

- > dans cette région mettent en lumière plusieurs structures distinctes, différenciant les naines blanches selon leur atmosphère (notamment entre celles constituées surtout d'hydrogène et celles dominées par l'hélium), leur masse ou leur statut d'étoile double.

Les données de *Gaia* soutiennent l'idée de nombreuses fusions et accrétions de galaxies

Par ailleurs, l'astrophysicien Hugh Van Horn avait postulé en 1968 qu'en se refroidissant, l'intérieur d'une naine blanche pourrait passer à l'état solide en se cristallisant progressivement, cette transition de phase libérant une chaleur latente qui modifierait le rythme de refroidissement de l'astre. Or l'une des structures du diagramme H-R dans le groupe des naines blanches est la signature, observée pour la première fois, de ce phénomène prévu il y a cinquante ans.

Nous avons déjà mentionné que les étoiles d'un amas, qui partagent une même origine, ont le même âge et la même composition chimique initiale. Mais chacune de ces étoiles évolue selon un rythme imposé par sa masse. En reportant sur un diagramme H-R les luminosités et les températures de toutes les étoiles appartenant à un même amas, on obtient une «isochrone»: un instantané des propriétés d'un ensemble d'étoiles de même âge. En comparant les isochrones d'amas d'âges différents, il devient ainsi possible de comparer les observations avec les modèles d'évolution stellaire. C'est la première fois que l'on dispose d'isochrones empiriques et précises pour une multitude d'amas. Cela suscitera sans aucun doute de précieuses améliorations de nos modèles de structure et d'évolution stellaires.

Les données de *Gaia* sont également précieuses pour étudier le halo extérieur et le voisinage de la galaxie. Grâce à l'analyse des étoiles contenues dans à peu près la moitié des amas globulaires (des pelotes compactes d'étoiles qui gravitent autour du centre galactique), dans les quelques galaxies sphéroïdales voisines et dans les deux Nuages de Magellan (deux galaxies satellites de la Voie lactée), on connaît désormais leurs

mouvements avec beaucoup plus de précision, même s'il subsiste des biais systématiques dans les données.

L'analyse des surdensités d'étoiles au sein du halo externe révèle pour la première fois une carte cinématique et structurelle des courants stellaires de la Voie lactée. Il existe en effet un réseau complexe de tels courants qui s'entrecroisent et qui présentent bien souvent une cohérence cinématique surprenante. Plusieurs de ces structures étaient inconnues jusqu'ici. Cette nouvelle carte accrédite bien le scénario selon lequel la Voie lactée a subi un nombre considérable de fusions et d'accrétions de galaxies mineures au cours de son histoire.

Les galaxies naines sphéroïdales voisines ne se trouvent pas toutes dans le même plan, même si toutes ont des orbites très inclinées par rapport au disque galactique. On a observé des asymétries et, peut-être, des traces d'un effet de marée chez certaines de ces galaxies. L'analyse du mouvement de ces galaxies satellites permet aussi d'estimer la masse de la Voie lactée.

UNE MISSION PROLONGÉE

Que nous réserve le futur? Il était prévu que la mission dure jusqu'en juillet 2019 avec une extension possible d'un an. Mais la mission s'est révélée moins gourmande en carburant que prévu et la mise en orbite a été très efficace. On prévoit aujourd'hui que le carburant s'épuisera vers 2024; c'est pourquoi l'ESA a déjà décidé d'étendre la mission à la fin 2020, et elle étudie la possibilité de la faire durer encore deux années supplémentaires. Plus on observe une étoile longtemps, meilleure est la détermination de son mouvement. Il devient également possible de mesurer toute déviation de ce mouvement par rapport à la ligne droite. Si tel est le cas, cela indique que l'étoile possède un compagnon – une autre étoile ou une planète. On estime que *Gaia* pourrait détecter ainsi près de 20 000 planètes comparables à Jupiter et 6 000 autres par la méthode du transit (la brève baisse de luminosité d'une étoile lorsqu'une planète vient à passer devant elle).

Pendant que la communauté scientifique dépouille les données de son second catalogue, le satellite *Gaia* poursuit ses observations quotidiennes. La prochaine livraison de données est prévue pour 2020. Ce troisième catalogue précisera les données existantes et inclura une nouvelle information: la classification de certains objets observés en étoiles, galaxies ou quasars, les température, gravité de surface, composition chimique et autres propriétés de multiples étoiles, ainsi que les orbites précises de certains corps du Système solaire. La communauté astronomique peut se réjouir, les données déjà fournies par *Gaia* et celles qui restent à venir lui donneront du travail pour des décennies. ■

BIBLIOGRAPHIE

P.-E. Tremblay et al., **Core crystallization and pile-up in the cooling sequence of evolving white dwarfs**, *Nature*, vol. 565, pp. 202-205, 2019.

A. Helmi et al., **The merger that led to the formation of the Milky Way's inner stellar halo and thick disk**, *Nature*, vol. 563, pp. 85-88, 2018.

T. Antoja et al., **A dynamically young and perturbed Milky Way disk**, *Nature*, vol. 561, pp. 360-362, 2018.

Archives de la mission Gaia :
<http://gea.esac.esa.int/archive/>



Septembre 2018 :
les incendies de forêt
font rage près de Delta,
en Californie, entretenus
par une vague de chaleur
et la sécheresse.

L'ESSENTIEL

> Quand le jet-stream perd sa forme rectiligne et se met à onduler, il peut provoquer pluies torrentielles et canicules. Si jamais il se fige dans cette configuration, le mauvais temps s'installe durablement.

> Les mathématiques issues de la mécanique quantique expliquent comment des

résonances dans l'atmosphère amplifient les ondulations et aggravent encore la météo.

> Avec le réchauffement climatique, on prévoit que ce phénomène d'amplification s'aggraverait à partir des années 2050.

L'AUTEUR



MICHAEL E. MANN
professeur de physique
de l'atmosphère et directeur
de l'Earth System Science
Center à l'université d'État de
Pennsylvanie, aux États-Unis

Le jet-stream, amplificateur météorologique

Le jet-stream, ce courant de vents violents qui circulent à haute altitude, est parfois responsable dans nos latitudes d'événements météorologiques extrêmes. Il est à craindre que le réchauffement climatique renforce cette tendance vers 2050. Avec à la clé vagues de chaleur et inondations à répétition.

Ces quinze dernières années, une longue litanie d'événements climatiques extrêmes a frappé le monde en été. En 2003, l'Europe a connu une vague de chaleur inédite, qui a fait 30 000 victimes. En 2010, des feux de forêt en Russie et des inondations au Pakistan ont causé des dégâts et un nombre de morts sans précédent. Un an plus tard, sous l'effet de la chaleur et la sécheresse sévissant aux États-Unis, les ranchers de l'État d'Oklahoma perdaient la moitié de leur bétail. Les feux de forêt de 2016 en Alberta ont constitué la catastrophe la plus coûteuse de l'histoire du Canada. Et l'été 2018 a été tristement célèbre pour les États-Unis : des températures dépassant 37°C ont été durablement atteintes dans le sud-ouest, des pluies abondantes et des crues ont inondé le coin nord-est du pays et la Californie a subi de terribles incendies. Le même été, des calamités météorologiques du même type ravageaient l'Europe et l'Asie.

Est-ce une coïncidence que ces catastrophes historiques surviennent de nos jours, alors que la Terre se réchauffe ? Mes collègues et moi pensons que non. Tous ces événements ont un point commun : ils se sont déroulés pendant que le jet-stream présentait une forme inhabituelle.

Le jet-stream (on dit aussi courant-jet) est un courant de vents violents qui soufflent d'ouest en est et font le tour de l'hémisphère Nord à une latitude moyenne d'environ 60°, celle du sud de la Scandinavie par exemple. Le jet-stream chemine parfois en ligne à peu près droite, mais il peut aussi onduler – il forme alors un S couché si on le dessine sur un planisphère. Par exemple, il peut traverser l'Amérique du Nord en remontant depuis l'océan Pacifique jusqu'à l'ouest du Canada, avant de bifurquer vers le sud en traversant le Midwest américain, puis de reprendre plein nord vers la Nouvelle-Écosse. Cette traversée, qui dure généralement quelques jours, apporte de l'air chaud au nord et de l'air frais au sud et déverse sur les territoires de la pluie ou de la neige, en particulier au niveau des coudes du S. Finalement, le jet-stream contrôle la météorologie quotidienne des latitudes moyennes.

Durant les événements extrêmes mentionnés, le jet-stream s'est étrangement comporté. Ses coudes se sont aventurés loin au nord et au sud, et ils ont comme calé – ils ont stoppé leur progression vers l'est. Or plus ces sinuosités sont larges, plus les conditions climatiques s'aggravent sous les pics et les creux du S couché. Et si en plus elles se figent, comme cela a été le cas durant l'été 2018, les bulletins météo se mettent à se ressembler de jour en jour, n'annonçant que pluies diluviennes ou canicules. Inondations record, sécheresses, vagues de chaleur et feux de forêt surviennent alors.



En 2010, de graves inondations ont submergé la ville de Khairpur Nathan Shah, au Pakistan. Elles puisaient leur source dans un effet atmosphérique nommé amplification quasi résonante.

Mes collègues et moi avons montré récemment 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 comme une bonne nouvelle – la malédiction continuera sans empirer. 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, ruinées 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, 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 ➤

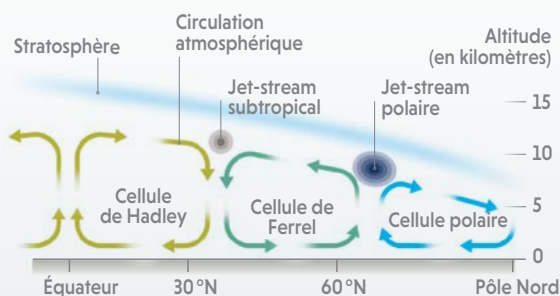
Si le jet-stream est affaibli, ses sinuosités peuvent caler, d'où des situations de blocage

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

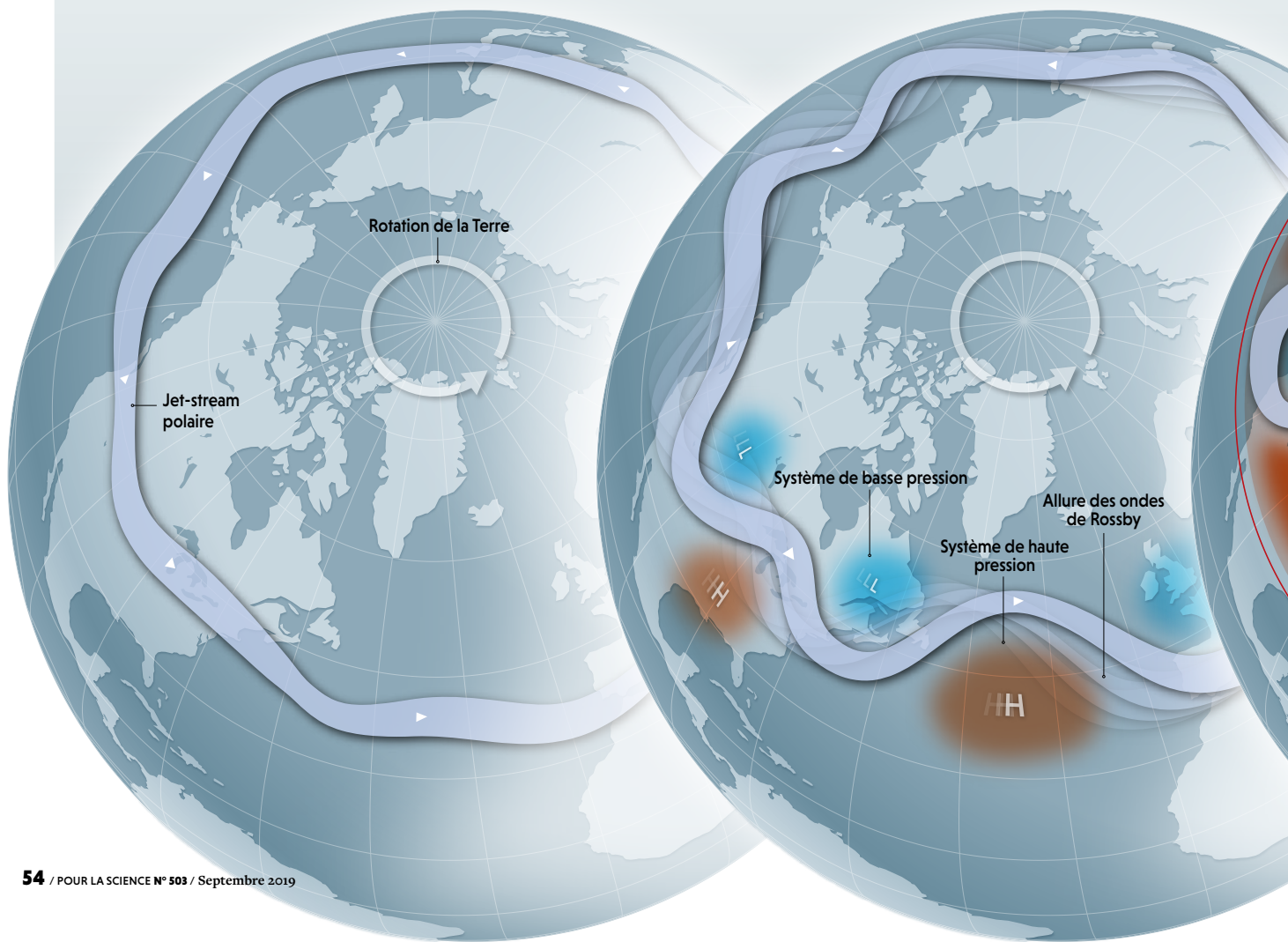
Les jet-streams soufflent entre 30° et 60° de latitude environ, aux frontières des cellules de circulation atmosphérique (voir ci-dessus). Le jet-stream polaire de l'hémisphère Nord va d'ouest en est autour du globe, parfois selon une trajectoire quasi rectiligne et d'autres fois en ondulant légèrement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

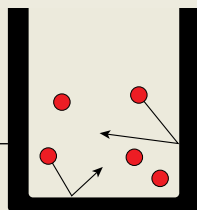
En été, des ondulations prononcées du jet-stream créent des systèmes de basse pression (L pour low) qui apportent de l'air froid et humide, et des systèmes de haute pression (H pour high) amenant de l'air chaud et sec. Il arrive que le jet-stream suive un motif ondulant qui se répète (ci-dessous), qui 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

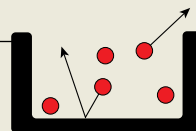
Les murs hauts représentent des barrières d'énergie

Les électrons sont piégés dans la boîte



Murs de plus basse énergie

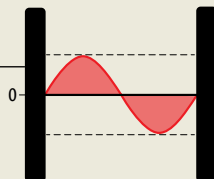
Les électrons peuvent s'échapper grâce à leur énergie propre



B Physique quantique

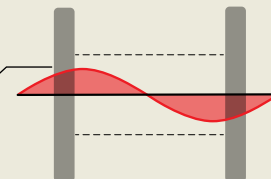
Les murs de haute énergie agissent comme un puissant guide d'ondes

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

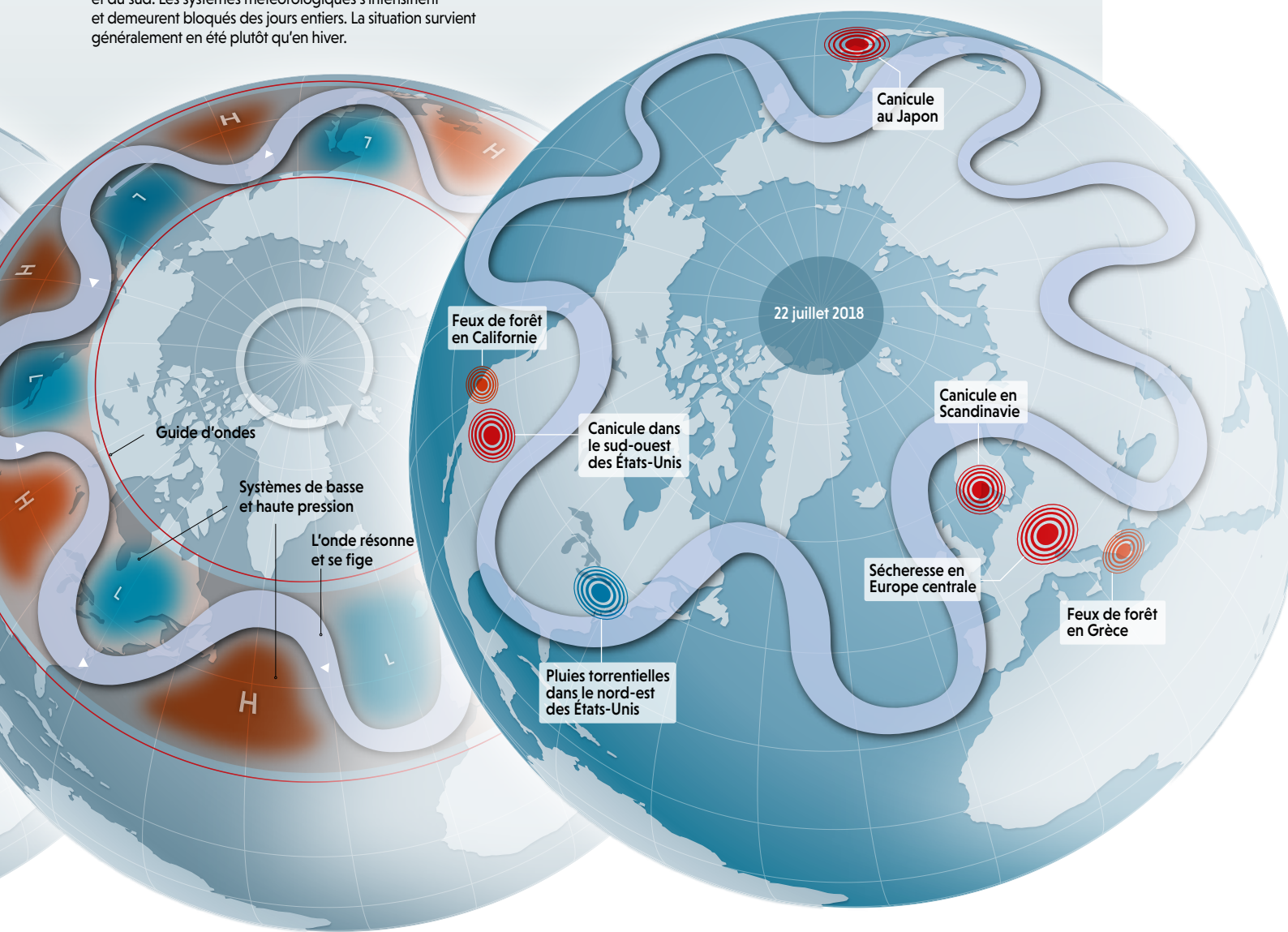


Résonance orageuse

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

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

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.

de l'AQR, voire le réduirait – et finalement adoucissait 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 de 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.

LE FUTUR EST ENTRE NOS MAINS

Y a-t-il une issue? Si le monde agit maintenant pour sortir de sa passivité 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 des événements 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 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 ne le savons pas encore. 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 – des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Encore une fois, cela requiert de comprendre la physique du comportement des ondes. La boucle est bouclée. ■



© Muséum national d'Histoire naturelle - Tin-Yam Chan



exposition
3 avril 2019 —
5 janvier 2020

#ExpoOcean

Océan

UNE
PLONGÉE
INSOLITE

GRANDE GALÉRIE
DE L'ÉVOLUTION

POUR LA
SCIENCE

Dompter les photons grâce à la topologie

Les performances des techniques de communication fondées sur des systèmes optiques plafonnent. Mais un domaine de recherche récent, la photonique topologique, ouvre la voie à un nouvel élan d'innovations.

© M. A. Bandres et al., Science, vol. 359, eaar4005, 2018

En 2018, Mordechai Segev et des collègues ont mis à profit des propriétés dites topologiques pour guider la lumière (*en rouge sur ce schéma*) sur les bords d'un réseau de résonateurs optiques annulaires mesurant 125 micromètres de côté, et ainsi obtenir une émission de lumière laser (*en haut à gauche*).

L'ESSENTIEL

> Grâce aux outils mathématiques de la topologie, les physiciens expliquent des propriétés de conductivité exotiques de certains matériaux, où les électrons circulent uniquement à leur surface et dans une unique direction.

> L'enjeu de la photonique topologique est de s'inspirer

de ces matériaux pour concevoir des systèmes où la lumière ne peut se propager que dans une seule direction.

> Il serait alors possible de réaliser des micro-isolateurs optiques, des éléments indispensables pour fabriquer des supercalculateurs optiques très performants.

LES AUTEURS



OLIVIER BLEU
doctorant
à l'institut Pascal,
à Clermont-Ferrand



DMITRY SOLNYSHKOV
enseignant
chercheur à
l'institut Pascal



GUILLAUME MALPUECH
directeur de
recherche du CNRS
à l'institut Pascal

