

CHAOS :

Sous la direction de Pierre Lena. Les sciences du ciel : le chaos.

Chaos : étymologie, du latin chaos (état de confusion antérieur à l'organisation du monde)

L'observation de systèmes physiques très simples (un pendule composé) ou très complexes (l'atmosphère de la Terre) a révélé des parentés de comportement qui ont conduit à définir la notion de phénomène chaotique. Un système est dit chaotique lorsque son évolution au cours du temps présente une extraordinaire sensibilité aux conditions initiales : une infime variation de celles-ci conduit le système, au bout d'un temps T_c plus ou moins long (dit temps caractéristique), à aboutir à des états extrêmement différents.

Cette variation des conditions initiales pouvant être infiniment petite, elle est extrêmement difficile et même rigoureusement impossible à mesurer ou contrôler, ce qui entraîne que l'état du système au bout du temps T_c est impossible à prédire, quelle que soit la qualité du modèle physique qui le décrit. Le propre du système chaotique est d'amplifier les infimes écarts initiaux, l'amplification de ceux-ci croissant exponentiellement avec le temps t (en e^{t/T_c}).

L'ingrédient nécessaire est que le système possède plusieurs "degrés de liberté" couplés les uns aux autres. La météorologie de l'atmosphère terrestre, avec $T_c = 10$ jours, offre un exemple de comportement chaotique : malgré le nombre de paramètres qui interviennent, une description célèbre (effectuée par Edward Lorenz en 1960) est parvenue à reproduire son comportement en se limitant à douze d'entre eux.

Une autre propriété des systèmes chaotiques est qu'ils possèdent des attracteurs étranges. On désigne sous ce nom un sous-ensemble d'états du système par lesquels, lors de son évolution, il a une probabilité très élevée de passer, probabilité beaucoup plus élevée que celle d'occuper tous les autres états théoriquement possibles.

Ainsi, lorsque le système est abandonné à son évolution en partant de conditions initiales absolument quelconques, cette évolution va l'amener au voisinage de l'attracteur, voisinage dans lequel il va demeurer tout en poursuivant une évolution chaotique, c'est-à-dire dont les états précis occupés au cours du temps sont imprédictibles. On voit que l'évolution chaotique se situe en quelque sorte entre une évolution entièrement déterministe (tout est prévisible une fois connues les conditions initiales) et celle où tout serait purement aléatoire (chaque état possible n'étant défini que par une probabilité).

La théorie mathématique du chaos développe des outils rigoureux qui sont adéquats pour décrire les phénomènes chaotiques qu'observe la physique : une fois encore, la correspondance entre les phénomènes naturels et l'abstraction mathématique se trouve mise en évidence.

Le chaos en astrophysique :

La météorologie des planètes autres que la Terre est encore trop mal connue pour que l'on puisse en déterminer le caractère éventuellement chaotique, mais la mécanique céleste offre dans le système solaire (et probablement ailleurs, lorsque cela deviendra observable) des exemples spectaculaires de tels comportements. Henri Poincaré avait ainsi prévu que, lors de très longues périodes de temps, les interactions gravitationnelles existant entre les différentes planètes pouvaient perturber la stabilité des orbites telles que nous les

connaissions (des ellipses dont le Soleil occupe un foyer) au point de les rendre chaotiques au sens précis défini ci-dessus.

Les durées mises en jeu sont telles que l'observation ne peut révéler le phénomène qui doit être numériquement simulé par de puissants ordinateurs, si bien que sa première mise en évidence est très récente (fin des années 1980).

Le temps caractéristique de comportement chaotique des planètes intérieures (Mars, Terre, Mercure) est de l'ordre de 10 millions d'années, la quantité sensible au comportement chaotique étant "l'ellipticité" de l'orbite. Le domaine de variation de cette ellipticité (épaisseur de l'attracteur) est néanmoins assez faible pour que des collisions entre la Terre et Vénus ne puissent se produire. On sait aussi que la rotation propre de Vénus sur elle-même ne se fait pas dans le même sens que celle des autres planètes : cet effet pourrait être une conséquence du chaos.

Hypériorion, satellite de Saturne, est un gros rocher de forme approximativement ellipsoïdale (100 x 125 x 175 Km de demi-axes respectifs), orbitant autour de Saturne en 21 jours. La position et l'orientation d'Hypériorion dans l'espace (mouvement de libération) présentent plusieurs degrés de liberté, contrôlés par le champ gravitationnel qu'il subit de la part de Saturne et des autres satellites de celle-ci.

Cette orientation présente à l'observation un régime chaotique, aisément observable parce qu'ici le temps caractéristique est égal à la période orbitale, donc très court. Les développements de la théorie du chaos sont trop récents pour que l'on en ait épuisé les illustrations dans les objets astronomiques.

On a pu suggérer, par exemple, que le cycle solaire de onze ans serait un phénomène de ce type : le champ magnétique solaire offre en effet, au cours du temps, à la fois des régularités (inversion d'un cycle à l'autre, migration en latitude des taches solaires, variations du nombre de taches) et une grande variabilité (champ dipolaire simple alternant avec des distributions plus complexes).

Les régularités pourraient traduire l'existence d'un attracteur, tandis que la distribution chaotique serait la traduction de la complexité du système et de la non-linéarité des équations (magnéto-hydrodynamique) qui en décrivent l'évolution.

On tente également de considérer comme chaotique l'univers primordial décrit par la phase d'*inflation* : d'infimes variations du couplage entre particules de matière (alors décrites comme des champs) conduisent à des évolutions divergentes.

La prédiction d'un tel modèle est que l'Univers que nous observons, limité par l'*horizon*, ne serait qu'une structure locale, presque découplée d'autres mini-univers inobservables parce que situés au-delà de cet horizon.

Flammarion, Page 257.