

- ont mesuré la vitesse du vent et la distribution de la température du tourbillon de feu ainsi créé. Ils ont donc mis en évidence que le feu ne suffit pas en lui-même à engendrer un tourbillon de flammes: il faut un mécanisme qui mette l'air en rotation et un autre qui amplifie celle-ci.

LE RÔLE DE L'AIR

Une tornade de feu a essentiellement la même aérodynamique. De nombreux tourbillons se forment naturellement dans l'atmosphère. Ils sont engendrés par les vents tournant autour des montagnes ou longeant le sol, voire par des différences de pression dans l'atmosphère. Le feu, lui, joue deux rôles: il concentre la rotation et la fait monter (les gaz chauds s'élevant vite), ce qui aboutit à un étroit tube d'air et de flammes tournant autour d'un axe plus ou moins vertical.

Dans les premiers instants d'une tornade de feu, l'air chaud surmontant le feu aspire vers le haut l'air venu le remplacer à la base. Ce faisant, il rassemble des tourbillons atmosphériques préexistants. Certains de ces tourbillons sont initialement horizontaux, mais l'aspiration vers le haut tend à les redresser vers la verticale. Ensuite, l'air ascendant s'échauffe à mesure que brûlent les gaz qu'il contient.

La pression exercée par l'air entourant le tourbillon force aussi l'air chaud et léger de l'intérieur du tube de feu à s'élever; le tourbillon ou la tornade de feu s'étire ainsi le long de son axe et son diamètre diminue. Comme le moment cinétique (la quantité de mouvement de rotation) de la masse tournante est une quantité conservée, l'étiement de cette dernière a pour conséquence de faire tourner plus vite le contenu du tourbillon, effet comparable à l'accélération de la rotation d'une patineuse qui rapproche les bras de son corps.

Un tourbillon de feu qui arrive sur une zone en feu tend à s'étirer jusqu'à une hauteur considérable et à tourner très vite; lorsqu'il parvient au-dessus d'une zone déjà brûlée, il s'élargit et ralentit en prenant l'aspect d'un cylindre diffus de fumée. Les mêmes comportements valent pour les tornades de feu. Parfois, la masse en rotation est si large et tourne si lentement que les pompiers ne s'aperçoivent pas qu'il s'agit d'un tourbillon. Quant aux déplacements d'un tourbillon de feu, ils dépendent des vents ambiants et des détails du relief, mais il reste à comprendre de quelle façon précisément.

Howard Emmons et Shuh-Jing Ying avaient aussi montré que les tourbillons de feu conservent avec une remarquable efficacité leur énergie cinétique de rotation, ce qui les rend malheureusement assez persistants. À mesure que la rotation dans une tornade de feu s'accélère, deux forces radiales opposées s'intensifient: d'une part la force centrifuge, qui tire chaque parcelle d'air vers l'extérieur, d'autre part celle due à la basse pression régnant au centre du tourbillon, qui l'aspire

au contraire vers l'intérieur. L'équilibre entre ces deux forces limite le mouvement radial de l'air et donc la perte d'énergie cinétique par le tourbillon. Les feux ne présentant pas de rotation échangent, eux, à peu près dix fois plus d'énergie avec l'atmosphère environnante.

Ce mécanisme contribue aussi à rendre les tourbillons de feu plus minces et plus hauts que les feux non tournants. La stabilisation, par les forces radiales, des parois tournantes du tube de feu implique que, sauf à la base, pratiquement aucun air n'est aspiré à l'intérieur. Peu d'oxygène est donc disponible pour la combustion. Une partie des gaz combustibles doit donc remonter haut à l'intérieur du tube avant qu'il y en ait assez pour brûler.

Tout aussi dangereux est le fait que l'ascension rapide de gaz chauds et peu denses crée une très basse pression à la base du tourbillon. Le frottement de l'air contre le sol ralentit la rotation, ce qui réduit la force centrifuge poussant l'air vers l'extérieur. Comme l'aspiration vers l'intérieur du tube engendrée par la pression reste la même, de l'air rasant le sol s'engouffre dans la tornade de feu. L'effet produit est le même que celui qu'aurait un aspirateur géant, avalant de l'air et des débris enflammés à sa base, les tirant vers le haut à des vitesses extrêmes avant de les éjecter de façon imprévisible depuis des hauteurs considérables, ce qui déclenche des incendies secondaires à distance.

Malgré toutes nos nouvelles connaissances sur la physique des tornades de feu, nous ne savons toujours pas prédire où et quand l'une d'elles se produira. Au moins une chose est sûre: l'ingrédient essentiel à leur formation est l'existence d'une source de rotation importante.

L'ENDROIT IDÉAL

À cet égard, des études de cas nous ont montré que l'un des endroits les plus propices à la formation de tornades de feu se trouve du côté sous le vent d'une montagne. En contournant la montagne, le flux d'air crée des mouvements tourbillonnants en arrière du mont, comme dans l'écoulement d'une rivière immédiatement en aval d'un rocher. Si à ces tourbillons s'ajoute un incendie, ce dernier pourra rassembler tous ces mouvements rotatifs et les transformer en une tornade de feu.

Toutefois, la pratique nous a appris que des tourbillons de feu peuvent aussi apparaître sur un terrain plat et en l'absence de vent. Ainsi, un

LES TOURBILLONS DE FEU CONSERVENT ASSEZ BIEN LEUR ÉNERGIE DE ROTATION, D'OÙ LEUR PERSISTANCE



En novembre 2008, l'incendie de Corona Yorba Linda, en Californie, a créé un grand tourbillon de feu, une tornade de feu peut-être, qui a menacé les habitations.

grand tourbillon de feu apparu au Kansas a probablement été formé par la collision d'un front froid avec l'air ambiant chaud au-dessus d'un champ en feu. Et en 2007, Rui Zhou et Zi-Niu Wu, de l'université Tsinghua, à Pékin, ont montré que certaines configurations où plusieurs feux sont présents peuvent déclencher des courants d'air au sol et finir par leur imprimer une rotation. Or ces configurations peuvent apparaître spontanément à la faveur des sautes de feu, c'est-à-dire des incendies secondaires allumés par les brandons que beaucoup d'incendies projettent.

L'AIR FRAIS DE L'OcéAN

Après toutes ces considérations, sommes-nous en mesure de préciser l'origine de la rotation d'air qui a causé la terrible tornade de feu de l'incendie de Carr? Étant donné les nombreux tourbillons de feu qui ont précédé le phénomène, d'importants mouvements de rotation étaient sans doute présents dans le secteur. Natalie Wagenbrenner, de notre laboratoire de Missoula, s'est livrée à des simulations numériques de la météo de cette journée-là.

Son travail a montré que l'air frais et dense de l'océan Pacifique était poussé vers l'est et au-dessus du sommet d'une chaîne de montagnes situées à l'ouest de Redding. Cet air frais était beaucoup plus lourd que l'air chaud de la vallée de Sacramento, puisque l'aéroport de Redding a enregistré ce jour-là une température maximale de 45 °C! Par gravité, l'air froid marin s'est donc écoulé le long des flancs des montagnes vers le fond de la vallée. Cependant, curieusement, à l'endroit où la tornade de feu s'était formée, ces forts vents de surface semblaient avoir disparu.

Comment était-ce possible? En fait, nous avions affaire à l'équivalent atmosphérique du ressaut hydraulique subi par l'eau se déversant dans le lac en aval d'un barrage. On observe alors que la surface du plan d'eau calme est rehaussée (c'est le ressaut) par la formation et le maintien d'une vague déferlante stationnaire, qui marque la limite entre les écoulements. Or cette vague s'accompagne d'intenses mouvements tourbillonnaires.

De façon analogue, l'air froid et dense qui descendait à vive allure le flanc de la montagne a pénétré dans le bassin d'air chaud et calme de la vallée de Sacramento, engendrant un ressaut probablement responsable des puissants mouvements de rotation à l'origine de la tornade de feu de l'incendie de Carr (voir l'encadré pages 56 et 57).

Par ailleurs, Neil Lareau, de l'université du Nevada, et ses collègues ont proposé en 2018 que les pyrocumulonimbus de plus de 10 kilomètres d'altitude qui surmontaient l'incendie de Carr pendant que la tornade de feu s'est formée ont contribué aussi à étirer le tourbillon jusqu'à une grande altitude, tout en l'aminçant et en l'accéléralant.

Si les incendies de forêt continuent à s'intensifier, comme le laisse prévoir le réchauffement climatique, il se pourrait que nous soyons confrontés plus souvent à des tornades de feu. Espérons que de nouvelles recherches, combinées aux progrès de la prévision météorologique et de la puissance de calcul, nous permettront bientôt de préciser les conditions favorables à la formation d'une tornade de feu et d'alerter à temps les populations concernées. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. P. LAREAU ET AL.,
The Carr Fire vortex: A case of pyrotornadogenesis?,
Geophysical Research Letters,
vol. 45(23), pp. 13, 107-113
et 115, 2018.

J. M. FORTHOFFER ET
S. L. GOODRICK, Vortices and
wildland fire, dans P. A. Werth
et al. (dir.), *Synthesis of
Knowledge of Extreme Fire
Behavior*, vol. 1 for Fire
Managers, US Forest Service
Pacific Northwest Research
Station, novembre 2011.