

# Modélisation stochastique de l'évolution à temps long du système solaire

Eric Woillez<sup>1</sup> & Freddy Bouchet<sup>1</sup>

Univ Lyon, Ens de Lyon, Univ Claude Bernard, CNRS, Laboratoire de Physique, F-69342 Lyon, France  
eric.woillez@ens-lyon.fr

Un résultat majeur en mécanique céleste dans les dernières décennies est la découverte que le système solaire est chaotique, avec un temps de Lyapunov estimé numériquement à 10 millions d'années [1]. Ceci signifie en particulier qu'une indétermination de quelques mètres dans la position actuelle des planètes conduit à une incertitude totale de leur position sur des temps de l'ordre de l'âge du système solaire. Ce résultat induit un changement total de paradigme : il ne s'agit plus désormais de prédire les positions des planètes avec toujours plus de précision, en prenant en compte l'influence des phénomènes perturbatifs (phénomènes dissipatifs par exemple), ou les corrections relativistes, mais bien d'utiliser de nouveaux outils pour prédire l'état du système solaire à temps long de façon statistique. Cette exposé a pour but de donner un aperçu sur de récents travaux en mécanique céleste (2015-2017) où l'utilisation d'outils issus de la physique statistique a permis de progresser dans la description de la dynamique du système solaire.

Une intégration de plusieurs centaines de trajectoires de la dynamique séculaire du système solaire sur 5 milliards d'années, avec des conditions initiales proches, a permis de donner une estimation de la distribution à temps long des paramètres orbitaux des planètes. Une première approche théorique a été tentée consistant à prédire ces distributions de probabilités avec un échantillonnage microcanonique de l'espace des phases, en prenant en compte la conservation des intégrales premières du mouvement [3]. Je montrerai que cette technique rend compte d'une partie des résultats numériques, car elle permet de prédire la forme asymptotique des distributions, mais a aussi ses limites. L'intégration numérique révèle que la distribution de probabilité des paramètres orbitaux des planètes n'atteint pas un état stationnaire dans la durée des 5 milliards d'années considérée. De plus, la planète Mercure possède une dynamique particulière qui rend caduque ce type de description pour elle. Ceci montre qu'en mécanique céleste, il n'est pas possible de court-circuiter les détails de la dynamique par une hypothèse d'équiprobabilité sur l'espace des phases comme on le fait habituellement en physique statistique des systèmes à l'équilibre.

Je montrerai donc dans cet exposé qu'une autre approche possible consiste à utiliser la séparation d'échelles de temps entre la dynamique rapide des planètes et la dynamique lente de certains invariants adiabatiques. La séparation d'échelles de temps permet d'utiliser la technique de moyennisation stochastique pour décrire asymptotiquement la dynamique lente des invariants adiabatiques par une équation différentielle stochastique de type équation de Langevin. J'évoquerai deux phénomènes particuliers. Le premier est l'influence de la ceinture d'astéroïdes sur la dynamique de Mars [4]. On peut montrer que la trajectoire fortement chaotique des astéroïdes induit une dispersion des trajectoires de Mars sur un temps de l'ordre de 30 millions d'années. Je discuterai enfin un travail en cours sur la dynamique de Mercure, qui utilise cette même technique de moyennisation stochastique pour prédire la déstabilisation de l'orbite de la planète, et les éventuelles collisions avec Vénus qui peuvent en résulter.

## Références

1. J. LASKAR, A numerical experiment on the chaotic behaviour of the solar system, *Nature*, 338(6212) :237–238, mar 1989.
2. J. LASKAR, Chaotic diffusion in the solar system, *Icarus*, 196(1) :1–15, 2008.
3. F. MOGAVERO, Addressing the statistical mechanics of planet orbits in the solar system, *arXiv preprint arXiv :1703.09225*, 2017.
4. E. WOILLEZ AND F. BOUCHET, Long-term influence of asteroids on planet longitudes and chaotic dynamics of the solar system, *Astronomy & Astrophysics*, 607 :A62, 2017.