

Résumé du sujet

Les étoiles se forment au sein de complexes atomiques et moléculaires géants dont la structure complexe et turbulente est encore mal comprise. On observe des structures de type fractal sur plus de quatre ordres de grandeur en taille, et les étoiles naissent de l'effondrement gravitationnel des régions les plus denses et froides du milieu interstellaire (MIS), lesquelles baignent dans un milieu beaucoup plus dilué et chaud. Or les temps caractéristiques de l'effondrement en chute libre impliqueraient des taux de formation stellaire beaucoup plus importants que ce qui est observé et épuiserait beaucoup trop vite le gaz disponible pour former de nouvelles étoiles. En réalité, cette estimation naïve ne tient pas compte de deux effets majeurs; le champ magnétique interstellaire, qui fournit une densité d'énergie à même de ralentir la formation stellaire, et surtout la turbulence injectée à grande échelle par les mouvements d'ensemble (rotation différentielle de la Galaxie) et à petite échelle par les événements violents locaux (supernovae).

Les nuages denses du MIS sont donc probablement des entités éphémères. Pourtant, alors même que de nombreuses problématiques dépendent du "temps de vie" des nuages (formation de l'hydrogène moléculaire, notamment), celui-ci est encore mal connu.

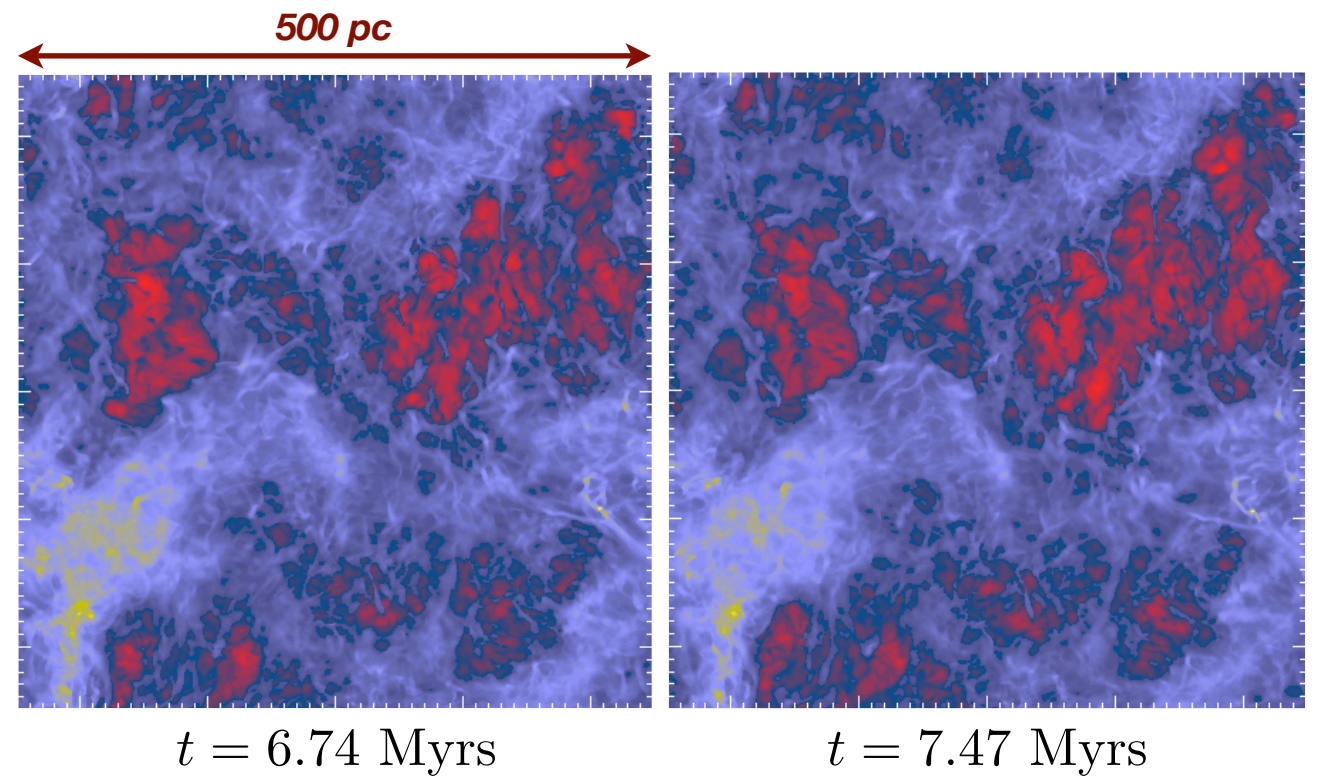
Le stage proposé vise à estimer ce temps de vie en utilisant des simulations numériques à grande échelle (de l'ordre de quelques dizaines de parsecs), et à étudier comment celui-ci varie fonction des différents processus physiques inclus dans le modèle et de leurs contributions respectives. On utilisera des simulations effectuées sur les calculateurs de l'IDRISS avec le code à maillage adaptatif RAMSES (Teyssier 2002, Fromang et al. 2006), incluant des particules traceuses advectées dans les écoulements. À chaque pas de temps, on peut extraire les régions connexes de densité supérieure à un seuil donné (qu'on appellera "clumps") à l'aide d'un algorithme de type "friend-of-friend". Les particules sont alors marquées comme faisant partie ou non de l'un de ces clumps, et l'on peut dans un premier temps vérifier le caractère lagrangien des trajectoires de ces particules en se fondant sur la corrélation attendue entre le nombre de particules dans un clump et la masse de celui-ci.

On commencera par étudier la fraction du temps passé par chaque particule dans des régions de densité donnée, c'est-à-dire sans identification d'une entité surdente d'un pas de temps à l'autre. Cela permettra par exemple d'obtenir une limite supérieure au temps disponible pour former les espèces moléculaires. Dans un deuxième temps, on procédera à l'identification des régions surdentes d'un instantané de la simulation (temps t) à l'autre (temps $t+N*dt$), en calculant pour chaque paire de clumps le pourcentage de particules qui passent de l'un à l'autre. On devrait ainsi obtenir une histoire complète des agrégations, fusions et divisions des régions surdentes. En particulier, en considérant uniquement les transferts majoritaires, on pourra en déduire une "lignée" de clumps en fonction du temps, et étudier, à partir de la population du clump au temps t , comment cette population initiale décroît au cours du temps. On pourra ainsi estimer un temps de cohérence des structures.

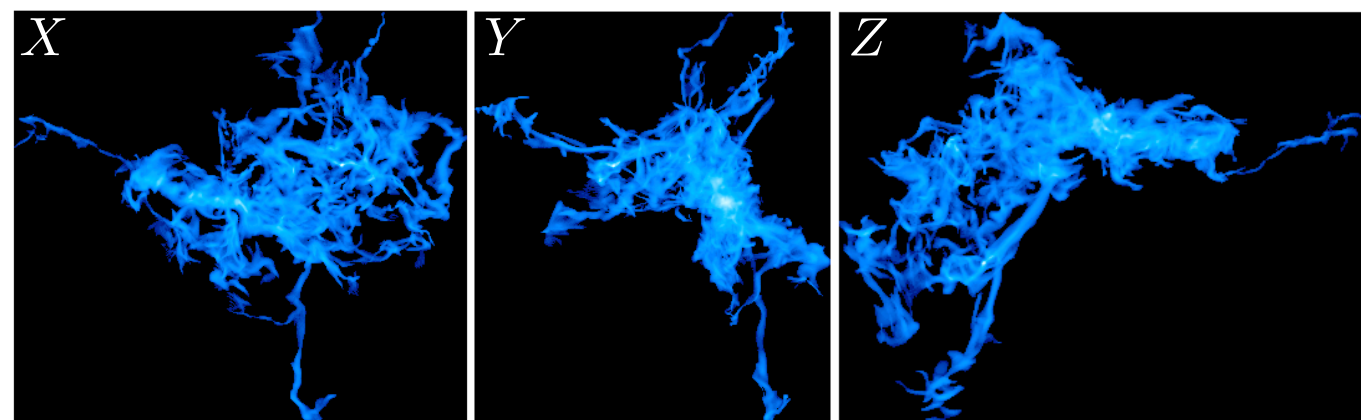
On prévoit qu'il faudra des simulations avec un pas de temps suffisamment court pour que l'identification soit possible, et on étudiera le cas de différents types de simulations : avec ou sans champ magnétique, avec ou sans autogravité (ce dernier cas devant servir de référence), isothermes ou biphasique en raison de l'instabilité thermique. On cherchera notamment à savoir si l'on peut établir un lien entre les temps de cohérence mesurés et les temps caractéristiques de la turbulence.

Le stage se déroulera à l'ENS Paris, au sein du laboratoire de radioastronomie (LRA), et sera supervisé par F. Levrier en collaboration avec P. Hennebelle et P. Lesaffre.

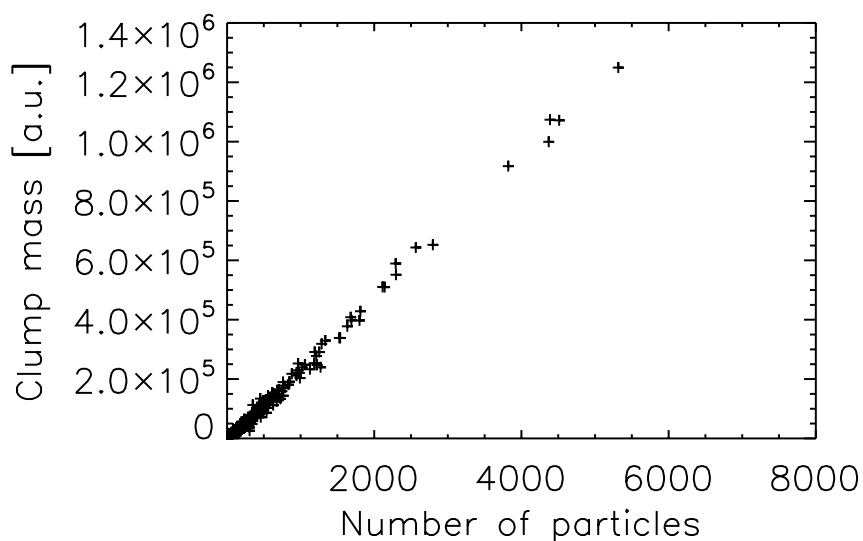
Le travail proposé est susceptible d'une poursuite en thèse.



1 : Densités de colonne d'une simulation hydrodynamique du milieu interstellaire à grande échelle. Cette simulation inclut les effets de l'auto-gravitation, mais pas du champ magnétique. On montre ici deux pas de temps à 6.74 Myrs (à gauche) et 7.47 Myrs (à droite). Le faible écart de temps entre les deux explique le peu de différences observées. Les densités de colonne maximales varient de $3.10^{23} \text{ cm}^{-2}$ à $5.10^{23} \text{ cm}^{-2}$ entre les deux pas de temps.



2 : Densités de colonne le long des axes du cube de simulation, pour le clump le plus peuplé (#6) isolé par l'algorithme "Friend-of friend" au temps 00020 (6.74 Myrs). On remarque la topologie extrêmement complexe des structures ainsi isolées.



3 : Corrélation entre la masse d'un clump (calculée à partir du champ de densité et présentée ici en unités arbitraires) et le nombre de particules présentes dans ce clump. La forte corrélation linéaire confirme le caractère lagrangien des trajectoires.

Total number of particles in clump 6 at time 00020 is 186270
[8.88205% of total] / [50.7427% of the 367087 particles in clumps at time 00020]
102391 [54.9691%] go into clumps at time 00021
-> 96119 [93.8745%] to clump 9

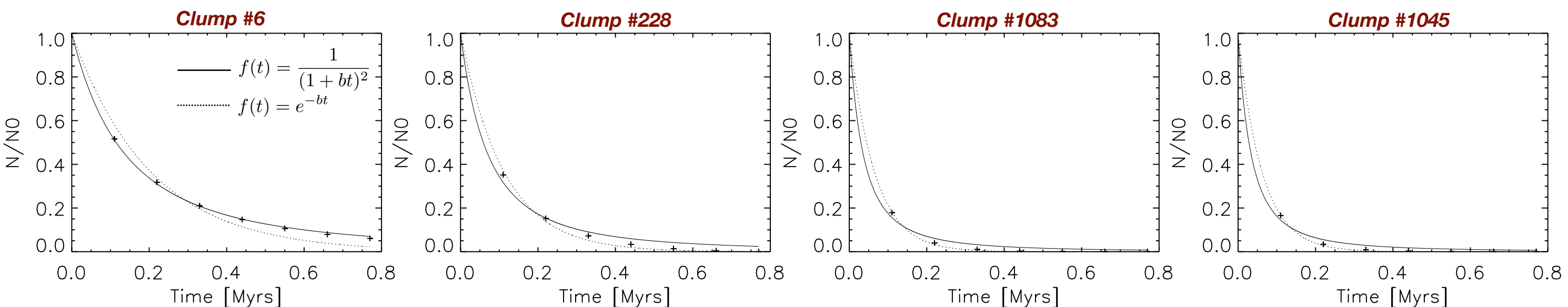
Total number of particles in clump 9 at time 00021 is 198782
[9.47866% of total] / [53.4222% of the 372096 particles in clumps at time 00021]
109048 [54.8581%] go into clumps at time 00022
-> 103335 [94.7610%] to clump 6

Total number of particles in clump 6 at time 00022 is 205499
[9.79896% of total] / [54.5186% of the 376934 particles in clumps at time 00022]
111692 [54.3516%] go into clumps at time 00023
-> 105280 [94.2592%] to clump 5

Lignée du clump 6 au temps 6.74 Myrs



4 : Résumé des populations de quelques clumps aux pas de temps considérés (6.74 à 7.06 Myrs ici). On voit par exemple que le clump #6 au temps 00020 (6.74 Myrs) contient la majorité des particules dans les régions surdenses à cet instant, qu'environ la moitié de celles-ci se retrouvent dans des clumps au pas de temps suivant, dont l'immense majorité dans le clump #9. Ceci permet l'identification du clump #6 au temps 00020 (6.74 Myrs) avec le clump #9 au temps 00021 (6.85 Myrs). On en tire la lignée du clump en question.



5 : Déclins des populations initiales de différents "clumps" identifiés au temps 00020 (6.74 Myrs). L'identification des clumps aux temps ultérieurs permet de tracer (croix) la fraction des particules initialement présentes et qui restent dans le même clump au cours du temps. Les courbes en trait plein et en pointillés représentent des ajustements par deux fonctions de formes différentes. Les temps de cohérence ainsi calculés sont de l'ordre de moins de 10^5 ans, ce qui suggère que les nuages interstellaires sont des structures foncièrement éphémères.

