



Ces fleurs de tournesol, près de Golssen, en Allemagne, ont été victimes d'une canicule prolongée en 2018 imputable au comportement du jet-stream.

➤ grâce à une astuce mathématique, l'approximation WKB (pour Gregor Wentzel, Hendrik Kramers et Léon Brillouin).

Au début des années 1980, David Karoly, aujourd'hui au CSIRO, en Australie, et Brian Hoskins, de l'université de Reading, en Angleterre, ont montré que l'atmosphère pouvait se comporter comme un guide d'ondes pour les ondes de Rossby stationnaires et aux longueurs d'onde assez courtes (environ la largeur des États-Unis, soit un huitième à un sixième du tour complet de l'hémisphère Nord à cette latitude).

L'onde de Rossby stationnaire est alors piégée à l'intérieur du guide d'ondes, avec une perte minimale d'énergie fuyant par les bords nord et sud. Dans cette situation, les ondes s'immobilisent et s'amplifient en raison de l'AQR, entraînant des calamités météorologiques qui perdurent plusieurs jours.

En 2013, l'équipe de Vladimir Petoukhov, en s'appuyant sur les travaux de David Karoly et Brian Hoskins, a montré que les conditions propices à la situation d'un guide d'ondes pour ondes stationnaires de Rossby surviennent surtout en été. Durant cette saison, le jet-stream est rarement un vent solitaire soufflant d'ouest en est. La plupart du temps, il alterne en fait entre deux couloirs, l'un situé au nord et le second au sud de sa latitude moyenne.

À l'aide de l'approximation WKB, les climatologues ont révélé que c'est précisément dans ces conditions de jet à «double chemin» que l'atmosphère peut se comporter comme un guide d'ondes pour les ondes de Rossby de courte longueur d'onde. L'amplitude de ces ondes est souvent faible, mais si une boucle initiale est créée lorsqu'une masse d'air se déplaçant d'ouest en est atteint les montagnes Rocheuses ou les Alpes, ou lorsque cette masse d'air rencontre un fort contraste de température de surface à la frontière entre la terre et l'océan, les ondes de Rossby peuvent s'amplifier rapidement grâce à l'AQR.

Comment savoir à l'avance si une AQR va se produire? Les conditions favorables au phénomène varient en fait d'une année sur l'autre. Elles dépendent surtout de la configuration nord-sud des variations de température dans la basse atmosphère – des données que les modèles climatiques anticipent correctement.

En 2017, nous avons montré que les conditions favorables à l'AQR avaient été de plus en plus souvent réunies au cours des dernières décennies. Les simulations indiquent que cette tendance est pilotée par l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre. Des facteurs naturels tels que les fluctuations du rayonnement solaire et les éruptions volcaniques, ainsi que des paramètres humains tels que la pollution atmosphérique au dioxyde de soufre notamment, ont également joué un rôle. Ces simulations, appelées CMIP5, sont le résultat d'une modélisation réalisée par plus de cinquante équipes dans le monde pour le dernier rapport du Giec.

Les températures enregistrées et les simulations montrent que le changement climatique réchauffe l'Arctique plus vite que le reste de l'hémisphère Nord; ce phénomène est connu sous le nom d'« amplification » arctique. Or une différence de température moins importante entre les latitudes moyennes et polaires ralentit le jet-stream et favorise donc l'installation de conditions météorologiques persistantes, associées au double cheminement du jet-stream et à l'AQR.

LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE EN CAUSE

Cette tendance à la hausse contribue à expliquer la vague d'événements météorologiques estivaux extrêmes et de longue durée que l'on a observée autour de l'hémisphère Nord au cours des deux dernières décennies. Des scientifiques ont récemment montré que les conditions de l'AQR étaient liées à la vague de chaleur européenne de 2003, aux feux de forêt de 2010 en Russie et aux inondations consécutives au Pakistan, à la sécheresse qui a frappé les États-Unis en 2011, ainsi qu'aux incendies de forêt de Californie en 2015 et ceux d'Alberta en 2016. On peut ajouter à cette liste les feux de forêt sans précédent de Californie en 2018. Les changements climatiques causés par l'homme ont accru la probabilité de ces calamités météorologiques d'environ 50% au cours des dernières décennies.

Au vu de ce qui précède, il semblerait que les épisodes météorologiques extrêmes ne feront qu'empirer. Des principes physiques de base laissent penser que c'est bien ce qui va se passer. Par exemple, une atmosphère plus chaude retient davantage d'humidité et déverse ensuite plus de pluies torrentielles. Et une planète plus chaude signifie plus de vagues de chaleur,

intenses et longues. Mais qu'en est-il de l'onde stationnaire et de l'AQR?

«Les prédictions sont difficiles, surtout en ce qui concerne l'avenir», auraient dit le physicien Niels Bohr et par la suite la légende du baseball Yogi Berra. En 2018, nous avons analysé comment les événements associés à l'AQR ont des chances d'être altérés par le changement climatique. Nous nous attendions à ce que la tendance à la hausse continue avec la même vigueur. Mais ce n'est pas ce que nous avons découvert.

Les experts du Giec et des simulations CMIP5 envisagent l'avenir du climat selon différents scénarios, du plus optimiste où les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) sont stoppées dès aujourd'hui à un monde qui s'entête à rejeter de plus en plus de CO₂. En partant de ce dernier scénario qualifié de *business as usual*, nous avons conclu que les chances de voir émerger les conditions propices à l'AQR allaient stagner jusqu'en 2050... avant de réaugmenter ensuite.

Ce basculement de régime résulte d'une autre activité humaine participant au changement climatique : les polluants atmosphériques comme le dioxyde de soufre, émis par exemple par la combustion du charbon. Sous forme d'aérosols, ces polluants dérivent dans l'atmosphère.

Cette pollution a été responsable des pluies acides dans les années 1950 à 1970 aux États-Unis. La loi sur la lutte contre la pollution atmosphérique (Clean Air Act) a alors imposé aux industriels d'équiper les cheminées d'épurateurs afin d'éliminer le dioxyde de soufre des émissions. Cela a sauvé des forêts, des lacs et des cours d'eau, mais a aussi contribué à accélérer le réchauffement climatique à partir des années 1970, car ces particules réfléchissent la lumière du soleil dans l'espace : plus rares dans le ciel, elles ont moins rempli cette fonction.

Une grande partie du reste du monde – et surtout la Chine – fonctionne encore avec d'anciennes pratiques industrielles. Le scénario habituellement envisagé par le Giec suppose que des pays comme la Chine continueront à brûler du charbon, contribuant ainsi à une augmentation des émissions de CO₂ qui en ferait plus que tripler le niveau préindustriel d'ici à la fin du XXI^e siècle. Le scénario suppose toutefois que ces industries installeront des épurateurs ces prochaines décennies.

Cela entraînera une réduction spectaculaire des aérosols d'ici au milieu du siècle, et accélérera le réchauffement. L'effet sera particulièrement important aux moyennes latitudes en été, lorsque la lumière du soleil est maximale ; une grande partie ne sera plus réfléchi. Dans certaines simulations numériques, le réchauffement

estival des latitudes moyennes est si notable qu'il dépasse le réchauffement de l'Arctique. L'amplification arctique diminue voire s'arrête. Cela stabiliserait voire réduirait l'AQR, et finalement adoucira le jet-stream.

Cette évolution semble être une bonne nouvelle. Mais il s'agit en réalité d'un pacte faustien. L'effet positif quasi immédiat se paye à long terme. Au milieu du siècle, les aérosols auront presque tous disparu et, à partir de ce moment, la hausse des gaz à effet de serre pourra livrer tout son potentiel en termes d'élévation des températures. Une fois encore, la hausse s'accélérera dans la région polaire. L'amplification arctique reprendra et les événements liés à l'AQR – les régimes climatiques durables, intenses, chauds, secs et humides – se multiplieront à nouveau. À la fin du siècle, ils seront environ 1,5 fois plus fréquents qu'aujourd'hui. Le changement sera particulièrement marqué en été, dans les latitudes moyennes. Or c'est là que vivent la plupart des populations et où l'on fait pousser de nombreuses cultures, dont beaucoup résistent mal à la canicule.

Y a-t-il une issue ? Si le monde agit maintenant et s'engage vers une diminution significative des émissions de carbone dans l'atmosphère, nous pouvons encore éviter un réchauffement catastrophique de 2 °C, ce qui nous épargnerait probablement une aggravation de l'AQR. La voie la plus sûre (et la plus économique) consiste à limiter immédiatement l'usage de combustibles fossiles et les autres activités humaines qui enrichissent l'atmosphère en gaz à effet de serre.

LE FUTUR EST ENTRE NOS MAINS

Le monde doit parfois prendre des décisions en dépit des incertitudes. Certaines simulations indiquent une augmentation beaucoup plus importante (plus de trois fois) du nombre d'événements AQR, tandis que d'autres montrent en réalité une diminution. La disparité des résultats provient en grande partie des différentes façons dont les modèles climatiques traitent les aérosols. Les prévisions finiront-elles par converger ? Nous l'ignorons. On peut soutenir que, compte tenu de l'incertitude et du risque potentiel, si le pire des scénarios survient, la solution la plus sage consiste à réduire fortement les émissions.

Bien entendu, il serait utile de réduire les incertitudes. Cela revient, au moins en partie, à améliorer notre compréhension de la physique. En l'occurrence celle des aérosols et de la façon dont ils diffusent le rayonnement solaire constitué... d'ondes électromagnétiques. Encore une fois, cela requiert de comprendre la physique des ondes. La boucle est bouclée. ■

LA PROBABILITÉ DES CALAMITÉS MÉTÉOROLOGIQUES A AUGMENTÉ D'ENVIRON 50 %

BIBLIOGRAPHIE

M. E. MANN ET AL., *Projected changes in persistent extreme summer weather events: The role of quasi-resonant amplification*, *Science Advances*, vol. 4(10), article eaat3272, 2018.

D. COUMOU ET AL., *The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation*, *Nature Communications*, vol. 9, article 2959, 2018.

M. E. MANN ET AL., *Influence of anthropogenic climate change on planetary wave resonance and extreme weather events*, *Scientific Reports*, vol. 7, article 45242, 2017.

J. MASTER, *Le jet-stream polaire se dérègle-t-il ?*, *Pour la Science*, n° 449, pp. 56-63, mars 2015.