



1



2

Fleurs de tournesol (1) et graines rabougries (2) près de Golssen, en Allemagne, victimes de la canicule prolongée de 2018.

> du S un creux se déployait au-dessus du Pakistan et a apporté des inondations historiques.

En temps normal, l'amplitude des ondes de Rossby est limitée par l'énergie qu'elles irradient lorsqu'elles s'étendent vers le nord et le sud, et à mesure de leur progression vers l'est. Sous certaines conditions, toutefois, l'atmosphère peut se comporter comme un guide d'ondes. Imaginez une ligne d'axe est-ouest traversant le Canada en son centre et une autre parallèle qui passerait au sud des États-Unis. Une onde de Rossby sinueuse reste bloquée entre ces «murs» et perd peu d'énergie (le câble coaxial qui relie les antennes des toits aux téléviseurs est un autre exemple de guide d'ondes; les ondes électromagnétiques qui transmettent le signal de télévision sont en grande partie confinées dans la paroi cylindrique du câble et là aussi se propagent presque sans perte d'énergie). Ce confinement verrouille le jet-stream et les puissants systèmes de haute et basse pression.

Quand les ondes font du sur-place (comme c'est le cas avec les ondes stationnaires), les boucles enflent sous certaines circonstances. Ce phénomène, qui survient surtout en été, est nommé amplification quasi résonante (AQR). Il y a plusieurs années, Vladimir Petoukhov et ses collègues, à l'institut de Potsdam de recherche sur les effets du changement climatique, en Allemagne, ont montré que les conditions favorisant une AQR dépendaient de la forme du jet-stream. Or le réchauffement climatique aurait une influence sur la forme du jet-stream et donc sur l'AQR.

Pour comprendre pourquoi, il faut faire appel aux mêmes mathématiques qui ont été développées au début du xx^e siècle pour résoudre certains problèmes en mécanique quantique. J'aime particulièrement l'idée qu'il existe un lien entre la météorologie et ce champ de recherche. J'ai débuté ma carrière comme

physicien théoricien avant de m'intéresser aux sciences de l'atmosphère; cela me rassure donc de penser que les vieux manuels de mécanique quantique qui dorment dans ma bibliothèque sont toujours utiles dans mon travail.

Saisir en quoi les mathématiques d'une onde atmosphérique et d'un électron sont similaires va nous aider à comprendre pourquoi les sécheresses et les inondations s'aggravent. Imaginez un électron en physique classique et dressez des murs de très haute énergie autour de lui (à l'aide de champs magnétiques par exemple): vous l'aurez emprisonné à l'intérieur d'une boîte dont il ne pourra s'échapper. La particule sera condamnée à rebondir éternellement entre les parois.

DES SIMILITUDES AVEC LA PHYSIQUE QUANTIQUE

En mécanique quantique, les choses sont différentes. L'électron n'a plus de position bien définie. À la place, la probabilité de trouver l'électron en un endroit donné est déterminée par l'équation de Schrödinger, qui est une équation d'onde. Si vous placez un électron entre des murs de haute énergie, il existera donc une certaine chance de le trouver en chaque point de la boîte. Or cette probabilité est décrite par une courbe sinusoïdale, autrement dit par un S couché. Cela ne vous rappelle rien? L'électron se comporte à la fois comme une particule et comme une onde.

Quelque chose d'intéressant se produit lorsque les murs de la boîte sont de hauteur (c'est-à-dire d'énergie) modeste. Dans ce cas, l'électron a une probabilité faible mais non nulle de pénétrer les parois, et même de les traverser si elles ne sont pas trop épaisses. C'est l'«effet tunnel». C'est comme si vous lanciez une balle de tennis contre un vrai mur et qu'elle passait à travers. Finalement, l'électron est majoritairement confiné à l'intérieur de la

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