CENTRE DE RECHERCHE ASTROPHYSIQUE DE LYON

Centre de Recherche Astrophysique de Lyon
UMR 5574

Proposition de stage de Master 2 Recherche
Année académique 2026 – 2027

Responsable de stage : Benoît Commerçon

@ : benoit.commercon@ens-lyon.fr ☎ : 0472728917

Adresse/Lieu du Stage : CRAL - site Jacques Monod : 46 allée d'Italie, Lyon

Équipe de recherche d'accueil : Equipe AstroENS

Intitulé du stage : MHD idéale par transport contraint dans le module AMR de SHAMROCK

Résumé du travail demandé :

Le champ magnétique joue un rôle central dans de nombreux systèmes astrophysiques : formation stellaire, disques protoplanétaires, transport de moment cinétique par instabilité magnéto-rotationnelle, jets et milieu interstellaire. La magnétohydrodynamique (MHD) idéale en est le modèle de base, et sa simulation numérique sur des échelles très contrastées exige à la fois du raffinement adaptatif de maillage (AMR) et des machines massivement parallèles.

SHAMROCK est un code d'hydrodynamique astrophysique conçu pour les architectures exascale. Écrit en C++ moderne avec SYCL, il s'exécute de façon portable sur CPU et GPU de différents constructeurs. Il propose un solveur SPH (particules) et un module AMR en volumes finis de type Godunov, construit sur un arbre de patchs distribués.

Le module AMR ne dispose pas encore de la MHD. La difficulté principale est de préserver la contrainte $\nabla \cdot B = 0$: une divergence non nulle produit des forces non physiques et des instabilités. La méthode du transport contraint (CT) garantit cette contrainte à la précision machine en stockant le champ magnétique sur les faces des cellules et en le mettant à jour par les champs électriques aux arêtes. Elle est la référence dans des codes comme RAMSES, Athena++ ou PLUTO.

En AMR, le transport contraint impose en plus des opérateurs de prolongation et de restriction qui conservent la divergence nulle, ainsi qu'une correction des champs électriques aux interfaces entre niveaux de raffinement.

Objectifs du stage

L'objectif est d'implémenter un solveur de MHD idéale par transport contraint dans le module AMR de SHAMROCK, validé sur des tests standards et exécutable sur GPU.

- Introduire le champ magnétique centré aux faces dans les structures de données du module AMR.
- Implémenter un solveur de Riemann MHD (HLL puis HLLD) et une reconstruction d'ordre 2 de type MUSCL.
- Implémenter le calcul des champs électriques aux arêtes et la mise à jour par transport contraint, d'abord sur grille uniforme.
- Étendre la méthode aux niveaux de raffinement : prolongation et restriction à divergence nulle, synchronisation des champs électriques aux interfaces grossier/fin.

- Valider le solveur et mesurer ses performances sur GPU.

Profil recherché

- M2 de physique numérique, mécanique des fluides, mathématiques appliquées ou calcul scientifique, astrophysique.
- Bonnes bases en méthodes numériques pour les EDP, idéalement en volumes finis et solveurs de Riemann.
- Pratique du C++ indispensable; une expérience de la programmation GPU (SYCL, CUDA, Kokkos) est un plus, non un prérequis.
- Goût pour le développement logiciel rigoureux : git, tests, revue de code.
- Intérêt pour le calcul haute performance et la dynamique des fluides.

Candidature

Envoyer un CV, une lettre de motivation et les relevés de notes de M1 et M2 à benoit.commercon@ens-lyon.fr. Les candidatures sont examinées au fil de l'eau jusqu'à ce que le poste soit pourvu. Une poursuite en thèse pourra être discutée selon les financements disponibles.

Références

Transport contraint dans le code RAMSES

Teyssier, Fromang & Dormy (2006), *J. Comput. Phys.* 218, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2006JCoPh.218...44T/abstract

Fromang, Hennebelle & Teyssier (2006), *A&A*, 457, 371, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2006A%26A...457..371F/abstract

Code SHAMROCK

https://shamrock-code.github.io/

Type de financement envisagé pour le stage : ANR

Indication éventuelle d'ouverture vers un sujet de thèse : Oui

CENTRE DE RECHERCHE ASTROPHYSIQUE DE LYON

Centre de Recherche Astrophysique de Lyon
UMR 5574

Master 2 Research internship offer
Academic year 2026 – 2027

Internship supervisor: Benoît Commerçon

@ : benoit.commercon@ens-lyon.fr ☎ : **0472728917**

Address/Workplace: CRAL - site Jacques Monod : 46 allée d'Italie, Lyon

Hosting research team: AstroENS

Internship title: Ideal MHD with Constrained Transport in the AMR Module of SHAMROCK

Summary of the proposed work:

Magnetic fields play a central role in many astrophysical systems: star formation, protoplanetary discs, angular momentum transport through the magnetorotational instability, jets and the interstellar medium. Ideal magnetohydrodynamics (MHD) is the baseline model for these systems, and simulating it across widely different scales requires both adaptive mesh refinement (AMR) and massively parallel machines.

SHAMROCK is an astrophysical hydrodynamics code designed for exascale architectures. Written in modern C++ with SYCL, it runs portably on CPUs and GPUs from different vendors. It provides an SPH (particle) solver and a Godunov-type finite-volume AMR module built on a tree of distributed patches.

The AMR module does not yet support MHD. The main challenge is to preserve the $\nabla \cdot B = 0$ constraint: a non-zero divergence produces unphysical forces and instabilities. The constrained transport (CT) method guarantees this constraint to machine precision by storing the magnetic field on cell faces and updating it with the electric fields on cell edges. It is the standard approach in codes such as RAMSES, Athena++ and PLUTO.

In AMR, constrained transport also requires divergence-preserving prolongation and restriction operators, as well as a correction of the electric fields at the interfaces between refinement levels.

Internship objectives

The goal is to implement an ideal MHD solver based on constrained transport in the AMR module of SHAMROCK, validated on standard test problems and running on GPUs.

- Introduce the face-centred magnetic field into the data structures of the AMR module.
- Implement an MHD Riemann solver (HLL, then HLLD) and a second-order MUSCL-type reconstruction.
- Implement the computation of edge electric fields and the constrained transport update, first on a uniform grid.
- Extend the method to refinement levels: divergence-free prolongation and restriction, and synchronisation of electric fields at coarse/fine interfaces.
- Validate the solver and measure its performance on GPUs.

Candidate profile

- Master's student (M2) in computational physics, fluid mechanics, applied mathematics, scientific computing or astrophysics.
- Solid background in numerical methods for PDEs, ideally finite-volume methods and Riemann solvers.
- Experience with C++ is essential; experience with GPU programming (SYCL, CUDA, Kokkos) is a plus but not a requirement.
- Interest in rigorous software development: git, testing, code review.
- Interest in high-performance computing and fluid dynamics.

Application

Please send a CV, a cover letter and your M1 and M2 transcripts to benoit.commercon@ens-lyon.fr. Applications will be reviewed on a rolling basis until the position is filled. A follow-up PhD may be discussed, depending on available funding.

Nature of the financial support for the internship: ANR

Potential for a follow-up as a PhD thesis: Yes