

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 physicien Niels Bohr et par la suite la légende du baseball Yogi Berra. En 2018, nous 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 selon différents scénarios, du plus optimiste où les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) sont stoppées dès aujourd'hui à un monde qui s'entête à rejeter de plus en plus de CO₂. En partant de ce dernier scénario qualifié de *business as usual*, nous avons conclu 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 résulte d'une autre activité humaine participant au changement climatique : les polluants atmosphériques comme le dioxyde de soufre, émis par exemple par la combustion du charbon. Sous forme d'aérosols, ces polluants dérivent dans l'atmosphère.

Cette pollution a été responsable des pluies acides dans les années 1950 à 1970 aux États-Unis. La loi sur la lutte contre la pollution atmosphérique (Clean Air Act) a alors imposé aux industriels d'équiper les cheminées d'épurateurs afin d'éliminer le dioxyde de soufre des émissions. Cela a sauvé des forêts, des lacs et des cours d'eau, mais a aussi contribué à accélérer le réchauffement climatique à partir des années 1970, car ces particules réfléchissent la lumière du soleil dans l'espace : plus rares dans le ciel, elles ont moins rempli cette fonction.

Une grande partie du reste du monde – et surtout la Chine – fonctionne encore avec d'anciennes pratiques industrielles. Le scénario habituellement envisagé par le Giec suppose que des pays comme la Chine continueront à brûler du charbon, contribuant ainsi à une augmentation des émissions de CO₂ qui en ferait plus que tripler le niveau préindustriel d'ici à la fin du xx^e siècle. Le scénario suppose toutefois que ces industries installeront des épurateurs ces 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 voire réduirait l'AQR, et finalement adoucirait 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 liés à 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.

Y a-t-il une issue ? Si le monde agit maintenant 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 de l'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 FUTUR EST ENTRE NOS MAINS

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 l'ignorons. 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 constitué... d'ondes électromagnétiques. Encore une fois, cela requiert de comprendre la physique des ondes. La boucle est bouclée. ■

LA PROBABILITÉ DES CALAMITÉS MÉTÉOROLOGIQUES A AUGMENTÉ D'ENVIRON 50 %

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.

L'ESSENTIEL

● Les tornades de feu, combinaisons de tornade et d'incendie, sont extrêmement rares mais très dangereuses.

● Leur formation nécessite à la fois un grand incendie et un mouvement de rotation atmosphérique, que le feu

va concentrer sous la forme d'un tube d'air tourbillonnant vertical.

● Les chercheurs commencent à bien comprendre la physique du phénomène, mais restent incapables de prévoir son apparition.

L'AUTEUR



JASON FORTHOFFER
pompier et ingénieur, chercheur
au laboratoire des sciences
du feu de Missoula (Montana,
États-Unis), au Service forestier
des États-Unis

Dans un tourbillon d'air et de feu

Lorsqu'un incendie se combine à des vents tournoyants, une tornade de feu se forme. Même si les chercheurs comprennent de mieux en mieux la physique de ces phénomènes dévastateurs, leur prévision reste un défi.

N

ous étions fin juillet 2018. De grands incendies dévastaient le sud-ouest de l'Oregon et le nord de la Californie (l'incendie dit «de Carr») et je venais en avion à la rencontre d'une unité de pompiers endeuillée: «L'un de mes pompiers est mort dans une tornade qui a projeté son

véhicule à des dizaines de mètres d'altitude», m'avait expliqué son chef. Une tornade? Oui, mais une tornade de feu!

Dix ans auparavant, j'avais été le témoin pour la première fois des conséquences d'une tornade de feu. Celle-ci s'était produite au cours du monstrueux incendie dit «des Indiens» qui avait fait rage dans la forêt domaniale de Los Padres, en Californie centrale, réduisant en cendres 329 kilomètres carrés de végétation. Un tourbillon de vent et de feu de plus de 300 mètres de diamètre s'était formé et s'était abattu sur une équipe de pompiers. Par chance, ils se trouvaient à ce moment-là sur une autoroute à deux voies, ce qui leur avait sauvé la vie. Quelques mètres plus loin, ils auraient été tués par les débris d'arbres et de végétaux arrachés partout par la tornade.

À mon arrivée sur le site, j'avais vu d'énormes branches de chêne gisant partout, sur un sol



Au laboratoire des sciences du feu de Missoula, dans le Montana, on crée des tornades de feu miniatures en mettant en rotation l'air aspiré au-dessus d'une cuvette d'alcool en feu.

➤ décapé. La scène m'avait impressionné et inquiété. Il était évident qu'une telle tornade risquait d'atteindre et de blesser des pompiers même dans un abri considéré comme sûr. On n'était pas passé loin de la catastrophe...

Afin de comprendre ce qu'est une tornade de feu, il faut se remémorer ce qu'est un feu de forêt ordinaire. Un tel phénomène naît de la rencontre entre une source de chaleur de température supérieure à 600 °C et une végétation inflammable. Une fois allumé, le feu prend la forme d'un front de flammes dépassant en hauteur la végétation qui se consume et poussant devant lui un mélange de gaz et d'air brûlant. Cette « vague de chaleur » de plusieurs centaines de degrés s'étend vers l'avant jusqu'à une distance qui peut excéder trois fois la hauteur des flammes. Prise dans la chaleur, la végétation subit une pyrolyse, c'est-à-dire une très rapide décomposition chimique due à l'effet thermique. Cela dégage un volume important de vapeur d'eau et de gaz inflammables, lesquels s'embrasent d'un seul coup, ce qui déplace le front vers l'avant, tandis qu'une colonne de convection plus ou moins verticale, selon le vent, surmonte l'incendie et emporte la fumée.

En fonction des écoulements d'air au voisinage de l'incendie, il peut alors arriver que des « tourbillons de feu » se forment. Ces colonnes de feu tournoyantes ont la taille de l'un de ces éphémères tourbillons de poussière que nous apercevons parfois. Une tornade de feu, en revanche, combine le feu et des vents tournoyants aussi violents que ceux d'une véritable tornade. Un tel phénomène est rare au point d'en être devenu quasi mythique.

PLUSIEURS DÉFINITIONS

En 2008, de retour à mon laboratoire, je m'étais lancé dans une recherche bibliographique. Plusieurs tornades de feu avaient bien été signalées, mais les informations disponibles étaient si rares que les chercheurs ne s'accordaient même pas sur la définition du phénomène. Certains l'associaient exclusivement à la formation d'un pyrocumulonimbus (étymologiquement un « nuage de pluie cumulé dû au feu »), c'est-à-dire l'un de ces nuages d'orage se formant à partir de la vapeur d'eau que libèrent les incendies en dévorant la végétation. Pour les tenants du lien entre tornade de feu et pyrocumulonimbus, il ne peut y avoir de véritable tornade de feu qu'en relation avec un pyrocumulonimbus.

Si l'on applique cette définition, la seule tornade de feu jamais documentée est celle apparue en 2003 lors d'un grand incendie près de Canberra, en Australie, et qui a dévasté une bande longue de quelque 25 kilomètres... Cette définition semblait toutefois trop restrictive

pour être utile aux pompiers. En adoptant la définition plus pragmatique de « tourbillon de feu accompagné de vents analogues à ceux d'une tornade », avec mon collègue Bret Butler, nous avons réuni toutes les informations disponibles dans un manuel et des formations destinées aux pompiers. Puis l'incendie de Carr s'est déclaré, et avec lui la tornade de feu meurtrière sur laquelle j'ai enquêté.

UN CHAMP DE BATAILLE

Le site ressemblait à un champ de bataille. Pour m'aider, j'avais recruté le météorologue Joshua Wurman. Nous n'avions jamais rien vu de tel. Des îlots entiers de maisons avaient été rasés. Les toitures et toutes sortes de débris jonchaient le sol. Plusieurs voitures avaient enchaîné des tonneaux. Déracinés ou cassés, les arbres avaient perdu leur écorce sous les assauts d'un vent transportant sable et cailloux. Trois pylônes métalliques de 30 mètres de haut s'étaient écroulés...

Nous avons estimé que des vents avaient soufflé ici à 265 kilomètres par heure. Cette vitesse signifie une tornade de niveau 3 sur l'échelle de Fujita (qui classe les tornades selon la vitesse des vents sur une échelle allant de 0 à 5). En Californie, seulement deux tornades normales de cette force sont documentées... Or la tornade de l'incendie de Carr n'était pas « normale » : il s'agissait d'une tornade de feu à l'intérieur de laquelle des gaz brûlaient à 1500 °C, tandis que sa base faisait plus de 300 mètres de diamètre pour une hauteur de 4800 mètres. Durant au moins 40 minutes, elle s'est déplacée lentement, laissant une traînée de destructions d'environ 1,5 kilomètre de long.

Selon les témoins, la tornade de feu s'est produite le soir du 26 juillet 2018, à l'occasion d'un feu si étendu et si intense qu'il avait créé des pyrocumulonimbus atteignant plus de 5 kilomètres d'altitude. Vers 17h30, les flammes ont soudainement foncé vers l'est, tuant un pompier au volant d'un bulldozer ainsi qu'un habitant resté prisonnier de son domicile. Alors que l'incendie s'approchait de la périphérie de la ville de Redding, il a donné naissance à plusieurs tourbillons de feu et a projeté des brandons à plus de 1,5 kilomètre en avant à travers la rivière Sacramento. Cela a déclenché plusieurs incendies secondaires à proximité de maisons. La situation est rapidement devenue chaotique.

Les débris emportés par le vent ont endommagé curieusement deux camions de pompier. Alors que ces deux lourds véhicules roulaient dans la même direction à 50 mètres de distance, l'un fut abîmé surtout du côté du conducteur, et l'autre surtout du côté passager, ce qui témoigne du mouvement rotatif de l'air.

**LA TORNADE DE FEU
FAISAIT PLUS
DE 300 MÈTRES
DE DIAMÈTRE ET
S'ÉLEVAIT JUSQU'À
4 800 MÈTRES**