



Histoire climatique

de la Terre

Et si tout venait du soleil ?

Jean Chaline
Jacques Lang

ellipses

Les climats, causes et fluctuations

« *C'est une triste chose de penser que la Nature parle, et que le genre humain n'écoute pas* ».
Citation apocryphe attribuée à Victor Hugo

Le climat a varié constamment tout au long de l'histoire des temps géologiques jusqu'au dernier réchauffement climatique contemporain commencé depuis 1980.

Le terme de dérèglement climatique est à nuancer, car le climat n'a jamais été réglé, ni dérégulé, par rapport à quoi? À quelle époque et dans quelle région? Le climat a toujours varié comme nous le préciserons tout au long de cet ouvrage.

I. Climatologie et météorologie

Les variations climatiques sont les conséquences de deux types de phénomènes appartenant à des domaines différents, d'une part le *climat*, déterminé par des facteurs cosmiques et terrestres, et, d'autre part, la *météorologie* qui concerne uniquement l'atmosphère. Bien qu'elles analysent toutes les deux des phénomènes climatiques, il ne faut pas les confondre, ni les amalgamer, car elles n'ont pas les mêmes méthodes d'étude, ni les mêmes objectifs, et surtout elles fonctionnent à des échelles temporelles et géographiques différentes.

1. Climatologie

La climatologie cherche à expliquer la dynamique climatique en fonction des nombreux paramètres astronomiques et planétaires qui la conditionnent et qui seront développés en détail plus loin¹.

1. Boesch, Q. 2022. *Climatologie. À la découverte des climats passés, présents et futurs de notre planète*. De Boeck Supérieur.

L'un de ces phénomènes astronomiques est celui qui fait que les deux pôles ne reçoivent pas la même énergie lors des variations entre le 22° de latitude (étés plus froids et hivers plus chauds) et le 24,5° degré de latitude (étés plus chauds et hivers plus froids). Il est responsable des saisons terrestres.

À la variabilité climatique dépendant de l'énergie solaire reçue, il faut ajouter l'influence de la latitude qui, faible en région équatoriale, devient très importante aux hautes latitudes. En fonction de ces paramètres, on peut distinguer des climats zonaux.

Le climat est décrit par des moyennes sur 30 ans de l'ensemble des paramètres météorologiques mesurés localement, comme la pression atmosphérique, la température, l'humidité, les vents, les précipitations (quantité et type) et la nébulosité (quantité et qualité de la couverture nuageuse¹).

On distingue les types de climat en fonction de leur position géographique par rapport à l'équateur et aux pôles ainsi qu'aux océans. Le *climat polaire* se caractérise par un froid permanent, le *climat continental* se manifeste par des *hivers froids et longs*. Les *climats océaniques* sont *tempérés et humides*, les *méditerranéens* sont *chauds avec des hivers courts*. Ceux des *zones subtropicales* sont des *déserts* avec de très grands écarts de température et ceux des *tropiques* sont *chauds et humides*. Il faut y ajouter les variations d'altitude qui conditionnent les *climats montagnards*.

Ces fluctuations permettent de faire éventuellement des prévisions, car elles suivent des lois mathématiques non-linéaires². La climatologie est une discipline sur le long terme, analysant des périodes sur des dizaines ou des centaines, voire des milliers d'années au cours des temps géologiques.

Les anglo-saxons parlent de « *greenhouse* » pour les phases chaudes et de « *icehouse* » pour les phases glaciaires, alors que les Français utilisent les expressions de « *planète-serre* » et de « *planète-igloo* ».

2. Météorologie

Selon le Larousse, la météorologie est *l'étude des phénomènes atmosphériques et de leurs lois, notamment en vue de la prévision du temps*. Remarquons que le terme employé ici par les spécialistes, *le temps*, est un phénomène très local, temporel, qui change constamment, pendant une période éphémère, d'une heure à l'autre, contrairement au terme *climat*, beaucoup plus global, qui dure au minimum pendant plusieurs décennies et affecte de grandes surfaces.

-
1. Moreau, R. & Sommeria, J. 2023. *Encyclopédie de l'environnement*. Institut de France. Académie des Sciences.
 2. Nottale, L. Chaline, J. & Grou, P. 2009. *Des fleurs pour Schrödinger. La relativité d'échelle et ses applications*. Ellipses, Paris.

Signalons également la différence entre une *prédiction* et une *prévision*, termes trop souvent confondus. Une *prédiction* est la résultante de données scientifiques permettant de prédire qu'un événement peut survenir lorsque certaines conditions sont remplies, mais jamais exactement ni où, ni quand il se manifestera. C'est ainsi que, malgré des milliers d'informations, on ne peut pas savoir ce qu'il va se passer la semaine prochaine. L'utilisation de l'intelligence artificielle devrait cependant améliorer la situation.

Les *prévisions météorologiques* concernent un temps très court, au maximum une dizaine de jours. Elles s'appuient sur des paramètres mesurés depuis l'enregistrement des données météorologiques. Ce dernier a été réalisé tout d'abord en 1854 par Urbain Le Verrier. De fait, l'invention du premier service météorologique français remonte au Second Empire¹ en 1864. Ce service étudie les variations de la température et de la pression atmosphérique, les rivières atmosphériques, les vents, notamment les grands courants-jets atmosphériques de haute altitude² et ceux de surface, la nébulosité, l'humidité et les précipitations. Les premières mesures ont été dépendantes de l'invention des appareils permettant de les mesurer, comme le baromètre pour la pression atmosphérique, le thermomètre pour la température et l'anémomètre pour la vitesse du vent, c'est-à-dire à partir du XVII^e siècle.

Les premiers bulletins de la météorologie moderne datent seulement de 1946, à la fin de la Seconde guerre mondiale. On doit à Lewis Fry Richardson, en 1922, l'amélioration des prévisions météorologiques en utilisant des « *équations primitives atmosphériques* », c'est-à-dire des lois de la mécanique des fluides (thermodynamique) qui déterminent le fonctionnement de l'atmosphère. Ces prévisions sont désormais accompagnées d'une estimation de leur fiabilité³. On peut en effet prévoir le brouillard ou la pluie dans une région en donnant la probabilité du phénomène à 25 %, 50 % ou 80 %, mais généralement sans pouvoir préciser le lieu précis, ni son ampleur.

Il faut y ajouter les interactions atmosphère-océan, c'est-à-dire les tempêtes et les ouragans dont les paramètres évoluent très rapidement, d'heure en heure, les zones d'affrontements entre les zones cycloniques et anticycloniques ainsi que celles des fronts polaires et la convergence intertropicale qui constituent des barrières climatiques également très fluctuantes.

-
1. Cot, B.D. 2007. À quand remonte l'enregistrement des données météorologiques? *L'Express* du 17/05/2007.
 2. Le jet-stream (ou courant-jet) est un courant d'air très rapide de quelques centaines de kilomètres de large et de quelques kilomètres d'épaisseur. Il est habituellement situé entre 18 et 15 kilomètres au-dessus de la surface de la Terre. Ce courant souffle d'ouest vers l'est selon la rotation de la Terre. La vitesse de ces vents à l'intérieur de ces courants est d'environ 200 à 300 km/h, mais ils peuvent passer à 400 km/h. Nous y reviendrons ultérieurement.
 3. Stewart, I. 2020. *Les dés jouent-ils aux dieux?* Dunod, Paris.

Compte-tenu du nombre de disciplines et des données impliquées par les recherches sur le climat, elles sont nécessairement pluridisciplinaires et parmi les plus complexes de la science actuelle, ce qui explique l'incompréhension de certains spécialistes très spécialisés.

Nous évoquerons les grandes fluctuations paléoclimatiques à l'échelle des temps géologiques, mais nous ferons de nombreuses digressions sur les phénomènes météorologiques. Ces derniers, courts de quelques mois, interviennent au sein des climats et permettent de décrire des phénomènes comme les vagues de chaleur, les *canicules* ou leurs antonymes de froid que nous proposons de nommer les *frigidums*¹.

Ce sont les variations météorologiques qui permettent les simulations présentées dans les bulletins météo des journaux télévisés. Le climat d'une région intègre l'ensemble des conditions météorologiques relevées, caractéristiques qui participent à leur variabilité géographique et temporelle².

On peut se poser la question: pourquoi la météorologie est-elle si chaotique? La réponse est rationnelle. En effet, l'atmosphère est un système dynamique ouvert³. Or cette dernière est gérée par des *oscillateurs harmoniques*⁴ qui, dans certaines conditions, deviennent non-linéaires et chaotiques. C'est-à-dire que nous sommes entrés dans une nouvelle dynamique, celle de *l'incertitude*⁵. Le *chaos* est un phénomène physique bien connu qui dépend de ce que l'on appelle *la sensibilité aux conditions initiales*⁶. Dans un tel système dynamique, deux trajectoires qui commencent avec deux conditions initiales très voisines⁷ évoluent à l'origine selon une trajectoire très proche, mais rapidement leur comportement devient désordonné et leurs trajectoires divergent fortement, comme si elles subissaient des forces d'attraction aux contours si étonnants que David Ruelle et Floris Takens⁸ les ont appelées des « *attracteurs étranges* ».

1. Du latin *frigidus* exprimant le froid.

2. Poitou, J. Braconnot, P. & Masson-Delmotte, V. 2014. *Le climat: La Terre et les hommes*. EDP Sciences (EDP = Édition en Physique et Astronomie, Chimie, Matériaux, Sciences de l'Ingénieur et Technologies, Mathématiques et Informatique, Santé, Sciences de la Vie et de l'Environnement, Sciences Sociales, Sciences Humaines et Économie).

3. Queiros-Condé, D., Chaline, J. & Brissaud, I. 2023. *L'Entropie créatrice. Vers une thermodynamique fractale et quantique de l'Univers, de la vie et des sociétés*. Ellipses, Paris.

4. Les *oscillateurs harmoniques* (pendule, système masse-ressort) sont des systèmes dont l'évolution au cours du temps est décrite par une fonction sinusoïdale avec une fréquence qui dépend des paramètres du système et dont l'amplitude est constante.

5. Stewart, I. 2020. *Les dés jouent-ils aux dieux? Les mathématiques de l'incertitude*. Dunod, Quai des sciences, Paris.

6. Queiros-Condé, D., Chaline, J. & Dubois, J. 2015. *Le monde des fractales. La Nature trans-échelles*. Ellipses, Paris.

7. Pas toujours connues avec une grande précision.

8. Ruelle, D. & Takens, F. 1971. On the nature of turbulence. *Communications in Mathematical Physics*, 20:167-192.

Ce comportement chaotique a été synthétisé par le météorologue Edward Lorenz (1917-2008), avec une métaphore devenue célèbre¹ « *le battement d'ailes d'un papillon au Brésil peut-il provoquer une tornade au Texas?* ». Cette métaphore est souvent mal interprétée. Il serait plus exact de dire que la différence de cause, c'est-à-dire que des conditions initiales légèrement différentes, dues uniquement aux battements d'ailes d'un papillon, peut induire une différence d'effet amplifié, une tornade. Le battement d'ailes ne provoque évidemment pas la tornade. C'est une image très générale qui s'applique à de nombreux systèmes, montrant simplement qu'un petit effet peut avoir des conséquences imprévisibles très amplifiées. Chacun d'entre nous en a fait souvent l'expérience dans la vie courante.

Lorenz a détruit le souhait des météorologues de pouvoir faire des prévisions précises à long terme avec leurs ordinateurs. C'est la raison pour laquelle ces météorologues ne peuvent pas faire de prévisions au mieux à plus de quatre jours. Mais il faut savoir que chaque mois, Météo-France publie un bulletin des grandes tendances climatiques pour les trois mois à venir². Ce ne sont pas des prévisions météorologiques, mais simplement des tendances probabilistes attendues en moyenne sur le trimestre à l'échelle de la France ou de l'Europe. Elles permettent de préciser si la saison à venir sera en moyenne plutôt plus chaude ou plus froide que la normale, voire de saison.

Cependant les prévisions deviennent de plus en plus précises grâce aux 16 satellites météo européens de l'Agence spatiale européenne et d'EUMETSAT à Darmstadt (Allemagne), dont les satellites *MetOp*³ A (2006), B (1012) et C (2018) sont fabriqués par « *Space systems* » (Airbus) à Toulouse. Placés sur des orbites polaires quasi-circulaires à 820 km d'altitude par ArianeSpace, ils fournissent chacun un million d'observations par jour, observations qu'il convient de synthétiser pour affiner les prévisions. Il faut également prendre en compte le programme de l'Agence spatiale européenne *Living Planet* sur les vents et la dynamique atmosphérique. Cette agence a lancé en 2018 le satellite *Aeolus*⁴ avec le laser *Doppler Aladin* qui analyse les vitesses de déplacements des particules et des aérosols. D'autre part, le radar micro-ondes *SKIM* va permettre de mesurer la hauteur et la vitesse de déplacement des vagues marines. En outre, il existe désormais des drones sous-marins pour analyser les courants océaniques. Toutes ces avancées technologiques vont permettre d'améliorer les prévisions météorologiques.

-
1. Lorenz, E.N. 1963. *Un battement d'ailes de papillon au Brésil peut-il déclencher une tornade au Texas?* *Alliage*, 22 : 42-45.
 2. Météo-France. *Les tendances à trois mois*. 24/04/2023.
 3. *Meteorological Operational*.
 4. De *Éole*, le dieu du vent de la mythologie grecque.

En conclusion, il ne faut donc pas confondre, comme le font de nombreux médias, météorologie et climatologie. Ainsi, à des précipitations météorologiques identiques peuvent correspondre des climats très différents.

La vision du climatologue qui s'exprime à l'échelle géologique depuis des millénaires jusqu'au Quaternaire, n'est pas à la même échelle que celle du météorologue qui se réfère localement à notre vécu du temps présent sur seulement quelques heures ou quelques jours. Nous analyserons les grandes fluctuations paléoclimatiques à l'échelle des temps géologiques depuis des millénaires jusqu'au Quaternaire et à l'époque actuelle. Elles résultent d'une multitude de paramètres climatiques.

II. Paramètres climatiques

L'idée que le climat puisse être déterminé par des phénomènes astronomiques a été proposée dès 1842 par le mathématicien Joseph-Alphonse Adhémar¹. Celui-ci a suggéré que les ères glaciaires avaient été provoquées par des *forces astrophysiques*. Cette théorie a été approfondie en 1875 par James Croll², qui a évoqué un *forçage*³ astronomique du climat. Les paramètres qui contrôlent ce dernier sont maintenant mieux connus, surtout depuis le début du XXI^e siècle.

Mais, depuis ces premières analyses, on a découvert que le climat était affecté par de nombreux facteurs extra-terrestres et même par le système solaire. C'est l'objet de la cosmo-climatologie qui s'intéresse au rôle potentiel de notre galaxie, la Voie lactée, où se situe la Terre.

La Terre est en effet plongée au sein d'un Univers traversé par une multitude de radiations qui la frappent constamment et modifient les nombreuses molécules qu'elles rencontrent (ADN, etc.).

1. Les facteurs galactiques, la cosmo-climatologie

Il y a au moins trois phénomènes d'origine galactique, voire extragalactique, qui sont imposés à la Terre. Ce sont notamment celui de la course du système solaire autour du centre de notre galaxie, celui des flashs des sursauts gamma ainsi que celui des bombardements de rayons cosmiques provenant du fond de l'Univers.

-
1. Adhémar, J. 1842. *Révolutions de la mer. Déluges périodiques*. Carilian-Goeury & V. Dalmont, Paris.
 2. Croll, J. 1875. *Climate and Time, in Their Geological Relations. A Theory of Secular Changes of the Earth's Climate*. Appleton and Company, New York.
 3. *Forçage* est un anglicisme signifiant l'action de forcer, d'obliger, d'imposer.

a. La course du système solaire dans la Voie lactée

La Voie lactée est une galaxie spirale contenant 250 milliards d'étoiles. Elle tourne sur elle-même à 240 km par seconde et met entre 225 et 250 millions d'années pour effectuer une rotation complète. On sait maintenant¹ que notre système solaire s'est formé dans le bras d'Orion de la Voie lactée, à environ 27 000 années-lumière du centre, il y a 4,5 milliards d'années, et que, sur l'une de ses planètes, la Terre, s'est développée une forme de vie. Depuis sa création, il aurait fait environ 29 tours. Notre système solaire se trouverait au centre d'une gigantesque « bulle de vide² » qui mesure 1 000 années-lumière de diamètre. Cette bulle aurait été causée par l'explosion de 15 supernovæ, mais les bords de sa « coquille » regorgeraient de matière. Elle a été identifiée il y a environ un demi-siècle parce qu'aucune étoile ne s'est formée à l'intérieur de cette structure depuis 14 millions d'années.

Il faut au système solaire 250 millions d'années pour accomplir un circuit autour du centre de notre galaxie, car il est entraîné par cette rotation. Le déplacement du système solaire autour du centre de la Voie lactée peut influencer le climat dans la mesure où, à cause de la cyclicité de cette rotation, il peut traverser, à certaines périodes de son parcours, des zones de concentration plus importantes de poussières interstellaires, concentrations pouvant affecter la luminosité du rayonnement de notre soleil³. Tous les 30 millions d'années, le Soleil traverse le plan de la Voie lactée⁴. C'est lorsqu'il traverse ces bras de la galaxie qu'il est exposé à subir des ondes de choc de supernova, ondes qui peuvent provoquer des extinctions biologiques.

b. Les flashes des sursauts gamma

Les *sursauts gamma* correspondent à des bouffées de photons⁵ comme la lumière visible ou le rayonnement X, mais ils sont beaucoup plus énergétiques.

1. Luminet, J.-P. 2020. *L'Écume du temps*. Odile Jacob, Paris.

2. Zucker, C. et al. 2022. Star formation near the Sun is driven by expansion of the Local Bubble. *Nature*, 601: 334-337.
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-04286-5>.

3. Shaviv, N. 2003. The spiral structure of the Milky Way, cosmic rays, and ice age epochs on Earth. *New Astronomy*, 8, 39-77.

4. Fondevilla, W. 2009. Position actuelle de notre système solaire dans notre galaxie. *Futura-Sciences: les forums de la science* - 11/06/2009.

5. Le photon, une particule élémentaire, de masse et de charge nulles, est l'aspect corpusculaire de la lumière dont la vitesse, dans le vide, est environ égale à 300 000 km/s, quel que soit le référentiel.

Phénomènes les plus lumineux de l'Univers¹, ils furent seulement découverts en 1967².

Ils seraient provoqués, soit par des effondrements gravitationnels de très grosses étoiles sur elles-mêmes³ lors de leur fin de vie⁴, lorsqu'elles explosent en une supernova⁵, soit lors de la formation d'un trou noir⁶, soit par la fusion de deux trous noirs ou encore en provenance d'une étoile à neutrons. Ces phénomènes libèrent, en quelques secondes, plus d'énergie que le soleil pendant les 10 milliards d'années de toute sa durée de vie: le *sursaut gamma*. La durée des émissions gamma est très courte et varie de quelques millisecondes à quelques minutes. Mais elles peuvent avoir des conséquences majeures sur l'atmosphère terrestre. En effet, en perçant cette dernière, les rayons gamma détruisent une partie de la couche d'ozone, laissant la voie libre aux rayons ultra-violet qui détruisent des cellules dans le vivant et provoquent des mutations de l'ADN. En outre, ce rayonnement transforme les molécules d'azote et d'oxygène en un gaz très nocif, le dioxyde d'azote, gaz qui fait obstacle à la lumière solaire en obscurcissant le ciel. Le refroidissement qui en résulte peut enclencher éventuellement une glaciation.

Les géophysiciens ont identifié un rayonnement gamma très intense qui aurait atteint la Terre il y a 440 millions d'années, à la fin de la période de l'Ordovicien. Cet événement a été mis en évidence en étudiant les cernes des arbres fossiles contenant des taux de carbone 14 excessifs. Au niveau microscopique, la quantité d'ultra-violet à laquelle la Terre fut exposée, aurait été de cinq fois supérieure à la normale et aurait pu altérer l'ADN de quasiment toutes les espèces végétales et animales de surface, ce qui aurait causé une hécatombe. À cette époque, le plancton et les coraux qui évoluaient dans les eaux chaudes près de la surface, ont été les premiers touchés par les ultra-violets et se sont éteints en masse. Mais, à une certaine profondeur, les rayons ultra-violets ne passant plus, certaines espèces marines comme les

-
1. Schilling, G. 2002. *Flash! The hunt for the biggest explosions in the universe*. Cambridge University Press.
 2. Le satellite *Vela 4*, est chargé de surveiller l'application du « *Traité d'interdiction partielle des essais nucléaires* » signé en 1963 avec l'URSS et plusieurs pays disposant d'un programme d'arme nucléaire.
 3. Gilliland, B. 2017. *Les mystères de l'Univers. Du Big-Bang à la fin des temps. Ça m'intéresse*, Prisma Gennevilliers. Excellent document pour ceux qui veulent avoir tous les détails de l'histoire de l'Univers.
 4. Les supernovae lorsqu'elles explosent, détruisent complètement l'étoile en fin de vie, alors que les novae explosent partiellement de façon récurrente, multipliant leur luminosité par 10000.
 5. Mochkovitch, R. 2001. *Les supernovae. Pour la Science*, 30.
 6. Un trou noir est par définition impossible à observer par lui-même puisqu'aucune lumière ne peut en sortir. On peut les détecter en observant les astres proches dont les orbites convergent autour de leur région apparemment vide.