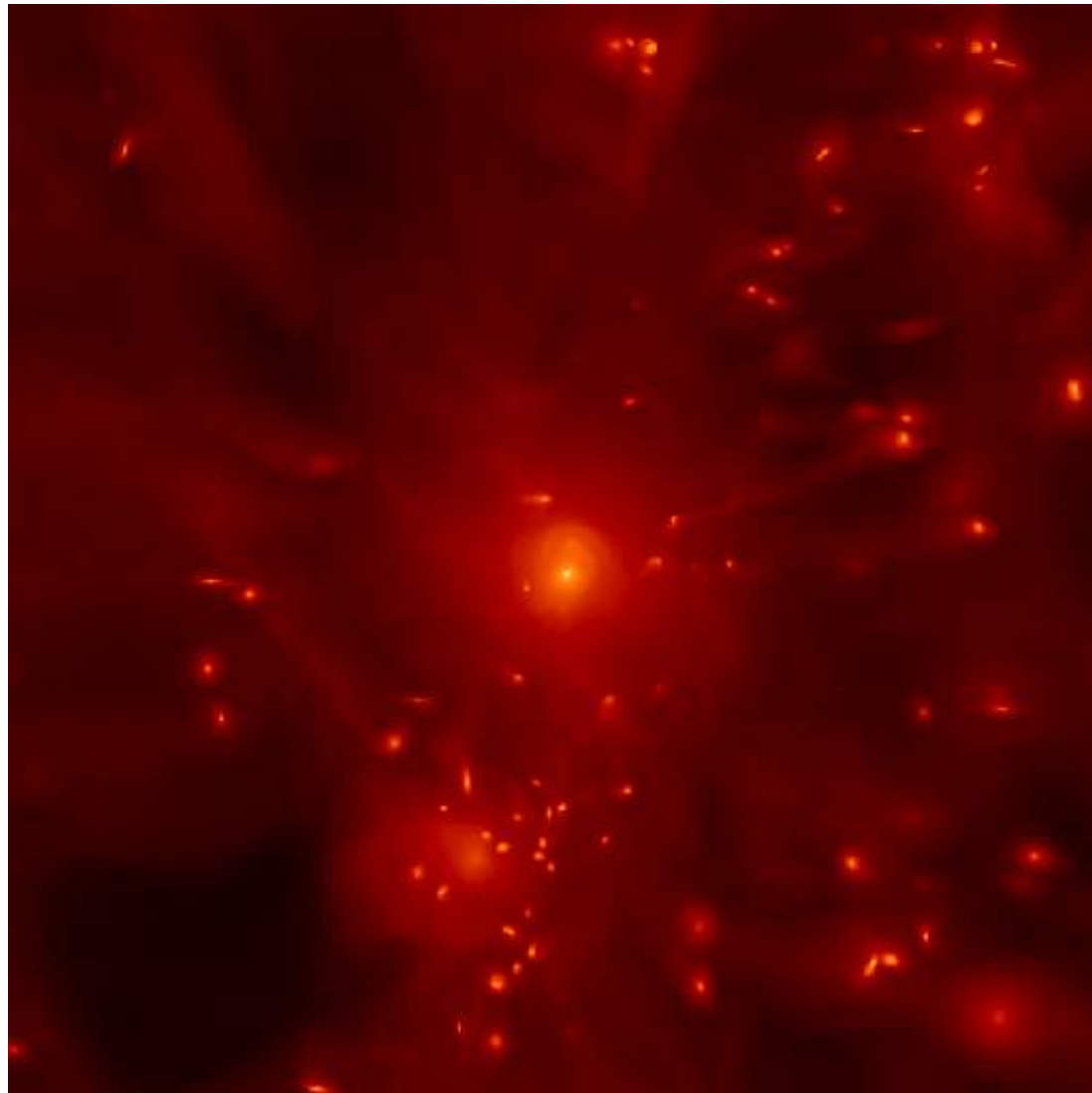




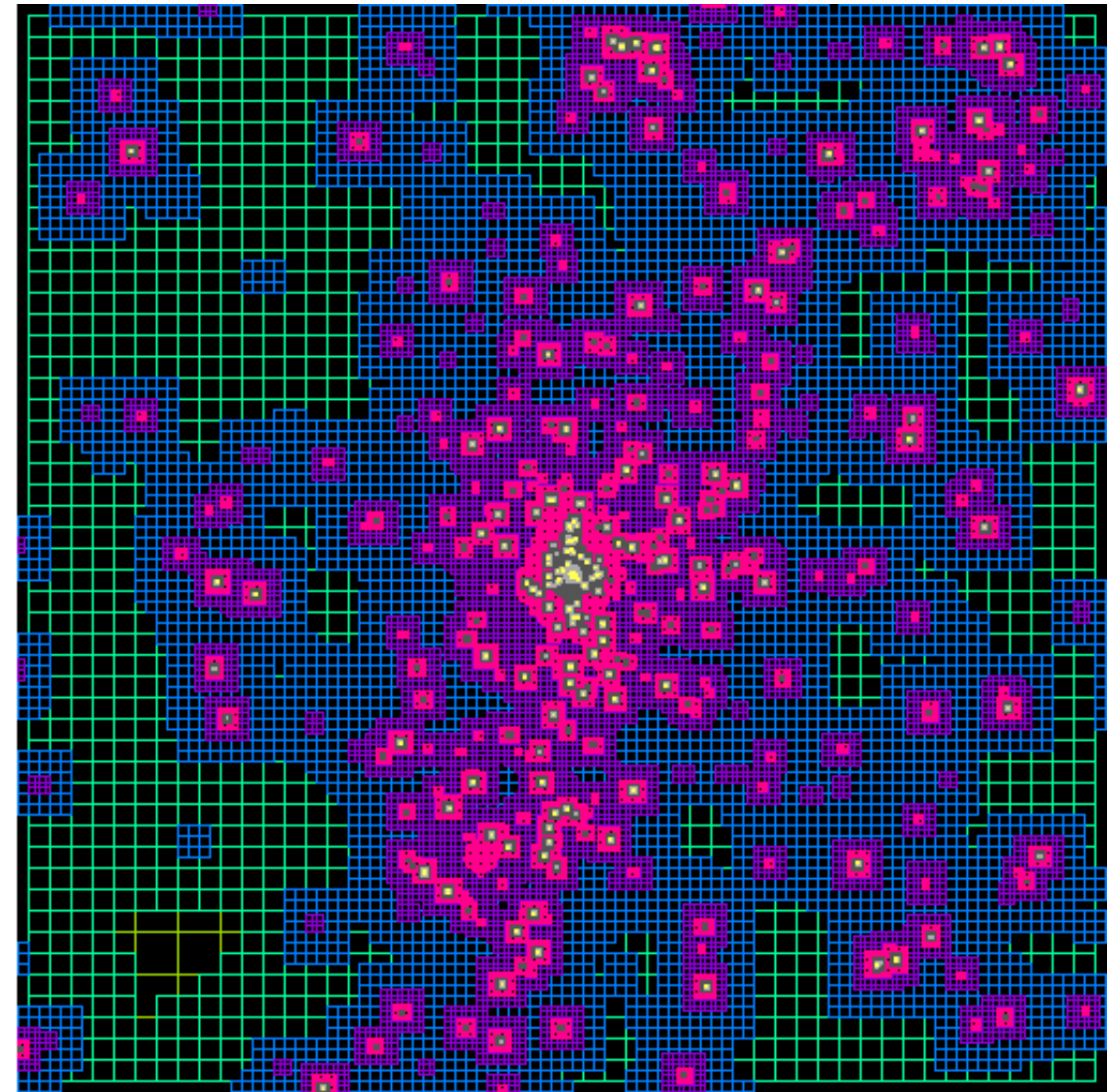
# Raffinement adaptatif de maille

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



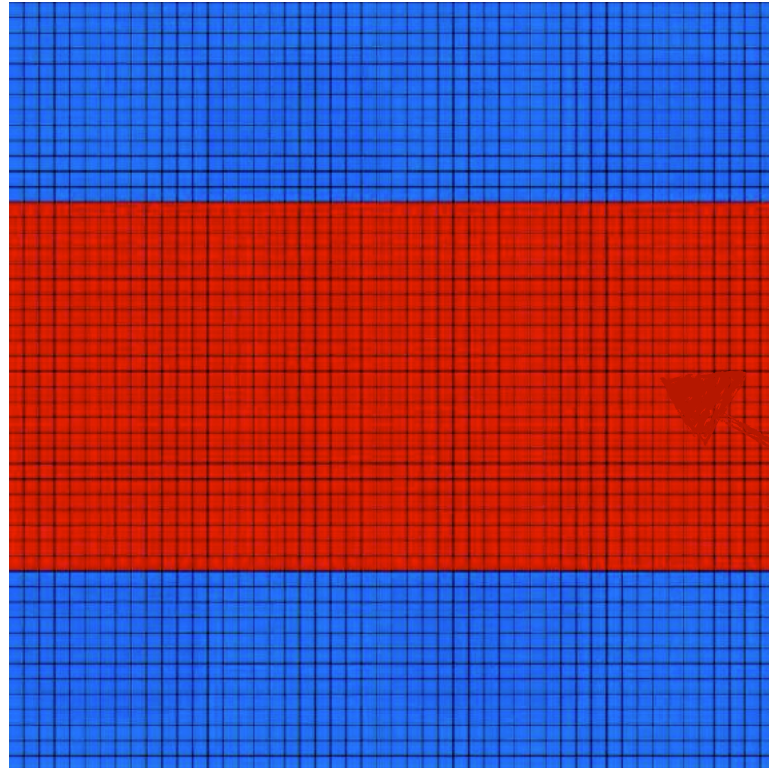
distribution du maillage

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

# Approches alternatives aux codes grilles

## Moving Mesh

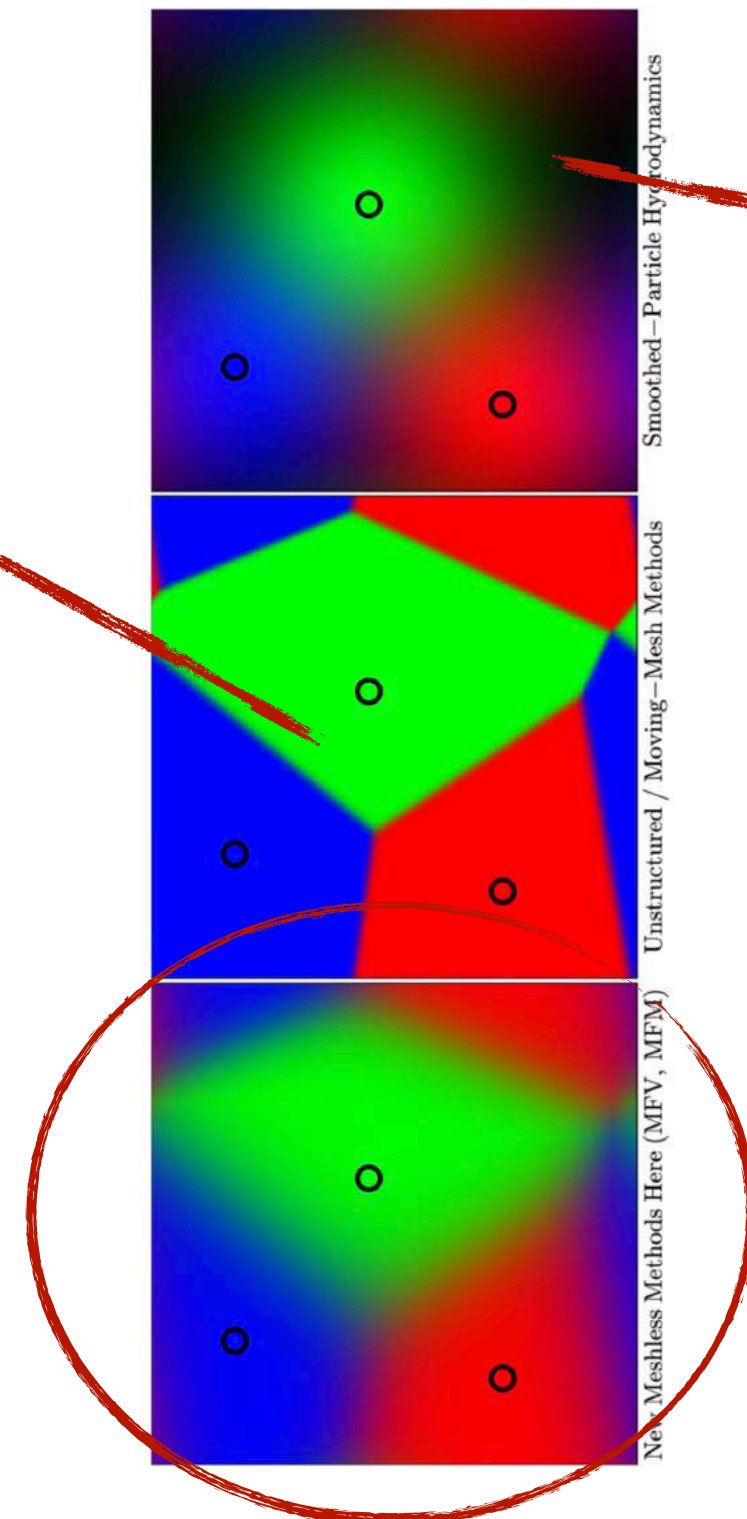
Code Arepo



Springel 2009

## Riemann sans la grille

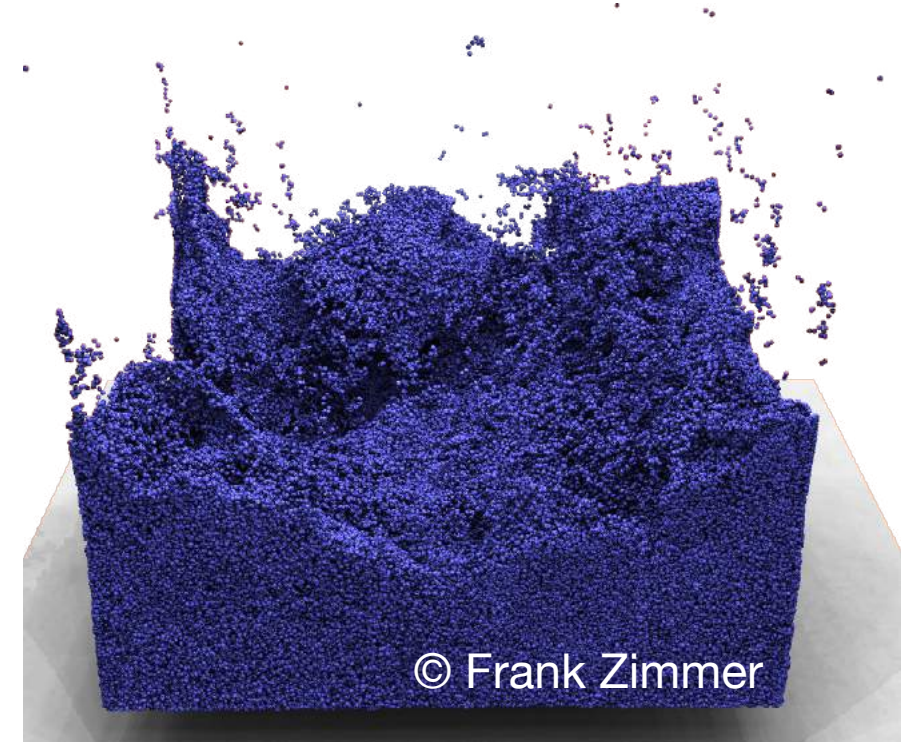
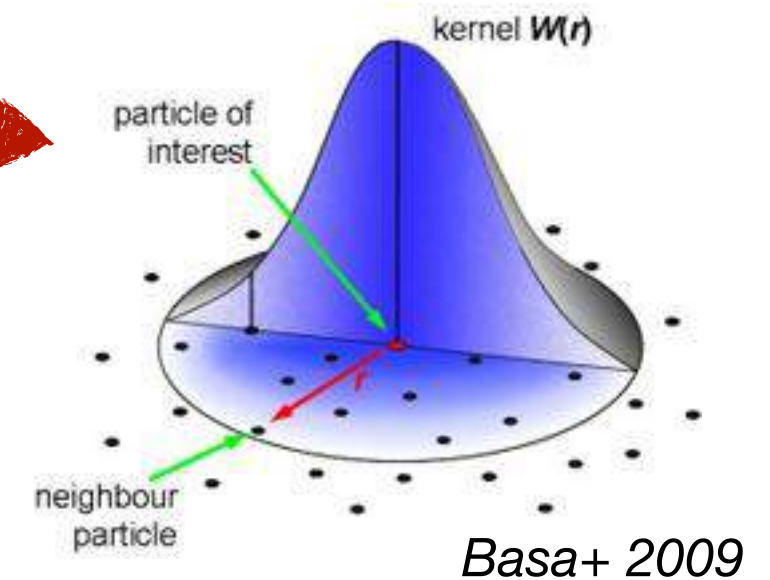
Code Gizmo



Hopkins 2015

## Smoothed Particle Hydrodynamics

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

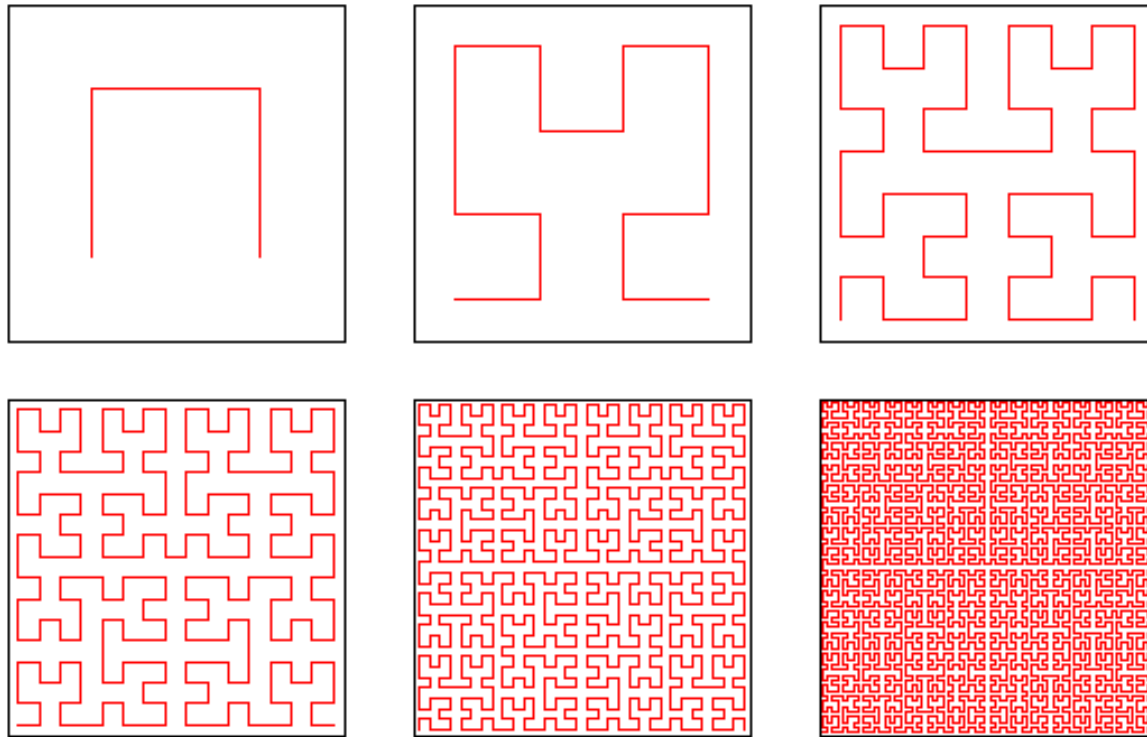




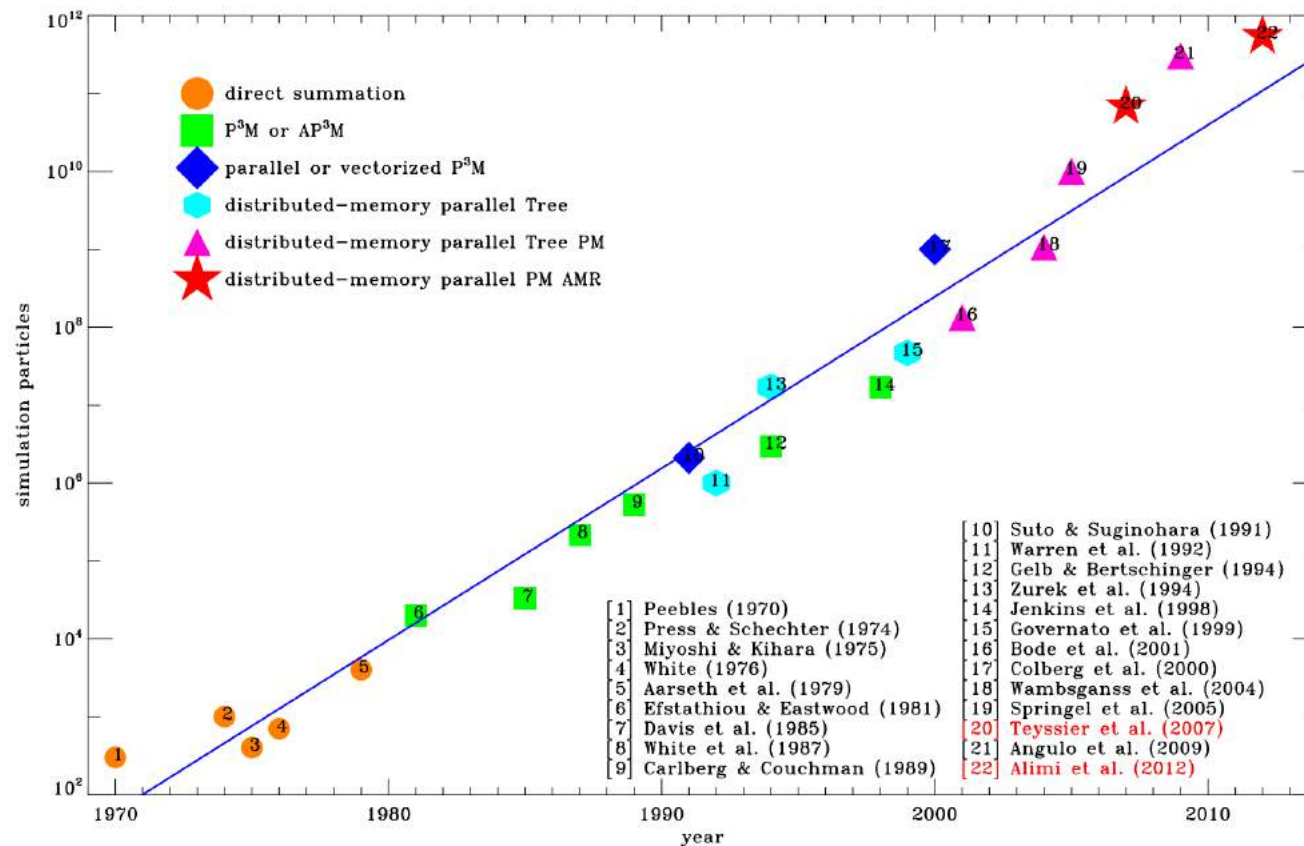
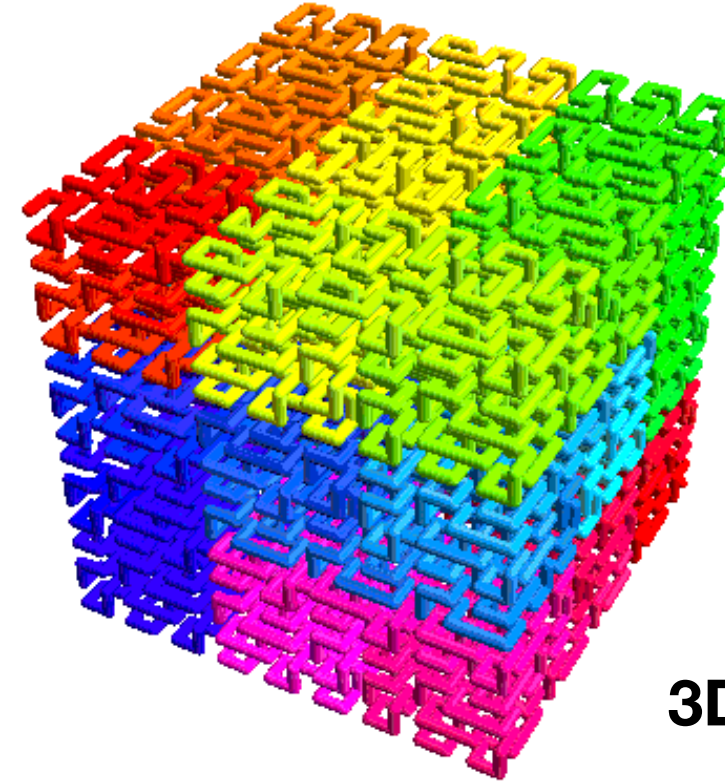
# Pour être plus efficace, on partage le travail

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**

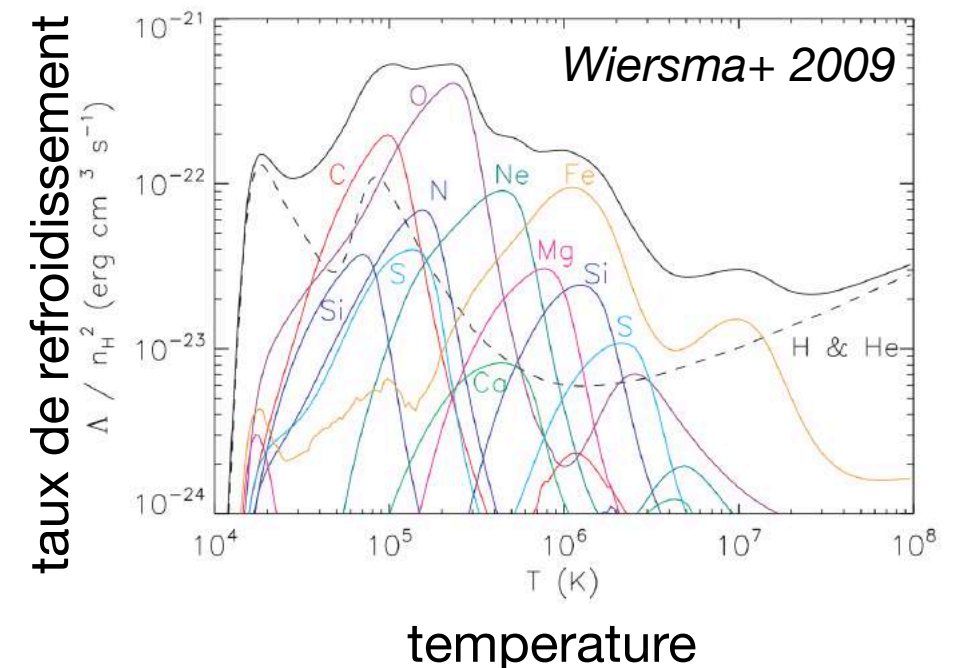
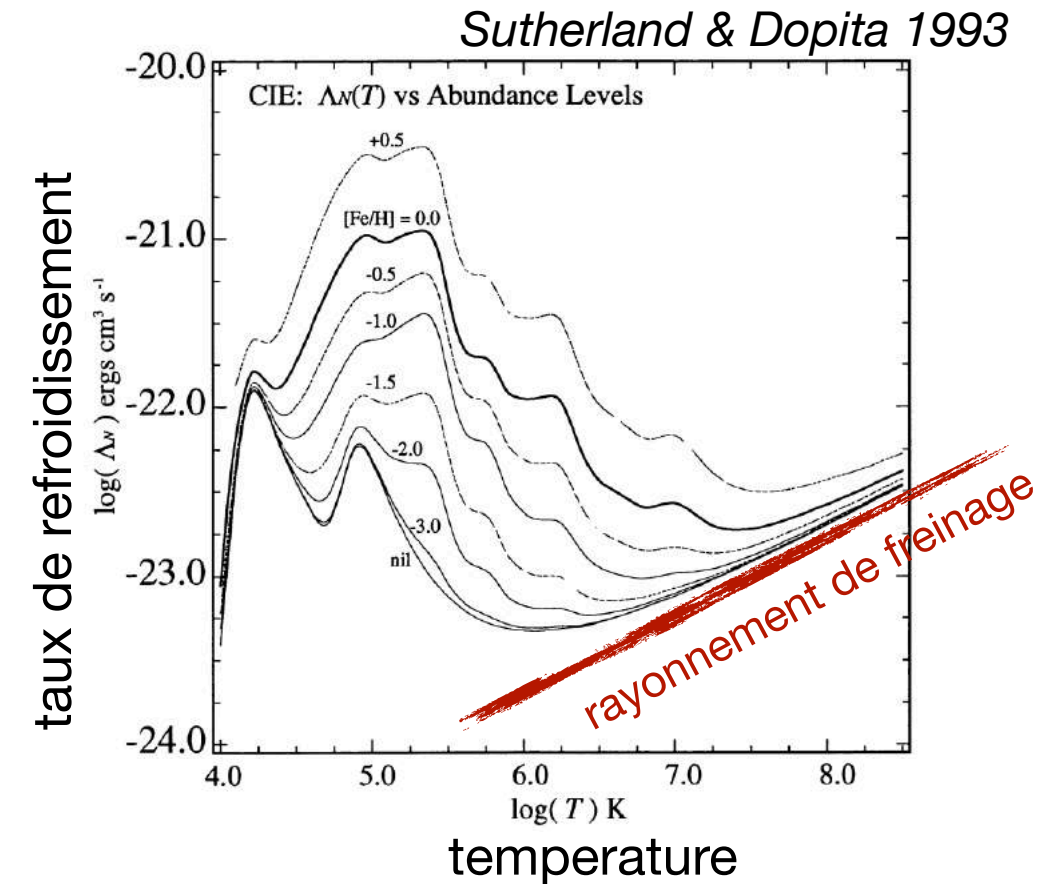
exemple:

émet des photons  
 $h\nu$

-e

-e

rayonnement continu de freinage entre 2 électrons



**Contrairement à la matière noire le gaz peut refroidir**

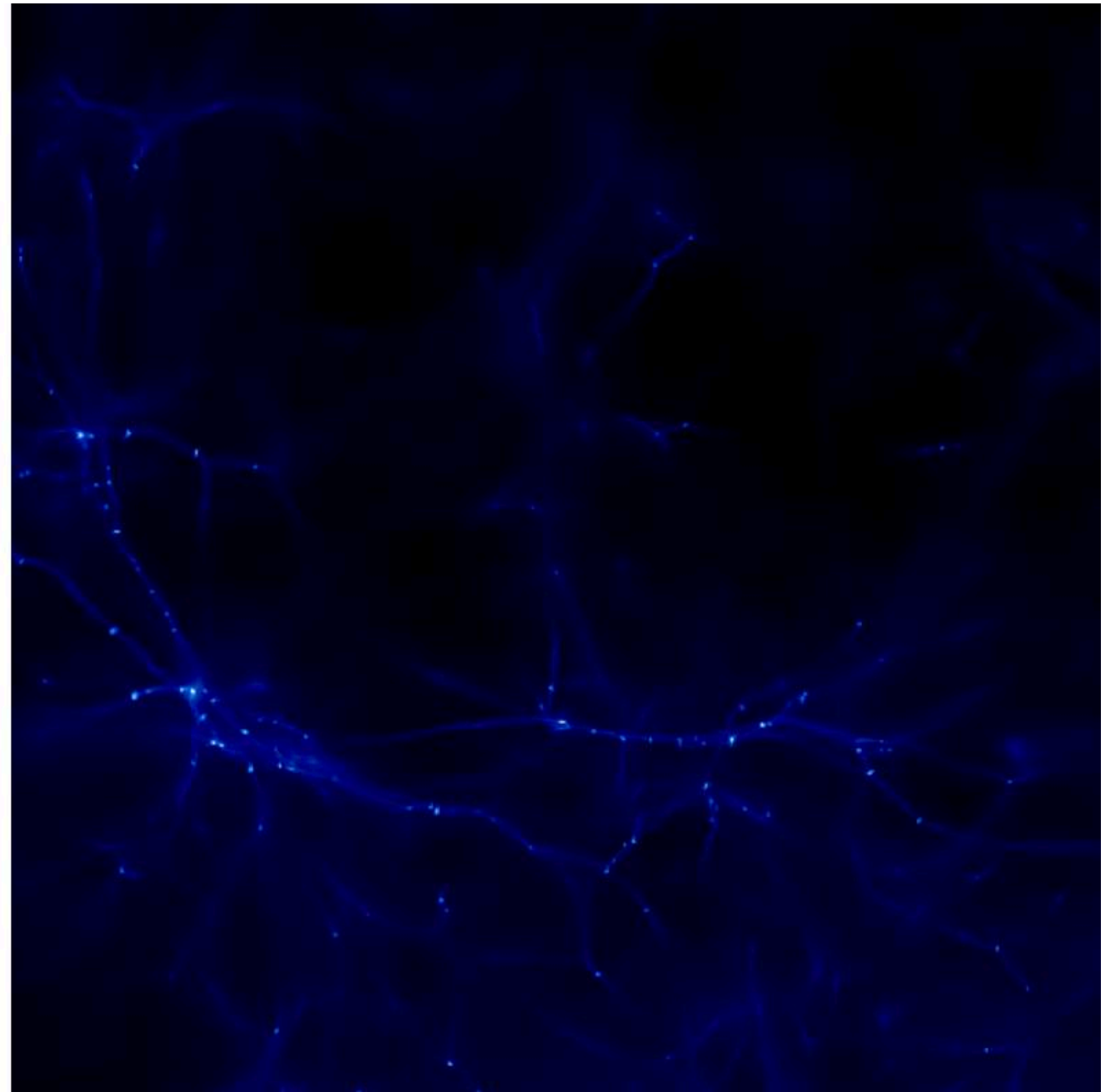
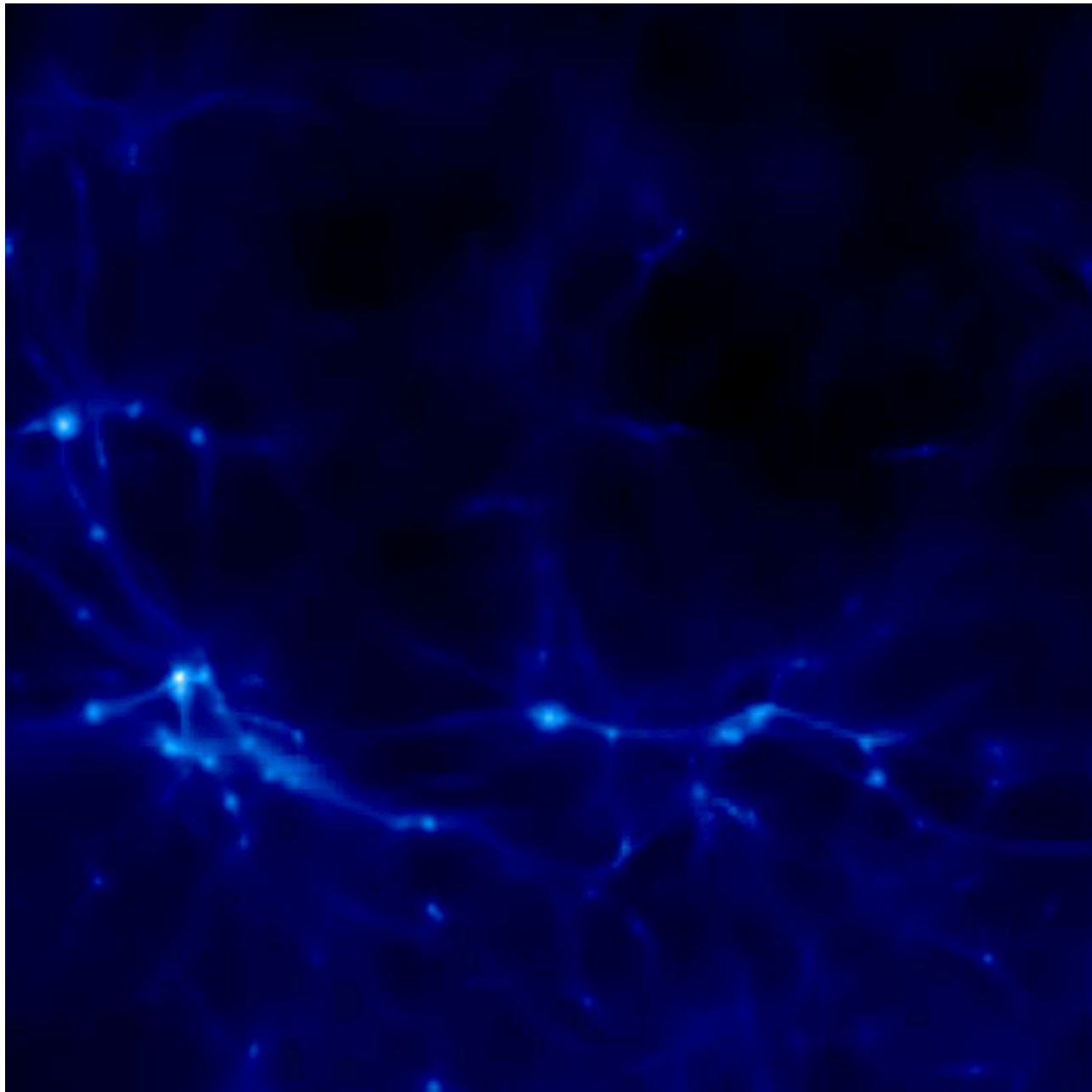


# Le refroidissement du gaz

Densité de gaz

sans refroidissement

avec refroidissement



10 Mpc

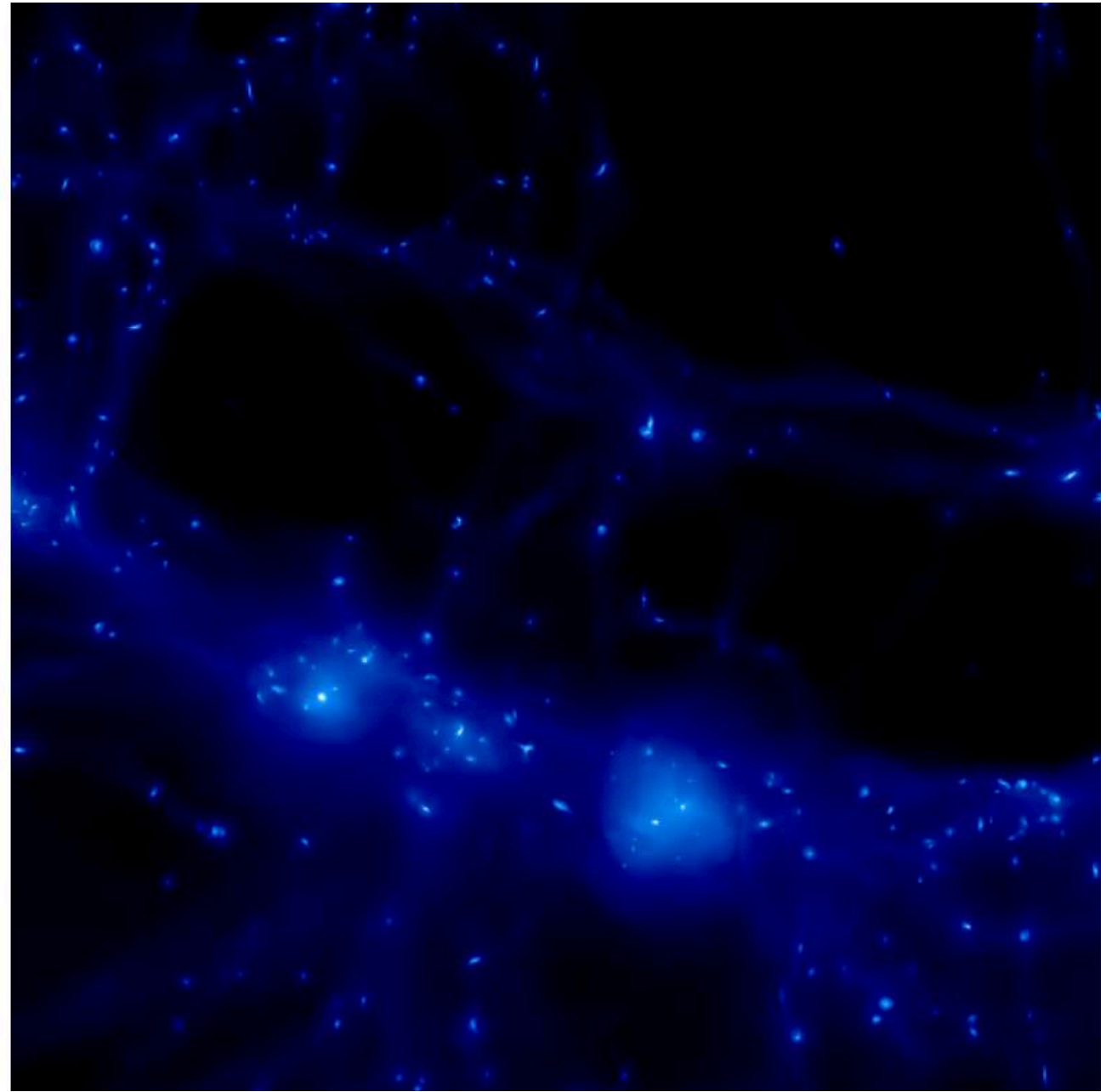
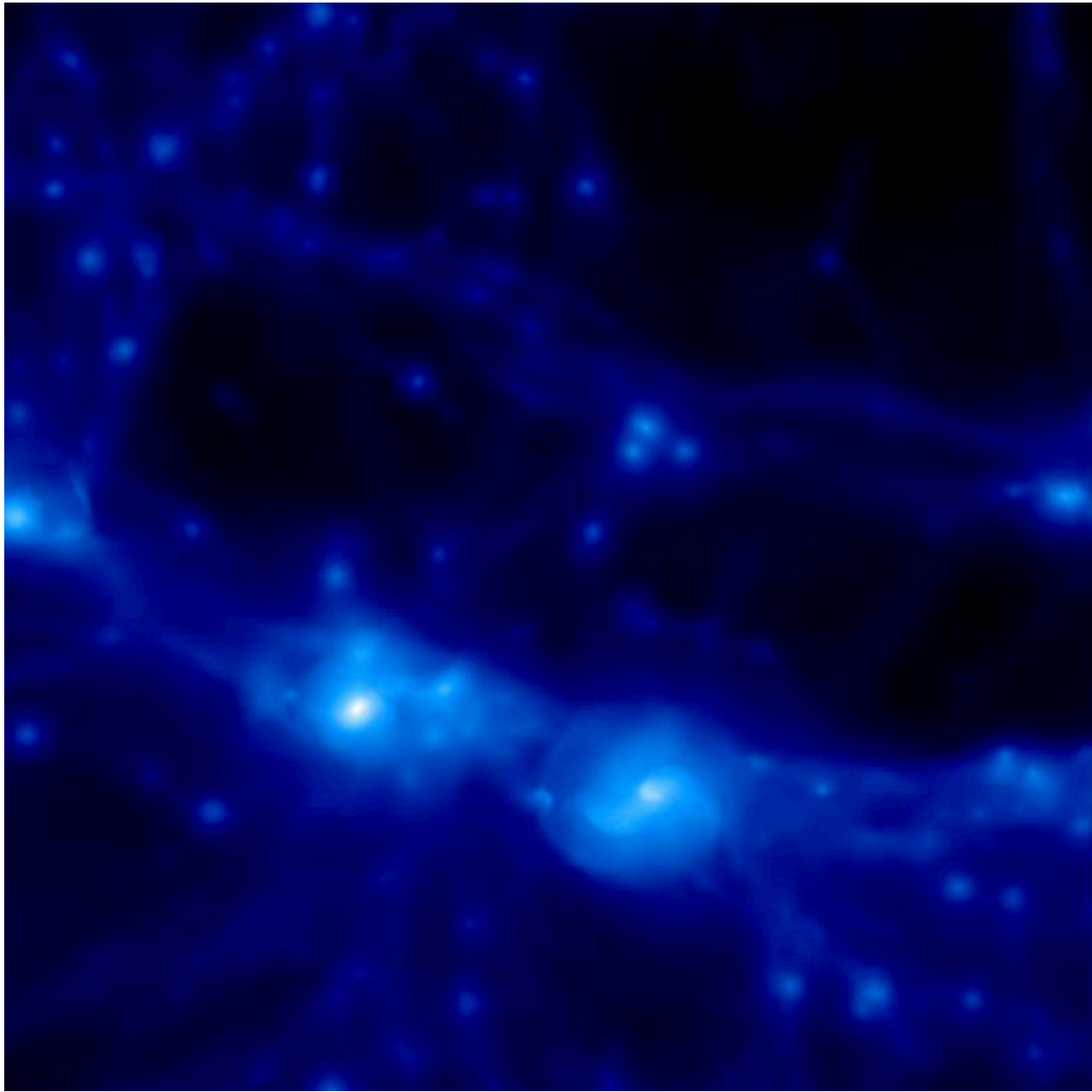
10 Mpc

# Le refroidissement du gaz

Densité de gaz

sans refroidissement

avec refroidissement



10 Mpc

10 Mpc

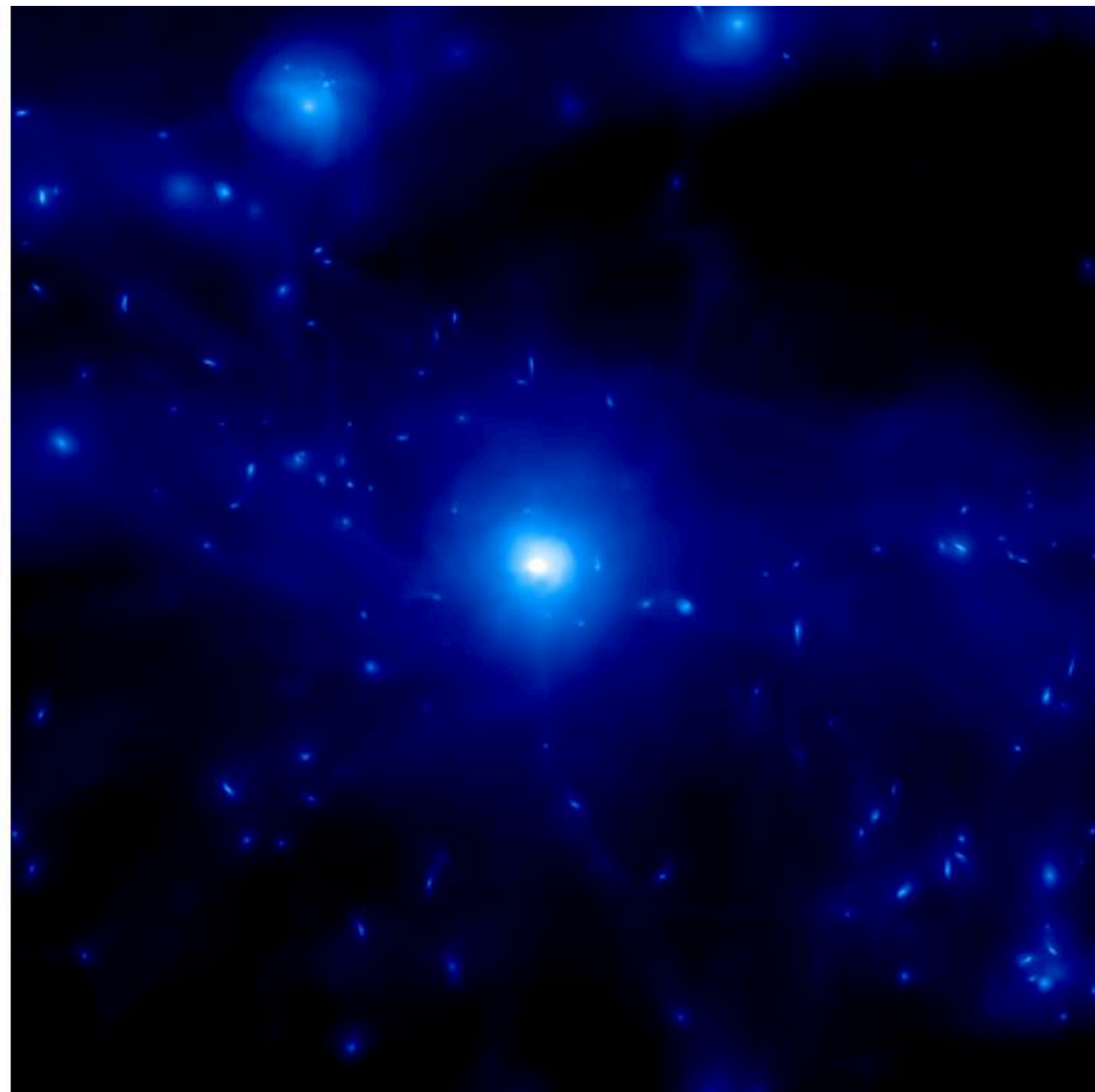
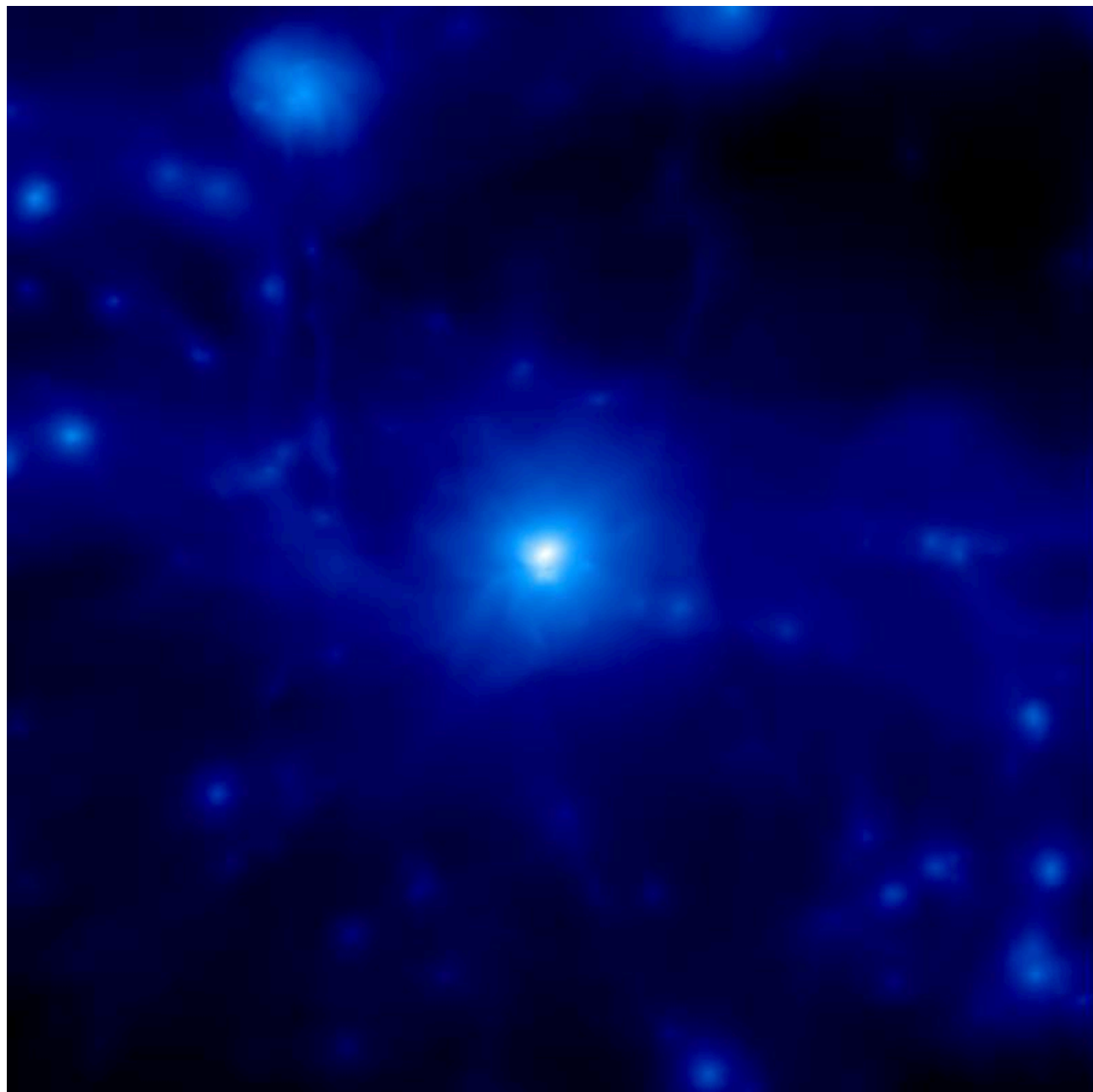


# Le refroidissement du gaz

Densité de gaz

sans refroidissement

avec refroidissement



10 Mpc

10 Mpc

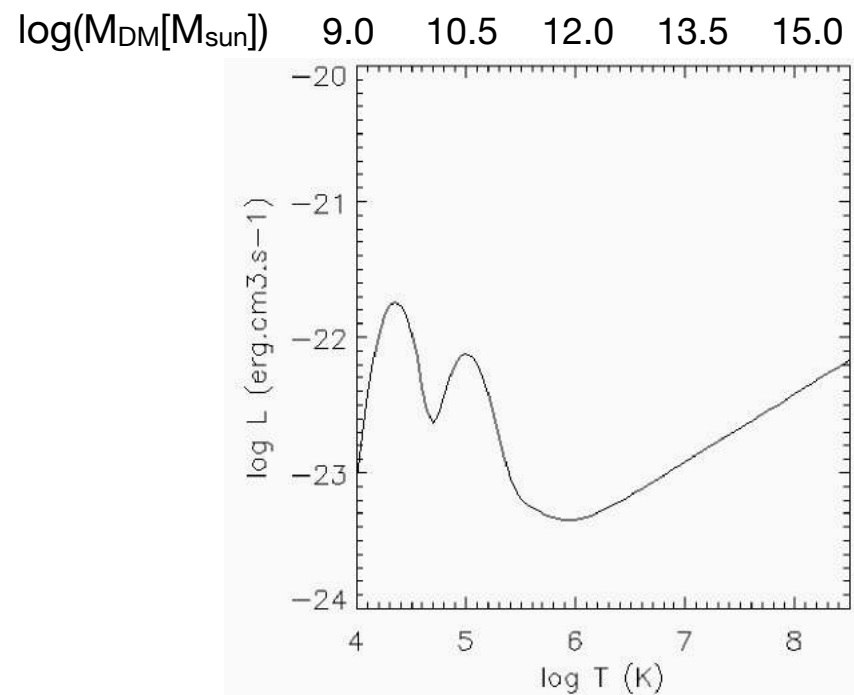
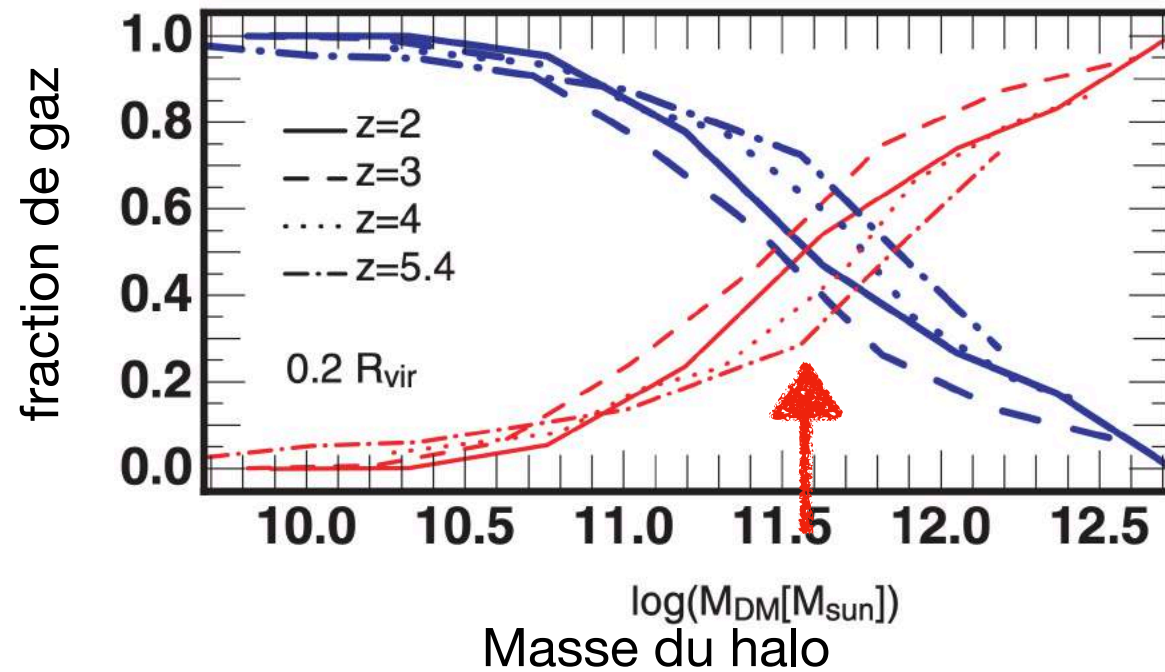
# La nature de l'accrétion de gaz sur les galaxies dépend de la masse

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

accrétion froide

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

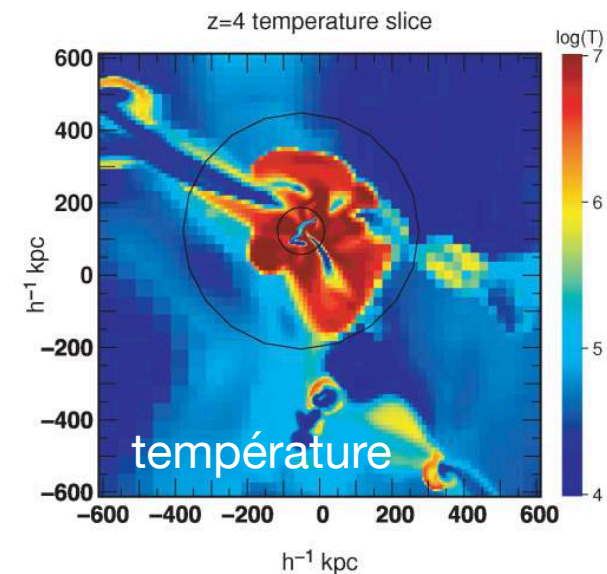
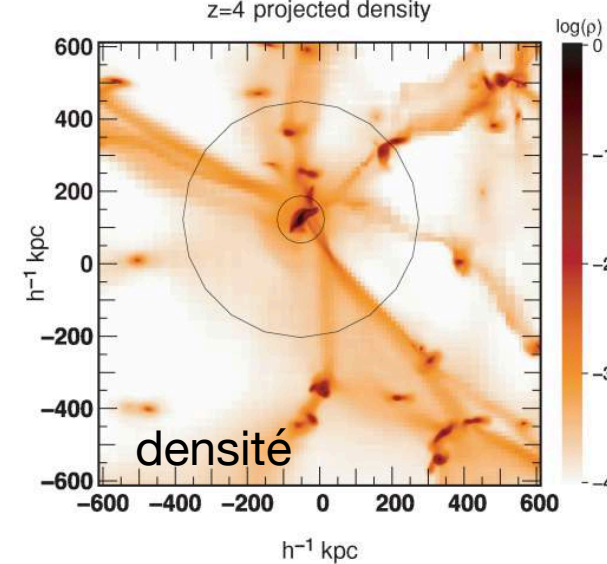
accrétion chaude



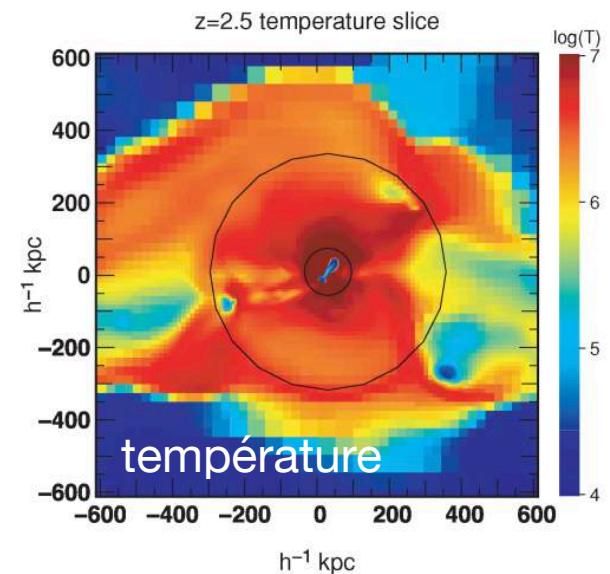
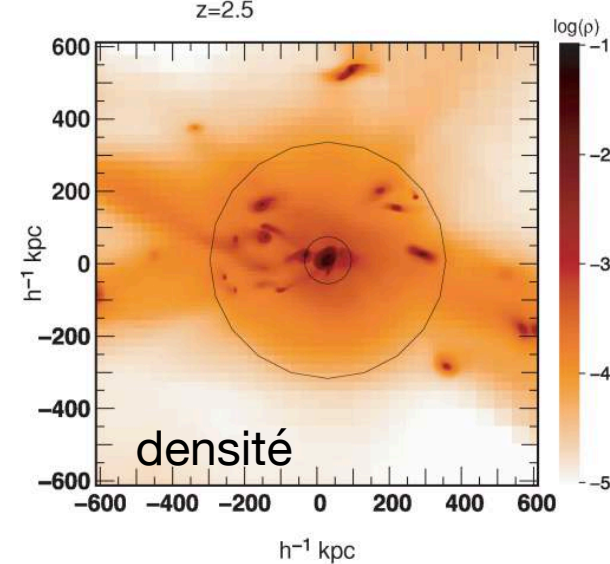
$$t_{\text{cool}} \propto T/\Lambda$$

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



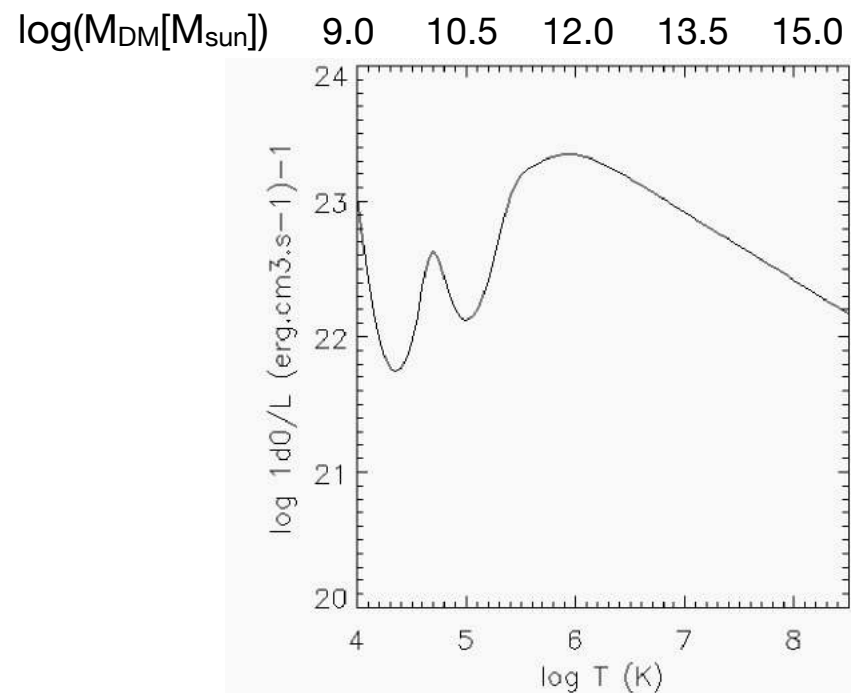
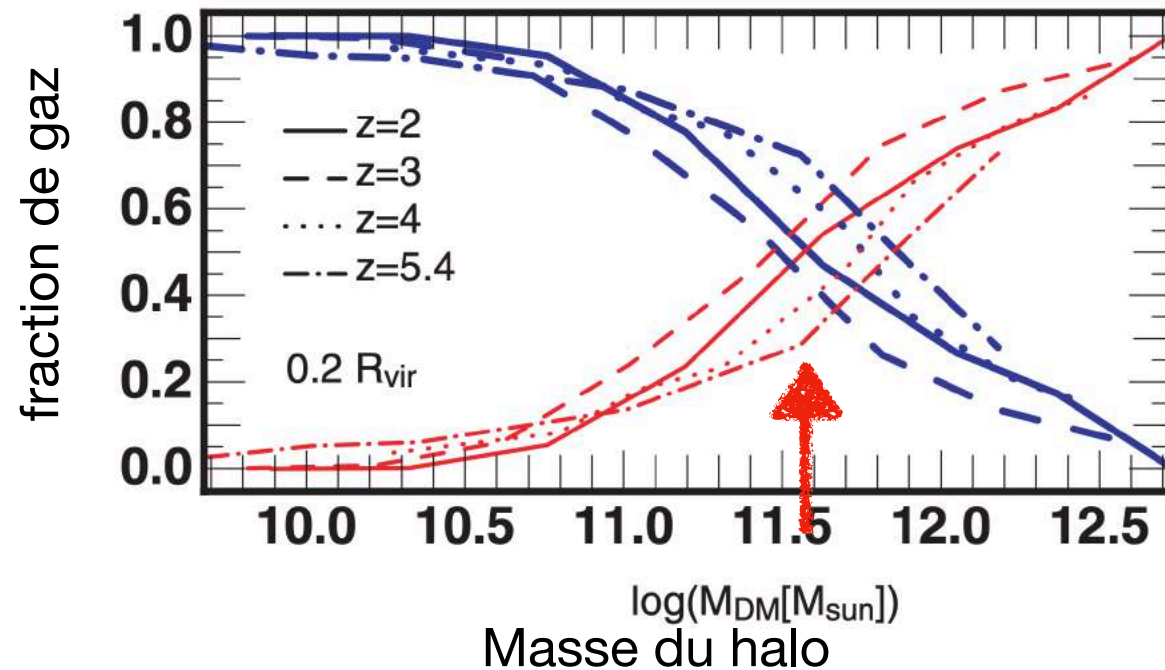
# La nature de l'accrétion de gaz sur les galaxies dépend de la masse

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

accrétion froide

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

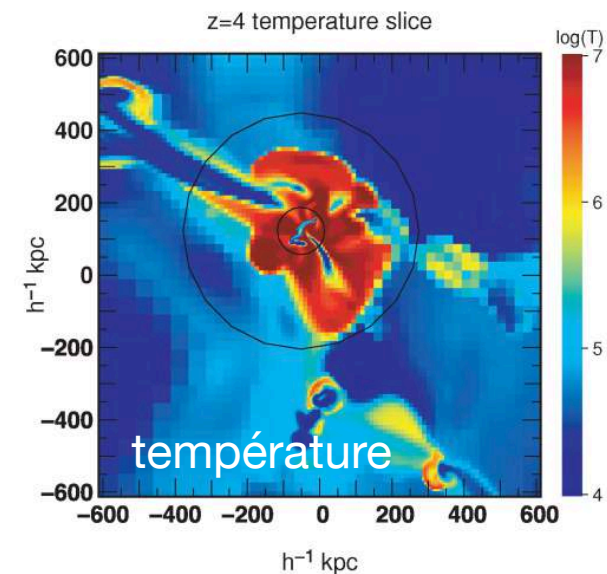
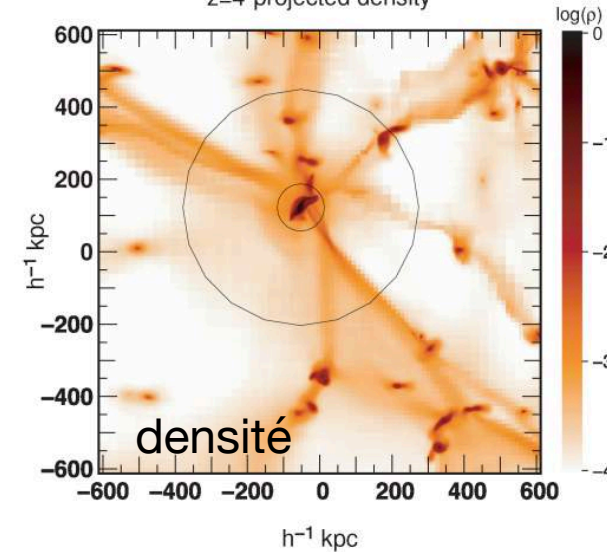
accrétion chaude



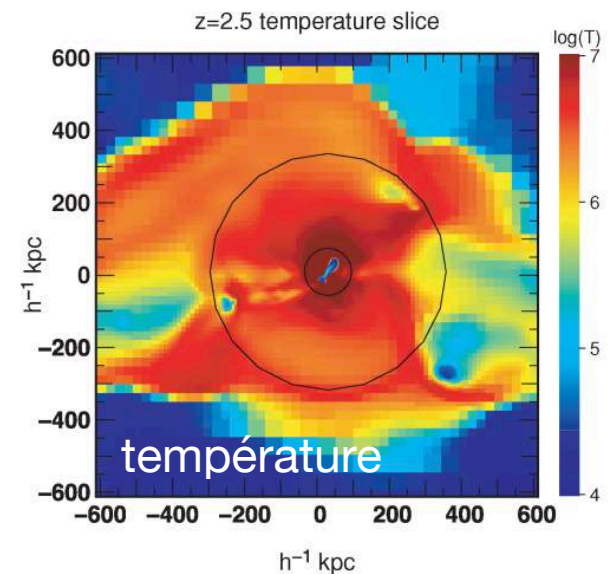
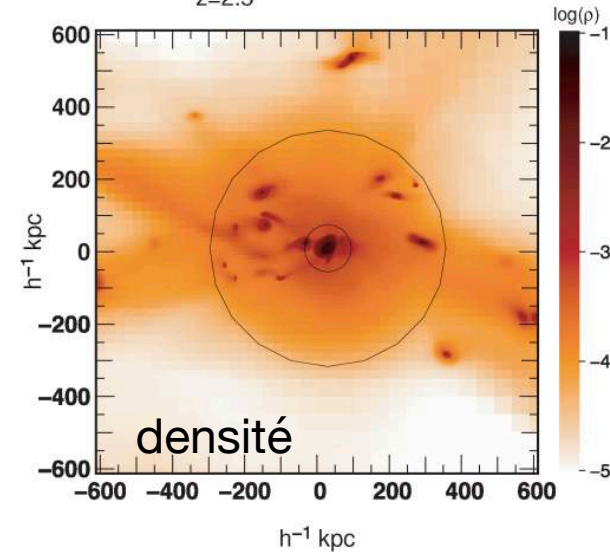
$$t_{\text{cool}} \propto T/\Lambda$$

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

accrétion froide  
z=4 projected density



accrétion chaude  
z=2.5



Ocvirk, Pichon & Teyssier 2008

Birnboim & Dekel 2003

Keres+ 2005

Dekel & Birnboim 2006

Dekel+ 2009

Nelson+ 2013

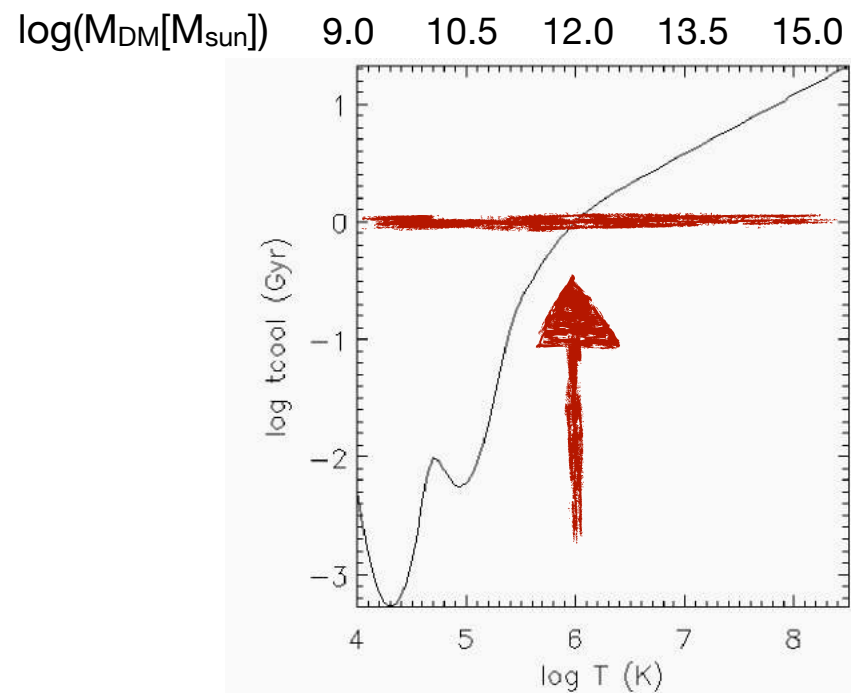
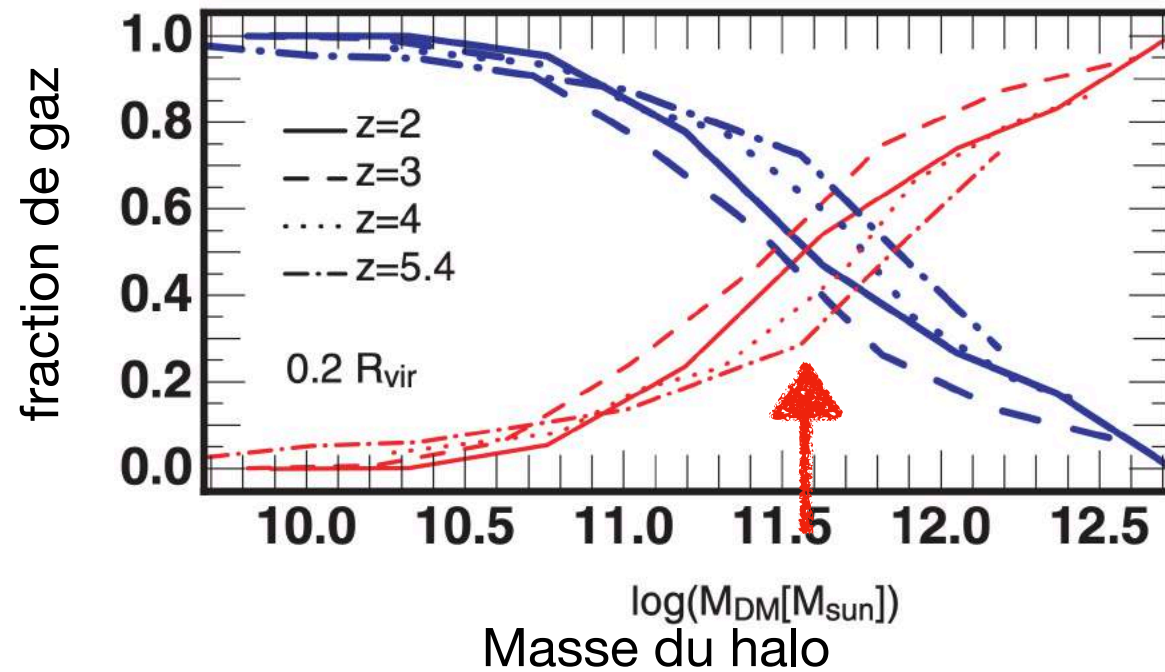
# La nature de l'accrétion de gaz sur les galaxies dépend de la masse

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

accrétion froide

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

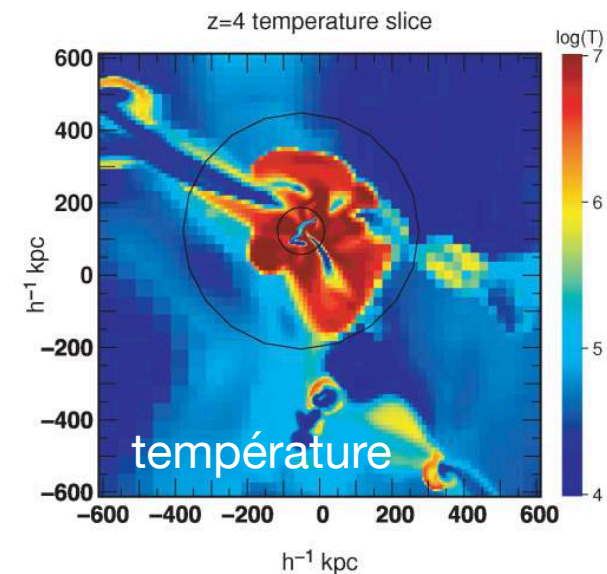
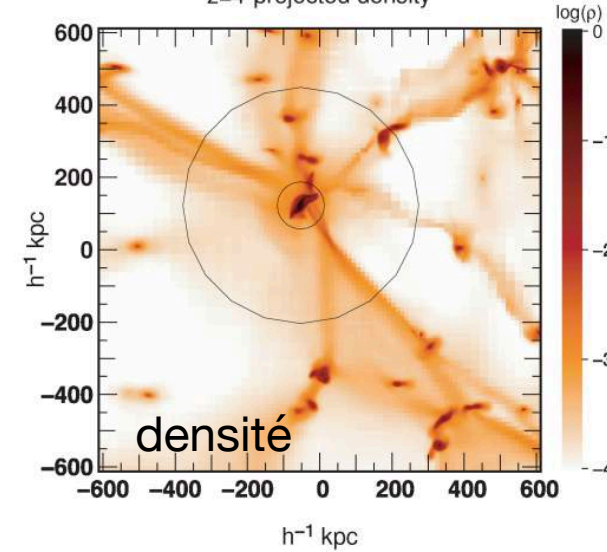
accrétion chaude



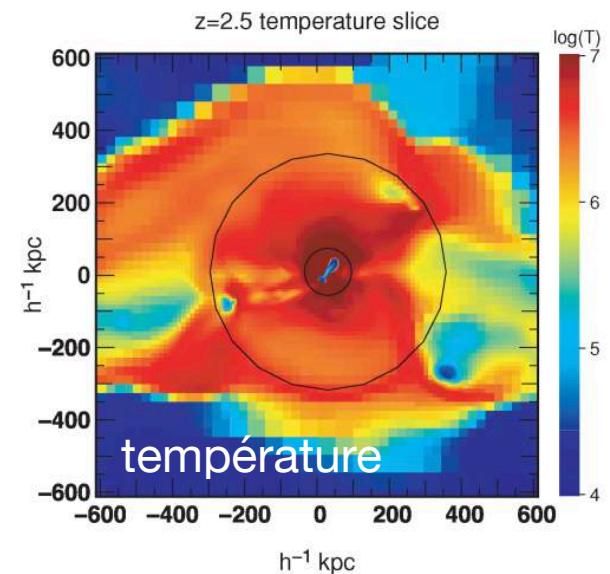
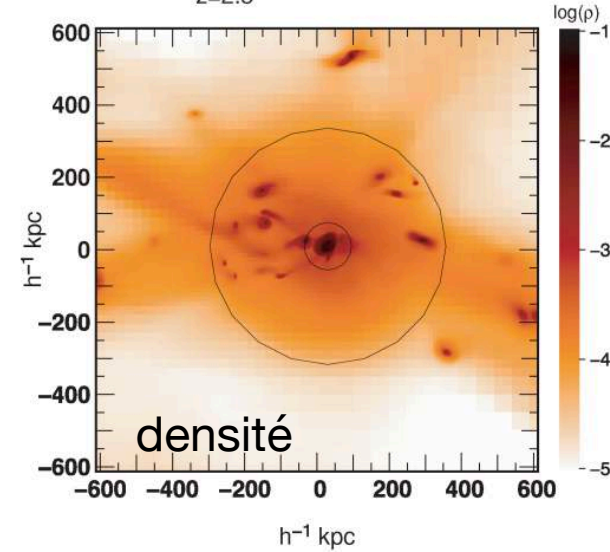
$$t_{\text{cool}} \propto T/\Lambda$$

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

accrétion froide  
 $z=4$  projected density



accrétion chaude  
 $z=2.5$



Ocvirk, Pichon & Teyssier 2008

Birnboim & Dekel 2003

Keres+ 2005

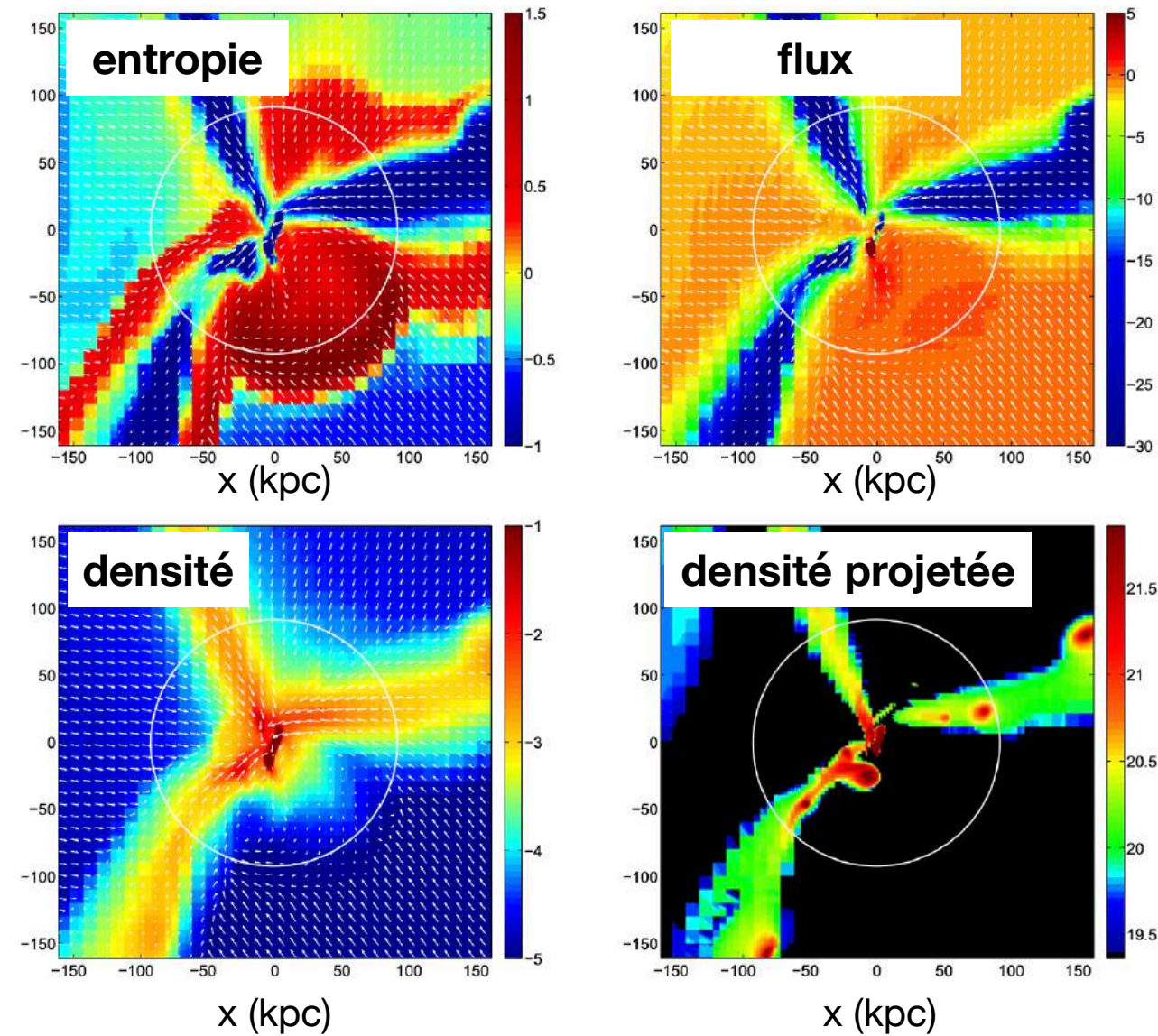
Dekel & Birnboim 2006

Dekel+ 2009

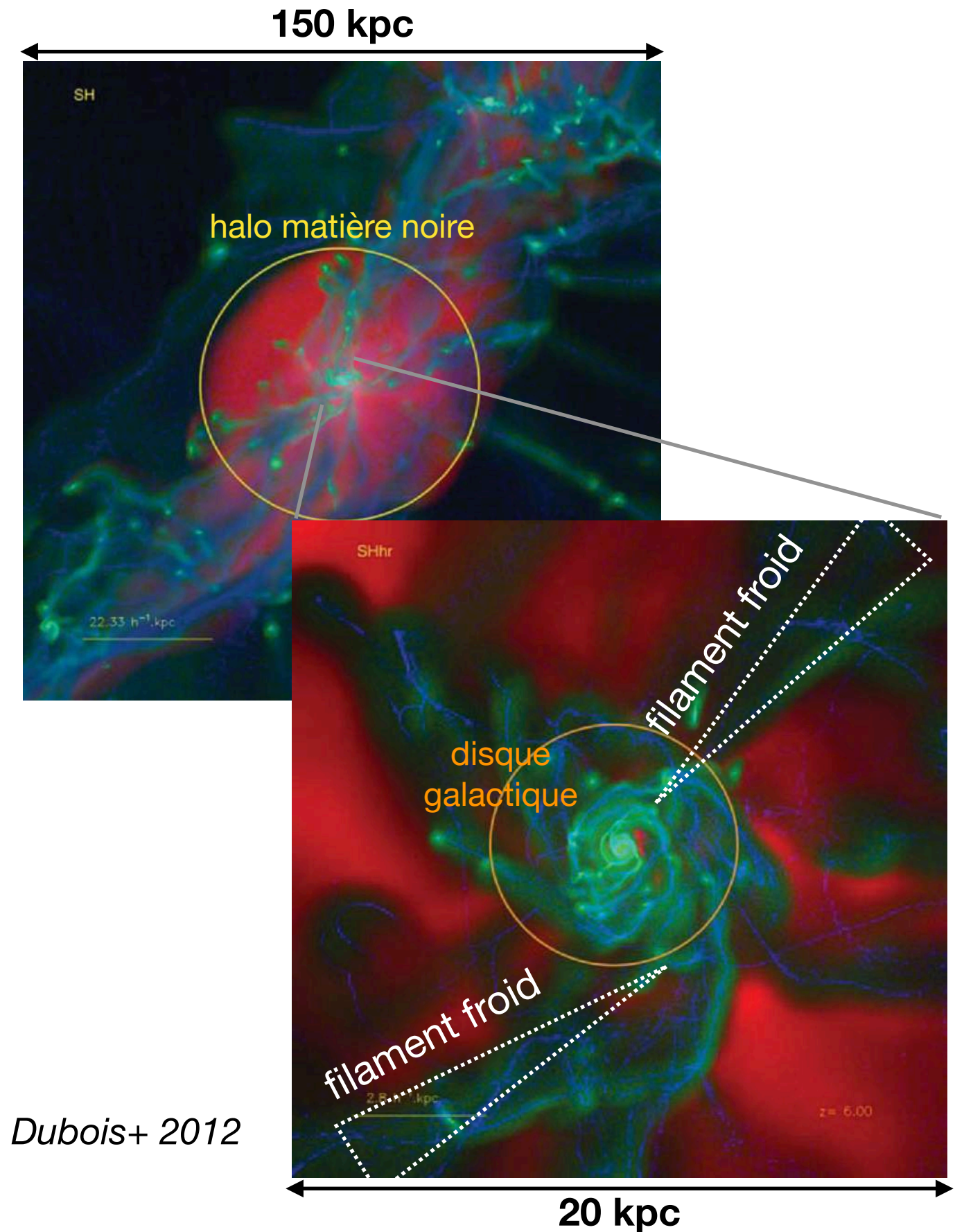
Nelson+ 2013



# Une accrétion filamentaire et froide nourrissant efficacement les disques



*Dekel+ 2009*

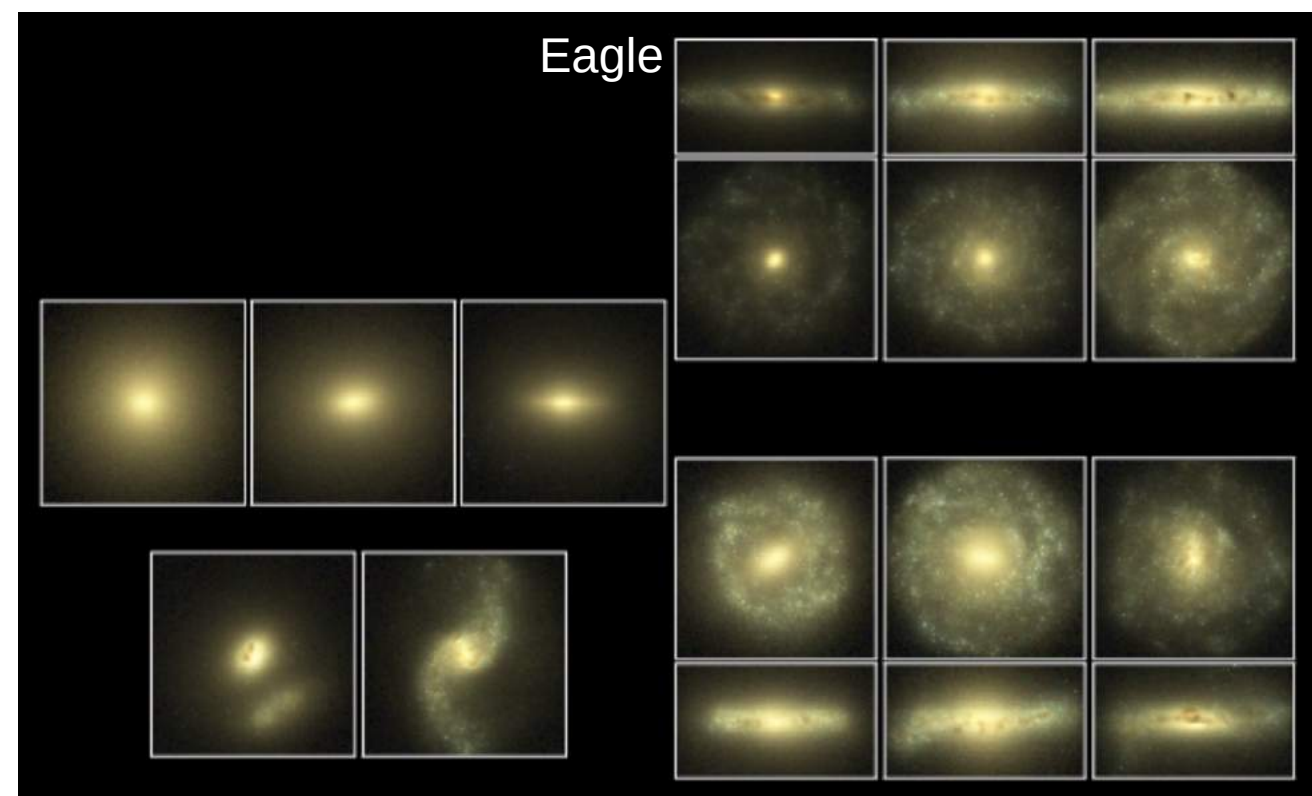
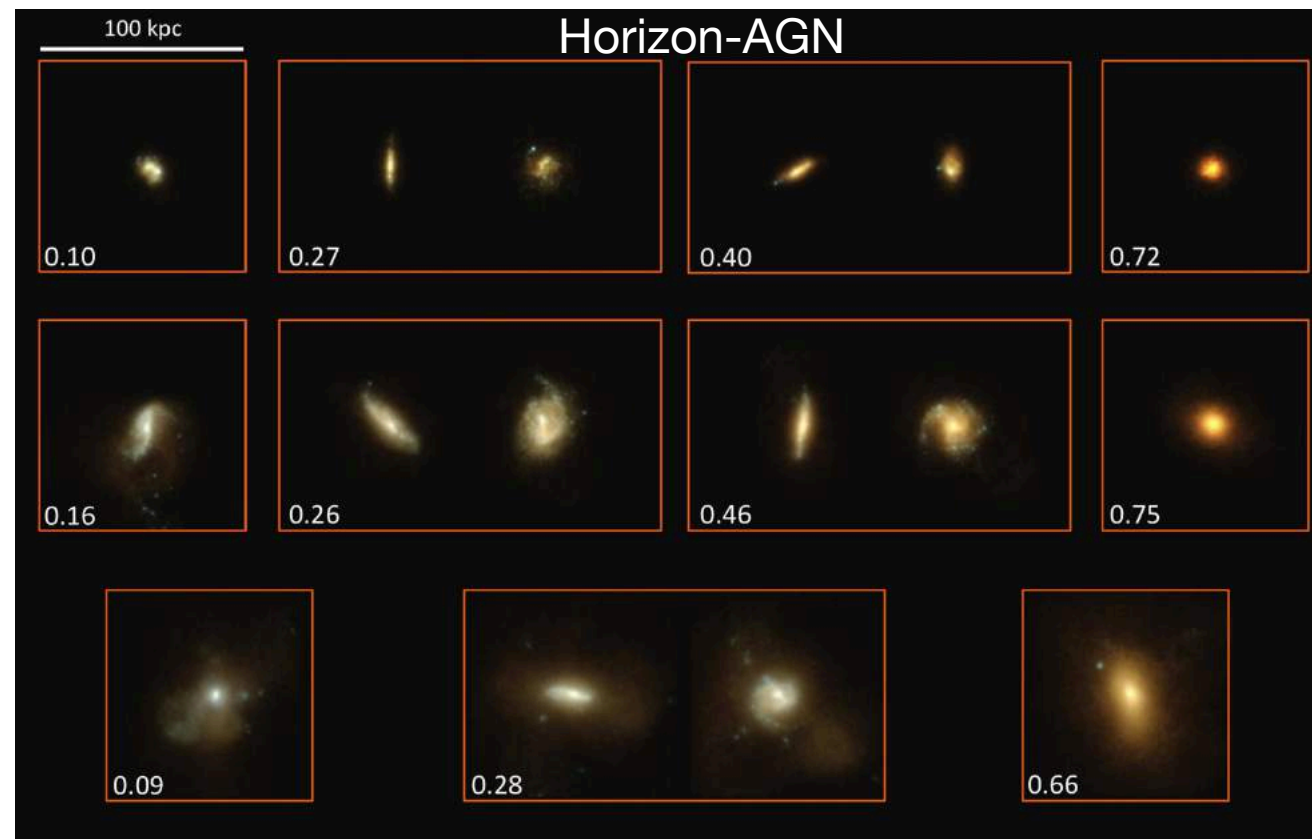


*Dubois+ 2012*



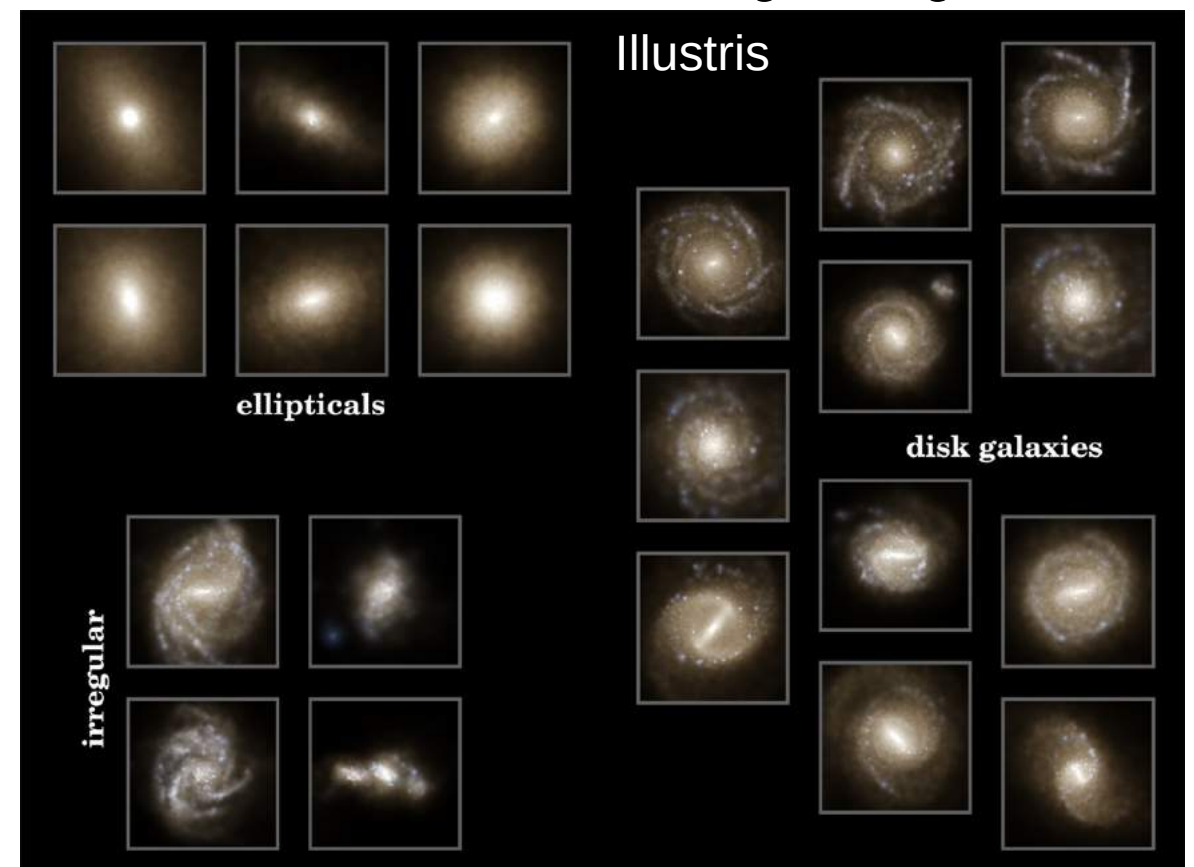
# Les galaxies simulées montrent une variété morphologique

*Dubois+ 2014*



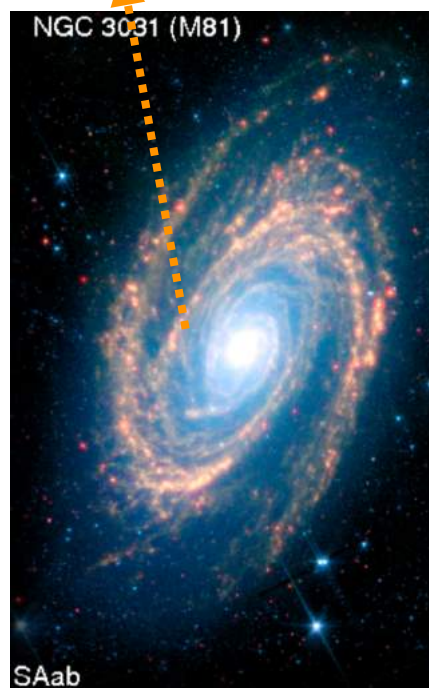
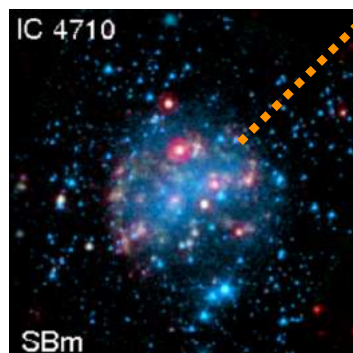
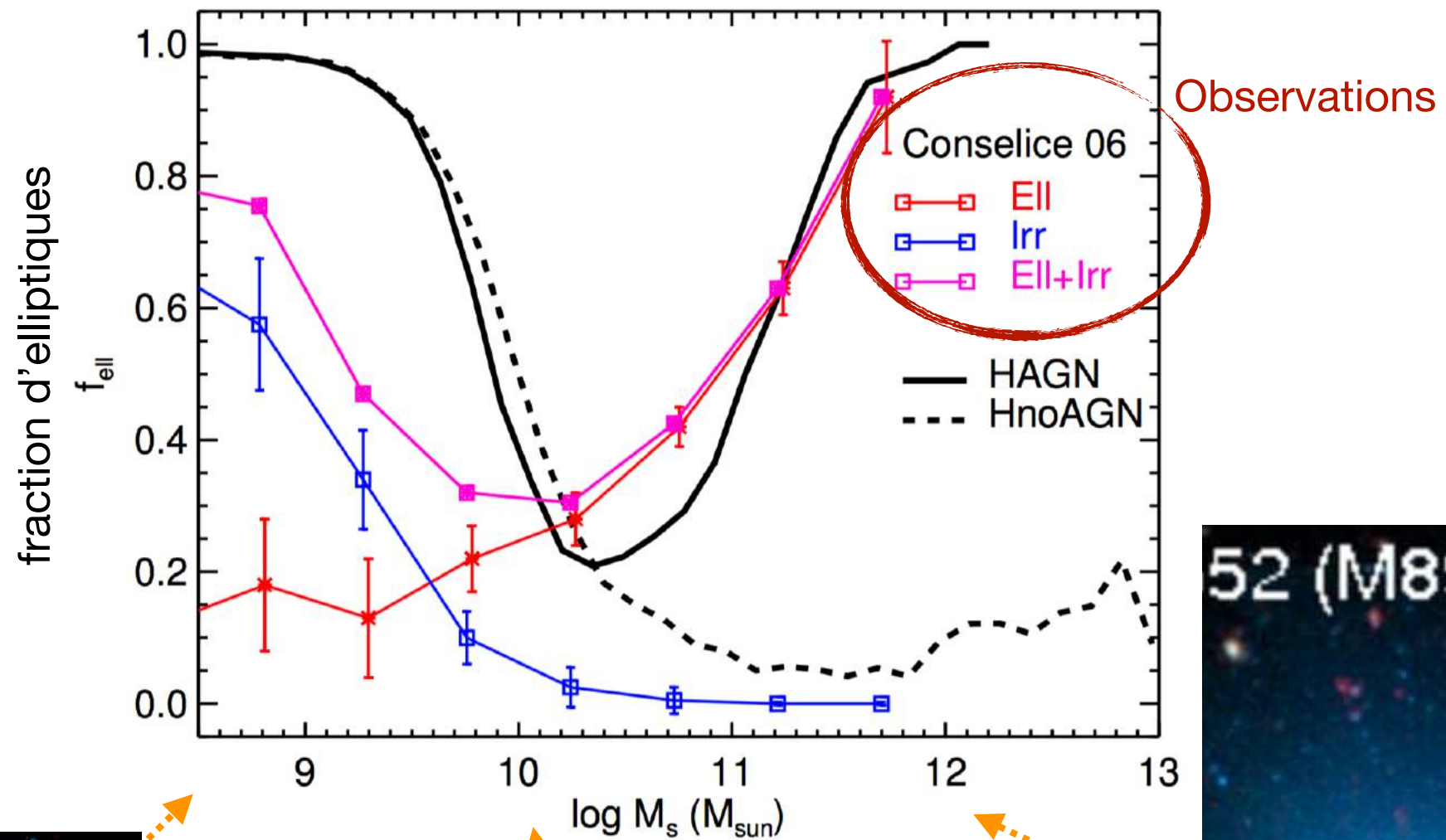
*Schaye+ 2014*

*Vogelsberger+ 2014*

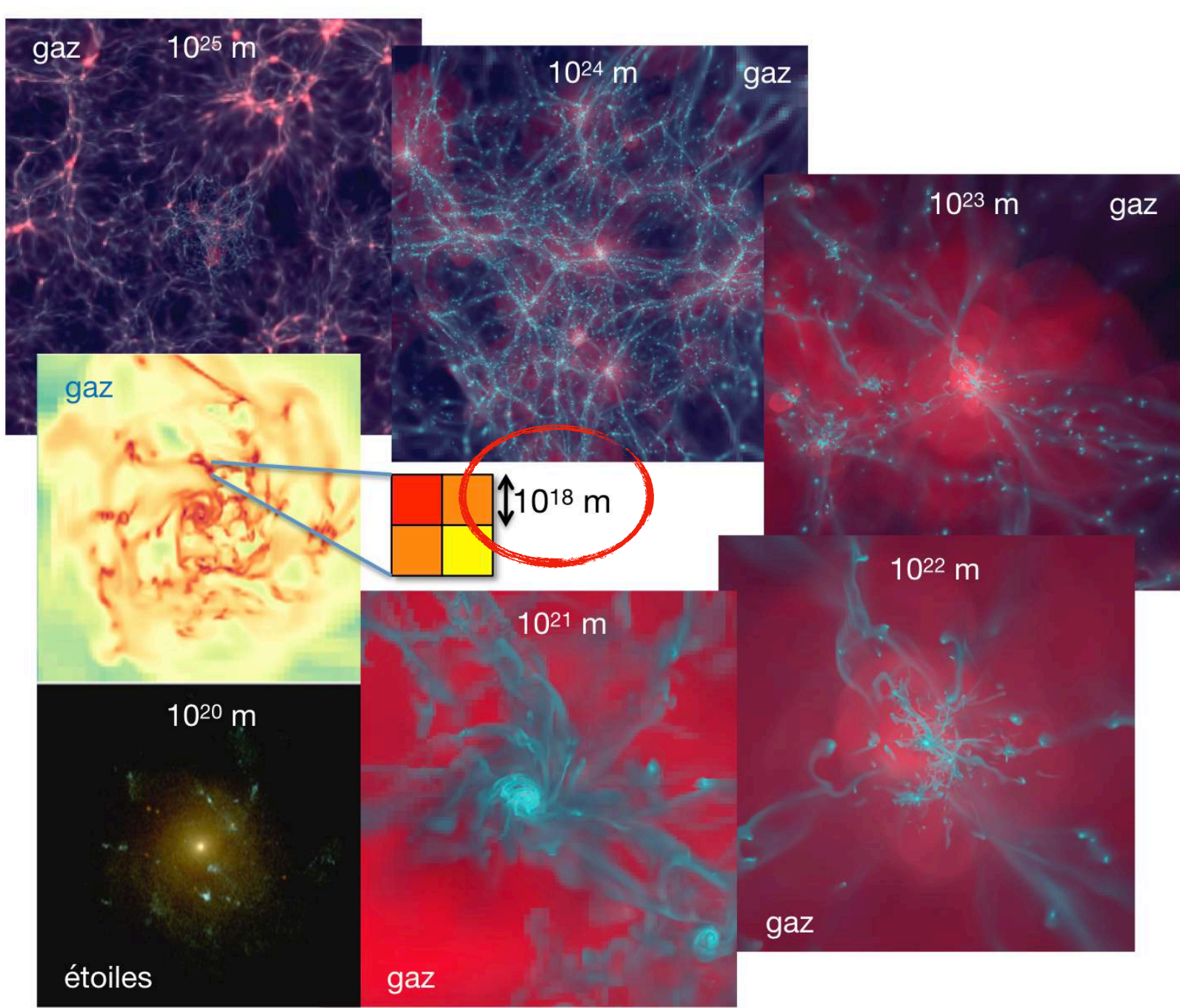




# Une ségrégation morphologique



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





# 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

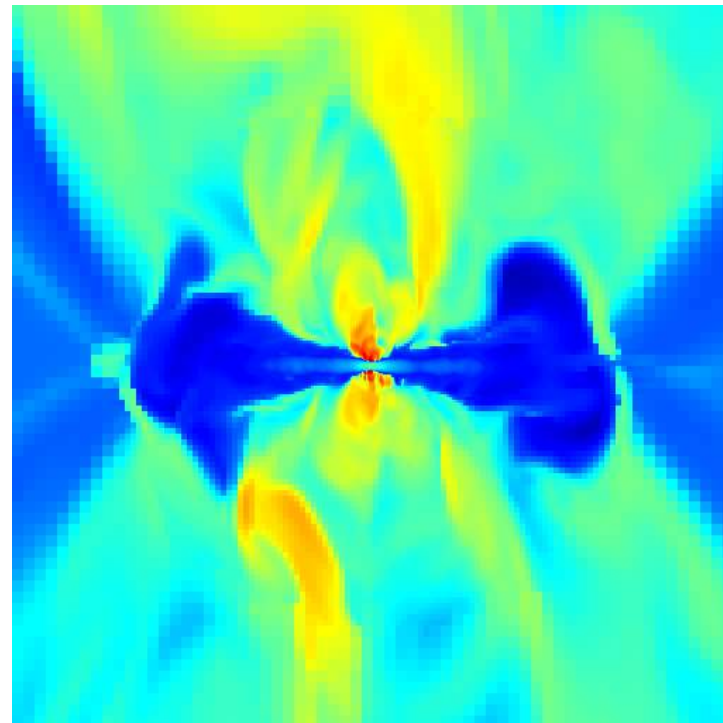
la formation d'étoiles



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  $\rho$

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\*

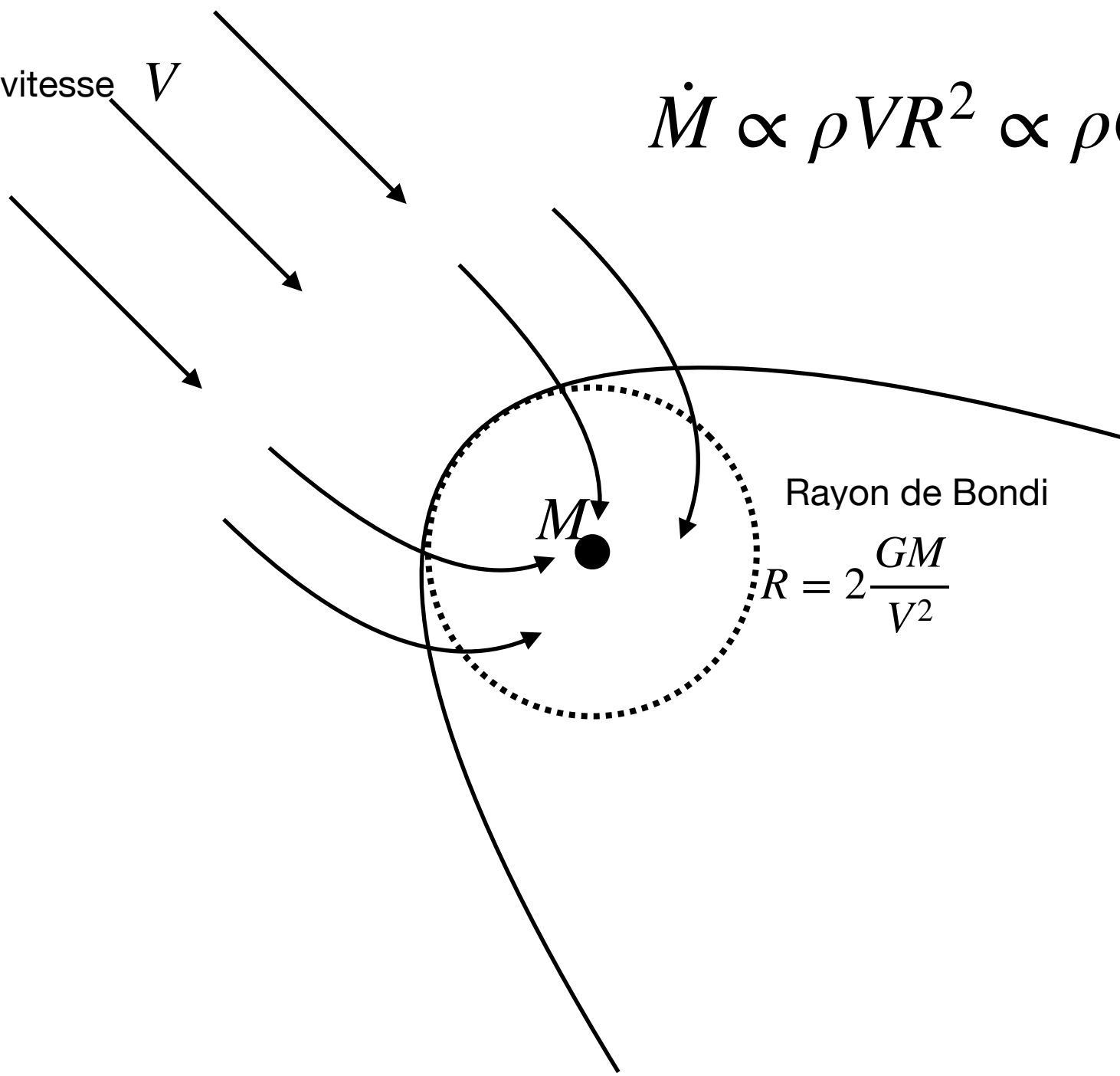
L'énergie libérée est proportionnelle au taux d'accrétion

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

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

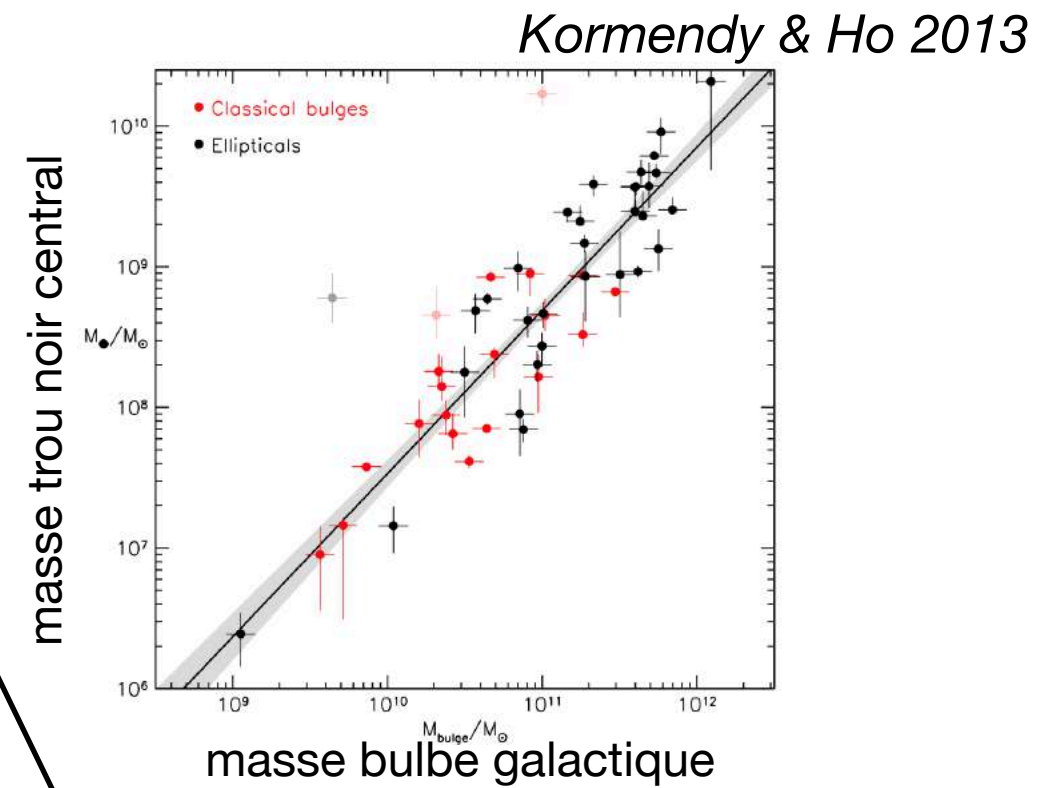
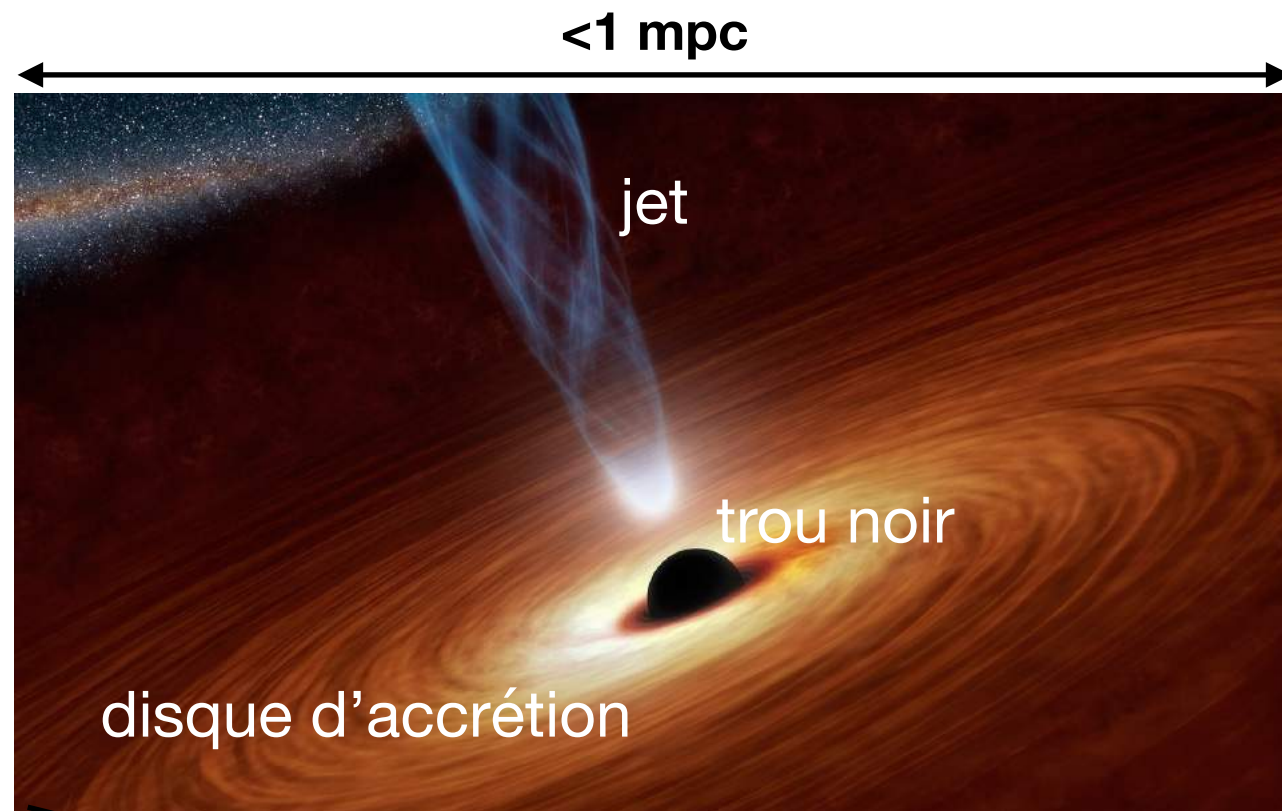
**La rétroaction du trou noir sur le gaz est d'autant plus forte que le gaz est dense et froid**

\*modulo un changement de pré-facteur



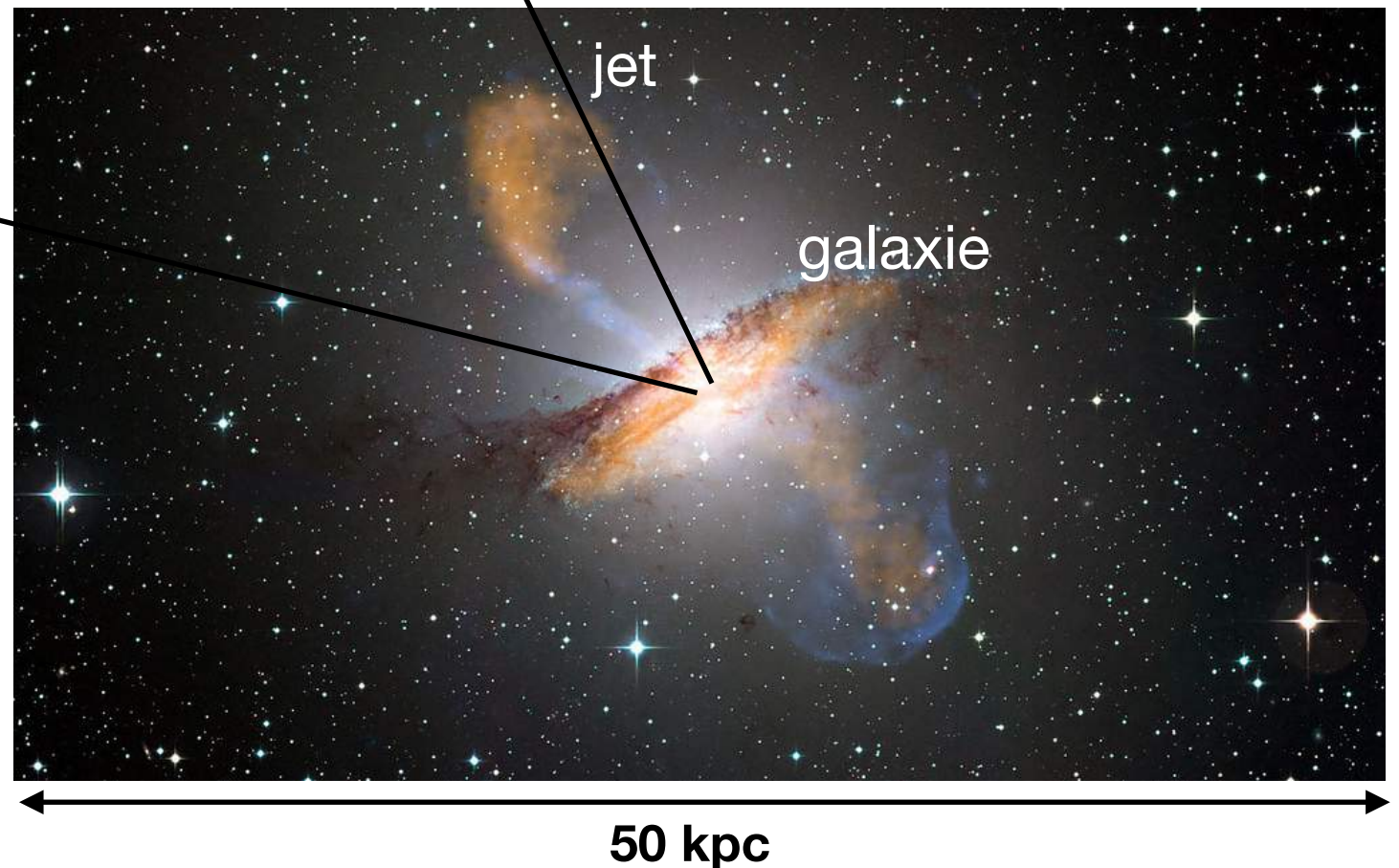


# Les trous noirs supermassifs et leur Noyau Actif de Galaxie (AGN)



$10^6$  plus petit

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

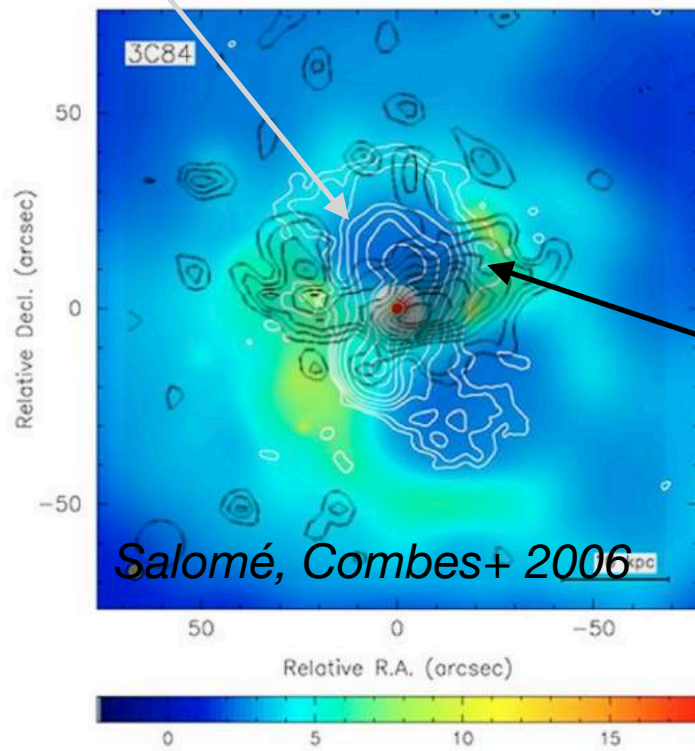




# Les trous noirs supermassifs et leurs jets

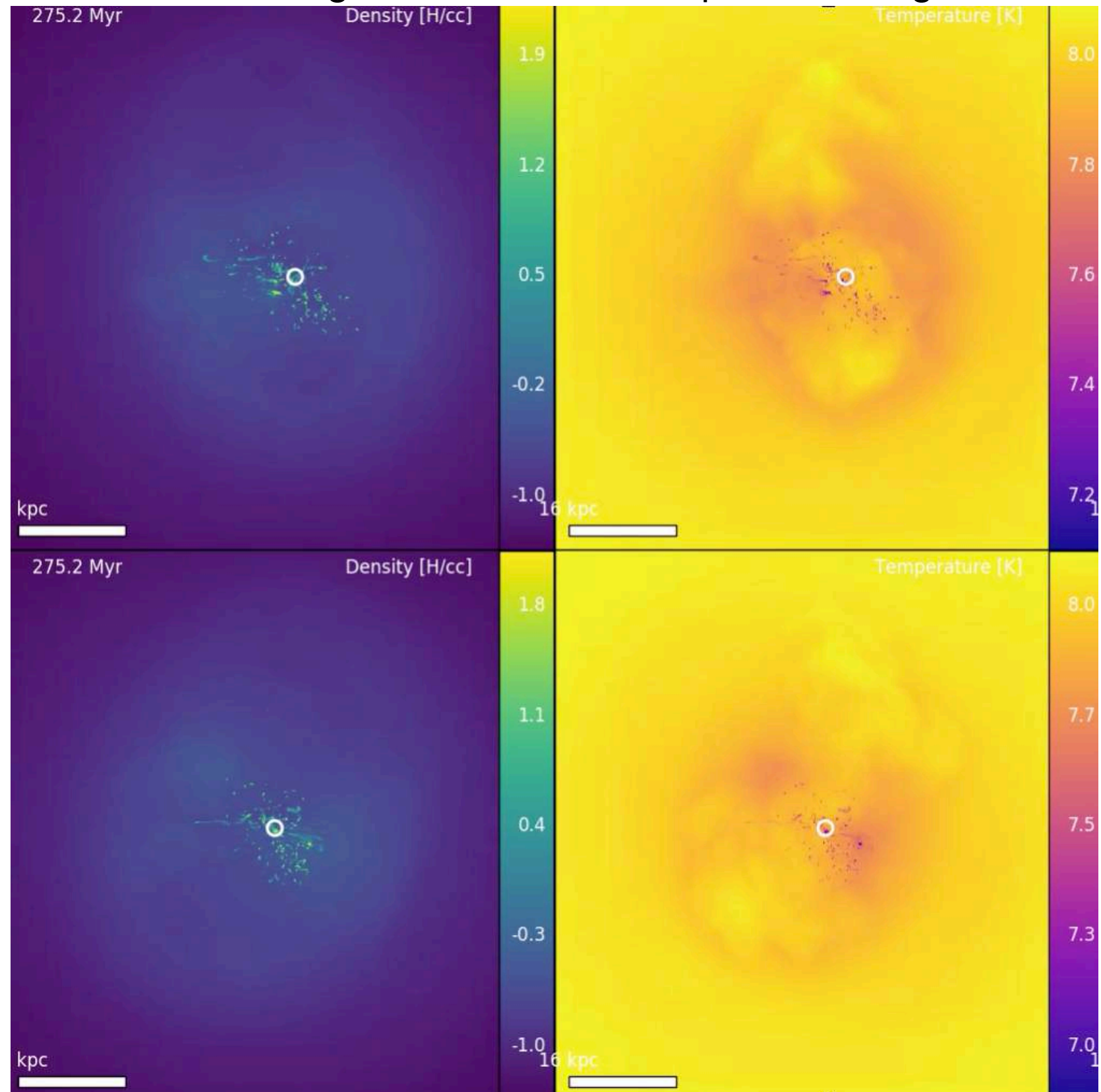
émission  
radio AGN

## Observations

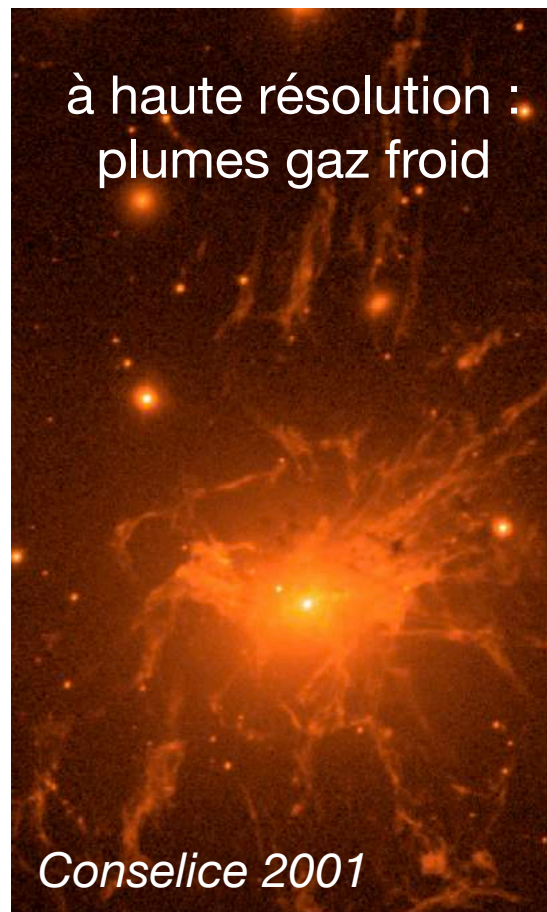


## Densité du gaz

## Température du gaz



à haute résolution :  
plumes gaz froid

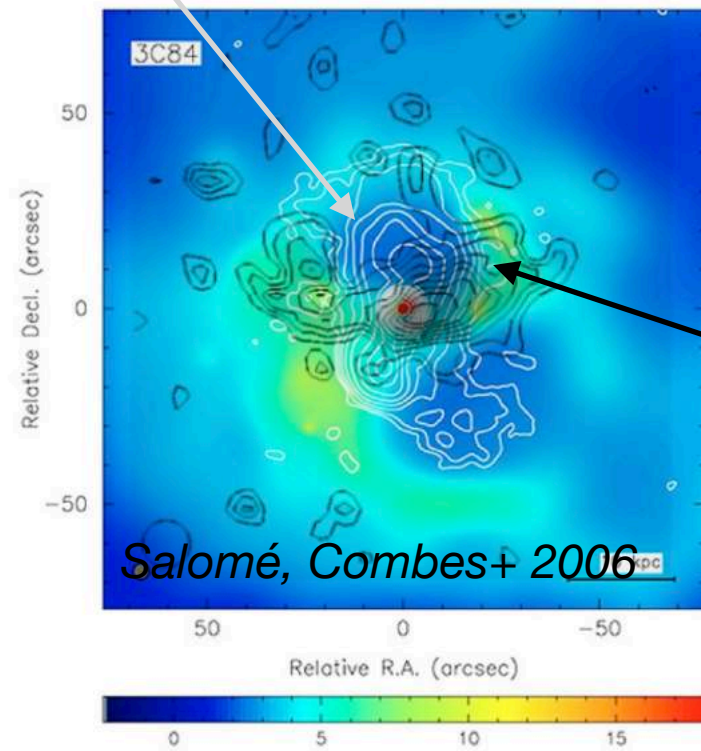




# Les trous noirs supermassifs et leurs jets

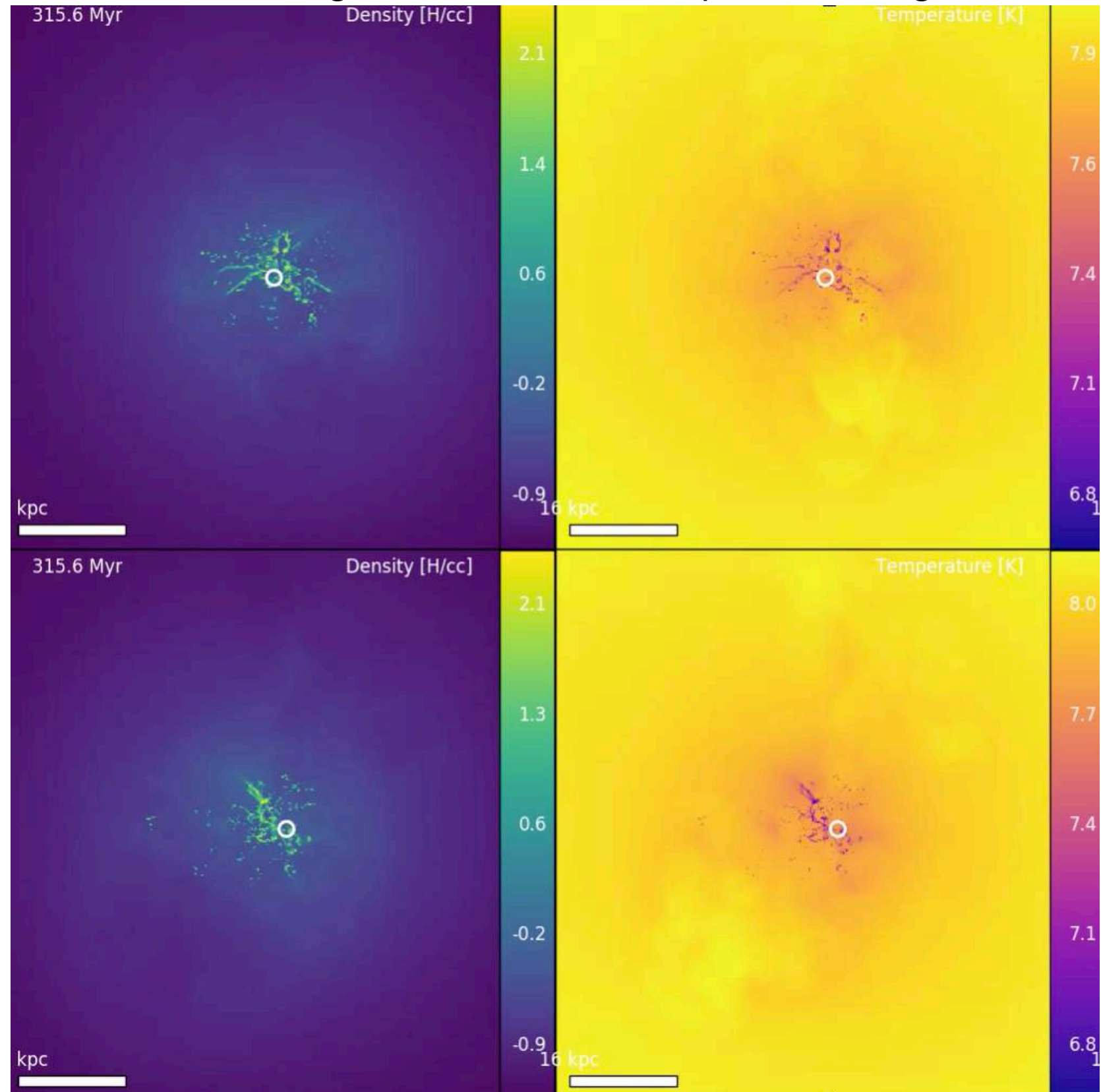
émission  
radio AGN

## Observations

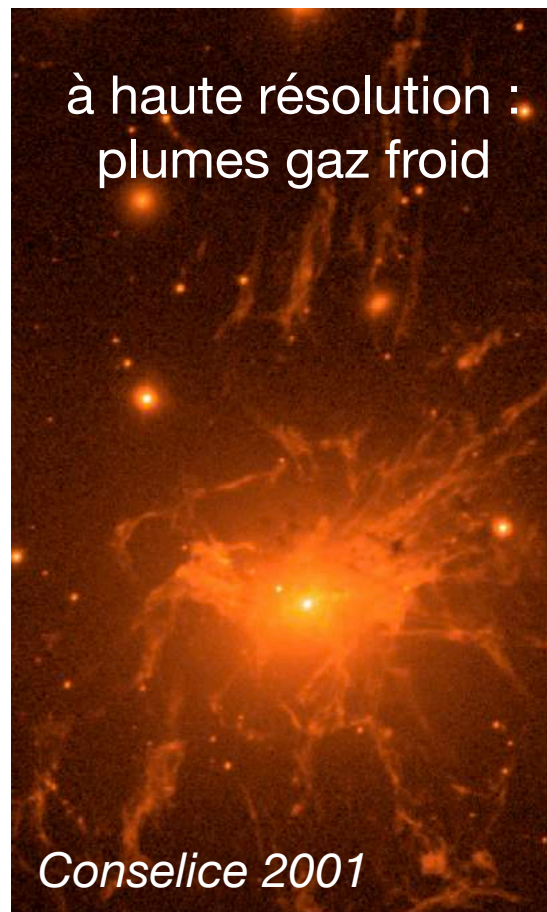


## Densité du gaz

## Température du gaz



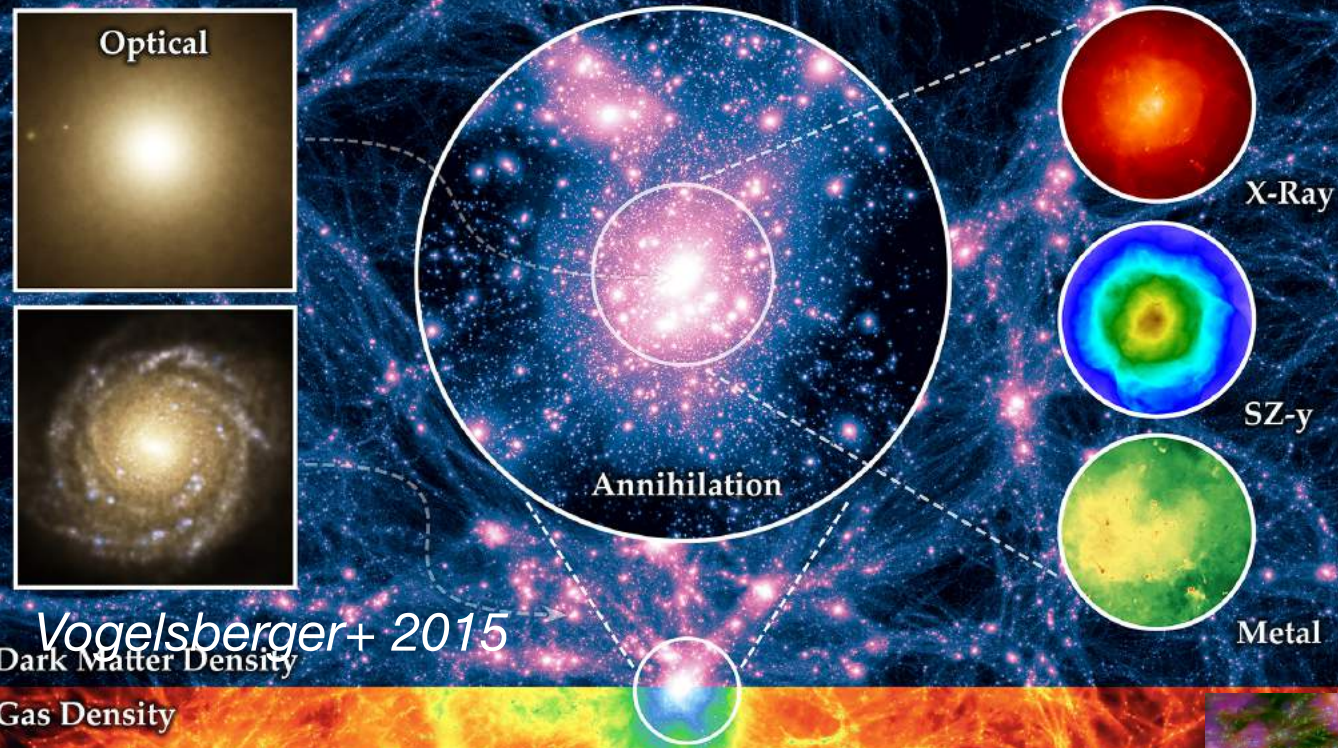
à haute résolution :  
plumes gaz froid





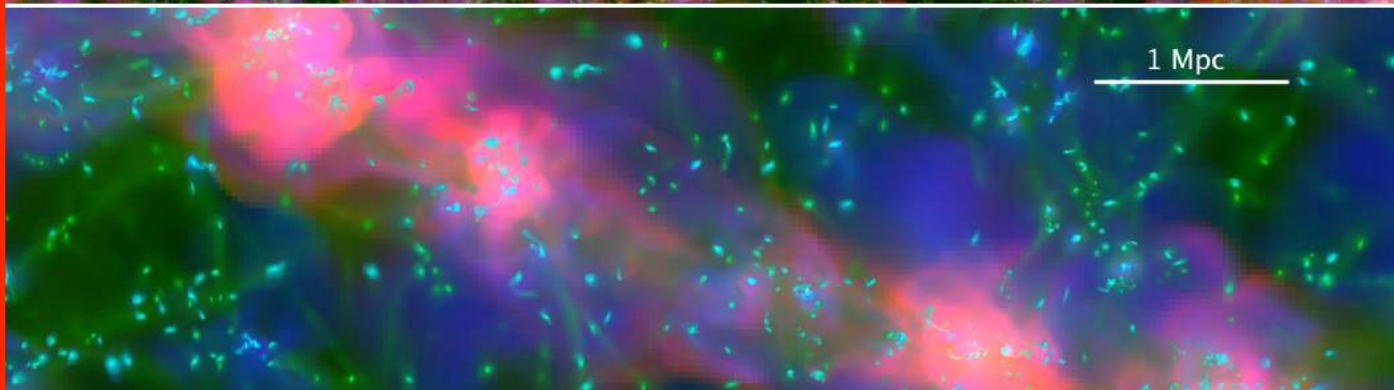
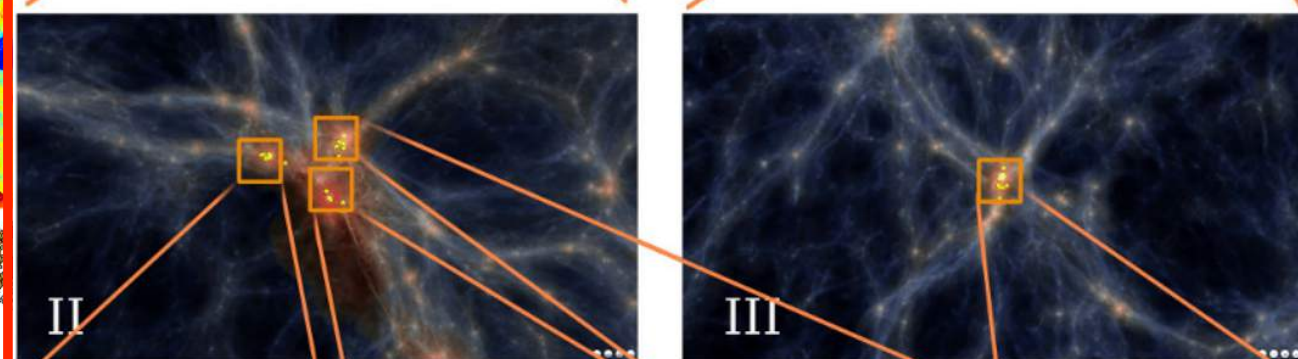
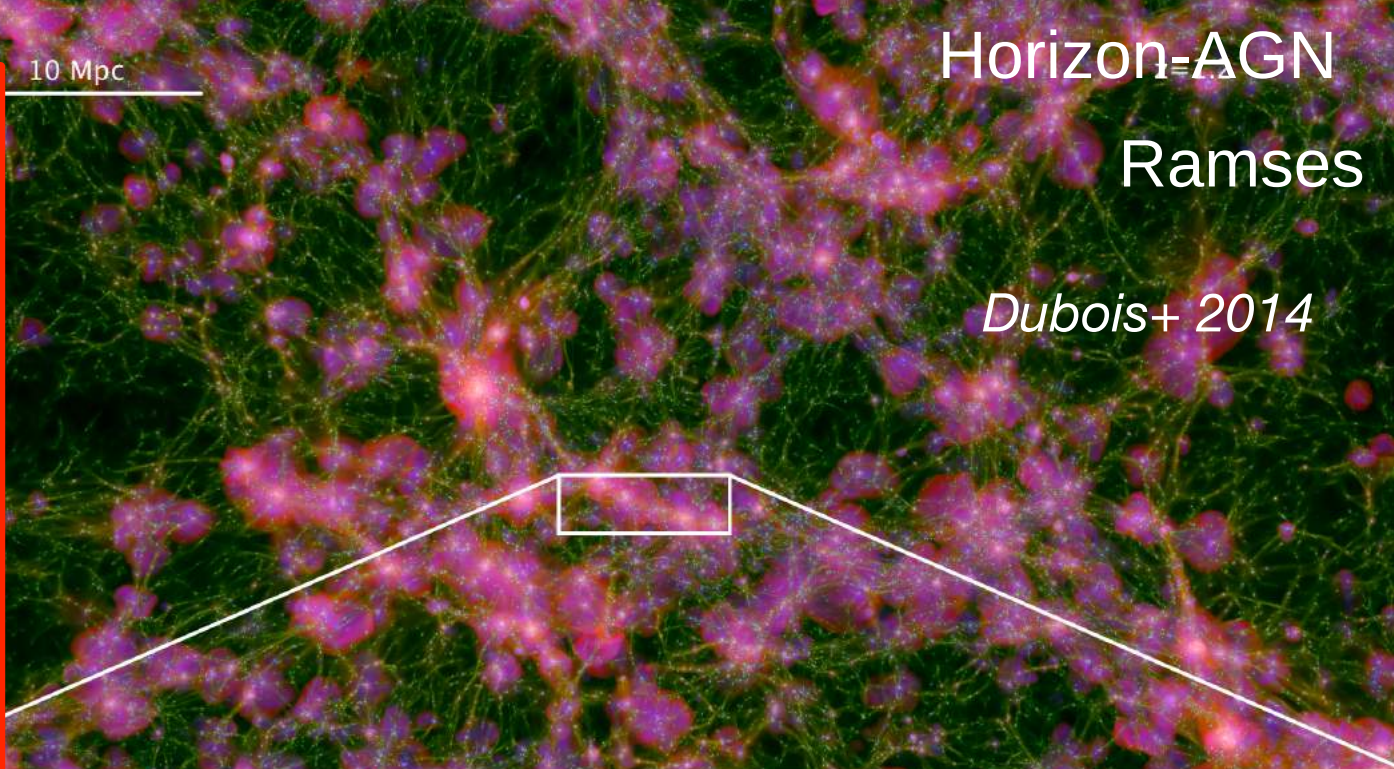
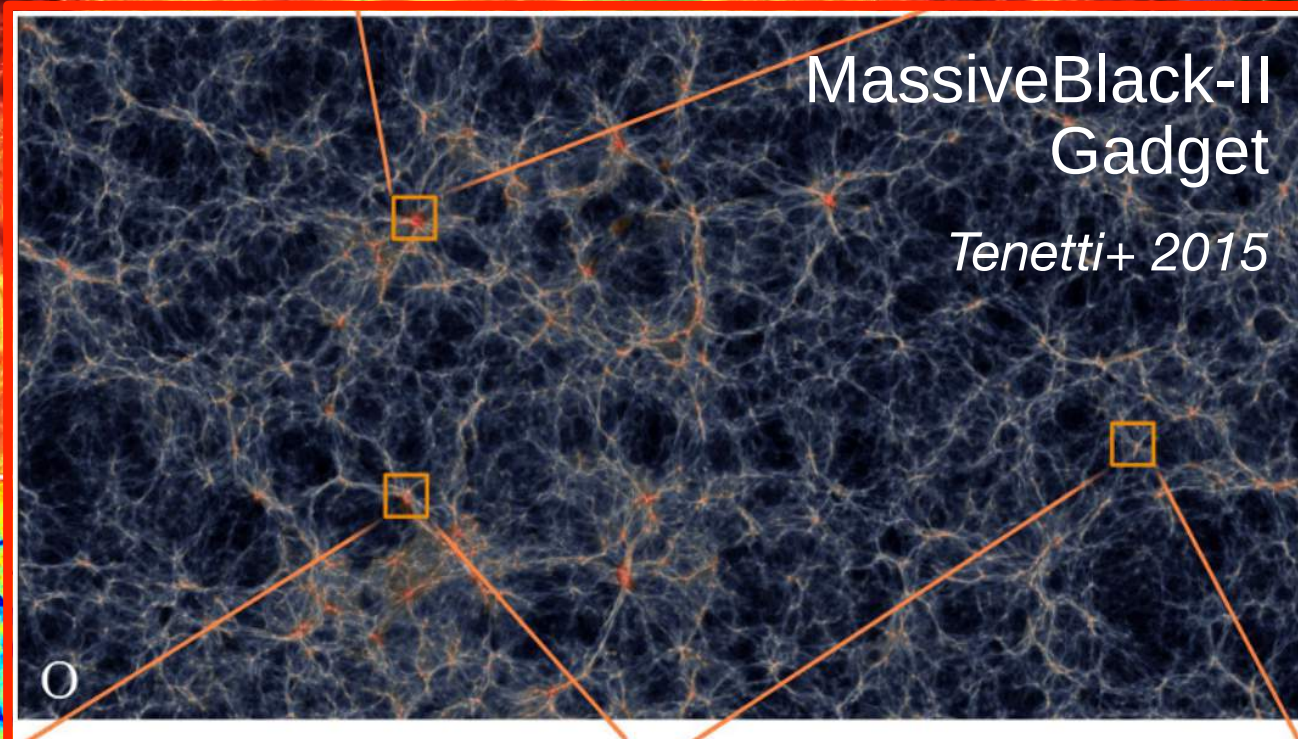
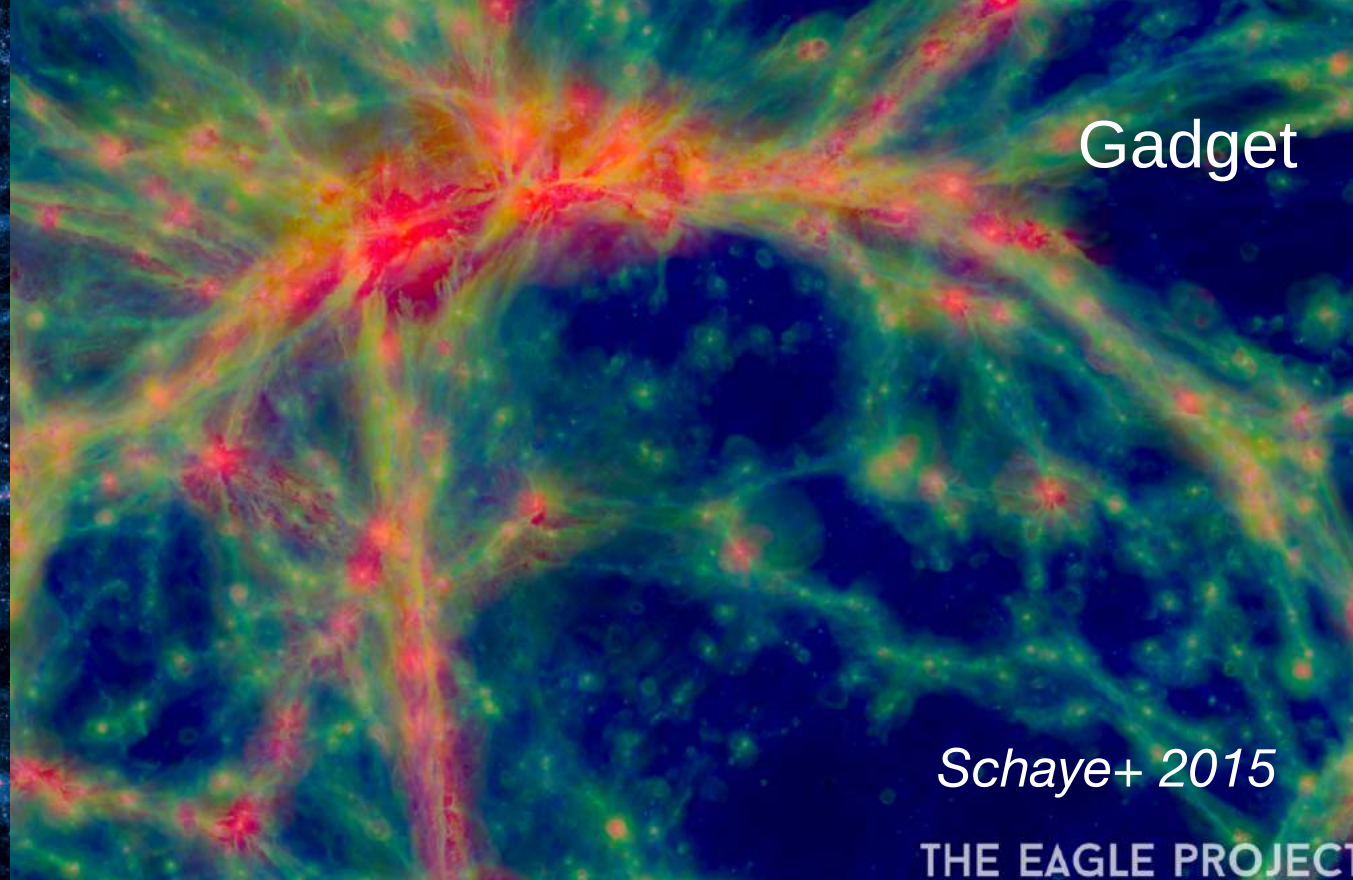
# The Illustris Simulation

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



Arepo

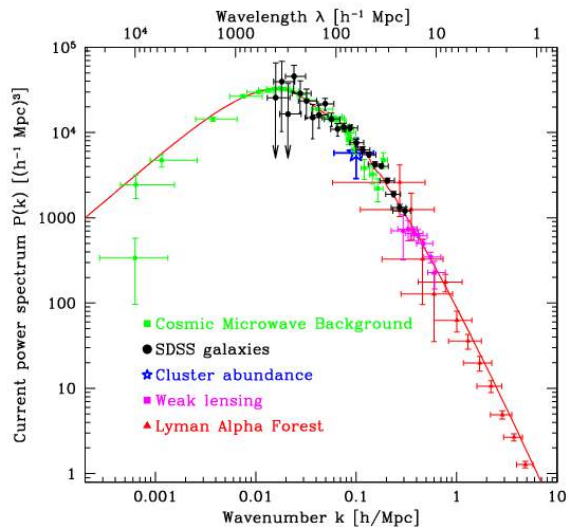
Gadget





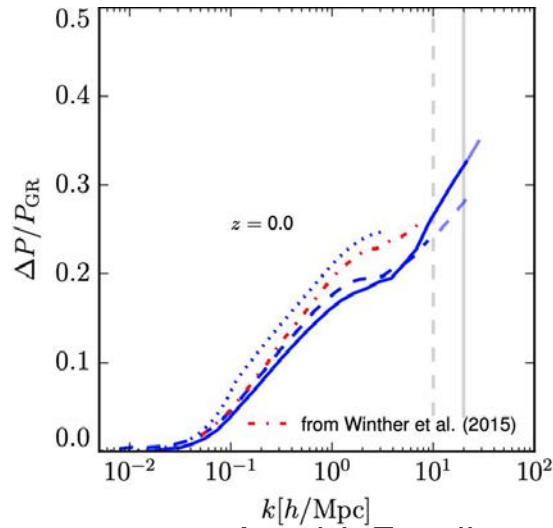
# La physique des baryons modifie la distribution de la matière

Observations



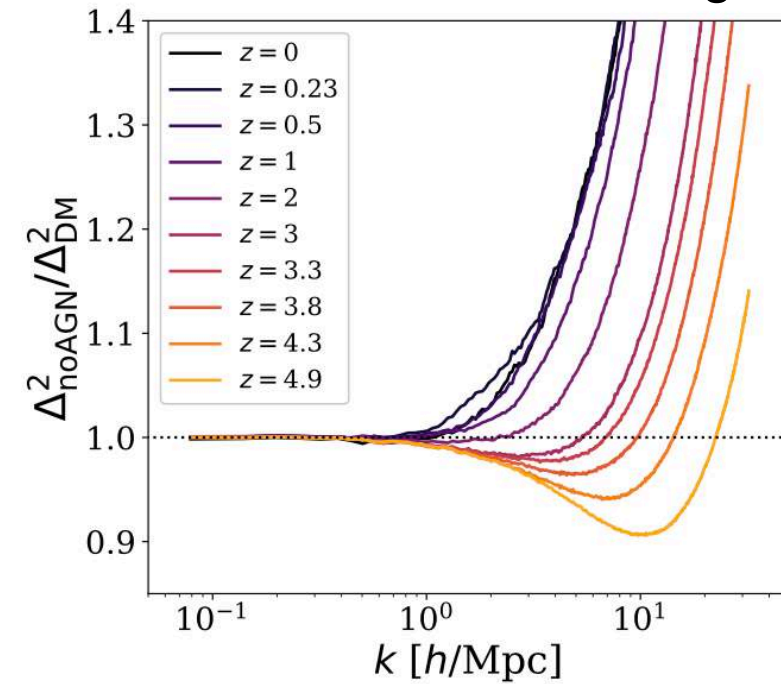
Tegmark+ 2004

Déviati cosmologie non-standard

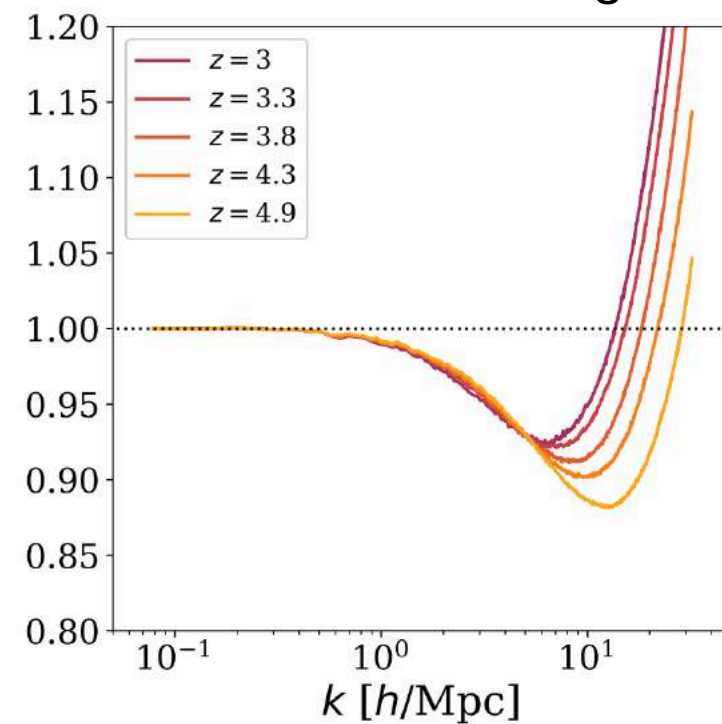
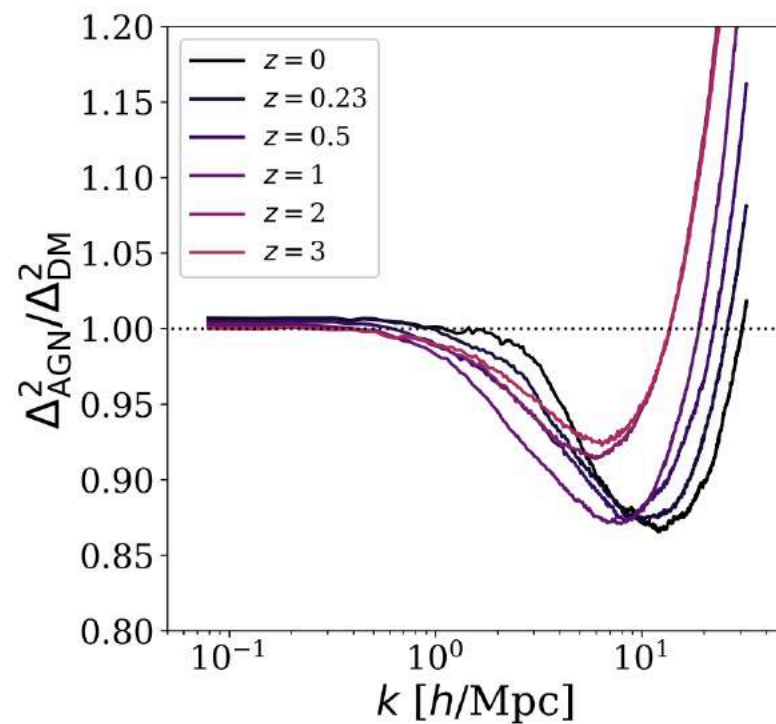


Arnold, Fosalba+ 2018

Simulation sans AGN versus simulation sans gaz



Simulation avec des AGN versus simulation sans gaz



voir aussi :

van Daalen+ 2011

Vogelsberger+ 2014

Hellwing+ 2016

Springel+ 2017

Chisari+ 2018

# Les AGN changent la morphologie des galaxies ?

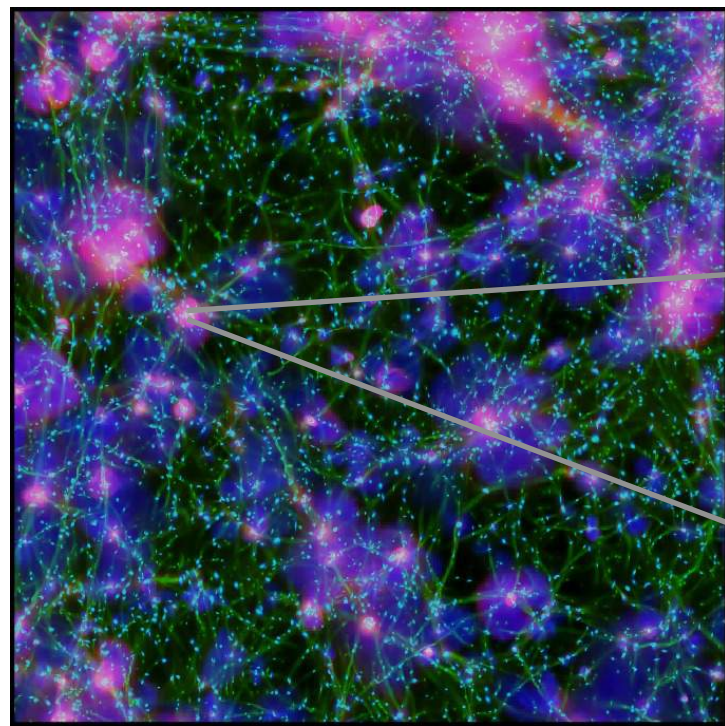
Les mêmes galaxies simulées

avec AGN

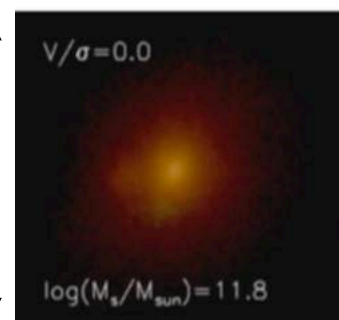
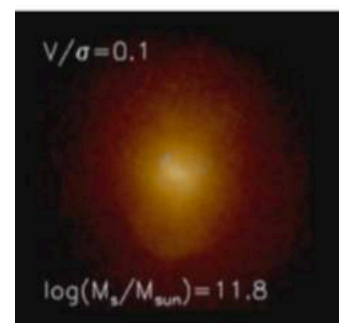
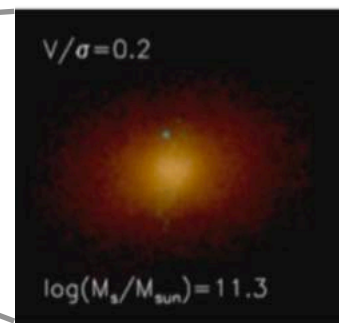
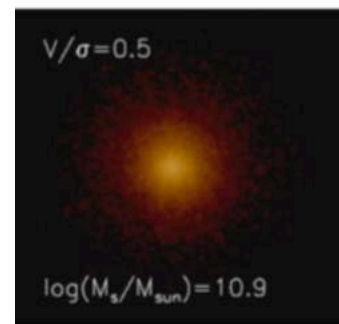
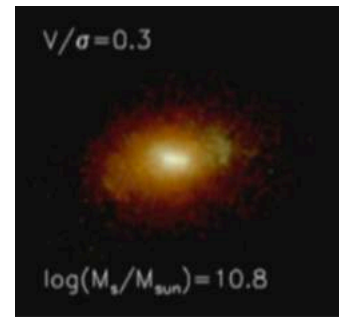
sans AGN

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

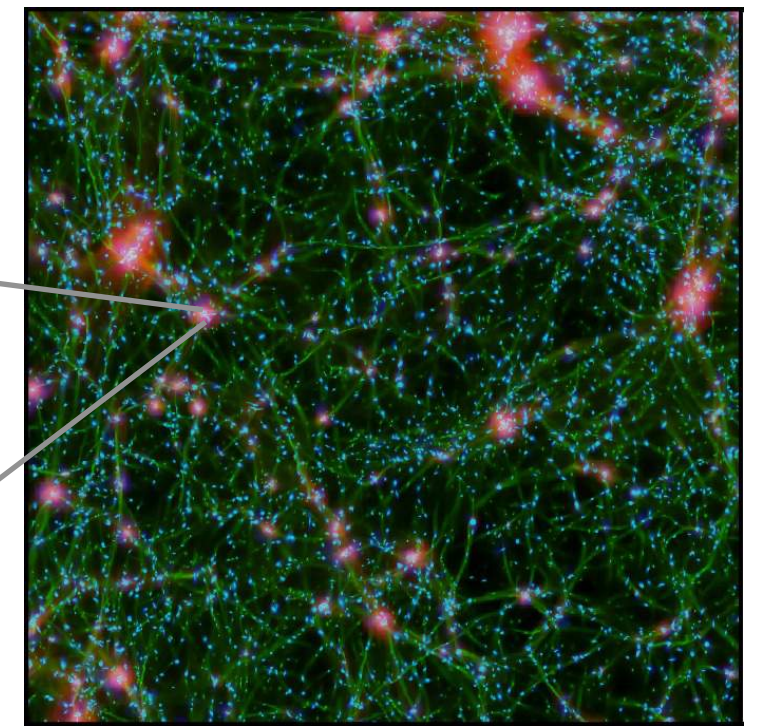
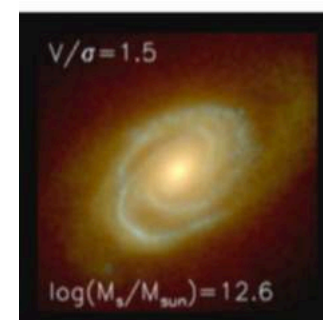
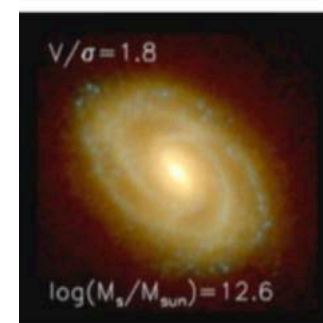
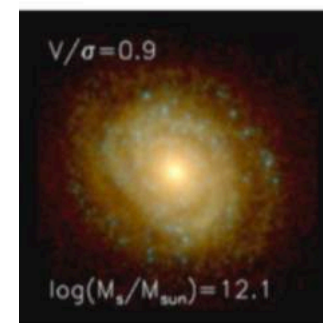
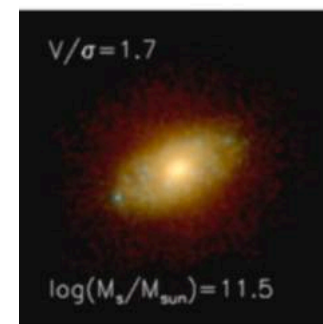
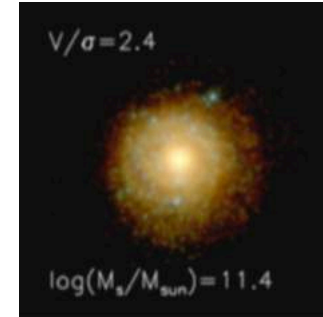
sans AGN  
(cas non réaliste d'un  
univers sans trous noirs)



25 Mpc



100 kpc



25 Mpc



# La densité de galaxies est plus grande autour des galaxies massives

Un amas de galaxies

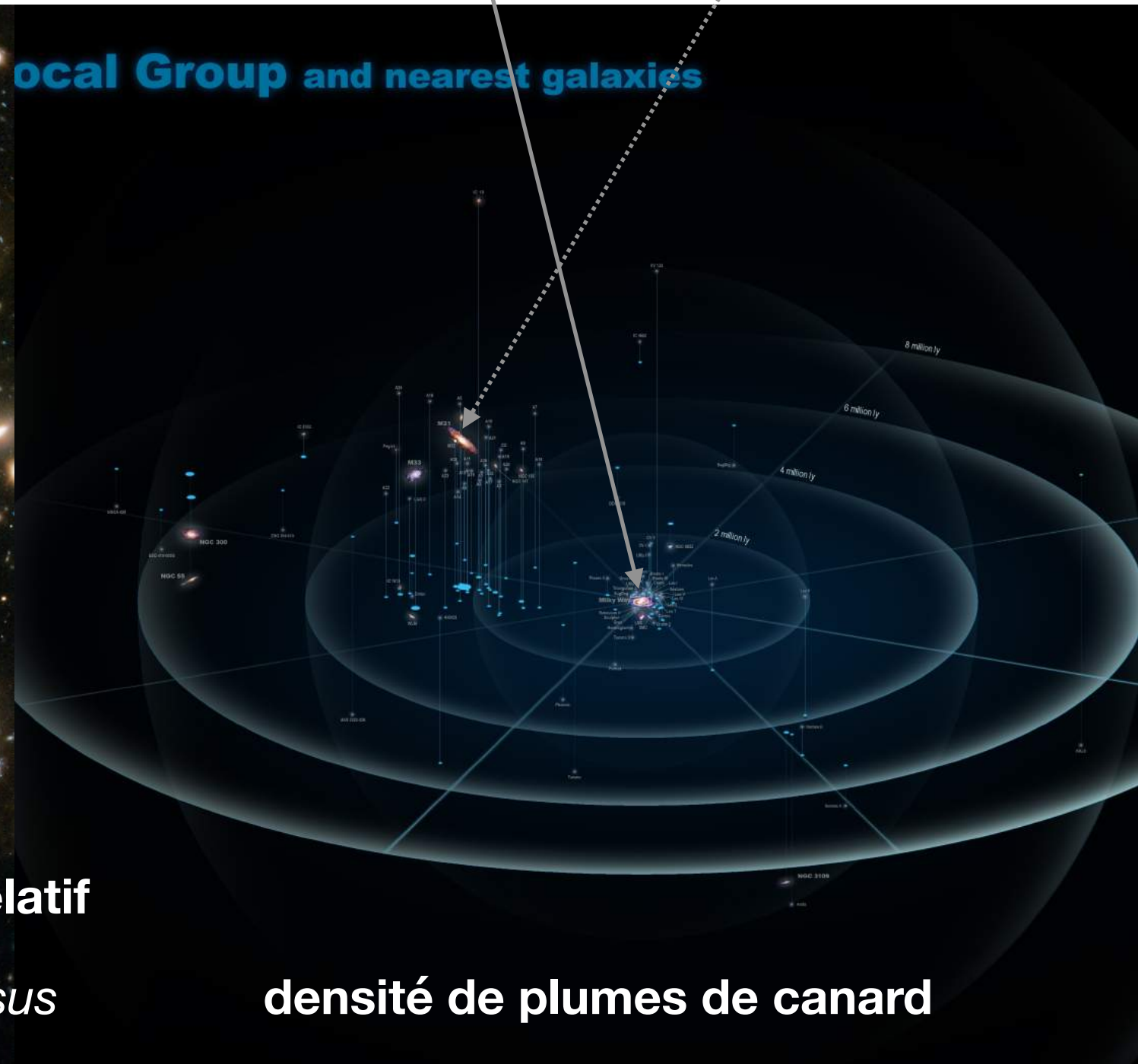


**densité du plomb**

**en relatif**

*versus*

La Voie Lactée et Andromède



**densité de plumes de canard**

Les fusions entre galaxies y  
sont plus nombreuses

**Les fusions de galaxies transforment les disques en sphéroïdes  
(ici collision Voie Lactée avec Andromède)**





**Les fusions de galaxies transforment les disques en sphéroïdes  
(ici collision Voie Lactée avec Andromède)**



**Les fusions de galaxies transforment les disques en sphéroïdes  
(ici collision Voie Lactée avec Andromède)**





**Les fusions de galaxies transforment les disques en sphéroïdes  
(ici collision Voie Lactée avec Andromède)**



# Les fusions de galaxies transforment les disques en sphéroïdes (ici collision Voie Lactée avec Andromède)

extrait du film

« À la rencontre d'Andromède »

*une création originale du Planétarium de la Cité des sciences et de l'industrie*

production : Cyril Birnbau

conception & scénario : Brigitte Davidm

réalisation & post-production : Roberto D'Alessandro

simulation collision galactique : Yohan Dubois

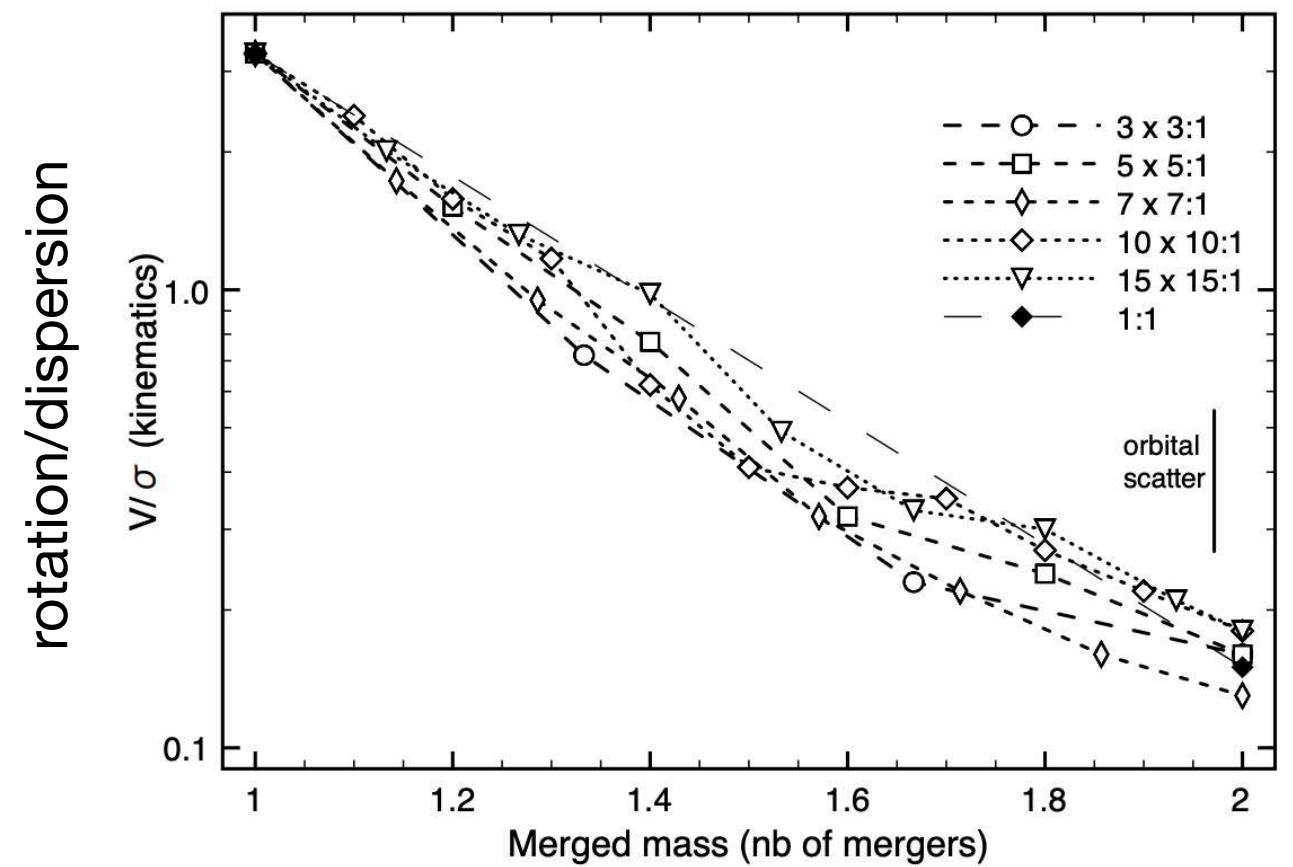
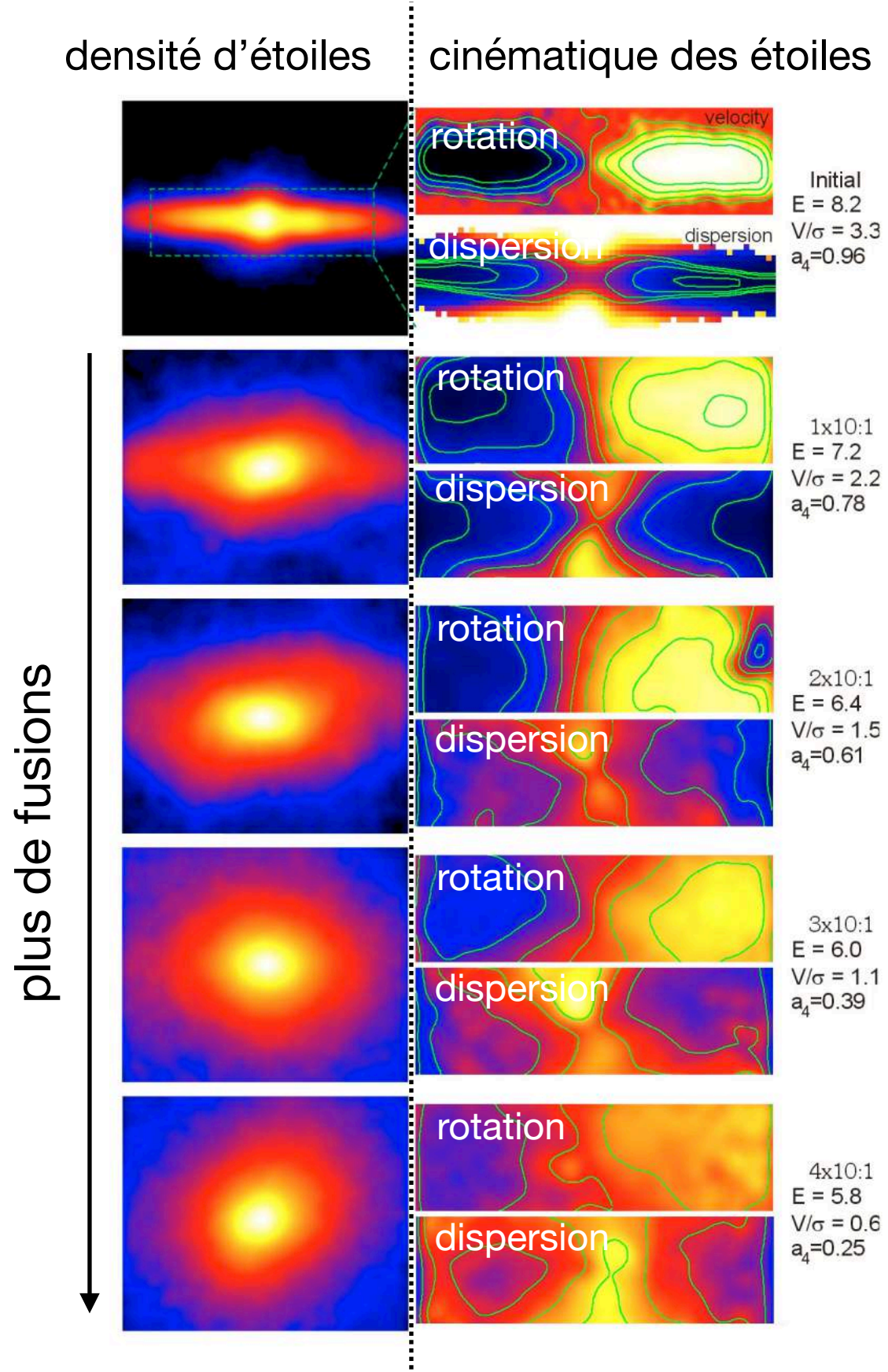


**planétarium**

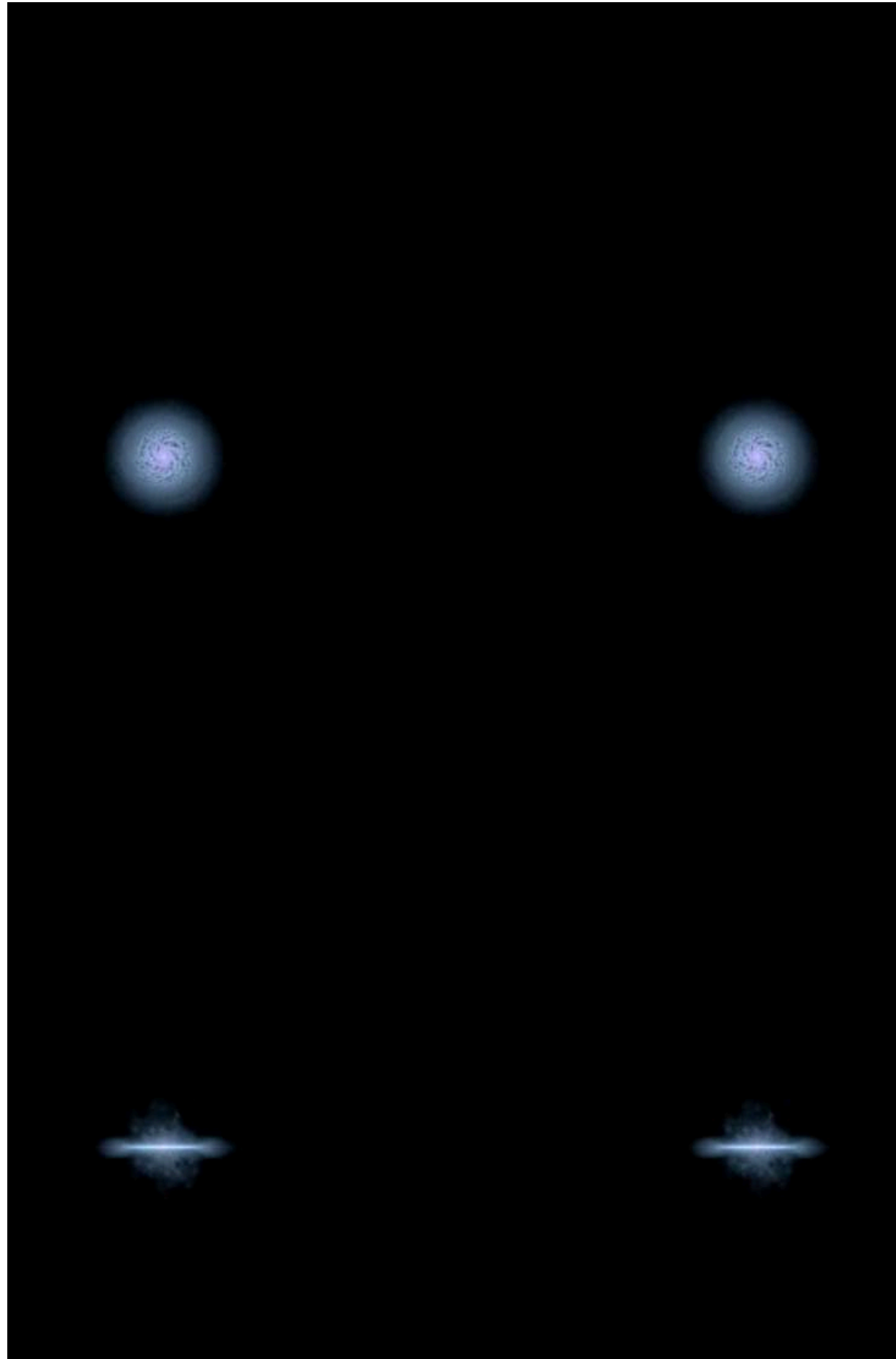
Universcience  
© 2022



# Plus de masse fusionnée = plus de changement morphologique

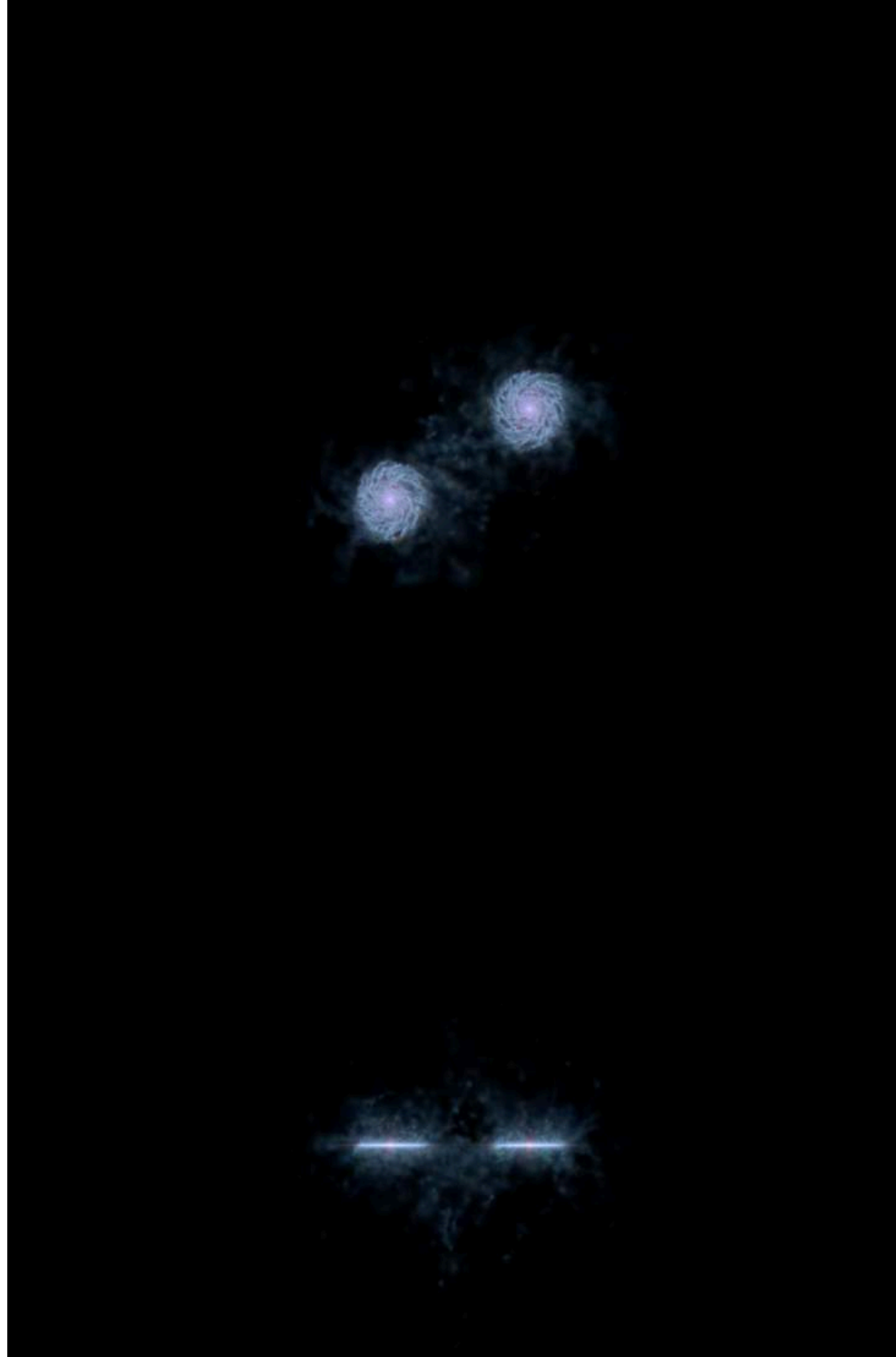


# Les fusions déclenchent l'activité du trou noir central



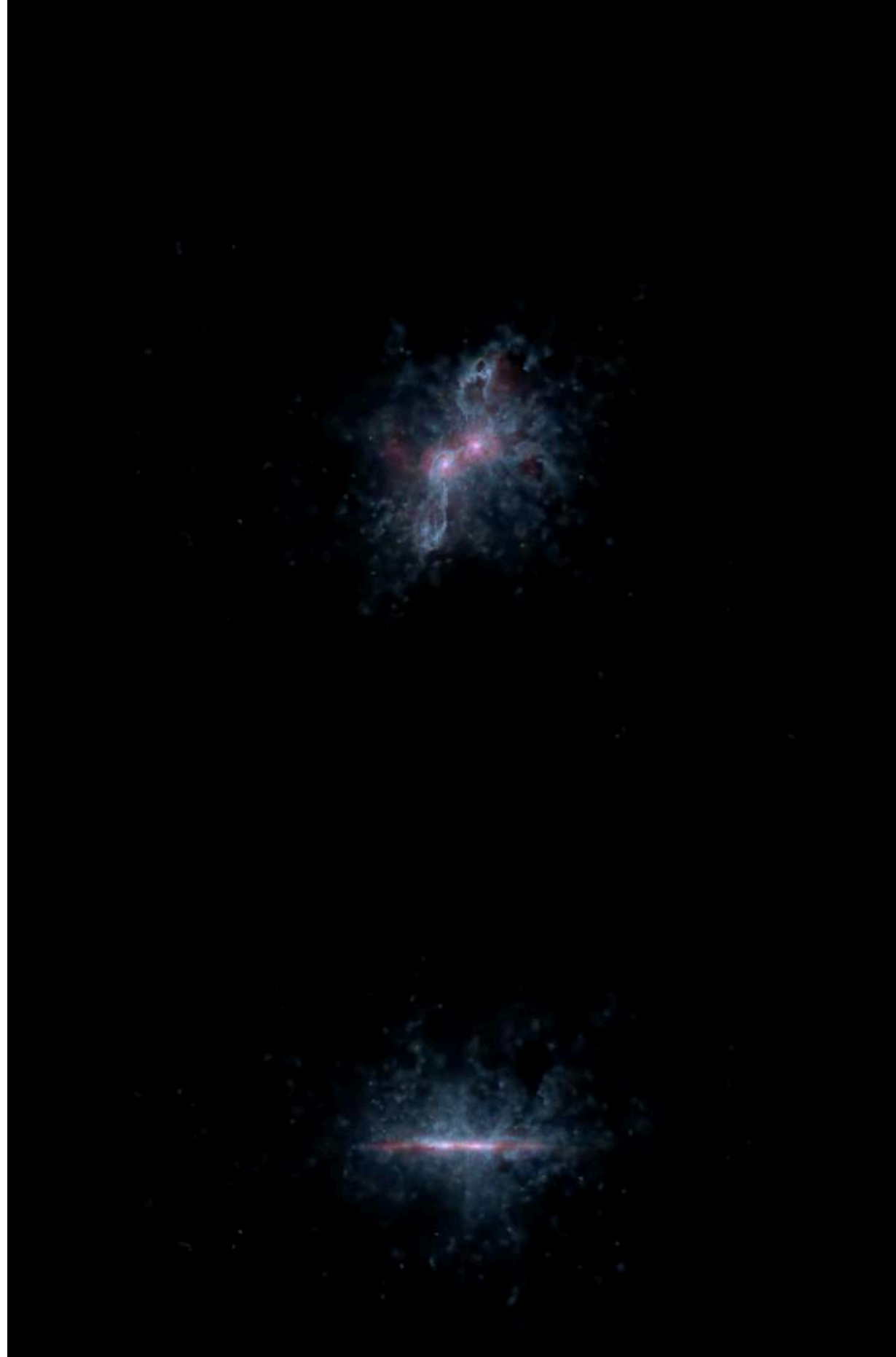


## Les fusions déclenchent l'activité du trou noir central



*Capelo, Volonteri+ 2015*

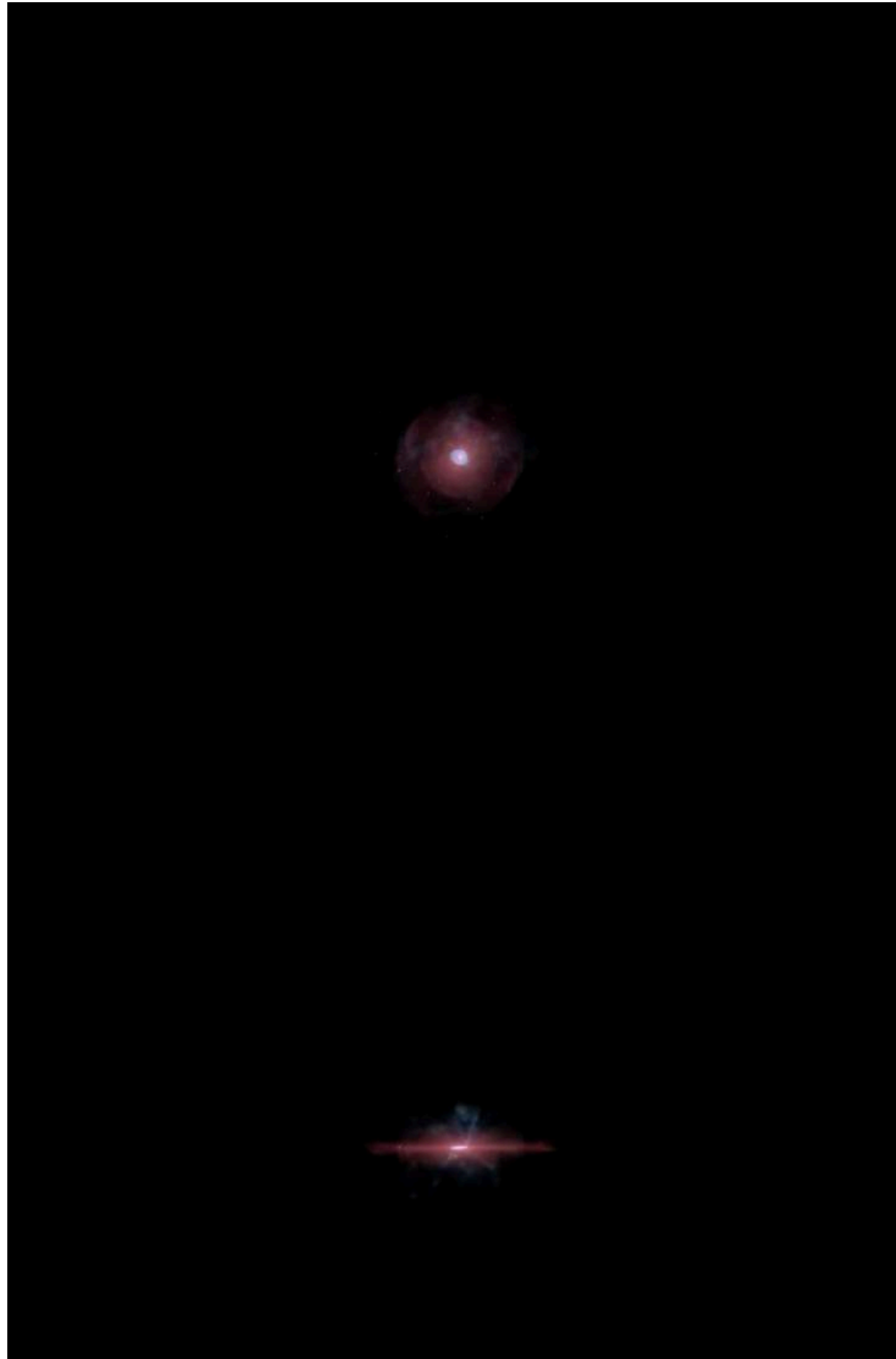
## Les fusions déclenchent l'activité du trou noir central



*Capelo, Volonteri+ 2015*



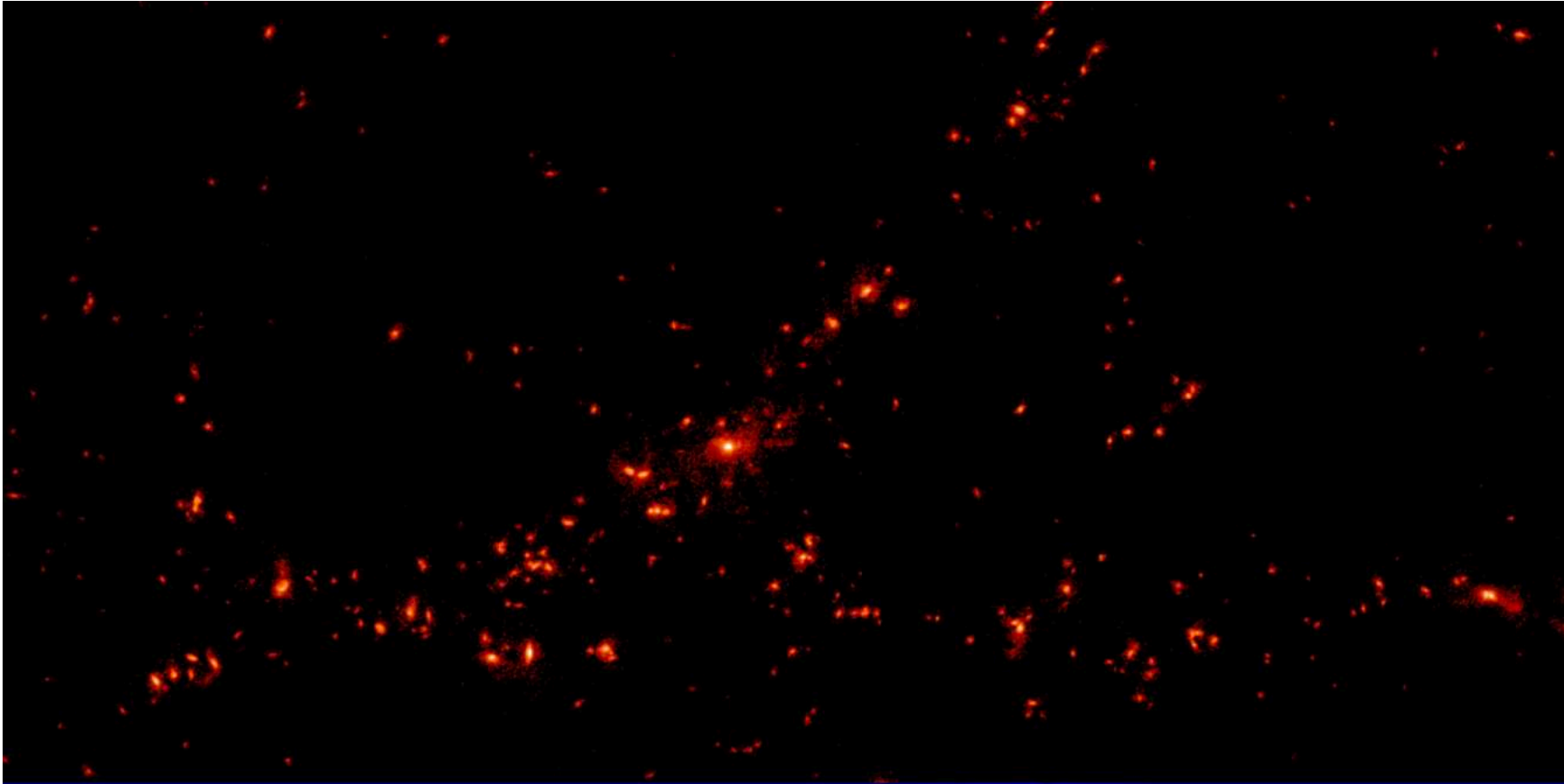
## Les fusions déclenchent l'activité du trou noir central



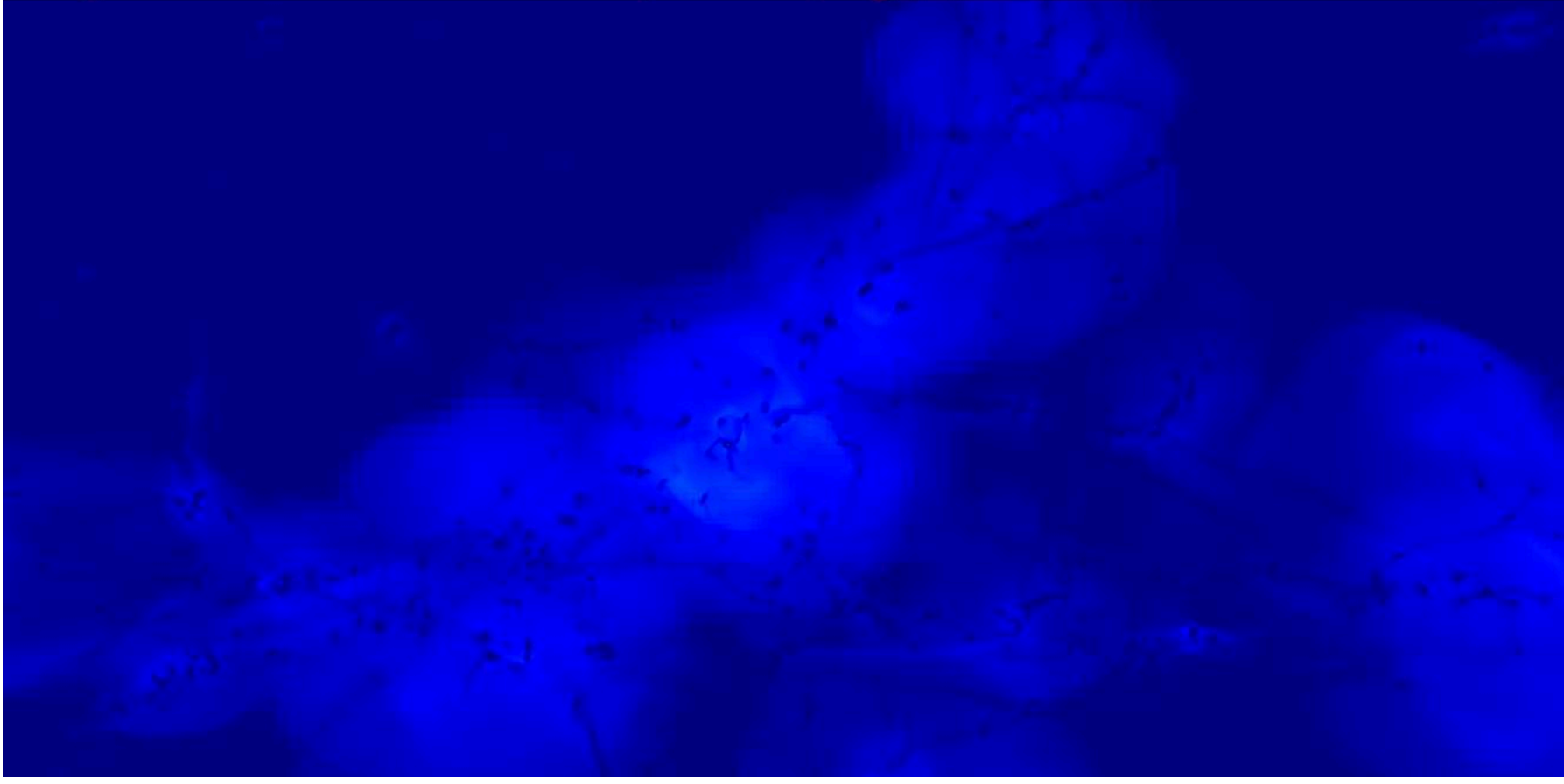
*Capelo, Volonteri+ 2015*

## La cas d'un amas massif

densité d'étoiles



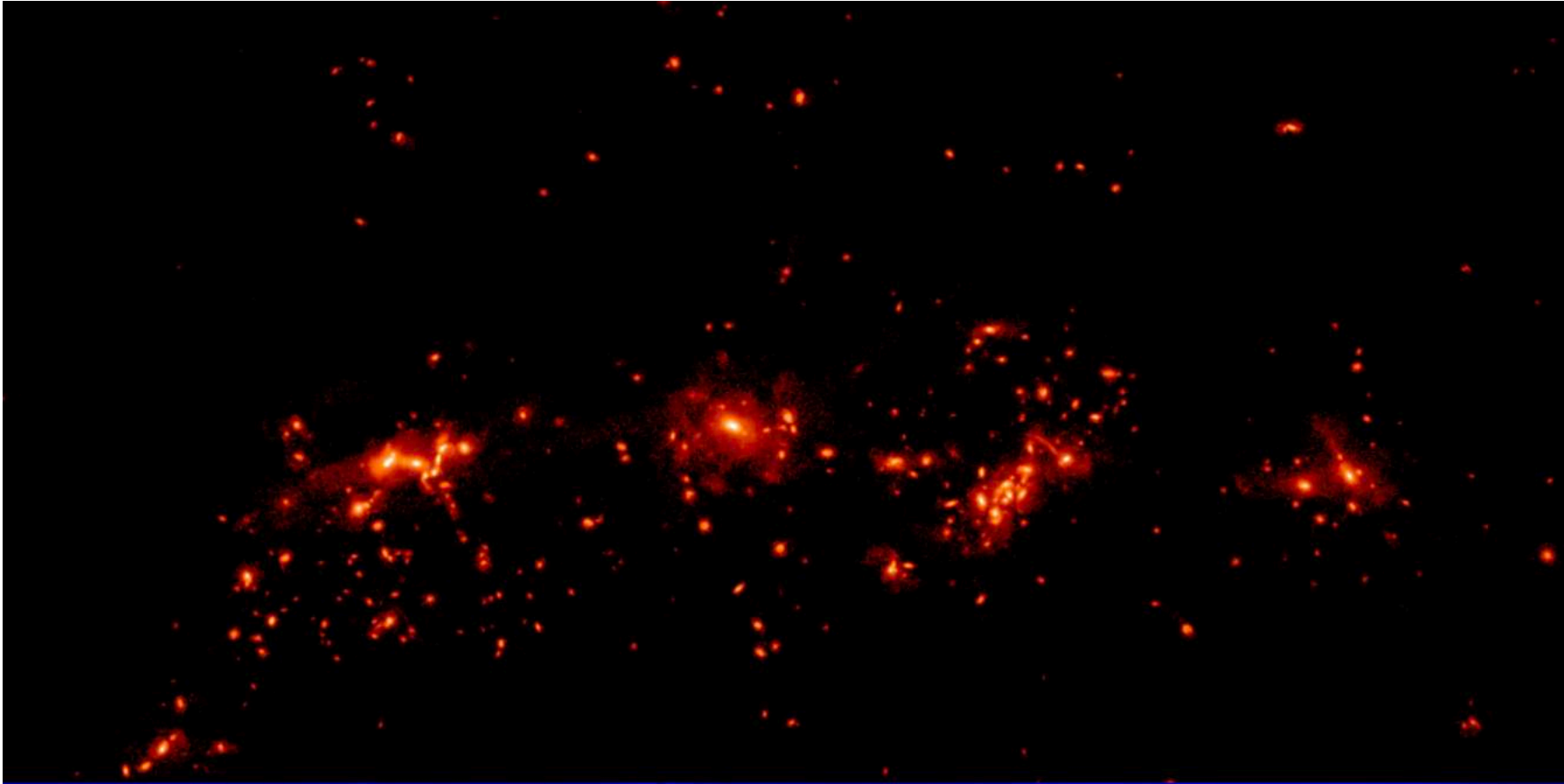
température du gaz



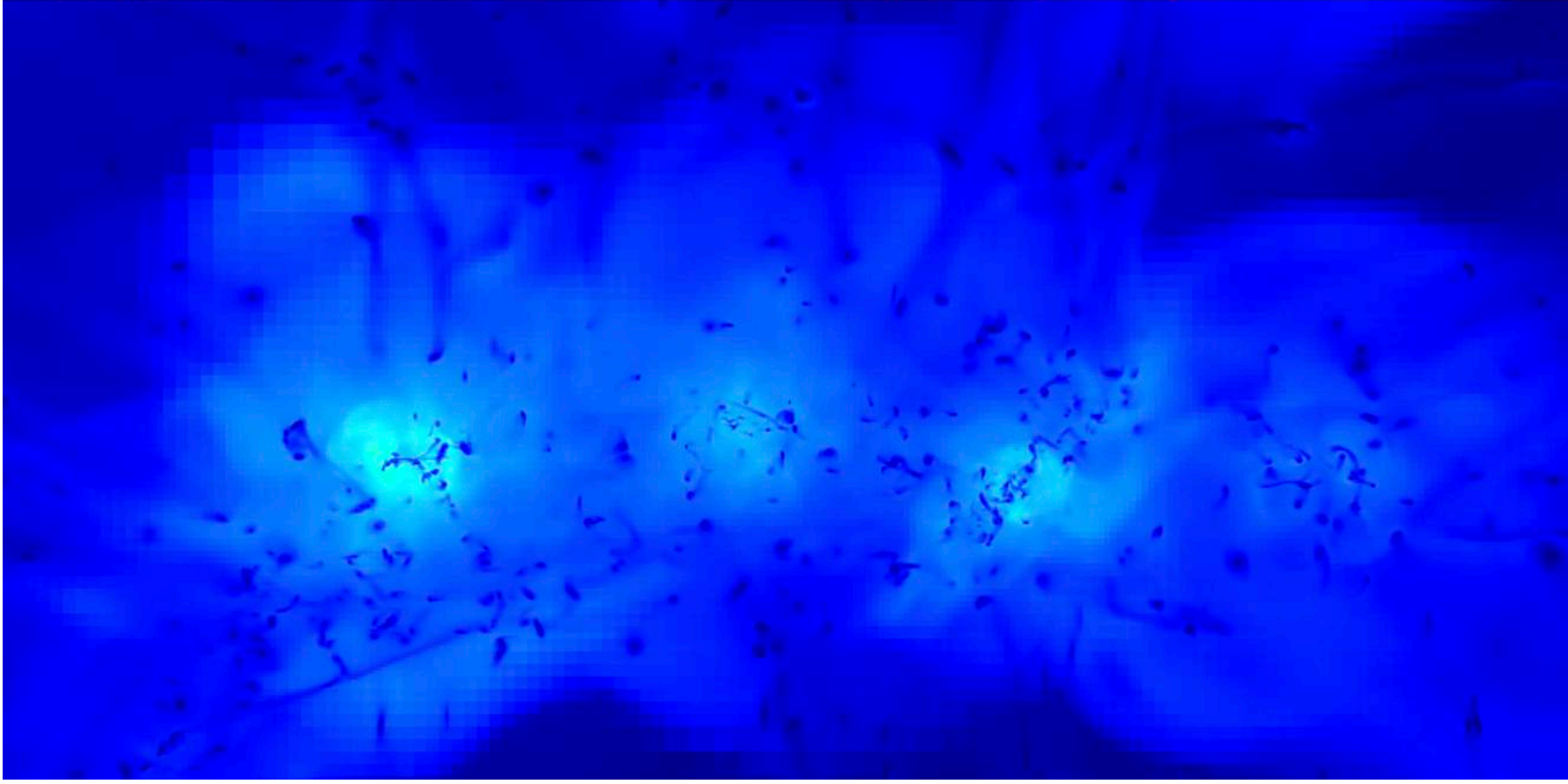


## La cas d'un amas massif

densité d'étoiles

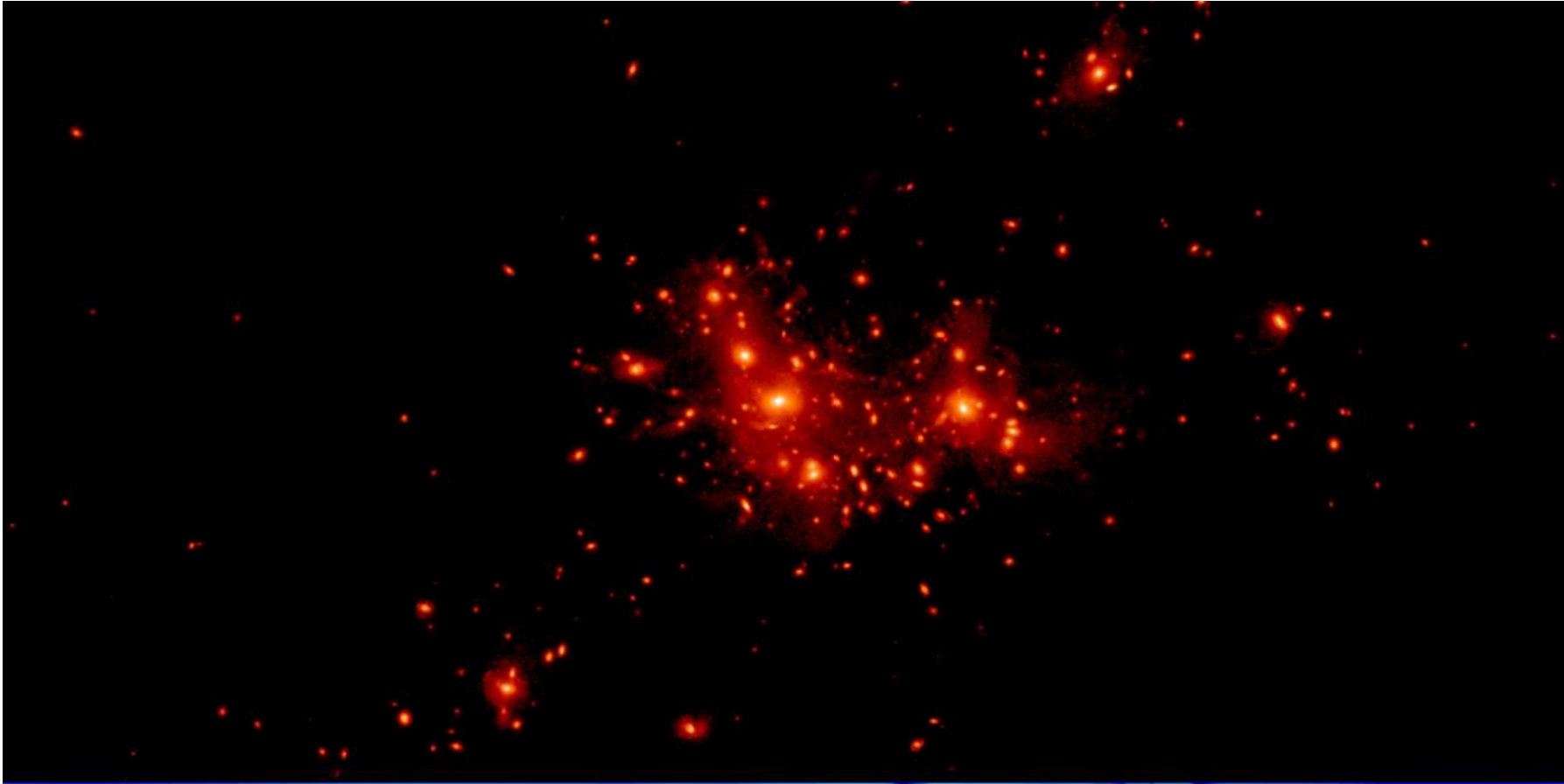


température du gaz

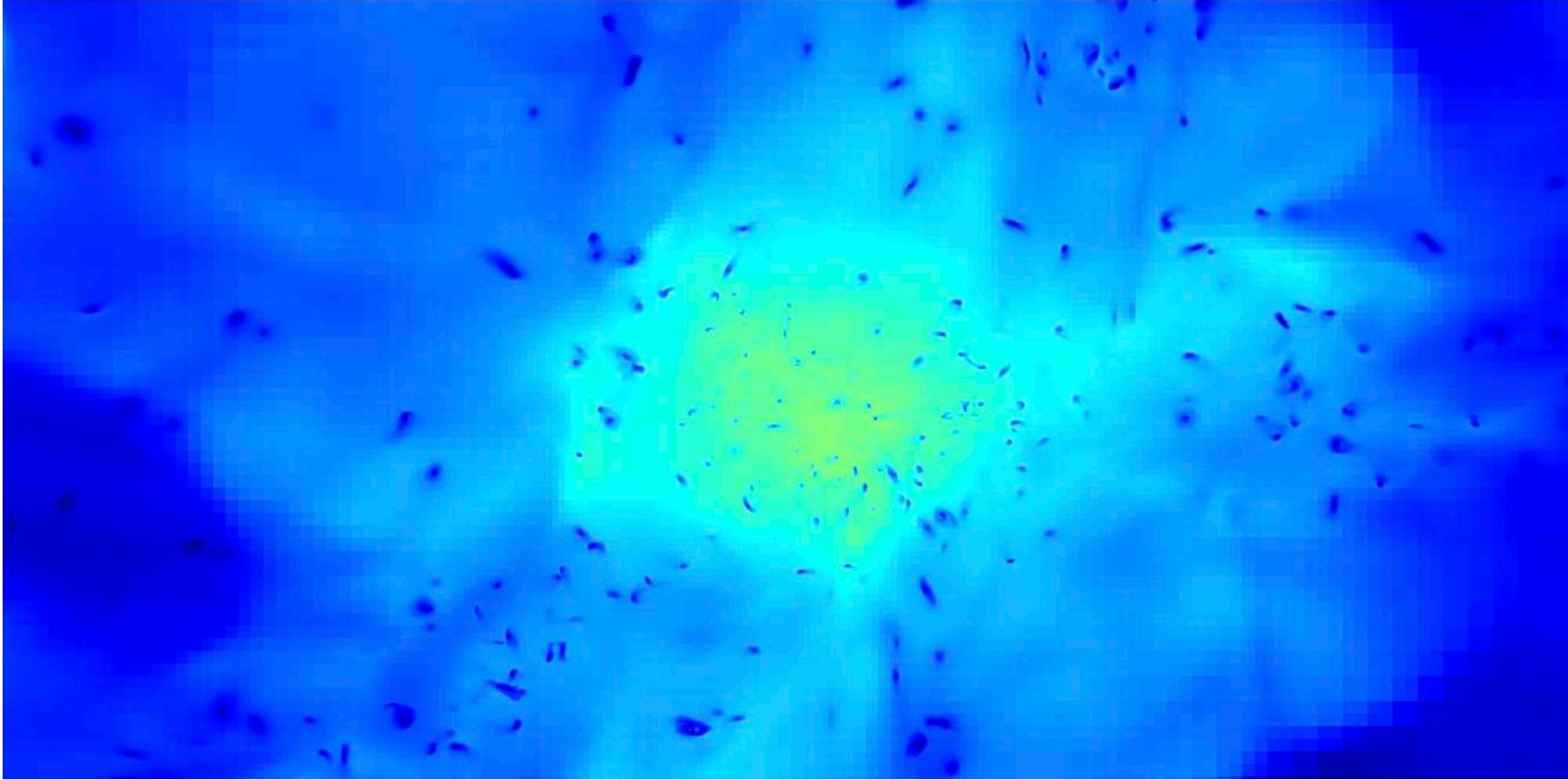


## La cas d'un amas massif

densité d'étoiles



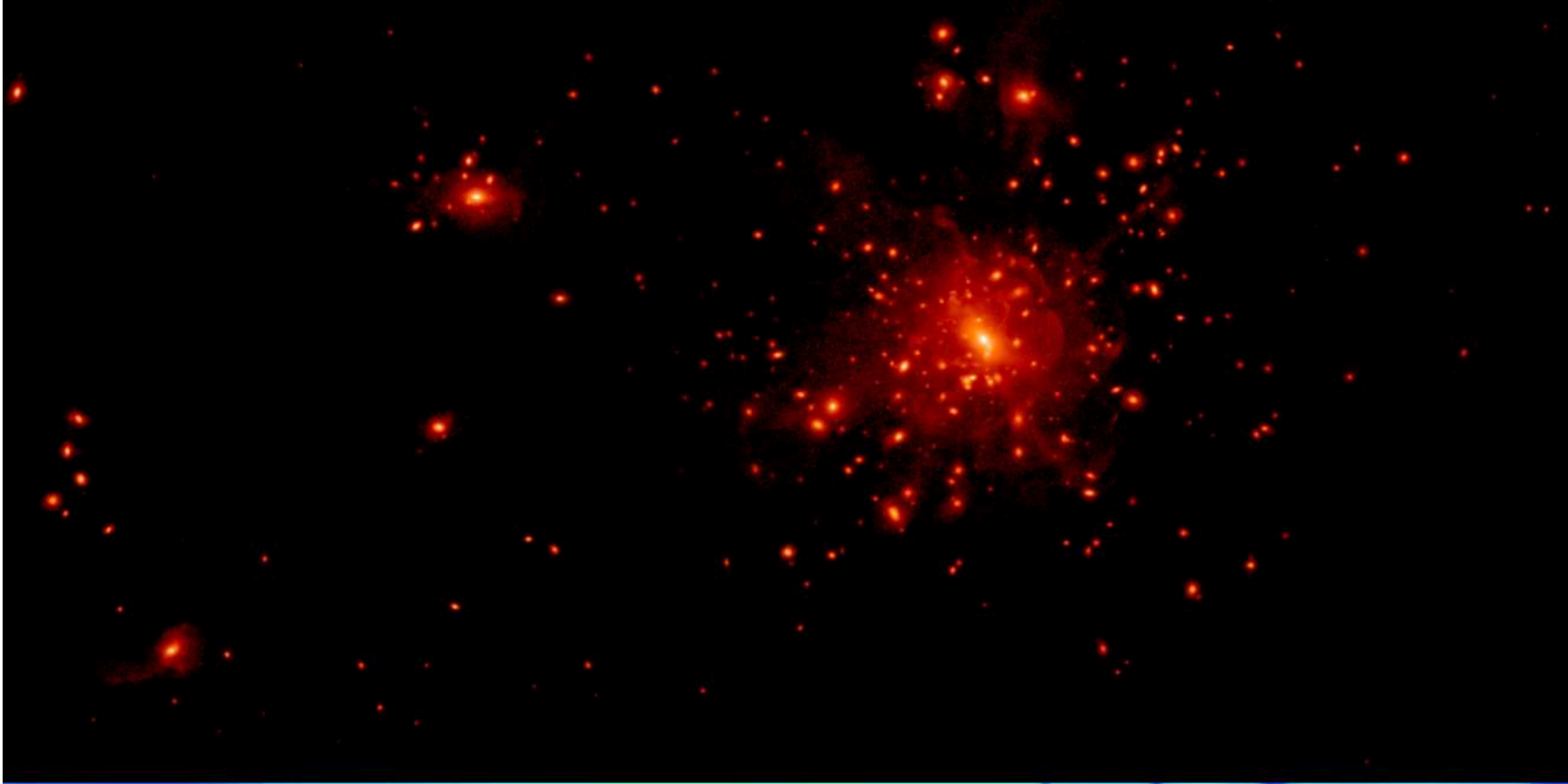
température du gaz



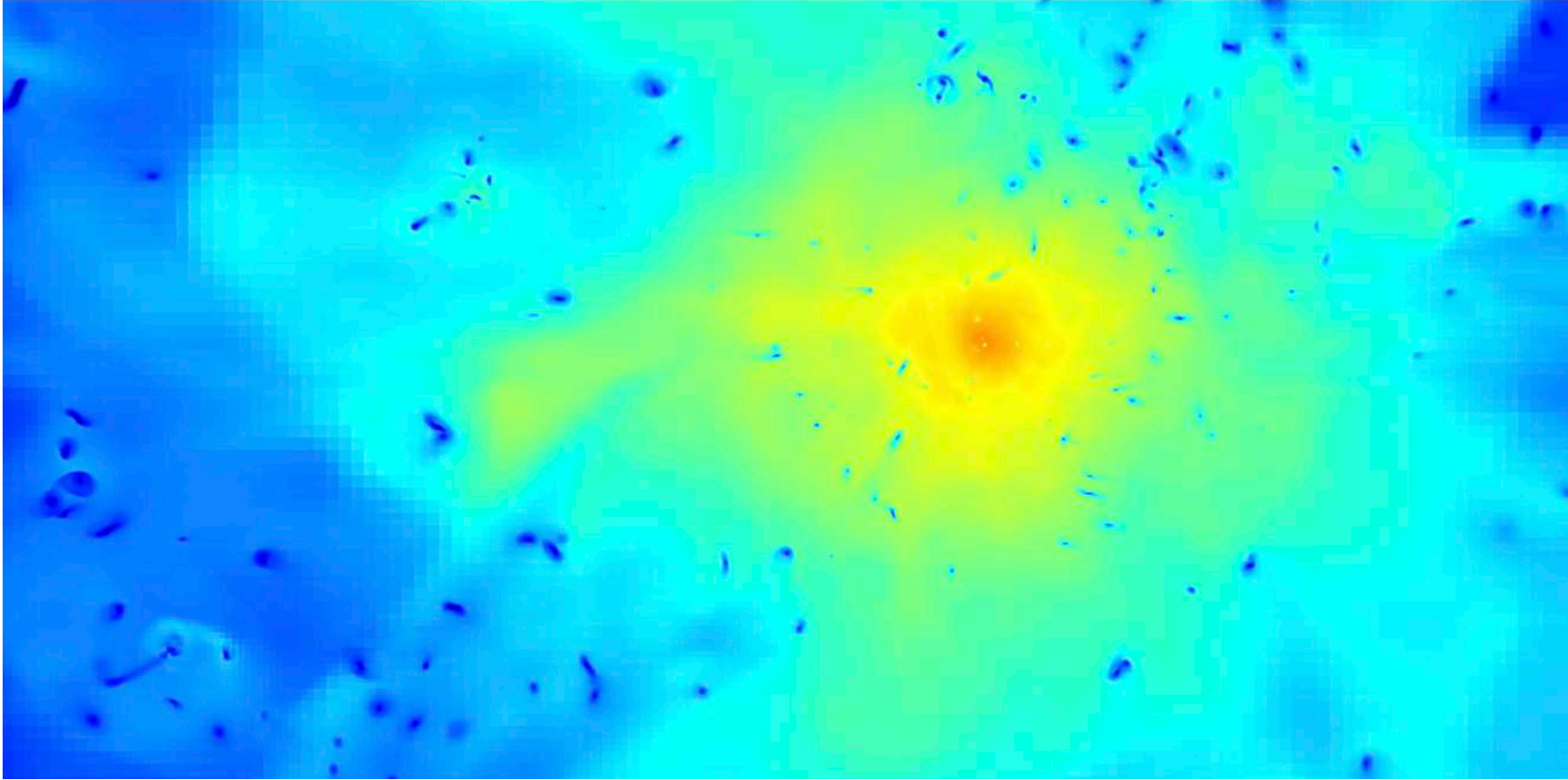


## La cas d'un amas massif

densité d'étoiles



température du gaz

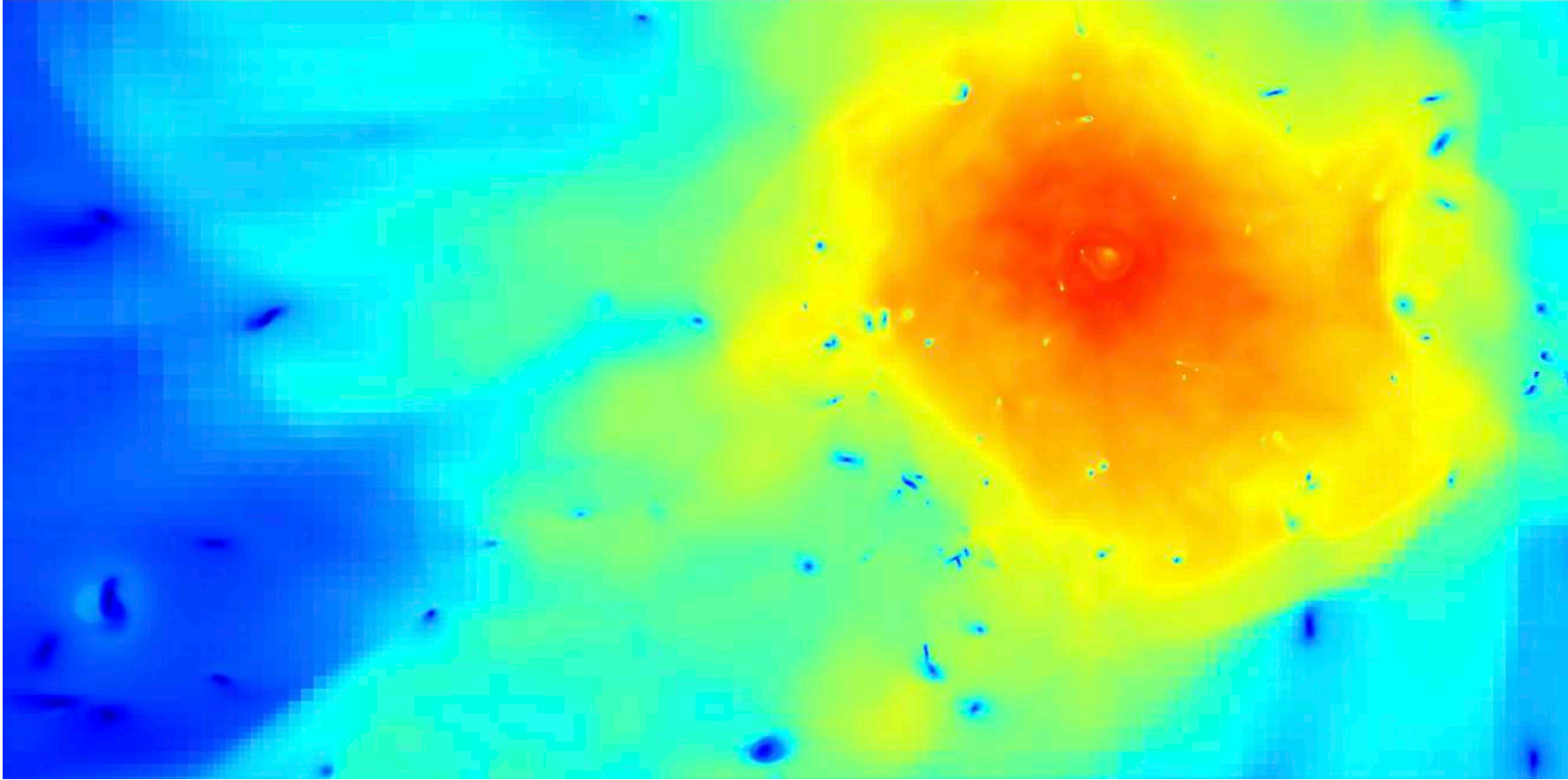


## La cas d'un amas massif

densité d'étoiles

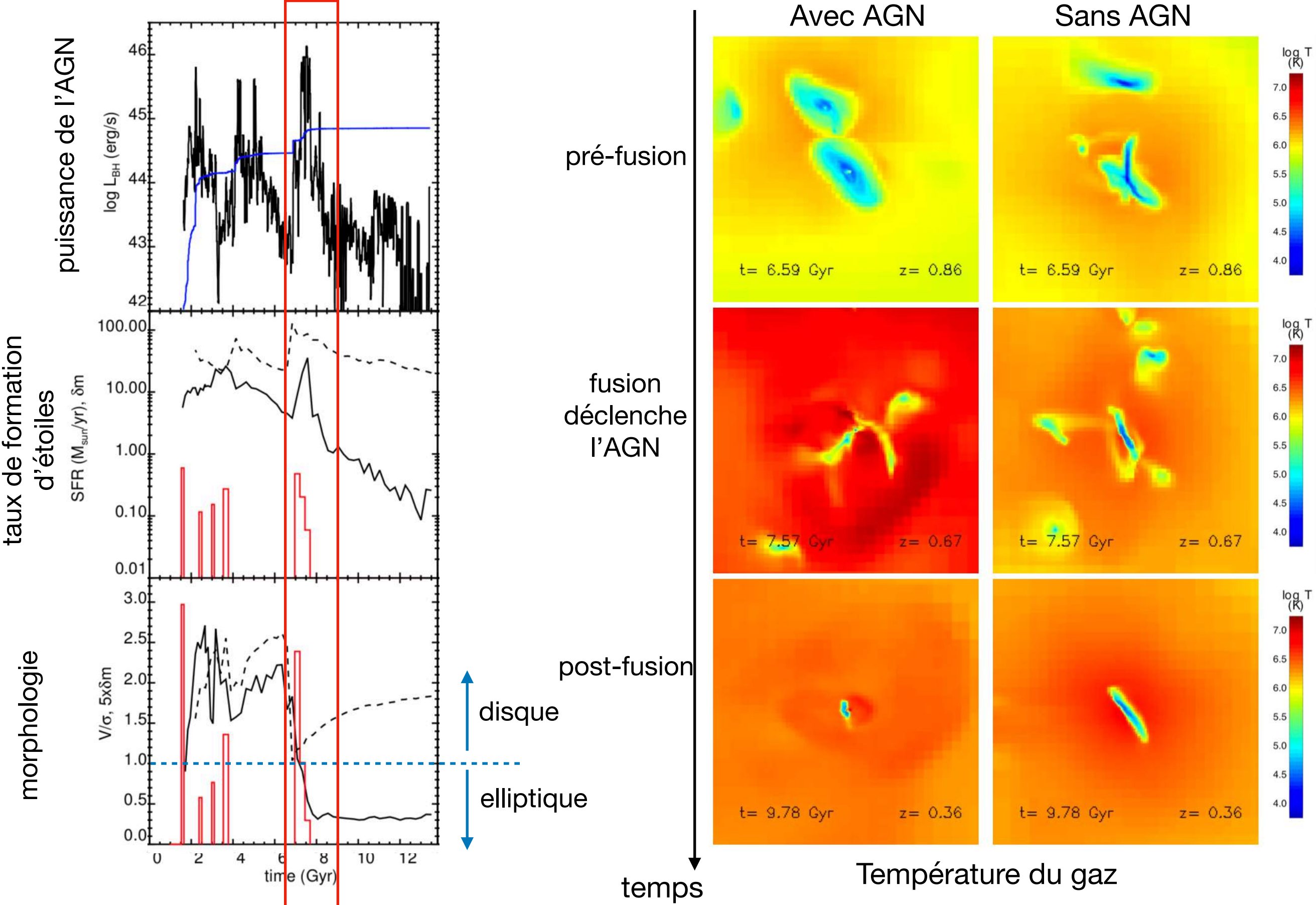


température du gaz

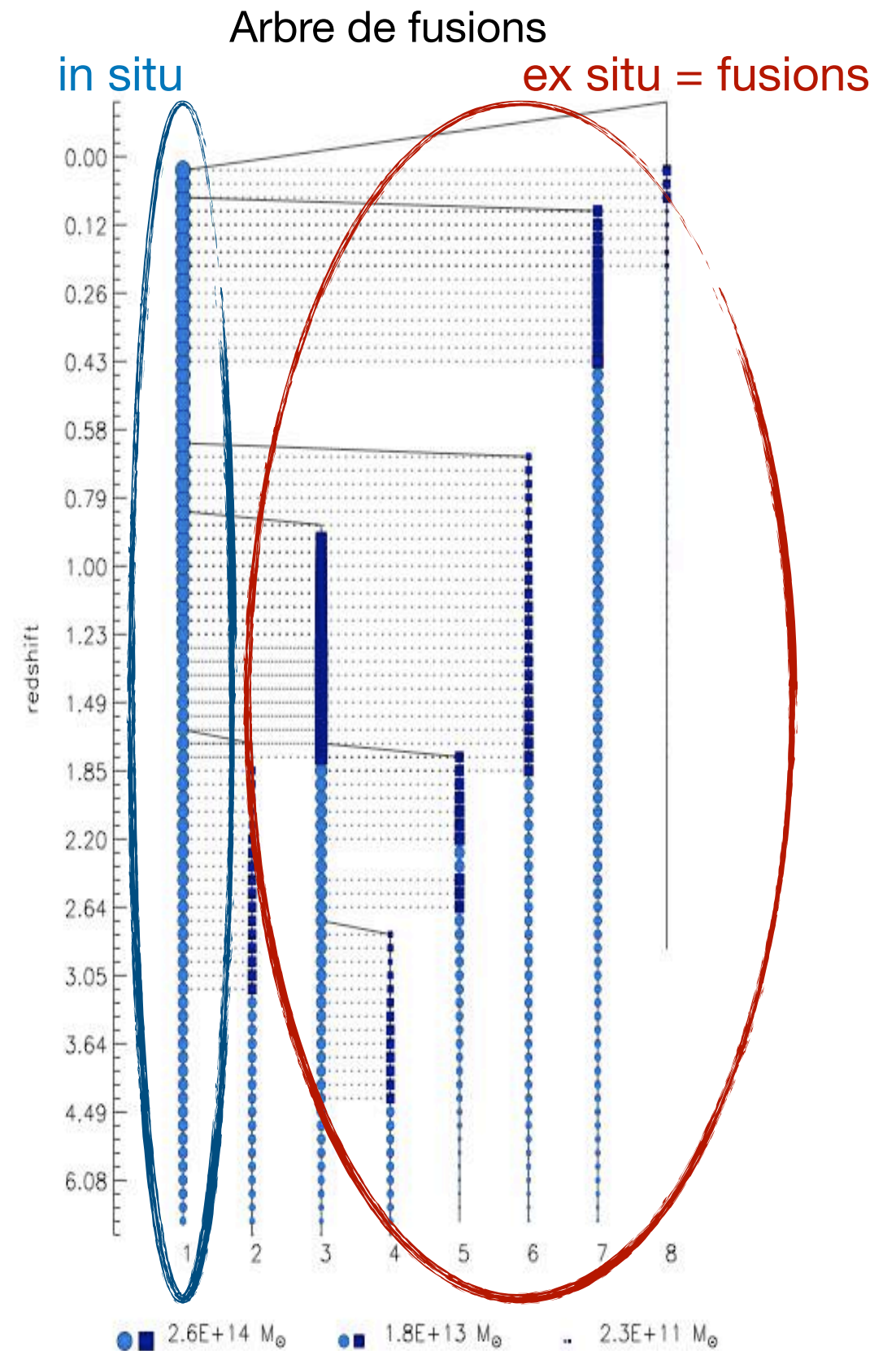
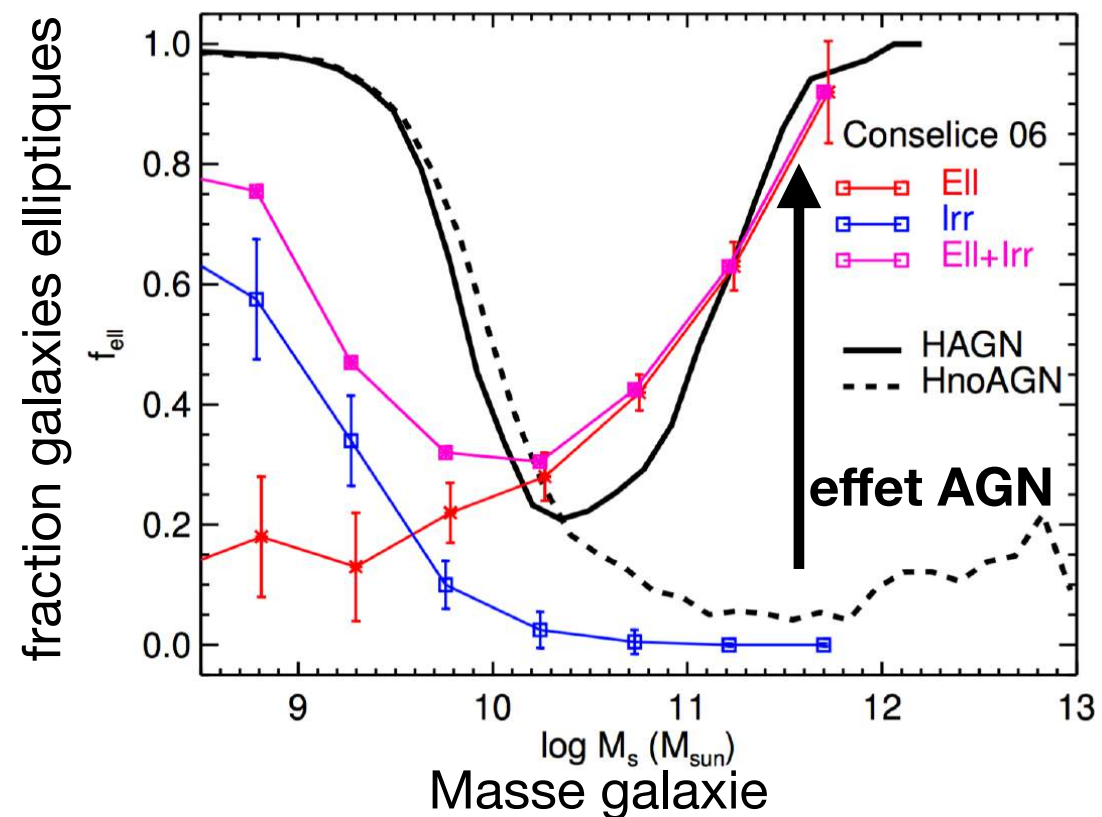
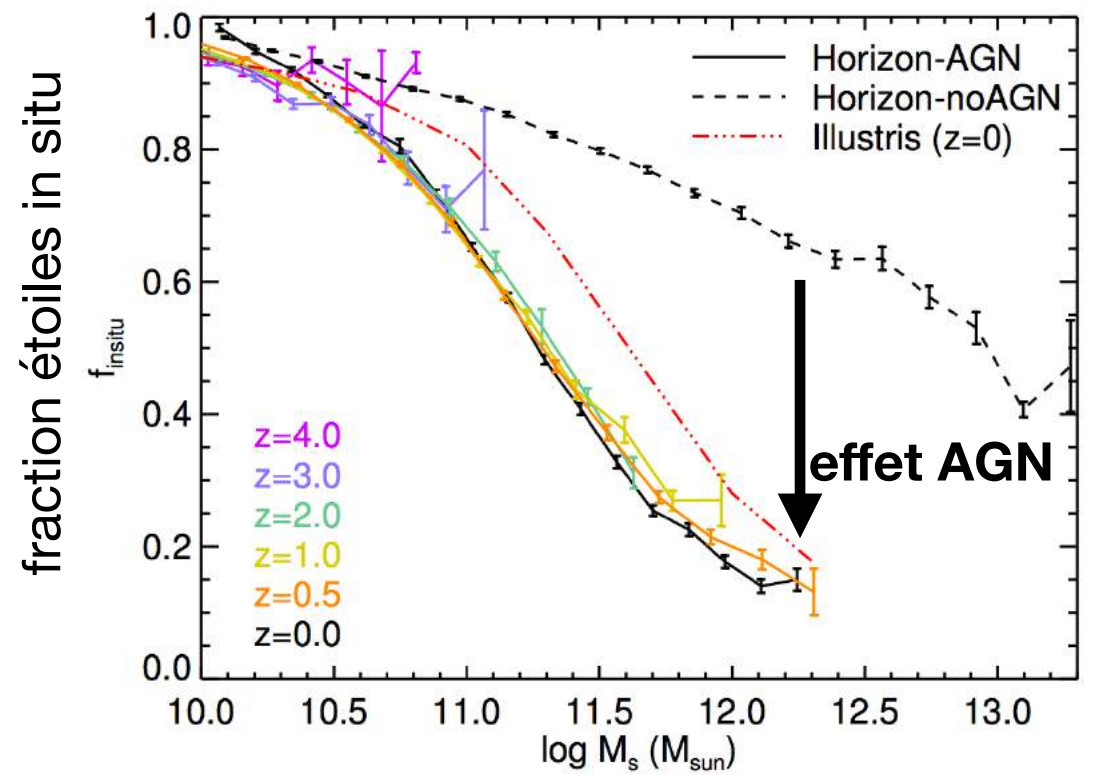




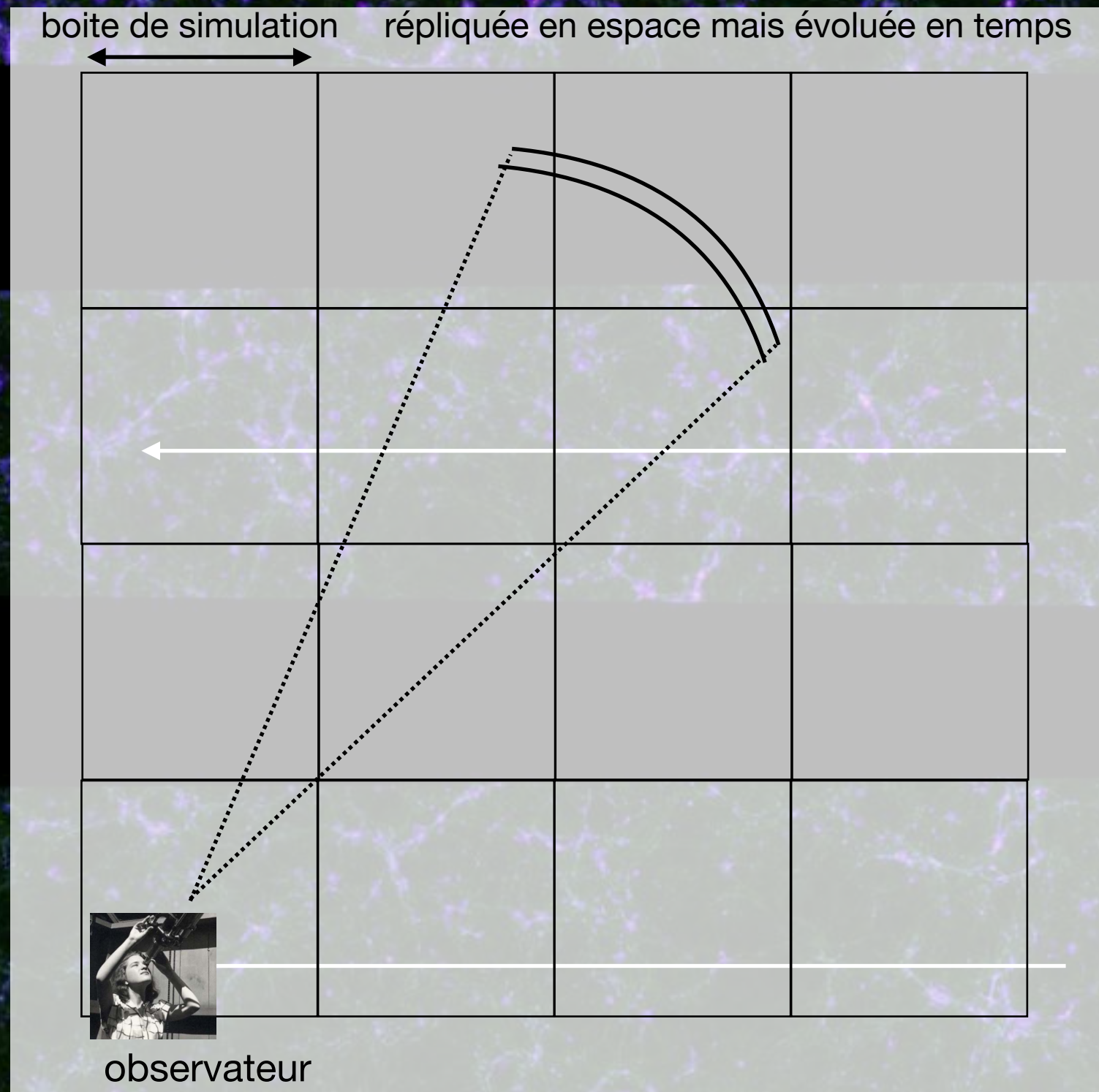
Les fusions changent la morphologie. Les AGN rendent ce changement durable.



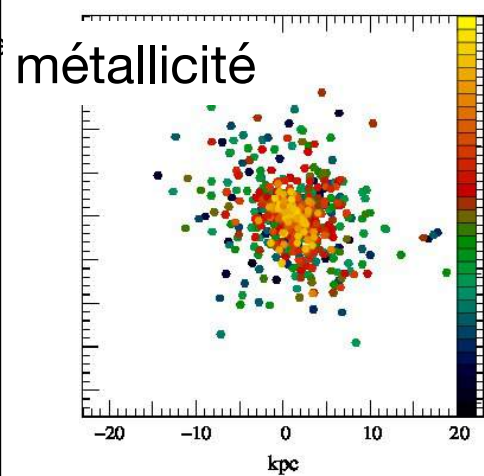
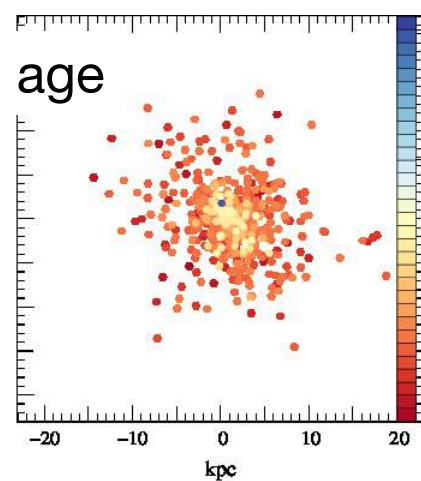
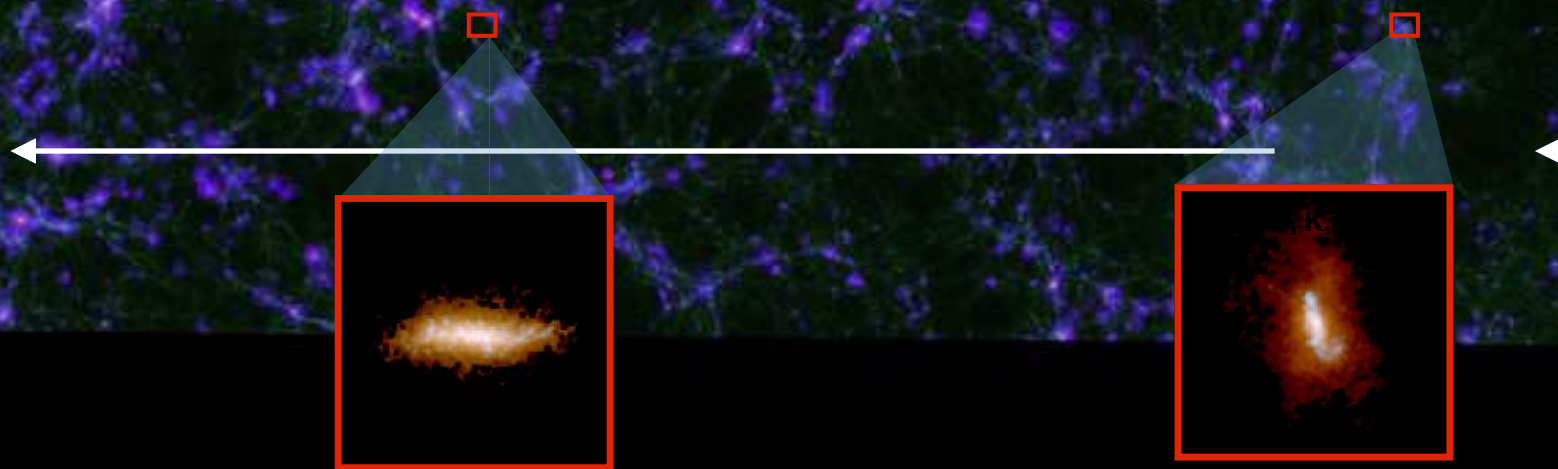
# Les fusions changent la morphologie. Les AGN rendent ce changement durable.



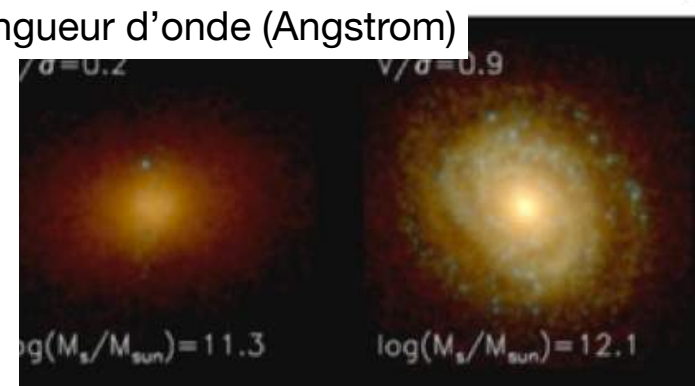
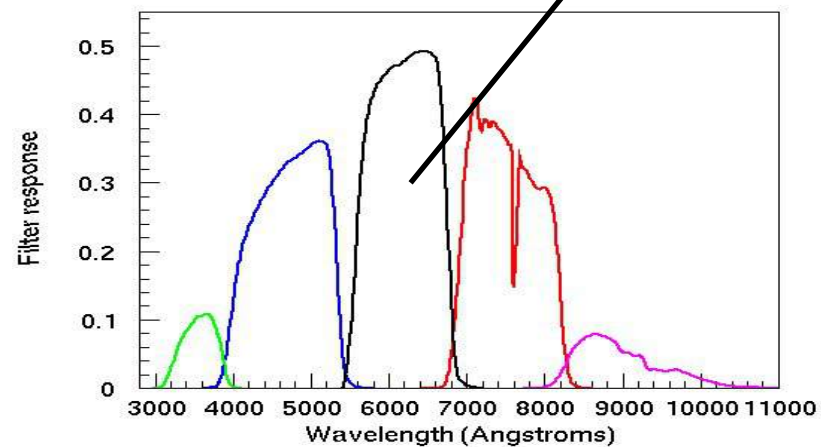
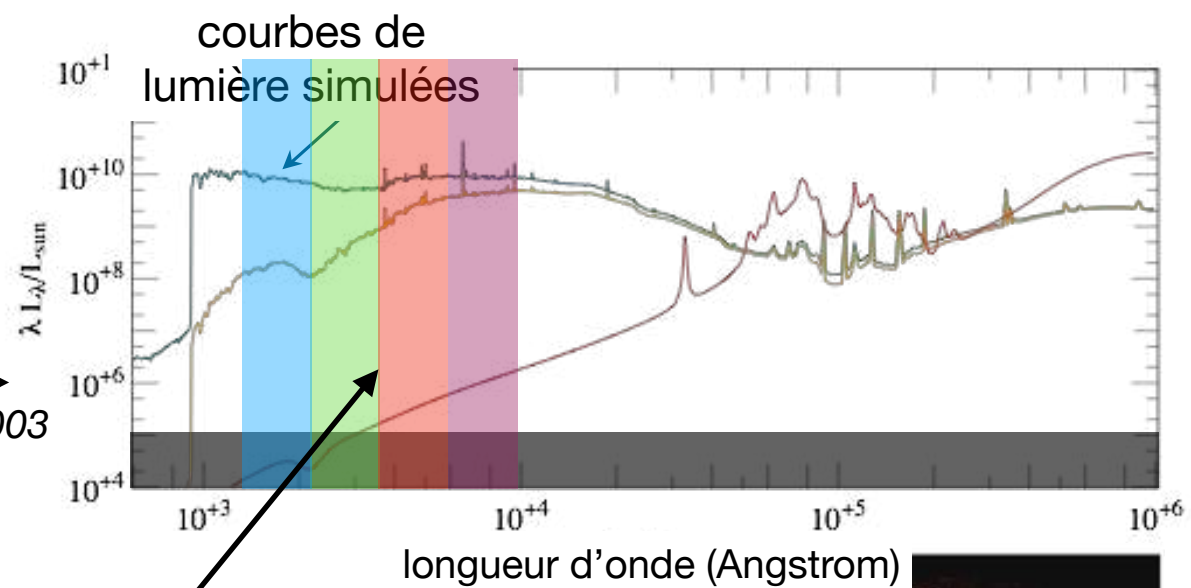








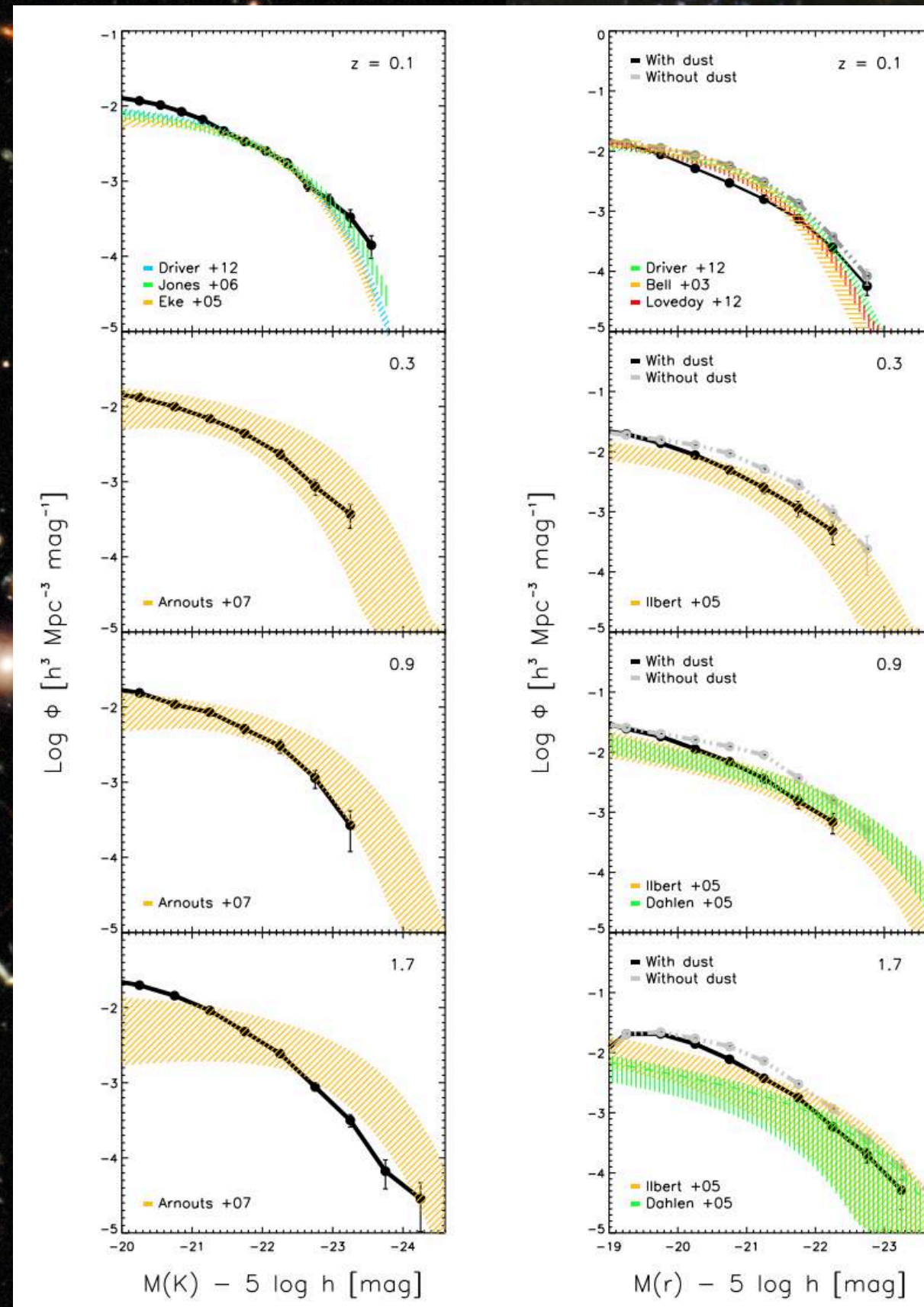
synthèse spectrale  
population stellaire  
*Bruzual & Charlot 2003*



*Kaviraj, Laigle+ 2017*



# Prédiction des fonctions de luminosités des galaxies





**Le ciel observé**

**Le ciel simulé sur ordinateur**

**Telescope spatial Hubble**

*Gouin, Gavazzi+ 2019*

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



# Résumé

## **Les simulations comme outil essentiel pour comprendre la formation des grandes structures**

**Les simulations permettent :**

- **de faire un suivi dynamique des galaxies ;**
- **de tester les processus physiques essentiels à la structuration de la matière (e.g. processus de rétroaction AGN, supernova, etc.) ;**
- **de comprendre les mécanismes de formation des galaxies et des structures de l'Univers (morphologie disque versus elliptique) ;**
- **de saisir l'évolution des galaxies dans la complexité de leur environnement (environnements plus ou moins denses) ;**
- **contraindre et éliminer des modèles d'Univers (nature énergie noire ou de la matière noire) ;**
- **de produire des univers factices (entraînement pour interpréter les observations).**