

## **Climat et Statistiques : Mesurer la variabilité climatique**

**Pascal Yiou<sup>(\*)</sup>**

Le but de l'atelier a été de poser quelques questions de statistiques relatives au changement climatique.

On sait que notre planète s'est réchauffée de 0,5 degrés C au cours du 20<sup>ème</sup> siècle et on pense que l'augmentation des températures sera de 2 à 5 degrés C au cours du 21<sup>ème</sup> siècle. Tout d'abord, un examen des températures moyennes de l'hémisphère nord au cours du dernier millénaire montre le caractère exceptionnel du 20<sup>ème</sup> siècle, avec des températures relativement stables de l'an mille au 19<sup>ème</sup> siècle, et une augmentation sans précédent pendant le 20<sup>ème</sup> siècle. Cette augmentation sort de tous les intervalles de confiance que l'on peut construire sur les derniers siècles. Actuellement, la seule explication plausible et quantifiable de ce réchauffement est l'augmentation exponentielle des gaz à effet de serre. Ni l'activité solaire ni le volcanisme ne peuvent expliquer cette caractéristique de manière satisfaisante.

Cette augmentation de la température moyenne, bien que faible au regard des variations glaciaires, s'est-elle accompagnée de changements dans les modes de variabilité du climat ? J'ai exposé plusieurs manières de caractériser la variabilité, en insistant sur le fait que la société y est certainement plus sensible qu'à une augmentation séculaire de la température.

Des relevés de précipitations effectués à Paris dès la fin du 17<sup>ème</sup> siècle permettent d'aborder les variations de cycle saisonnier depuis le Petit Âge de Glace<sup>1</sup>. Ces relevés, effectués de manière soigneuse par les scientifiques de l'Observatoire de Paris, montrent un fort cycle saisonnier des précipitations, avec pratiquement deux fois plus de précipitations en été qu'en hiver. Cette situation nous semble paradoxale, mais elle est confirmée par plusieurs écrits qui parlent du temps pluvieux en été à Paris. Quand on examine la courbe mensuelle des précipitations au cours de la fin du 20<sup>ème</sup> siècle, elle est à peu près uniformément distribuée au cours de l'année sans cycle saisonnier. Ceci est un premier signe de changement de mode

---

<sup>(\*)</sup>Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, UMR CEA-CNRS, CE Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette. E-mail : [pascal.yiou@cea.fr](mailto:pascal.yiou@cea.fr)

<sup>1</sup> Le Petit Âge de Glace est une période d'avancée des glaciers alpins et de refroidissement en Europe qui a eu lieu entre le 15<sup>ème</sup> siècle et le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle. Il a été interrompu au cours du 17<sup>ème</sup> siècle par deux décennies très chaudes (correspondant à l'apogée du règne de Louis XIV). Cette période climatique est documentée par des séries dendrochronologiques et des témoignages historiques, comme des dates de vendanges très tardives.

de variabilité entre le milieu du Petit Âge de Glace et maintenant : l'amplitude du cycle saisonnier des précipitations est beaucoup plus faible actuellement.

Cette constatation amène à se demander si le changement climatique séculaire a une influence sur des phénomènes à courte durée de vie, ou bien s'il y a un changement dans les statistiques des événements météorologiques. J'ai donc expliqué comment quantifier les statistiques météorologiques. A nos latitudes, le mode de circulation atmosphérique le plus typique est l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) qui module les flux d'ouest par le gradient de pression entre l'anticyclone des Açores et la dépression islandaise. Dans sa phase positive, le vent d'ouest qui balaie l'Atlantique va arroser la Scandinavie tandis qu'il fera sec en Europe du sud. Alors que dans sa phase négative, l'air humide provoquera des précipitations dans le sud de l'Europe. Quand on s'intéresse aux données de pression atmosphérique quotidiennes sur l'Atlantique nord, on peut déterminer les régimes dominants de la circulation en effectuant une classification statistique (avec des algorithmes *ad hoc*). On trouve, pour les données d'hiver, quatre régimes dominants : les deux phases de l'Oscillation nord Atlantique, un régime de blocage avec un anticyclone sur la Scandinavie qui « empêche » l'air humide de pénétrer sur la France, et un régime de dorsale nord Atlantique avec un anticyclone qui provoque une arrivée d'air froid polaire sur la France. À partir de cette classification, il est possible de déterminer des probabilités de changements de régime de la circulation, qui permettent de décrire celle-ci sous forme de processus de Markov. Sans entrer dans les détails théoriques, les probabilités de transition d'un régime à l'autre s'écrivent sous forme de matrice 4x4 dont la diagonale donne la probabilité de rester dans le même régime d'un jour sur l'autre. Avec le calcul (élémentaire) des éléments de cette matrice, on se rend compte d'une propriété fondamentale de la circulation atmosphérique de l'Atlantique nord : on passe très rarement d'une phase de la NAO à l'autre, et il est toujours nécessaire de passer par une phase de blocage ou de dorsale intermédiaire. Une des théories actuelles du changement climatique est que le réchauffement lent s'accompagne d'un changement de la répartition des régimes de temps. Des études récentes montrent que le régime de blocage scandinave était plus probable lors du Petit Âge Glaciaire.

Le dernier aspect que j'ai abordé concerne l'étude des extrêmes climatiques, en particulier les phénomènes liés à des dépassements de seuils : précipitations intenses, tempêtes et vagues de chaud ou de froid. Une manière d'aborder le problème est d'utiliser la théorie statistique des valeurs extrêmes pour décrire la queue de distribution des variables. On sait que la moyenne n'est pas très utile pour

décrire cette queue, essentiellement parce que la moyenne de variables IID (indépendantes et identiquement distribuées) suit une loi gaussienne, de manière asymptotique mais universelle. C'est le célèbre théorème central limite. Par contre, lorsqu'on considère le maximum (au lieu de la moyenne) d'une variable, la convergence de la loi se fait vers une loi d'extrême généralisée, dont deux des paramètres ont des analogies avec la moyenne et la variance, et le troisième décrit la forme de la queue de la distribution : une distribution bornée (e.g. loi uniforme), une décroissance rapide (e.g. lois gaussienne ou exponentielle) et une décroissance lente (e.g. loi de Cauchy) sans variance. Le signe de ce paramètre décrit complètement le type de distribution d'extrême. Son interprétation « physique » s'effectue en traçant la courbe des niveaux de retour d'extrêmes en fonction des périodes de retour : par exemple, le maximum moyen attendu sur une période de temps de plus en plus grande. Cette courbe est nécessairement croissante (« les records sont faits pour être battus »), mais sa convexité, i.e. son taux de croissance, est contrôlé par le paramètre de queue de distribution. Ainsi, l'estimation correcte de ce paramètre est essentielle pour connaître la dépendance des niveaux de retour, et éventuellement dimensionner des digues, barrages, piles de ponts et autres ouvrages d'art. Une étude menée au LSCE sur une simulation numérique du climat avec un modèle global couplé, montre qu'un changement climatique où la circulation océanique « saute » d'un état faible à fort, s'accompagne de changements mineurs de précipitations moyennes. Par contre, les niveaux d'extrêmes des précipitations peuvent changer énormément de manière locale, en particulier le long du Gulf Stream.

J'ai conclu cette présentation par l'exposé de deux TD à réaliser avec ordinateur et le logiciel libre « R »<sup>2</sup> (analogue à scilab ou matlab, avec une orientation vers les statistiques), afin d'étudier des probabilité empiriques des régimes de temps et de tester les convergences vers les lois d'extrêmes dans des cas simples. Les sujets de ces TDs sont disponibles sur le site web :

[http://www.ipsl.jussieu.fr/~ypsce/py\\_cours.html](http://www.ipsl.jussieu.fr/~ypsce/py_cours.html).

J'ai ensuite répondu aux questions de l'auditoire, composé principalement d'enseignants du secondaire. Les questions étaient très pertinentes et témoignent d'une culture climatique assez avancée. J'ai donc parlé de la théorie astronomique des paléoclimats qui rythme les alternances ces âges glaciaires et interglaciaires en fonction des paramètres orbitaux de la Terre. Ces calculs sont basés sur des analyses

---

<sup>2</sup>

Le logiciel R est téléchargeable à partir de l'adresse <http://www.r-project.org/>. Il fonctionne sur les plateformes usuelles d'ordinateurs personnels. Une documentation en français est disponible sur ce site.

de Fourier de séries temporelles. J'ai expliqué le « dilemme » du cycle climatique de 100000 ans, pour lequel la cause la plus intuitive, la périodicité de l'excentricité de la rotation, est probablement à rejeter car son bilan d'énergie est trop faible.