

Vers l'exascale : corrélations temporelles en turbulence astrophysique

Responsables de stage :

- Noé Brucy (Post-doctorant, CRAL) : noe.brucy@ens-lyon.fr
- Jérémy Fensch (Maître de Conférences, CRAL@ENS de Lyon) : jeremy.fensch@ens-lyon.fr

Lieu du stage: CRAL, École Normale Supérieure de Lyon, 46 allée d'Italie, Lyon

Durée : Format stage de M2 (4 à 6 mois, selon le parcours de Master)

Gratification acquise et ouverture éventuelle vers un sujet de thèse.

Résumé du travail demandé:

La formation d'étoiles dans le milieu interstellaire est gouvernée par la turbulence dans les nuages moléculaires : son amplitude (le Mach) mais aussi sa statistique (par exemple sa compressibilité ou son spectre de puissance).

Dans les simulations de l'état de l'art, la turbulence est injectée par un processus stochastique *ad hoc*, une force aléatoire qui remue le gaz dans la boîte de simulation à grande échelle inspirés de modèles mathématiques de la turbulence (processus Ornstein-Uhlenbeck, voir Figure 1). Cette méthode a permis de mieux comprendre la formation des étoiles et est notamment à l'origine des *prescriptions* de formation d'étoiles dans les simulations cosmologiques (e.g. Federrath & Klessen 2012). Or, de récentes études tendent à montrer que la statistique de la turbulence obtenue est biaisée par les propriétés du processus d'injection, i.e le forçage. Il est donc nécessaire de concevoir un forçage plus réaliste, qui reproduit mieux la cinétique du milieu interstellaire.

Dans ce stage, nous proposons d'implémenter un forçage innovant, qui permet de choisir un spectre de corrélation temporelle autre que celui du forçage classique, et d'étudier l'impact sur les statistiques de la turbulence et la formation d'étoiles en résultant.

Cette implémentation se fera dans le code multi-GPU SHAMROCK (voir Figure 2), seul code hydrodynamique multi-méthode (méthodes euleriennes adaptatives et lagrangiennes) qui a atteint le niveau exascale avec 84% en efficacité *weak scaling* sur 24000 GPUs de la machine Aurora du Argonne National Laboratory. Il s'agit d'un code écrit en C++20 et utilisant la librairie SYCL. Il s'agira d'implémenter:

- **une nouvelle méthode de forçage**, de façon efficace, sur GPU. Nous comparerons par exemple des méthodes de forçage dans l'espace réel (comme dans le code IDEFIX) ou dans l'espace de Fourier (comme dans le code RAMSES).

- **de nouvelles méthodes d'analyse *on-the-fly***. L'étude de la turbulence nécessite un bon échantillonnage temporel. Dans l'ère de l'exascale il n'est plus possible de faire cette analyse sur des dumps/outputs à cause du coût mémoire exorbitant. Il faudra donc implémenter *dans*

SHAMROCK, des méthodes statistiques qui calculeront les propriétés de la turbulence pendant que la simulation tourne, en particulier la densité de probabilité et le spectre de puissance des différents champs. Ces analyses étant non locales, cette partie demandera la conception d'un algorithme parallèle efficace et potentiellement asynchrone qui s'insère dans le schéma de communication de SHAMROCK.

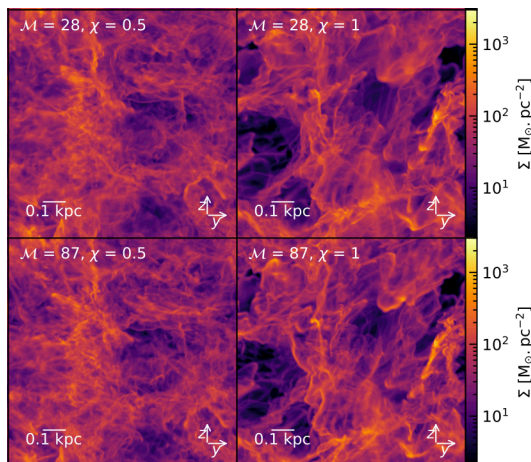


Fig. 1 : cartes de densité d'une boîte turbulente, avec des nombres de Mach $\mathcal{M}$ et une compressibilité χ croissante (Brucy et al., 2024)

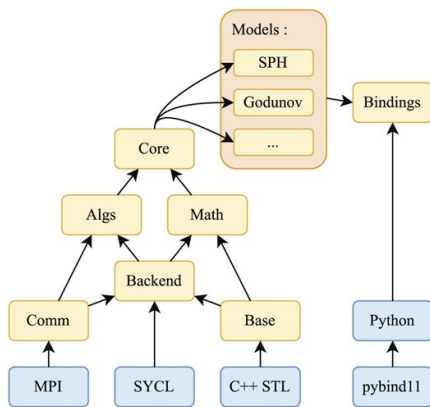


Fig. 2: Structure interne de SHAMROCK: sa conception modulaire permet de séparer les aspects matériels (interaction avec les CPU/GPU), les aspects algorithmiques (gestion de la grille de calcul, recherche de voisins) et les modules physiques (David—Cléris et al., 2025).

Si le temps le permet, nous souhaitons aussi intégrer le calcul de coefficients des transformées en ondelettes de diffusion, développées au laboratoire de physique de l'ENS, qui permettent de faire des reconstructions *a posteriori* des simulations de turbulence.

Le stage est ambitieux à la fois sur le plan du calcul HPC et de l'astrophysique. Il aura lieu dans l'équipe AstroENS, située sur le campus de l'ENS de Lyon (46, allée d'Italie 69007 Lyon). Plusieurs membres de l'équipe travaillent actuellement sur le code SHAMROCK, et nous accueillerons plusieurs stagiaires sur ce code pendant l'été.

Pour candidater, merci d'envoyer votre CV à noe.brucy@ens-lyon.fr et jeremy.fensch@ens-lyon.fr, avec une courte motivation dans le corps de l'email, avant le 4 novembre 2026.

Références d'intérêt:

- Le code SHAMROCK : <https://github.com/Shamrock-code/Shamrock>
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2025MNRAS.539....1D/abstract>
- Impacts de la turbulence sur la formation d'étoiles :
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024A%26A...690A..44B/abstract>
- Impacts du temps de corrélation du forçage sur les propriétés de la turbulence :
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2025ApJ...987..122G/abstract>