

# L'histoire de la formation stellaire dans les galaxies

*Comment les galaxies convertissent-elles  
leurs réserves de gaz en étoiles?*

1. Dans la Voie Lactée, le réservoir de gaz en place comparé à son temps d'effondrement gravitationnel devrait former des 10aines d'étoiles par an. Les galaxies forment leurs étoiles beaucoup plus **lentement**.



*Galaxie spirale :*

- Réserves de gaz =  
5 milliards de masses solaires
- Temps d'effondrement gravitationnel =  
50 à 100 millions d'années

*Forme 1 ou 2 étoiles par an, au lieu de 50-100*

# L'histoire de la formation stellaire dans les galaxies

*Comment les galaxies convertissent-elles  
leurs réserves de gaz en étoiles?*

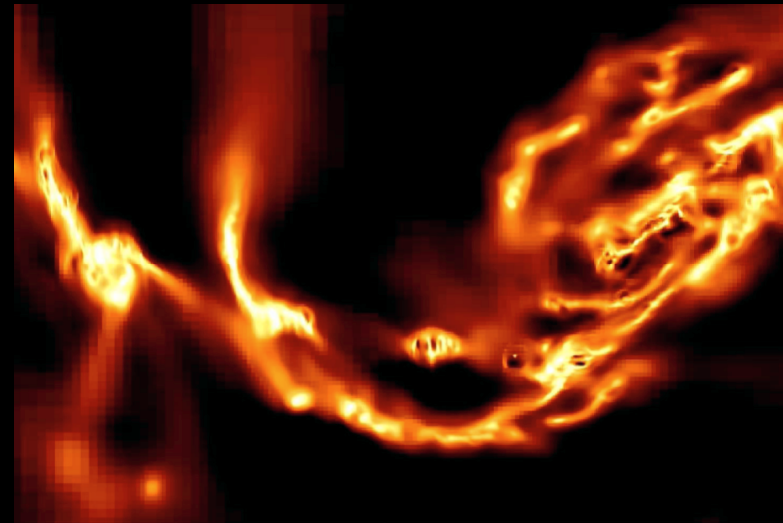
1. Dans la Voie Lactée, le réservoir de gaz en place comparé à son temps d'effondrement gravitationnel devrait former des 10aines d'étoiles par an. Les galaxies forment leurs étoiles beaucoup plus **lentement**.
2. L'efficacité de conversion gaz => étoiles est très homogène pour une très grande partie des galaxies :
  - formation stellaire lente et **continue**
  - accompagnée de la croissance parallèle du trou noir central
3. Il existe une seconde population de galaxies à **flambées** dont la formation stellaire devient considérablement (10-100x) plus efficace.

# Une nouvelle génération de simulations de galaxies : Résoudre la formation stellaire aux échelles cosmologiques



Di Matteo Springel et al. 2007

Gaz de densité moyenne,  
Pas de sous-structures



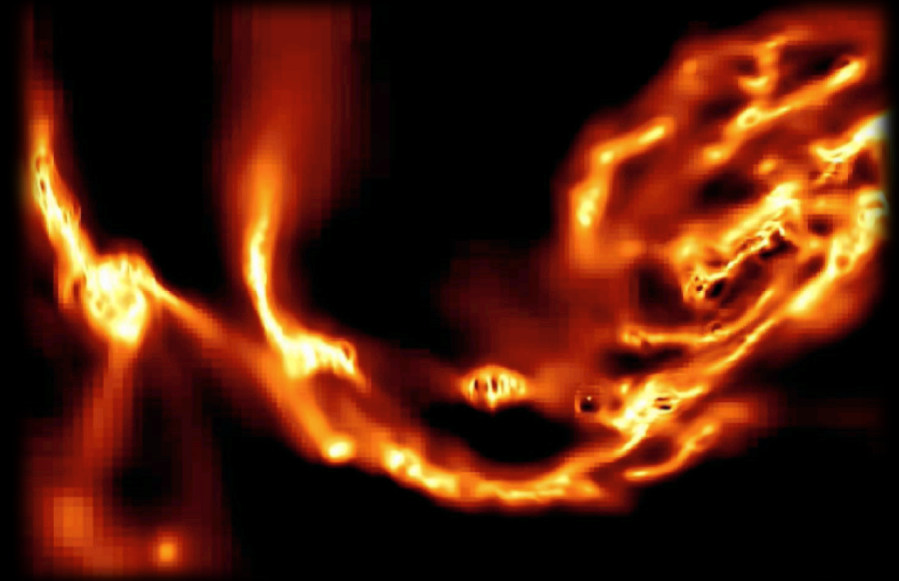
Bournaud et al. 2010

Gaz résolu, hétérogène et turbulent:  
Nuages denses, bulles vides, ...

# Une nouvelle génération de simulations de galaxies : Résoudre la formation stellaire aux échelles cosmologiques



Curie @ CEA/TGCC

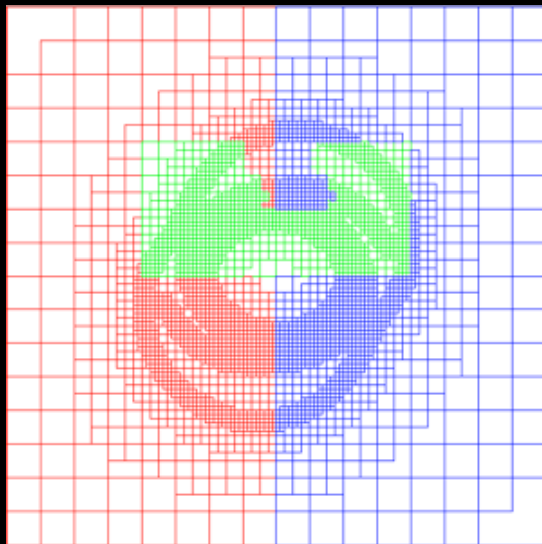
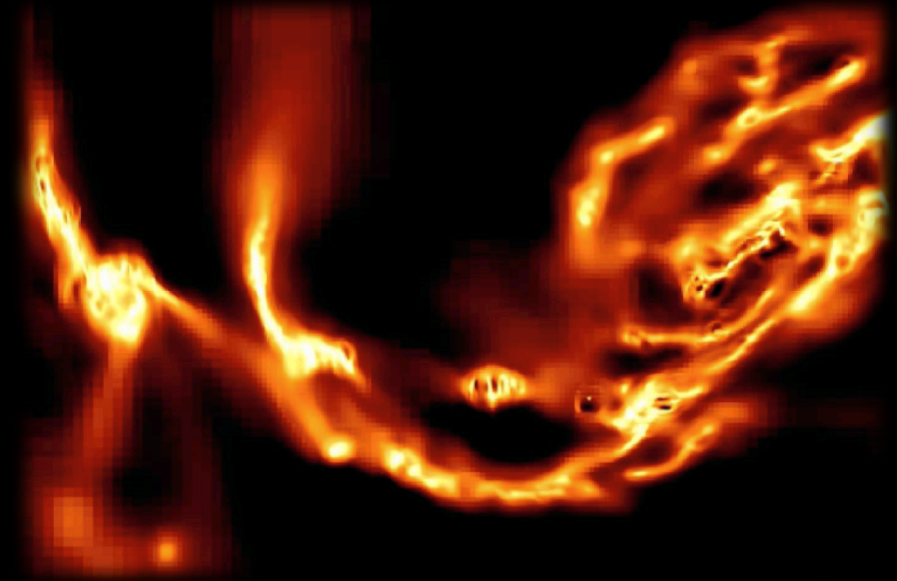
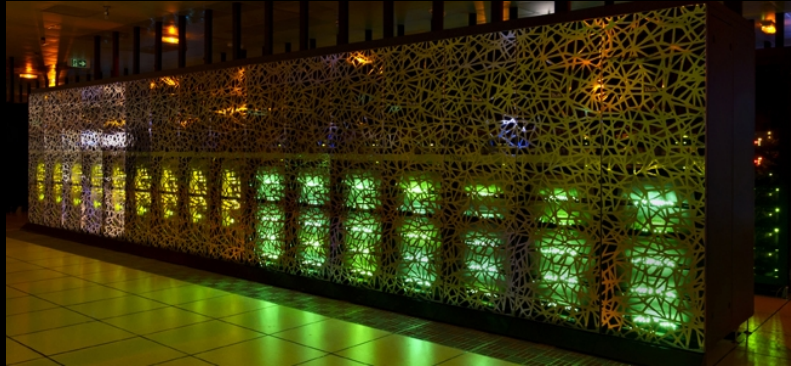


Organisation des moyens de calculs  
à l'échelle nationale et européenne





# Une nouvelle génération de simulations de galaxies : Résoudre la formation stellaire aux échelles cosmologiques

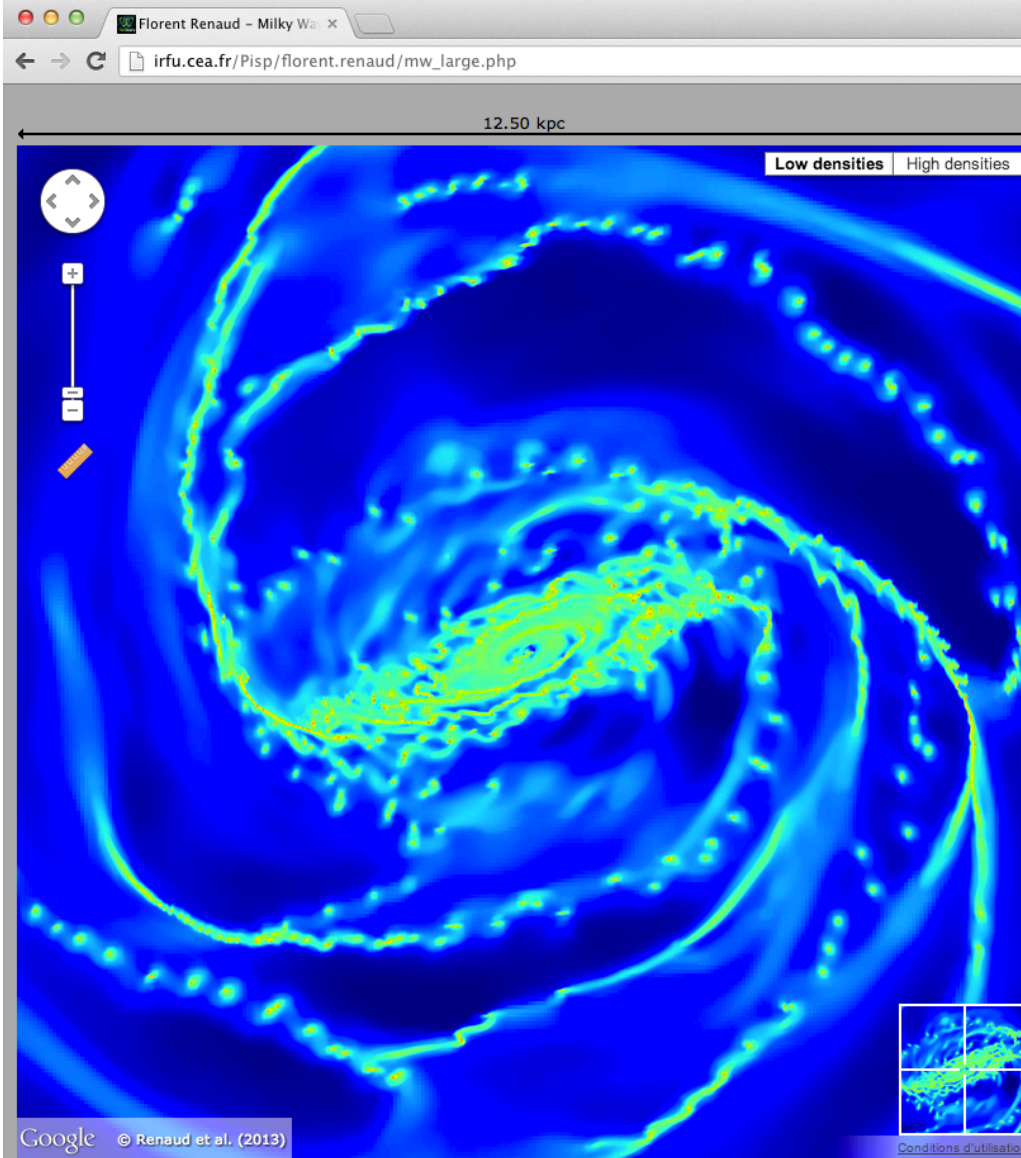
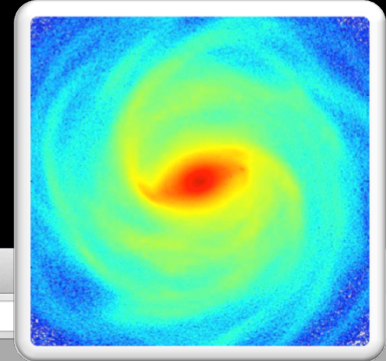


- Moyens de calcul pétaflopiques
- Code à maillage adaptatif RAMSES

**=> Résolution de 1 a.-l. pour des galaxies de 100,000 a.-l.**

# La formation stellaire dans la Voie Lactée

[http://irfu.cea.fr/Pisp/florent.renaud/mw\\_large.php](http://irfu.cea.fr/Pisp/florent.renaud/mw_large.php)



## Milky Way maps

Information  
Zoom level: 0  
Size of a pixel: 12.21 pc  
Center of the image: (0.0000 pc, 0.0000 pc)  
Position of the cursor: (406.2500 pc, 2.3750 kpc)

Reset Map  
Guided Tour

### About the simulation

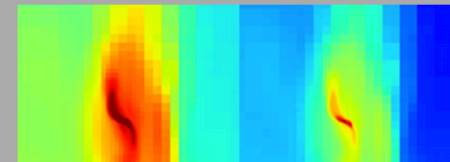
[A few details](#)  
Publications : Renaud et al. (in prep.)

### What is displayed?

Surface density of gas from a hydrodynamic simulation of a Milky Way like galaxy, at sub-parsec resolution. The map is made of 174 762 tiles, each being a 1024 pixels x 1024 pixels 8-bits png image. The "big pixels" come from the AMR (adaptive mesh refinement) technique used in the simulation.

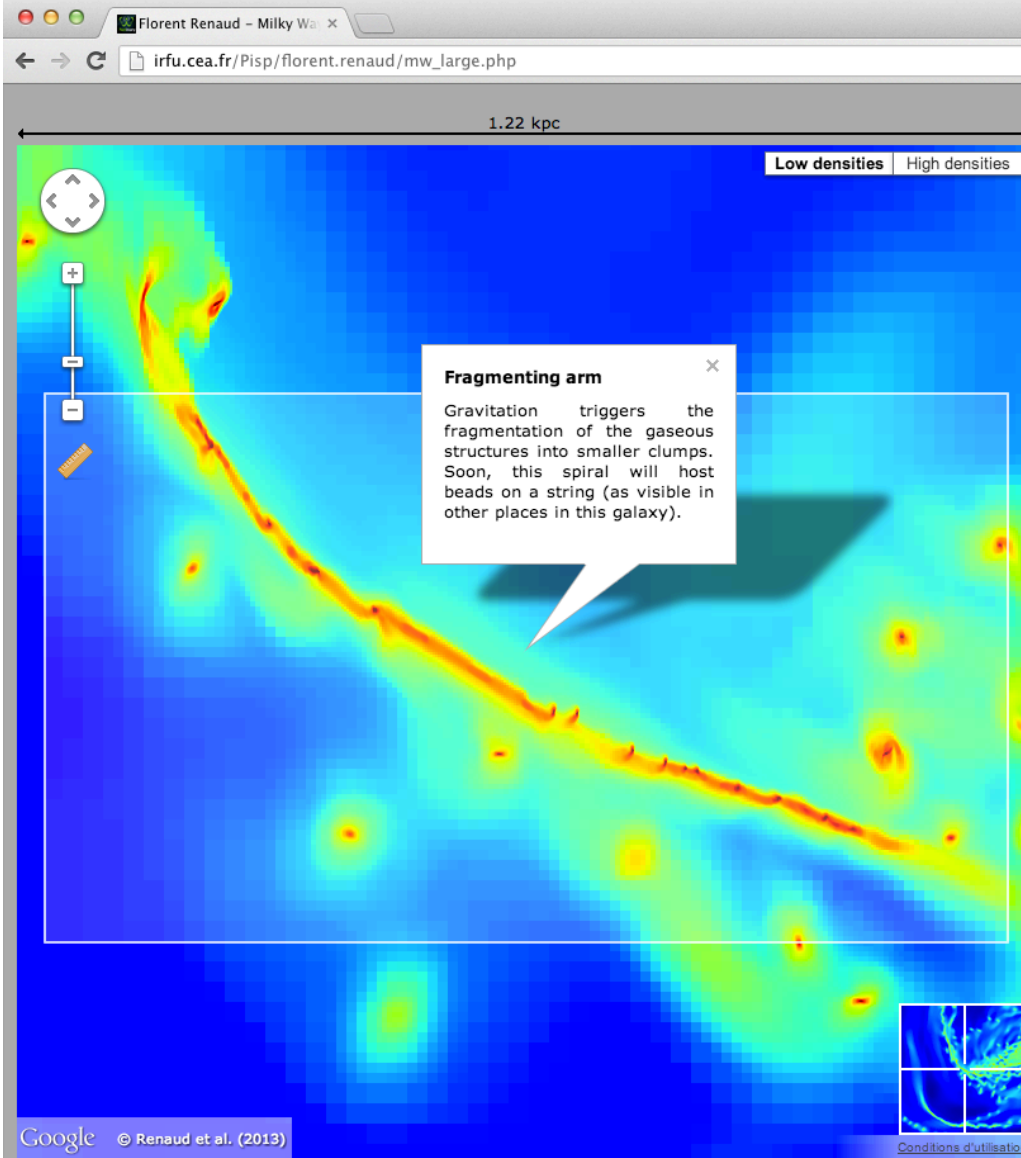
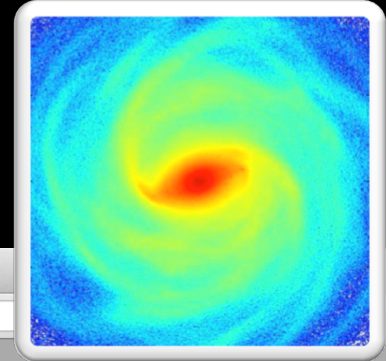
### What happens at zoom levels 5 and 8?

The color table changes automatically, so that the contrast of the very dense structures is enhanced. You can also change the contrast manually by selecting the map type (in top-right corner).



# La formation stellaire dans la Voie Lactée

[http://irfu.cea.fr/Pisp/florent.renaud/mw\\_large.php](http://irfu.cea.fr/Pisp/florent.renaud/mw_large.php)



## Milky Way maps

### Information

Zoom level: 3  
Size of a pixel: 1.53 pc  
Center of the image: (-3.0340 kpc, -750.0000 pc)  
Position of the cursor: (4.1094 kpc, -718.7500 pc)

Reset Map

### Guided Tour



### About the simulation

#### [A few details](#)

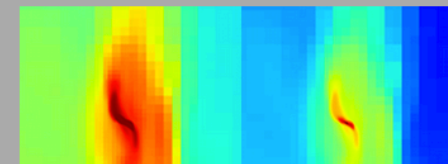
Publications : Renaud et al. (in prep.)

### What is displayed?

Surface density of gas from a hydrodynamic simulation of a Milky Way like galaxy, at sub-parsec resolution. The map is made of 174 762 tiles, each being a 1024 pixels x 1024 pixels 8-bits png image. The "big pixels" come from the AMR (adaptive mesh refinement) technique used in the simulation.

### What happens at zoom levels 5 and 8?

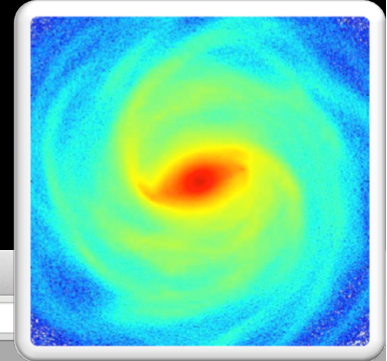
The color table changes automatically, so that the contrast of the very dense structures is enhanced. You can also change the contrast manually by selecting the map type (in top-right corner).





# La formation stellaire dans la Voie Lactée

[http://irfu.cea.fr/Pisp/florent.renaud/mw\\_large.php](http://irfu.cea.fr/Pisp/florent.renaud/mw_large.php)



Florent Renaud - Milky Way

irfu.cea.fr/Pisp/florent.renaud/mw\_large.php

1.22 kpc

Low densities High densities

**Spurs**

A velocity difference between both sides of the spiral arm creates Kelvin-Helmholtz instabilities, visible as spurs. Those on the top of this region have been created 15 million years ago and had time to diffuse, while those at the bottom are younger (10 million years) and are still dense and thin.

Milky Way maps

Information

- Zoom level: 3
- Size of a pixel: 1.53 pc
- Center of the image: (5.5000 kpc, -170.0000 pc)
- Position of the cursor: (4.1094 kpc, -718.7500 pc)

Guided Tour

Reset Map

**About the simulation**

[A few details](#)

Publications : Renaud et al. (in prep.)

**What is displayed?**

Surface density of gas from a hydrodynamic simulation of a Milky Way like galaxy, at sub-parsec resolution. The map is made of 174 762 tiles, each being a 1024 pixels x 1024 pixels 8-bits png image. The "big pixels" come from the AMR (adaptive mesh refinement) technique used in the simulation.

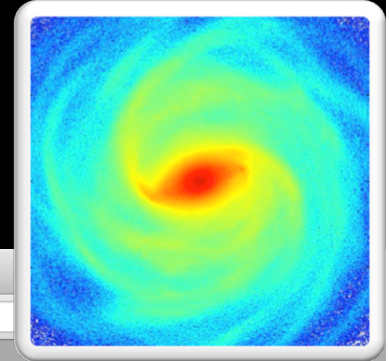
**What happens at zoom levels 5 and 8?**

The color table changes automatically, so that the contrast of the very dense structures is enhanced. You can also change the contrast manually by selecting the map type (in top-right corner).



# La formation stellaire dans la Voie Lactée

[http://irfu.cea.fr/Pisp/florent.renaud/mw\\_large.php](http://irfu.cea.fr/Pisp/florent.renaud/mw_large.php)



Florent Renaud - Milky Way

irfu.cea.fr/Pisp/florent.renaud/mw\_large.php

9.54 pc

Low densities High densities

**Proto-stellar cores**

The darkest spots in this region are the future nurseries of stars: the proto-stellar cores. These are the smallest structure resolved by our simulation.

$\log(\Sigma [M_{\odot} \text{pc}^{-2}])$

7.8  
5.1  
2.3

## Milky Way maps

Information

Zoom level: 10  
Size of a pixel: 0.05 pc  
Center of the image: (1.5440 kpc, 484.0000 pc)  
Position of the cursor: (2.6108 kpc, 672.5311 pc)

Reset Map

Guided Tour

### About the simulation

[A few details](#)  
Publications : Renaud et al. (in prep.)

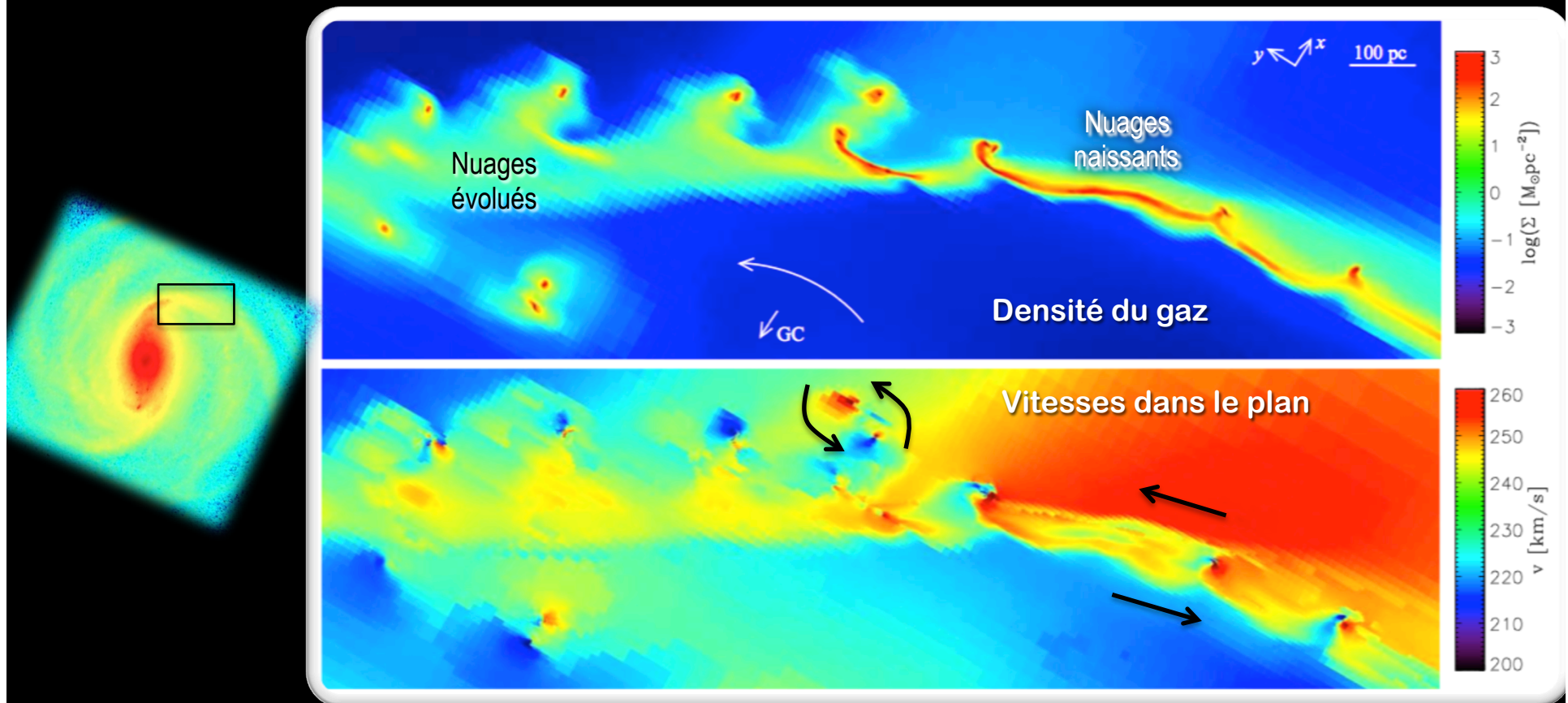
### What is displayed?

Surface density of gas from a hydrodynamic simulation of a Milky Way like galaxy, at sub-parsec resolution. The map is made of 174 762 tiles, each being a 1024 pixels x 1024 pixels 8-bits png image. The "big pixels" come from the AMR (adaptive mesh refinement) technique used in the simulation.

### What happens at zoom levels 5 and 8?

The color table changes automatically, so that the contrast of the very dense structures is enhanced. You can also change the contrast manually by selecting the map type (in top-right corner).

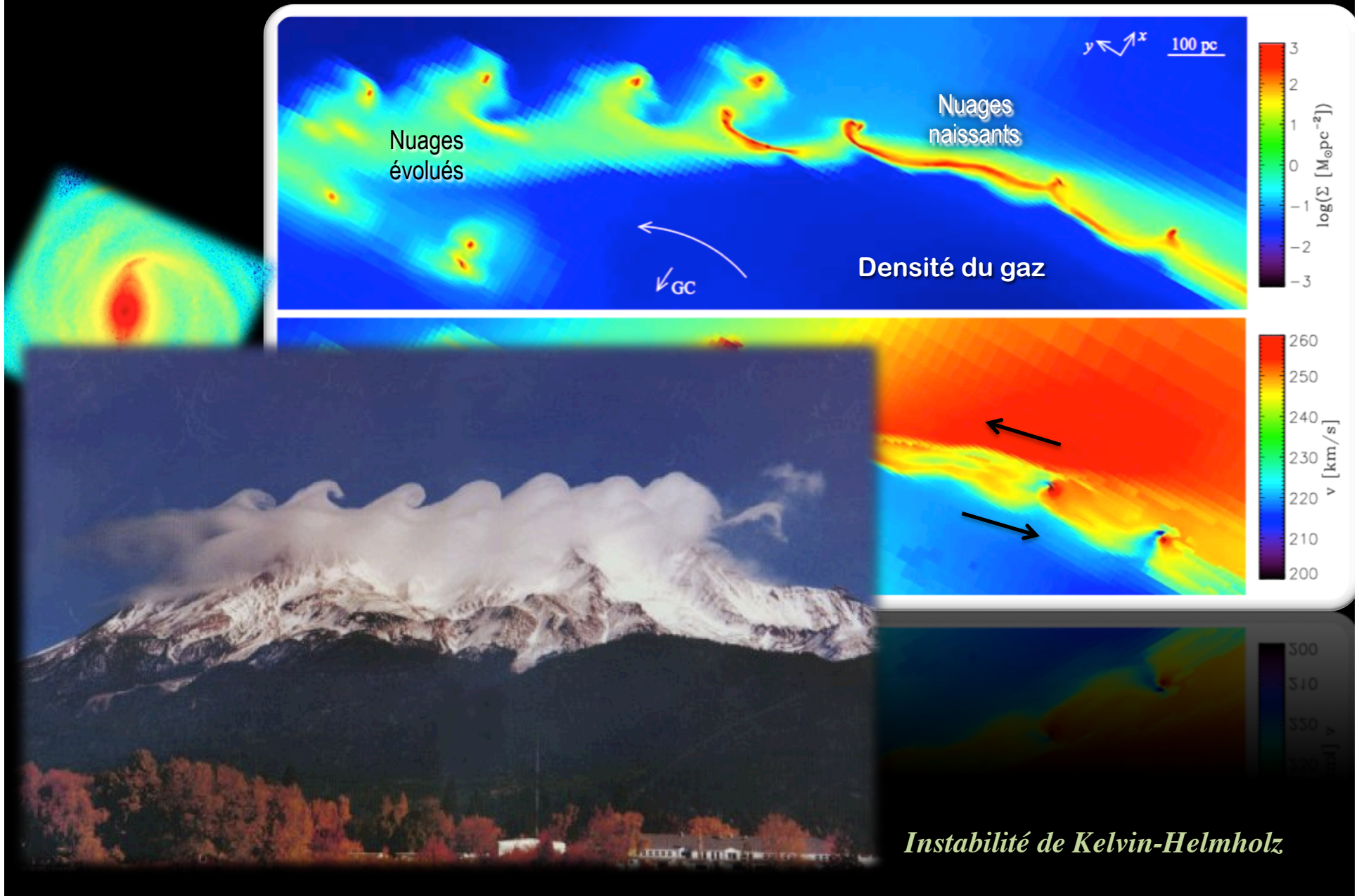
# La formation stellaire dans la Voie Lactée



La formation stellaire auto-régulée des galaxies "normales" est expliquée par:

- 1/ La turbulence du gaz interstellaire, entretenue par les **instabilités gravitationnelle et hydrodynamique**
- 2/ La rétroaction des étoiles jeunes (vents stellaires, explosions de supernovae)

# La formation stellaire dans la Voie Lactée





# La croissance quasi-continue des trous noirs supermassifs

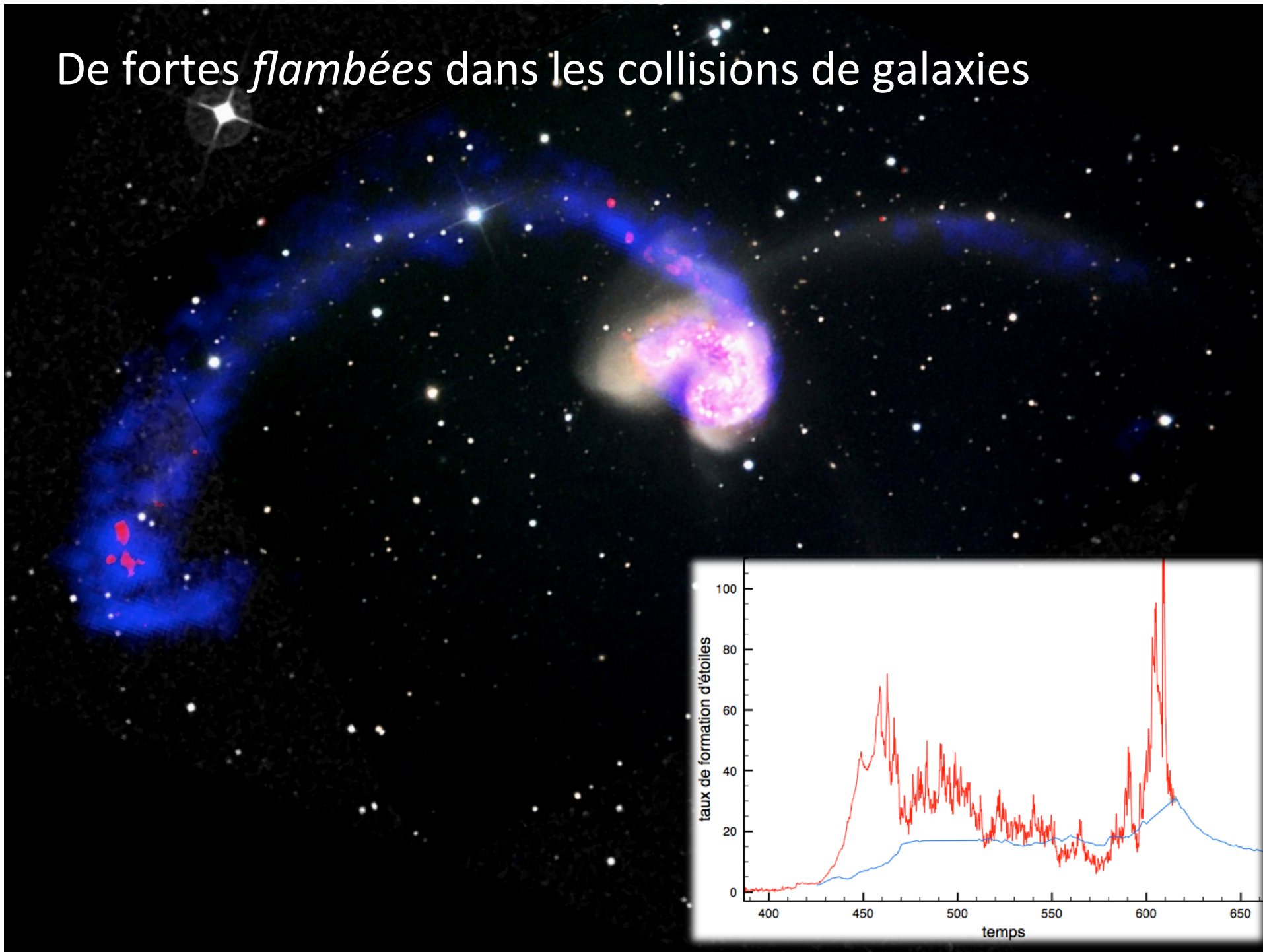


Même technique appliquée à une galaxie de l'Univers primordial :

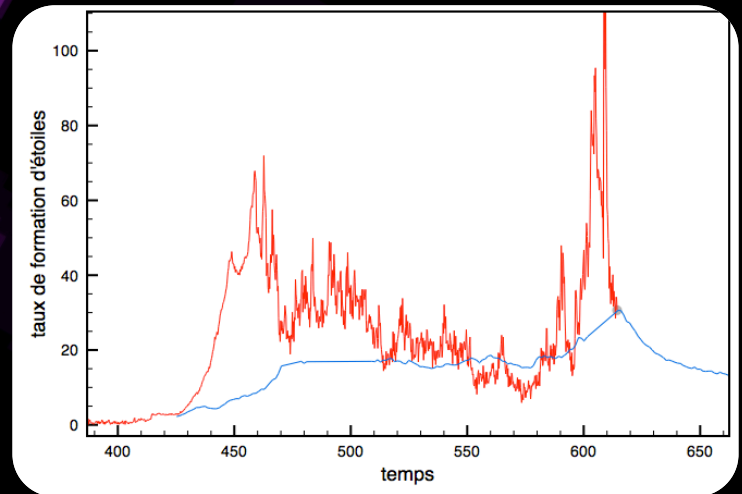
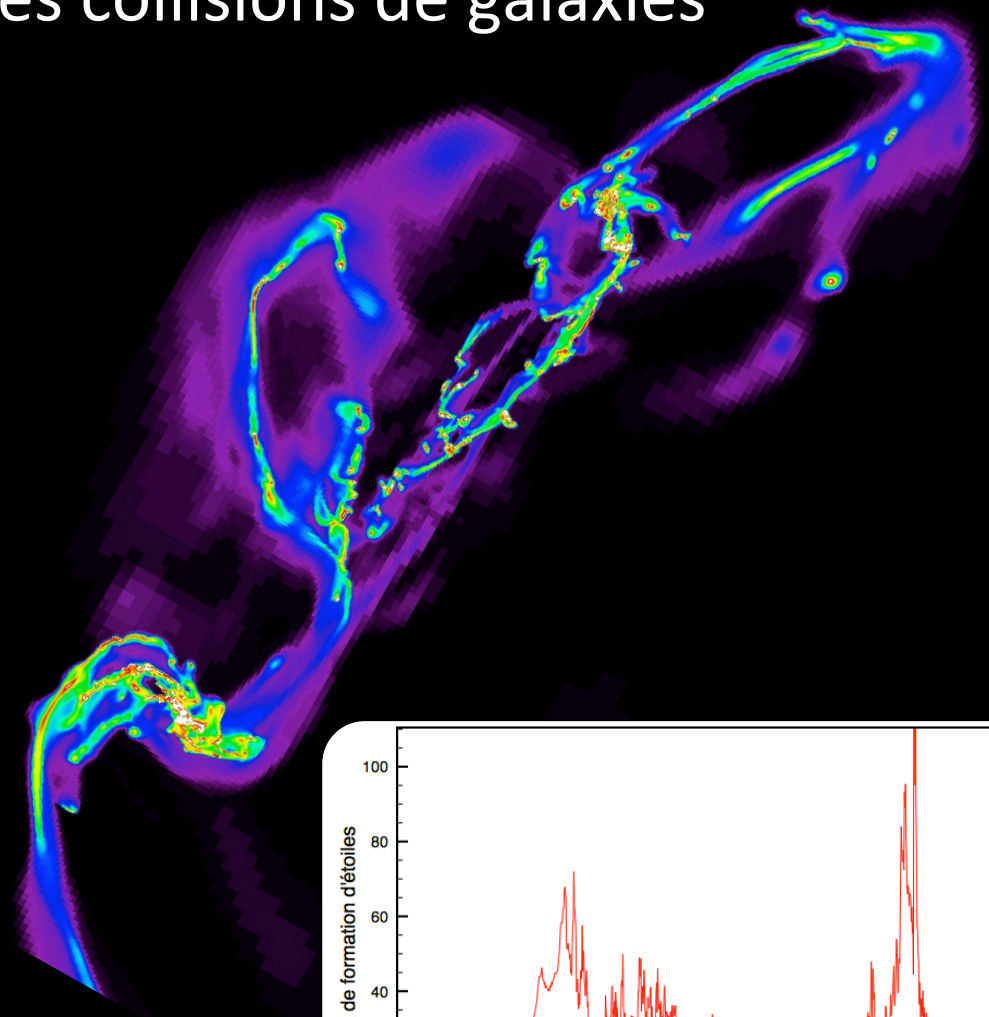
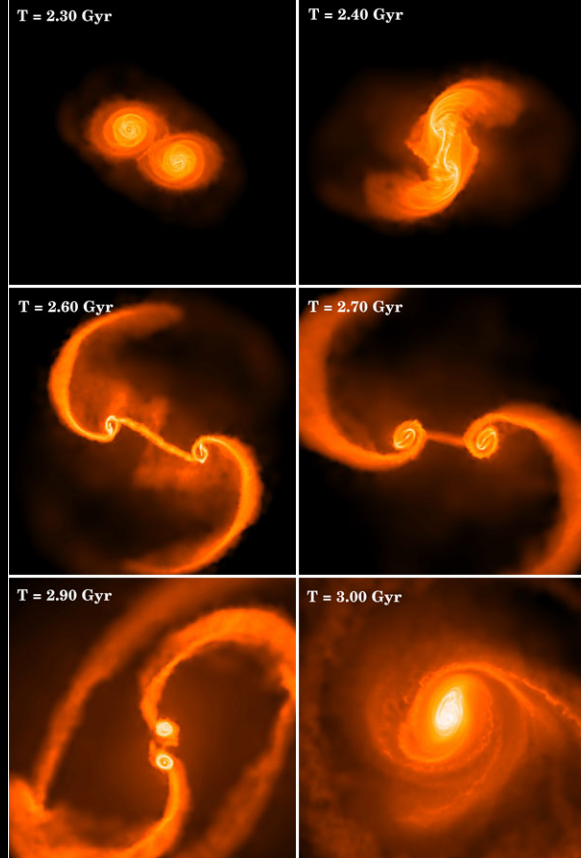
- Fragmentation majeure du disque
- Une partie du gaz est freinée dans sa rotation, et peut alimenter le trou noir central



# De fortes *flambées* dans les collisions de galaxies



# De fortes *flambées* dans les collisions de galaxies



Les flambées de formation stellaire enfin expliquées :  
Agitation turbulente du gaz à des vitesses supersoniques,  
Fragmentation exacerbée et sur-production de gaz très dense, très instable