

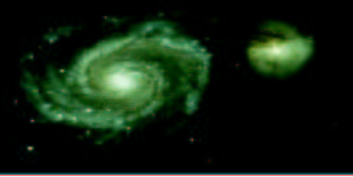
Simulations numériques en astrophysique

Dynamique des systèmes auto-gravitants

Jérôme Perez - Fabrice Roy - Nicolas Kielbasiewicz

Laboratoire de Mathématiques Appliquées - ENSTA

jerome.perez@ensta.fr



Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

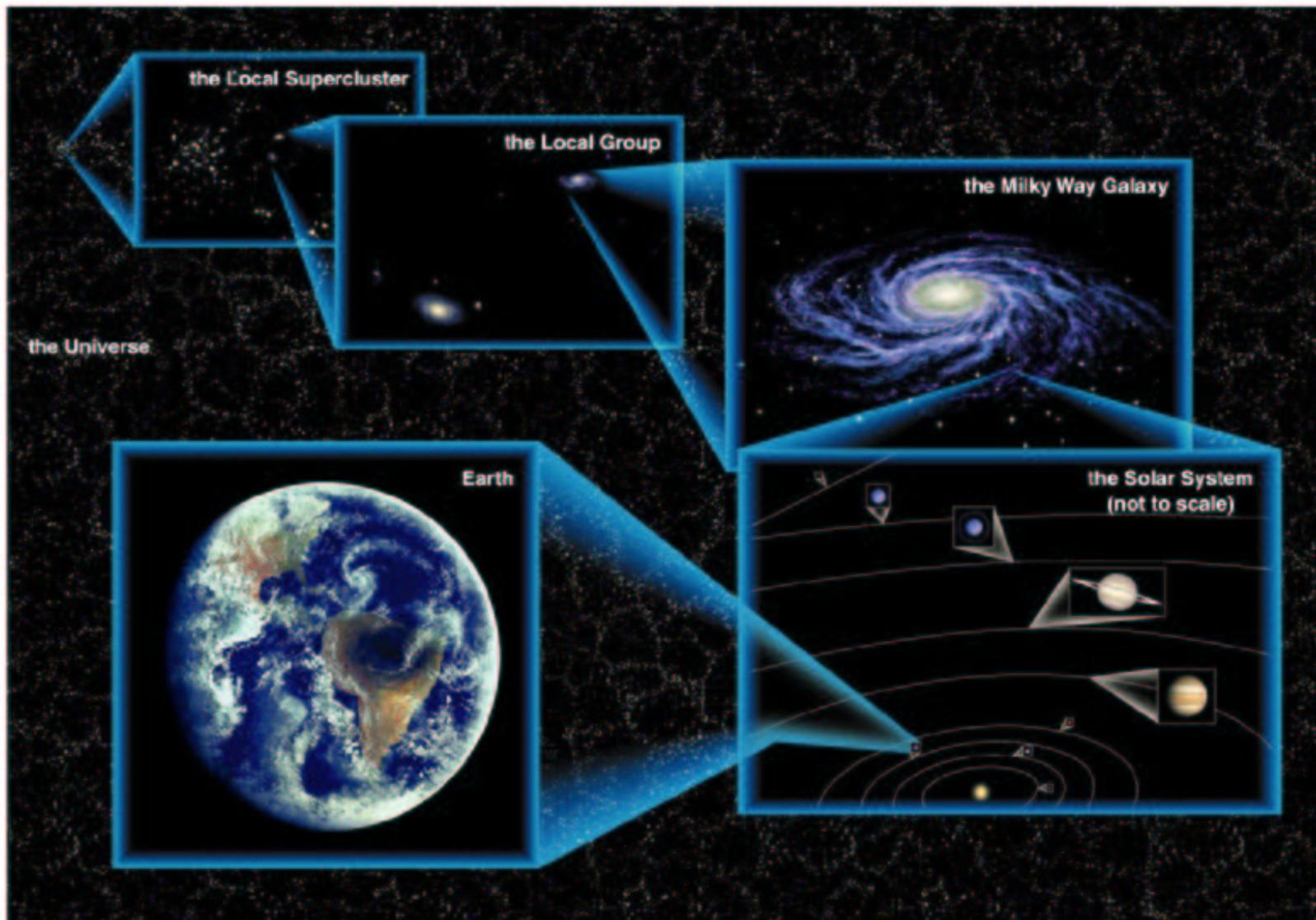
Résultats

Conclusion

Problème étudié



Où sommes-nous ?



Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.



Les galaxies

Découverte de Edwin Hubble en 1924 :

Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Les galaxies

Découverte de Edwin Hubble en 1924 :

il existe des mondes distincts du nôtre, des ensembles d'étoiles évoluant indépendamment.

Une galaxie = un ensemble d'étoiles maintenu par la gravitation.

Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



La séquence de Hubble

Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

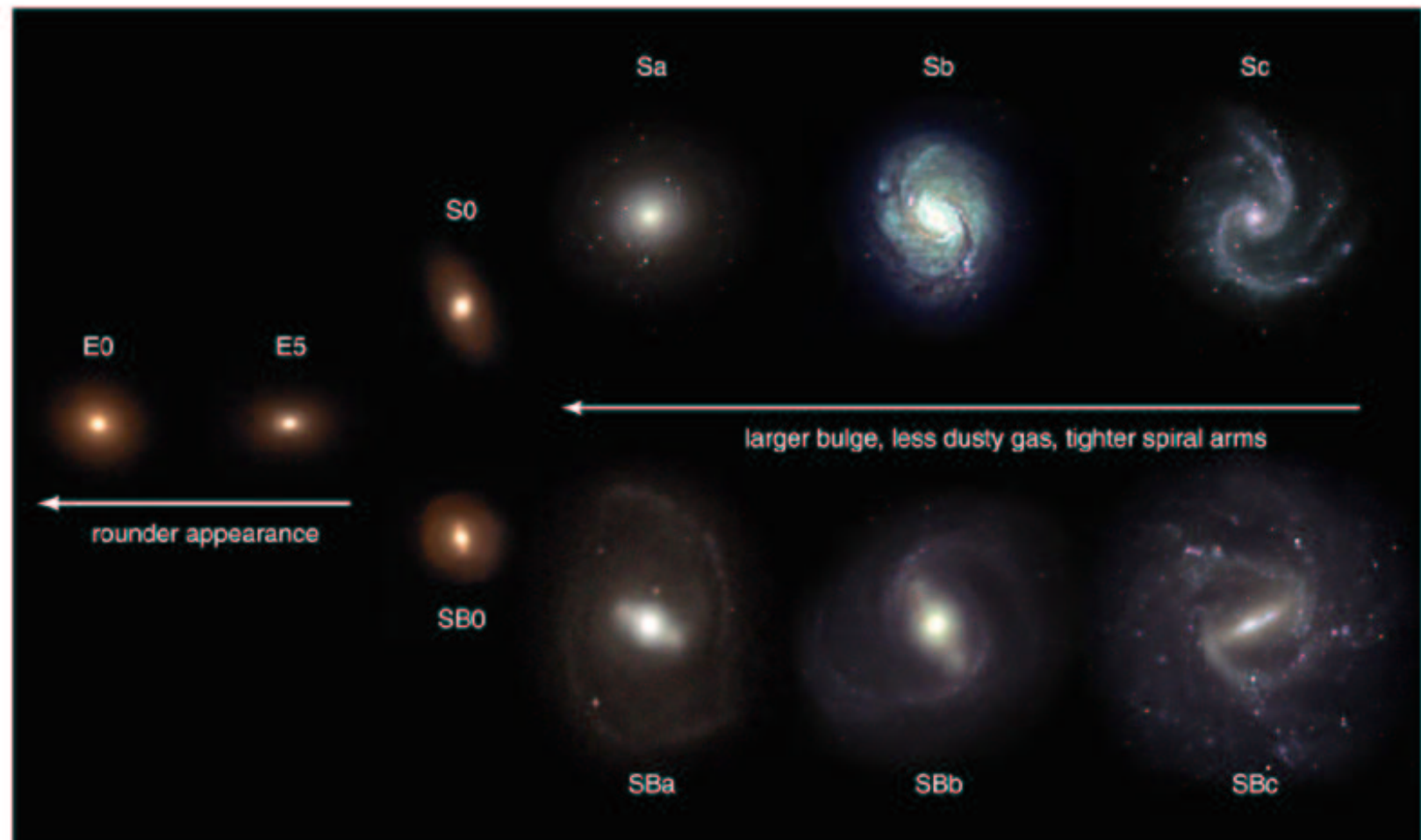
Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.



Galaxies spirales

Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

10^8 à 10^{11} étoiles, 10^4 à $5 \cdot 10^4$ pc de diamètre, gaz, poussières.





Galaxies spirales

Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

10^8 à 10^{11} étoiles, 10^4 à $5 \cdot 10^4$ pc de diamètre, gaz, poussières.





Galaxies spirales

Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

10^8 à 10^{11} étoiles, 10^4 à $5 \cdot 10^4$ pc de diamètre, gaz, poussières.





Galaxies spirales

Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

10^8 à 10^{11} étoiles, 10^4 à $5 \cdot 10^4$ pc de diamètre, gaz, poussières.





Galaxies spirales

Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

10^8 à 10^{11} étoiles, 10^4 à $5 \cdot 10^4$ pc de diamètre, gaz, poussières.



ESO PR Photo 08a/99 (27 February 1999)

Barred Galaxy NGC 1365
(VLT UT1 + FORS1)

© European Southern Observatory





Galaxies spirales

10^8 à 10^{11} étoiles, 10^4 à $5 \cdot 10^4$ pc de diamètre, gaz, poussières.



Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Galaxies spirales

Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

10^8 à 10^{11} étoiles, 10^4 à $5 \cdot 10^4$ pc de diamètre, gaz, poussières.





Galaxies elliptiques

Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

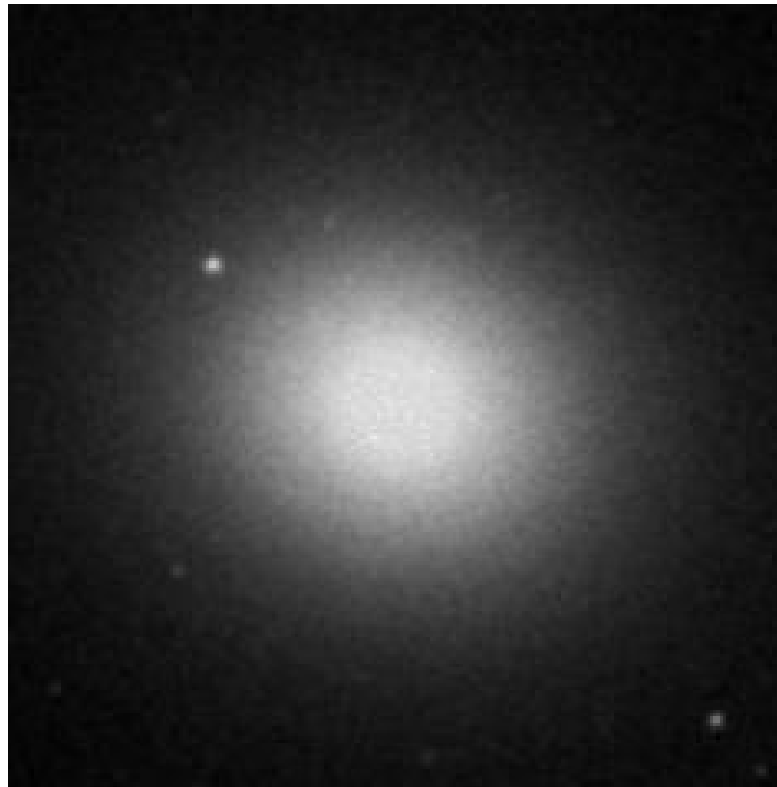
10^9 à 10^{13} étoiles, 10^4 à $2 \cdot 10^5$ pc de diamètre, pas de gaz, pas de poussières.





Galaxies elliptiques

10^9 à 10^{13} étoiles, 10^4 à $2 \cdot 10^5$ pc de diamètre, pas de gaz, pas de poussières.



Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Galaxies elliptiques

10^9 à 10^{13} étoiles, 10^4 à $2 \cdot 10^5$ pc de diamètre, pas de gaz, pas de poussières.



Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Galaxies elliptiques

Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

10^9 à 10^{13} étoiles, 10^4 à $2 \cdot 10^5$ pc de diamètre, pas de gaz, pas de poussières.





Galaxies elliptiques

10^9 à 10^{13} étoiles, 10^4 à $2 \cdot 10^5$ pc de diamètre, pas de gaz, pas de poussières.



Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Galaxies elliptiques

Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

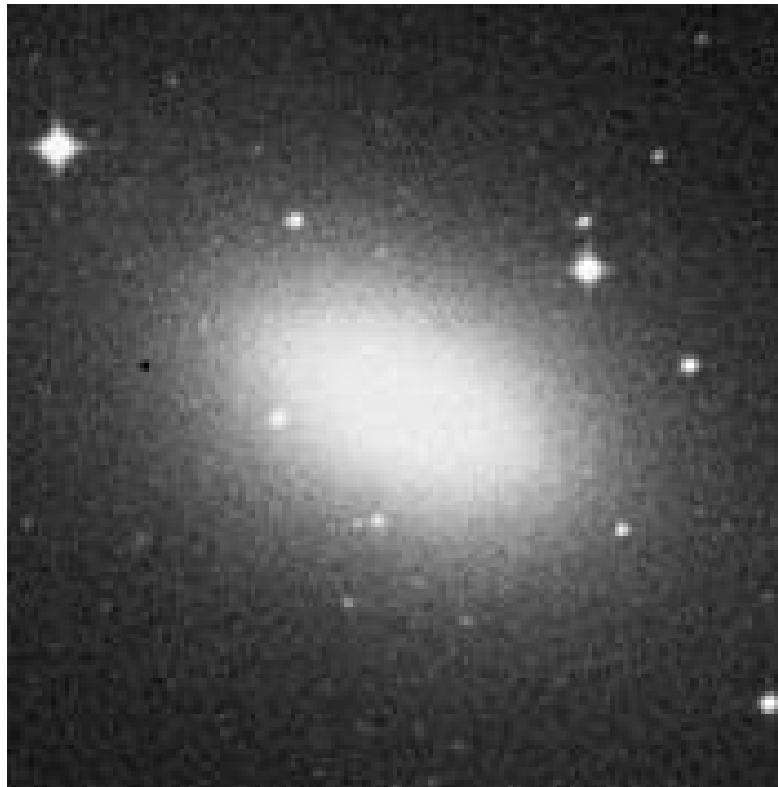
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

10^9 à 10^{13} étoiles, 10^4 à $2 \cdot 10^5$ pc de diamètre, pas de gaz, pas de poussières.





Galaxies elliptiques

Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

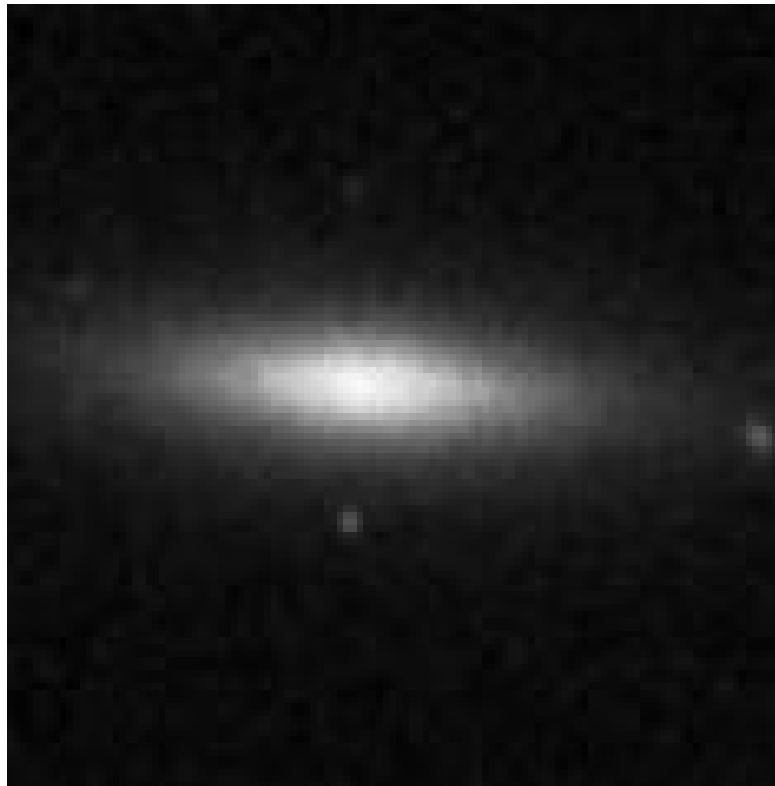
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

10^9 à 10^{13} étoiles, 10^4 à $2 \cdot 10^5$ pc de diamètre, pas de gaz, pas de poussières.





Autres systèmes

Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Autres systèmes

Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

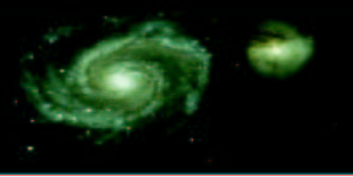
Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

Amas globulaires

Il en existe entre 150 et 200 dans la Voie Lactée.



Autres systèmes

Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

Amas globulaires

Il en existe entre 150 et 200 dans la Voie Lactée.

Amas ouverts

Nombreux, mais beaucoup ont disparu du fait de leur
instabilité dynamique.



Amas globulaires

Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- **Amas globulaires**
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

10^3 à 10^6 étoiles, 10 à 50 pc de diamètre, pas de gaz, pas de poussières.





Amas ouverts

10^2 à 10^3 étoiles, 3 à 10 pc de diamètre, pas de gaz, pas de poussières.



Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Objectifs

Étudier la dynamique des systèmes auto-gravitants

Systèmes auto-gravitants considérés :

- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Amas globulaires

Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts

● Objectifs

- Attention !

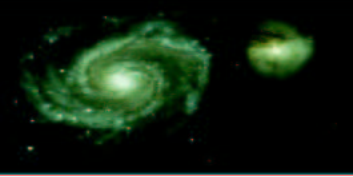
Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Attention !

Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Attention !

Galaxies spirales : gaz, poussières.

Ces éléments doivent être modélisés !

Galaxies elliptiques, amas globulaires : systèmes à N corps

Problème étudié

- Où sommes-nous ?
- Les galaxies
- La séquence de Hubble
- Galaxies spirales
- Galaxies elliptiques
- Autres systèmes
- Amas globulaires
- Amas ouverts
- Objectifs
- Attention !

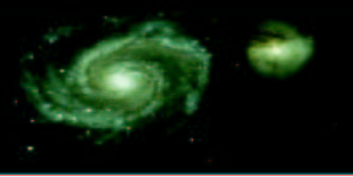
Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Problème étudié

Modélisation

- Théorème du viriel
- Temps caractéristiques
- Temps caractéristiques
- Modélisation analytique

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

Modélisation



Théorème du viriel

Énergies cinétique K et potentielle U d'un système auto-gravitant :

$$K_{\alpha\beta} = \sum_{i=1}^N \frac{\mathbf{p}_{\alpha}^i \mathbf{p}_{\beta}^i}{2m_i} \quad \text{Tr}(K_{\alpha\beta}) = K$$

$$U_{\alpha\beta} = G \sum_{i \neq j=1}^N m_i m_j \frac{\mathbf{r}_{\alpha}^i (\mathbf{r}_{\beta}^j - \mathbf{r}_{\beta}^i)}{|\mathbf{r}^i - \mathbf{r}^j|^3} \quad \text{Tr}(U_{\alpha\beta}) = U$$

Problème étudié

Modélisation

● Théorème du viriel

● Temps caractéristiques

● Temps caractéristiques

● Modélisation analytique

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Théorème du viriel

Énergies cinétique K et potentielle U d'un système auto-gravitant :

$$K_{\alpha\beta} = \sum_{i=1}^N \frac{\mathbf{p}_{\alpha}^i \mathbf{p}_{\beta}^i}{2m_i} \quad \text{Tr}(K_{\alpha\beta}) = K$$

$$U_{\alpha\beta} = G \sum_{i \neq j=1}^N m_i m_j \frac{\mathbf{r}_{\alpha}^i (\mathbf{r}_{\beta}^j - \mathbf{r}_{\beta}^i)}{|\mathbf{r}^i - \mathbf{r}^j|^3} \quad \text{Tr}(U_{\alpha\beta}) = U$$

Théorème du viriel :

Problème étudié

Modélisation

● Théorème du viriel

● Temps caractéristiques

● Temps caractéristiques

● Modélisation analytique

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Théorème du viriel

Énergies cinétique K et potentielle U d'un système auto-gravitant :

$$K_{\alpha\beta} = \sum_{i=1}^N \frac{\mathbf{p}_{\alpha}^i \mathbf{p}_{\beta}^i}{2m_i} \quad \text{Tr}(K_{\alpha\beta}) = K$$

$$U_{\alpha\beta} = G \sum_{i \neq j=1}^N m_i m_j \frac{\mathbf{r}_{\alpha}^i (\mathbf{r}_{\beta}^j - \mathbf{r}_{\beta}^i)}{|\mathbf{r}^i - \mathbf{r}^j|^3} \quad \text{Tr}(U_{\alpha\beta}) = U$$

Théorème du viriel :

$$\frac{1}{2} \frac{d^2}{dt^2} \text{Tr}(I_{\alpha\beta}) = 2K + U \quad I_{\alpha\beta} = \sum_{i=1}^N m_i \mathbf{r}_{\alpha}^i \mathbf{r}_{\beta}^i$$

Problème étudié

Modélisation

● Théorème du viriel

● Temps caractéristiques

● Temps caractéristiques

● Modélisation analytique

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Théorème du viriel

Énergies cinétique K et potentielle U d'un système auto-gravitant :

$$K_{\alpha\beta} = \sum_{i=1}^N \frac{\mathbf{p}_{\alpha}^i \mathbf{p}_{\beta}^i}{2m_i} \quad \text{Tr}(K_{\alpha\beta}) = K$$

$$U_{\alpha\beta} = G \sum_{i \neq j=1}^N m_i m_j \frac{\mathbf{r}_{\alpha}^i (\mathbf{r}_{\beta}^j - \mathbf{r}_{\beta}^i)}{|\mathbf{r}^i - \mathbf{r}^j|^3} \quad \text{Tr}(U_{\alpha\beta}) = U$$

Théorème du viriel :

$$0 = 2K + U$$

pour un système à l'équilibre

Problème étudié

Modélisation

● Théorème du viriel

● Temps caractéristiques

● Temps caractéristiques

● Modélisation analytique

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Théorème du viriel

Énergies cinétique K et potentielle U d'un système auto-gravitant :

$$K_{\alpha\beta} = \sum_{i=1}^N \frac{\mathbf{p}_{\alpha}^i \mathbf{p}_{\beta}^i}{2m_i} \quad \text{Tr}(K_{\alpha\beta}) = K$$

$$U_{\alpha\beta} = G \sum_{i \neq j=1}^N m_i m_j \frac{\mathbf{r}_{\alpha}^i (\mathbf{r}_{\beta}^j - \mathbf{r}_{\beta}^i)}{|\mathbf{r}^i - \mathbf{r}^j|^3} \quad \text{Tr}(U_{\alpha\beta}) = U$$

Théorème du viriel :

Rapport du viriel $\mathcal{V} = 2K/U = -1$

pour un système à l'équilibre

Problème étudié

Modélisation

● Théorème du viriel

● Temps caractéristiques

● Temps caractéristiques

● Modélisation analytique

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Temps caractéristiques

Temps dynamique t_d = temps mis par une particule pour traverser le système

$$t_d \approx \left(\sqrt{G \rho_m} \right)^{-1}$$

où ρ_m = densité moyenne du système.

$t_d \approx 10^6$ années pour un amas ouvert

$t_d \approx 10^6$ années pour un amas globulaire

$t_d \approx 10^8$ années pour une galaxie elliptique

Problème étudié

Modélisation

- Théorème du viriel
- Temps caractéristiques
- Temps caractéristiques
- Modélisation analytique

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Temps caractéristiques

Problème étudié

Modélisation

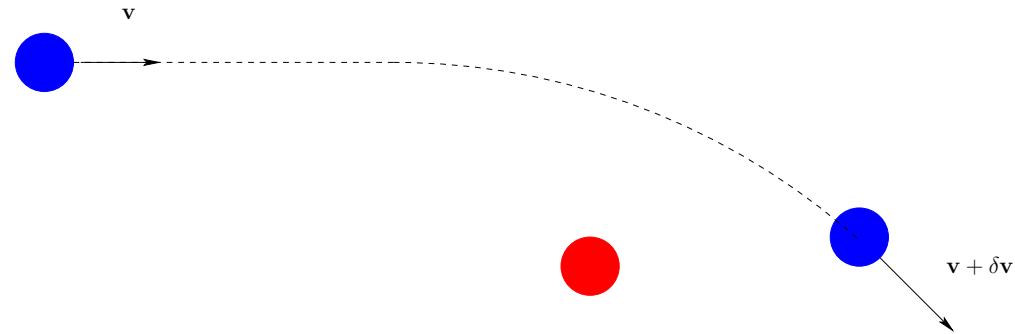
- Théorème du viriel
- Temps caractéristiques
- Temps caractéristiques
- Modélisation analytique

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Temps de relaxation par collision t_r = temps nécessaire pour
que $\int \delta v^2 / v^2 = 1$

$$t_r \approx \frac{N}{\ln N} t_d$$

$t_r \approx 10^8$ années pour un amas ouvert
 $t_r \approx 10^{10}$ années pour un amas globulaire
 $t_r \approx 10^{17}$ années pour une galaxie elliptique



Modélisation analytique

N particules ponctuelles, de coordonnées $\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N$ et d'impulsions $\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_N$.

Problème étudié

Modélisation

- Théorème du viriel
- Temps caractéristiques
- Temps caractéristiques
- Modélisation analytique

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Modélisation analytique

N particules ponctuelles, de coordonnées $\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N$ et d'impulsions $\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_N$.

- Approche directe : Problème à $N \gg 1$ corps ...

Problème étudié

Modélisation

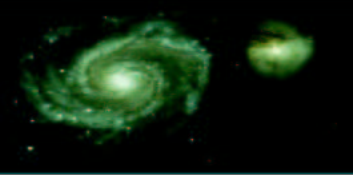
- Théorème du viriel
- Temps caractéristiques
- Temps caractéristiques
- Modélisation analytique

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Modélisation analytique

Problème étudié

Modélisation

- Théorème du viriel
- Temps caractéristiques
- Temps caractéristiques
- Modélisation analytique

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

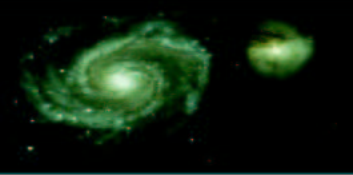
N particules ponctuelles, de coordonnées $\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N$ et d'impulsions $\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_N$.

- Approche directe : Problème à $N \gg 1$ corps ...
- Approche statistique : BSC-Poisson

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{r}_{1,\dots,N}, \mathbf{p}_{1,\dots,N}, t) &\rightarrow F(\mathbf{r}_{1,\dots,N}, \mathbf{p}_{1,\dots,N}, t) \\
 &\rightarrow f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = \int F d\mathbf{r}_2 d\mathbf{p}_2 \cdots d\mathbf{r}_N d\mathbf{p}_N
 \end{aligned}$$

1. Poisson : $\Delta\psi = 4\pi Gm \int f d\mathbf{p}$

2. BSC : $\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\mathbf{p}}{m} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} - m \frac{\partial f}{\partial \mathbf{p}} \frac{\partial \psi}{\partial \mathbf{r}} = \text{Coll.}$



Outils numériques

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Codes particuliers

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

● Codes particuliers

● En pratique...

● Code Particule-Particule

● Potentiel adouci (1)

● Potentiel adouci (2)

● Code Particule-Grille (1)

● Code Particule-Grille (2)

● Code Particule-Grille (3)

● Code Particule-Grille (4)

● Codes en arbre : Treecode

● Principe du Treecode (2)

● Moments quadripolaires (1)

● Moments quadripolaires (2)

● Moments quadripolaires (3)

● Parallélisme : généralités

● Parallélisme du Treecode

● Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

Évolution d'une assemblée de particules au cours du temps.



Codes particuliers

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

● Codes particuliers

- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

Évolution d'une assemblée de particules au cours du temps.

Deux étapes distinctes :

- Calcul de la force exercée sur chaque particule
- Évolution de la vitesse et de la position des particules

... divers algorithmes pour ces 2 étapes.



En pratique...

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

● Codes particuliers

● En pratique...

● Code Particule-Particule

● Potentiel adouci (1)

● Potentiel adouci (2)

● Code Particule-Grille (1)

● Code Particule-Grille (2)

● Code Particule-Grille (3)

● Code Particule-Grille (4)

● Codes en arbre : Treecode

● Principe du Treecode (2)

● Moments quadrupolaires (1)

● Moments quadrupolaires (2)

● Moments quadrupolaires (3)

● Parallélisme : généralités

● Parallélisme du Treecode

● Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



En pratique...

La force dérive d'un potentiel

$$\mathbf{F}_i(\mathbf{r}) = -\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} m_i \psi(\mathbf{r})$$

où $\psi(\mathbf{r})$ est de la forme

$$\psi(\mathbf{r}) = -G \sum_j \frac{M_j}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|}$$

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

● Codes particuliers

● En pratique...

● Code Particule-Particule

● Potentiel adouci (1)

● Potentiel adouci (2)

● Code Particule-Grille (1)

● Code Particule-Grille (2)

● Code Particule-Grille (3)

● Code Particule-Grille (4)

● Codes en arbre : Treecode

● Principe du Treecode (2)

● Moments quadrupolaires (1)

● Moments quadrupolaires (2)

● Moments quadrupolaires (3)

● Parallélisme : généralités

● Parallélisme du Treecode

● Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



En pratique...

La force dérive d'un potentiel

$$\mathbf{F}_i(\mathbf{r}) = -\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} m_i \psi(\mathbf{r})$$

où $\psi(\mathbf{r})$ est de la forme

$$\psi(\mathbf{r}) = -G \sum_j \frac{M_j}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|}$$

Potentiels \implies Accélérations

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

● Codes particuliers

● En pratique...

● Code Particule-Particule

● Potentiel adouci (1)

● Potentiel adouci (2)

● Code Particule-Grille (1)

● Code Particule-Grille (2)

● Code Particule-Grille (3)

● Code Particule-Grille (4)

● Codes en arbre : Treecode

● Principe du Treecode (2)

● Moments quadrupolaires (1)

● Moments quadrupolaires (2)

● Moments quadrupolaires (3)

● Parallélisme : généralités

● Parallélisme du Treecode

● Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



En pratique...

La force dérive d'un potentiel

$$\mathbf{F}_i(\mathbf{r}) = -\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} m_i \psi(\mathbf{r})$$

où $\psi(\mathbf{r})$ est de la forme

$$\psi(\mathbf{r}) = -G \sum_j \frac{M_j}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|}$$

Potentiels \implies Accélérations

Accélérations \implies Vitesses

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

● Codes particuliers

● En pratique...

● Code Particule-Particule

● Potentiel adouci (1)

● Potentiel adouci (2)

● Code Particule-Grille (1)

● Code Particule-Grille (2)

● Code Particule-Grille (3)

● Code Particule-Grille (4)

● Codes en arbre : Treecode

● Principe du Treecode (2)

● Moments quadrupolaires (1)

● Moments quadrupolaires (2)

● Moments quadrupolaires (3)

● Parallélisme : généralités

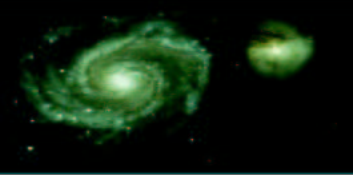
● Parallélisme du Treecode

● Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



En pratique...

La force dérive d'un potentiel

$$\mathbf{F}_i(\mathbf{r}) = -\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} m_i \psi(\mathbf{r})$$

où $\psi(\mathbf{r})$ est de la forme

$$\psi(\mathbf{r}) = -G \sum_j \frac{M_j}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|}$$

Potentiels \implies Accélérations

Accélérations \implies Vitesses

Vitesses \implies Positions

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

● Codes particuliers

● En pratique...

● Code Particule-Particule

● Potentiel adouci (1)

● Potentiel adouci (2)

● Code Particule-Grille (1)

● Code Particule-Grille (2)

● Code Particule-Grille (3)

● Code Particule-Grille (4)

● Codes en arbre : Treecode

● Principe du Treecode (2)

● Moments quadripolaires (1)

● Moments quadripolaires (2)

● Moments quadripolaires (3)

● Parallélisme : généralités

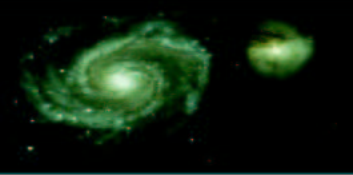
● Parallélisme du Treecode

● Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

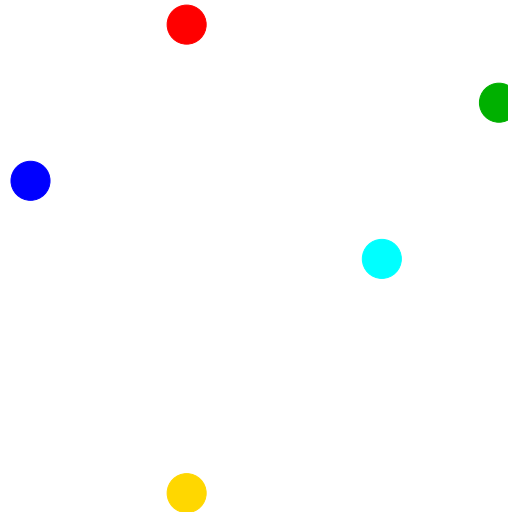
Résultats

Conclusion



Code Particule-Particule

Calcul du potentiel exercé par chaque particule sur chaque autre particule :



Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

● Codes particuliers

● En pratique...

● **Code Particule-Particule**

● Potentiel adouci (1)

● Potentiel adouci (2)

● Code Particule-Grille (1)

● Code Particule-Grille (2)

● Code Particule-Grille (3)

● Code Particule-Grille (4)

● Codes en arbre : Treecode

● Principe du Treecode (2)

● Moments quadripolaires (1)

● Moments quadripolaires (2)

● Moments quadripolaires (3)

● Parallélisme : généralités

● Parallélisme du Treecode

● Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

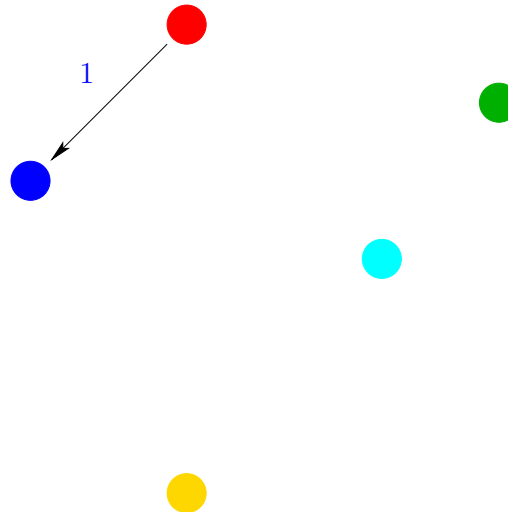
Résultats

Conclusion



Code Particule-Particule

Calcul du potentiel exercé par chaque particule sur chaque autre particule :



Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

● Codes particuliers

● En pratique...

● **Code Particule-Particule**

● Potentiel adouci (1)

● Potentiel adouci (2)

● Code Particule-Grille (1)

● Code Particule-Grille (2)

● Code Particule-Grille (3)

● Code Particule-Grille (4)

● Codes en arbre : Treecode

● Principe du Treecode (2)

● Moments quadripolaires (1)

● Moments quadripolaires (2)

● Moments quadripolaires (3)

● Parallélisme : généralités

● Parallélisme du Treecode

● Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

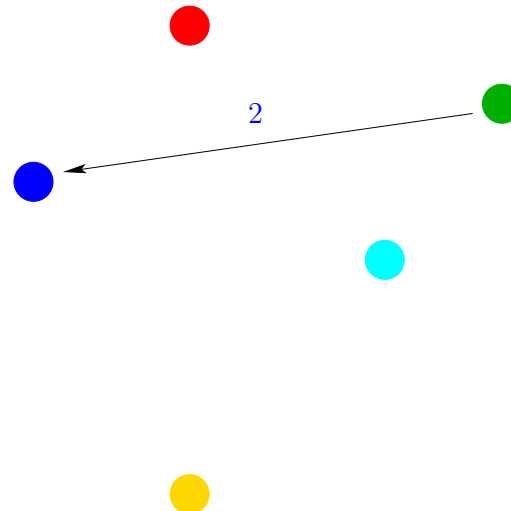
Résultats

Conclusion



Code Particule-Particule

Calcul du potentiel exercé par chaque particule sur chaque autre particule :



Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

● Codes particuliers

● En pratique...

● Code Particule-Particule

● Potentiel adouci (1)

● Potentiel adouci (2)

● Code Particule-Grille (1)

● Code Particule-Grille (2)

● Code Particule-Grille (3)

● Code Particule-Grille (4)

● Codes en arbre : Treecode

● Principe du Treecode (2)

● Moments quadripolaires (1)

● Moments quadripolaires (2)

● Moments quadripolaires (3)

● Parallélisme : généralités

● Parallélisme du Treecode

● Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

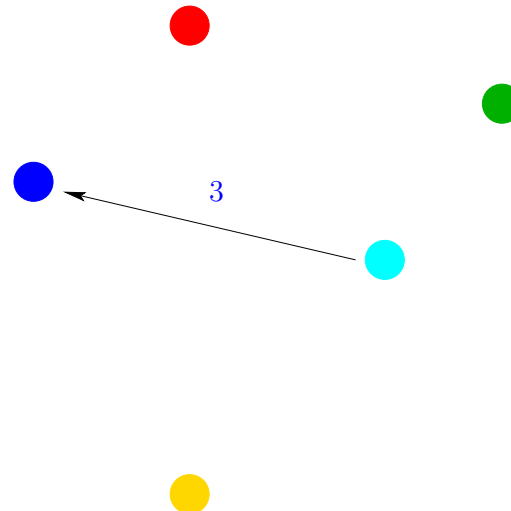
Résultats

Conclusion



Code Particule-Particule

Calcul du potentiel exercé par chaque particule sur chaque autre particule :



Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

● Codes particuliers

● En pratique...

● **Code Particule-Particule**

● Potentiel adouci (1)

● Potentiel adouci (2)

● Code Particule-Grille (1)

● Code Particule-Grille (2)

● Code Particule-Grille (3)

● Code Particule-Grille (4)

● Codes en arbre : Treecode

● Principe du Treecode (2)

● Moments quadripolaires (1)

● Moments quadripolaires (2)

● Moments quadripolaires (3)

● Parallélisme : généralités

● Parallélisme du Treecode

● Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

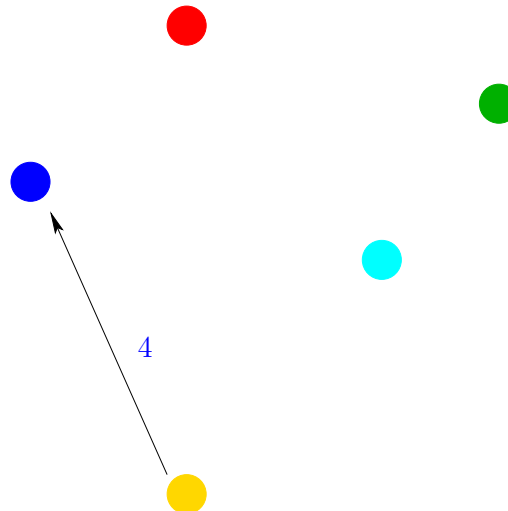
Résultats

Conclusion



Code Particule-Particule

Calcul du potentiel exercé par chaque particule sur chaque autre particule :



Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

● Codes particuliers

● En pratique...

● **Code Particule-Particule**

● Potentiel adouci (1)

● Potentiel adouci (2)

● Code Particule-Grille (1)

● Code Particule-Grille (2)

● Code Particule-Grille (3)

● Code Particule-Grille (4)

● Codes en arbre : Treecode

● Principe du Treecode (2)

● Moments quadripolaires (1)

● Moments quadripolaires (2)

● Moments quadripolaires (3)

● Parallélisme : généralités

● Parallélisme du Treecode

● Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

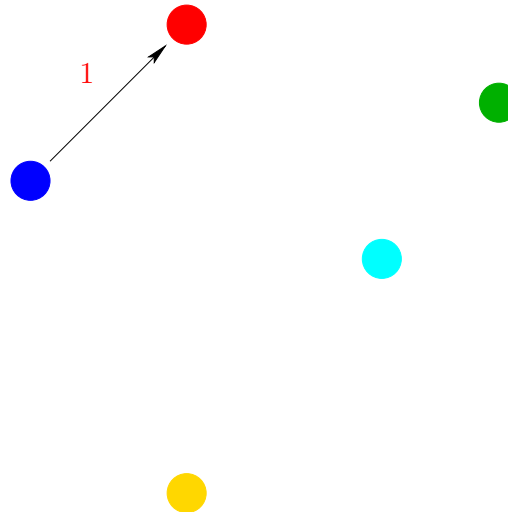
Résultats

Conclusion



Code Particule-Particule

Calcul du potentiel exercé par chaque particule sur chaque autre particule :



Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

● Codes particuliers

● En pratique...

● Code Particule-Particule

● Potentiel adouci (1)

● Potentiel adouci (2)

● Code Particule-Grille (1)

● Code Particule-Grille (2)

● Code Particule-Grille (3)

● Code Particule-Grille (4)

● Codes en arbre : Treecode

● Principe du Treecode (2)

● Moments quadripolaires (1)

● Moments quadripolaires (2)

● Moments quadripolaires (3)

● Parallélisme : généralités

● Parallélisme du Treecode

● Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

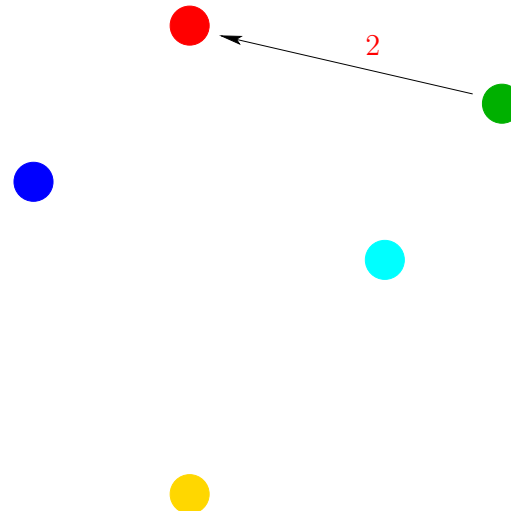
Résultats

Conclusion



Code Particule-Particule

Calcul du potentiel exercé par chaque particule sur chaque autre particule :



Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

● Codes particuliers

● En pratique...

● **Code Particule-Particule**

● Potentiel adouci (1)

● Potentiel adouci (2)

● Code Particule-Grille (1)

● Code Particule-Grille (2)

● Code Particule-Grille (3)

● Code Particule-Grille (4)

● Codes en arbre : Treecode

● Principe du Treecode (2)

● Moments quadripolaires (1)

● Moments quadripolaires (2)

● Moments quadripolaires (3)

● Parallélisme : généralités

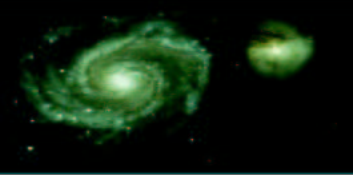
● Parallélisme du Treecode

● Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

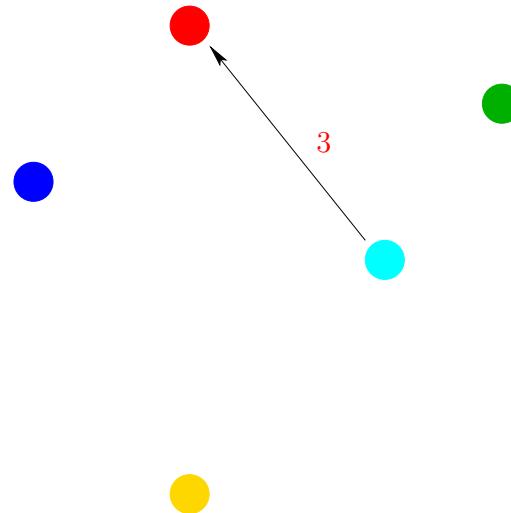
Résultats

Conclusion



Code Particule-Particule

Calcul du potentiel exercé par chaque particule sur chaque autre particule :



Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

● Codes particuliers

● En pratique...

● Code Particule-Particule

● Potentiel adouci (1)

● Potentiel adouci (2)

● Code Particule-Grille (1)

● Code Particule-Grille (2)

● Code Particule-Grille (3)

● Code Particule-Grille (4)

● Codes en arbre : Treecode

● Principe du Treecode (2)

● Moments quadripolaires (1)

● Moments quadripolaires (2)

● Moments quadripolaires (3)

● Parallélisme : généralités

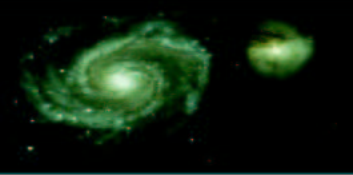
● Parallélisme du Treecode

● Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

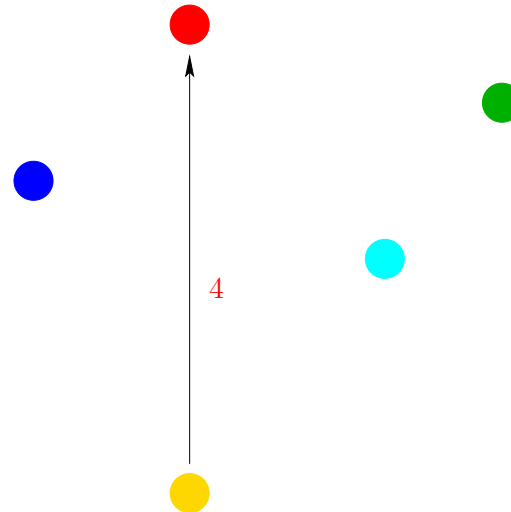
Résultats

Conclusion



Code Particule-Particule

Calcul du potentiel exercé par chaque particule sur chaque autre particule :



Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

● Codes particuliers

● En pratique...

● Code Particule-Particule

● Potentiel adouci (1)

● Potentiel adouci (2)

● Code Particule-Grille (1)

● Code Particule-Grille (2)

● Code Particule-Grille (3)

● Code Particule-Grille (4)

● Codes en arbre : Treecode

● Principe du Treecode (2)

● Moments quadripolaires (1)

● Moments quadripolaires (2)

● Moments quadripolaires (3)

● Parallélisme : généralités

● Parallélisme du Treecode

● Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

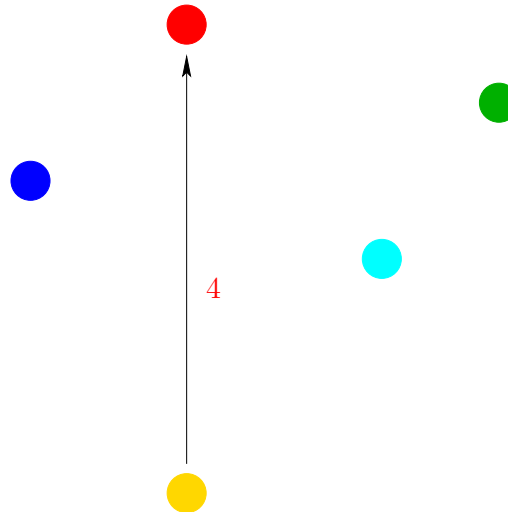
Résultats

Conclusion



Code Particule-Particule

Calcul du potentiel exercé par chaque particule sur chaque autre particule :



$1 = 1 : \text{Schéma } \mathcal{O}(N^2)$

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

● Codes particuliers

● En pratique...

● Code Particule-Particule

● Potentiel adouci (1)

● Potentiel adouci (2)

● Code Particule-Grille (1)

● Code Particule-Grille (2)

● Code Particule-Grille (3)

● Code Particule-Grille (4)

● Codes en arbre : Treecode

● Principe du Treecode (2)

● Moments quadripolaires (1)

● Moments quadripolaires (2)

● Moments quadripolaires (3)

● Parallélisme : généralités

● Parallélisme du Treecode

● Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

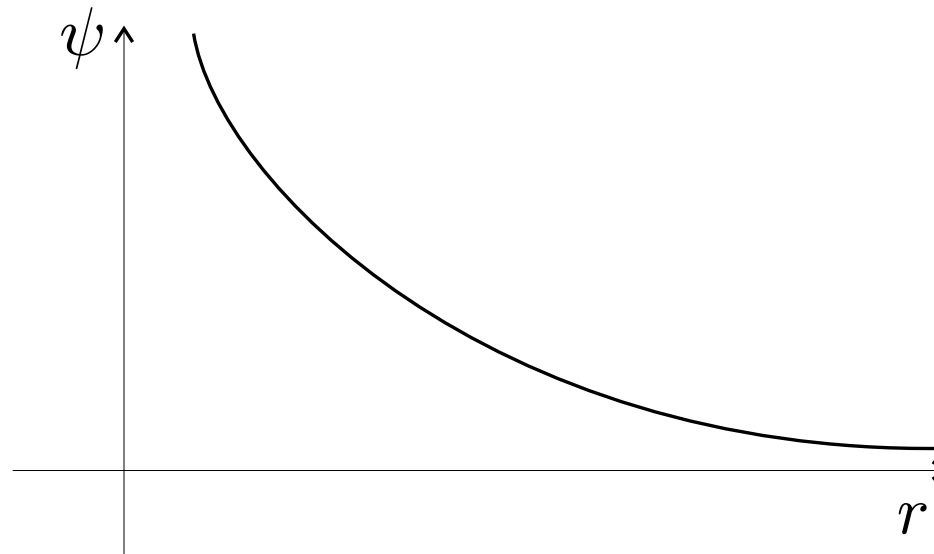
Conclusion



Potentiel adouci (1)

Code Particule-Particule (PP)

$$\psi_i = -G \sum_{j \neq i} \frac{m_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}$$



Singularité pour $\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_j \implies$ Problème numérique

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- **Potentiel adouci (1)**
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

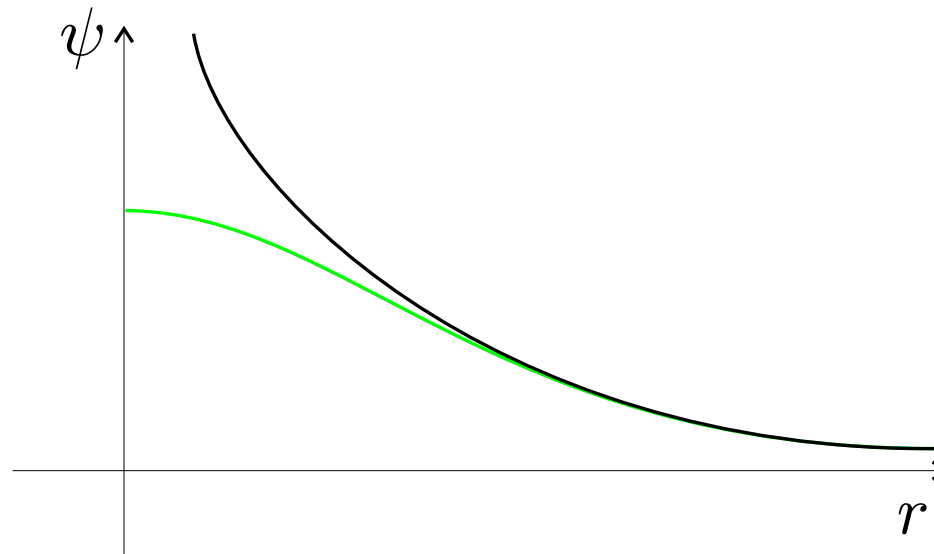
Conclusion



Potentiel adouci (1)

Code Particule-Particule (PP)

$$\psi_i = -G \sum_{j \neq i} \frac{m_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \longrightarrow \psi_i = -G \sum_{j \neq i} \frac{m_j}{\left((\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)^2 + \varepsilon^2 \right)^{1/2}}$$



Adoucissement de type 1

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- **Potentiel adouci (1)**
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadripolaires (1)
- Moments quadripolaires (2)
- Moments quadripolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

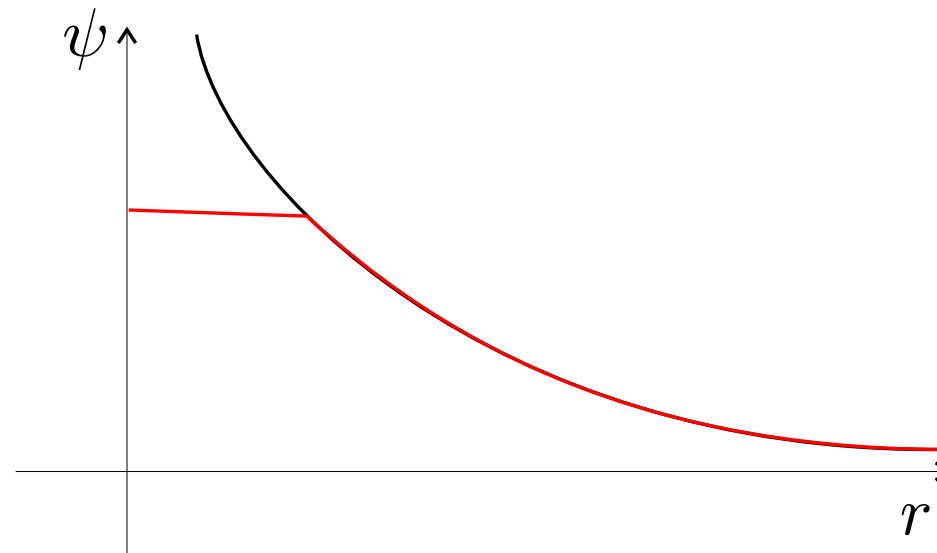
Conclusion



Potentiel adouci (1)

Code Particule-Particule (PP)

$$\psi_i = -G \sum_{j \neq i} \frac{m_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \longrightarrow \psi_i = -G \sum_{j \neq i} \frac{m_j}{\max(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|, \varepsilon)}$$



Adoucissement de type 2

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- **Potentiel adouci (1)**
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Code Particule-Grille (1)

Particule-Grille = PM pour Particle-Mesh
(certains disent Particule-Maille en français)

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- **Potentiel adouci (1)**
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Code Particule-Grille (1)

Particule-Grille = PM pour Particle-Mesh
(certains disent Particule-Maille en français)

Division de l'espace en une grille J^3

Problème étudié

Modélisation

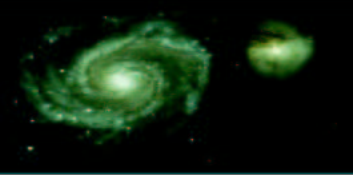
Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- **Potentiel adouci (1)**
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Code Particule-Grille (1)

Particule-Grille = PM pour Particle-Mesh
(certains disent Particule-Maille en français)

Division de l'espace en une grille J^3

Calcul du potentiel entre chaque cellule de la grille et non entre chaque particule.

Problème étudié

Modélisation

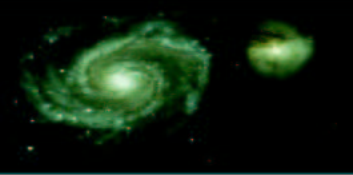
Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- **Potentiel adouci (2)**
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Code Particule-Grille (2)

Problème étudié

Modélisation

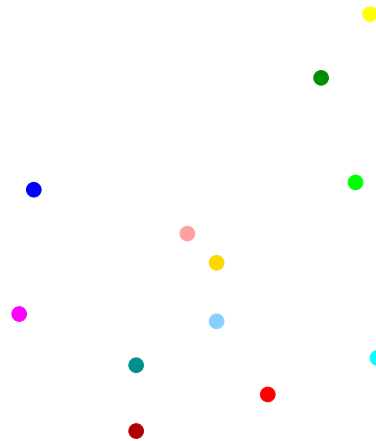
Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- **Potentiel adouci (2)**
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion





Code Particule-Grille (2)

Problème étudié

Modélisation

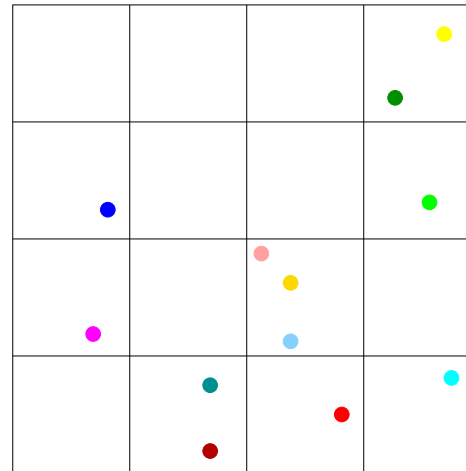
Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- **Potentiel adouci (2)**
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion





Code Particule-Grille (2)

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Code Particule-Grille (2)

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- **Code Particule-Grille (1)**
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

1,1	← 2,1		



Code Particule-Grille (2)

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- **Code Particule-Grille (1)**
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

1,1		3,1	



Code Particule-Grille (2)

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- **Code Particule-Grille (1)**
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

1,1		3,1	

Complexité



Code Particule-Grille (2)

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- **Code Particule-Grille (2)**
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

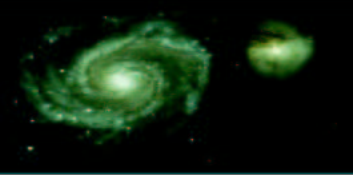
Résultats

Conclusion

1,1		3,1	

Complexité

■ $\mathcal{O}(J^6)$ dans l'espace direct



Code Particule-Grille (2)

Problème étudié

Modélisation

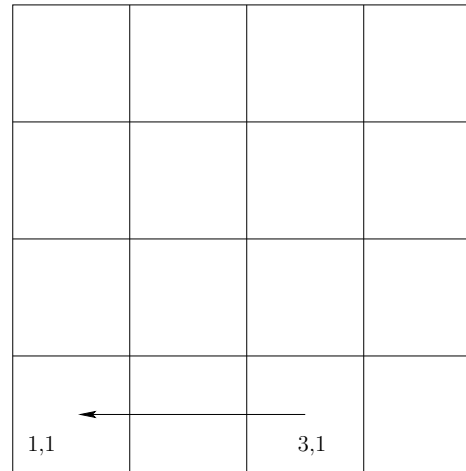
Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- **Code Particule-Grille (2)**
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

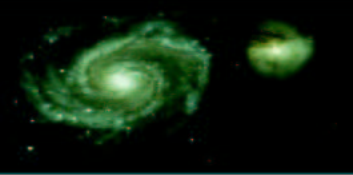
Résultats

Conclusion



Complexité

- $\mathcal{O}(J^6)$ dans l'espace direct
- ψ : convolution discrète $\Rightarrow \mathcal{O}(J^3 \ln(J))$ dans l'espace réciproque



Code Particule-Grille (3)

Problème : approximation valable seulement si la densité est à peu près homogène.

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- **Code Particule-Grille (2)**
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadripolaires (1)
- Moments quadripolaires (2)
- Moments quadripolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Code Particule-Grille (3)

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- **Code Particule-Grille (2)**
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadripolaires (1)
- Moments quadripolaires (2)
- Moments quadripolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

Problème : approximation valable seulement si la densité est à peu près homogène.

Sinon : contraste de densité non pris en compte dans les cellules voisines



Code Particule-Grille (3)

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- **Code Particule-Grille (2)**
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

Problème : approximation valable seulement si la densité est à peu près homogène.

Sinon : contraste de densité non pris en compte dans les cellules voisines

⇒ le potentiel n'est plus approché correctement.



Code Particule-Grille (4)

Évolution des codes PM

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- **Code Particule-Grille (2)**
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Code Particule-Grille (4)

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- **Code Particule-Grille (2)**
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadripolaires (1)
- Moments quadripolaires (2)
- Moments quadripolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

Évolution des codes PM

■ les codes P^3M

À grande échelle : PM

À courte échelle : PP

Prise en compte des contrastes de densités à petite échelle,
mais augmentation du temps de calcul...



Code Particule-Grille (4)

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- **Code Particule-Grille (2)**
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

Évolution des codes PM

■ les codes P^3M

À grande échelle : PM

À courte échelle : PP

Prise en compte des contrastes de densités à petite échelle,
mais augmentation du temps de calcul...

■ Codes à grille adaptative (sur la densité, ...)



Codes en arbre : Treecode

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

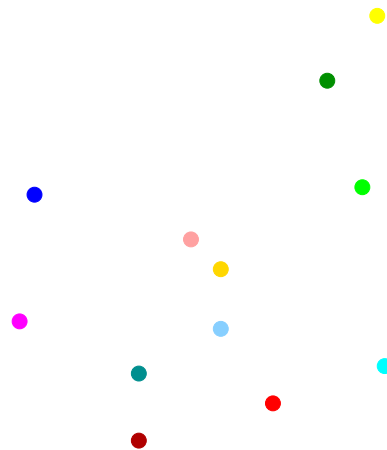
- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

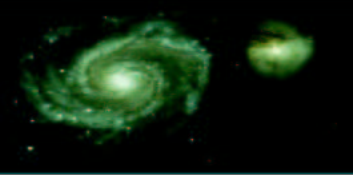
Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

Barnes et Hut 1986





Codes en arbre : Treecode

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

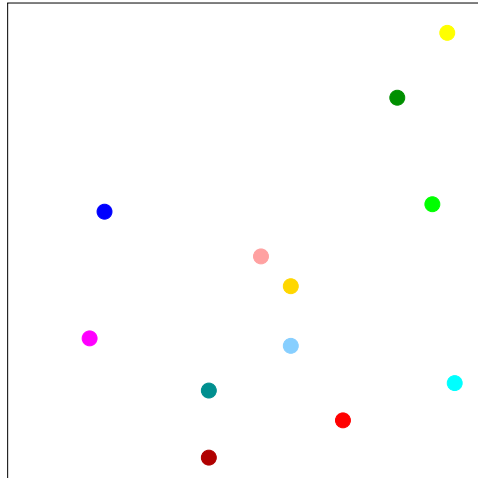
- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

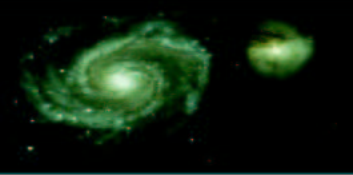
Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

Barnes et Hut 1986





Codes en arbre : Treecode

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

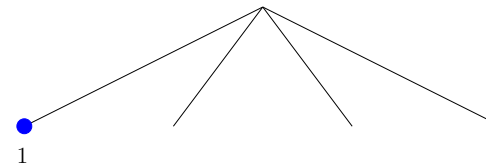
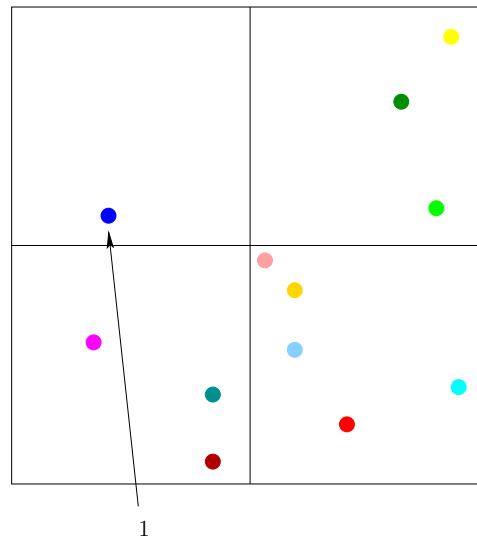
- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- **Code Particule-Grille (3)**
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

Barnes et Hut 1986



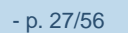


A 4x4 grid with colored dots and arrows. The dots are located at the following coordinates (row, column) starting from the top-left:

- (1, 3): Blue dot
- (2, 1): Magenta dot
- (2, 3): Yellow dot
- (2, 4): Green dot
- (3, 2): Teal dot
- (3, 3): Red dot
- (3, 4): Cyan dot
- (4, 1): Red dot
- (4, 2): Pink dot
- (4, 3): Light blue dot
- (4, 4): Yellow dot

Arrows point from labels to specific dots:

- Label 4.1 points to the magenta dot at (2, 1).
- Label 3.4 points to the red dot at (3, 3).
- Label 3.2 points to the cyan dot at (3, 4).
- Label 2.3 points to the green dot at (2, 4).





Codes en arbre : Treecode

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

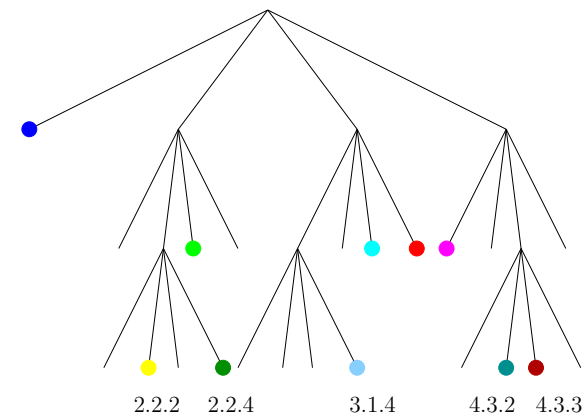
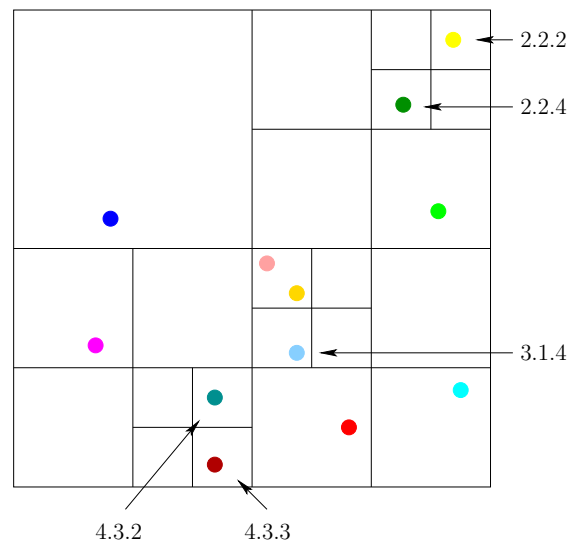
- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

Barnes et Hut 1986





Codes en arbre : Treecode

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

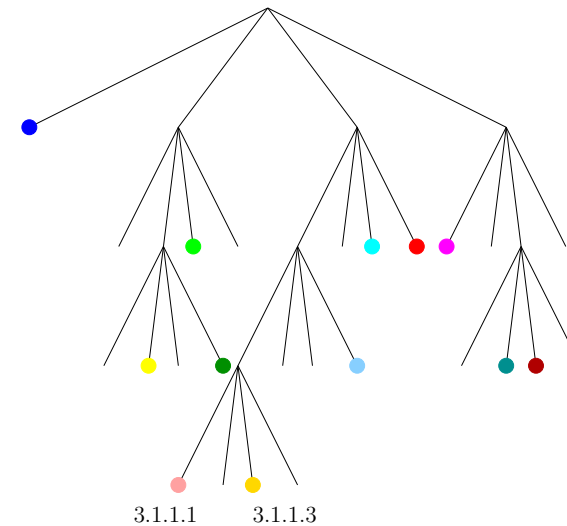
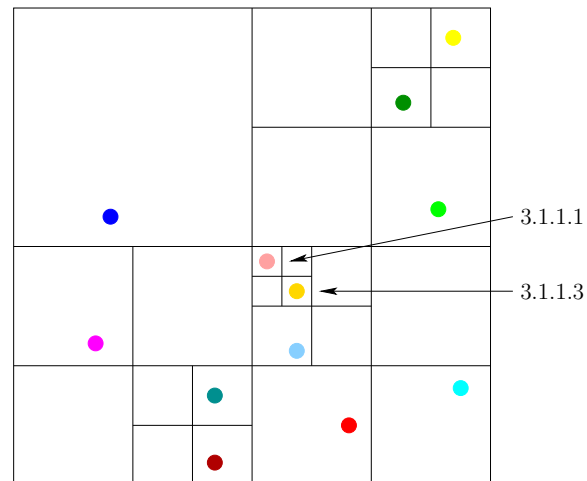
- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

Barnes et Hut 1986





Principe du Treecode (2)

Problème étudié

Modélisation

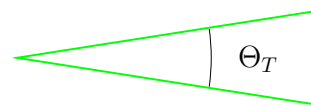
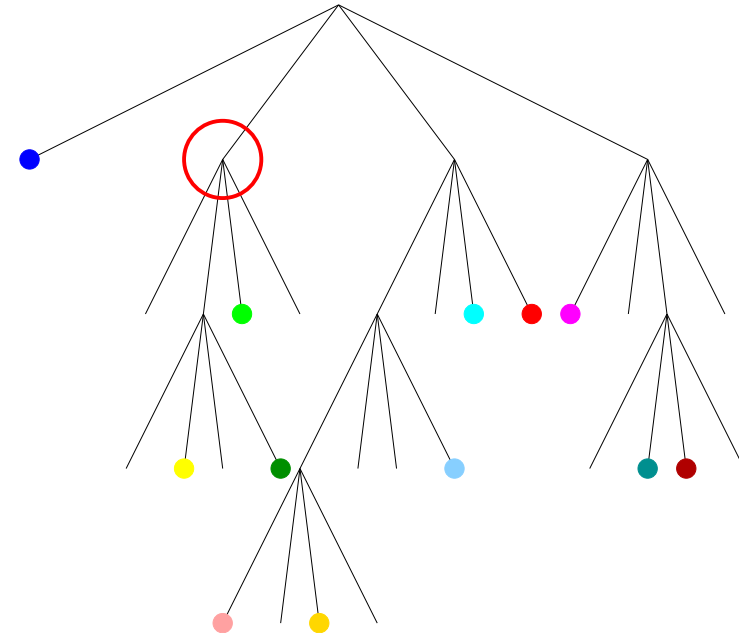
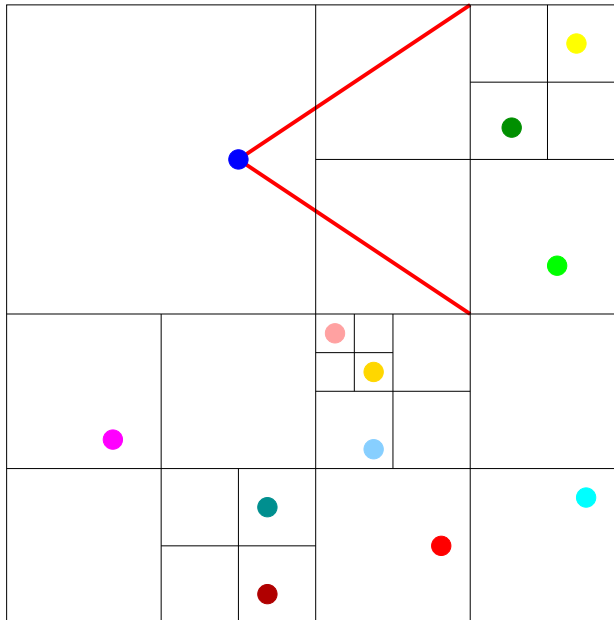
Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion





Principe du Treecode (2)

Problème étudié

Modélisation

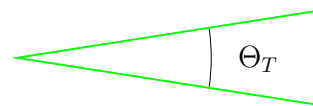
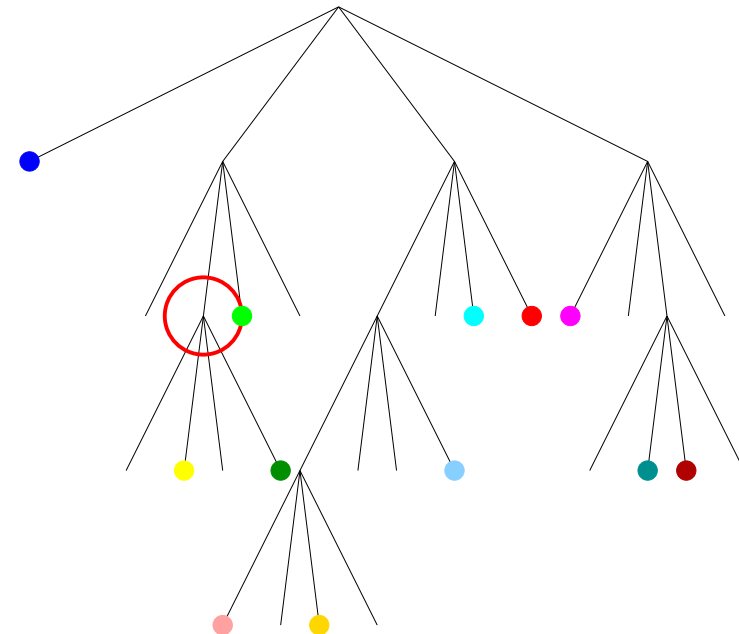
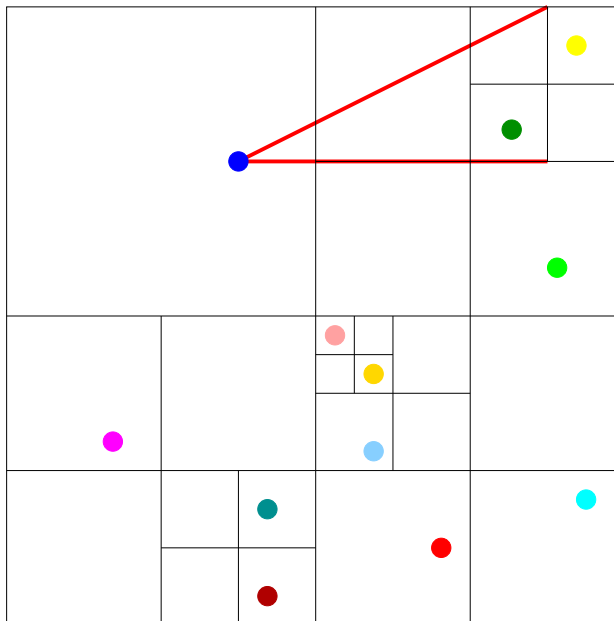
Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion





Principe du Treecode (2)

Problème étudié

Modélisation

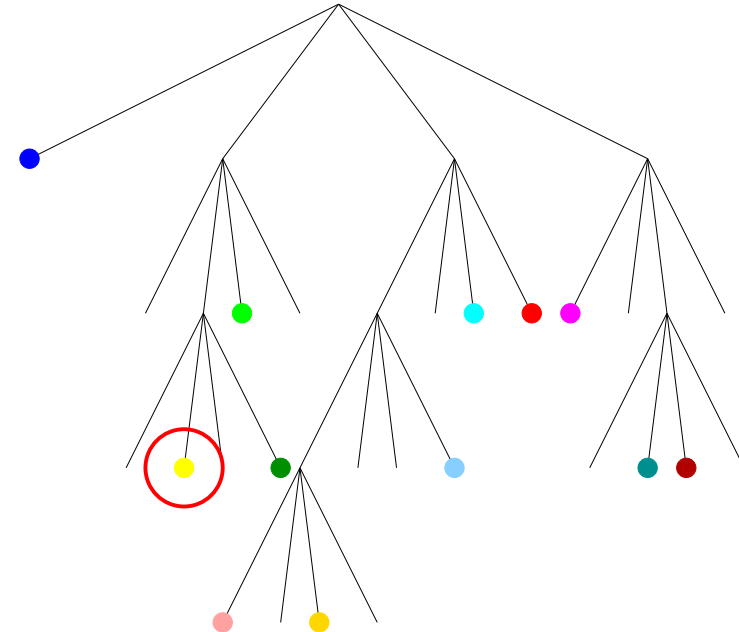
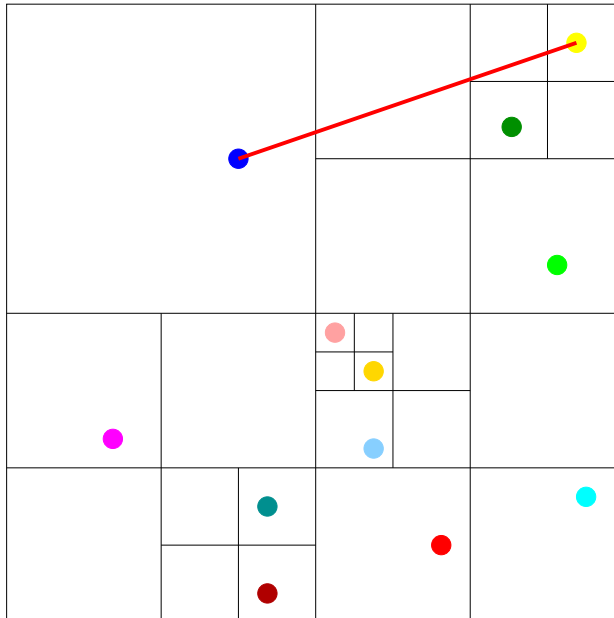
Outils numériques

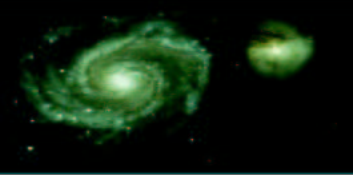
- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion





Principe du Treecode (2)

Problème étudié

Modélisation

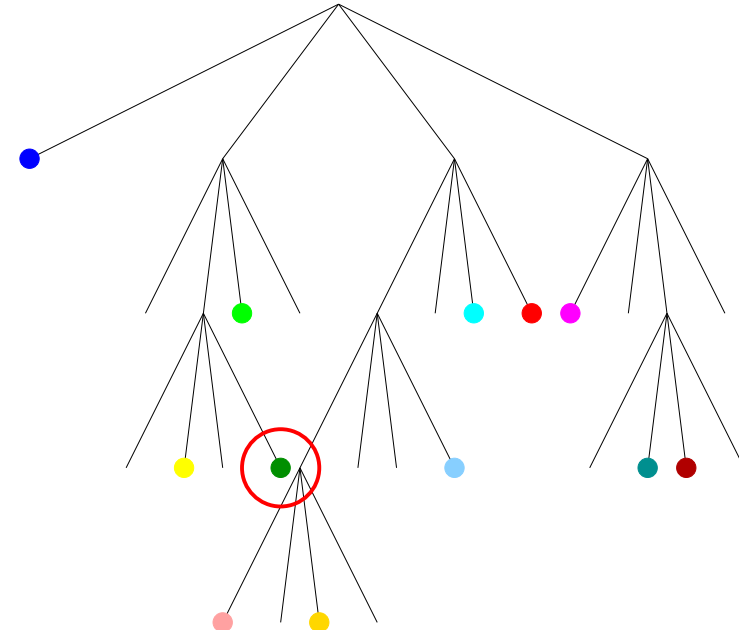
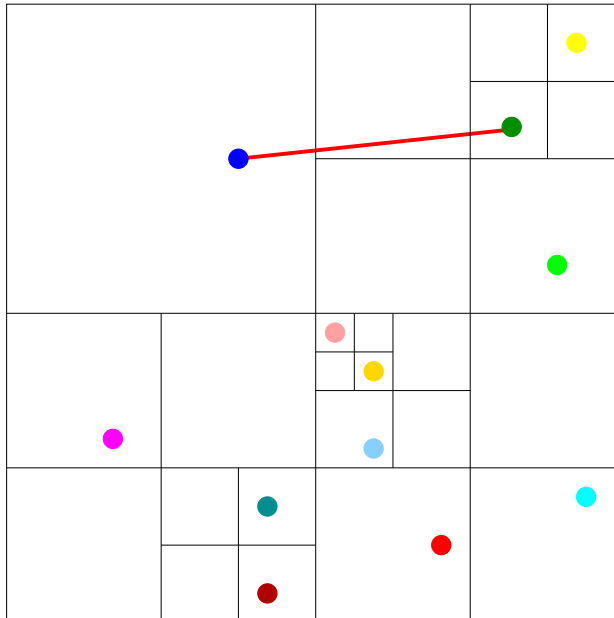
Outils numériques

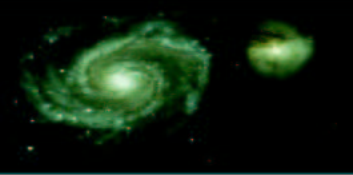
- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion





Principe du Treecode (2)

Problème étudié

Modélisation

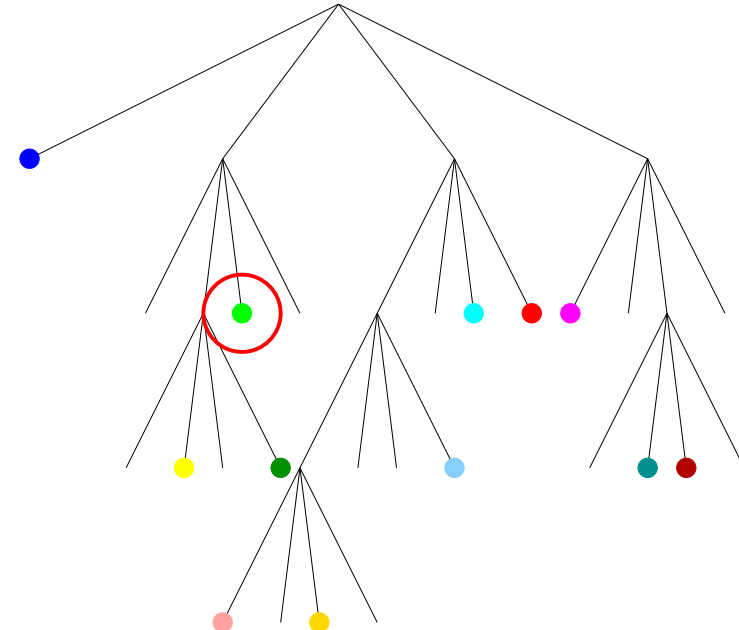
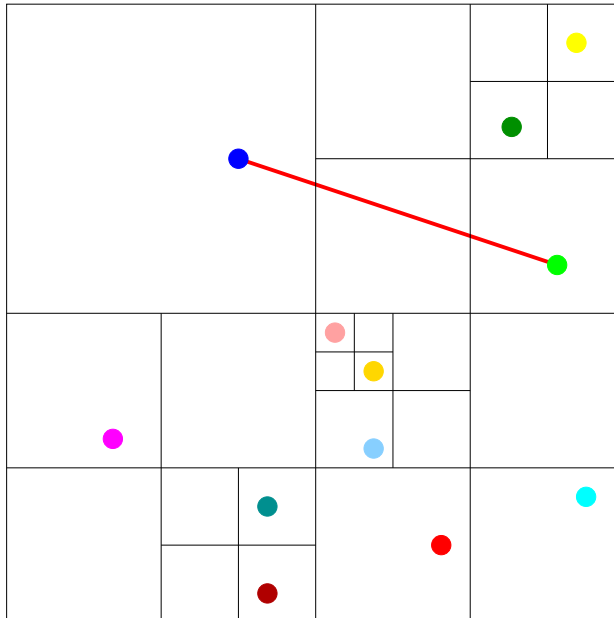
Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion





Principe du Treecode (2)

Problème étudié

Modélisation

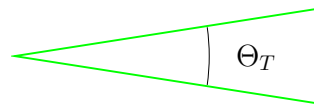
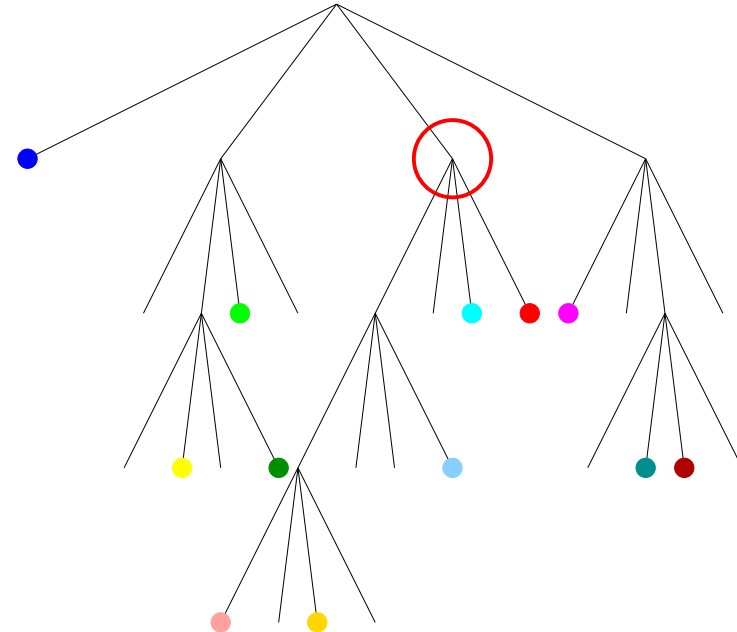
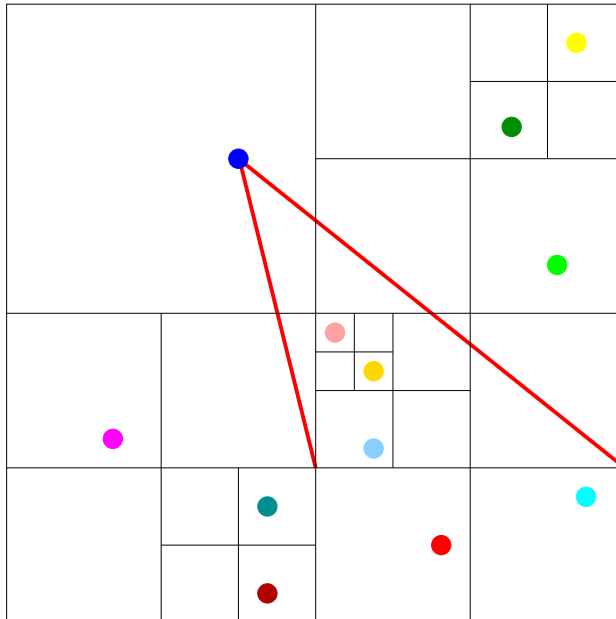
Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion





Principe du Treecode (2)

Problème étudié

Modélisation

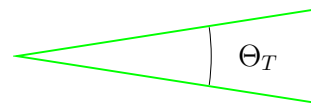
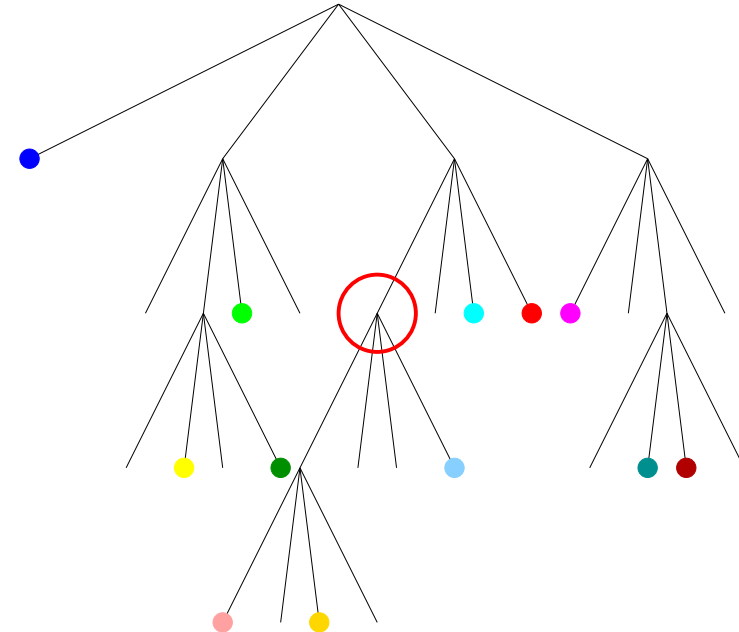
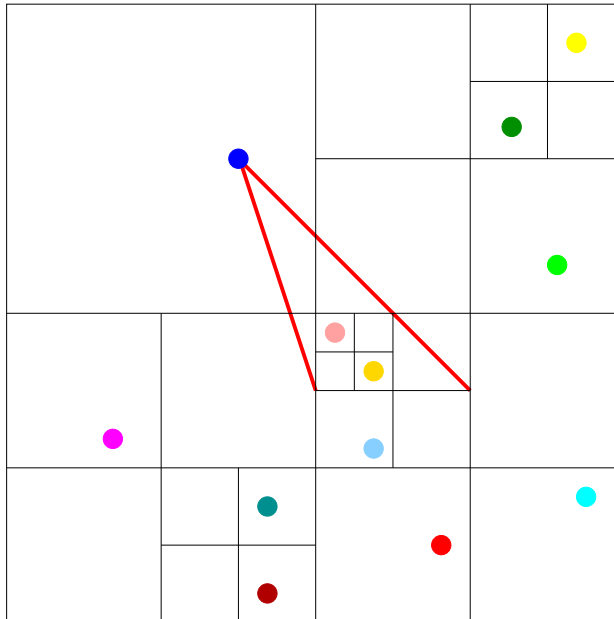
Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion





Principe du Treecode (2)

Problème étudié

Modélisation

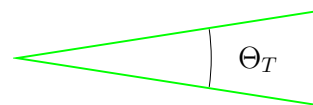
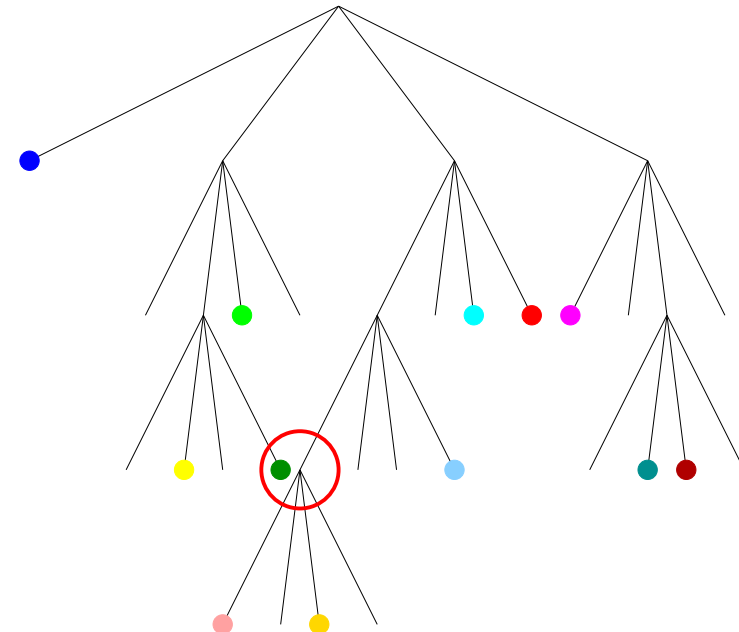
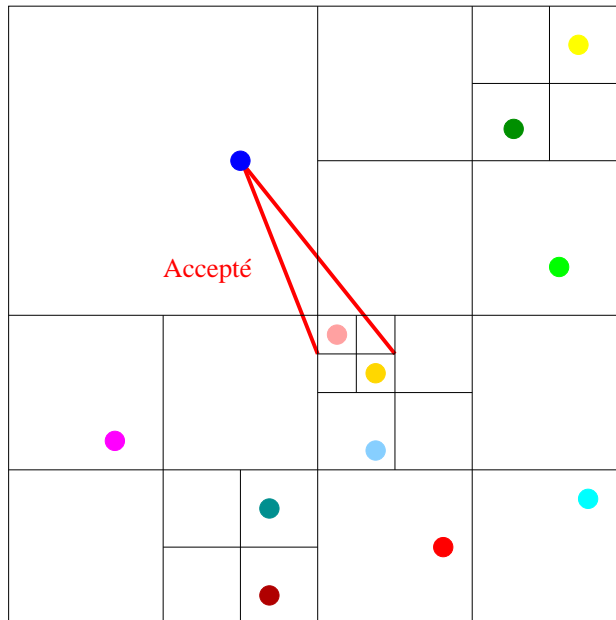
Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion





Principe du Treecode (2)

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

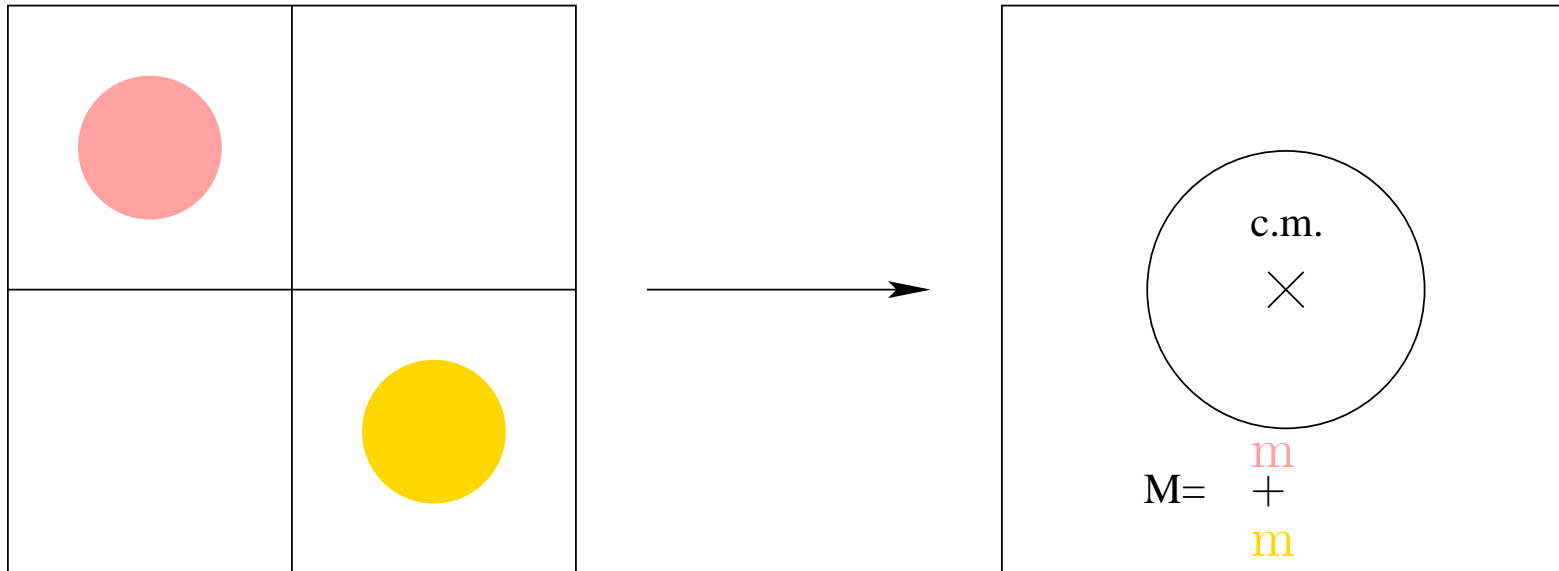
- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)

- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion





Principe du Treecode (2)

Problème étudié

Modélisation

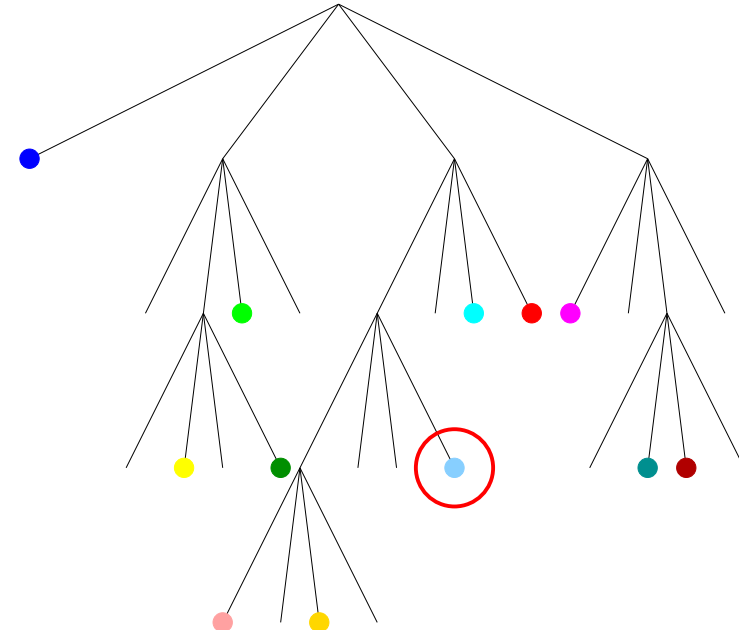
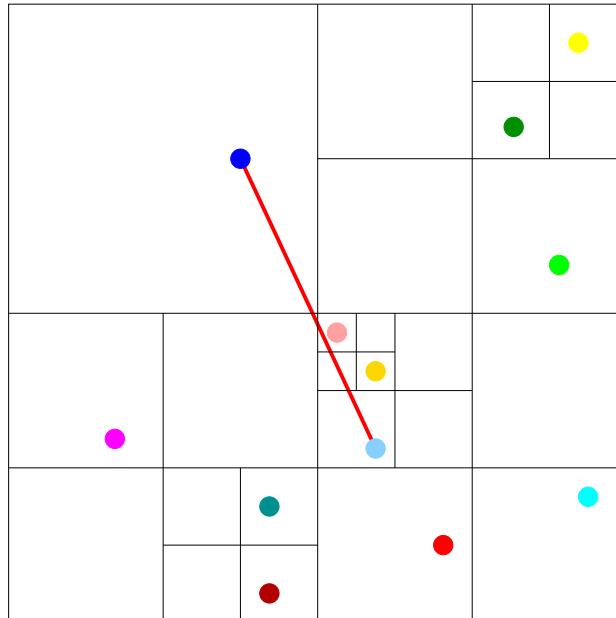
Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion





Principe du Treecode (2)

Problème étudié

Modélisation

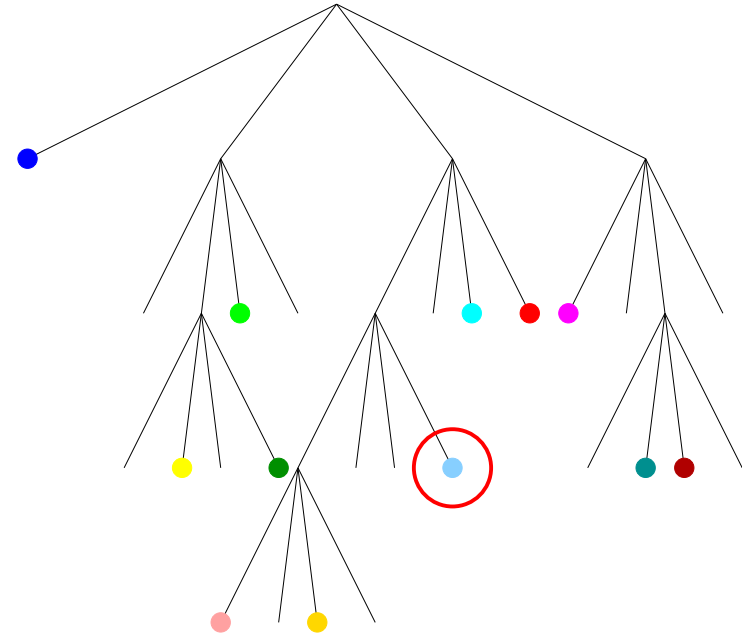
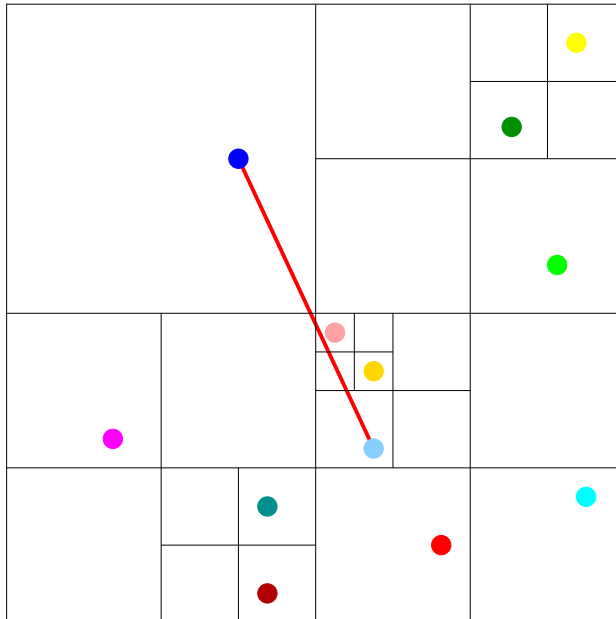
Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

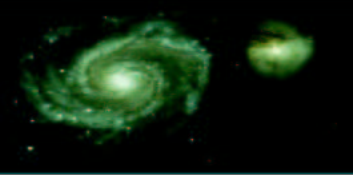
Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

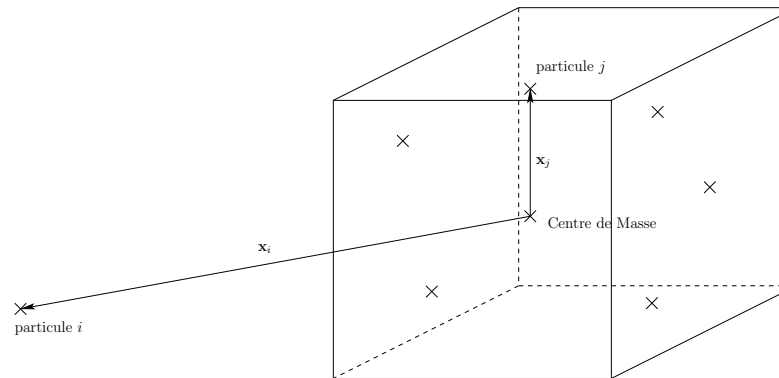
Conclusion



Complexité : $\mathcal{O}(N \log N)$



Moments quadripolaires (1)



Problème étudié

Modélisation

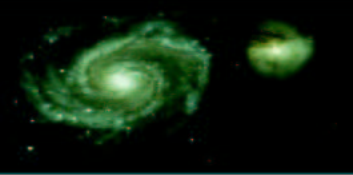
Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadripolaires (1)
- Moments quadripolaires (2)
- Moments quadripolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

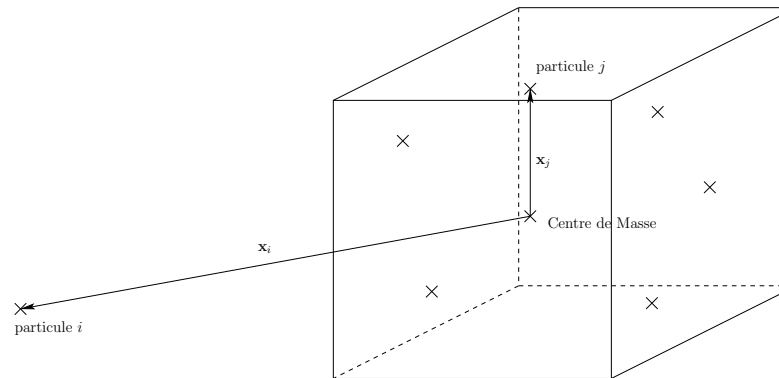
Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Moments quadrapolaires (1)



Première approximation : potentiel exercé par une particule cm de masse m_{cm} située en \mathbf{r}_{cm} , avec

$$m_{cm} = \sum_{j=1}^n m_j \quad \text{et} \quad \mathbf{r}_{cm} = \frac{1}{m_{cm}} \sum_{j=1}^n m_j \mathbf{r}_j$$

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrapolaires (1)
- Moments quadrapolaires (2)
- Moments quadrapolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement - Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Moments quadripolaires (2)

Valeur exacte du potentiel :

$$\psi(\mathbf{x}_i) = -G \sum_{j=1}^n \frac{m_j}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|}$$

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadripolaires (1)
- Moments quadripolaires (2)
- Moments quadripolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Moments quadripolaires (2)

Valeur exacte du potentiel :

$$\psi(\mathbf{x}_i) = -G \sum_{j=1}^n \frac{m_j}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|}$$

Développement de $1/|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|$ en polynômes de Legendre

$$\frac{1}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|} = \frac{1}{x_i} \left[P_0(u) + \frac{x_j}{x_i} P_1(u) + \left(\frac{x_j}{x_i} \right)^2 P_2(u) + \dots \right]$$

avec

$$u = \frac{\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j}{x_i x_j}$$

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadripolaires (1)
- Moments quadripolaires (2)
- Moments quadripolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Moments quadripolaires (3)

Trois premiers termes du développement :

$$\psi(\mathbf{x}_i) = -\frac{G}{x_i} \sum_{j=1}^n m_j \left(P_0(u) + \frac{x_j}{x_i} P_1(u) + \left(\frac{x_j}{x_i} \right)^2 P_2(u) \right)$$

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadripolaires (1)
- Moments quadripolaires (2)
- Moments quadripolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Moments quadripolaires (3)

Trois premiers termes du développement :

$$\psi(\mathbf{x}_i) = -\frac{G}{x_i} \sum_{j=1}^n m_j \left(P_0(u) + \frac{x_j}{x_i} P_1(u) + \left(\frac{x_j}{x_i} \right)^2 P_2(u) \right)$$

Trois premiers polynômes de Legendre

$$\begin{aligned} P_0(u) &= 1, \\ P_1(u) &= u, \\ P_2(u) &= \frac{3}{2} \left(u^2 - \frac{1}{3} \right). \end{aligned}$$

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particulaires
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadripolaires (1)
- Moments quadripolaires (2)
- Moments quadripolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Moments quadripolaires (3)

Trois premiers termes du développement :

$$\psi(\mathbf{x}_i) = -\frac{G}{x_i} \sum_{j=1}^n m_j \left(P_0(u) + \frac{x_j}{x_i} P_1(u) + \left(\frac{x_j}{x_i} \right)^2 P_2(u) \right)$$

Trois premiers polynômes de Legendre

$$P_0(u) = 1,$$

$$P_1(u) = u,$$

$$P_2(u) = \frac{3}{2} \left(u^2 - \frac{1}{3} \right).$$

Potentiel :

$$\psi(\mathbf{x}_i) = -\frac{G}{x_i} \sum_{j=1}^n m_j - \frac{G}{x_i^3} \mathbf{x}_i \cdot \sum_{j=1}^n m_j \mathbf{x}_j - \frac{G}{x_i^5} \sum_{j=1}^n m_j \left[\frac{3}{2} (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j)^2 - \frac{1}{2} x_i^2 x_j^2 \right]$$

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadripolaires (1)
- Moments quadripolaires (2)
- Moments quadripolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Moments quadripolaires (3)

Trois premiers termes du développement :

$$\psi(\mathbf{x}_i) = -\frac{G}{x_i} \sum_{j=1}^n m_j \left(P_0(u) + \frac{x_j}{x_i} P_1(u) + \left(\frac{x_j}{x_i} \right)^2 P_2(u) \right)$$

Trois premiers polynômes de Legendre

$$P_0(u) = 1,$$

$$P_1(u) = u,$$

$$P_2(u) = \frac{3}{2} \left(u^2 - \frac{1}{3} \right).$$

Potentiel :

$$\psi(\mathbf{x}_i) = -\frac{G}{x_i} \sum_{j=1}^n m_j - \frac{G}{x_i^5} \sum_{j=1}^n m_j \left[\frac{3}{2} (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j)^2 - \frac{1}{2} x_i^2 x_j^2 \right]$$

Problème étudié

Modélisation

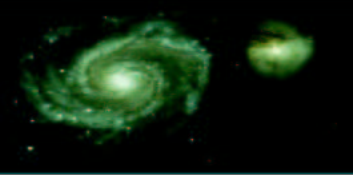
Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadripolaires (1)
- Moments quadripolaires (2)
- Moments quadripolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Parallélisme : généralités

Codes particulaires : parallélisme grossier évident

Problème étudié

Modélisation

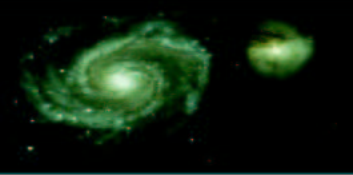
Outils numériques

- Codes particulaires
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Parallélisme : généralités

Codes particuliers : parallélisme grossier évident

Un processus gère N/p particules, où p est le nombre de processus.

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Parallélisme : généralités

Codes particuliers : parallélisme grossier évident

Un processus gère N/p particules, où p est le nombre de processus.

PP : on coupe la boucle de calcul du potentiel

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Parallélisme : généralités

Codes particulaires : parallélisme grossier évident

Un processus gère N/p particules, où p est le nombre de processus.

PP : on coupe la boucle de calcul du potentiel

PM : on coupe la boucle de calcul de M (il est aussi possible de paralléliser la FFT)

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particulaires
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Parallélisme : généralités

Codes particulaires : parallélisme grossier évident

Un processus gère N/p particules, où p est le nombre de processus.

PP : on coupe la boucle de calcul du potentiel

PM : on coupe la boucle de calcul de M (il est aussi possible de paralléliser la FFT)

TREECODE : on coupe la boucle de calcul du potentiel, on peut aussi paralléliser la construction de l'arbre

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particulaires
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Parallélisme du Treecode de l'Uma

Utilisation d'une ferme de Pc Linux = machine à mémoire distribuée

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Parallélisme du Treecode de l'Uma

Utilisation d'une ferme de Pc Linux = machine à mémoire distribuée

Communications entre processeurs réalisées à l'aide de MPI

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Parallélisme du Treecode de l'Uma

Utilisation d'une ferme de Pc Linux = machine à mémoire distribuée

Communications entre processeurs réalisées à l'aide de MPI

Parallélisme du Treecode : chacun des p processeurs calcule le potentiel subi par N/p particules

Problème étudié

Modélisation

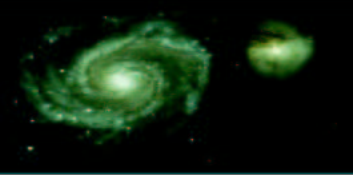
Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

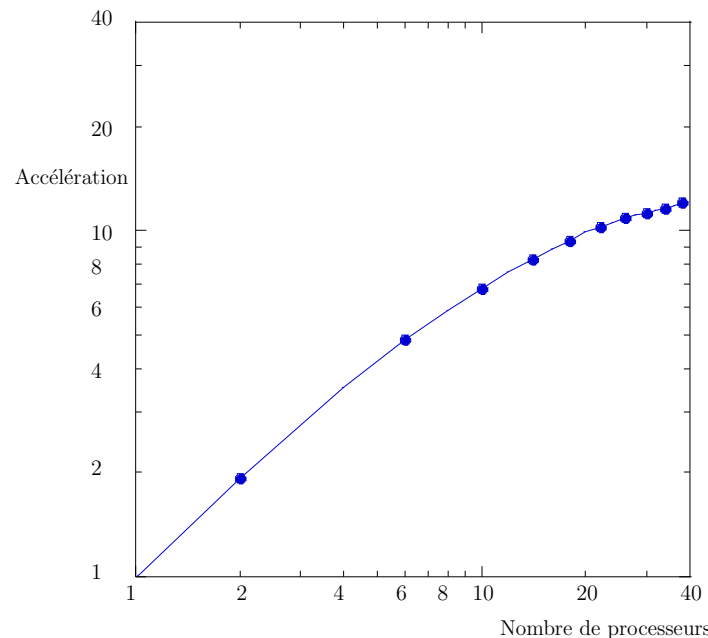


Parallélisme du Treecode de l'Uma

Utilisation d'une ferme de Pc Linux = machine à mémoire distribuée

Communications entre processeurs réalisées à l'aide de MPI

Parallélisme du Treecode : chacun des p processeurs calcule le potentiel subi par N/p particules



$$N = 5 K$$

Problème étudié

Modélisation

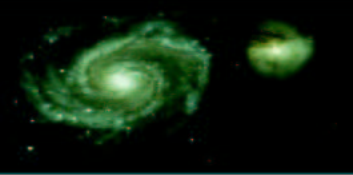
Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

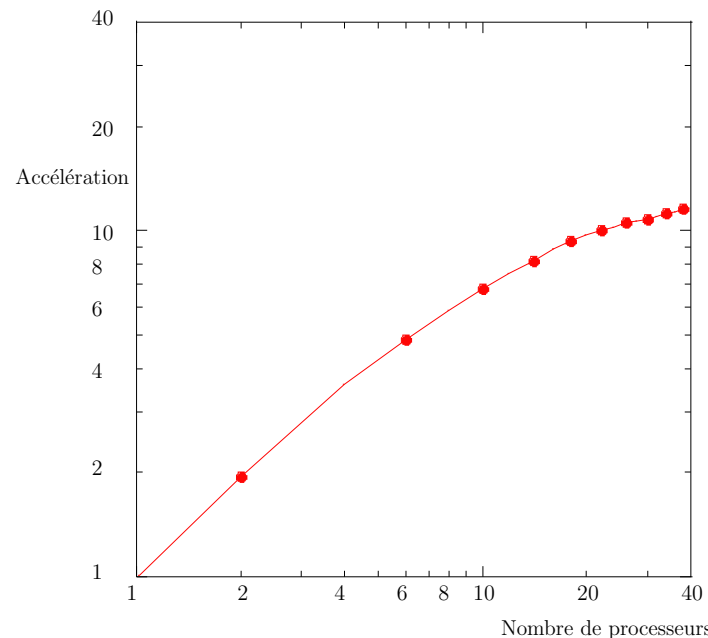


Parallélisme du Treecode de l'Uma

Utilisation d'une ferme de Pc Linux = machine à mémoire distribuée

Communications entre processeurs réalisées à l'aide de MPI

Parallélisme du Treecode : chacun des p processeurs calcule le potentiel subi par N/p particules



$N = 50\,K$

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

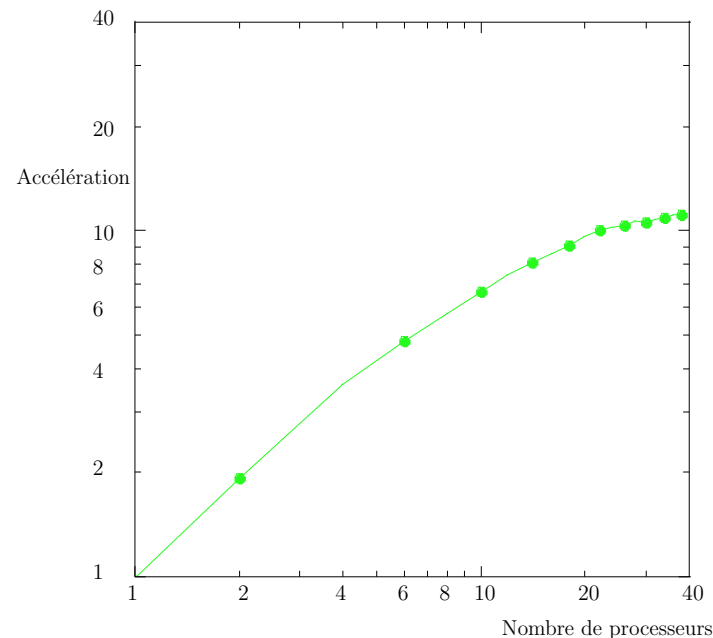


Parallélisme du Treecode de l'Uma

Utilisation d'une ferme de Pc Linux = machine à mémoire distribuée

Communications entre processeurs réalisées à l'aide de MPI

Parallélisme du Treecode : chacun des p processeurs calcule le potentiel subi par N/p particules



$N = 200\,K$

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Parallélisme du Treecode de l'Uma

Utilisation d'une ferme de Pc Linux = machine à mémoire distribuée

Communications entre processeurs réalisées à l'aide de MPI

Parallélisme du Treecode : chacun des p processeurs calcule le potentiel subi par N/p particules

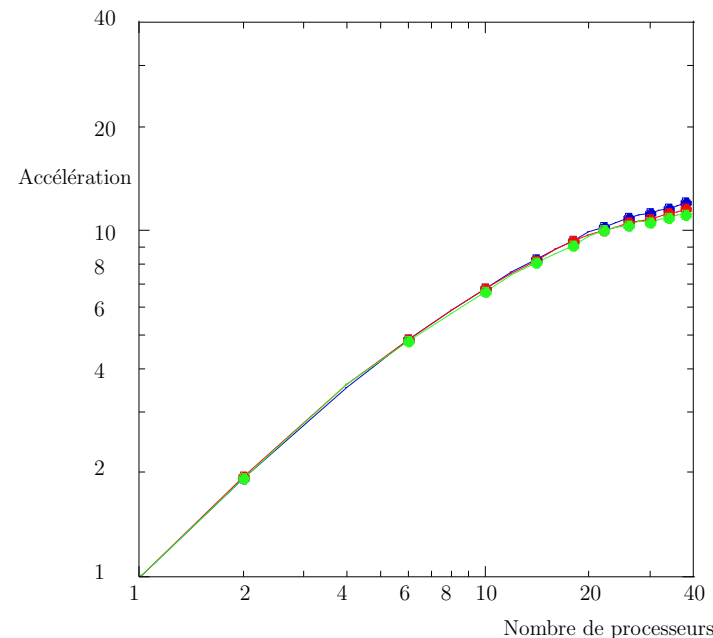




Schéma temporel (1)

Schéma classique : saute-mouton (leap-frog)

$$\frac{\mathbf{r}_{new} - \mathbf{r}_{old}}{\Delta t} = \mathbf{v}_{new} , \quad (1)$$

$$\frac{\mathbf{v}_{new} - \mathbf{v}_{old}}{\Delta t} = \mathbf{f}(\mathbf{r}_{old}) , \quad (2)$$

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

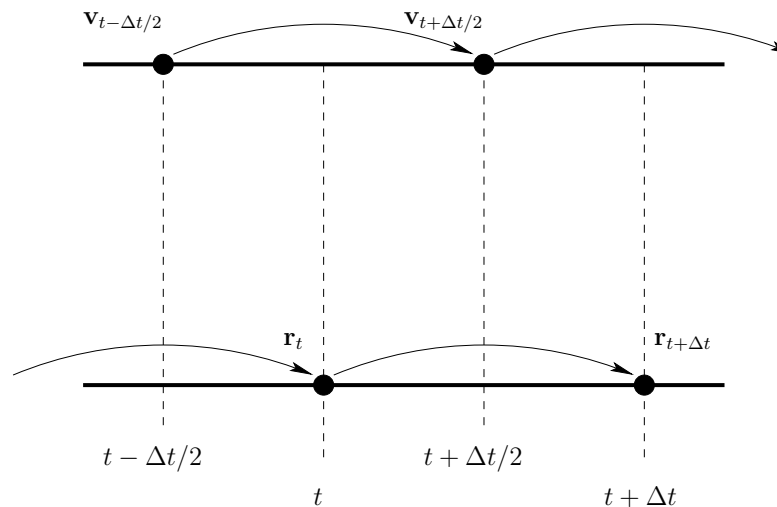


Schéma temporel (1)

Schéma classique : saute-mouton (leap-frog)

$$\frac{\mathbf{r}_{new} - \mathbf{r}_{old}}{\Delta t} = \mathbf{v}_{new} , \quad (1)$$

$$\frac{\mathbf{v}_{new} - \mathbf{v}_{old}}{\Delta t} = \mathbf{f}(\mathbf{r}_{old}) , \quad (2)$$



Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Schéma temporel (1)

Schéma classique : saute-mouton (leap-frog)

$$\frac{\mathbf{r}_{new} - \mathbf{r}_{old}}{\Delta t} = \mathbf{v}_{new} , \quad (1)$$

$$\frac{\mathbf{v}_{new} - \mathbf{v}_{old}}{\Delta t} = \mathbf{f}(\mathbf{r}_{old}) , \quad (2)$$

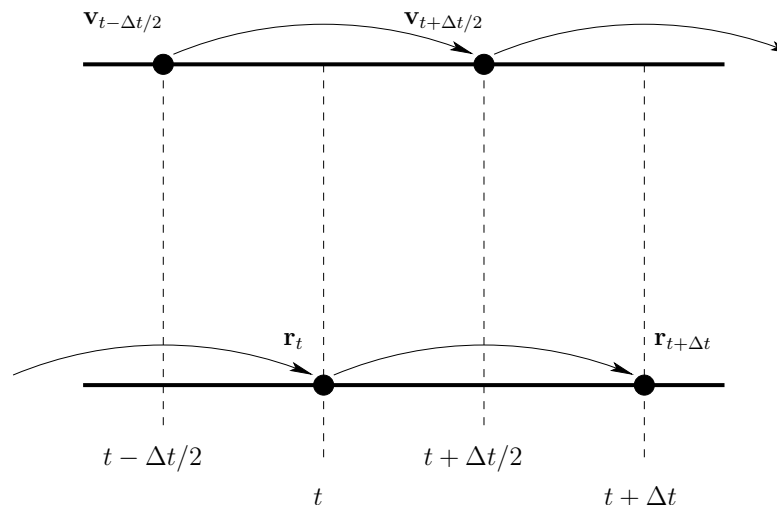


Schéma d'ordre 2, simple et rapide

Problème étudié

Modélisation

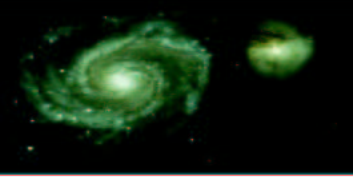
Outils numériques

- Codes particuliers
- En pratique...
- Code Particule-Particule
- Potentiel adouci (1)
- Potentiel adouci (2)
- Code Particule-Grille (1)
- Code Particule-Grille (2)
- Code Particule-Grille (3)
- Code Particule-Grille (4)
- Codes en arbre : Treecode
- Principe du Treecode (2)
- Moments quadrupolaires (1)
- Moments quadrupolaires (2)
- Moments quadrupolaires (3)
- Parallélisme : généralités
- Parallélisme du Treecode
- Schéma temporel (1)

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion



Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

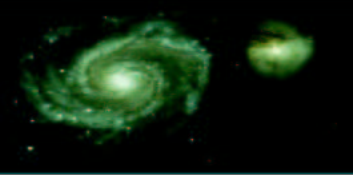
Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

- Conditions initiales
- Observables calculées
- Rayon de densité

Résultats

Conclusion

Expériences d'effondrement - Roy & Perez, MNRAS, 2004



Conditions initiales

6 types de conditions initiales

- H_η : Densité homogène

Problème étudié

Modélisation

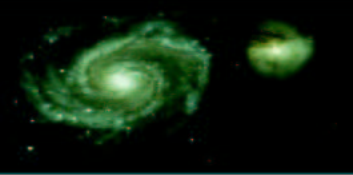
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

- Conditions initiales
- Observables calculées
- Rayon de densité

Résultats

Conclusion



Conditions initiales

6 types de conditions initiales

- H_η : Densité homogène
- $C_\eta^{n_g}$: Densité de type grumeaux

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

- Conditions initiales
- Observables calculées
- Rayon de densité

Résultats

Conclusion



Conditions initiales

6 types de conditions initiales

- H_η : Densité homogène
- $C_\eta^{n_g}$: Densité de type grumeaux
- G_η^σ : Vitesses de type gaussienne de largeur à mi-hauteur σ

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

- Conditions initiales
- Observables calculées
- Rayon de densité

Résultats

Conclusion



Conditions initiales

6 types de conditions initiales

- H_η : Densité homogène
- $C_\eta^{n_g}$: Densité de type grumeaux
- G_η^σ : Vitesses de type gaussienne de largeur à mi-hauteur σ
- M_η^k : Spectre de masse de type $k = I$ (Kroupa), II (Salpeter) ou III ($1/m$)

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

- Conditions initiales
- Observables calculées
- Rayon de densité

Résultats

Conclusion



Conditions initiales

6 types de conditions initiales

- H_η : Densité homogène
- $C_\eta^{n_g}$: Densité de type grumeaux
- G_η^σ : Vitesses de type gaussienne de largeur à mi-hauteur σ
- M_η^k : Spectre de masse de type $k = I$ (Kroupa), II (Salpeter) ou III ($1/m$)
- $P_\eta^{\alpha_d}$: Densité selon une loi de puissance $\rho \propto r^{-\alpha_d}$

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

- Conditions initiales
- Observables calculées
- Rayon de densité

Résultats

Conclusion



Conditions initiales

6 types de conditions initiales

- H_η : Densité homogène
- $C_\eta^{n_g}$: Densité de type grumeaux
- G_η^σ : Vitesses de type gaussienne de largeur à mi-hauteur σ
- M_η^k : Spectre de masse de type $k = I$ (Kroupa), II (Salpeter) ou III ($1/m$)
- $P_\eta^{\alpha_d}$: Densité selon une loi de puissance $\rho \propto r^{-\alpha_d}$
- $R_\eta^{\gamma_{rot}}$: Système en rotation avec paramètre de rotation γ_{rot}

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

- Conditions initiales
- Observables calculées
- Rayon de densité

Résultats

Conclusion



Observables calculées

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

● Conditions initiales

● Observables calculées

● Rayon de densité

Résultats

Conclusion

■ Énergie totale



Observables calculées

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

● Conditions initiales

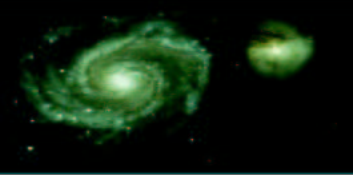
● Observables calculées

● Rayon de densité

Résultats

Conclusion

- Énergie totale
- Rapport du viriel ν



Observables calculées

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

● Conditions initiales

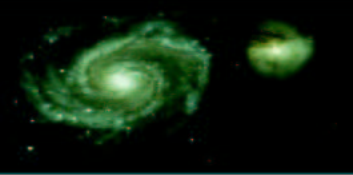
● Observables calculées

● Rayon de densité

Résultats

Conclusion

- Énergie totale
- Rapport du viriel \mathcal{V}
- Centre de densité et rayon de densité R_d



Observables calculées

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

● Conditions initiales

● Observables calculées

● Rayon de densité

Résultats

Conclusion

- Énergie totale
- Rapport du viriel \mathcal{V}
- Centre de densité et rayon de densité R_d
- Rapports d'axes a_1 et a_2 (rapports des valeurs propres de la matrice d'inertie)



Observables calculées

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

● Conditions initiales

● Observables calculées

● Rayon de densité

Résultats

Conclusion

- Énergie totale
- Rapport du viriel \mathcal{V}
- Centre de densité et rayon de densité R_d
- Rapports d'axes a_1 et a_2 (rapports des valeurs propres de la matrice d'inertie)
- Rayons contenant 10, 50 et 90% de la masse R_{10} , R_{50} et R_{90}



Observables calculées

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

● Conditions initiales

● Observables calculées

● Rayon de densité

Résultats

Conclusion

- Énergie totale
- Rapport du viriel \mathcal{V}
- Centre de densité et rayon de densité R_d
- Rapports d'axes a_1 et a_2 (rapports des valeurs propres de la matrice d'inertie)
- Rayons contenant 10, 50 et 90% de la masse R_{10} , R_{50} et R_{90}
- Potentiel ψ et densité ρ



Observables calculées

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

● Conditions initiales

● Observables calculées

● Rayon de densité

Résultats

Conclusion

- Énergie totale
- Rapport du viriel \mathcal{V}
- Centre de densité et rayon de densité R_d
- Rapports d'axes a_1 et a_2 (rapports des valeurs propres de la matrice d'inertie)
- Rayons contenant 10, 50 et 90% de la masse R_{10} , R_{50} et R_{90}
- Potentiel ψ et densité ρ
- Température $T = 2K/3N$



Observables calculées

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

● Conditions initiales

● Observables calculées

● Rayon de densité

Résultats

Conclusion

- Énergie totale
- Rapport du viriel \mathcal{V}
- Centre de densité et rayon de densité R_d
- Rapports d'axes a_1 et a_2 (rapports des valeurs propres de la matrice d'inertie)
- Rayons contenant 10, 50 et 90% de la masse R_{10} , R_{50} et R_{90}
- Potentiel ψ et densité ρ
- Température $T = 2K/3N$
- Ajustement des couples potentiel-densité par un polytrophe ou une sphère isotherme.



Rayon de densité

Problème étudié

Modélisation

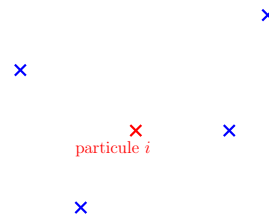
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

- Conditions initiales
- Observables calculées
- Rayon de densité

Résultats

Conclusion





Rayon de densité

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

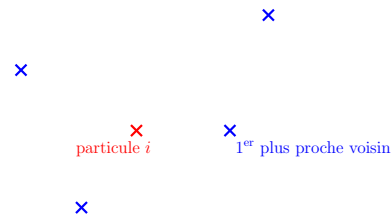
● Conditions initiales

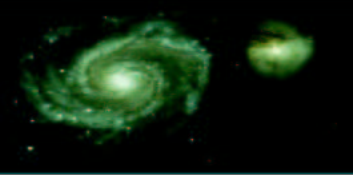
● Observables calculées

● Rayon de densité

Résultats

Conclusion





Rayon de densité

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

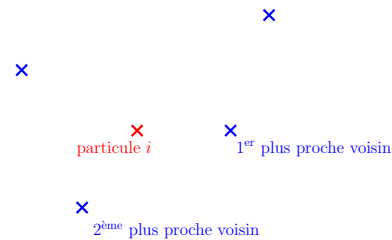
● Conditions initiales

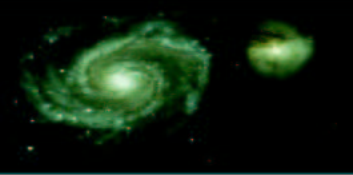
● Observables calculées

● Rayon de densité

Résultats

Conclusion





Rayon de densité

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

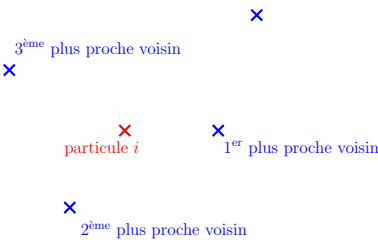
● Conditions initiales

● Observables calculées

● Rayon de densité

Résultats

Conclusion





Rayon de densité

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

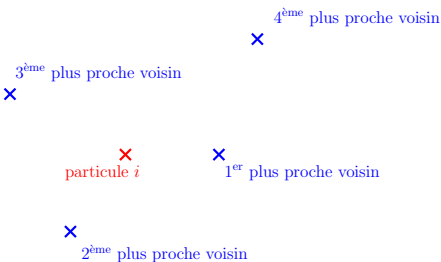
● Conditions initiales

● **Observables calculées**

● Rayon de densité

Résultats

Conclusion





Rayon de densité

Problème étudié

Modélisation

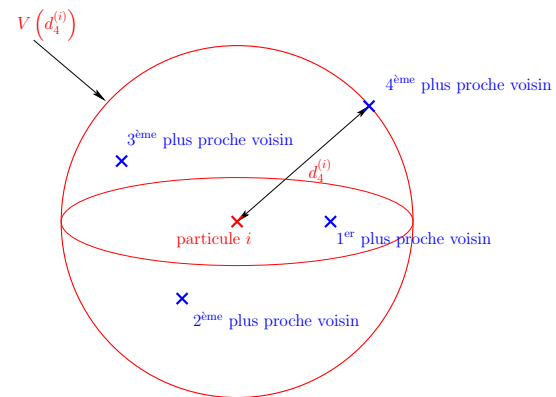
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

- Conditions initiales
- Observables calculées
- Rayon de densité

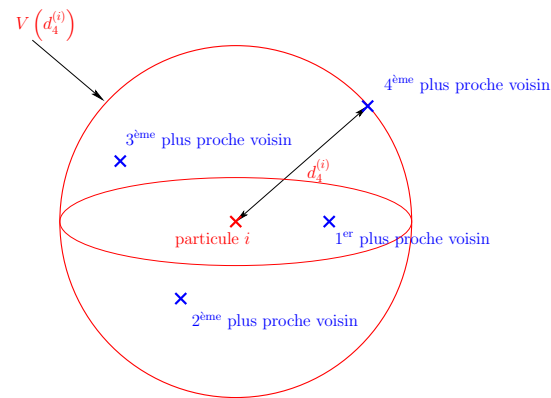
Résultats

Conclusion





Rayon de densité



$$\rho_j^{(i)} = \frac{j-1}{V(d_j^{(i)})} m$$

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

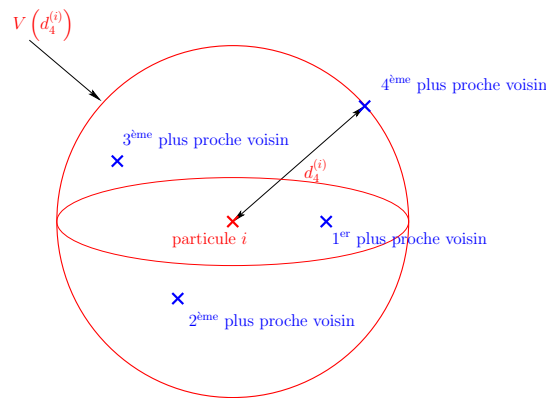
- Conditions initiales
- Observables calculées
- Rayon de densité

Résultats

Conclusion



Rayon de densité



$$\rho_j^{(i)} = \frac{j-1}{V(d_j^{(i)})} m$$

$$\mathbf{r}_{cd} = \frac{\sum \mathbf{r}_i \rho_j^{(i)}}{\sum \rho_j^{(i)}} \quad \text{et} \quad R_{d,j} = \frac{\sum |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{cd}| \rho_j^{(i)}}{\sum \rho_j^{(i)}}$$

Casertano et Hut, 1985.

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

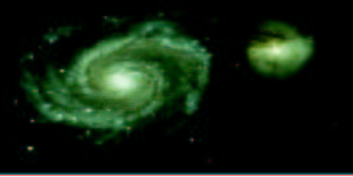
● Conditions initiales

● Observables calculées

● Rayon de densité

Résultats

Conclusion



Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

Conclusion

Résultats



Effondrement

Problème étudié

Modélisation

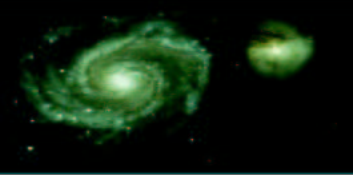
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

Conclusion



Effondrement

Tous les effondrements conduisent à la formation d'un état d'équilibre.

Problème étudié

Modélisation

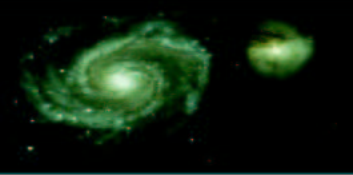
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

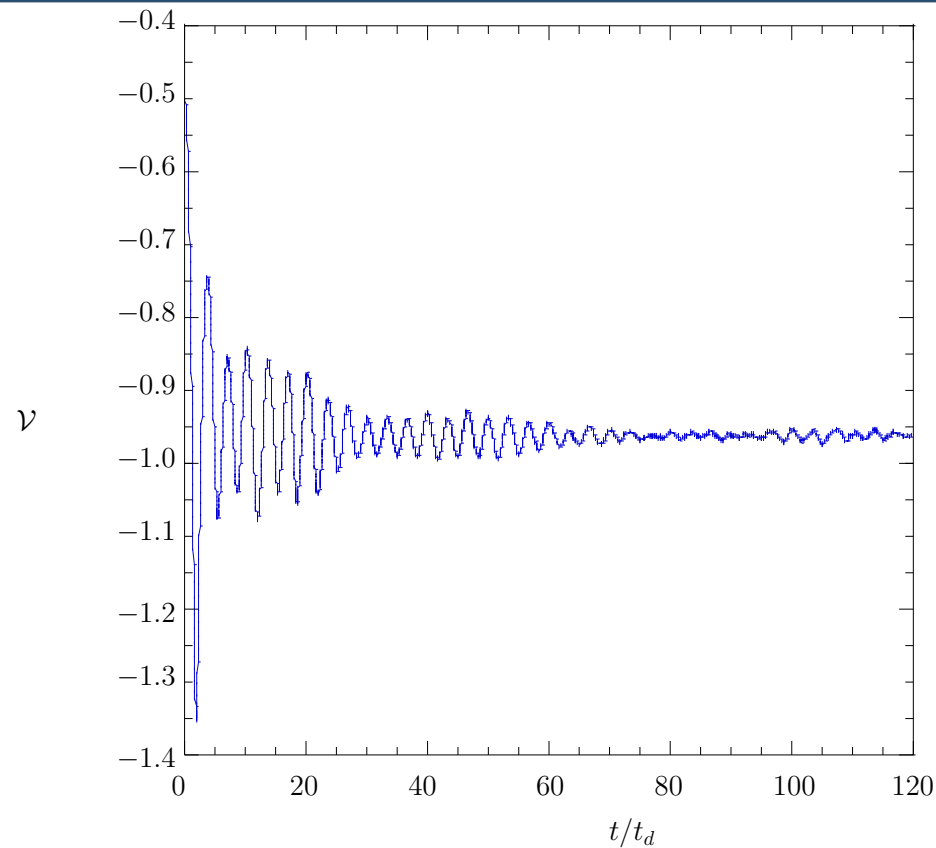
- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

Conclusion



Effondrement

Tous les effondrements conduisent à la formation d'un état d'équilibre.



Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

Conclusion



Etude préliminaire

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

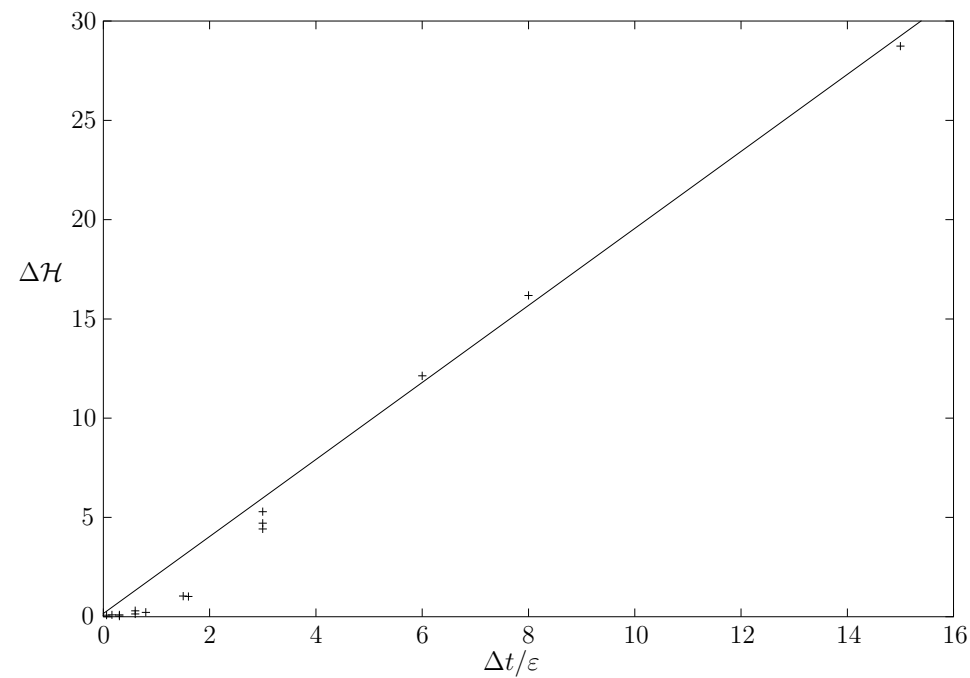
Résultats

- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

Conclusion

Potentiel approché

$$\psi(\mathbf{r}) = \begin{cases} -\frac{Gm_i}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|} & \text{si } |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i| > \varepsilon \\ -\frac{Gm_i}{\varepsilon} & \text{si } |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i| \leq \varepsilon \end{cases}$$





Etude préliminaire (II)

Problème étudié

Modélisation

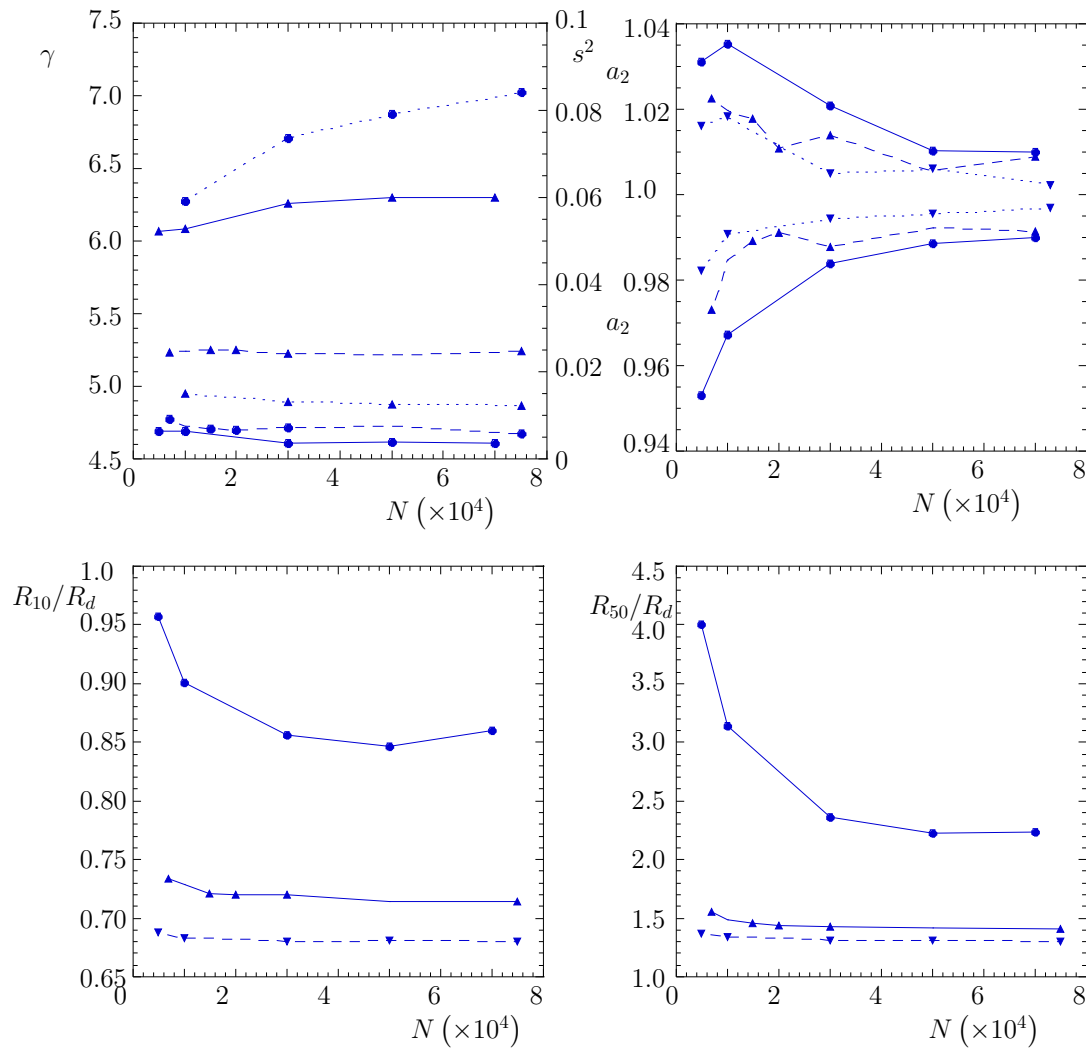
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

Conclusion





Géométrie du système final (I)

Problème étudié

Modélisation

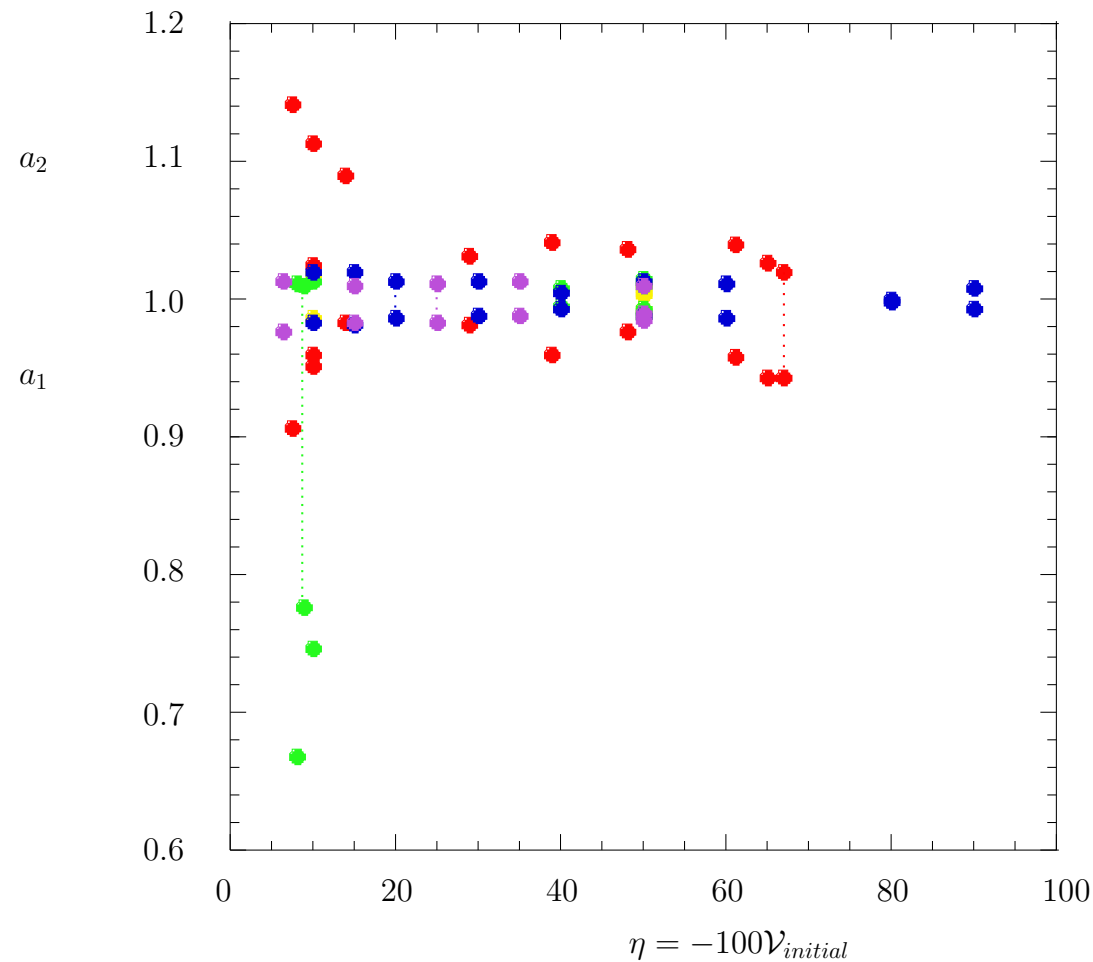
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

Conclusion





Géométrie du système final (I)

Problème étudié

Modélisation

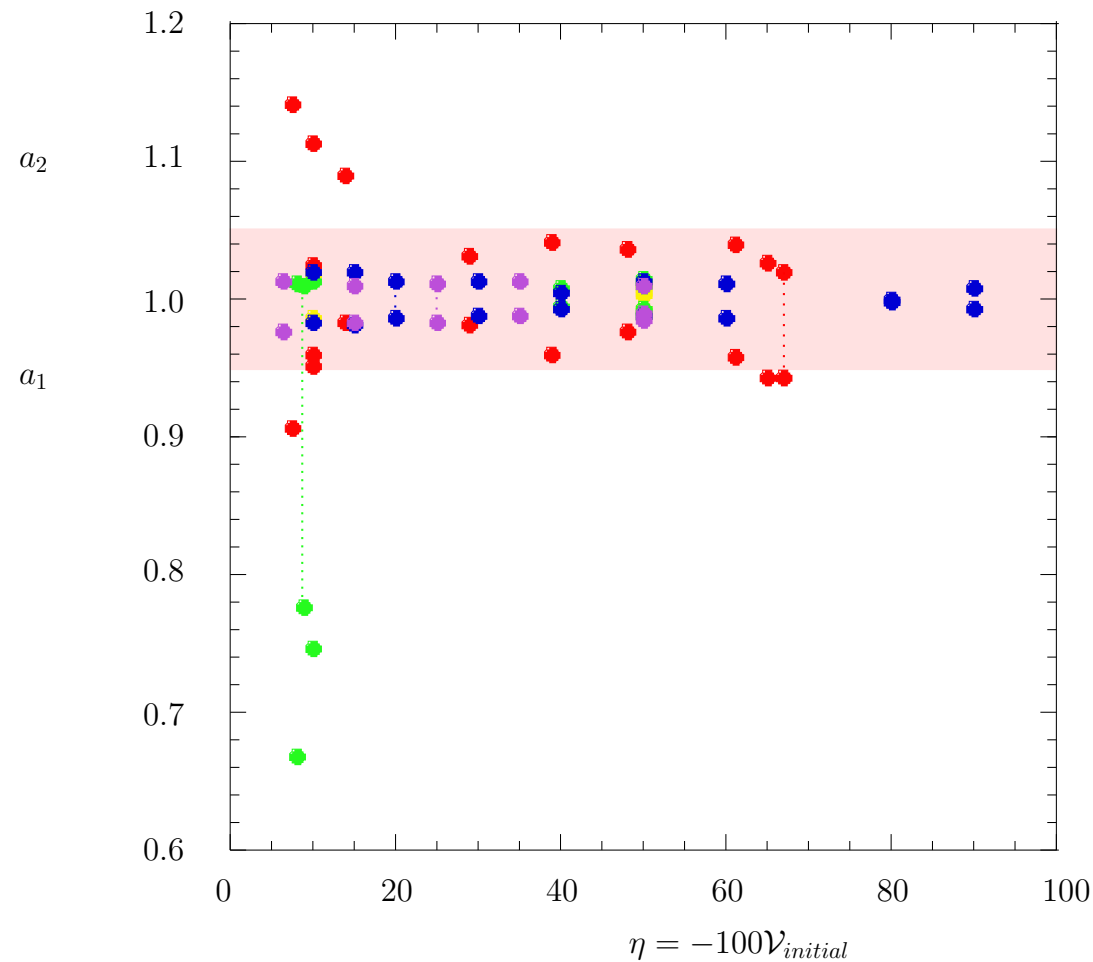
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

Conclusion





Géométrie du système final (II)

Problème étudié

Modélisation

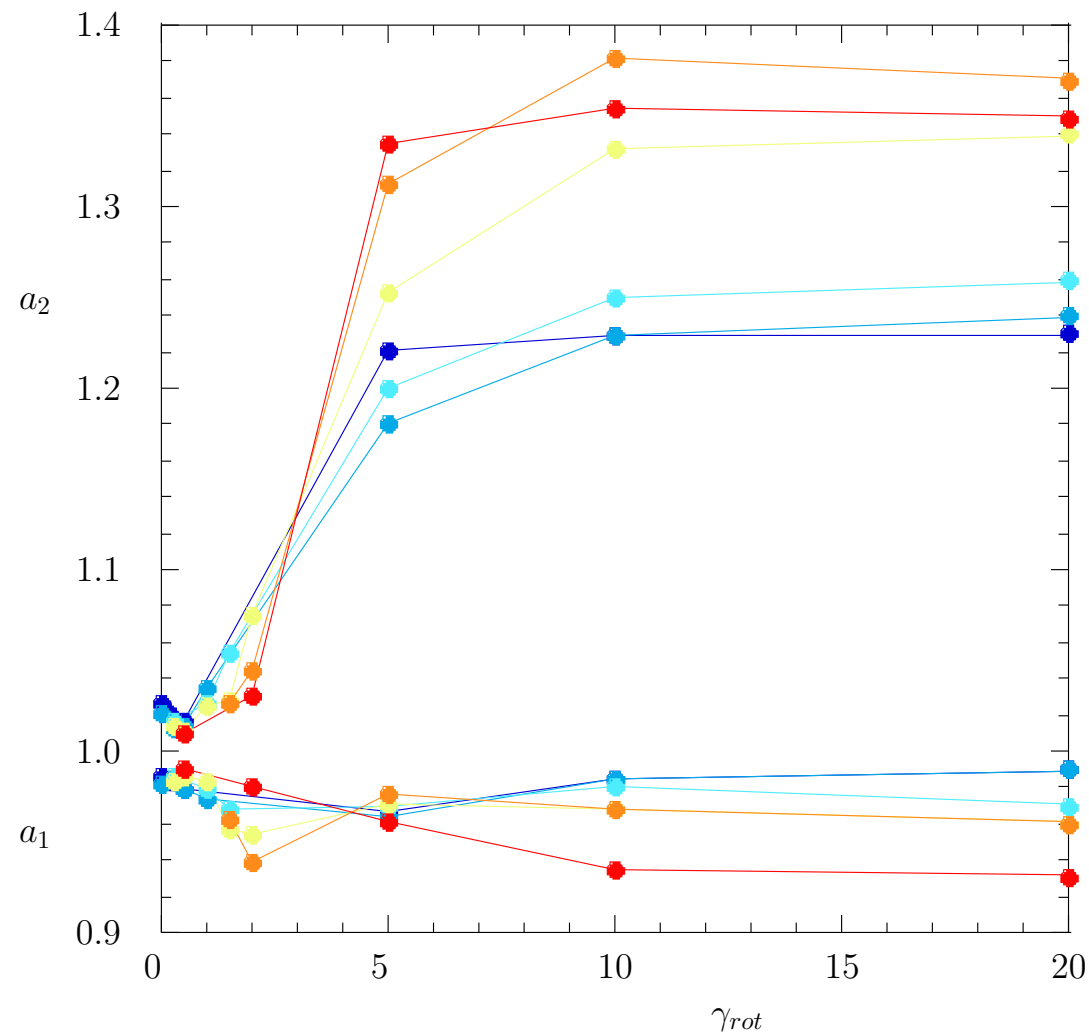
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

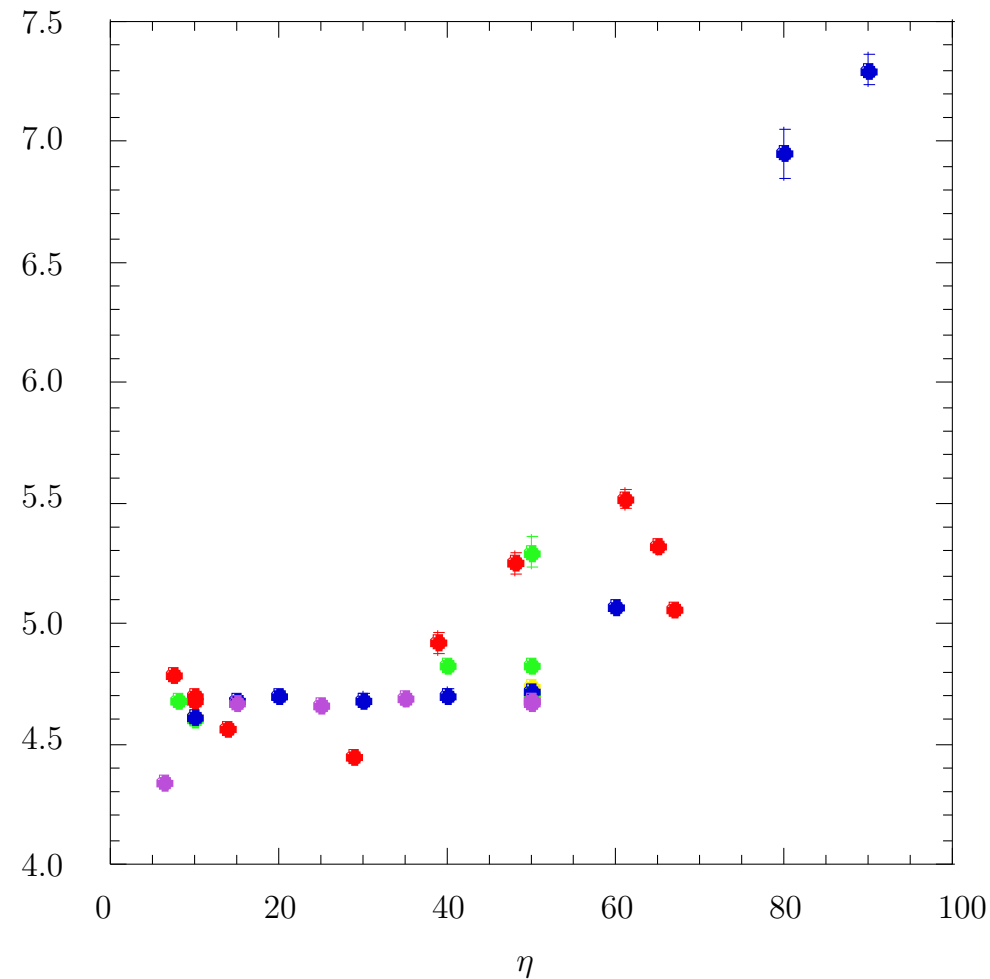
Conclusion

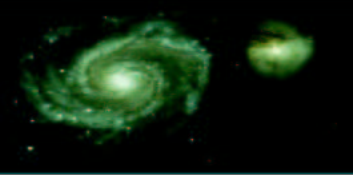




Ajustement par un polytrope

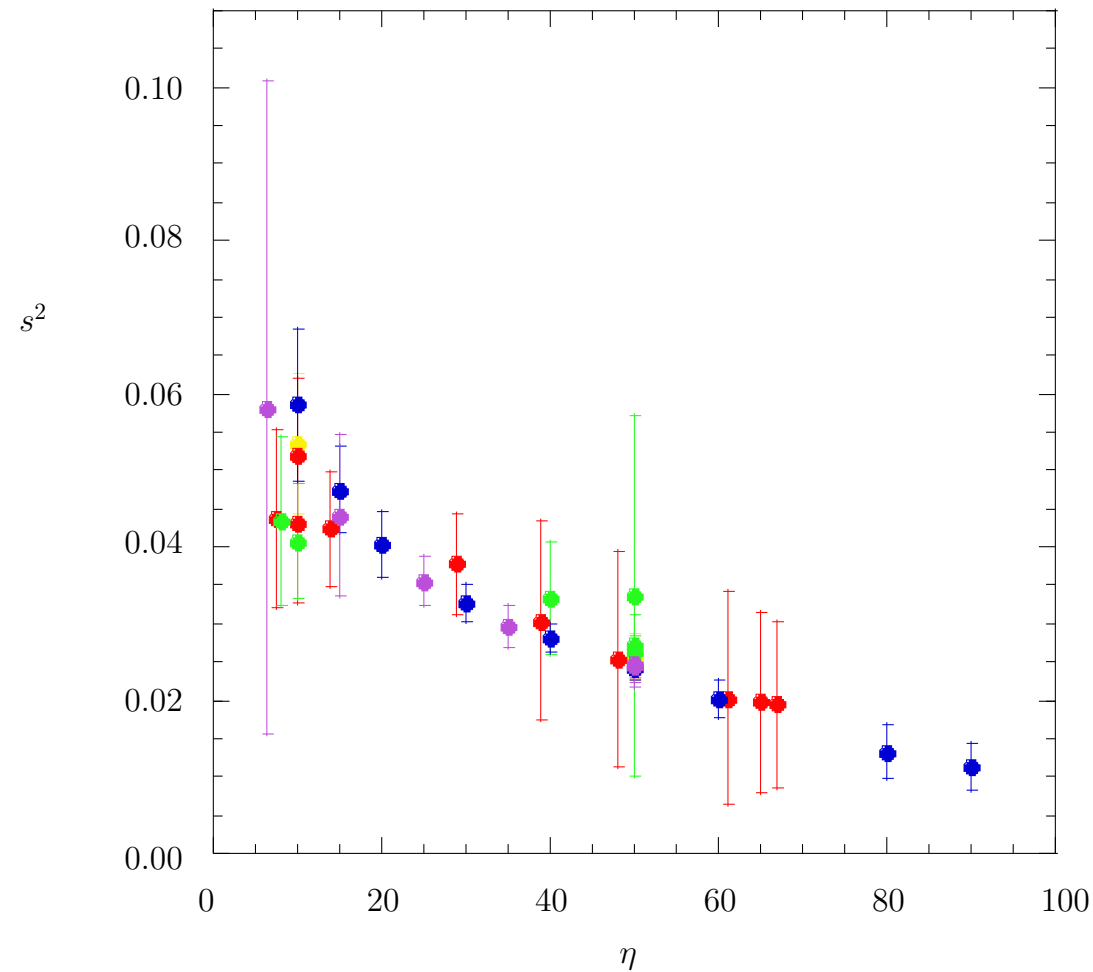
γ

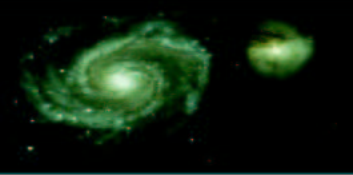




Ajustement par une sphère isotherme

Problème étudié
Modélisation
Outils numériques
Expériences d'effondrement - Roy & Perez, MNRAS, 2004
Résultats
● Effondrement
● Etude préliminaire
● Etude préliminaire (II)
● Géométrie du système final (I)
● Géométrie du système final (II)
● Ajustement par un polytrophe
● Ajustement sphère isotherme
● Exemple d'ajustement
● Densités finales
● Ségrégation de taille
● Énergie température
● Énergie température
Conclusion





Exemple d'ajustement

Problème étudié

Modélisation

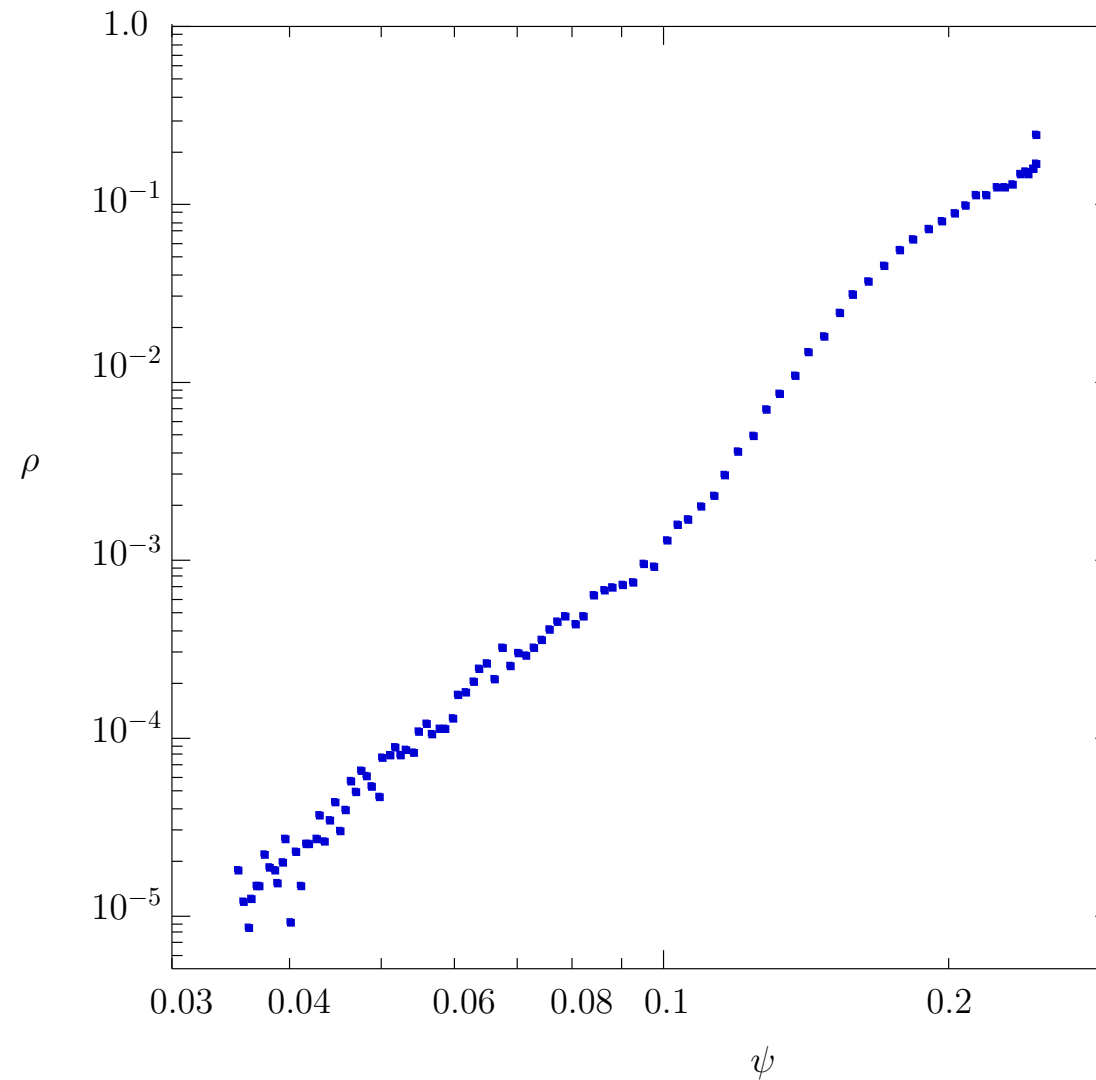
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

Conclusion





Exemple d'ajustement

Problème étudié

Modélisation

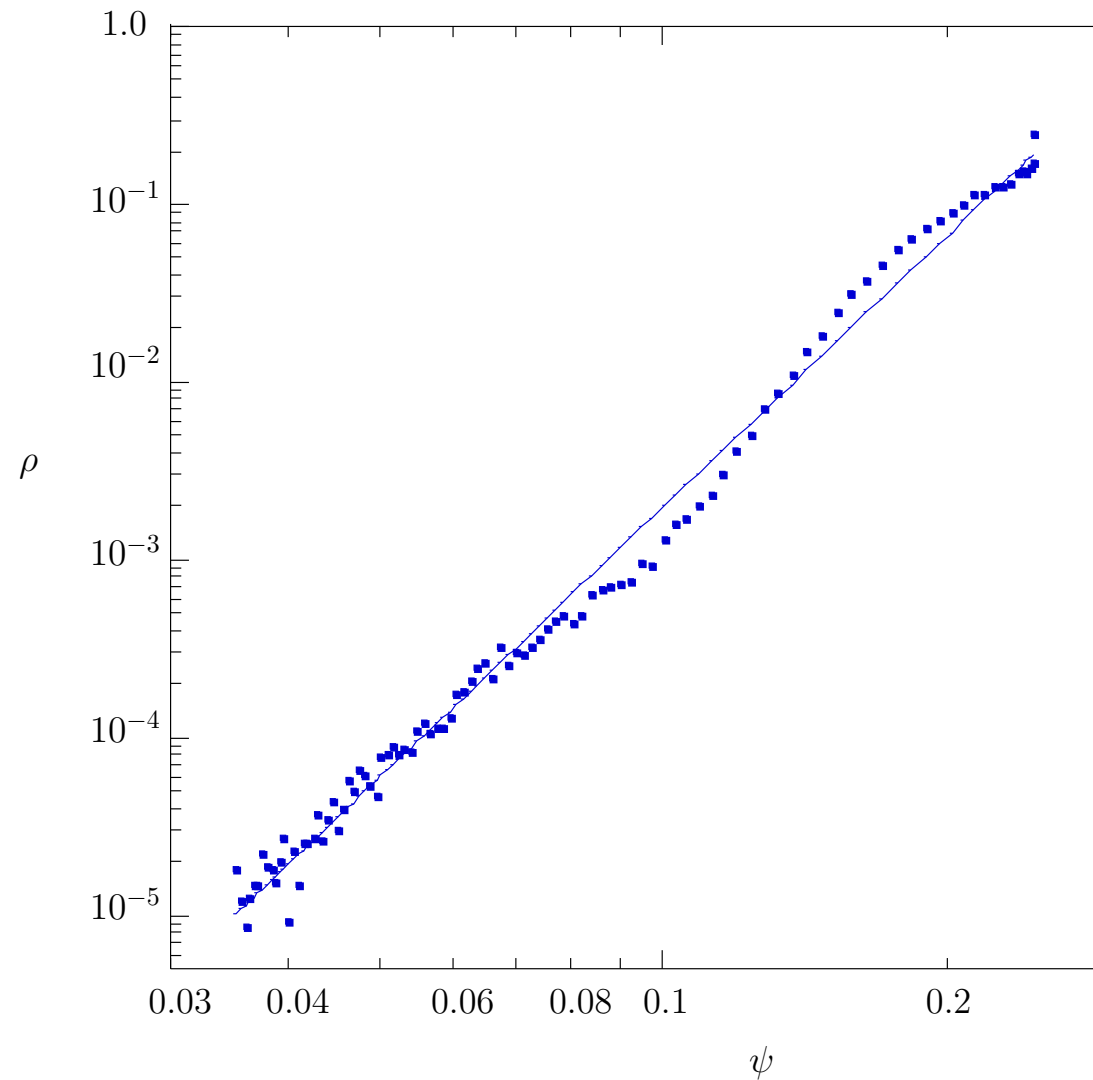
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

Conclusion





Exemple d'ajustement

Problème étudié

Modélisation

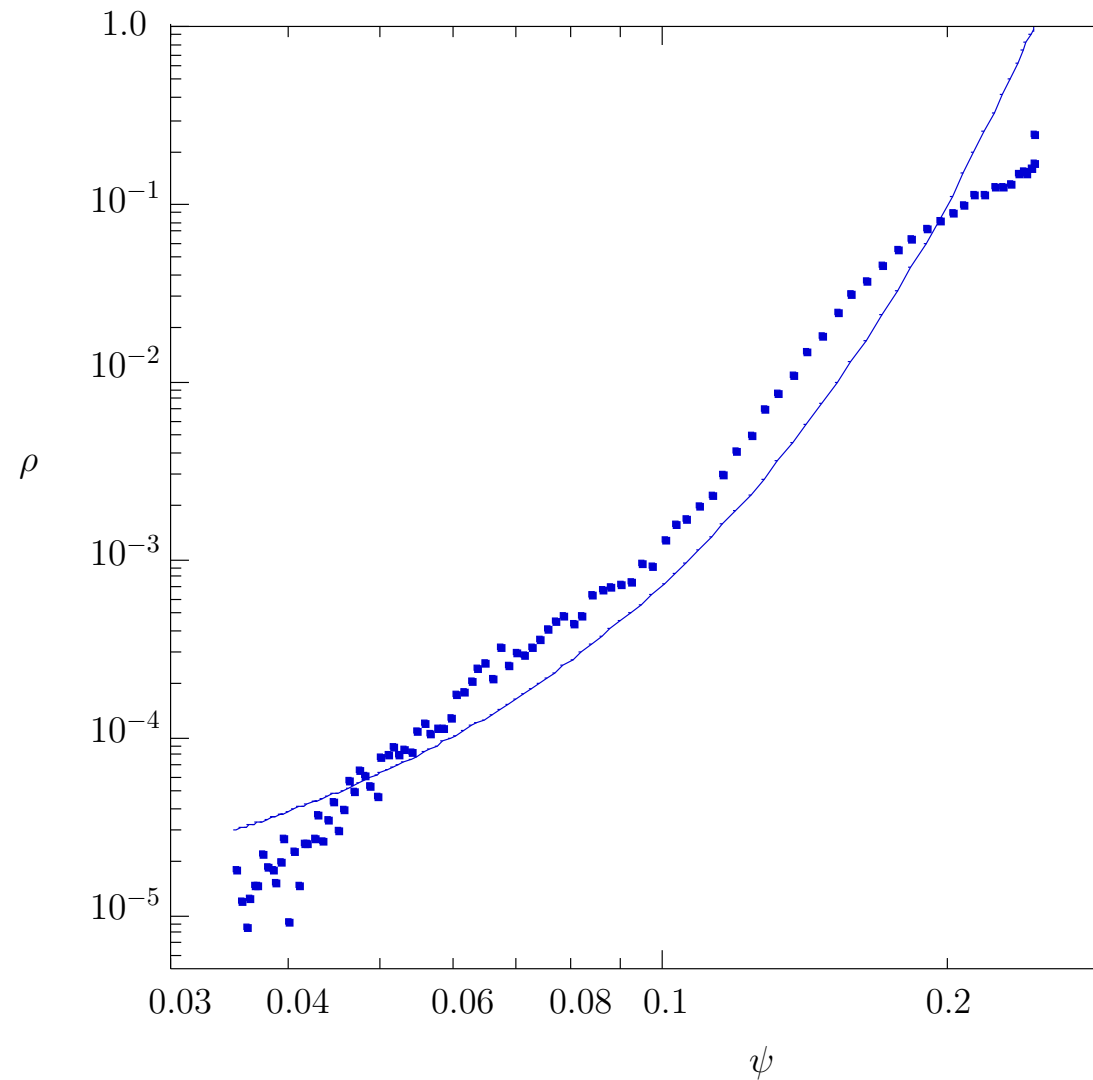
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

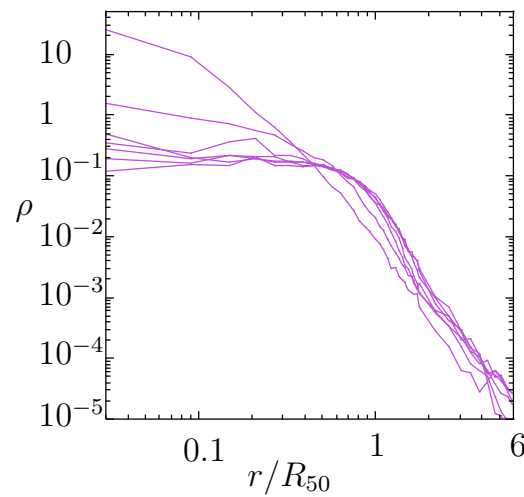
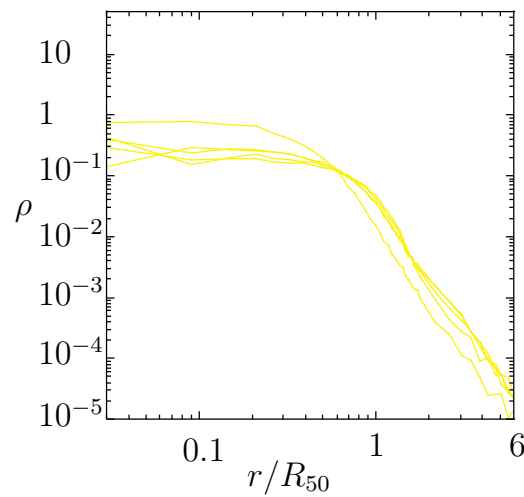
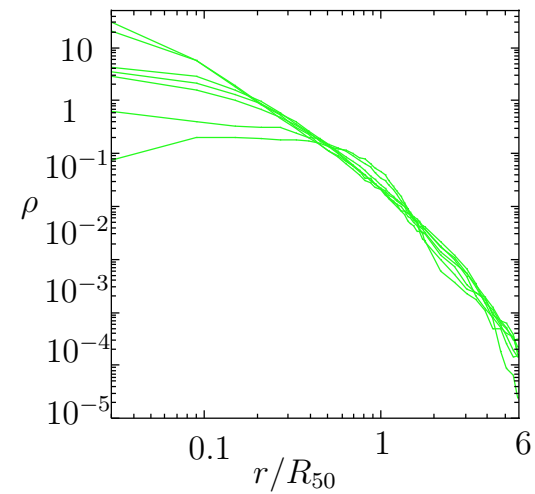
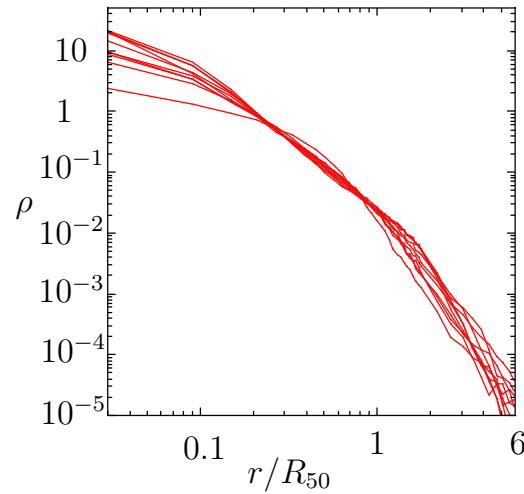
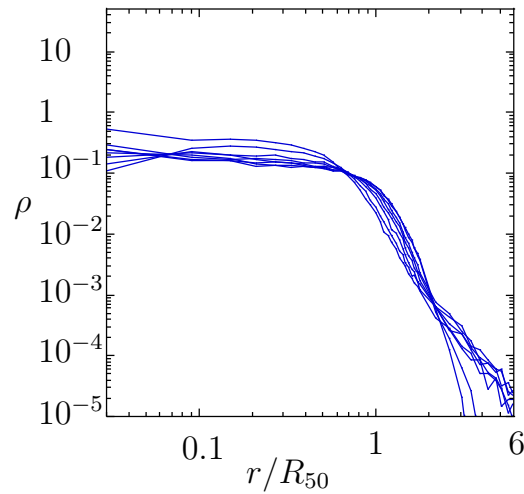
- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

Conclusion





Densités finales





Ségrégation de taille

Problème étudié

Modélisation

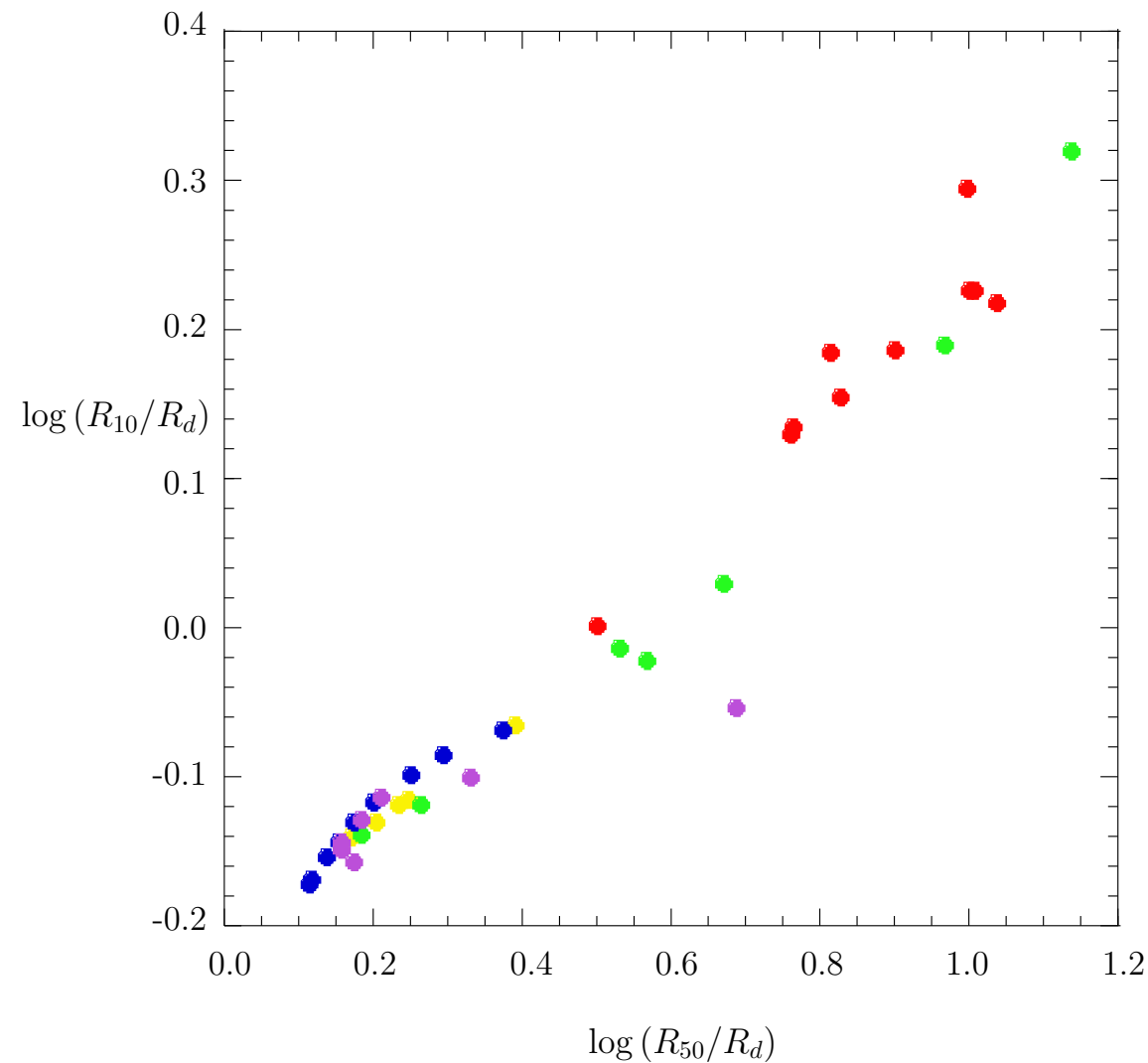
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

Conclusion





Ségrégation de taille

Problème étudié

Modélisation

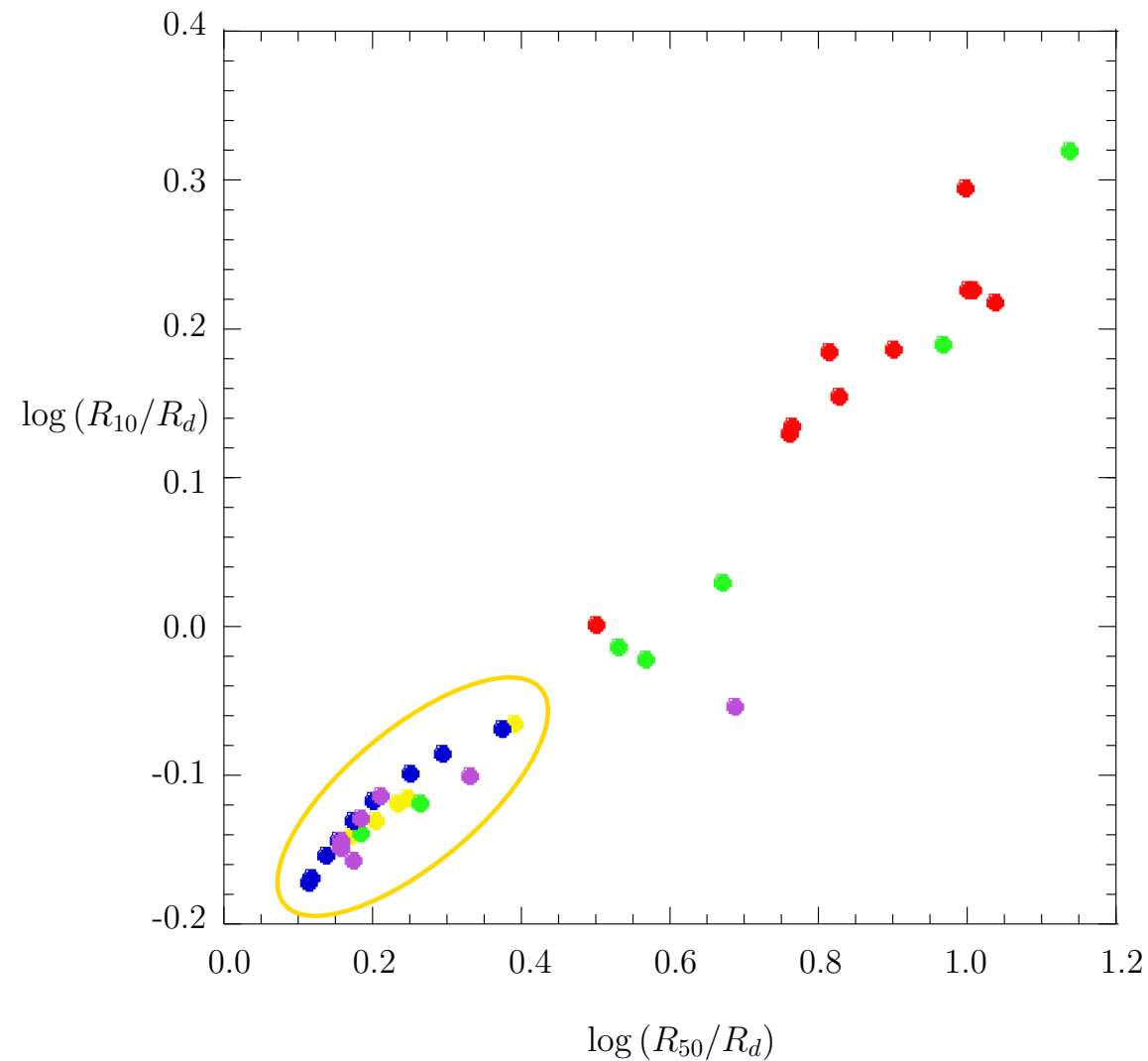
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

Conclusion





Ségrégation de taille

Problème étudié

Modélisation

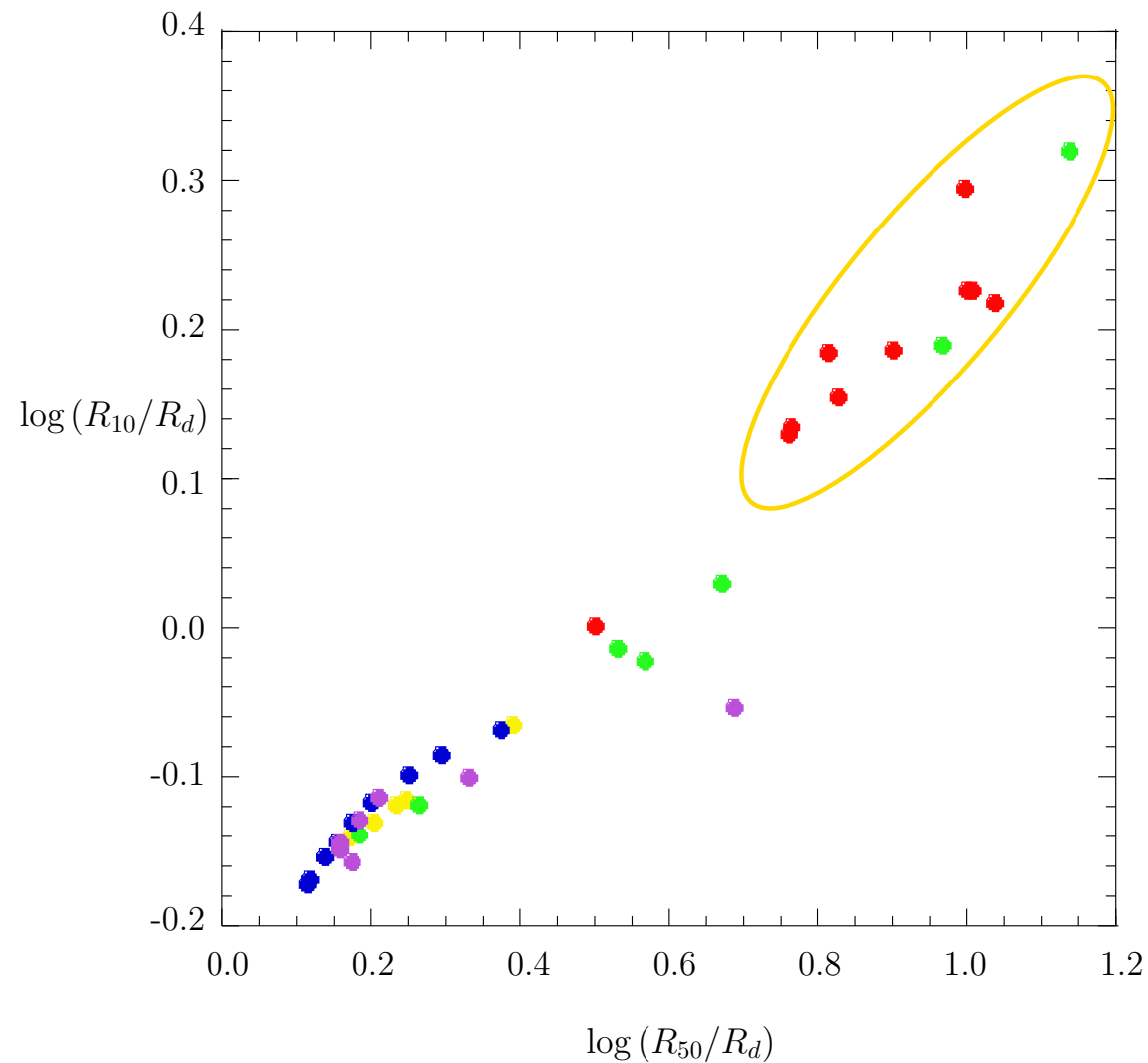
Outils numériques

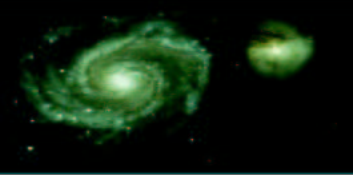
Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

Conclusion





Ségrégation de taille

Problème étudié

Modélisation

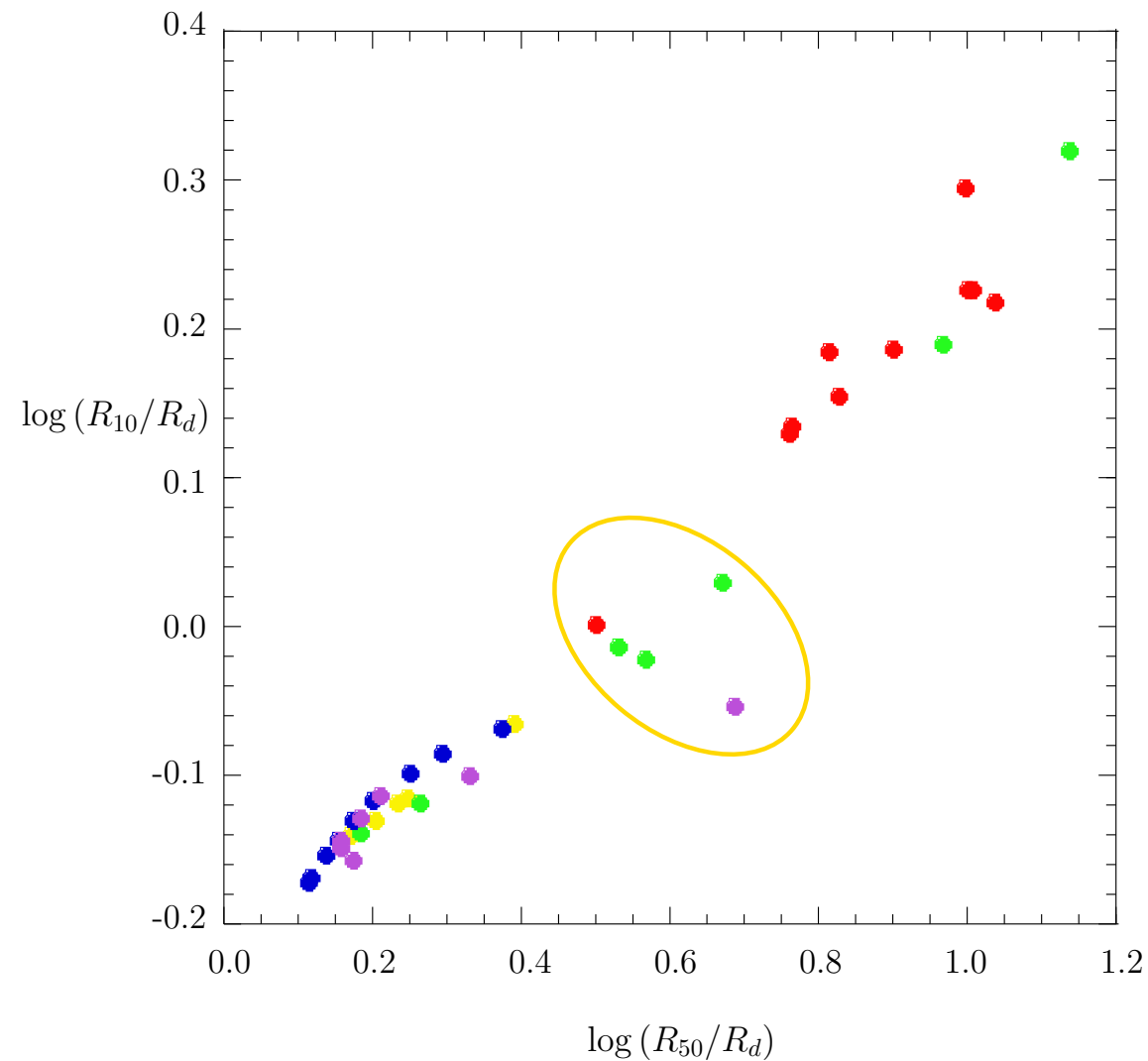
Outils numériques

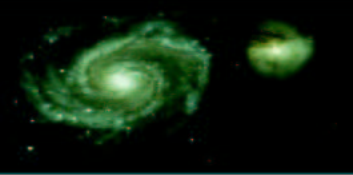
Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

Conclusion





Énergie température

Problème étudié

Modélisation

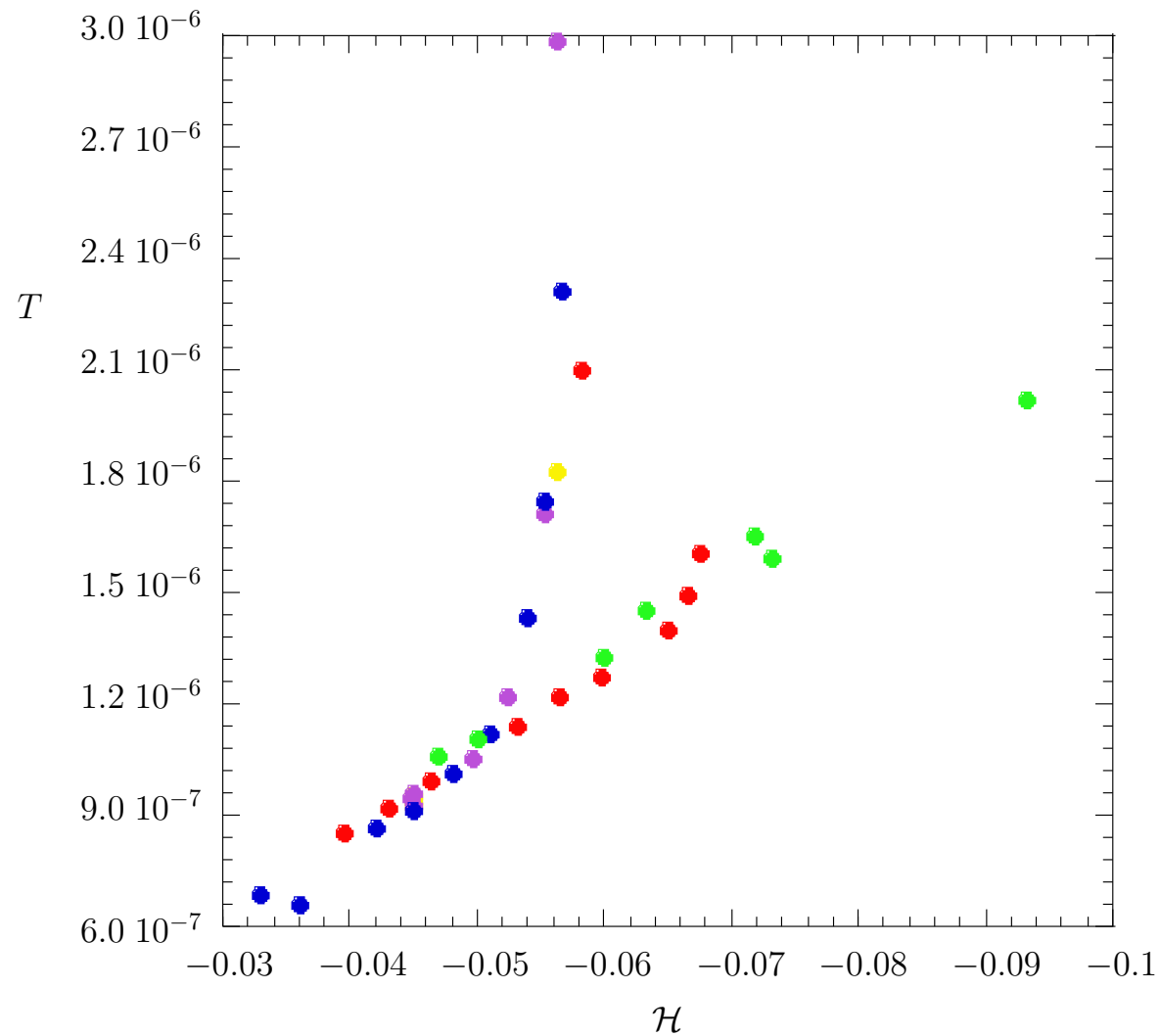
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

Conclusion





Énergie température

Problème étudié

Modélisation

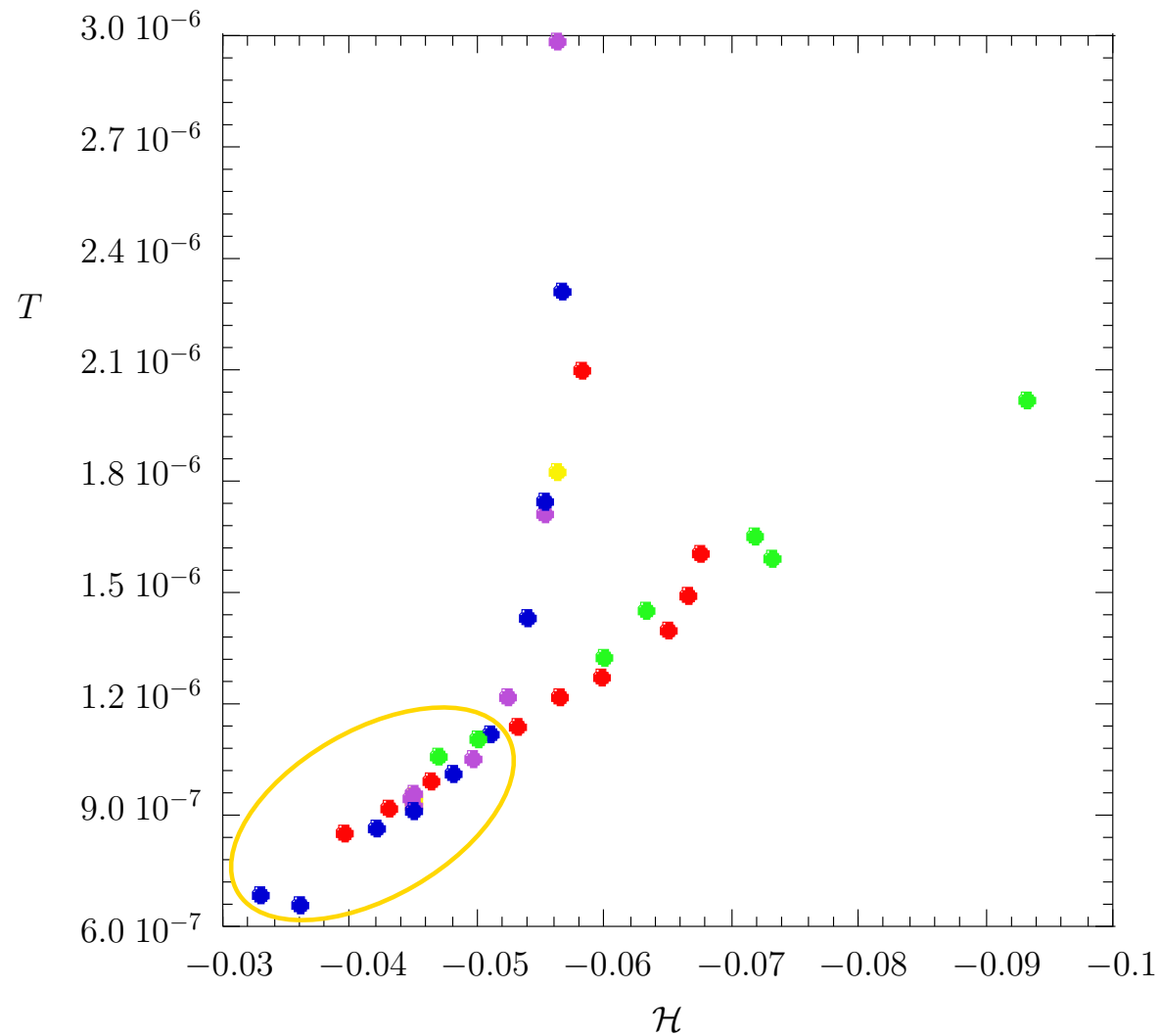
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

Conclusion





Énergie température

Problème étudié

Modélisation

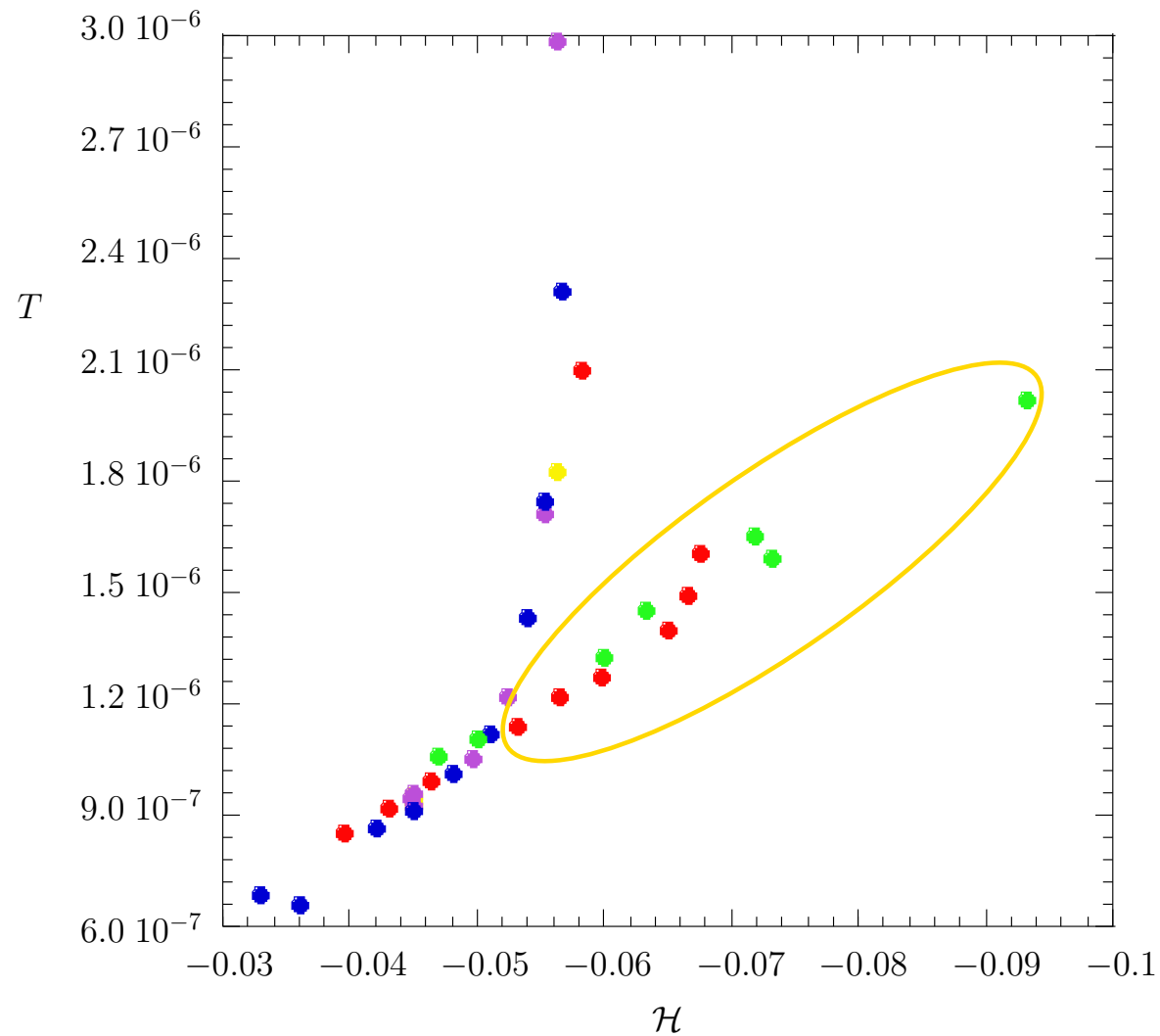
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

Conclusion





Énergie température

Problème étudié

Modélisation

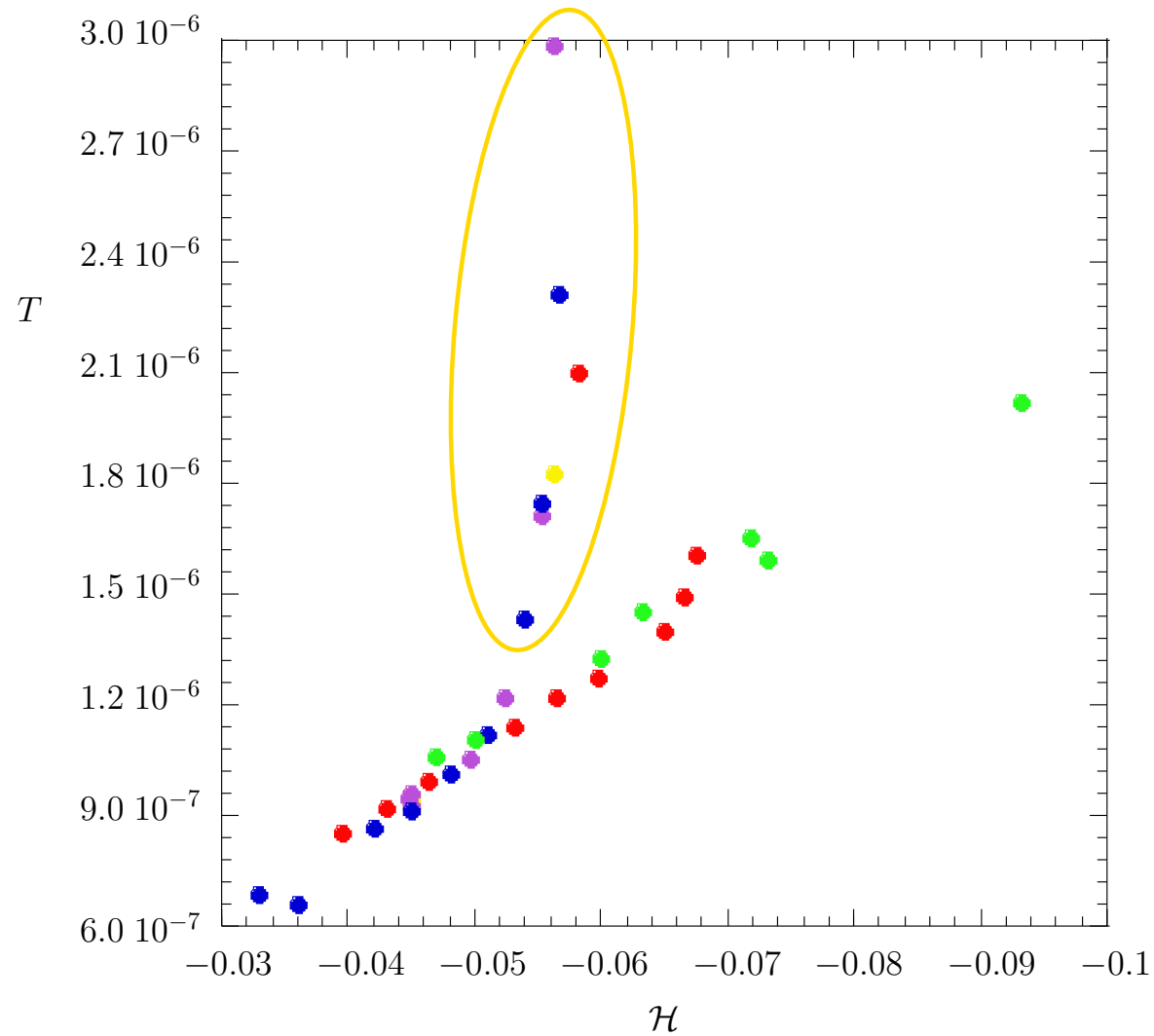
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

Conclusion





Énergie température

Problème étudié

Modélisation

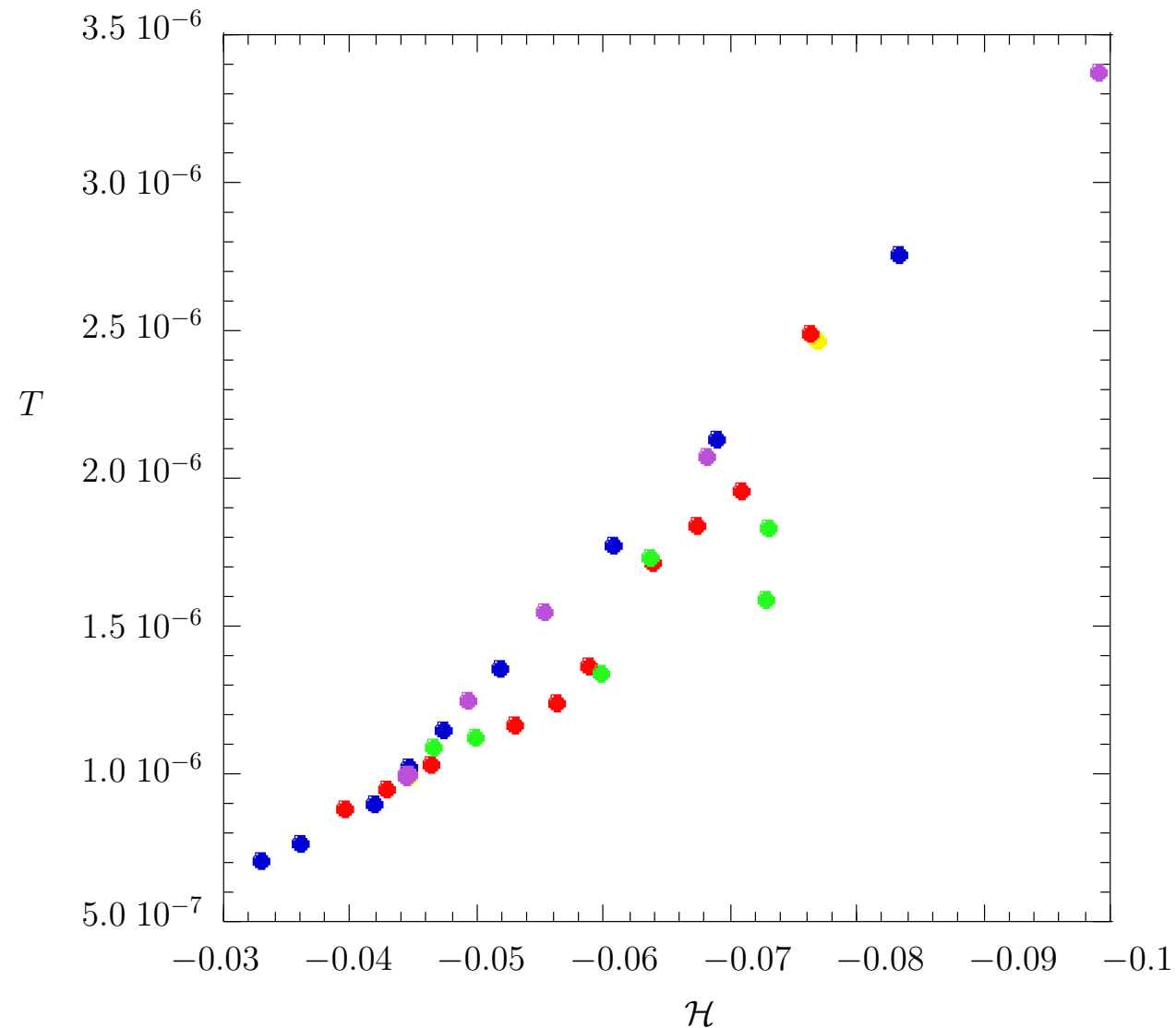
Outils numériques

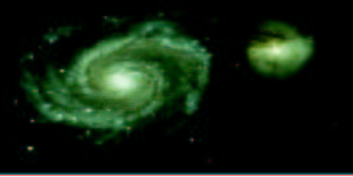
Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

- Effondrement
- Etude préliminaire
- Etude préliminaire (II)
- Géométrie du système final (I)
- Géométrie du système final (II)
- Ajustement par un polytrophe
- Ajustement sphère isotherme
- Exemple d'ajustement
- Densités finales
- Ségrégation de taille
- Énergie température
- Énergie température

Conclusion





Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

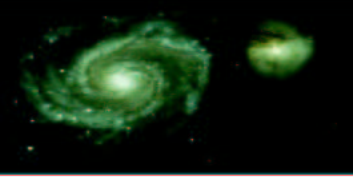
Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

- Interprétations numériques
- Interprétations physiques
- Conclusion

Conclusion



Interprétations numériques

Problème étudié

Modélisation

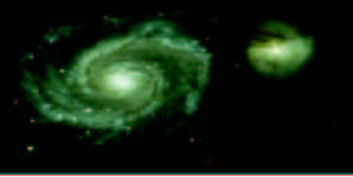
Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

- Interprétations numériques
- Interprétations physiques
- Conclusion



Interprétations numériques

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

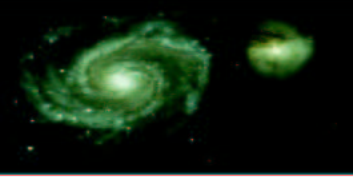
Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

- Interprétations numériques
- Interprétations physiques
- Conclusion

- $N = 30000$ particules : nécessaire et suffisant



Interprétations numériques

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

- Interprétations numériques
- Interprétations physiques
- Conclusion

- $N = 30000$ particules : nécessaire et suffisant
- État d'équilibre atteint pour chaque simulation



Interprétations numériques

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

- Interprétations numériques
- Interprétations physiques
- Conclusion

- $N = 30000$ particules : nécessaire et suffisant
- État d'équilibre atteint pour chaque simulation
- $\Delta t / \varepsilon$ doit être limité



Interprétations physiques

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

- Interprétations numériques
- Interprétations physiques
- Conclusion

	homogène	inhomogène
chaud		
froid		



Interprétations physiques

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

- Interprétations numériques
- Interprétations physiques
- Conclusion

	homogène	inhomogène
chaud	sphérique cœur-halo température élevée	
froid		



Interprétations physiques

- Problème étudié
- Modélisation
- Outils numériques
- Expériences d'effondrement - Roy & Perez, MNRAS, 2004
- Résultats
- Conclusion
 - Interprétations numériques
 - Interprétations physiques
 - Conclusion

	homogène	inhomogène
chaud	sphérique cœur-halo température élevée	sphérique cœur effondré température basse
froid		



Interprétations physiques

- Problème étudié
- Modélisation
- Outils numériques
- Expériences d'effondrement - Roy & Perez, MNRAS, 2004
- Résultats
- Conclusion
 - Interprétations numériques
 - Interprétations physiques
 - Conclusion

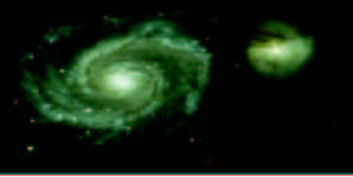
	homogène	inhomogène
chaud	sphérique cœur-halo température élevée	sphérique cœur effondré température basse
froid	sphérique cœur-halo température basse	



Interprétations physiques

- Problème étudié
- Modélisation
- Outils numériques
- Expériences d'effondrement - Roy & Perez, MNRAS, 2004
- Résultats
- Conclusion
 - Interprétations numériques
 - Interprétations physiques
 - Conclusion

	homogène	inhomogène
chaud	sphérique cœur-halo température élevée	sphérique cœur effondré température moyenne
froid	sphérique cœur-halo température basse	non sphérique cœur effondré température basse



Conclusion

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

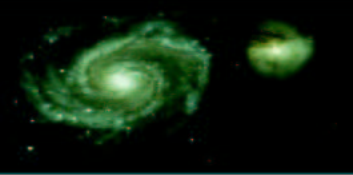
Résultats

Conclusion

● Interprétations numériques

● Interprétations physiques

● Conclusion



Conclusion

Conditions initialement homogènes

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

- Interprétations numériques
- **Interprétations physiques**
- Conclusion



Conclusion

Conditions initialement homogènes (vraisemblable à petite échelle) :

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

- Interprétations numériques
- Interprétations physiques
- Conclusion



Conclusion

Conditions initialement homogènes (vraisemblable à petite échelle) :
formation de systèmes à structure cœur-halo

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

- Interprétations numériques
- Interprétations physiques
- Conclusion



Conclusion

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

- Interprétations numériques
- Interprétations physiques
- Conclusion

Conditions initialement homogènes (vraisemblable à petite échelle) :
formation de systèmes à structure cœur-halo
Amas globulaire présentent une structure cœur-halo (pas de cœur effondré)



Conclusion

Conditions initialement homogènes (vraisemblable à petite échelle) :

formation de systèmes à structure cœur-halo

Amas globulaire présentent une structure cœur-halo (pas de cœur effondré)



Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

● Interprétations numériques

● **Interprétations physiques**

● Conclusion



Conclusion

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

- Interprétations numériques
- Interprétations physiques
- Conclusion

Conditions initialement homogènes (vraisemblable à petite échelle) :

formation de systèmes à structure cœur-halo

Amas globulaire présentent une structure cœur-halo (pas de cœur effondré)

Conditions initialement inhomogène



Conclusion

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

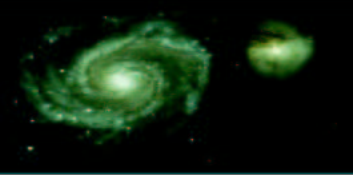
- Interprétations numériques
- Interprétations physiques
- Conclusion

Conditions initialement homogènes (vraisemblable à petite échelle) :

formation de systèmes à structure cœur-halo

Amas globulaire présentent une structure cœur-halo (pas de cœur effondré)

Conditions initialement inhomogène (grande échelle, scénario de formation hiérarchique) :



Conclusion

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

- Interprétations numériques
- Interprétations physiques
- Conclusion

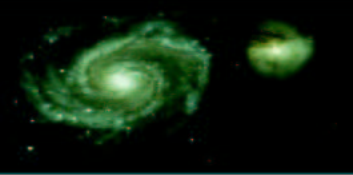
Conditions initialement homogènes (vraisemblable à petite échelle) :

formation de systèmes à structure cœur-halo

Amas globulaire présentent une structure cœur-halo (pas de cœur effondré)

Conditions initialement inhomogène (grande échelle, scénario de formation hiérarchique) :

formation de systèmes au cœur effondré et possiblement elliptique



Conclusion

Problème étudié

Modélisation

Outils numériques

Expériences d'effondrement -
Roy & Perez, MNRAS, 2004

Résultats

Conclusion

- Interprétations numériques
- Interprétations physiques
- Conclusion

Conditions initialement homogènes (vraisemblable à petite échelle) :

formation de systèmes à structure cœur-halo

Amas globulaire présentent une structure cœur-halo (pas de cœur effondré)

Conditions initialement inhomogène (grande échelle, scénario de formation hiérarchique) :

formation de systèmes au cœur effondré et possiblement elliptique

⇒ présence de trou noir au centre des galaxies elliptiques