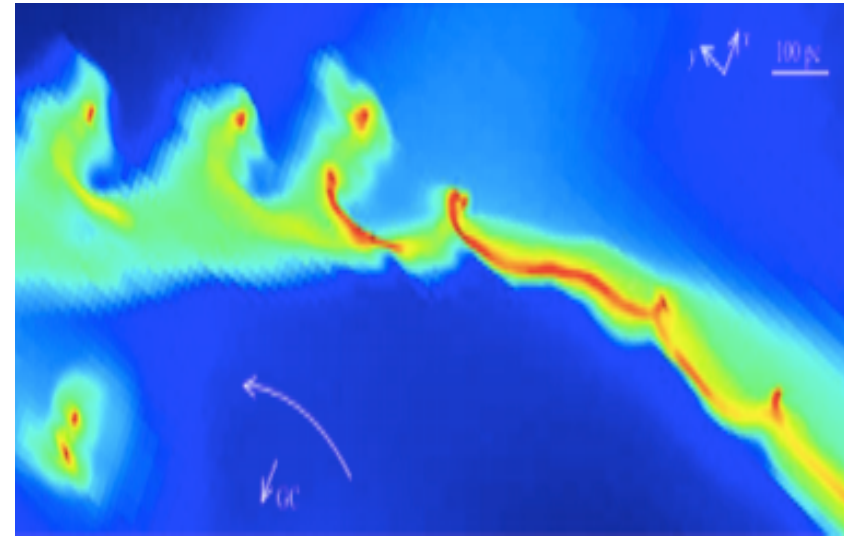


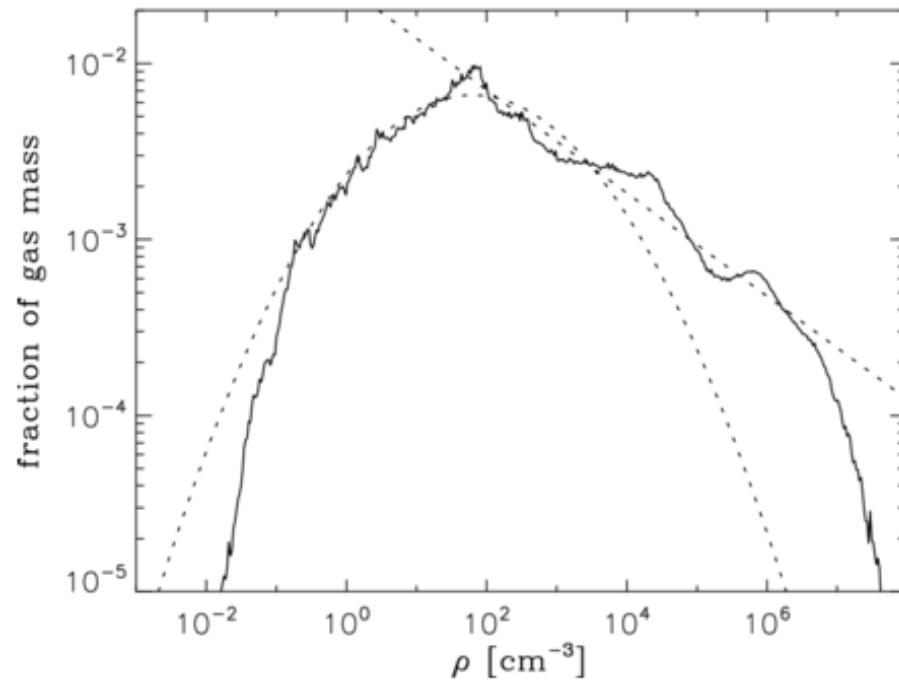
Formation des galaxies et de leurs étoiles



*Régulation de la formation stellaire et
de la croissance en masse des galaxies*

Frédéric Bournaud
CEA Saclay, DRF/IRFU/SAP/LCEG.

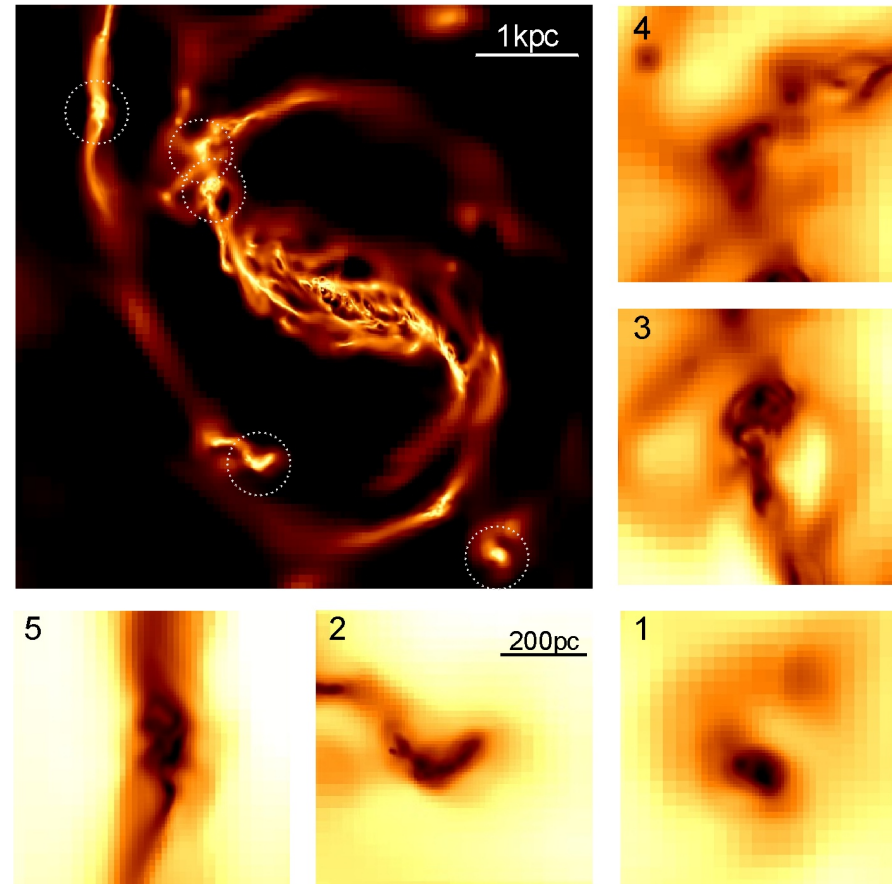
Dynamique galactique et formation stellaire



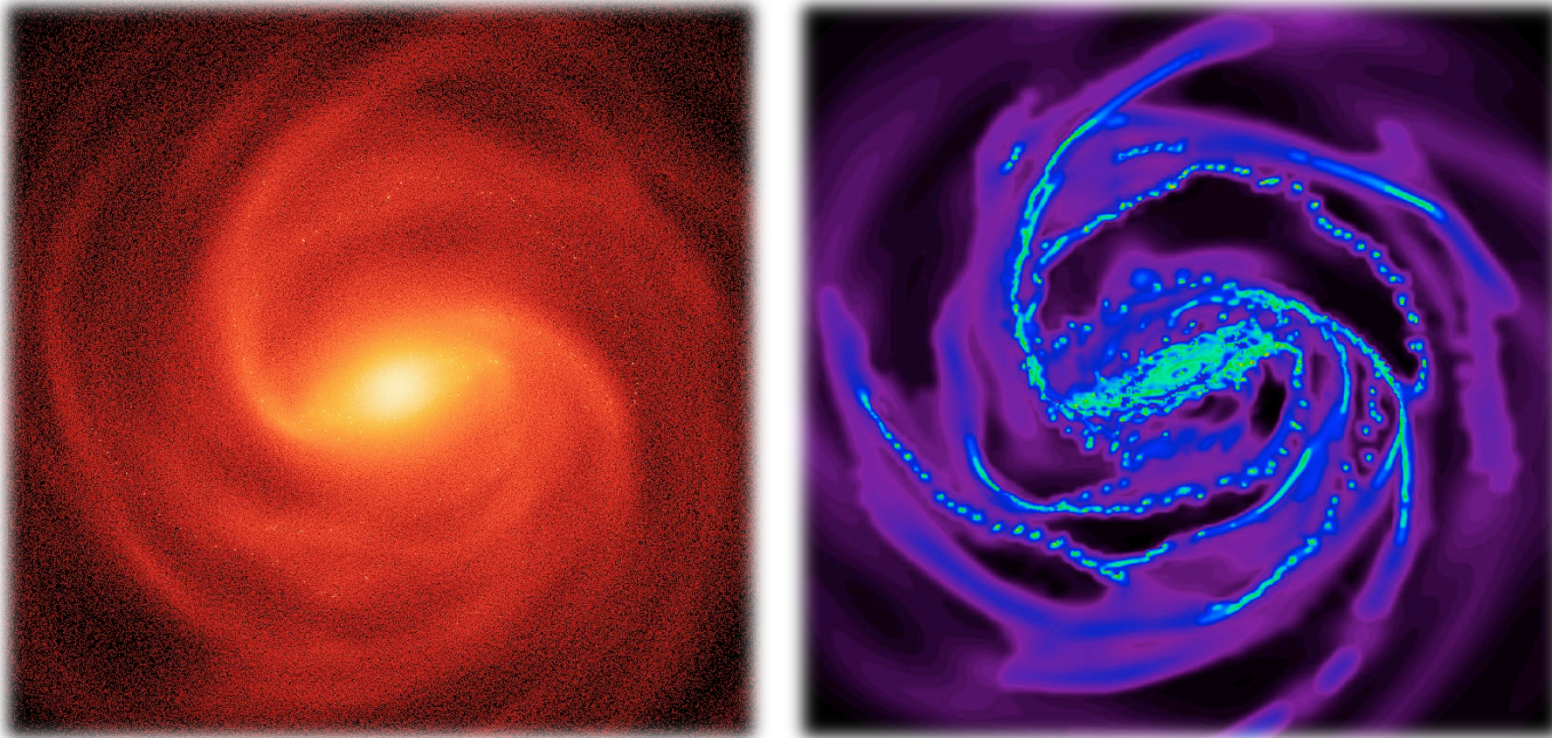
Code AMR RAMSES + Moyens HPC depuis 2010:

- Possibilité de résoudre la structure du milieu interstellaire jusqu'à l'échelle du parsec
- Modélisation d'une phase froide, instable, et turbulente en régime supersonique

=> Les « premières échelles » de la formation stellaire peuvent être résolues (hors contexte cosmologique)

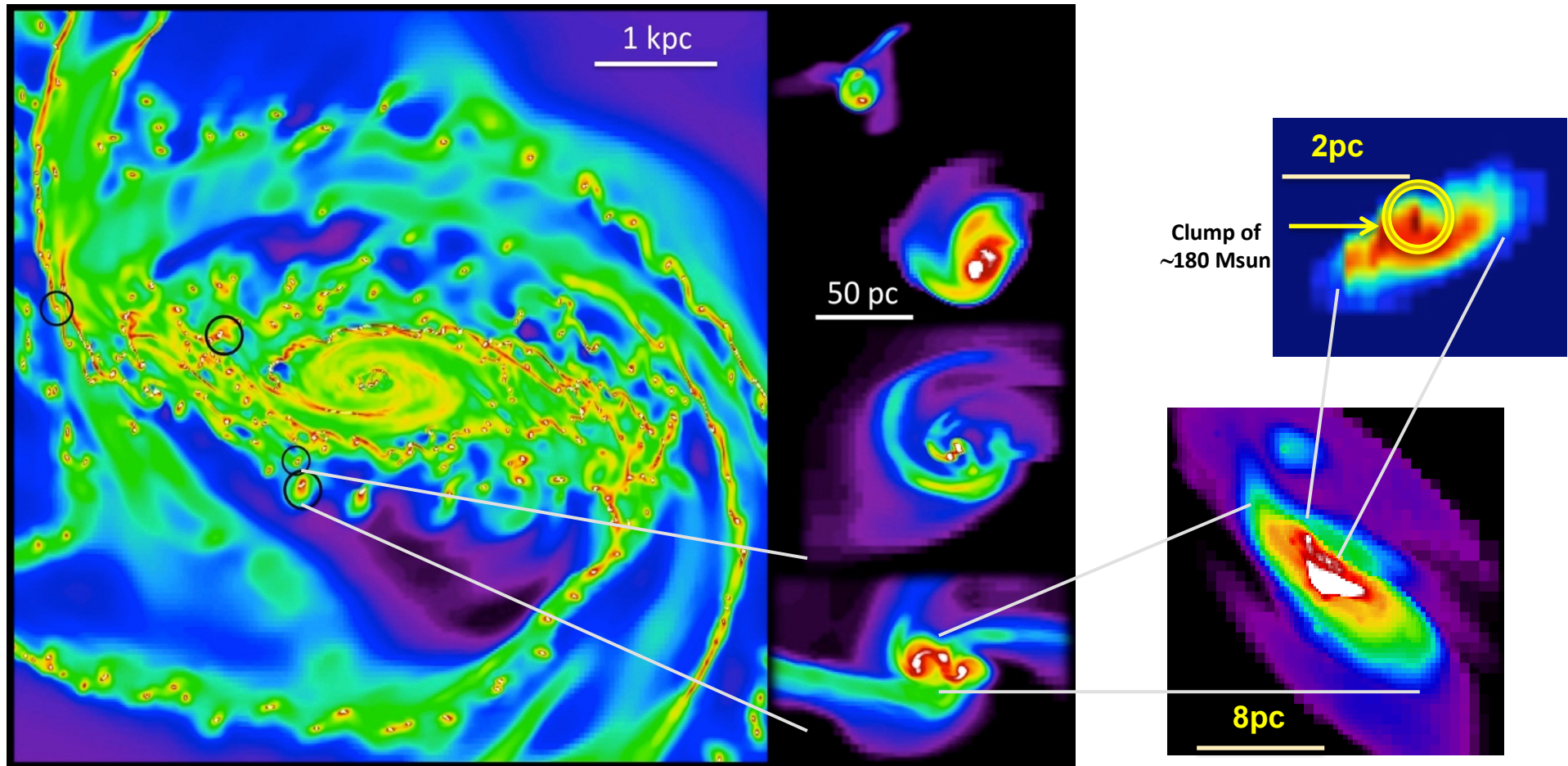


Première étape: modélisation de la Voie Lactée



- Distribution de masse selon le « modèle de Besançon » (Robin, Reylé et al.)
- Evolution jusqu'à la formation d'une spirale barrée réaliste
- Croissement graduel de la résolution jusqu'à 0.01pc

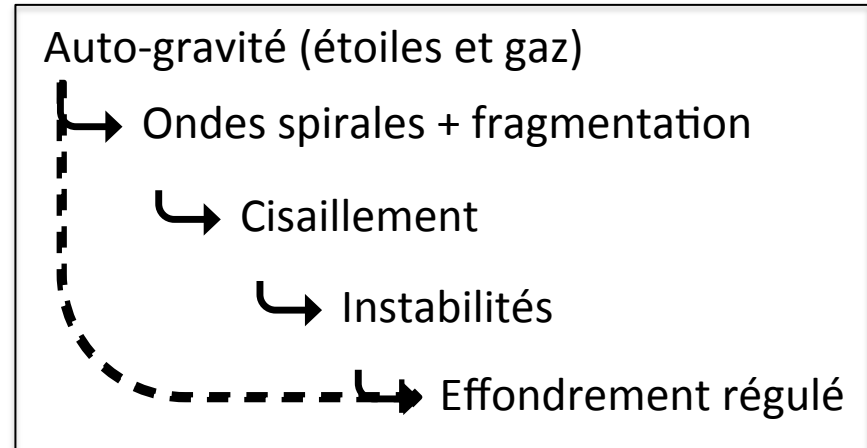
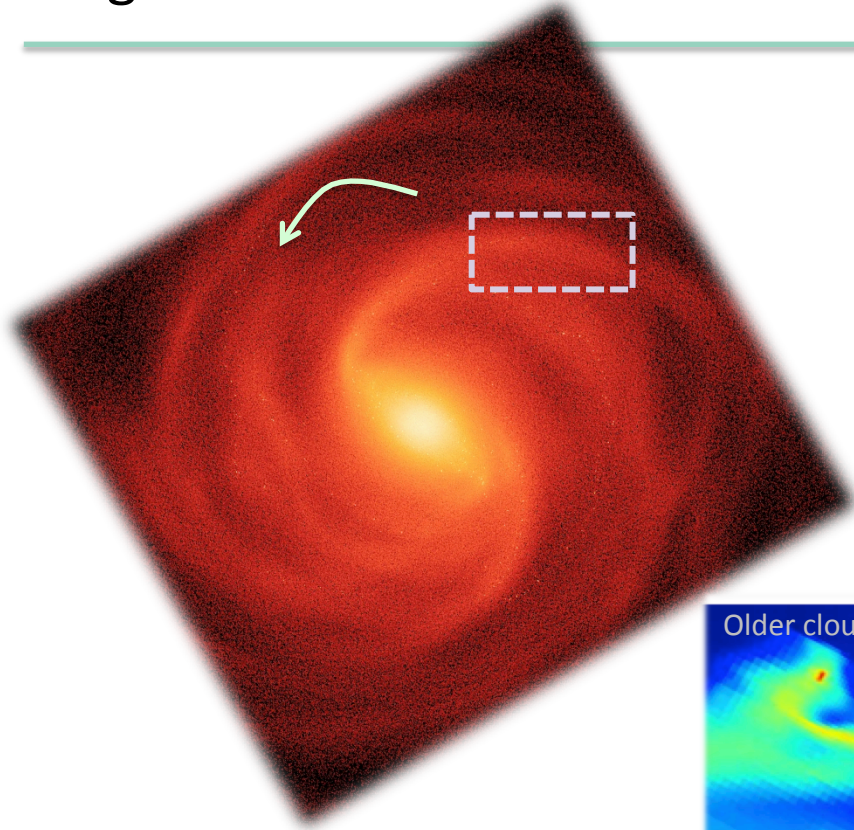
Première étape: modélisation de la Voie Lactée



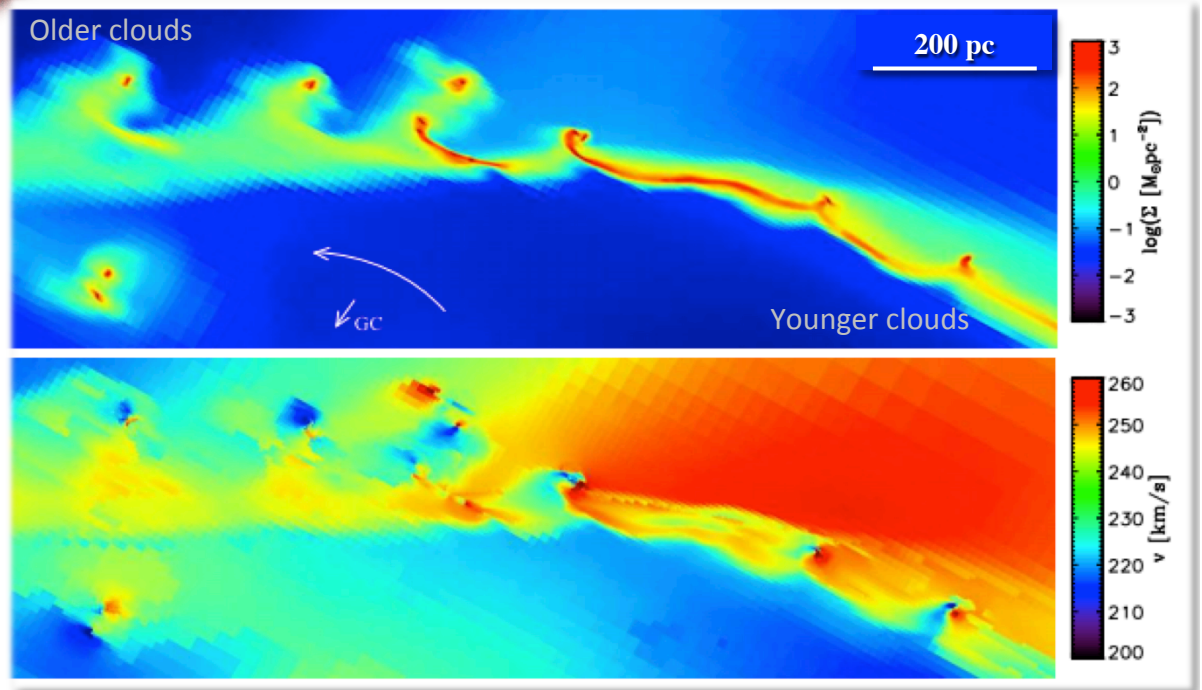
Renaud, Bournaud, Emsellem et al. 2013

- Physique très approchée à l'échelle sous-parsec.
- Mais la fraction de gas très dense (jusqu'à 10^7 fois la densité moyenne) fournie par la dynamique galactique depuis les échelles 1pc-1kpc est explicitement résolue.

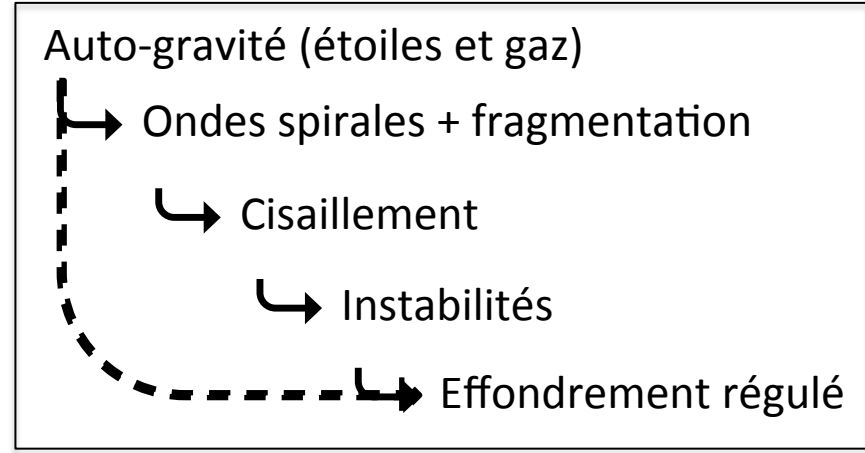
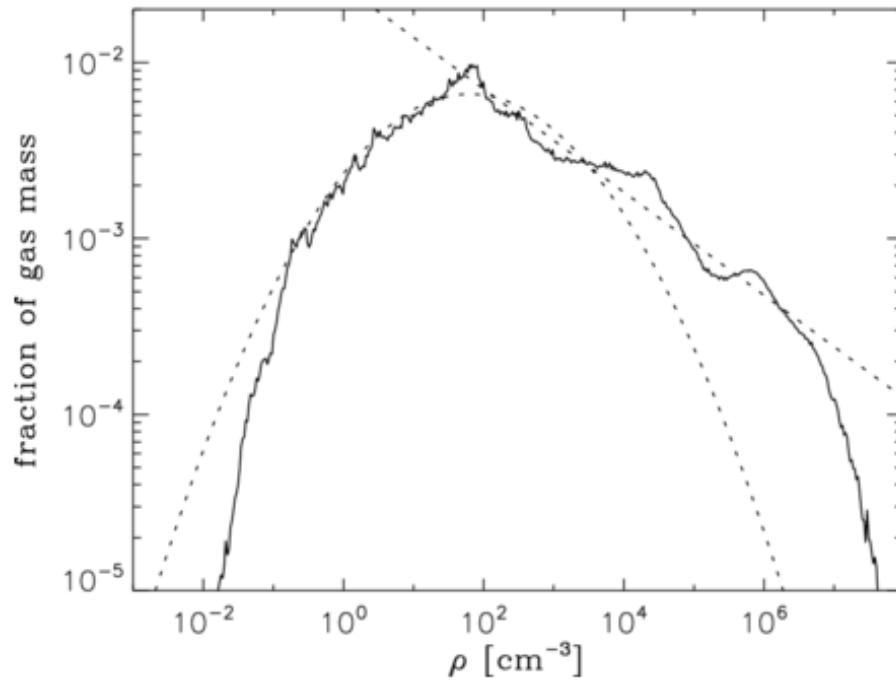
Régulation de la formation stellaire par la cascade turbulente



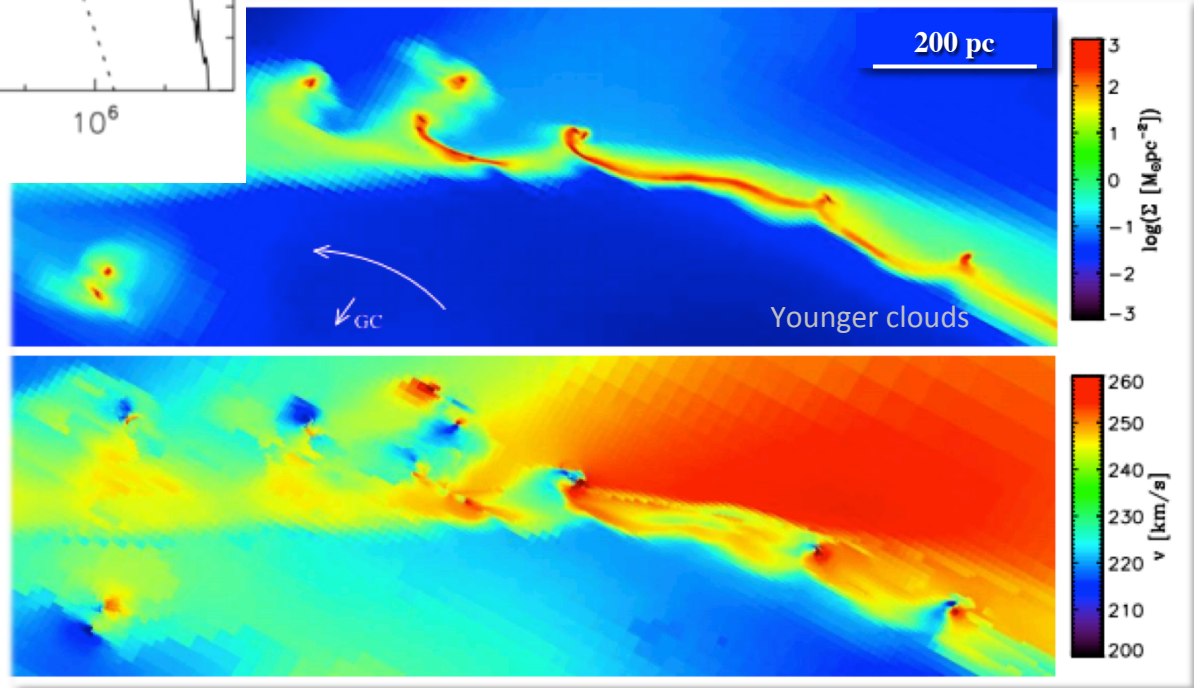
Seulement $\sim 2\%$ de la masse de gaz est sous forme dense, avec une autogravité dépassant la pression turbulente, à tout instant.



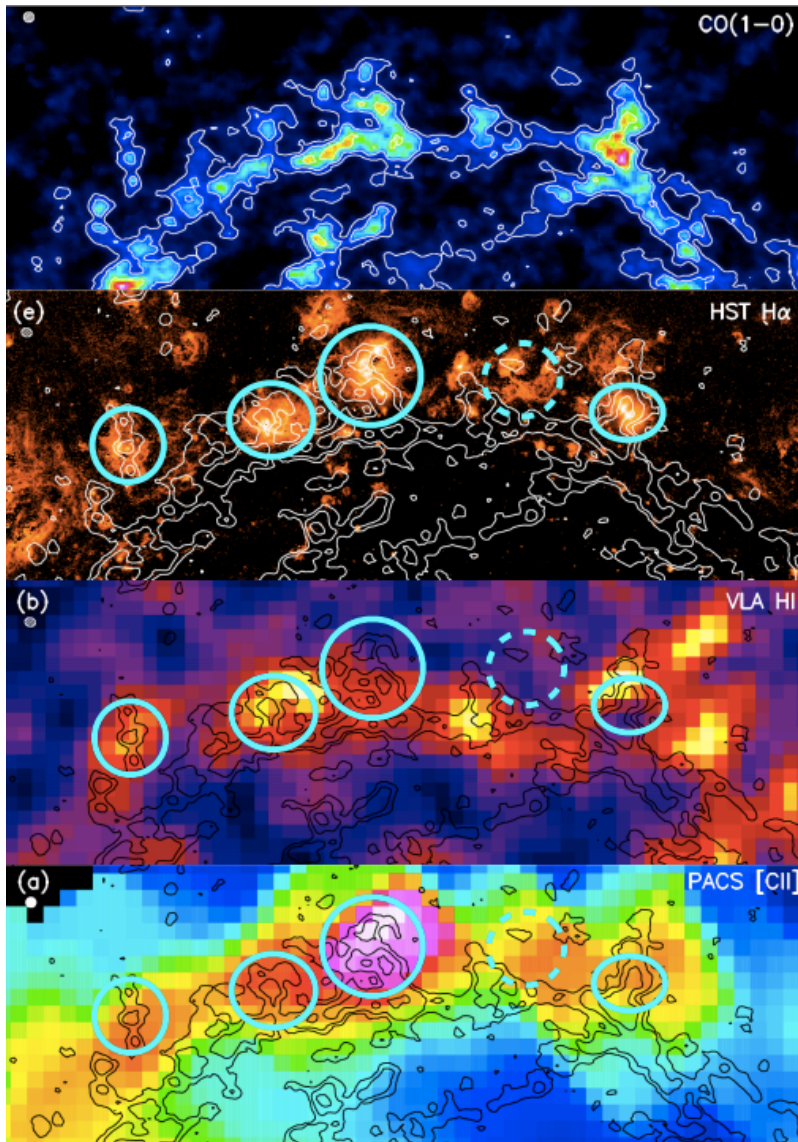
Régulation de la formation stellaire par la cascade turbulente



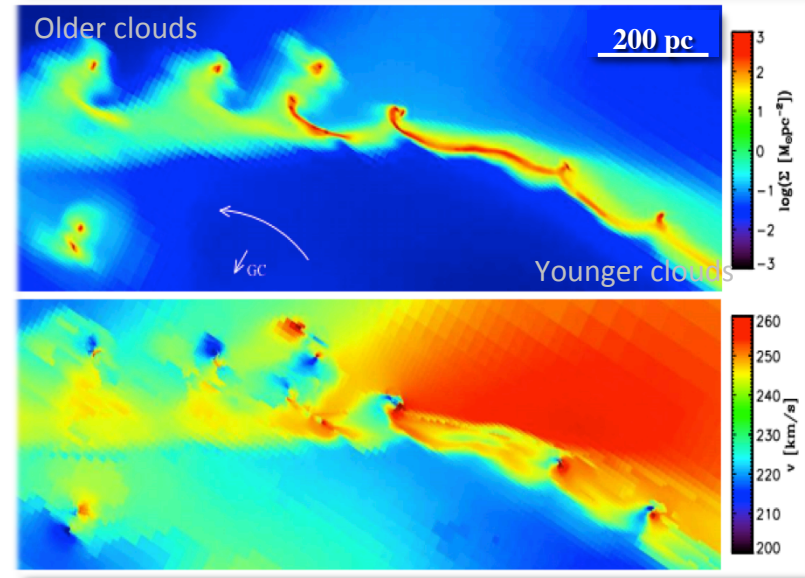
Seulement $\sim 2\%$ de la masse de gaz est sous forme dense, avec une autogravité dépassant la pression turbulente, à tout instant.



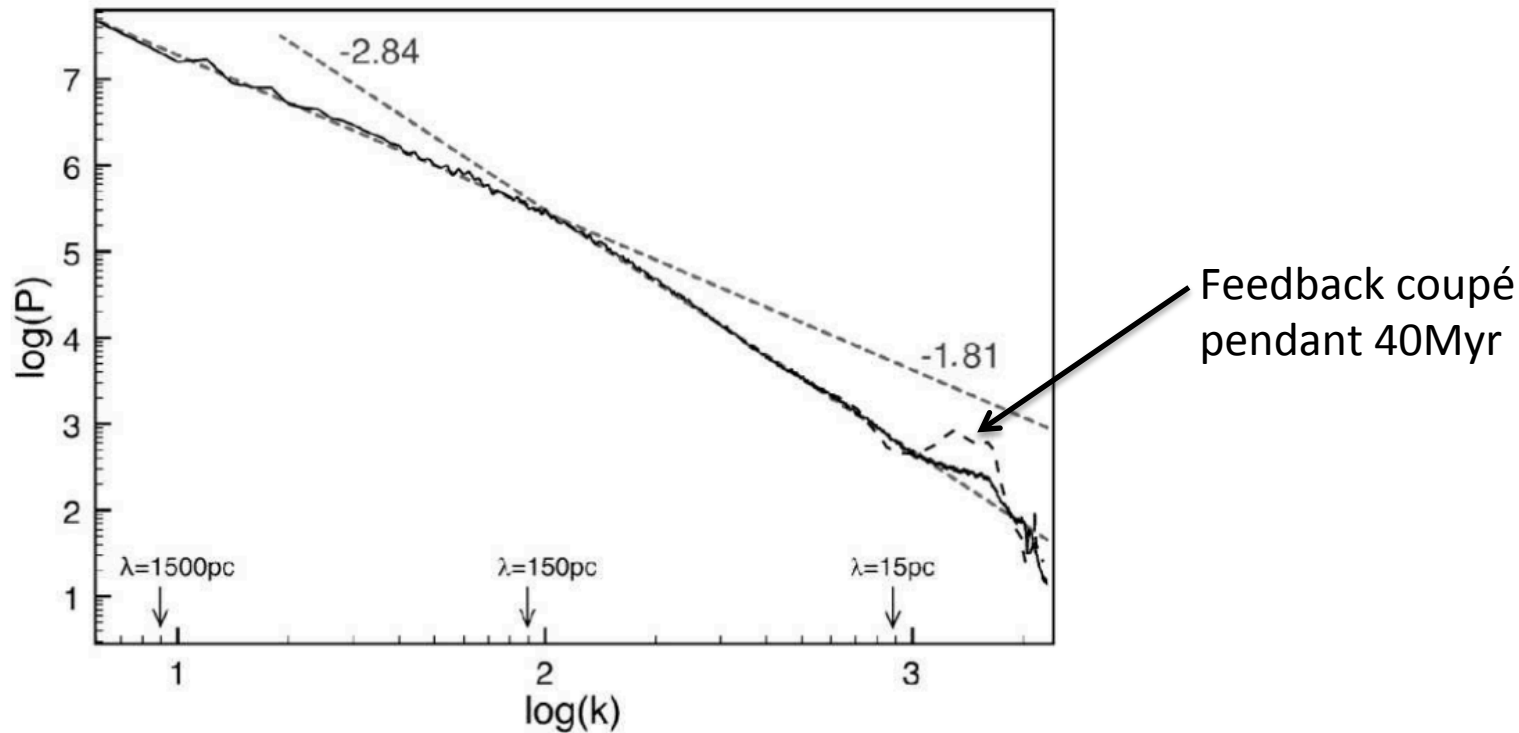
Régulation de la formation stellaire par la cascade turbulente



- Observations IRAM du gaz moléculaire dans un bras spiral de M51 (Schinnerer et al. 2015)
- Rapport des taux de formation stellaire dans les bras et les « spurs » compatible avec nos modèles

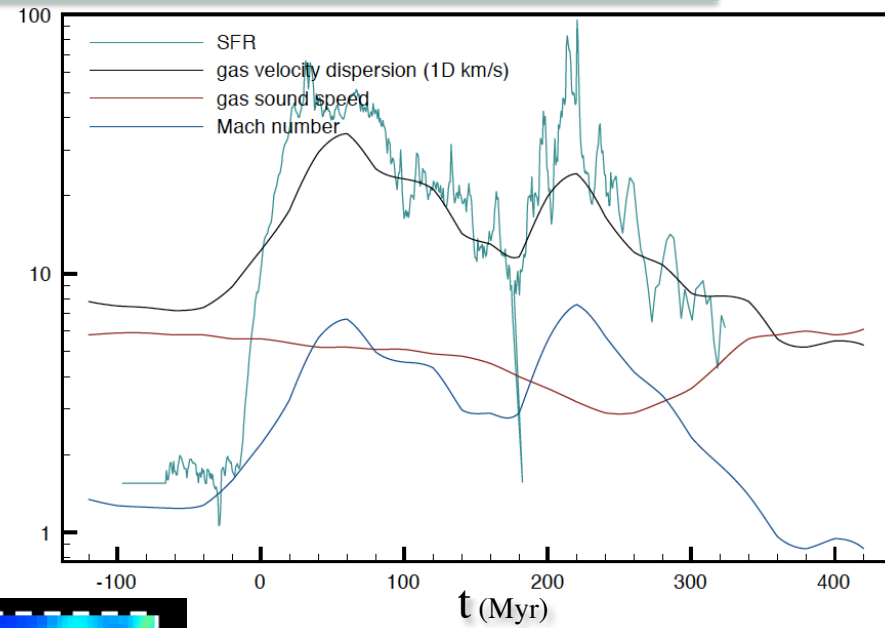
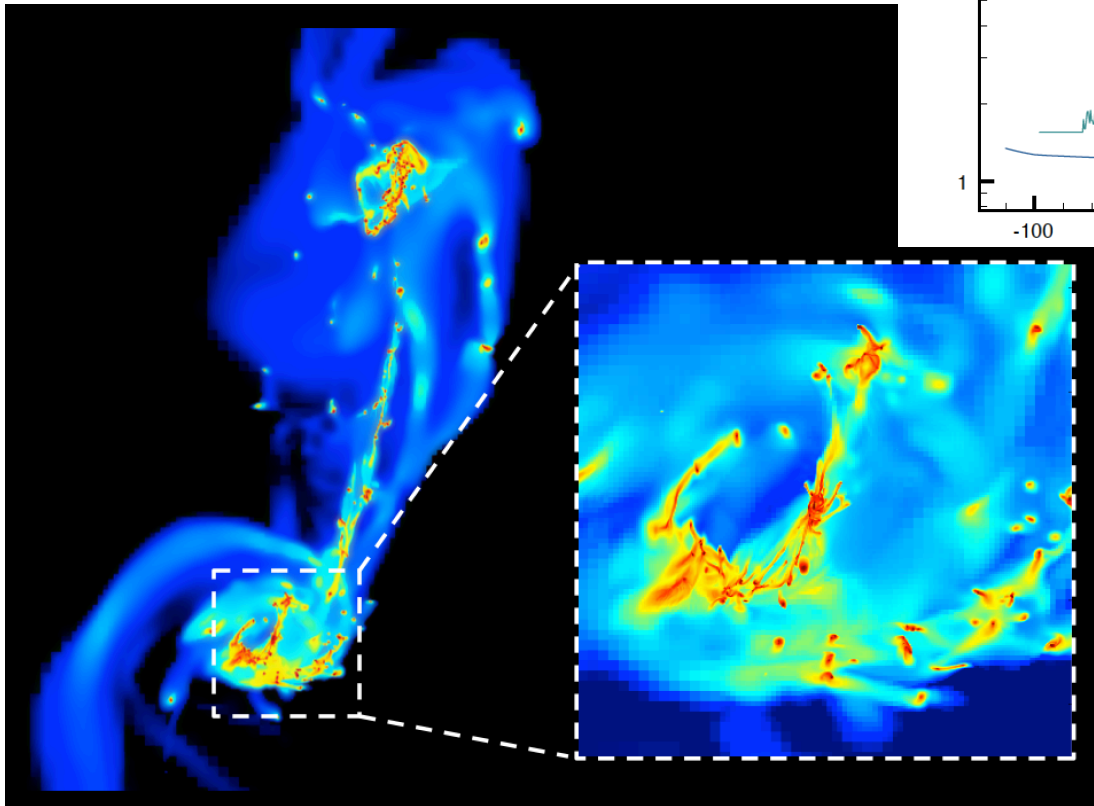


L'influence limitée du « feedback » sur la structure du MIS.



- Le « feedback » joue un rôle de régulateur mais ne détermine pas les propriétés de la cascade turbulente
- C'est la fraction de gaz très dense et auto-gravitant, issu de la cascade turbulente, qui régule la formation stellaire, pas le feedback.

Transition aux « starbursts » dans les collisions de galaxies

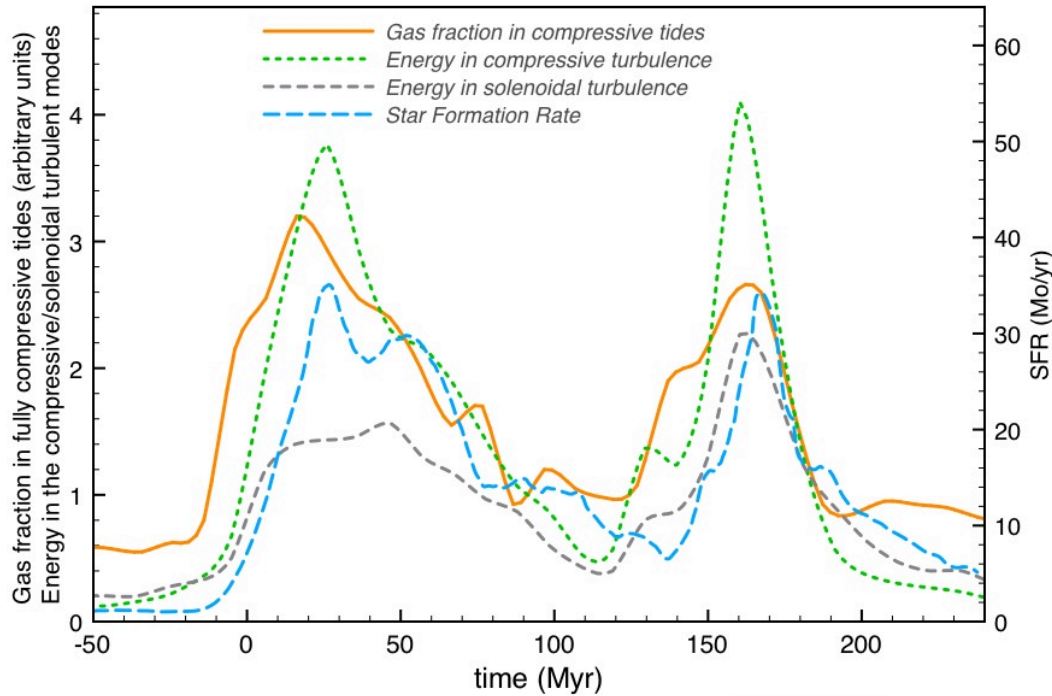


Interactions de galaxies :

- Sursaut de formation stellaire
- Turbulence largement accrue.

=> Quel est le lien?

Transition aux « starbursts » dans les collisions de galaxies



$$v_{turb} = v_{sol} + v_{comp}$$

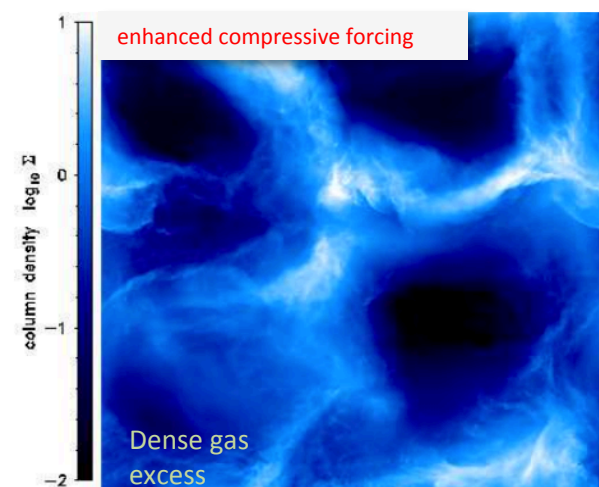
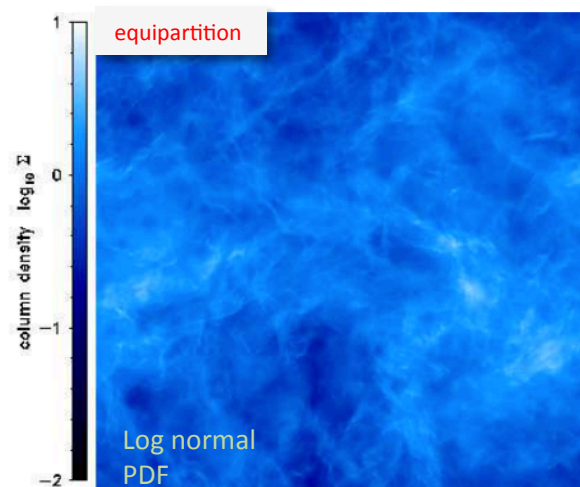
$$\nabla \cdot v_{sol} = 0 \quad \nabla \times v_{sol} = \nabla \times v_{turb}$$

$$\nabla \cdot v_{comp} = \nabla \cdot v_{turb} \quad \nabla \times v_{comp} = 0$$

L'augmentation de la turbulence ne régule pas plus la formation stellaire, car elle se fait préférentiellement dans le mode Ccompressif qui déstabilise le gaz

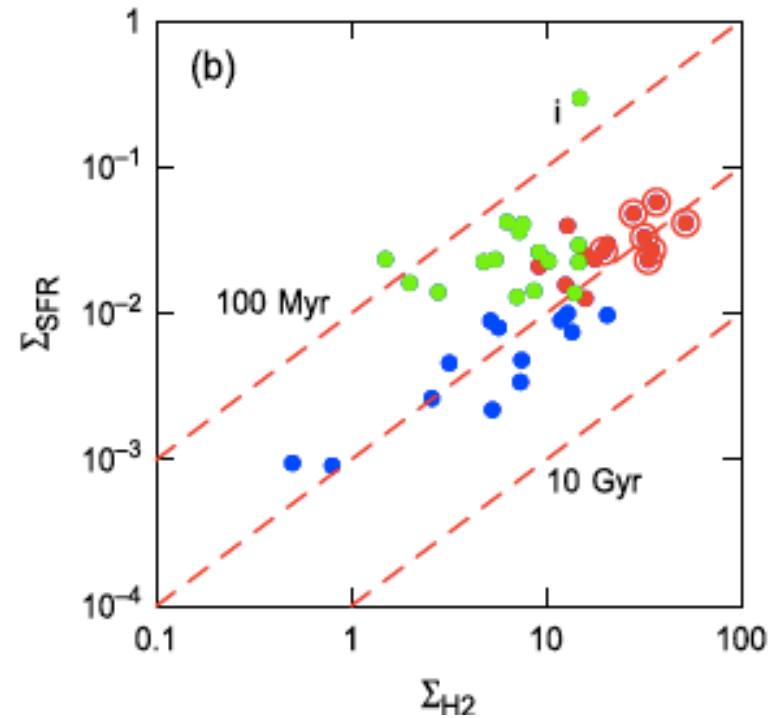
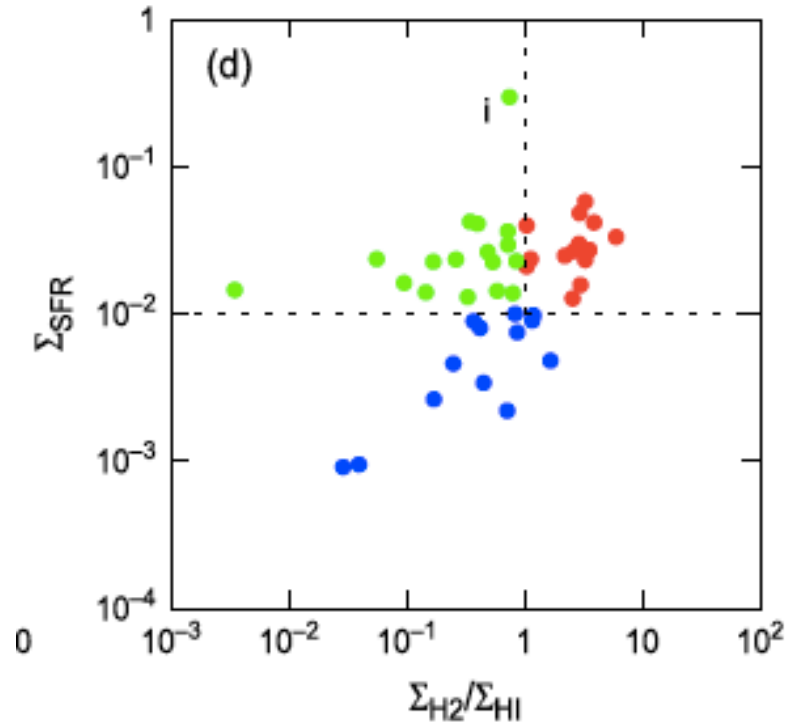
Les propriétés du forçage turbulent sont déterminées par la dynamique galactique (disques, collisions, etc).

Détermine l'efficacité de formation Stellaire, et peut-être l'IMF



Fedderath et al. 2012 – ISM simulations with arbitrary turbulent forcing

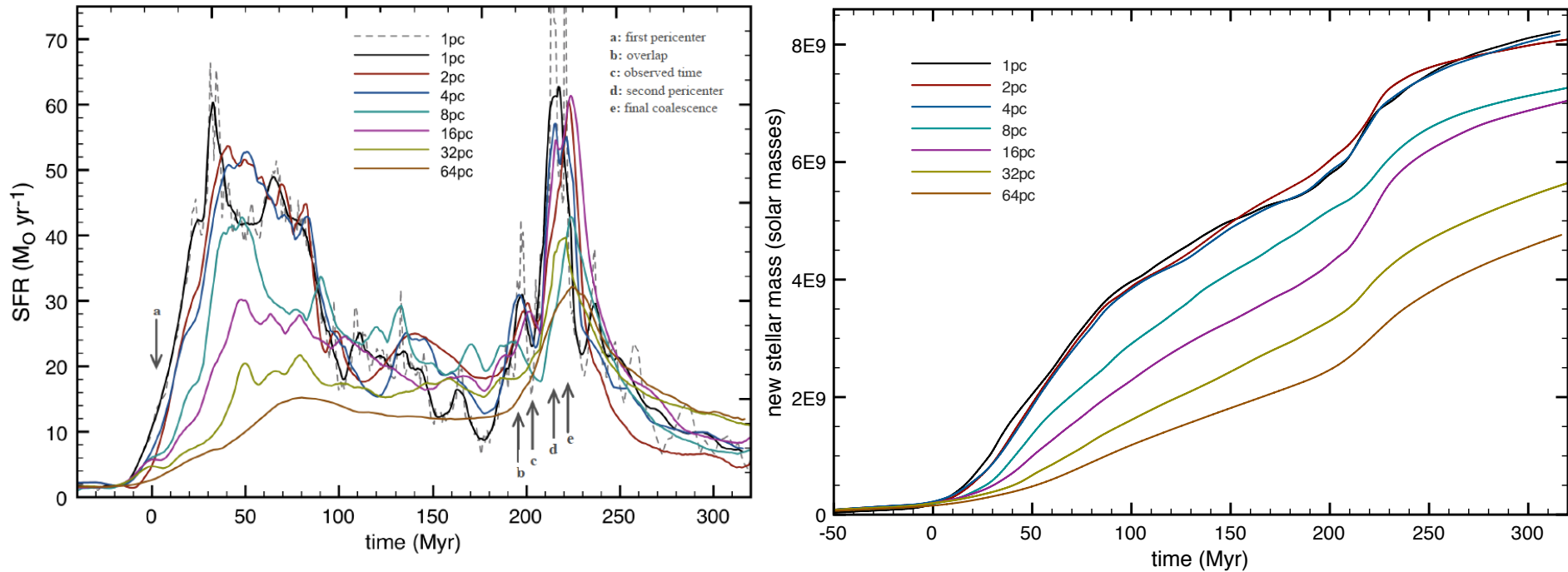
Transition aux « starbursts » dans les collisions de galaxies



ALMA vient de montrer que les régions « starbursts » des systèmes en interaction ont un excès de formation stellaire par rapport au gaz moléculaire, et un excès de gaz peu dense (atomique) par rapport au gaz moléculaire (Elmegreen et al. 2016)



Convergence des modèles sous-maille ?



Simulation du même système avec une résolution de 64pc à 1pc

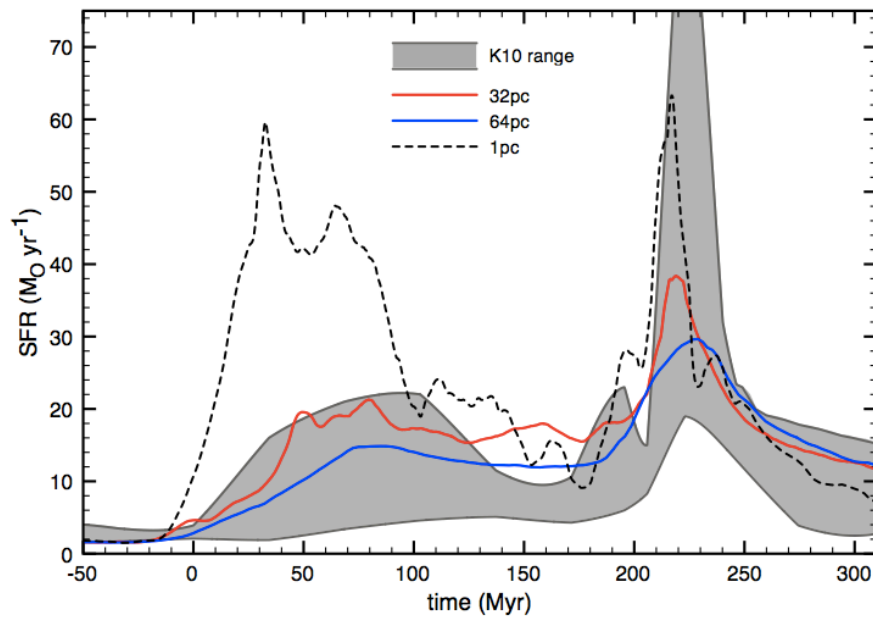
Convergence rapide à 5pc environ.

C'est l'échelle à laquelle le gaz auto-gravitant est résolu sans biais dans son refroidissement.

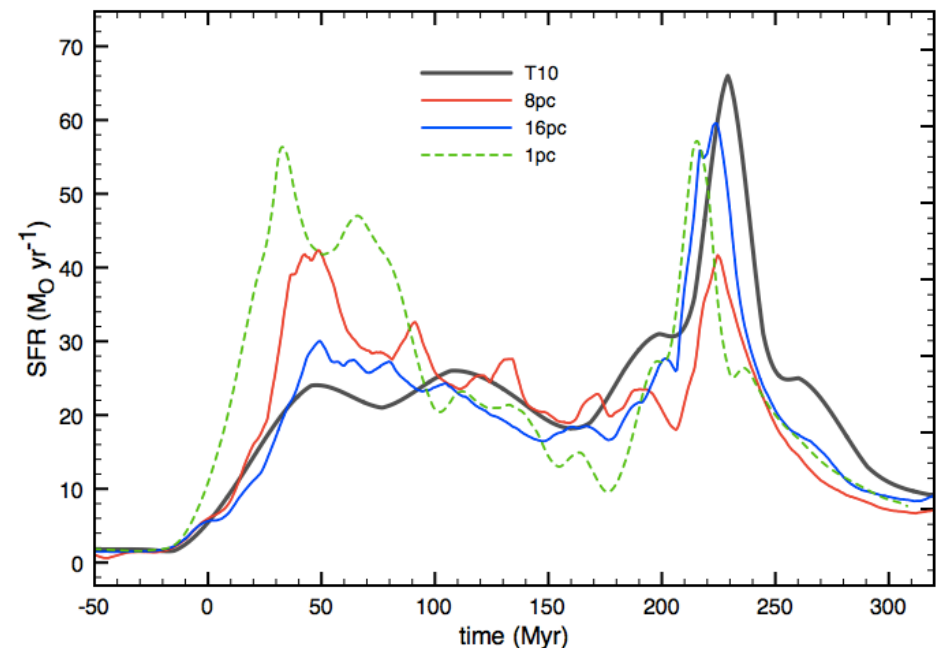
Convergence des modèles sous-maille ?

Comparaison au même système avec d'autres codes et/ou modèles sous-maille :

La résolution semble bien plus déterminante que le solveur hydro et le modèle sous-maille.

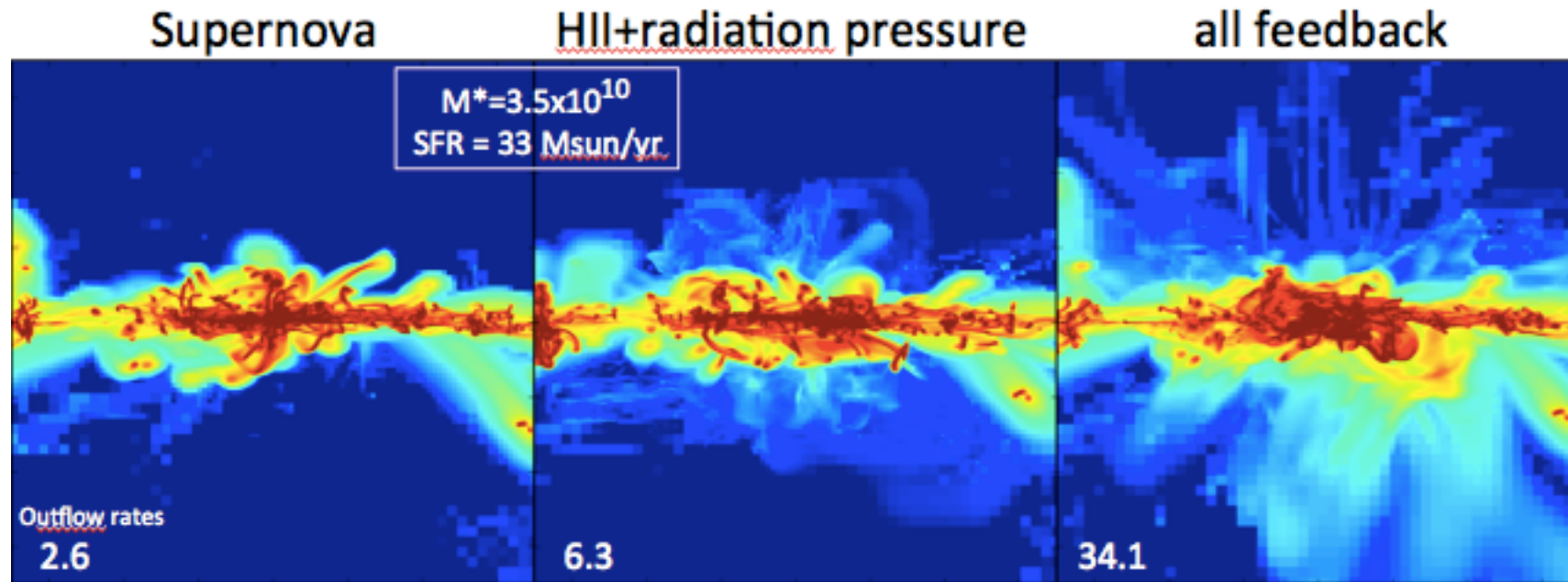


*Comparing to Karl, Naab et al. 2010 (K10)
SPH simulations with ~50pc resolution
and various sub-grid parameters*



*Comparing to Teyssier et al. 2010 (T10)
Same code but EoS (fake) cooling and no feedback*

« Feedback stellaire » et fontaine galactique

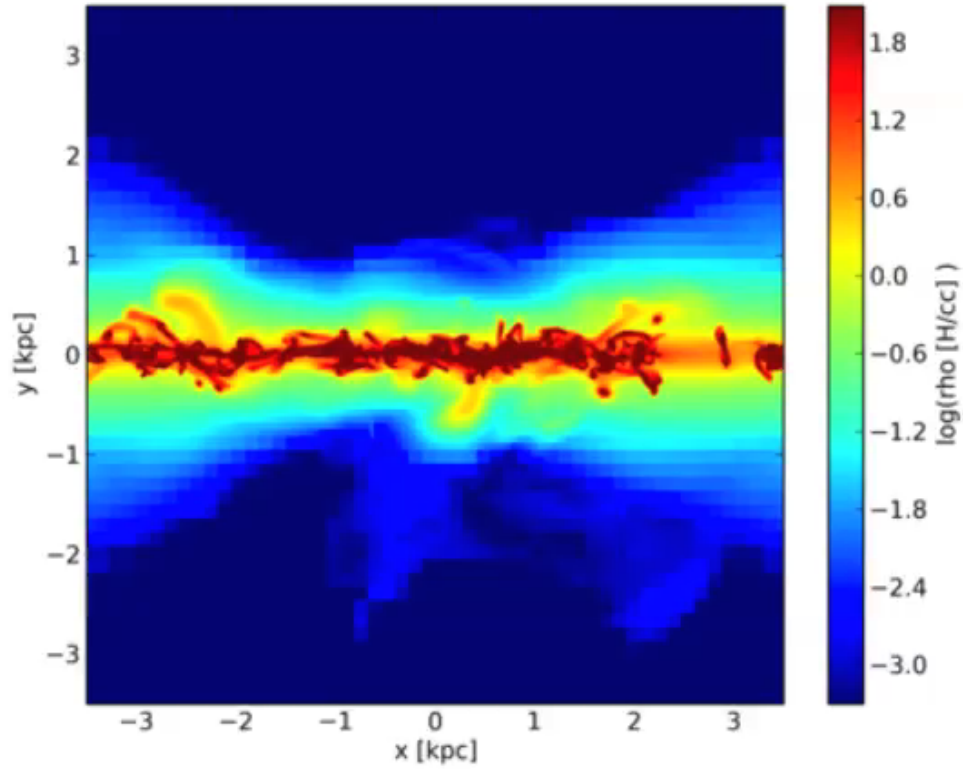


Le « feedback » ne se limite pas aux supernovae

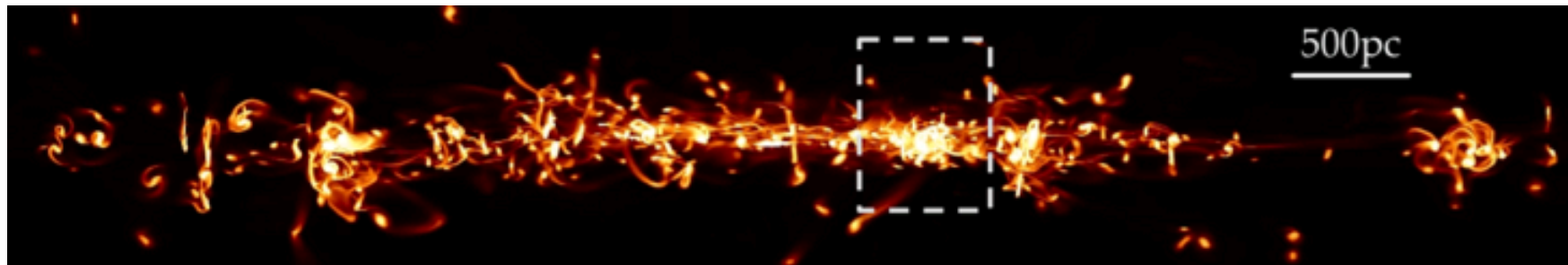
Les processus de feedback doivent être modélisés un par un, et pas comme un rejet d'énergie global unique : couplage non-linéaire

Néanmoins les « outflows » dûs au feedback stellaire sont lents : « fontaine »

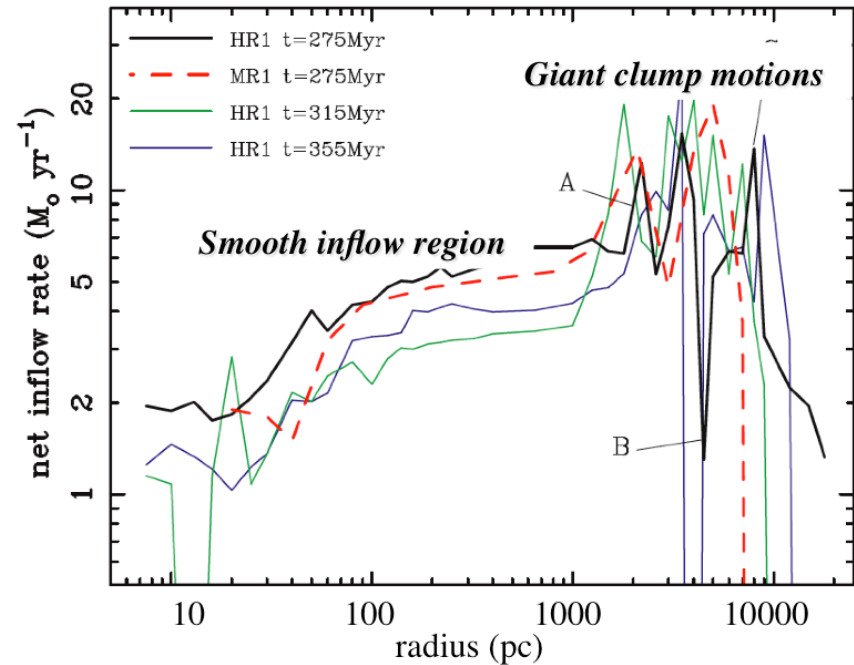
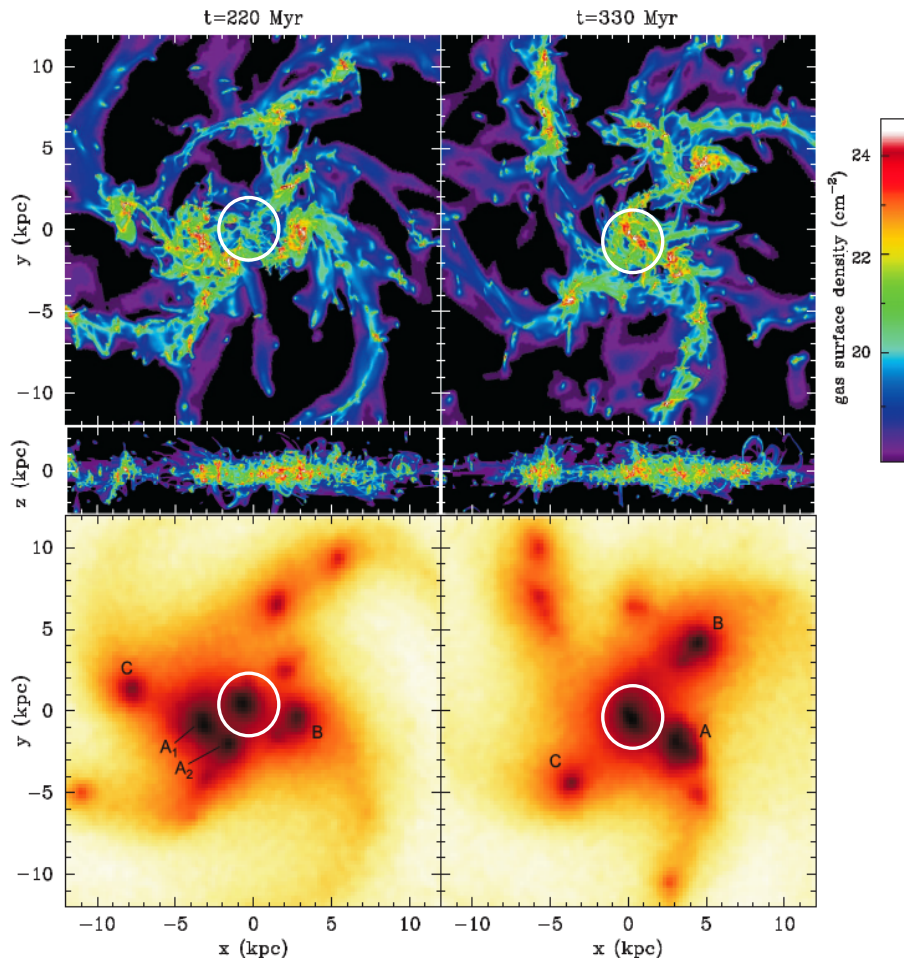
« Feedback stellaire » et fontaine galactique



Progéniteur de Voie Lactée
Redshift $z=2$.

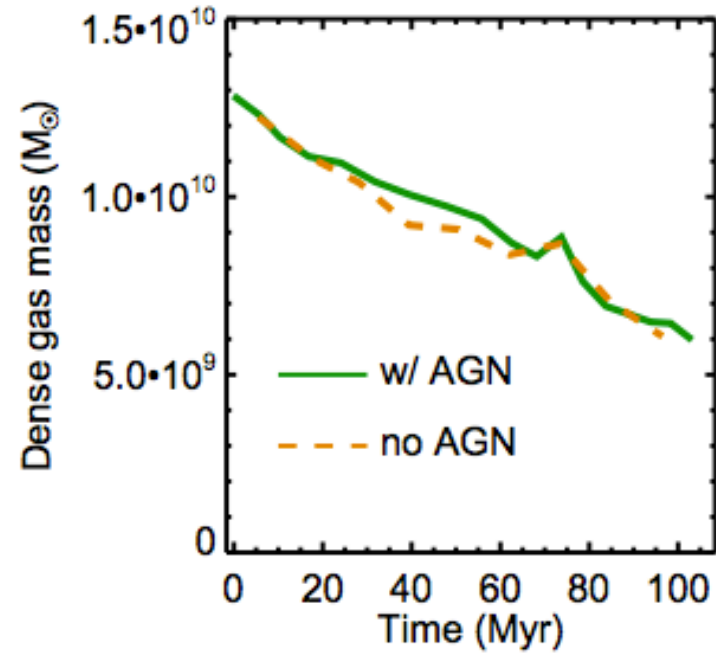
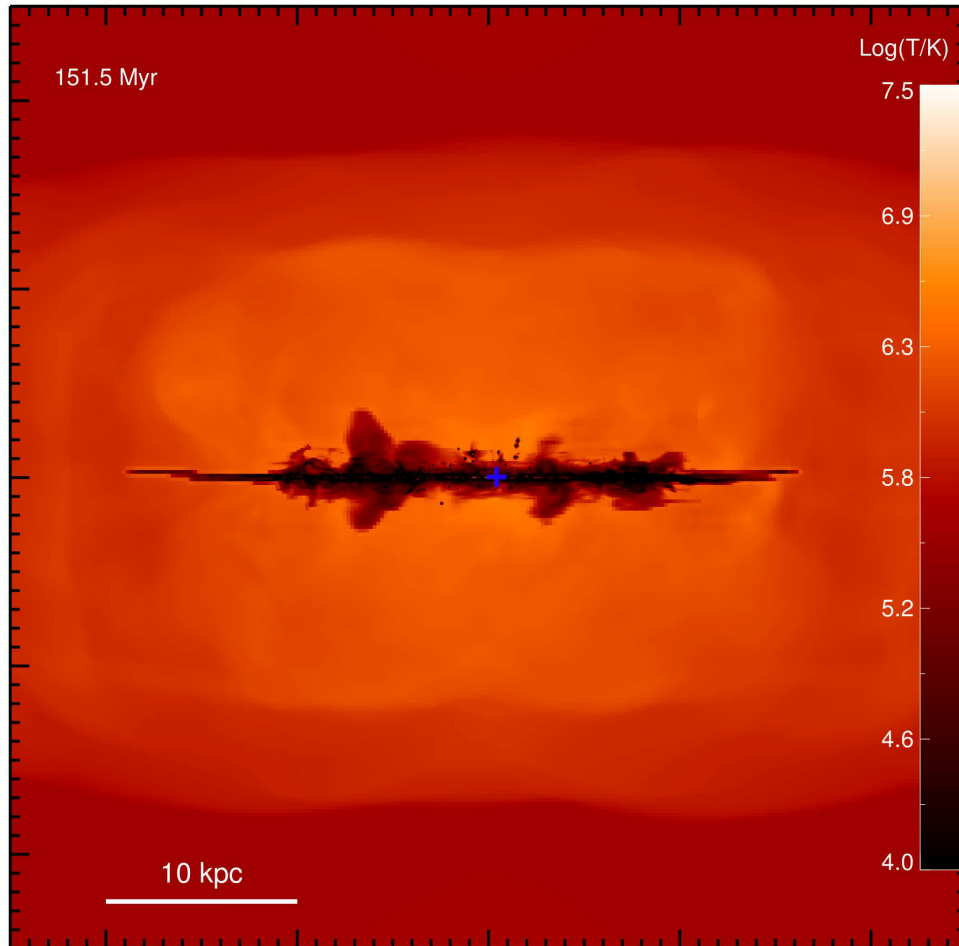


Instabilité de disque et alimentation des AGN



- Accrétion compensant pour les pertes dissipatives
- 10 M_{\odot} /yr dans le disque.
- 1-2 M_{\odot} /yr dans les pc centraux, malgré consommation du gaz

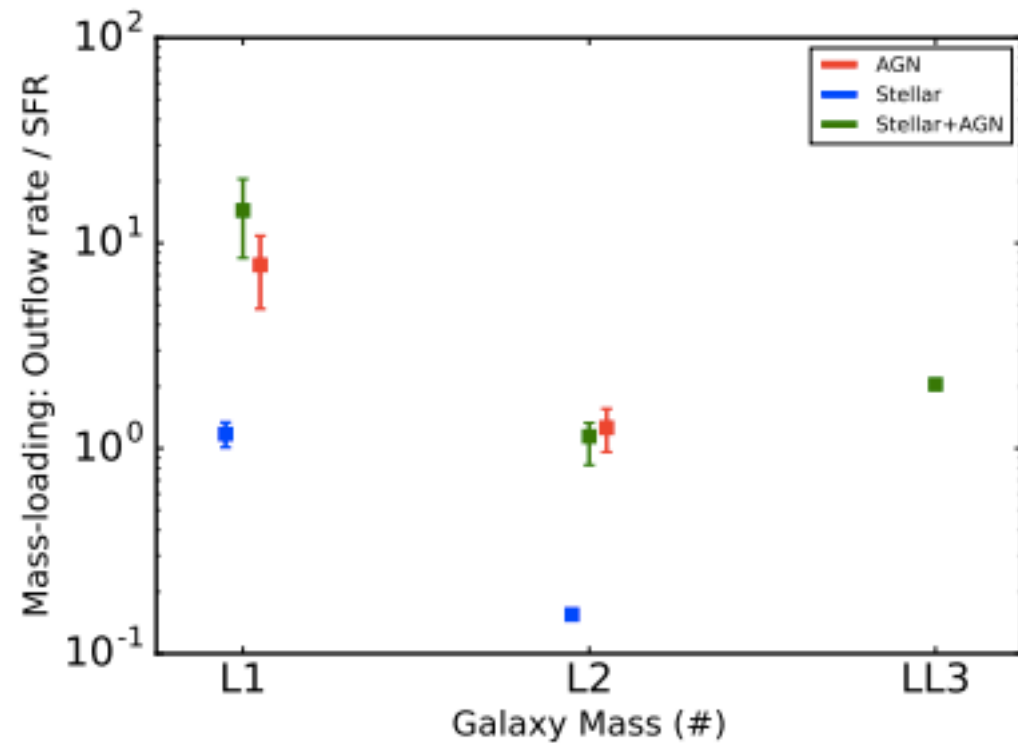
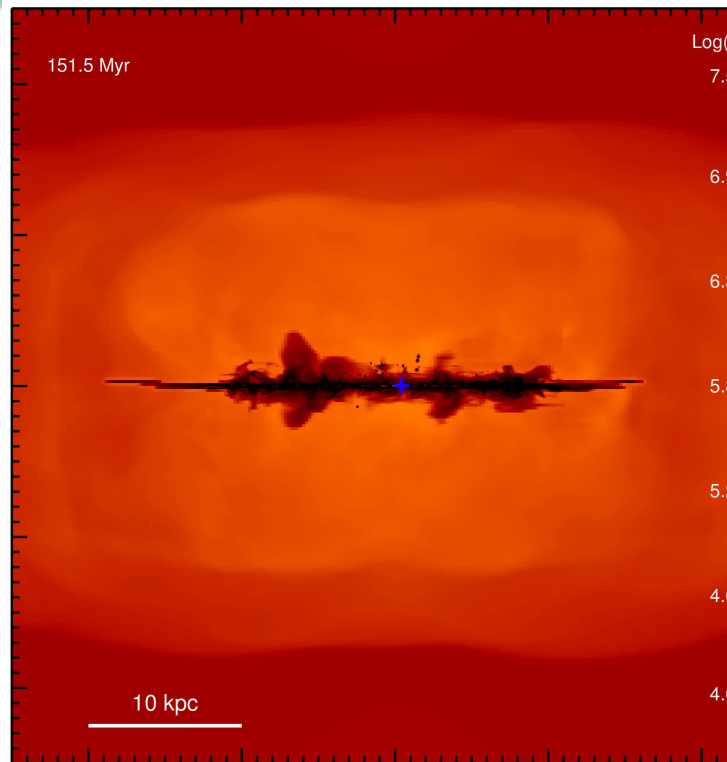
Feedback AGN et outflows rapides



- Outflows intermittants, très rapides, mais peu chargés en masse

- Ne change pas l'efficacité de formation stellaire

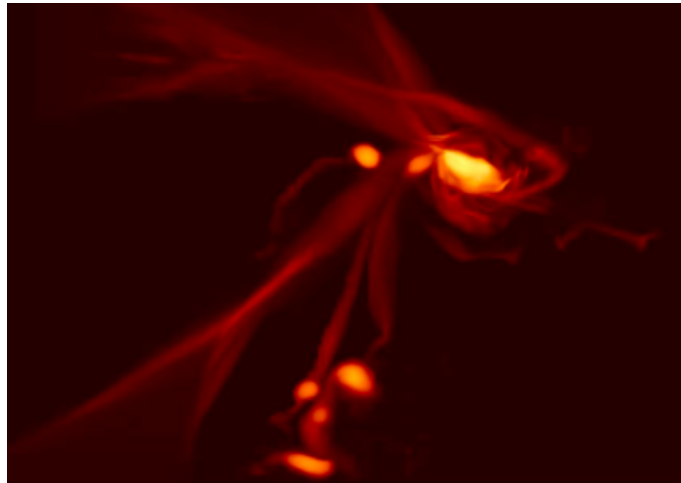
High-redshift galaxies ($z=2-3$): implications of the disk instability



- Couplage des outflows stellaires et AGN
- Obtention d'un taux d'outflow de 1 à 10 fois le taux de formation stellaire, au-dessus de la vitesse d'échappement
- Dépendance à la masse des galaxies (thèse O. Roos).

Quelques perspectives

- Modélisation précise du feedback aux échelles cosmologiques.
- Lien entre les instabilités de disque et l'évolution morphologique des galaxies, comparativement aux collisions.
- Interaction accrétion/éjection autour des galaxies, et devenir du gaz cosmologique qui alimente les galaxies (formation stellaire trop rapide vs réservoirs turbulents?)



Gabor & Bournaud 2014

- Physique plus riche (MHD, RT...) nécessitant un utilisation massive des moyens tier-0