

Sujet : Prévisibilité des événements extrêmes dans des systèmes complexes : applications aux vagues de chaleurs extrêmes

Previsibility of extreme events in complex systems: applications to extreme heatwaves

Dates : automne 2021 – hiver 2024

Directeur de thèse : Pascal Yiou (HDR), LSCE

Co-responsable : Freddy Bouchet (HDR), ENS Lyon

Résumé (Fr) :

La prévision d'événements extrêmes est un enjeu scientifique et sociétal important. Le devenir de certaines situations météorologiques est plus facile à prévoir que d'autres, et il existe des situations pour lesquelles les probabilités que se développent certains extrêmes, comme les vagues de chaleur estivales les plus meurtrières, sont plus grandes. Nous allons nous intéresser à la détermination de ces situations. De nombreuses techniques ont été développées en *data science* et en sciences atmosphériques pour répondre à ce défi, en apportant une meilleure compréhension physique sur la formation de ces événements.

Dans cette thèse, nous nous intéresserons principalement à caractériser la *prévisibilité* de trajectoires de systèmes chaotiques comme ceux qui décrivent les mouvements de l'atmosphère. La prévisibilité est une mesure du caractère prédictible du système, pour une échelle de temps donnée. Par exemple, le devenir de certaines situations météorologiques est prévisible pendant plusieurs jours à l'avance (forte prévisibilité), alors que d'autres peuvent changer très rapidement (faible prévisibilité). Cela peut se traduire par le fait que l'incertitude liée aux conditions initiales est moins forte dans le cas que dans le second. Comment caractériser cette incertitude ?

L'étude de la prévisibilité (en sciences atmosphériques) se place souvent dans un cadre probabiliste : on s'intéresse à la probabilité de se trouver dans un état particulier, sachant qu'on part d'un état donné, qui peut avoir une incertitude.

Le LSCE a développé un ensemble d'outils de simulations stochastiques d'ensemble de variables météorologiques, pour déterminer les densités de probabilité de ces variables, ainsi que des scores statistiques pour évaluer la qualité des prévisions ainsi produites. En parallèle, des algorithmes de mécanique statistique permettent de simuler des événements extrêmes de manière optimale, à partir de principes d'échantillonnage d'importance.

On va donc s'intéresser à déterminer les conditions météorologiques qui conduisent à des vagues de chaleur extrêmes et leur probabilité. L'objet de cette thèse est de développer une méthodologie statistique pour trouver les paramètres optimaux des outils de simulations climatiques, et de déterminer les variables importantes à partir desquelles les vagues de chaleur sont prédictibles, à des échéances allant de quelques jours à la saison. Un autre aspect important de la thèse sera de déterminer l'impact du changement climatique sur la prévisibilité de ces événements extrêmes.

La thèse se placera à l'interface entre les sciences du climat, les statistiques et la physique statistique. On cherchera à établir un équilibre entre expériences numériques et analyse de données en fonction des résultats obtenus dans les premiers mois de la thèse. La thèse sera financée par le projet d'ANR SAMPRACE (<https://samprace871353291.wordpress.com/>). Elle se déroulera sous la direction de Pascal Yiou (LSCE), en collaboration avec Freddy Bouchet (ENS Lyon).

Abstract (En) :

Predicting extreme events is an important scientific and societal issue. The evolution of some weather patterns is easier to predict than others, but there are patterns in which the chances of certain extremes, such as the deadliest summer heat waves, are greater. We will focus on determining these patterns. Numerous techniques have been developed in *data science* and atmospheric sciences to tackle this challenge, and to provide a better physical understanding of the formation of these events.

In this thesis, we are mainly interested in characterizing the predictability of trajectories of chaotic systems such as those that describe the movements of the atmosphere. Predictability is a measure of how predictable a system is, for a given timescale. For example, the evolution of some meteorological patterns is predictable for several days in advance (high predictability), while others can change very quickly (low predictability). This means that the uncertainty linked to the initial conditions is less strong in the first case than in the second. How to characterize this uncertainty?

The study of predictability (in atmospheric sciences) is often placed in a probabilistic framework: we are interested in the probability of being in a particular state, knowing that we start from a given state which may be uncertain.

LSCE has developed a set of tools for stochastic simulations of meteorological variables to determine the probability densities of these variables, as well as statistical scores to assess the quality of the forecasts thus produced. In parallel, statistical mechanics algorithms developed at ENS Lyon enabled to simulate extreme events in an optimal way, based on important sampling principles.

We will therefore focus on determining the weather conditions that lead to extreme heat waves and their likelihood. The object of this thesis is to develop a statistical methodology to find the optimal parameters of climate simulation tools, and to determine the important variables from which heat waves are predictable. Another important aspect of the thesis will be to determine the impact of climate change on the predictability of these extreme events.

The thesis will stand at the interface between climate science, statistics and nonlinear physics. We will try to establish a balance between digital experiments and data analysis according to the results obtained in the first months of the thesis. The thesis will be funded by the ANR SAMPRACE project (<https://samprace871353291.wordpress.com/>). The work will be supervised by Dr. Pascal Yiou (LSCE), in collaboration with Dr. Freddy Bouchet (ENS Lyon).

Description (Fr) :

Les extrêmes climatiques comme les vagues de chaleur ont des impacts à long terme sur les sociétés et les écosystèmes. Un grand corpus d'études est consacré à l'étude d'événements observés ou répertoriés, et de simulations numériques de modèles climatiques. L'étude des événements extrêmes revêt plusieurs difficultés, en particulier un faible échantillonnage et une grande diversité de choix des variables météorologiques pertinentes (pouvant conduire à des propriétés statistiques différentes). Pouvoir prévoir, à plus ou moins longue échéance, l'arrivée d'événements extrêmes est un enjeu majeur de société. Plusieurs méthodes statistiques ont été développées pour étudier des événements extrêmes ou rares dans des systèmes géophysiques, en particulier au LSCE et à l'ENS de Lyon. Dans cette thèse, on s'intéressera à la prévision d'extrêmes climatiques, et à l'impact du changement climatique sur notre habilité à les prévoir.

Un défi scientifique actuel porte sur la simulation et la prévision de vagues de chaleur extrêmes : quelles sont les conditions et les variables météorologiques à surveiller pour qu'une vague de chaleur se déclenche et dure ? Quelle est la probabilité qu'une vague de chaleur survienne, à partir d'une situation météorologique donnée ? Pour y répondre, on peut formaliser cette question dans un cadre plus probabiliste : étant donné un état A observé (ou non) de l'atmosphère, quelle est la probabilité de se retrouver dans un état B de canicule au bout d'un certain temps ? Et par quel chemin passe-t-on de A à B ? Cette probabilité, en fonction de tous les états de départ A possibles, s'appelle la fonction « committor ». L'objet de la thèse sera de développer des méthodologies pour calculer cette fonction « committor », pour les états de canicule au bout d'un temps fixé.

Nous nous placerons dans un cadre de systèmes dynamiques chaotiques et de processus aléatoires. L'ENS de Lyon a travaillé sur des exemples de fonctions « committor » pour des systèmes complexes idéalisés. Le LSCE a développé des méthodologies pour caractériser la prédictabilité de systèmes chaotiques en fonction d'un état de départ identifié (Faranda et al., 2017). La thèse cherchera à mettre en commun ces deux approches pour quantifier la prédictabilité de certaines conditions climatiques, à partir d'observations et de simulations climatiques. On s'intéressera aussi aux changements de cette prédictabilité en réponse aux forçages (naturels et/ou anthropiques).

On s'intéressera particulièrement à la description des *chemins* qui conduisent aux événements rares (dans un espace des phases bien choisi), et la dépendance de ces chemins aux forçages. Ces chemins correspondent à la séquence des conditions météorologiques qui permettent d'atteindre l'état de vague de chaleur.

Dans un premier temps, nous élaborerons une méthodologie pour déterminer les meilleures variables prédictrices des extrêmes (e.g. humidité du sol, caractère anticyclonique de la circulation, etc.). Nous optimiserons une méthode d'analogues (qui est un prototype de machine learning) pour déterminer ces conditions à partir d'observations et de simulations numériques du climat déjà existantes. De cette manière, nous construirons une première fonction « committor » de vagues de chaleur, à partir de simulations stochastiques d'analogues (e.g. Yiou, 2014 ; Yiou et Déandréis, 2019). Nous étudierons le lien entre la fonction « committor » et des grandeurs de systèmes dynamiques chaotiques comme les dimensions locales et persistances (Faranda et al., 2017).

Dans un deuxième temps, nous examinerons des algorithmes d'événements rares (Lestang et al., 2018) pour simuler des ensembles de vagues de chaleur, soit à partir de simulations stochastiques (Yiou et Jézéquel, 2020), soit à partir de modèles climatiques simples (Ragone et al., 2018). Ces simulations permettront d'examiner et de compléter les fonctions « committor » déterminées dans le premier temps. Par un processus itératif, entre approches « committor » et simulations d'événements rares, nous optimiserons les simulations de vagues de chaleur et l'estimation de leur prédictabilité.

Enfin, on examinera l'effet du changement climatique sur la prévisibilité des vagues de chaleur « ultimes », tant sur leur probabilités que leurs propriétés physiques. Des simulations de modèles couplés (e.g. CMIP6) pourront être utilisées pour cette évaluation.

Nous cherchons un.e candidat.e motivé.e par l'étude et la simulation d'extrêmes climatiques, avec de bonnes connaissances en mathématiques appliquées. La thèse se placera à l'interface entre les sciences du climat, les statistiques et la physique statistique. On cherchera à établir un équilibre entre expériences numériques et analyse de données en fonction des résultats obtenus dans les premiers mois de la thèse.

Cette thèse s'effectuera au LSCE dans l'équipe ESTIMR, sous la direction de Pascal Yiou (HDR) et en collaboration avec F. Bouchet (ENS Lyon). Elle bénéficiera de discussions avec D. Faranda, M. Vrac, P. Naveau, S. Thao (LSCE), C. Herbert (ENS Lyon), F. Ragone (UC Louvain-la-Neuve), S. Vaienti (U Marseille).

Références

- Faranda, D., Messori, G. and Yiou, P.: Dynamical proxies of North Atlantic predictability and extremes, *Scientific Reports*, 7, 41278, 2017.
- Lestang, T., Ragone, F., Bréhier, C.-E., Herbert, C. and Bouchet, F.: Computing return times or return periods with rare event algorithms, *J. Stat. Mech. Theory Exp.*, 2018(4), 043213, 2018.
- Ragone, F., Wouters, J. and Bouchet, F.: Computation of extreme heat waves in climate models using a large deviation algorithm, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 201712645, 2017.
- Yiou, P.: AnaWEGE: a weather generator based on analogues of atmospheric circulation, *Geosci. Model Dev.*, 7(2), 531–543, doi:10.5194/gmd-7-531-2014, 2014.
- Yiou, P. and Déandréis, C.: Stochastic ensemble climate forecast with an analogue model, *Geosci. Model Dev.*, 12(2), 723–734, 2019.
- Yiou, P. and Jézéquel, A.: Simulation of extreme heat waves with empirical importance sampling, *Geosci. Model Dev.*, 13(2), 763–781, doi:10.5194/gmd-13-763-2020, 2020.