



Intégrer l'Univers : Solveurs ODE Haute-Performance pour l'Astrophysique Numérique

Résumé

Stage de M2 sur la thématique de l'intégration de systèmes d'équations différentielles ordinaires (ODE) avec application à la cosmologie. L'un des objectifs est de rendre possible l'intégration de systèmes très grands et l'intégration de milliards de systèmes d'ODE sur des supercalculateurs exascale. Le projet est multiforme et peut donner lieu tant à de la recherche en informatique théorique, qu'en méthodes numériques, ou en astrophysique computationnelle suivant l'intérêt de la personne. Le sujet peut être adapté aux profils suivants : informatique, mathématiques appliquées, physique computationnelle, ou cosmologie. Aucune connaissance en astrophysique n'est nécessaire pour les profils maths-info. Pour les profils physique une forte appétence pour le numérique est demandée. Ouverture vers une thèse possible suivant le déroulement du stage.

Contexte

Même si l'intégration de systèmes d'équations différentielles ordinaires (ODE) est un sujet bien connu en méthodes numériques, elle demeure un domaine de recherche actif tant du point de vue théorique que de celui de l'implémentation et des applications. C'est par exemple le cas de l'astrophysique computationnelle qui est particulièrement demandeuse en matière d'intégration d'ODE haute-performance, depuis la simulation de formation de galaxies jusqu'au calcul des géodésiques en relativité générale. Aujourd'hui, dans la pratique, la plupart des codes de simulation reposent sur les mêmes bibliothèques logicielles séculaires ou réimplémentent encore et toujours les mêmes méthodes de Runge-Kutta. Mais alors que la cosmologie fait face à de nouveaux problèmes ouverts qui remettent en question notre compréhension de l'histoire de l'expansion de l'Univers, les besoins en simulation numérique augmentent pour tenter d'éclairer les phénomènes physiques à l'œuvre. Et avec ces besoins vient la nécessité de revisiter l'intégration d'ODE sous un jour nouveau.

Dans ce cadre, nous souhaitons jeter les bases solides d'une nouvelle génération de codes de calcul en combinant résultats théoriques, abstraction, transformation de programmes à la compilation, et techniques de programmation avancées pour la résolution d'ODEs. L'objectif à terme est de pouvoir intégrer en parallèle des milliards de systèmes d'équations en tirant parti de toutes les ressources matérielles disponibles sur supercalculateur tout en fournissant des garanties de précision, de stabilité, et de robustesse. Il s'agit d'un projet ambitieux qui touche à de très nombreux aspects de recherche en informatique : informatique théorique, méthodes numériques, mathématiques appliquées, compilation, optimisation, théorie des types, architecture logicielle, parallélisation, précision mixte, calcul haute performance, et physique computationnelle.

Du côté astrophysique, le besoin se fait de plus en plus pressant. En effet, le télescope de l'observatoire Vera Rubin installé au Chili a commencé à prendre les premières images du ciel, après deux décennies de conception et de fabrication. Pendant une période de 10 ans, il scrutera l'ensemble du ciel austral, avec l'objectif de réaliser un relevé, le LSST (Legacy Survey of Space and Time). Ce projet permettra de compiler un catalogue sans précédent, incluant 20 milliards de galaxies et un nombre mille fois plus élevé d'objets lumineux transitoires. Les données seront combinées à celle du télescope spatial Euclid de l'Agence Spatiale Européenne pour reconstruire la structure à grande échelle de l'Univers. L'analyse de ces catalogues et la prise en compte d'effets relativistes fins va demander, entre autres choses, l'intégration des équations d'Einstein et le calcul de milliards de géodésiques sur GPU. D'où la volonté de revisiter l'intégration numérique de systèmes d'ODE.

Sujet de stage de M2

En partant des recherches de John Butcher, le stage consistera à jeter les bases d'un intégrateur d'ODE universel couvrant, dans un premier temps, les méthodes de Runge-Kutta, les méthodes linéaires à pas multiples, et les méthodes linéaires généralisées. De là, nous nous poserons la question de la combinaison de méthodes pour mieux évaluer les erreurs numériques, ainsi que celle de la détermination de nouvelles méthodes à la compilation. Les méthodes numériques seront ensuite appliquées à la cosmologie numérique et plus spécifiquement au calcul du trajet de la lumière dans un espace-temps courbe. Suivant les intérêts de la personne, il sera ensuite possible d'explorer différentes pistes : une piste plus orientée méthodes numériques avec des

problématiques d'interpolation, une piste plus orientée HPC avec de l'optimisation, une piste orientée IA avec les Neural ODE, et une piste qui consistera à se concentrer sur la cosmologie numérique.

Ouverture vers une thèse

Suivant le déroulement du stage, il pourra éventuellement déboucher sur une thèse en mathématiques appliquées, méthodes numériques, calcul haute performance, ou astrophysique numérique suivant les préférences de la personne. L'idée de la thèse sera de revisiter l'intégration d'équations différentielles ordinaires en y intégrant tous les progrès théoriques et numériques des vingt dernières années, et en proposant de nouvelles approches. À l'issue de la thèse, les codes développés devraient permettre d'intégrer des milliards d'ODE en parallèle sur des supercalculateurs, avec un contrôle fin des erreurs numérique à la compilation. Il s'agira d'un sujet fortement interdisciplinaire à la croisée de plusieurs communautés : celle de la cosmologie d'abord avec l'équipe LSST au sein du Laboratoire d'Annecy de Physique des Particules, celle du calcul haute performance au travers de collaborations avec le Laboratoire Interdisciplinaire des Sciences du Numérique, celle des mathématiques avec le Laboratoire de Mathématiques de l'Université Savoie Mont Blanc, et celle du C++ au travers du comité de standardisation du langage.

Environnement scientifique

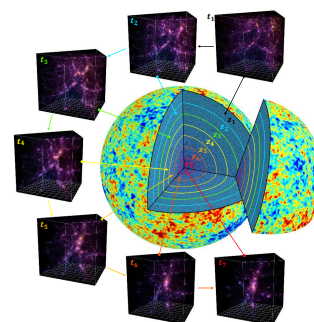
Vincent Reverdy est chercheur interdisciplinaire en informatique et en astrophysique numérique. Il fait également parti de la délégation française au comité de standardisation du C++. L'équipe d'accueil est l'équipe LSST du Laboratoire d'Annecy de Physique des Particules qui travaille sur les analyses cosmologiques des données de l'Observatoire Vera Rubin. Les expertises des membres de l'équipe s'étendent de l'instrumentation à la théorie en passant par l'analyse de données. Côté numérique, le laboratoire organise chaque année l'école Gray-Scott, l'une des plus grandes écoles d'été européenne sur le HPC. Cet environnement offrira un cadre favorable pour le ou la doctorante qui sera au contact d'une grande variété de sujets.

Financement de thèse

Le financement de thèse dépendra du déroulement du stage. Sur les aspects numériques, V. Reverdy a obtenu un financement de l'ANR. Des opportunités auprès de l'école doctorale locale sont également possibles.

Détails

- **Titre** : Intégrer l'Univers : Solveurs ODE Haute-Performance pour l'Astrophysique Numérique
- **Domaines** : Méthodes numériques, mathématiques appliquées, calcul haute performance et physique computationnelle
- **Type de stage** : Stage équivalent M2 Recherche
- **Durée du stage** : 4 mois (+ extension de 2 mois possible) entre mars et septembre 2026
- **Thèse proposée** : Oui
- **Financement de thèse** : ANR sur les aspects numériques + possibilité de financement à l'école doctorale locale
- **Lieu** : Laboratoire d'Annecy de Physique des Particules
- **Adresse** : 9 Chemin de Bellevue, 74940 Annecy, France
- **Équipe** : Cosmologie/LSST
- **Encadrant** : Vincent Reverdy, chercheur CNRS en informatique et astrophysique computationnelle



Simulation numérique de formation des grandes structures cosmiques de l'Univers. L'un des objectifs du stage sera de concevoir les intégrateurs numériques pour propager les photons dans de telles simulations.

Contact, questions et candidature

Par email, idéalement avant le **1er février** et au plus tard le **15 février** :

- **À envoyer à** : vincent.reverdy@lapp.in2p3.fr
- **Avec absolument comme objet de l'email** : STAGE ASTROINFO 2026 : Prénom Nom
- **Pièces nécessaires** : Curriculum Vitae + courte présentation dans l'email ou lettre de motivation
- **Optionnel** : un rapport de stage/projet d'une année précédente + notes de M1 + notes connues de M2