

# MUSÉE CANTONAL DES BEAUX-ARTS

---

# CLIMATS

---

## L'EFFET PAPILLON ET LE CLIMAT, OÙ COMMENT LE CHAOS REND DIFFICILE LA PREVISION DE L'EVOLUTION CLIMATIQUE

*Martin Beniston, climatologue, professeur ordinaire à l'Université de Genève et titulaire de la chaire de climatologie*

La théorie du chaos existe depuis la fin du 19<sup>e</sup> siècle; elle a attiré passablement l'attention au début des années 1960, en particulier par les travaux d'Edward Lorenz, spécialiste du climat au Massachusetts Institute of Technology (MIT) à Boston (décédé au mois d'avril 2008 à l'âge de 92 ans). C'est de ses explorations d'un monde dit *chaotique* que le grand public a retenu le concept du fameux *effet papillon*, selon lequel le battement d'aile d'un papillon à un endroit de la planète est susceptible de générer un ouragan dans une autre partie du monde. Bien que très imagée et fort improbable dans la réalité à cause des effets de dissipation d'énergie dans l'atmosphère, cette image véhicule l'un des concepts fondamentaux de la théorie du chaos, à savoir qu'un petit changement dans une partie d'un système complexe peut provoquer de grands changements ailleurs dans le système. Pour cela, il faut que le système soit non linéaire, ce qui est le cas de pratiquement tout ce qui nous entoure au niveau physique, biologique, chimique, économique et social. Un système non linéaire se manifeste par l'apparition de seuils au-delà desquels il entre dans un tout autre état; ainsi le dépassement du seuil de condensation dans l'air fait passer très rapidement l'atmosphère d'un état sec à un état saturé. La théorie du chaos cherche donc à explorer les seuils inhérents à tel ou tel système complexe et à comprendre les transitions d'un état *simple* (totalement prévisible) vers un état *chaotique* (totalement imprévisible... ou presque).

Les travaux de Lorenz l'ont mené à envisager le climat sous une forme « simplifiée », où le système est géré par l'apport énergétique externe (soleil) et interne (processus dits « diabatiques », liés à la convection et à la libération ou à l'absorption de chaleur latente lors de la formation de nuages). La figure ci-dessous illustre le comportement complexe

du système de Lorenz, pourtant simplifié par rapport à la réalité. Le diagramme représente le comportement thermique du climat non pas sous une représentation habituelle dans l'espace-temps, mais dans un référentiel que les mathématiciens appellent l'espace de phase. On voit que le climat de Lorenz peut basculer rapidement d'un état « chaud » à droite, à un état froid, à gauche, sans régularité particulière ; c'est la manifestation d'un comportement proche de l'état chaotique. En suivant les trajectoires en forme de double spirale, on constate qu'à aucun moment les trajectoires ne se croisent ; autrement dit, le climat à un endroit particulier peut être proche de celui à un autre endroit de l'espace de phase, mais jamais identique. C'est une autre caractéristique d'un comportement complexe.

Pour qu'un système complexe puisse évoluer, il faut que son comportement se situe entre l'ordre, où la complexité est inexistante et offre ainsi peu d'opportunités d'évolution, et le chaos, où le système entre dans un mode incontrôlable. Le système trouve ainsi un équilibre entre rigidité et anarchie, où l'excès est aussi destructeur que l'absence de changement. Ce n'est *qu'au bord du chaos* que les systèmes complexes peuvent prospérer. La complexité est par conséquent source de diversité, et l'on voit apparaître des structures complexes qui naissent du désordre : la non-linéarité des systèmes et de leurs structures sont à la base même de leur richesse. Dans la plupart des situations, des systèmes complexes comme le climat se situent dans des limites relativement bien définies, avec l'apparition de fluctuations internes comme le cycle saisonnier et l'influence de phénomènes quasi-cycliques comme El Nino ou le comportement des taches solaires. Dans certaines circonstances, cependant, une petite perturbation dans le système peut mener celui-ci à une situation moins ordonnée que d'habitude; on voit ainsi apparaître des comportements très fluctuants et difficiles à maîtriser, où le retour du système à la normale peut prendre du temps ou, si le système entre dans un régime chaotique, le retour à la normale devient peu probable. Par exemple, l'effondrement du Gulf Stream, ce courant chaud dans l'Atlantique Nord qui tempère le climat d'une bonne partie de l'Europe, pourrait faire basculer le climat de l'hémisphère nord vers des niveaux proches de ceux d'une période de glaciation.

Dans toute la problématique de la prévisibilité de l'évolution d'un système, le tout est de savoir où l'on se trouve au départ sur un tel diagramme; on parle ici de *conditions initiales* à partir desquelles on va tenter d'établir une prévision vers l'avenir. Dans le cadre du climat, il est difficile de connaître avec précision les conditions initiales précises dans l'espace et dans le temps; on est surtout très conscients que de très petits écarts des conditions initiales peuvent mener à des prévisions très différentes, puisque le climat *moyen* est déjà proche de la zone chaotique. On a aujourd'hui recours à la technique dite de *simulations d'ensembles*. L'idée est de répéter 50 à 100 fois une prévision en modifiant légèrement les conditions de départ; on obtiendra ainsi à l'arrivée, un *nuage de solutions* dans lequel se situera vraisemblablement la vérité. Plutôt que de n'avoir recours qu'à une seule prévision qui peut s'avérer fautive, on a aujourd'hui les moyens (informatiques, notamment) permettant d'aborder l'incertitude de la prévision par le biais de nombreuses simulations et d'attribuer un indice de probabilité à une prévision particulière par rapport à une autre. On peut ainsi vivre avec le chaos et utiliser certaines

de ses caractéristiques pour mieux comprendre l'évolution de systèmes complexes comme le climat...

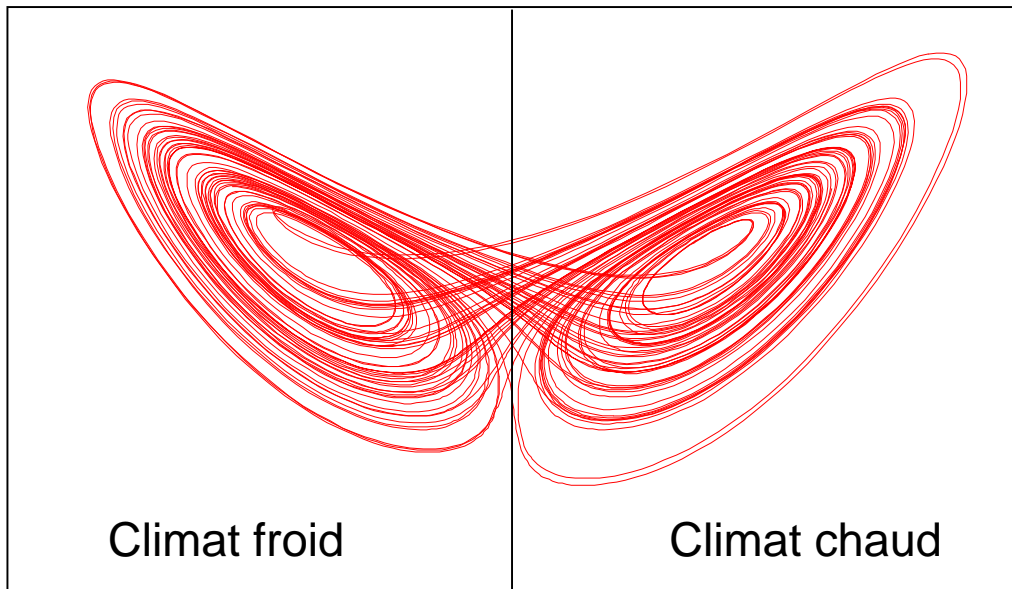


Figure 1 : L'attracteur de Lorenz. En suivant la trajectoire de la ligne rouge, on voit que le climat peut basculer rapidement d'un état à un autre sans régularité apparente