



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, À L'ORIGINE DU MAUVAIS TEMPS

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 où se déroulent les événements météorologiques) 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.

Mais pourquoi ces lacets se forment-ils en certains endroits et pas en d'autres? Le jet-stream est en réalité influencé par une série de

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/Oscillation australe (l'oscillation australe est une variation périodique des pressions mesurées d'un côté et de l'autre du Pacifique; quand l'écart entre ces deux pressions est faible, un événement El Niño se déclenche généralement).

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 coincée 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» et ne plus progresser vers l'est – une configuration dite d'onde stationnaire. Les systèmes météorologiques de haute et basse pression font alors du sur-place, brûlant les terres sous-jacentes ou causant d'incessantes pluies torrentielles et inondations – 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 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 (on parle alors de situation de blocage). C'est ce qui a causé en juillet 2018 la canicule du sud-ouest des États-Unis et les inondations simultanées survenues dans le coin nord-est du pays. Un autre exemple classique est ce qui s'est passé en 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 ➤

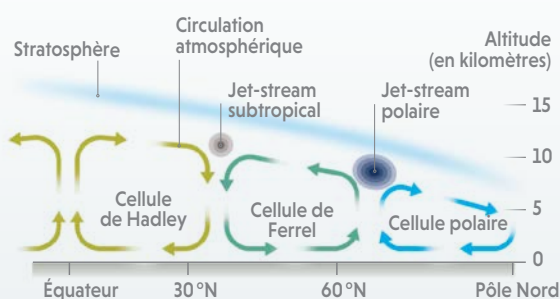
Si le jet-stream est affaibli, ses sinuosités peuvent caler, d'où des situations de blocage

larges ondes qui circulent dans l'atmosphère, créées naturellement par la rotation de la Terre dans le fluide qu'est l'air. Il s'agit des ondes de Rossby, nom donné en l'honneur du météorologue suédo-américain Carl-Gustaf Rossby, qui fut 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 CALAMITÉS MÉTÉOROLOGIQUES FIGÉES SUR PLACE

Le jet-stream pilote la météorologie de l'hémisphère Nord. Quand il ondule, il peut créer des zones de haute pression qui provoquent canicules et pluies torrentielles. Les fortes ondulations peuvent être bloquées sur place, ce qui prolonge les conditions difficiles pendant plusieurs jours, en particulier en été. Curieusement, la physique qui préside au phénomène est analogue à celle qui régit la matière à petite échelle, c'est-à-dire la mécanique quantique.



Le jet-stream s'enroule autour de la Terre

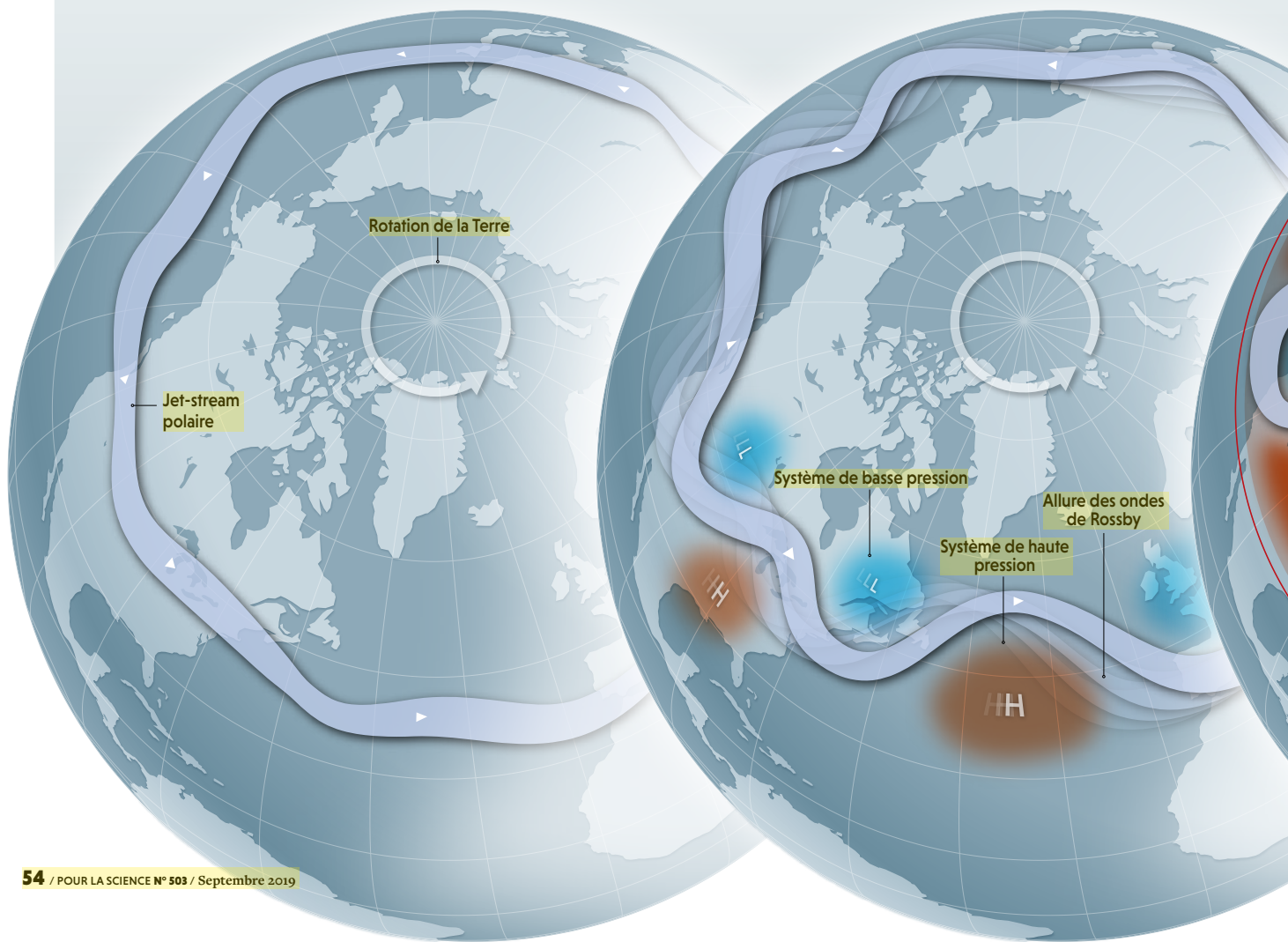
Les jet-streams soufflent entre 30° et 60° de latitude environ, aux frontières des cellules de circulation atmosphérique (voir ci-dessus). Le jet-stream polaire de l'hémisphère Nord va d'ouest en est autour du globe, parfois selon une trajectoire quasi rectiligne et d'autres fois en ondulant légèrement (ci-dessous). Les systèmes météorologiques tendent à suivre ce mouvement.

UN GUIDE D'ONDES DANS LE CIEL

Le guide d'ondes atmosphérique qui piège les ondes de Rossby est mathématiquement similaire à un guide d'ondes qui emprisonnerait un électron. En physique classique, un électron placé à l'intérieur d'une boîte aux murs hauts (représentant des barrières énergétiques élevées) se comporte comme une particule et rebondit d'une paroi à l'autre (A). Mais en physique quantique, un électron se comporte comme une onde piégée dans un guide d'ondes ; il a alors une probabilité non nulle de se trouver à l'extérieur de la boîte (B). Toutefois, plus les murs sont hauts, moins il y a de chance que cet effet tunnel se produise. Le phénomène est similaire à celui où les ondes de Rossby, associées à un jet-stream très sinueux, restent piégées dans un guide d'ondes atmosphérique, ce qui inflige aux continents chaleur ou pluies persistantes.

Les centres de pression enflent

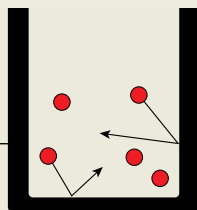
En été, des ondulations prononcées du jet-stream créent des systèmes de basse pression (L pour low) qui apportent de l'air froid et humide, et des systèmes de haute pression (H pour high) amenant de l'air chaud et sec. Il arrive que le jet-stream suive un motif ondulant qui se répète (ci-dessous), qui épouse la forme des ondes de Rossby créées dans l'atmosphère par la rotation de la Terre. Le motif et les conditions météorologiques associées progressent d'ouest en est.



A Physique classique

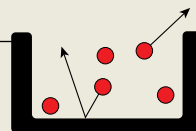
Les murs hauts représentent des barrières d'énergie

Les électrons sont piégés dans la boîte



Murs de plus basse énergie

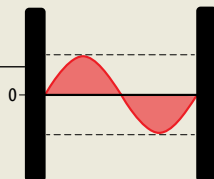
Les électrons peuvent s'échapper grâce à leur énergie propre



B Physique quantique

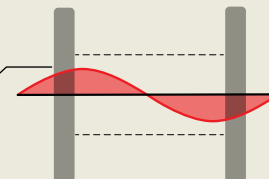
Les murs de haute énergie agissent comme un puissant guide d'ondes

Les électrons sont des ondes qui ont une faible chance de traverser les murs



Les murs de faible énergie agissent comme un guide d'ondes ténu

Les électrons ont une probabilité notable de se trouver à l'extérieur de la boîte

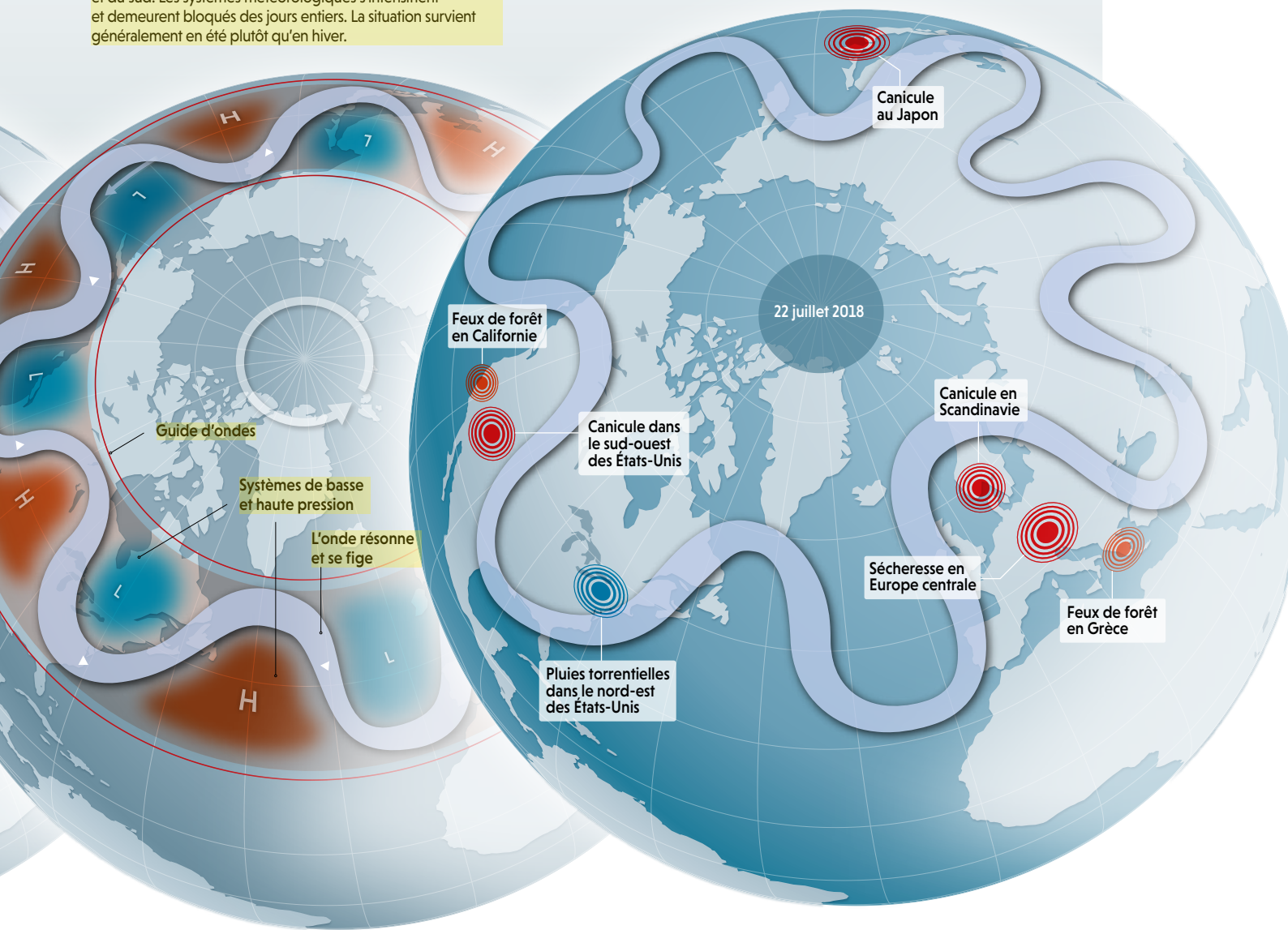


Résonance orageuse

Des ondes de Rossby de grande amplitude, et les sinuosités du jet-stream qui les suivent, peuvent rester bloquées et former une onde stationnaire. Il arrive en outre que l'atmosphère joue le rôle de guide d'ondes (lignes rouges), ce qui produit un effet de résonance et d'amplification sur le jet-stream. Ses ondulations s'accroissent à la fois en direction du nord et du sud. Les systèmes météorologiques s'intensifient et demeurent bloqués des jours entiers. La situation survient généralement en été plutôt qu'en hiver.

Un mauvais jour

En 2018, un jet-stream résonnant s'est retrouvé bloqué entre la fin du mois de juillet et le début d'août. Il a déclenché ou amplifié des conditions météorologiques extrêmes autour de la planète. À partir du 22 juillet, canicules et sécheresses ont touché plusieurs régions et ont attisé des feux de forêt, tandis que d'autres territoires subissaient de graves inondations.





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