

dapnia
SAP

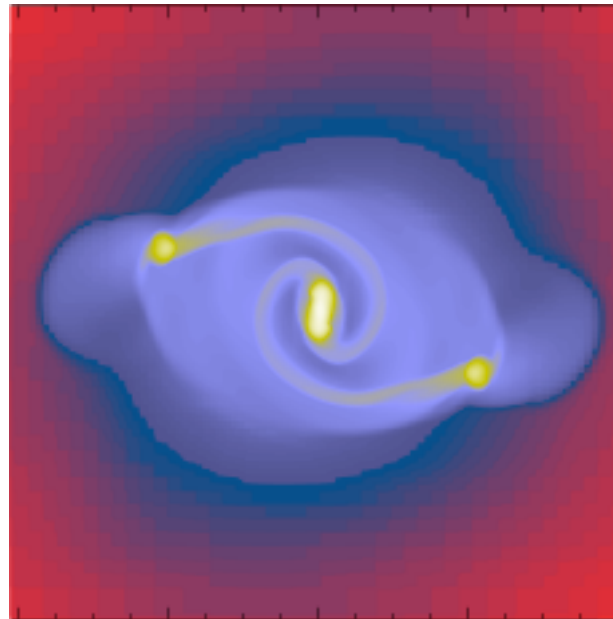
cea

saclay

CRA
Lyon



Outils numériques pour l'étude de l'effondrement et de la fragmentation de coeurs denses préstellaires



Benoît COMMERCON

Thèse en codirection avec E. Audit, P. Hennebelle et G. Chabrier

CEA/DSM/DAPNIA/SAP

CRAL, ENS Lyon

IRA FNS Paris

1. Comparaison AMR/SPH :

- Contexte
- Généralités – Hydrodynamique
- Code SPH DRAGON / Code AMR RAMSES
- Conservation du moment angulaire
- Etude numérique de la fragmentation des cœurs denses

2. Transfert radiatif et simulations numériques

- Modèles / Intérêt de modéliser le transfert radiatif
- Travaux en cours
- But : Simulation de formation d'étoiles avec équation de diffusion, champ magnétique et microphysique
- Différentes implications

Numérique et formation d'étoiles

- Formation des étoiles : élément **moteur** du cycle interstellaire
- Comprendre les **modes de formation**
 - isolé, binaire
 - petits et grands amas
- Fragmentation à l'origine des systèmes multiples
- Origine de la distribution en masse des étoiles
- **Phénomènes physiques multi-échelles et hautement non-linéaires:**
 - Gain de plus de 6 ordres de grandeur
 - Résolution de la **longueur de Jeans**
- **Simulations de formation d'étoiles :**
 - Processus complexes nécessitant l'utilisation de codes bien adaptés
 - Absence de solutions analytiques : outils non validés
 - Important de tester et comparer les codes

- ↳ Etude par la simulation numérique : 2 méthodes
 - Smoothed Particles Hydrodynamics
 - Adaptive Mesh Refinement
- Débat sur la méthode à utiliser pour la formation des structures
- **Objectif : Comparaison grâce à un modèle simple d'effondrement d'une sphère de densité uniforme en rotation**
 - ✓ Attention particulière aux conditions initiales
 - ✓ Modèle axisymétrique ==> conservation locale du moment angulaire
 - ✓ Perturbation $m=2$ ==> étude de la fragmentation

Equations du gaz

- **Equation d'Euler + Gravité pour GP :**

- Conservation de la masse
- Conservation de la quantité de mouvement
- Conservation de l'énergie totale

- **Equation d'état barotropique :** $\frac{P}{\rho} = C_s^2 = C_0^2 \left[1 + \left(\frac{\rho}{\rho_c} \right)^{2/3} \right]$

$$\begin{cases} -\gamma = 1 & \text{si } \rho < \rho_c \rightarrow \text{ISOTHERME} \\ -\gamma = 5/3 & \text{si } \rho > \rho_c \rightarrow \text{ADIABATIQUE} \end{cases}$$

$$\text{Longueur de Jeans} : \lambda_J = c_s \sqrt{\frac{\pi}{G\rho_0\gamma}}$$

Code SPH DRAGON (Smoothed Particle Hydrodynamics)

Code **DRAGON** développé par le groupe de formation d'étoiles de Cardiff (Turner et al. 1995)

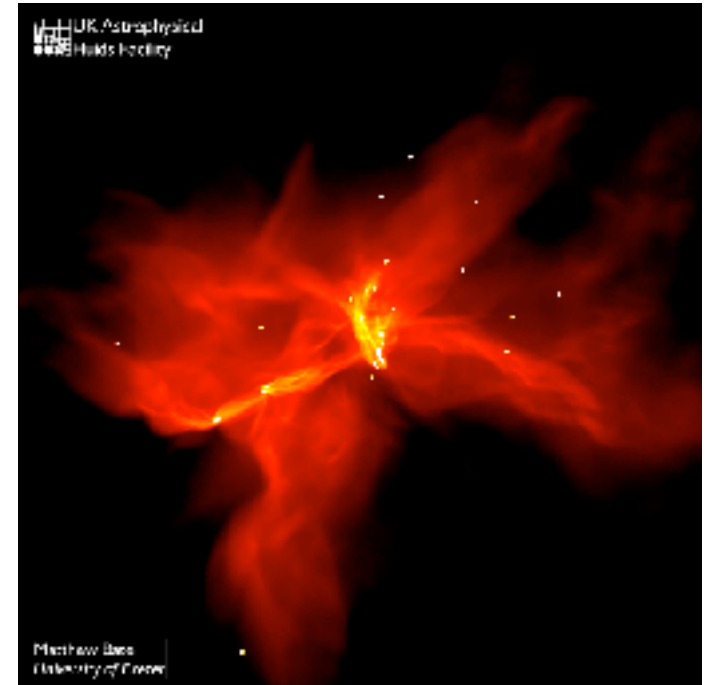
- Langage parallèle OpenMP
- Structure en arbre octal
- Sink particles
- Pas de temps individuel

•Avantages :

- ✓ Naturellement adaptatif
- ✓ Approche Lagrangienne
- ✓ Simple à mettre en œuvre et à développer

•Désavantages :

- ✓ Viscosité artificielle
- ✓ Résolution faible dans les zones de faible densité
- ✓ Bruit



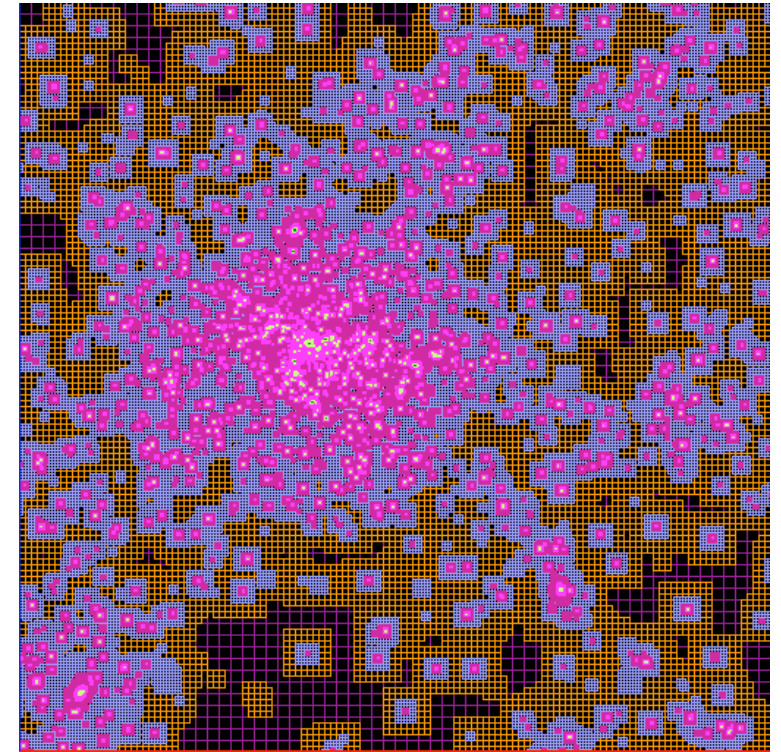
Simulation SPH (Bate et al. 2002)

Code AMR RAMSES (Adaptive Mesh Refinement)

- ✓ Code parallèle (MPI) avec structure en arbre (Teyssier 2002)

- ✓ Approche **Eulerienne** :
 - Grille « fixe »
 - Maillage adaptatif
 - Equations d'Euler sous leur forme conservative

- ✓ Paramètre de résolution l_{\min} :
==> description initiale de la sphère
ex : $l_{\min}=6 \Rightarrow 2^6$ cellules/dimension



Grille de simulation cosmologique AMR (RAMSES)

→ **Avantages :**

- ✓ Meilleure précision
- ✓ Captures des chocs

→ **Désavantages :**

- ✓ Difficile à mettre en œuvre
- ✓ Mélange des informations

Critères sur la résolution de la masse et la longueur de Jeans

- **Méthode AMR** : critère unique de raffinement N_{Jeans} en fonction de la longueur de Jeans :

$$N_{\text{Jeans}} \cdot \Delta x < \lambda_{\text{Jeans}}$$

↳ Critère de Truelove (Truelove et al. 1997) :

$$N_{\text{Jeans}} > 4$$

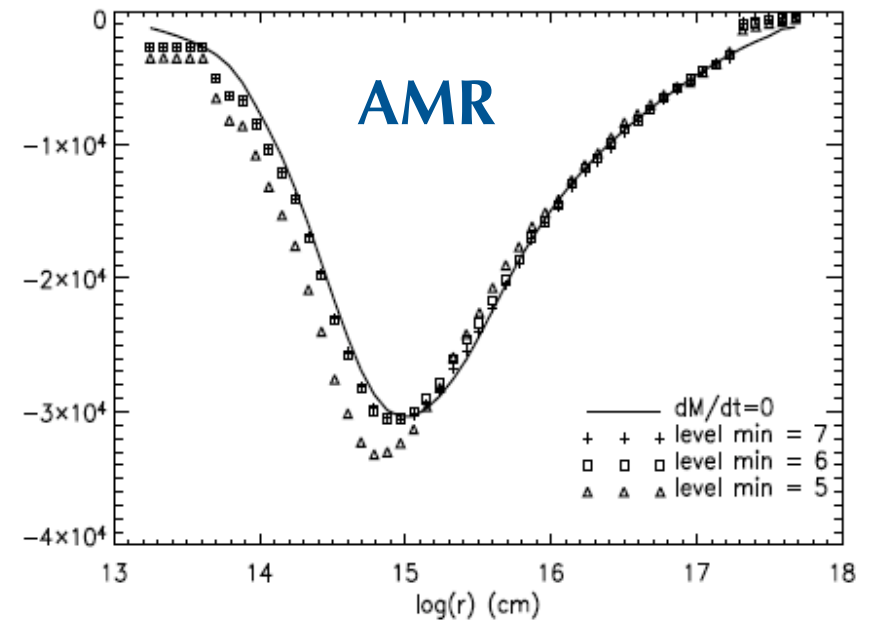
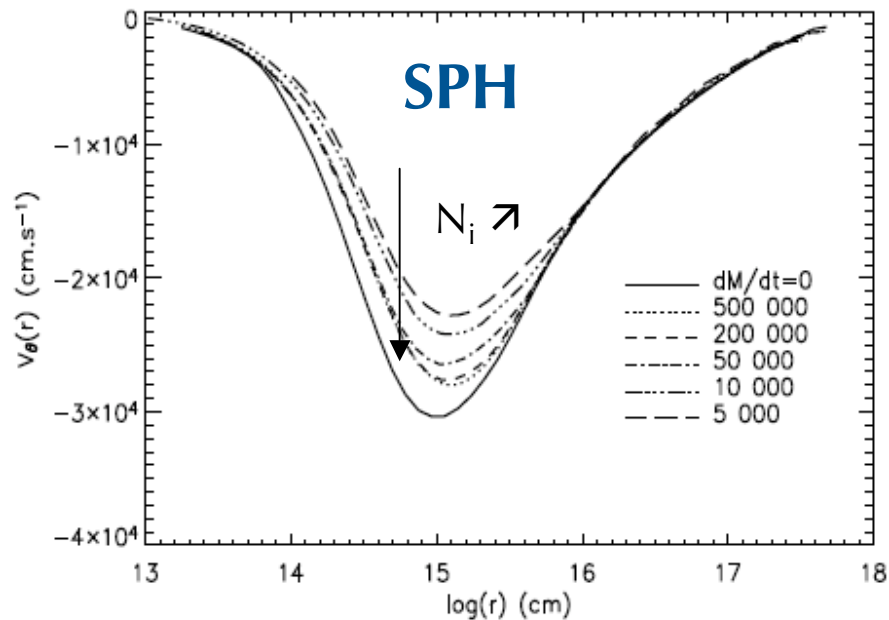
- **Méthode SPH** : masse d'une particule SPH et de ces N_{neigh} voisins doit être inférieure à la masse de Jeans

↳ Analogie avec la méthode AMR :

$$N_i > \frac{M_0}{m_{\text{max}}} N_{\text{Jeans}}^3$$

Etude de la conservation du moment angulaire

- Sphère isotherme de densité uniforme en rotation solide
 - Conservation du moment angulaire + Particules SPH transportent leur propre moment
- ↳ Vitesse angulaire corrigée
- $t_{\text{ff}}=0.086 \text{ Myr}$; $t_{\text{rot}}= 2.8 \text{ Myr}$



Effondrement d'une sphère uniforme avec perturbation $m=2$ - Modèle

Fragmentation : fonction de masse initiale, **stabilité** du disque

↳ **BUT** : étudier la dépendance des paramètres de résolutions numériques sur la fragmentation

↳ Perturbation azimuthale de densité pour **briser** la symétrie

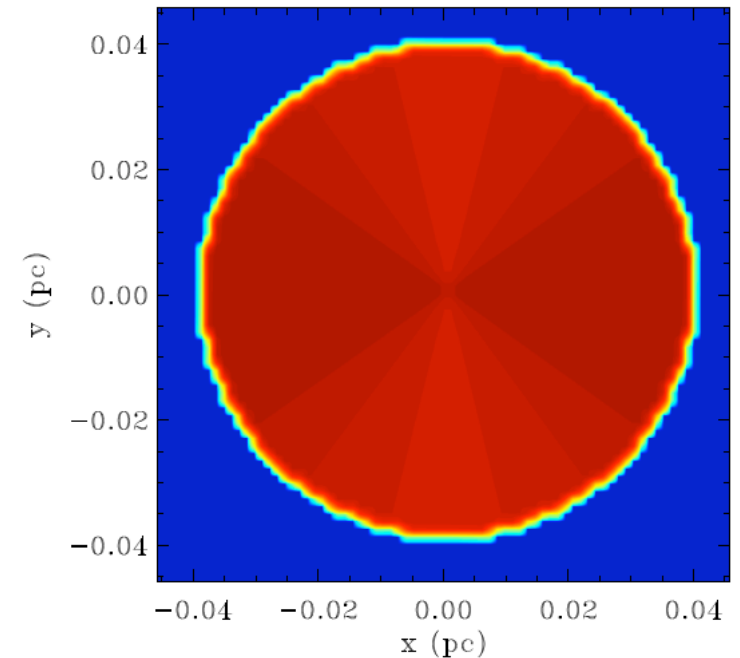
- Modèle identique de sphère uniforme
- Perturbation $m=2$, d'amplitude $A=0.1$

$$\rho = \rho_0[1 + A\cos(m\theta)]$$

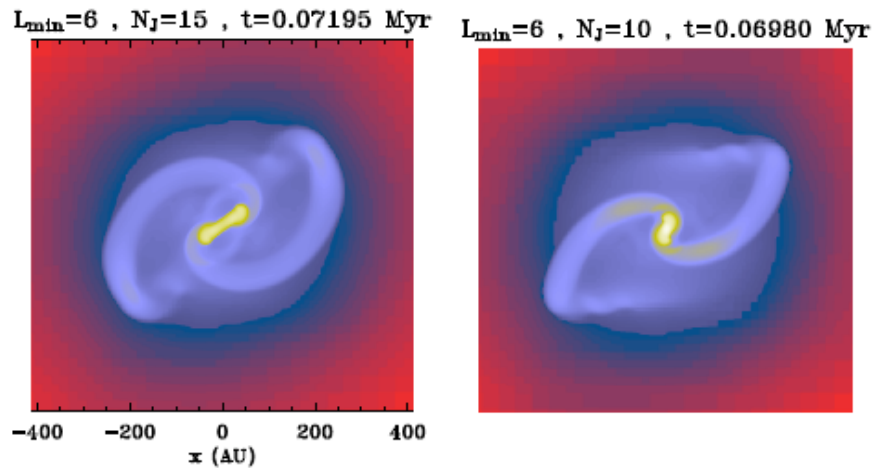
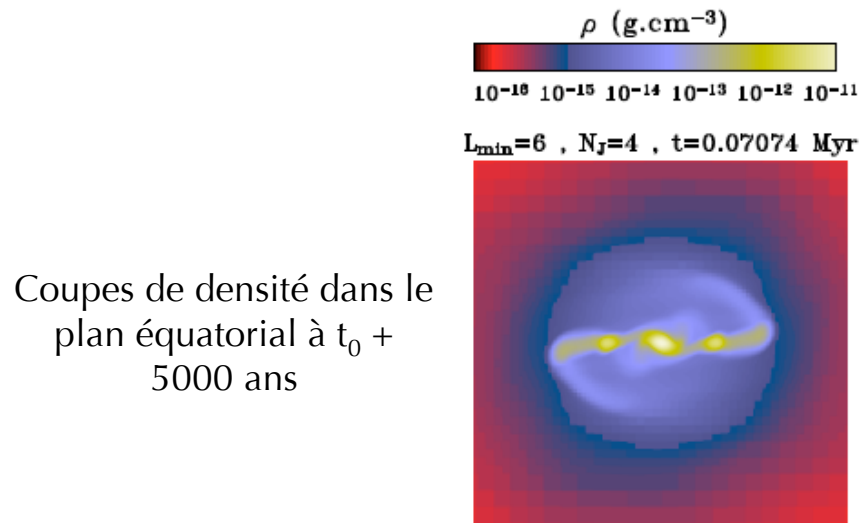
↳ 2 paramètres pour déterminer le système

- Support thermique : $\alpha = 0.5$
- Support rotationnel : $\beta = 0.04$

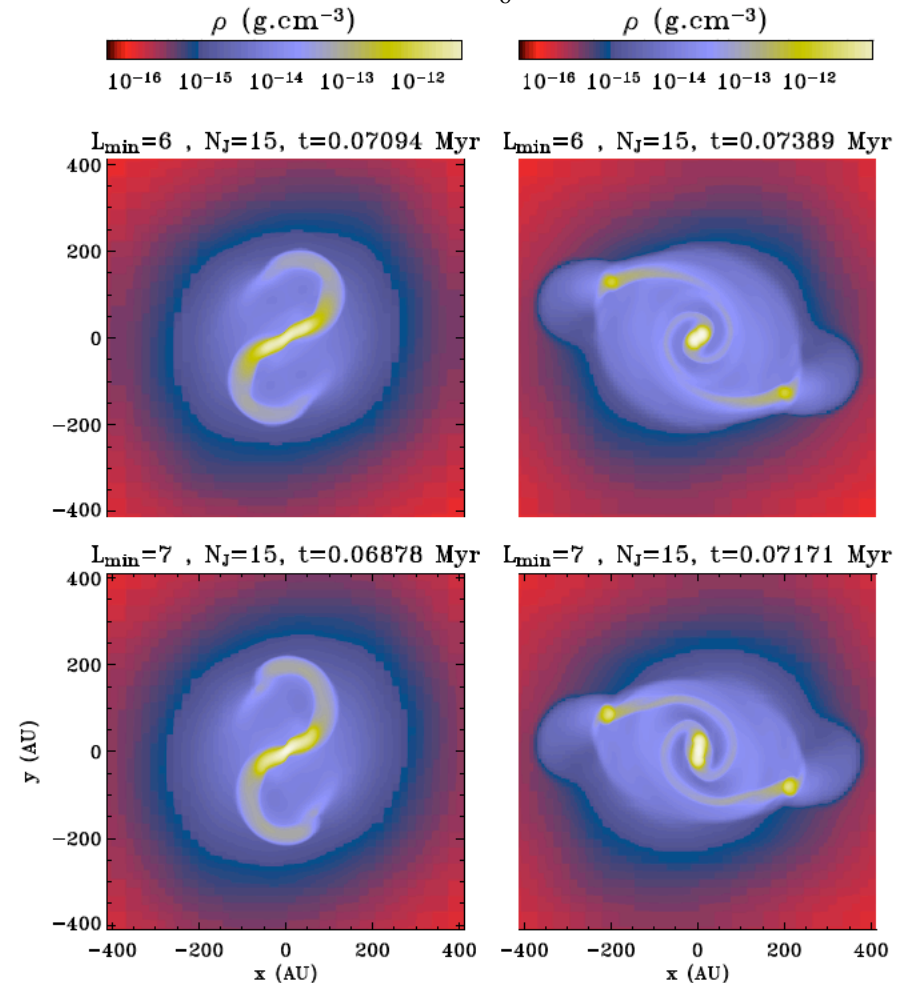
↳ Synchronisation des simulations à t_0



AMR

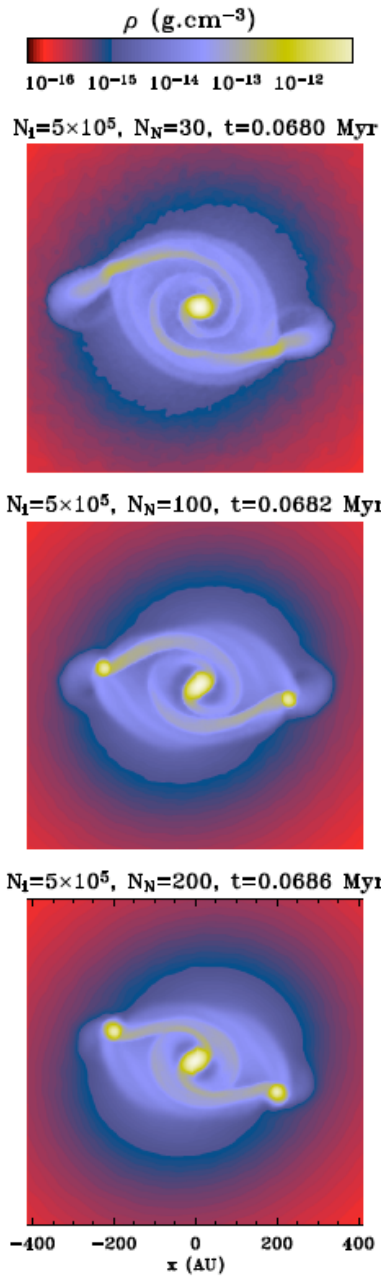


Coupes de densité dans le plan équatorial à $t_0 + 4000$ ans et $t_0 + 7000$ ans



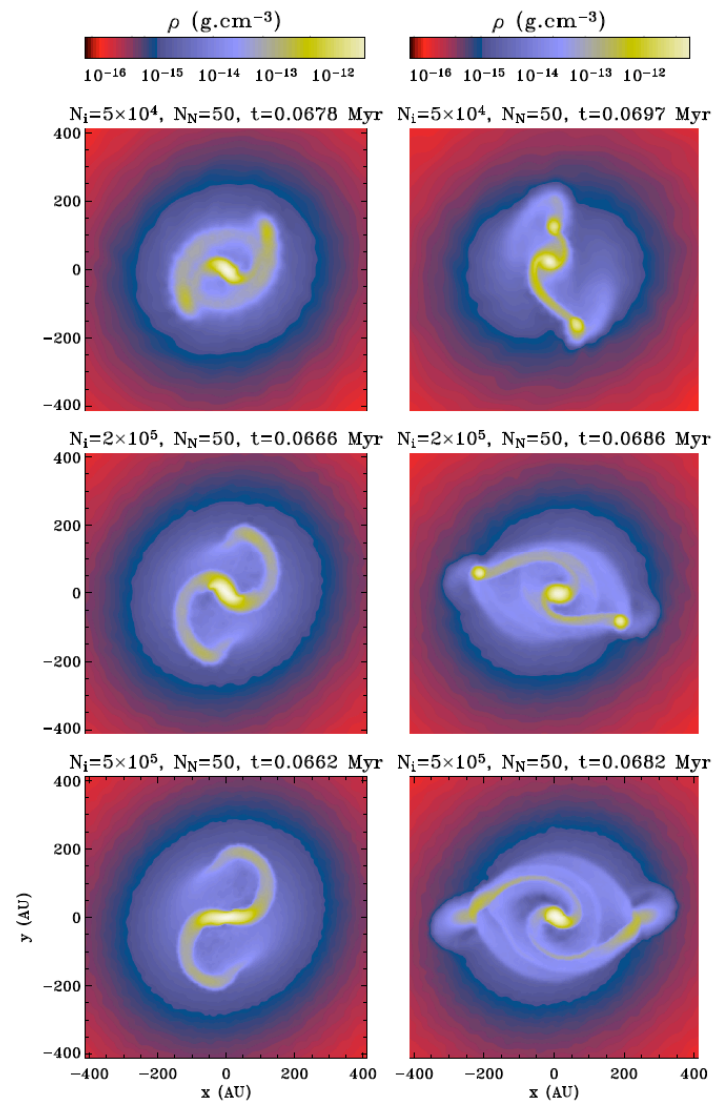
- Fragmentation artificielle avec $N_J=4$
- Convergence entre $L_{\min}=6$ (64^3) et $L_{\min}=7$ (128^3)
- 1 objet central + 2 satellites

SPH



Coupes de densité dans le plan équatorial à $t_0 + 6000$ ans

$N_N \nearrow$
 $N_i = 500000$

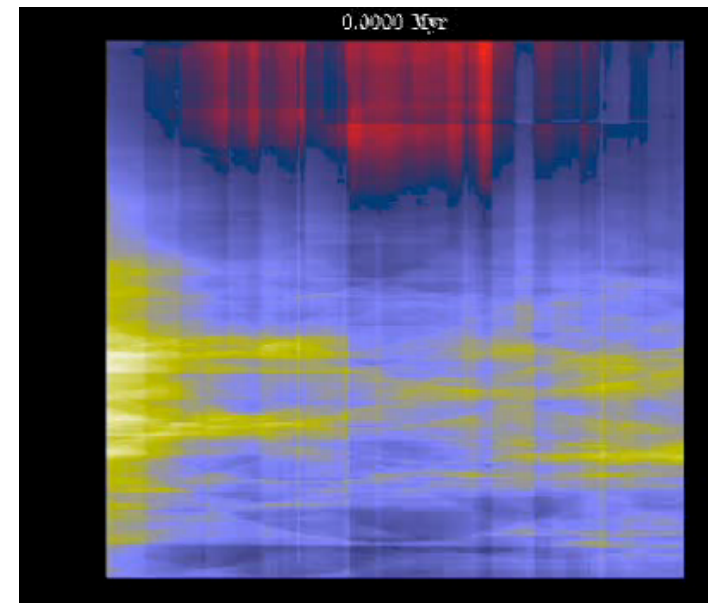
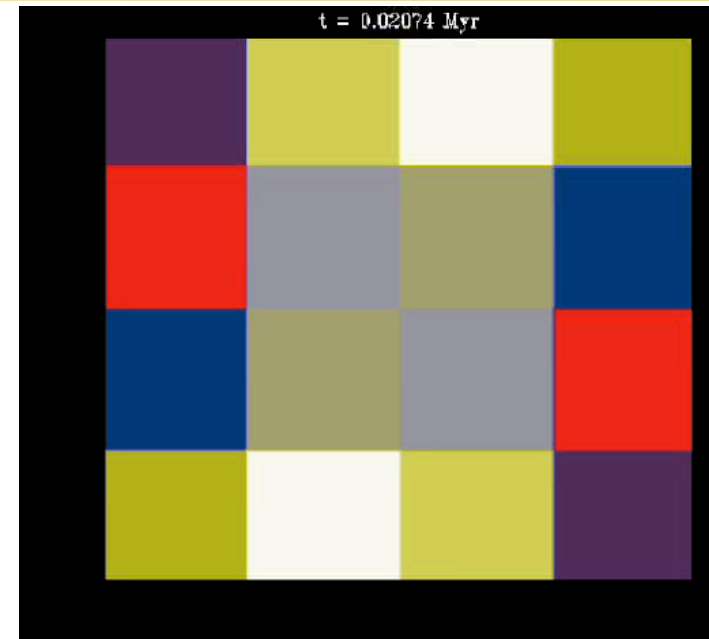
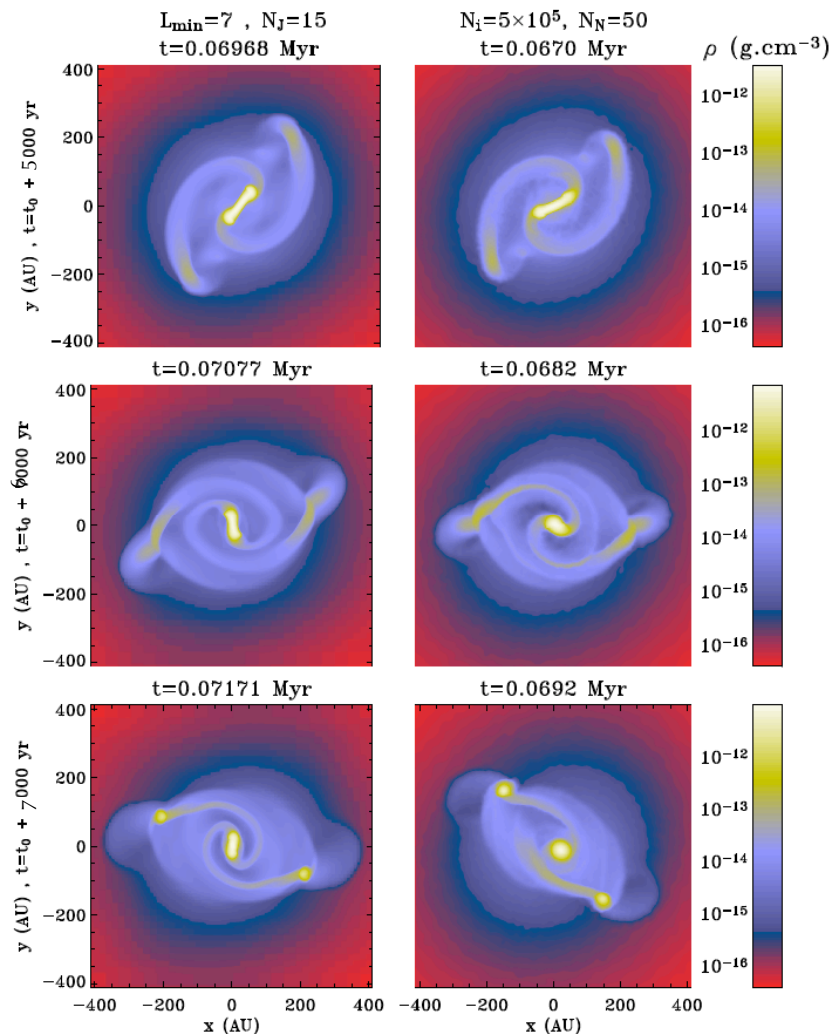


Coupes de densité dans le plan équatorial à $t_0 + 4000$ ans et $t_0 + 6000$ ans

$N_i \nearrow$
 $N_N = 50$

- Fragmentation artificielle avec $N_i=50000$
- Convergence si $N_i \nearrow, N_N \nearrow$ et le rapport $N_N/N_i \rightarrow 0$

AMR vs SPH



- AMR transporte mieux le moment angulaire à résolutions comparables
- Fragmentation :
 - Résolutions minimales

Approximation diffusion

- **Equation de diffusion de l'énergie radiative à résoudre :**

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\frac{c}{3\rho\kappa_R} \nabla E_r \right) = \kappa_P \rho (4\pi B - cE_r)$$

- ⇒ **Approximation du transfert radiatif par une équation de diffusion :**
 - ⇒ Couplage hydrodynamique / transfert radiatif ([E. Audit](#) , [M. Gonzalez](#))
 - ⇒ Calculs des opacités de Planck et de Rosseland ([G. Chabrier](#))
 - ⇒ Abandon de l'équation d'état barotropique
- ⇒ Limiteur de flux pour régime optiquement mince ($F < cE_r$)
- ⇒ Modèle pour objet prestellaire (luminosité, champ magnétique ?)
- ⇒ **Champ magnétique :** MHD idéale puis diffusion ambipolaire ([P. Hennebelle](#))
- ...
- ⇒ **Equation d'état ([G. Chabrier](#)) :** dissociation de H_2 , réaction endothermique permettant de poursuivre l'effondrement (2nd collapse)

- ✓ Premières simulations avec approximation de diffusion et champ magnétique

- ✓ Aujourd'hui :
 - **RHD** : Krumholz et al. (2007 - AMR), Whitehouse & Bate (2005 - SPH), Masunaga et al. (1998 - 2000)
 - **MHD** : Price & Bate (2007), Mashida et al. (2006), Fromang et al. (2006 - AMR) Banerjee & Pudritz (2005)

- ✓ Plusieurs objectifs
 - Etoiles massives :
 - effets de la pression radiative ==> ralentit l'effondrement
 - champ magnétique
 - 2nd collapse : Champ magnétique et transfert radiatif inhibent la fragmentation lors du 1^{er} collapse ==> fragmentation du 2nd cœur?

A yellow crosshair graphic consisting of a vertical line on the left and a horizontal line at the top, intersecting at the top-left corner of the page.

FIN