

➤ été le cas durant l'été 2018, les bulletins météo quotidiens se répètent, n'annonçant que pluies diluviennes ou canicules. Inondations record, sécheresses et feux de forêt surviennent alors.

Nous avons récemment montré que ces situations, où le jet-stream ondule et est comme paralysé, deviendront de plus en plus fréquentes en raison du réchauffement climatique, ce qui perturbera de façon répétée la météo de l'hémisphère Nord. Mais nous avons aussi prévu que, paradoxalement, la sévérité des cataclysmes pourrait marquer le pas pendant les prochaines décennies. Cela pourrait sonner presque comme une bonne nouvelle... sauf que, selon nos analyses, les événements extrêmes s'aggraveront à partir de 2050, en particulier l'été. La santé et la sécurité des gens seront davantage menacées, les dégâts causés par les orages seront de plus en plus coûteux et les cultures, dévastées par les intempéries, risqueront de ne plus suffire à nourrir une population mondiale toujours croissante.

D'où tirons-nous ces prévisions ? De la théorie des ondes et de la mécanique quantique. Oui, les mathématiques qui décrivent le comportement des électrons à petite échelle nous aident à dessiner le futur de l'atmosphère aux échelles globales. Elles indiquent que la multiplication des événements extrêmes, le plateau à venir et la nouvelle intensification qui s'ensuivra sont pilotés par un étrange compromis entre les concentrations de gaz à effet de serre provenant de combustibles fossiles brûlés et la pollution par le soufre provenant des cheminées industrielles. Elles soulèvent aussi la question de savoir si la réduction des émissions empêchera bien le jet-stream de causer des ravages, ce qui est loin d'être une certitude...

LES ONDES DE ROSSBY

Quelle est l'origine du jet-stream ? Ces vents se forment quand l'air chaud de surface des régions subtropicales remonte vers le nord et rencontre l'air froid de surface en provenance des pôles, ce qui se produit approximativement sur le continent américain à la frontière qui sépare les États-Unis et le Canada, et au niveau de la Scandinavie en Europe. Ils soufflent à 10 kilomètres d'altitude à l'interface de la troposphère (la couche la plus basse de l'atmosphère) et de la stratosphère.

Plus l'écart thermique est marqué entre l'air subtropical et l'air polaire, plus le jet-stream est vigoureux. En été, les différences de température sont moindres qu'en hiver et le jet-stream s'affaiblit. Comme une voile qui faseye sous un vent faible, le jet-stream forme alors plus facilement des ondulations nord-sud.

SI LE JET-STREAM EST AFFAIBLI, SES SINUOSITÉS PEUVENT CALER, D'OÙ DES SITUATIONS DE BLOCAGE

Mais pourquoi ces lacets se forment-ils qu'en certains endroits ? Le jet-stream est en réalité influencé par une série de larges ondes qui circulent dans l'atmosphère, créées naturellement par la rotation de la Terre dans l'air. Il s'agit des ondes de Rossby, du nom du météorologue suédo-américain Carl-Gustaf Rossby, le premier à expliquer dans les années 1930 la physique à grande échelle de l'atmosphère. Ces ondes existent aussi dans les océans.

Les ondes de Rossby atmosphériques s'étendent sur des centaines de kilomètres et se meuvent d'ouest en est dans l'hémisphère Nord. Quand la différence de température entre les masses d'air décroît en été, elles ont tendance à se déformer et leur migration vers l'est ralentit. En toute saison, le jet-stream adopte la forme et la trajectoire des ondes de Rossby.

D'autres ondes se propagent à travers l'atmosphère et les océans. Par exemple, des ondes de gravité naissent d'une perturbation temporaire entre la gravité, qui tire l'atmosphère vers le bas, et d'autres forces qui la poussent vers le haut, comme quand une montagne fait s'élever les vents incidents. Parmi ces ondes, celles dites « de Kelvin » se produisent dans le Pacifique dans un couloir étroit situé à cheval sur l'équateur. Elles y voyagent d'ouest en est, réchauffent et refroidissent à intervalles réguliers les eaux de surface, et constituent un ingrédient essentiel du phénomène climatique El Niño.

Les boucles du jet-stream engendrent des systèmes météorologiques locaux avançant vers l'est de façon synchrone avec elles. Ce sont les H (pour *high*) et L (pour *low*) des cartes météorologiques, qui pointent des zones de haute et basse pression. Une zone de haute pression coïncée dans un sommet du S (on parle de crête) tourne dans le sens des aiguilles d'une montre et apporte en été un temps sec et chaud. Un système dépressionnaire niché dans le bas du S (ou creux) tourbillonne en sens inverse et engendre un temps humide et frais. Si le jet-stream est affaibli, il peut « caler » (l'onde est stationnaire) : les systèmes météorologiques de haute et basse pression font du surplace, brûlant les terres sous-jacentes ou causant d'incessantes pluies torrentielles – c'est ce qui est arrivé avec l'ouragan Harvey, au Texas notamment, et l'ouragan Florence au-dessus du centre-est des États-Unis.

UN FACTEUR D'AGGRAVATION

Les événements météorologiques extrêmes surviennent majoritairement quand les boucles des ondes de Rossby, et donc celles du jet-stream, sont fortement amplifiées. En effet, les systèmes de haute et basse pression sont d'autant plus



En 2010, de graves inondations ont submergé la ville de Khairpur Nathan Shah, au Pakistan. Elles résulteraient d'un effet atmosphérique nommé « amplification quasi résonante » (AQR).

marqués que les crêtes et les creux s'éloignent de la trajectoire moyenne. Dans cette configuration où l'onde est stationnaire, le système de haute pression stagne. C'est ce qui a causé en juillet 2018 la canicule du sud-ouest des États-Unis et les inondations simultanées au nord-est du pays. Un autre exemple date de juillet 2010 en Asie: tandis qu'une crête se développait au-dessus de la Russie, engendrant records de chaleur, sécheresse et feux de forêt, plus en aval 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. Cependant, l'atmosphère se comporte parfois 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. Ce confinement verrouille le jet-stream et les puissants systèmes de haute et basse pression qui y sont liés.

Quand les ondes font du surplace, les boucles peuvent enfler. Ce phénomène, surtout estival, est une 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 développées au

début du xx^e siècle pour résoudre certains problèmes en mécanique quantique. L'idée qu'il existe un lien entre la météorologie et ce champ de recherche qui semble très éloigné m'est particulièrement séduisante, sachant que j'ai entamé ma carrière comme physicien théoricien.

Saisir en quoi les mathématiques d'une onde atmosphérique et d'un électron sont similaires éclaire 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: 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.

BULLETIN MÉTÉO QUANTIQUE

En mécanique quantique, les choses sont différentes. L'électron n'a pas de position bien définie: la probabilité de le trouver en un endroit donné est déterminée par l'équation de Schrödinger, une équation d'onde. Placé entre des murs de haute énergie, un électron a une probabilité de se trouver en chaque point de la boîte. Or cette probabilité est décrite par une courbe sinusoïdale, autrement dit par... un S couché.

Étonnamment, lorsque les murs de la boîte sont de hauteur (c'est-à-dire d'énergie) modeste, l'électron a une probabilité faible, mais non nulle, de traverser les parois. C'est l'« effet tunnel ». L'électron est ainsi majoritairement confiné à l'intérieur de la boîte, mais « fuite » un peu au niveau de chaque mur.

La physique à l'œuvre sur cet exemple à une dimension ressemble à ce qui se produit en trois dimensions dans le cas du guide d'ondes. On résout les équations décrivant ces objets