

# Sujet stage L3 ENS

## Transport optimal pour la cosmologie

Bruno Lévy - Centre Inria Nancy Grand-Est

1er Février 2023

### 1 Contexte

Notre équipe, constituée par des chercheurs en cosmologie, mathématique et informatique construit un nouvel outil pour étudier l'histoire de l'Univers.

*Quand on regarde les étoiles dans le ciel par une belle nuit d'été, on est pris d'un certain vertige, on est un peu désorienté, car les distances sont gigantesques. Mais qu'en est il du temps ? Est-ce que toutes ces étoiles - toutes ces galaxies - ont toujours été là ? Comment ont-elle bougé pour arriver là où elles sont aujourd'hui ? Est-il possible d'en savoir plus sur l'histoire de notre Univers ?*

Combiner les points de vues de trois disciplines permet d'apporter des éléments de réponse. Ces disciplines sont la cosmologie, branche de la physique qui s'intéresse à l'Univers et à son histoire, les mathématiques, qui fournissent un langage extrêmement puissant pour décrire et pour raisonner, et enfin l'informatique, véritable "baguette magique" qui donne vie aux formules mathématiques en permettant de les calculer dans un ordinateur pour simuler les lois de la physique.

Notre équipe de chercheurs, qui est constituée de Bruno Lévy (Directeur de recherche Inria), Roya Mohayaee (CNRS - Institut d'Astrophysique de Paris), Sebastian von Hausegger (Université d'Oxford), Farnik Nikakhtar (Université de Pennsylvanie) et Ravi Sheth (Université de Pennsylvanie), travaille depuis près d'une dizaine d'année à la réalisation d'une "machine à remonter le temps", qui permettra de reconstituer les trajectoires des galaxies, à partir de données d'observation, cartes 3D du cosmos construites grâce à des télescopes, jusqu'aux premiers âges de l'Univers, il y a 13.7 milliard d'années. Cet outil se fonde sur le "transport optimal", une théorie mathématique initiée par Gaspard Monge vers la révolution Française, et qui a connu de nombreux développements récents, grâce notamment aux travaux de mathématiciens tels que Yann Brenier, Cédric Villani, Alessio Figalli et beaucoup d'autres. Cette théorie, qui permet d'étudier

la manière de déplacer de la matière en faisant le moins d'effort possible, a des connexions profondes avec certains principes en physique, tels que le "principe de moindre action": il est bien connu que l'électricité prend toujours le chemin le plus court (c'est d'ailleurs comme cela que fonctionne un paratonnerre, en créant un chemin très court que la foudre préférera emprunter). De manière similaire, les galaxies suivent aussi un "chemin le plus court", mais cette fois dans l'espace *et dans le temps*, que la théorie du transport optimal permet de retrouver.

Notre équipe a mis au point l'outil et l'a soumis à un ensemble de tests. En particulier, nous avons évalué la capacité de la méthode à reconstruire à partir des données un certain signal caractéristique de phénomènes qui ont eu lieu pendant les 300 000 premières années de l'Univers, sortes d'"ondes sonores" qui se sont propagées dans le plasma originel (les "oscillations acoustiques des baryons" ou BAO). La trace de ces ondes est détectable dans le rayonnement qui a été émis à la fin de cette période, que l'on détecte aujourd'hui sous forme de micro-ondes (le fond de rayonnement cosmologique). La trace de ces ondes est également détectable dans la répartition actuelle des galaxies, mais sous une forme plus difficile à mesurer, brouillée par 13.7 milliards d'années d'évolution de l'Univers. Les premiers tests ont confirmé la capacité de la méthode à "débrouiller" ce profil d'onde, en faisant "remonter le temps à la matière".

Grace à ce nouvel outil, nous espérons peut-être un jour contribuer à lever le voile sur des questions qui restent ouvertes en cosmologie:

- En observant la vitesse de rotation des étoiles autour des galaxies, Vera Rubin a montré dans les années 1970 que celles-ci se déplaçaient beaucoup trop rapidement pour que les galaxies puissent rester stables. Mais la stabilité des galaxies pouvait être expliquée par la présence de (beaucoup de) matière en plus. Comme cette matière n'a jamais été détectée, les astrophysiciens lui ont donné le nom de "matière noire". Elle n'a toujours pas été détectée à l'heure actuelle, mais sa présence semble confirmée par de nombreuses autres observations (effets de lentille gravitationnelle, hétérogénéités du fond de rayonnement cosmologique...).
- d'autre part, vers la fin des années 1990, en mesurant la distance de certaines étoiles (supernovae de type Ia) Perlmutter et Riess ont observé que l'expansion de l'Univers avait accéléré pendant les derniers milliards d'années. Pour faire coller leurs modèles à la réalité, les astrophysiciens ont "rescuscité" un bout de l'équation de la relativité d'Einstein, que celui-ci avait écarté (la constante cosmologique), mais on ignore encore la source de cette accélération (qui a été nommée "énergie sombre", sans que l'on en connaisse la nature).

En analysant les cartes 3D de l'Univers construites à l'aide de télescopes, l'outil que nous avons développé permettra de mettre à l'épreuve plusieurs modèles mathématiques différents pour la matière noire et pour l'énergie noire,

et de déterminer lesquels de ces modèles semblent le mieux décrire la réalité. Mais avant cela, nous devons encore surmonter différents obstacles, tels que celui de la taille des données: le plus grand calcul que nous avons réalisé impliquait 300 millions de points. Pour une précision suffisante, il va falloir dépasser le milliard de points, ce qui va nécessiter l'utilisation d'un ordinateur plus grand, et surtout, le développement de nouveaux algorithmes. D'autre part, les données d'observation ne sont pas exhaustives: il faut être capable de prendre en compte le fait qu'une certaine proportion des galaxies ne sont pas observées, sans parler de la matière noire qui échappe à toute détection directe ! La méthode doit donc être capable de prendre en compte la matière qui n'a pas été observée, ce qui semble être confirmé par les premiers tests que nous avons réalisés.

## 2 Stage et Travail à réaliser

Le stage aura lieu au Centre Inria Nancy Grand-Est. Le sujet concerne la mise au point d'un nouvel algorithme de calcul du transport optimal semi-discret, pouvant passer à l'échelle pour de très grands volumes de données (milliards de points). Calculer numériquement le transport optimal revient à résoudre un problème d'optimisation sous contraintes. Dans le cas du transport optimal semi-discret, évaluer la fonction objectif, ses dérivées premières et secondes, nécessite de calculer une structure géométrique particulière (diagramme de Laguerre, également appelé diagramme de puissance), classique en géométrie algorithmique. Afin de passer à l'échelle pour des problèmes de très grande taille, l'objectif de ce stage est d'étudier des algorithmes alternatifs, et en se fondant sur leur propriétés, de donner des éléments permettant d'envisager l'écriture d'un nouveau code passant à l'échelle.

1. Etude de la bibliographie concernant la théorie du transport optimal en général et la reconstruction cosmologique;
2. Etude de la configuration particulière du transport optimal (semi-discret) et de l'algorithmique associée;
3. En étudiant les propriétés géométrique de la partition de l'espace associée au transport semi-discret (diagramme de Laguerre), proposition d'un nouvel algorithme de calcul avec l'objectif de passage à l'échelle (milliards de points);
4. *Eventuellement*: Implantation d'un prototype et premières expérimentations.

## 3 Contact

- Bruno Lévy [Bruno.Levy@inria.fr](mailto:Bruno.Levy@inria.fr), DR Inria, Centre Inria Nancy Grand-Est
- Page web: <https://members.loria.fr/BLevy/>

## 4 Pour en savoir plus

- Nos articles de recherche en lien avec ce projet:
  - Physical Review Letters: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.128.201302>
  - Physical Review Letters: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.129.251101>
  - Physics Magazine: <https://physics.aps.org/articles/v15/75>
  - Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: <https://academic.oup.com/mnras/article/506/1/1165/6300452>
- Rapports sur arXiv
  - <https://arxiv.org/abs/2203.01868>
  - <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03413154>
  - <https://arxiv.org/abs/2012.09074>
- Video fête de la science: <https://www.youtube.com/watch?v=P27XV-VAkNw&t=384s>
- France Culture, JT, Est Républicain: voir la section “couverture presse” sur ma page web: <https://members.loria.fr/BLevy/>