

Au-delà du chaos des mouvements planétaires grâce à la géologie

Dans l'introduction de son traité sur les probabilités de 1812, Pierre-Simon de Laplace envisageait la possibilité de modéliser l'univers entier en une seule équation (les lois de la gravitation). En utilisant uniquement la connaissance des conditions initiales actuelles, on pourrait alors retrouver tout le passé et prédire tout l'avenir. Henri Poincaré montra 80 ans plus tard les limites de cette approche en découvrant la possibilité de mouvements chaotiques, où une petite déviation des conditions initiales se traduit par une large déviation dans les prédictions.

Comme l'a montré Jacques Laskar en 1989, Le système solaire est chaotique, et le paradigme du déterminisme de Laplace ne s'y applique pas en pratique. La validité des solutions des modèles gravitationnels du système solaire ne peut s'étendre au-delà de 60 millions d'années (Ma), non seulement à cause des limitations inhérentes à la détermination des conditions et paramètres initiaux du modèle, mais plus fondamentalement à cause de la nature chaotique du système pour lequel les solutions proches divergent de façon exponentielle, multipliant les incertitudes par un facteur de 10 tous les 10 millions d'années.

En dépit des progrès accomplis récemment, la puissante contrainte imposée par le chaos signifie qu'il est impossible d'essayer de retracer l'histoire précise du système solaire à partir de la seule connaissance du présent.

Dans un article paru en mars dans PNAS ([Olsen et al, 2019](#)), une équipe internationale pluridisciplinaire incluant Jacques Laskar (IMCCE, Observatoire de Paris) montre comment l'analyse des données géologiques anciennes permet d'aller au-delà de l'horizon de prédictibilité du système solaire, et de retrouver son état il y a 200 Ma.

Selon la théorie de Milankovitch ([Milankovitch, 1941](#)), une partie des grands changements climatiques du passé est due aux variations de l'insolation à la surface de la Terre résultant des modifications de la forme de son orbite, modifications résultat des perturbations gravitationnelles des autres planètes. Ces variations peuvent être retrouvées dans les enregistrements stratigraphiques sur plusieurs millions d'années. La corrélation entre les données géologiques et les calculs de la mécanique céleste est suffisamment convaincante pour que depuis 2004, l'échelle de temps géologique du Néogène (0-23 Ma) est établie à partir des solutions astronomiques développées à l'IMCCE ([Laskar et al, 2004](#)). Depuis, un effort important est consacré à la prolongation de ces travaux pour étendre cette calibration astronomique sur des durées toujours plus importante. Dans ces travaux, la solution astronomique, donnée par le calcul, est utilisée pour calibrer les données géologiques, avec la limitation de 60 Ma imposée par le chaos.

Dans le travail qui vient d'être publié, la méthode est inversée, et les données géologiques sont utilisées pour contraindre la solution astronomique. Pour ce faire, il a fallu disposer d'une séquence stratigraphique exceptionnelle d'une très longue durée, s'étalant sur 25 Ma ([Olsen, 1986](#); [Olsen et al, 1996](#)). Ces séquences ont été acquises lors de deux programmes de forages continentaux effectués l'un dans le Bassin de Newark au sud-est de New York (USA), et l'autre, effectué plus récemment dans la "Petrified forest" au sein du plateau du Colorado. Les deux projets ont été coordonnés par Paul Olsen, du Lamont-Doherty Earth Observatory (Columbia University, USA).

La collaboration entre Paul Olsen et Jacques Laskar a démarré en juillet 1991 lors d'un colloque à Baltimore consacré aux enregistrements paléoclimatiques anciens. Paul Olsen voulait savoir si la prise en compte de l'évolution chaotique du système solaire, que venait de découvrir J. Laskar pourrait expliquer les valeurs anormales des très longues périodes qu'il retrouvait dans les enregistrements du Newark Basin datant de 200 Ma. La question de la nature des signaux dans les enregistrements stratigraphiques est souvent délicate, et des erreurs d'échelle de temps de plusieurs ordres de grandeur ont parfois été commises. Mais quelques années plus tard, lors d'une visite au Lamont Observatory, Jacques Laskar analyse directement les données obtenues par Paul Olsen, et trouve très convaincante la présence du signal à 405ka dans les données. Ce signal est fondamental, car cette composante, qui est la principale dans les variations de l'excentricité de la Terre, est relativement stable, et peut donc servir à établir une échelle de temps sur des périodes très anciennes ([Laskar et al, 2004](#)). Mais il subsistait beaucoup d'incertitudes dans la calibration temporelle

des données. C'est ce qui a motivé Paul Olsen à entreprendre avec ses collaborateurs un deuxième forage dans une zone très distincte, le Plateau du Colorado, mais couvrant une période similaire. L'analyse de ces données par des méthodes d'analyse de Fourier raffinées a permis de retrouver une partie des fréquences principales des mouvements de précession des orbites des planètes du système solaire. Si le mouvement du système solaire était régulier, la forme ces fréquences n'évolueraient pas au cours du temps, et on retrouverait les mêmes valeurs que les valeurs actuelles. Ce n'est pas le cas. La fréquence principale qui module l'excentricité de la Terre, qui fait intervenir les périodes de précession des orbites de la Terre et de Mars, passe d'une période de 2.4 Ma actuelle, à 1.7 Ma, la valeur observée il y a 200 Ma. Ceci est aussi une preuve géologique du mouvement chaotique du système solaire.

Ces travaux ont fait l'objet d'un communiqué de presse du CNRS

(<http://www.cnrs.fr/fr/quand-la-geologie-revele-les-secrets-du-systeme-solaire-passe>).

References

- Laskar, J.; Robutel, P.; Joutel, F.; Gastineau, M.; Correia, A.C.M.; and Levrard, B., 2004: A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy and Astrophysics*, **428**(1):261–285. doi:[10.1051/0004-6361:20041335](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041335).
- Milankovitch, M., 1941: *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*. Spec. Acad. R. Serbe, Belgrade.
- Olsen, P., 1986: A 40-Million-Year Lake Record of Early Mesozoic Orbital Climatic Forcing. *Science*, **234**(4778):842–848. doi:[10.1126/science.234.4778.842](https://doi.org/10.1126/science.234.4778.842).
- Olsen, P.; Laskar, J.; Kent, D.V.; Kinney, S.; Reynolds, D.; Sha, J.; and Whiteside, J., 2019: Mapping chaos in the solar system with the geological orrery. *PNAS*.
- Olsen, P.E.; Kent, D.V.; Cornet, B.; Witte, W.K.; and Schlichte, R.W., 1996: High-resolution stratigraphy of the Newark rift basin (early Mesozoic, eastern North America). *Geological Society of America Bulletin*, **108**(1):40–77. doi:[10.1130/0016-7606\(1996\)108<0040:HRSOTN>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1996)108<0040:HRSOTN>2.3.CO;2).