



# Climatologie et statistiques

Pascal Yiou, *directeur de recherche au CEA*

Philippe Naveau, *chargé de recherche CNRS à l'Institut Pierre Simon Laplace*

*L'étude du climat et de ses variations est basée sur un grand nombre d'outils et concepts statistiques. Ceci se reflète dans le langage employé par les différents rapports du GIEC (Groupe International d'Experts sur le Climat), qui mettent largement l'accent sur les incertitudes et leur quantification.*

L'estimation du changement climatique au cours des derniers siècles, et la mise en perspective du comportement des dernières décennies dans ce contexte pluri-millénaire, constituent un des grands défis scientifiques actuels. Quand on regarde des courbes de températures moyennes d'observations, sur le globe ou sur chaque hémisphère (ou sur des sous-régions), on constate une augmentation générale au cours du xx<sup>e</sup> siècle, avec une accélération à partir des années 1970. Un grand nombre d'arguments physiques et thermodynamiques, ainsi que des mesures, montrent que cette augmentation est liée à l'activité humaine, responsable du rejet de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

## **Climat vs. météo**

La première manifestation des statistiques en climatologie se situe dans la définition elle-même du climat, et la différence entre météorologie et climatologie. Pour reprendre un aphorisme célèbre, attribué à E.N. Lorenz, le météorologue à l'origine de l'expression « effet papillon » et de l'étude du chaos en sciences atmosphériques: « climate is what you expect, meteorology is what you get », soit « le climat est ce qui arrive en général, la météorologie est ce qui arrive vraiment ». Climatologie et météorologie utilisent et décrivent les mêmes variables physiques (température, pression, vitesse de vent, précipitations...), mais les météorologues s'intéressent à l'état des variables à un endroit donné et à un instant donné,

alors que les climatologues regardent des grandeurs moyennes, sur une saison ou une région. Ces grandeurs moyennes peuvent être les variables physiques habituelles (par exemple, la température moyenne en hiver sur l'Île-de-France), ou des grandeurs plus sophistiquées, comme la variance de la vitesse du vent ou l'ensoleillement moyen sur une région. En général, les variables climatiques sont définies sur des périodes de 30 ans (par exemple entre 1961 et 1990) pour des raisons heuristiques liées à l'inférence statistique des grandeurs moyennes. C'est pour cette raison qu'il n'est pas raisonnable de comparer des tendances de température sur une décennie ou moins, avec des tendances estimées sur l'ensemble du xx<sup>e</sup> siècle.

*La première manifestation des statistiques en climatologie se situe dans la définition elle-même du climat.*



## L'évolution des températures moyennes

Une question scientifique légitime est de savoir si les valeurs de température observées maintenant ont pu être vécues au cours du dernier millénaire, alors que la configuration des continents et celle de la position de la Terre autour du soleil étaient assez semblables. Pour accomplir cette tâche, alors qu'il n'y a pas d'enregistrements thermométriques avant le xvii<sup>e</sup> siècle, on utilise des indicateurs climatiques à base de cernes d'arbres, de sédiments lacustres ou marins, de carottes de glace, ou encore des témoignages écrits (comme les dates de vendanges). La combinaison de ces enregistrements indirects se fait par des techniques statistiques multi-variées parfois sophistiquées (par exemple des techniques d'ondelettes, des modèles bayésiens hiérarchiques, des composantes principales...) qui permettent de reconstituer un signal interprété comme une variation de température au cours des derniers siècles. Le résultat le plus frappant de ces études, réalisées par une quinzaine d'équipes de recherche dans le monde, est la robustesse de la forme des variations de températures. Cette forme est dite en « crosse de hockey » : on observe une légère décroissance de la température entre l'an Mil et 1900, puis une augmentation rapide au cours du xx<sup>e</sup> siècle (figure 1). Cette crosse de hockey est un peu tordue, avec un optimum médiéval climatique chaud (entre 1000 et 1400) et un petit âge de glace froid (entre 1500 et 1800). L'utilisation de méthodes statistiques permet d'obtenir des intervalles de confiance pertinents pour répondre à la question : « Quelle est la



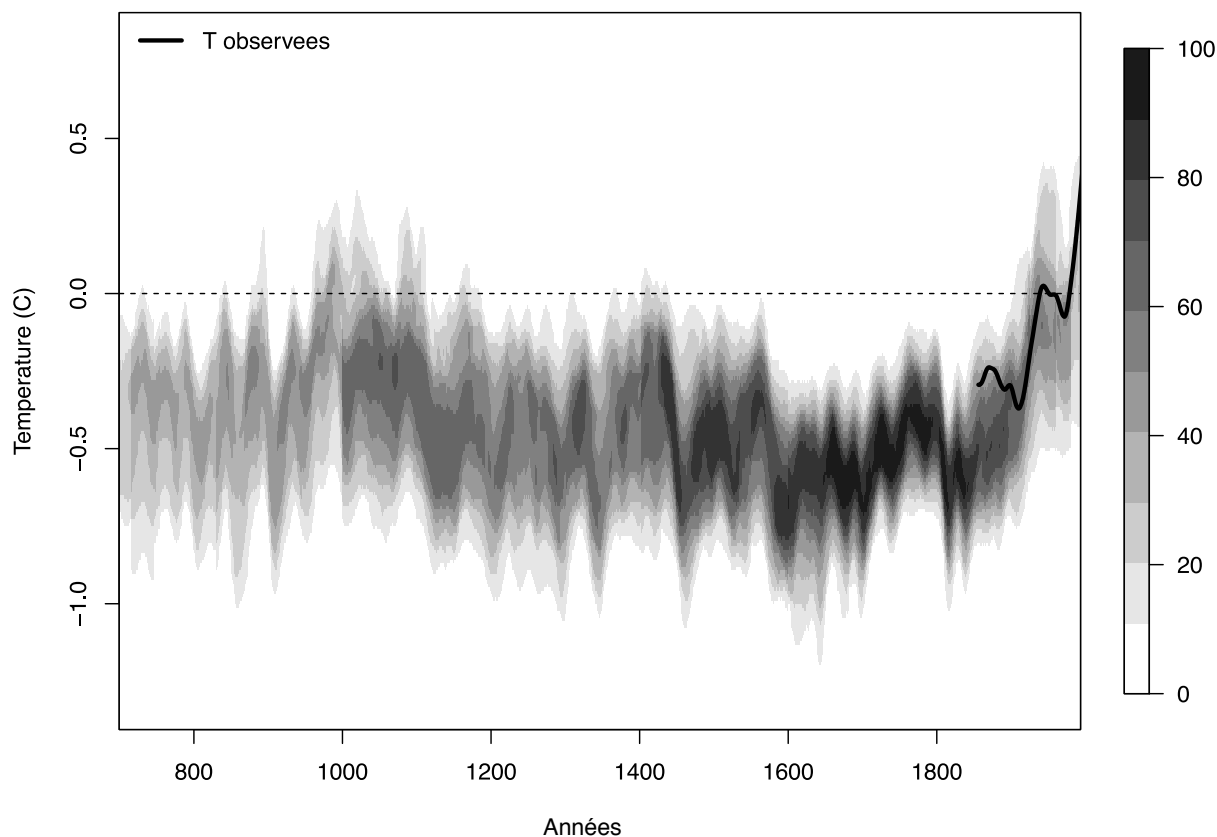


Figure 1. Recouvrement des reconstructions de températures de l'hémisphère nord depuis l'an 800. Les températures sont exprimées en différence par rapport à la moyenne de 1961 à 1990 (train pointillé). Les niveaux de gris indiquent les probabilités (en %) que les reconstructions de température pour chaque année se trouvent dans une gamme de température. La courbe en trait plein indique la moyenne des observations de température sur l'hémisphère nord (adapté du rapport de l'IPCC 2007).

probabilité pour que la température actuelle fasse partie de la gamme de températures reconstruites depuis l'an Mil ? » La réponse : une probabilité excessivement faible, quelle que soit l'approche statistique utilisée dans la reconstruction ! Autrement dit, il n'y a aucune chance que les changements climatiques actuels résultent d'une évolution normale du climat.

*Quelle est la probabilité pour que la température actuelle fasse partie de la gamme de températures reconstruites depuis l'an Mil ?*



## Variations autour de l'état moyen

Le corollaire de l'étude de l'évolution des températures moyennes est celle des variations autour de l'état moyen: peut-on dire qu'on observe de plus en plus d'événements extrêmes (comme des canicules, précipitations intenses, etc.) vers la fin du  $xx^e$  siècle?

Pour répondre à cette question, les climatologues peuvent utiliser des modèles statistiques construits pour la circonstance. Cette approche nécessite la disponibilité d'observations climatiques de qualité et de durée suffisante.

Si on s'intéresse aux vagues de chaleur, de froid ou aux précipitations intenses, le cadre statistique qui s'impose est celui de la Théorie des Valeurs Extrêmes, développée par Emile Gumbel, dans les années 1940. Pour une variable aléatoire continue  $X$ , l'objet de cette théorie est de décrire la répartition des grandes valeurs. L'enjeu principal est de décrire les extrêmes d'une loi que l'on ne connaît pas a priori (ce qui est le cas de la plupart des variables que l'on mesure).

### Théorie des valeurs extrêmes

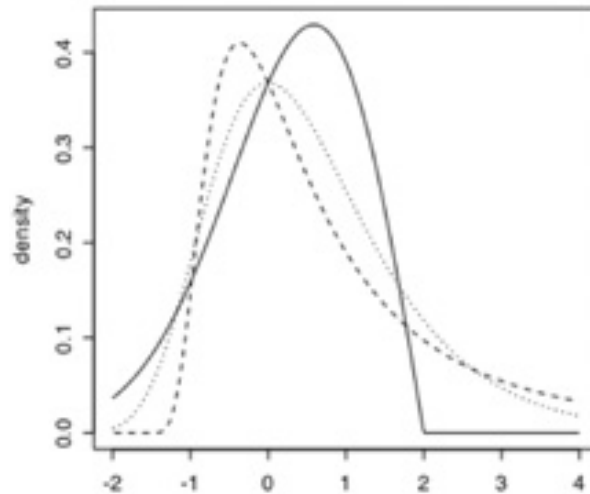


Figure 2. Densité de probabilité des lois de Fréchet (---), Weibull (-) et Gumbel (-.).

**Maximum de  $n$   
variables aléatoires**



$n$  tend vers l'infini

**Loi de Fréchet,  
Weibull ou Gumbel**





M.-R. Fréchet

Des mathématiciens des années 70 ont résolu cette question en énonçant que si la loi du maximum de  $X$  converge vers une loi, alors cette loi est une des trois lois d'extrêmes : les lois de Gumbel, Weibull et Fréchet (qui diffèrent essentiellement par la manière dont leur densité se comporte pour les très grandes valeurs). Pour en revenir au climat, on s'intéresse au type de loi de probabilité que suivent les températures maximales à chaque saison. Dans la plupart des régions, les lois du maximum de température suivent des lois de Weibull, c'est-à-dire que la loi du maximum décroît vers 0 plus vite qu'une loi exponentielle (ou une gaussienne). En revanche, les lois du maximum de précipitation suivent des lois de Gumbel ou de Fréchet : les valeurs peuvent être très grandes de manière relativement fréquente.



E.-J. Gumbel

Le dernier rapport spécial du GIEC sur les extrêmes montre que le nombre de vagues de chaleur en Europe a crû au  $xx^e$  siècle. C'est aussi le cas des précipitations intenses dans le sud de l'Europe, même si cette région connaît également une augmentation du nombre de jours sans pluie.



W. Weibull

Les manières dont les propriétés de ces lois d'extrêmes évoluent dans le temps sont des sujets de recherche très actifs dans le domaine de la climatologie statistique. Une estimation de ces extrêmes, et des incertitudes associées, est indispensable pour faire des prévisions climatiques dont se servent des secteurs économiques aussi variés que l'énergie, l'agriculture, l'assurance et les transports.

## Pour aller plus loin

Jeandel C., Mosséry R., (éd.) (2011). *Le Climat à Découvert : Outils et méthodes en recherche climatique*, CNRS Éditions, Paris.

