

boîte, mais «fuite» un peu au niveau de chaque mur. Bienvenue dans le monde étrange de la mécanique quantique.

La physique à l'œuvre sur cet exemple à une dimension ressemble à ce qui se produit à trois dimensions dans le cas du guide d'ondes – tel un câble coaxial. L'astuce mathématique qui permet de résoudre les équations qui décrivent ces objets, est connue sous le nom d'approximation WKB (née en 1926 sous la plume de Gregor Wentzel, Hendrik Kramers et Léon Brillouin, et utilisée dans divers contextes en physique quantique).

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 bloquées (ou stationnaires) et aux longueurs d'onde assez courtes (correspondant environ à la largeur de la partie continentale des États-Unis, soit un huitième à un sixième du tour complet de l'hémisphère Nord).

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 – à l'instar d'un électron dans une boîte. Dans cette situation, les ondes s'amplifient en raison de l'AQR. Immobilisé, le serpent d'air aux dimensions continentales crache alors son venin dans les crêtes et les creux et entraîne des calamités météorologiques qui perdurent

situation d'un guide d'ondes pour ondes stationnaires de Rossby surviennent surtout en été. Lors de 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, l'équipe de Vladimir Petoukhov a montré 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 généralement faible: les boucles ne s'étendent pas très loin au nord ou au sud. Mais si une boucle initiale est engendrée 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 au mécanisme de l'AQR.

LES CONDITIONS FAVORABLES À L'AQR ONT ÉTÉ PLUS FRÉQUENTES

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, mes collègues et moi avons montré que les conditions favorables à l'AQR avaient été de plus en plus souvent réunies au cours des dernières décennies. Les simulations climatiques indiquent que cette tendance est pilotée par l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre au fil du temps. 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. Les simulations, appelées CMIP5, sont le résultat d'une modélisation réalisée par plus de cinquante équipes dans le monde pour le dernier rapport du Giec (le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat).

Les températures enregistrées aux stations météorologiques et les simulations numériques 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. Des conditions qui sont associées au double cheminement du jet-stream et à l'AQR.

>

L'augmentation des gaz à effet de serre favorise l'amplification quasi résonante

plusieurs jours. L'approximation WKB, clé de la résolution de problèmes de guide d'ondes en mécanique quantique, est tout aussi utile pour comprendre le fonctionnement des ondes de Rossby dans cette situation.

Tout cela posé, il est facile de voir en quoi le changement climatique influe sur les ondes stationnaires, qui entraînent des épisodes météorologiques extrêmes. En 2013, l'équipe de Vladimir Petoukhov s'est appuyée sur les travaux de David Karoly et Brian Hoskins et a montré que les conditions propices à la

➤ Cette tendance à la hausse contribue à expliquer la vague d'événements météorologiques estivaux extrêmes et de longue durée que l'on a observés 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 l'Oklahoma et d'autres régions des États-Unis en 2011, ainsi qu'aux incendies de forêt de Californie en 2015 et ceux d'Alberta en 2016. On peut maintenant 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.

QUELLE EST L'INFLUENCE DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE ?

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 grand physicien Niels Bohr et par la suite la légende du base-ball Yogi Berra. Dans un article publié en octobre 2018, mes collègues et moi 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 sous différents scénarios, du plus optimiste où les émissions de dioxyde de carbone (CO_2) sont stoppées dès aujourd'hui à un monde qui s'entête à rejeter de plus en plus de CO_2 . En partant de ce dernier scénario qualifié de *business as usual* (où l'on extrapole l'augmentation de CO_2 à partir des valeurs des dernières décennies), nous sommes parvenus à la conclusion 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 puise sa source dans un autre facteur humain, déterminant mais parfois négligé, du changement climatique : les polluants atmosphériques tels que le dioxyde de soufre, qui sont produits par la combustion du charbon et d'autres activités

industrielles. Ces polluants forment des particules nommées aérosols qui dérivent dans l'atmosphère et réfléchissent la lumière du soleil dans l'espace, refroidissant ainsi la Terre.

La pollution aux aérosols a été responsable des pluies acides dans les années 1950 à 1970 dans le nord-est des États-Unis. La loi américaine sur la lutte contre la pollution atmosphérique (Clean Air Act) imposait aux installations industrielles américaines d'équiper les cheminées d'épurateurs afin d'éliminer le dioxyde de soufre des émissions. Cela a

La pollution par les aérosols enrayerait l'aggravation de l'AQR jusqu'en 2050

permis de sauver des forêts, des lacs et des cours d'eau, mais en retour a mis en relief le rôle joué par les aérosols dans le climat. Les particules reflétant la lumière du soleil, leur raréfaction dans le ciel a contribué à accélérer le réchauffement climatique à partir des années 1970.

Une grande partie du reste du monde – et surtout la Chine, qui compte près de la moitié de toutes les centrales au charbon actuelles – fonctionne encore avec d'anciennes pratiques industrielles. Le scénario habituellement envisagé par le Giec suppose que des pays tels que la Chine continueront à brûler du charbon, contribuant ainsi à une augmentation des émissions de CO_2 qui en ferait plus que tripler le niveau préindustriel d'ici à la fin du XIX^e siècle. Le scénario suppose également, toutefois, que ces industries installeront des épurateurs au cours des 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 le phénomène