

Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 53 (1995)
Heft: 269

Artikel: Le système solaire est-il chaotique?
Autor: Fischer, G.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-898746>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 08.02.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Le système solaire est-il chaotique?

G. FISCHER

Au cours des deux dernières décennies, les mathématiques ont fait de grands progrès sur plusieurs fronts nouveaux. On peut citer comme exemples la théorie des «fractals» et celle du «chaos». Dans les deux cas, ces progrès ont rapidement trouvé des applications à des processus auxquels on n'avait d'abord pas pensé. Chacun de nous a probablement vu l'une de ces images de kaléidoscope créées par fractals, où l'image, lorsqu'on l'agrandit, révèle des détails toujours plus fins et, dans certains exemples, toujours nouveaux. Le plus souvent, on introduit la notion des fractals en demandant quelle est la longueur d'un rivage de mer ou de lac. On se rend alors vite compte que cette question n'a pas de réponse univoque.

En mathématiques, la notion de chaos n'est pas forcément celle du désordre complet, celle de la foule désordonnée ou des molécules d'un gaz qui s'entrechoquent éternellement, où il serait illusoire de préciser la position de chaque personne ou molécule à tout instant. Le plus souvent, on veut simplement dire que le système n'est pas prévisible au-delà d'une certaine limite temporelle. Dans cet ordre d'idées on a pu lire, à plusieurs reprises récemment, que même le système solaire finira dans le chaos. Mais la notion de chaos sous-entendue n'est généralement pas précisée; il vaut donc la peine de voir s'il s'agit de prédictions alarmistes, dans le simple but de faire du sensationnalisme, ou si nous pouvons continuer de dormir en paix.

On ne connaît qu'imparfaitement le présent, le futur est donc encore plus aléatoire

Il est évident qu'à très longue échéance un certain désordre va s'installer dans le système solaire, mais cette affirmation n'a vraiment intérêt que si l'on donne une estimation du temps nécessaire à l'instauration du désordre. L'estimation de ce temps doit être abordée sous au moins trois aspects. Le premier ne concerne pas une perturbation complète du système, mais seulement un désaccord entre ce que nous pouvons prédire et l'état qui s'établira effectivement au bout d'un certain temps. C'est un temps qui découle tout naturellement des incertitudes qu'il y aura toujours dans notre connaissance des paramètres orbitaux de toutes les composantes d'un système. Cela revient à dire que, puisque nous ne connaissons pas parfaitement les conditions initiales, nous ne pouvons pas faire d'extrapolations parfaites, ni vers le futur, ni vers le passé. Ce temps, pour de petits écarts de prédiction, est au moins de l'ordre de 10 000 ans: en effet, nous sommes en mesure de reconstituer la succession des éclipses observées et enregistrées par nos prédécesseurs depuis plus de 5 000 ans. Les erreurs, sur cet intervalle, ne sont que d'environ une heure ou deux et pourraient, en réalité, provenir plutôt du deuxième effet (il vaut la peine de noter, ici, que 5 et 10 mille ans dans le passé correspondent assez exactement aux limites de l'ère néolithique). On peut donc affirmer que d'ici 10 000 ans, les incertitudes sur les conditions initiales engendreront au maximum des incertitudes de quelques heures sur les orbites planétaires et qu'elles ne nous feront pas perdre toute connaissance de l'évolution du système solaire avant plusieurs millions d'années. Même au bout de ce temps beaucoup plus long, les rayons des orbites des différentes planètes n'auront pratiquement pas changé et on ne pourra pas dire que le système est devenu totalement chaotique. Il faudra probable-

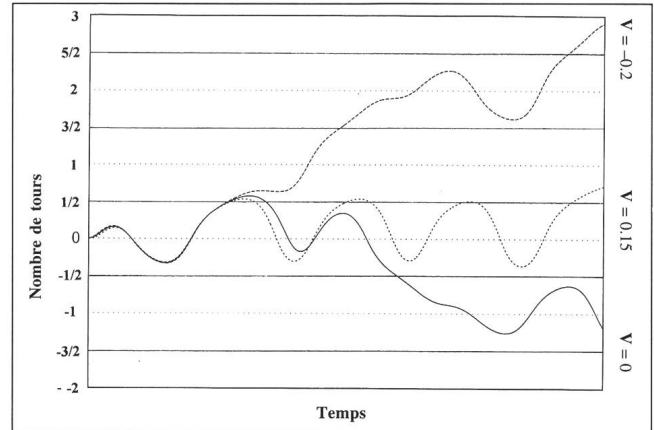


Fig. 1. Pendule rigide, excité par une force périodique de basse fréquence et forte intensité, pour trois conditions initiales très légèrement différentes.

ment attendre quelques cinq milliards d'années, lorsqu'à la fin de sa vie active le Soleil explosera, pour que le système solaire soit vraiment fortement «chamboulé».

Le graphique de la Fig. 1 est une illustration de ce premier effet. Il s'agit d'un pendule rigide, comme celui d'une horloge, mais excité beaucoup plus fortement par une force périodique, de façon à le faire même tourner complètement. Les trois courbes du graphe montrent les mouvements du pendule lorsque cette excitation est enclenchée alors que le pendule est soit au repos ($v = 0$), ou qu'il oscille déjà très imperceptiblement vers la droite ($v = 0.15$) ou vers la gauche ($v = -0.2$). Ces toutes petites différences dans les conditions initiales n'ont d'abord pas de conséquences importantes, les trois courbes suivent pratiquement le même chemin, mais soudain c'est le chaos. Le balancier arrive au voisinage de la position complètement renversée, le demi tour; dans deux des cas la force d'entraînement le ramène du même côté, alors que dans le troisième il fait un tour complet. Et dans les deux cas où il revient du même côté, ce n'est que partie remise, les deux courbes s'éloignent l'une de l'autre et sont bientôt, elles aussi, séparées d'un tour entier (ce graphe est adapté d'un exemple aimablement fourni par le Prof. Hans Beck et son assistant, M. Matteo Monbelli, de l'Institut de Physique de l'Université de Neuchâtel). Comme illustration extrême des conséquences lointaines d'un tout petit effet, dans le temps comme dans l'espace, on cite souvent ce papillon, dont les battements d'ailes à Tokyo engendrent un orage à Paris. Mais on peut montrer que la probabilité d'une telle relation de cause à effet est encore incroyablement plus petite que de voir tout le parfum réparti dans une chambre retourner d'un coup dans la bouteille. Même si ce retour dans la bouteille devait effectivement se produire, pour le vérifier il faudrait immédiatement fermer la bouteille, sinon le parfum en ressortirait aussitôt.

Le climat source de désordre à très long terme dans le système solaire

Le deuxième effet est plus subtil. Les calculs astronomiques où interviennent plusieurs corps sont difficiles; on sait, par exemple, que le problème à trois corps ne peut déjà plus être

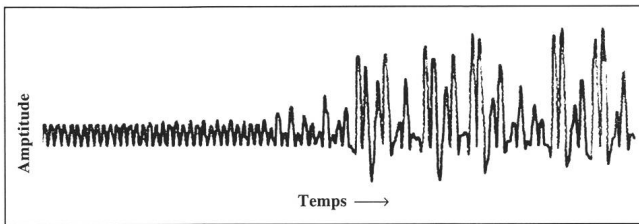


Fig. 2. Oscillateur pratiquement linéaire aux faibles amplitudes, excité par une force grandissante. Les caractéristiques non-linéaires du système prennent progressivement le dessus. Finalement, le système a un comportement chaotique imprévisible.

résolu de façon analytique. Pour simplifier les calculs on remplace donc le Soleil, les planètes et leurs satellites par des points de masse sans dimension. Cela serait sans conséquences, si ces corps étaient parfaitement indéformables et possédaient une symétrie exactement sphérique; mais cela n'est pas le cas. Comme exemples d'effets qui ne peuvent pas être traités ainsi on peut citer les marées. Des effets de ce genre ont pour conséquence que les deux satellites de Mars, Phobos et Deimos, vont bientôt (à l'échelle des temps géologiques, soit dans quelques millions d'années!) tomber sur leur planète. Le temps caractéristique pour l'instauration de petits écarts dans l'orbite de la Terre est aussi de l'ordre de 10 000 ans ou plus, mais on ne peut pas prédire l'ampleur exacte de ces effets, car ils dépendent de facteurs tels que le climat moyen (p. ex. la distribution des vents et des courants marins, le niveau des mers, etc.) et de la forme du globe dans tous ses détails (en particulier les déviations d'une sphéricité parfaite à cause des forces centrifuges causées par la rotation). Ainsi, au maximum de la dernière glaciation, le niveau des océans était-il de 130 m au-dessous du niveau actuel, cela avait une influence très importante sur les marées. En effet, le freinage provoqué par les marées dépend fortement de la topographie des fonds marins aux abords des côtes et de la forme de ces côtes. Par suite de la dérive des continents, la topographie du globe évolue constamment, bien que très lentement. En fin de compte on peut dire, pour ce deuxième effet, que les conclusions pour le court terme sont les mêmes que pour le premier: on ne

prévoit rien de spectaculaire. Pour le très long terme de dizaines ou centaines de millions d'années, par contre, les prévisions sont de plus en plus incertaines. La Fig. 2 est une illustration de ce que nous venons de dire: un processus oscillatoire est soumis à une perturbation croissante; au début cela ne semble pas l'influencer; mais la perturbation augmente et finalement l'oscillateur perd toute régularité et se comporte de façon totalement imprévisible (cet exemple nous a été fourni par le Prof. Edmond Geneux de Sainte-Croix). Un exemple naturel, mais inversé dans le temps, nous est fourni par le climat. Pendant la dernière glaciation, qui s'est terminée voici quelques 12 000 ans, la température moyenne de tout l'Atlantique nord pouvait changer en quelques années, et de façon totalement imprévisible, de quelques 5 °C, ce qui est énorme. Mais depuis 11 600 années, ces oscillations ont totalement disparu, pour des raisons qu'on ne s'explique pas encore bien aujourd'hui.

Des perturbations peuvent aussi venir de l'extérieur!

Dans une troisième catégorie, on doit mettre les interactions imprévisibles avec de gros astéroïdes venus de l'espace interstellaire. Ce qu'on entend ici par un gros astéroïde est un objet dont la masse vaut au moins quelques pour-cent de celle de la planète cible, par exemple, une collision entre la Terre et un bolide aussi massif que Mars, où la vitesse relative des deux corps est d'au moins une dizaine de kilomètres par seconde (comme exemple, la vitesse de la Terre dans son orbite autour du Soleil est proche de 30 km/s). La probabilité de telles collisions a diminué considérablement depuis la naissance du système solaire et elle est maintenant insignifiante.

Par contre, on sait que l'orbite de Pluton croise quelquefois celle de Neptune et une collision entre ces deux planètes est effectivement possible. Des phénomènes des trois catégories discutées plus haut pourraient effectivement conduire à une collision imprévue entre ces deux planètes, dans quelques dizaines de millions d'années peut-être, mais rien de catastrophique n'est prévu à court terme. En définitive, on peut donc dire que le chaos prédit par certains pour le système solaire, n'est pas pour demain.

GASTON FISCHER
Rue de Rugin 1a, 2034 Peseux

Les théories du chaos et des prédictions à long terme, la flèche du temps

A l'origine, la théorie des phénomènes chaotiques a été développée en relation avec les prédictions météorologiques, mais on a bientôt compris que presque tout ce qui évolue aboutit finalement à une forme de chaos. Tous ceux qui s'intéressent aux «prévisions météo» ont sûrement remarqué qu'on se limite en général à prédire le temps des cinq jours à venir. La raison en est bien simple, au-delà de cinq jours, et cela en dépit de l'énorme capacité de calcul des plus gros ordinateurs dont nous disposons aujourd'hui, les prédictions deviennent terriblement incertaines: on ne peut plus guère leur accorder de crédit. Les théories du chaos avaient justement pour objet de comprendre pourquoi il en est ainsi.

Ces mêmes théories ont permis de jeter un éclairage nouveau sur pratiquement tous les systèmes complexes, en particulier ceux comprenant un grand nombre de particules, comme les gaz et les liquides, ou d'autres qui obéissent à des équations non-linéaires. Les lois élémentaires de la physique sont généralement réversibles, c.-à-d. qu'elles restent invari-

antes par rapport à une inversion du temps. Mais dès qu'on cherche à décrire le comportement de certains systèmes comprenant des équations non-linéaires, ou d'autres composés d'un très grand nombre d'éléments, cette réversibilité peut disparaître: avec le temps qui s'écoule apparaît un désordre grandissant, le chaos apparaît de façon soudaine. Le physicien dit que l'entropie augmente.

On cite souvent le parfum qui diffuse de sa bouteille dans une chambre entière, ou le mélange d'un colorant soluble dans un liquide, pour illustrer les phénomènes qu'on dit irréversibles, ceux où l'on passe d'une situation bien ordonnée, avec le parfum dans la bouteille fermée et de l'air parfaitement inodore dans la chambre, à un désordre complet, la situation du parfum qui s'est totalement mélangé à l'air. Même si c'est à dessein qu'on a ouvert la bouteille, il y a désordre dans le sens qu'on ne peut pas revenir en arrière, faire retourner le parfum dans sa bouteille. Cette irréversibilité suggère une direction pour l'écoulement du temps et les théories du chaos ont ainsi contribué à une meilleure compréhension de cette notion de «flèche du temps».