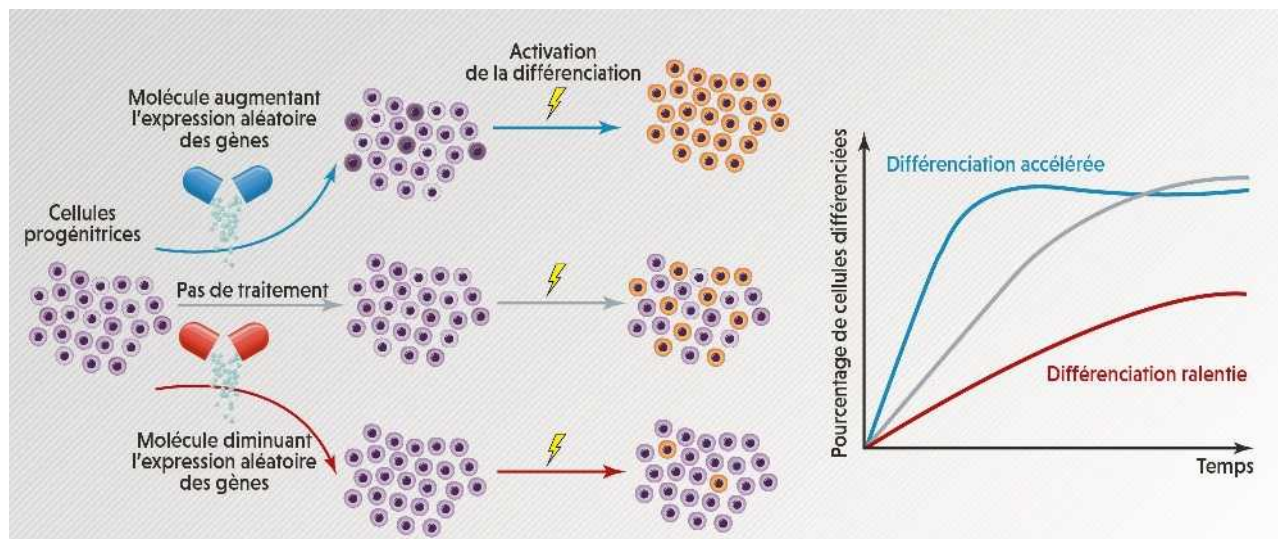


PLUS DE HASARD, PLUS DE DIFFÉRENCIATION

Dans une population cellulaire, l'expression des gènes est variable d'une cellule à l'autre. Mais lors de la différenciation, un pic de variabilité se produit au début du processus. L'équipe d'Olivier Gandrillon, à l'École normale supérieure de Lyon, avait montré ce phénomène en 2016 en suivant la transformation en globules rouges de cellules primaires (progénitrices) de sang de poulet. Cela suggérait que la variabilité augmentait la capacité des cellules à explorer l'espace constitué de l'ensemble des combinaisons d'expression de gènes et à y trouver une combinaison plus favorable et stable que les autres, qui correspondrait à l'état différencié. Encore fallait-il le prouver. C'est ce que l'équipe vient de faire : à l'aide de substances qui augmentent ou diminuent la variabilité de l'expression des gènes dans ces mêmes cellules, Olivier Gandrillon et ses collègues ont montré qu'augmenter cette variabilité accélère la différenciation, et que la diminuer ralentit la différenciation. Un modèle mathématique du processus a fini de les convaincre que la modulation de la différenciation était bien consécutive à celle de la variabilité d'expression induite par les substances.



Mon interprétation est différente, car je pense qu'il faut utiliser les principes darwiniens de la variation aléatoire et de la sélection pour comprendre l'embryogenèse et le fonctionnement cellulaire.

Dans mon dernier livre, je vais beaucoup plus loin dans la critique de la génétique en m'appuyant sur l'histoire et l'épistémologie de cette discipline. Je ne sais pas si cela me sert ou me dessert, mais je pense que le travail de réflexion théorique et épistémologique est indispensable au progrès de la biologie. Il va de pair avec la recherche expérimentale, même si aujourd'hui la majorité des biologistes sont uniquement des expérimentateurs.

En faisant référence à une théorie anarchiste, ne craignez-vous pas d'être accusé de diffuser des théories pseudoscientifiques ?

Cette référence était déjà présente dans mon premier livre, *Ni Dieu ni gène*. Les allers-retours entre la biologie et les sciences sociales avec utilisation croisée de métaphores ont toujours existé. Au XIX^e siècle, Rudolph Virchow, l'un des fondateurs de la théorie cellulaire, parlait du « comportement social » des cellules au sein de « sociétés cellulaires » et Claude Bernard n'hésitait pas à comparer ces dernières à des systèmes économiques. Dans l'autre sens, les sociologues parlent de « corps social ». Puis

au XX^e siècle, les biologistes moléculaires ont massivement utilisé des métaphores autoritaires et hiérarchiques.

Évidemment, le mot anarchie est souvent compris de façon très négative, il est assimilé à un chaos d'où rien de positif ne peut sortir. Pris dans ce sens, je comprends que le titre de mon livre puisse choquer. Pour ma part, je me réfère à l'étymologie du terme qui vient du préfixe privatif *an*, lequel signifie « sans » en grec, et de *arké*, lequel peut être à la fois traduit par « origine », « pouvoir » et « commandement ». Or le rôle dévolu par la biologie moderne à l'information contenue dans le génome correspond bien à celui d'une *arké* : antérieure à l'être vivant, elle dirige sa genèse et son fonctionnement.

Dans la théorie que je développe, les cellules individuelles n'ont pas besoin des instructions contenues dans le génome pour changer d'état, elles le font grâce à l'expression stochastique des gènes. Mais dans le même temps, elles se trouvent dans un milieu intérieur qui résulte, pour une cellule donnée, de l'activité des autres cellules. Chacune agit donc pour elle-même, mais l'enchevêtrement des contraintes (milieux intérieurs différenciés) les relie au sein d'une société cellulaire qui oriente leurs comportements dans l'intérêt collectif. ■

Propos recueillis
par Gérard Lambert

BIBLIOGRAPHIE

J.-J. Kupiec, **Et si le vivant était anarchique**, Les Liens qui Libèrent, 2019.

A. Guillemin et al., **Drugs modulating stochastic gene expression affect the erythroid differentiation process**, *Plos One*, vol. 14(11), article e0225166, 2019.

A. Richard et al., **Single-cell-based analysis highlights a surge in cell-to-cell molecular variability preceding irreversible commitment in a differentiation process**, *Plos Biology*, vol. 14, article e1002585, 2016.

J.-J. Kupiec, **A probabilistic theory for cell differentiation, embryonic mortality and DNA c-value paradox**, *Speculation in Science and Technology*, vol. 6(5), pp. 471-478, 1983.

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

Comment naissent les tornades de feu

Lorsque des vents tournoyants se combinent à un incendie, ils forment une tornade de feu. Un phénomène très dangereux et imprévisible, mais dont on comprend mieux aujourd'hui la physique.

Notre avion entamait sa descente sur Medford, dans l'Oregon, quand il s'est mis à traverser une épaisse couche de fumée. Nous étions fin juillet 2018 et de grands incendies dévastaient le sud-ouest de l'Oregon et le nord de la Californie – l'incendie dit de Carr. Je venais 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 au téléphone. 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 d'un monstrueux incendie – l'incendie des Indiens – qui avait fait rage entre le 8 juin et le 10 juillet 2008 dans la forêt domaniale de Los Padres, en Californie centrale, réduisant en

cendres 329 kilomètres carrés de la région sauvage de Ventana. 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 décapé au point que plus un seul caillou n'y était visible. La scène m'avait impressionné et inquiété. Il était évident qu'une telle tornade risque 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 mieux comprendre ce qu'est exactement une tornade de feu, il faut se remémorer ce qu'est un feu de forêt ordinaire. Un tel >



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.

> 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 se produire – et beaucoup d'entre nous l'ont déjà observé sur le terrain – que des « tourbillons de feu » se forment. Ces colonnes de feu tournantes 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. Je n'en avais entendu parler qu'une seule fois, par un pompier chevronné.

En 2008, de retour à mon laboratoire de Missoula, au Montana, je m'étais lancé dans une recherche bibliographique. Plusieurs tornades de feu avaient bien été signalées dans un passé proche ou lointain, mais les informations disponibles à leur propos 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 qui s'est formée 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 », mon collègue Bret Butler et moi avons rassemblé toutes les informations disponibles et les avons intégrées à un manuel et des formations destinées aux pompiers.

Puis l'incendie Carr, le grand incendie évoqué au tout début de cet article, qui a ravagé pendant l'été 2018 les comtés de Shasta et de Trinity, en Californie, a produit une tornade de feu. Et c'est ainsi que je me suis retrouvé sur place afin d'enquêter sur la mort d'un pompier, tragédie que je redoutais depuis longtemps.

COMME UN CHAMP DE BATAILLE

Le site ressemblait à un champ de bataille. Pour m'aider, j'avais recruté Josh Wurman, un météorologue célèbre aux États-Unis pour ses recherches sur les tornades et les ouragans. Comme moi, il n'avait 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 tonnes. Déracinés ou cassés, les arbres avaient aussi été écorchés par un vent transportant grains de sable et cailloux. Trois pylônes métalliques de 30 mètres de haut s'étaient écroulés; arraché à sa base, l'un d'eux avait été transporté sur 300 mètres...

Nous avons estimé que des vents avaient soufflé en cet endroit à 265 kilomètres par heure. Sur l'échelle de Fujita (qui classe les tornades selon la vitesse des vents sur une échelle allant de 0 à 5), cette vitesse signifie une tornade de 3, impliquant des dégâts considérables (murs et toits arrachés et emportés). 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

La tornade de feu faisait plus de 300 mètres de diamètre et s'élevait jusqu'à 4800 mètres

laquelle brûlaient des gaz dont la température a pu atteindre les 1 500 °C, tandis que sa base faisait plus de 300 mètres de diamètre et que, d'après les images radar, sa hauteur a atteint 4800 mètres. Durant au moins 40 minutes, elle s'est déplacée lentement, laissant une traînée de destructions d'environ 1,5 kilomètre de long.

Afin de tirer des leçons de cet extraordinaire événement, notre équipe a interrogé les témoins et recueilli des vidéos. La tornade de feu s'est produite le soir du 26 juillet 2018, au cours d'un



TRIANGLE DE FEU

L'air se met spontanément à tourbillonner au centre d'un trio de planches en feu disposées de façon triangulaire. L'un des feux rassemble ensuite les filets d'air tournant en un tourbillon de feu. De façon similaire, les feux de forêt ou les incendies urbains peuvent engendrer des tornades de feu.

incendie de forêt couvrant des milliers d'hectares au nord-ouest de Redding. Ce feu était 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 qui conduisait un bulldozer, Don Smith, ainsi qu'un habitant resté prisonnier de son domicile. Alors que l'incendie s'approchait de la périphérie 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 isolés à proximité de deux îlots de maisons situés au bout d'une impasse. La situation est devenue très chaotique: les pompiers tentaient d'évacuer les habitants et de sauver leurs biens, les gens couraient pour échapper au feu alors que toute retraite était coupée...

Jeremy Stoke, pompier de Redding, arriva sur les lieux vers 19h30, alors que la tornade de feu se formait au-dessus de la route menant au lotissement, piégeant habitants et pompiers. Il eut juste le temps de lancer un appel de détresse par radio avant que des vents tournants extrêmement violents ne fassent rouler son camion sur plusieurs dizaines de mètres avant de buter contre un arbre. Plusieurs heures ont passé avant qu'on ne le retrouve, mort des suites de ses blessures.

Les débris emportés par le vent ont aussi endommagé deux camions de pompier. Curieusement, 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. Les pare-brise de trois bulldozers qui se trouvaient à proximité ont aussi volé en éclats, blessant l'un des conducteurs à l'œil; un autre s'est gravement brûlé les mains. Un policier à la retraite s'est arrêté de rouler quand il s'est rendu compte que la caisse de son pick-up brûlait; il a survécu, mais avec des brûlures des voies respiratoires. Plus tragique encore, à la périphérie de la tornade, deux enfants et leur arrière-grand-mère ont péri dans l'incendie de leur maison.

Quelles sont les causes des tornades de feu? Pouvons-nous en prédire la formation afin de pouvoir évacuer les gens à temps? Pour répondre à ces questions, une première étape consiste à rechercher des événements comparables dans le passé. En 1871, une ville du Wisconsin fut dévastée par un phénomène qui, à en juger par la quantité massive d'objets déplacés, dont une maison, était sans doute une tornade de feu. En 1964, l'incendie du Polo, en Californie, a fait quatre blessés et détruit deux maisons, une grange, trois voitures et un verger d'avocats.

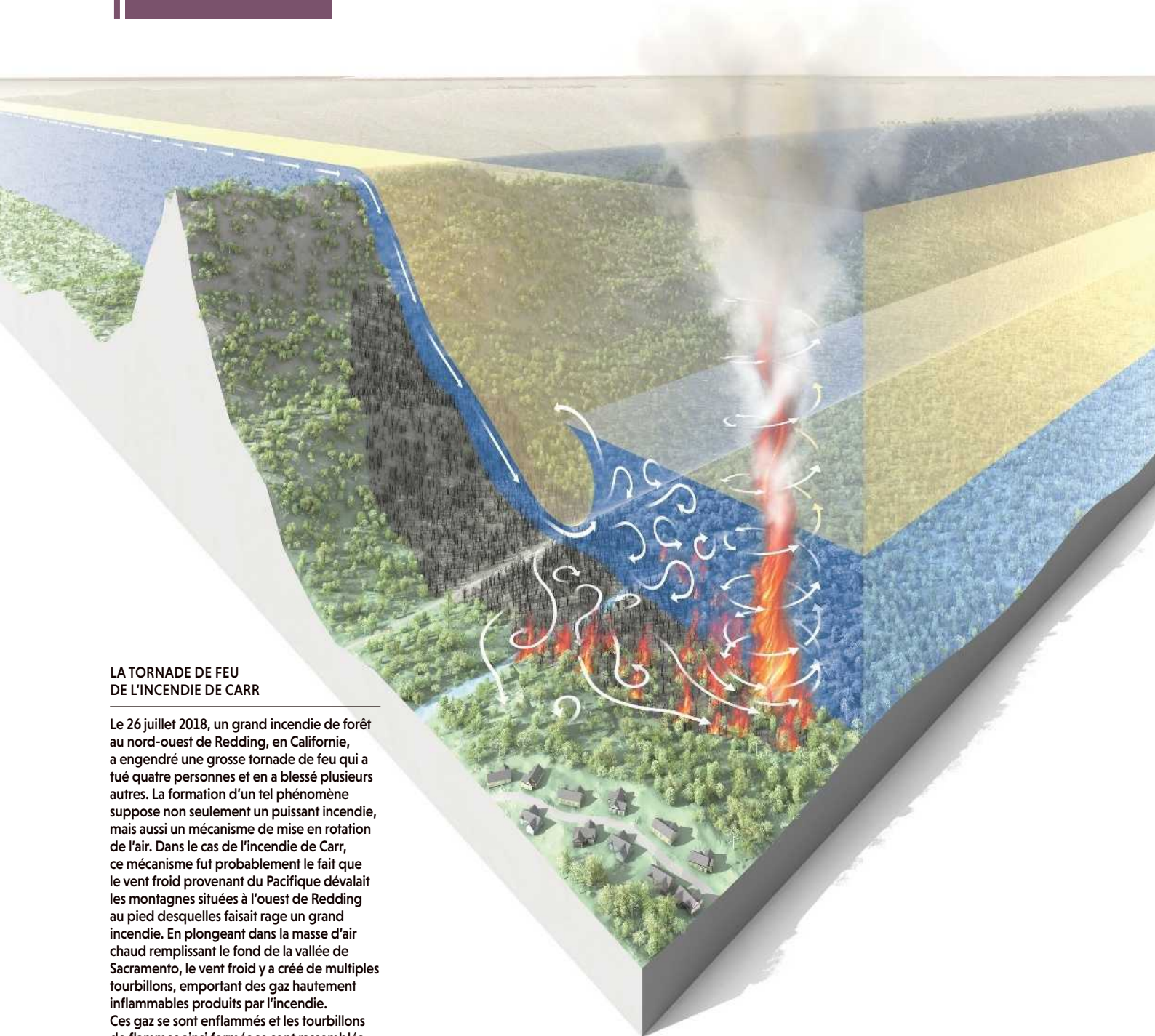
>

TORNADES DE FEU DE FORÊT

Les tornades de feu sont des colonnes de feu et de fumée tournant à des vitesses comparables à celles des vents des tornades habituelles. Elles sont rares, mais extrêmement destructrices. Remarquablement durables, elles peuvent se détacher de l'incendie principal et surprendre des groupes entiers de pompiers. Elles aspirent en hauteur des brandons et les recrachent au loin, ce qui déclenche des incendies secondaires. Même si les chercheurs comprennent de mieux en mieux la physique des tornades de feu, la prévision de ces phénomènes reste un défi.

LA TORNADE DE FEU DE L'INCENDIE DE CARR

Le 26 juillet 2018, un grand incendie de forêt au nord-ouest de Redding, en Californie, a engendré une grosse tornade de feu qui a tué quatre personnes et en a blessé plusieurs autres. La formation d'un tel phénomène suppose non seulement un puissant incendie, mais aussi un mécanisme de mise en rotation de l'air. Dans le cas de l'incendie de Carr, ce mécanisme fut probablement le fait que le vent froid provenant du Pacifique dévalait les montagnes situées à l'ouest de Redding au pied desquelles faisait rage un grand incendie. En plongeant dans la masse d'air chaud remplissant le fond de la vallée de Sacramento, le vent froid y a créé de multiples tourbillons, emportant des gaz hautement inflammables produits par l'incendie. Ces gaz se sont enflammés et les tourbillons de flammes ainsi formés se sont rassemblés, aboutissant à un gigantesque tourbillon de feu aspirant tout à sa base sur son passage : une énorme tornade de feu.



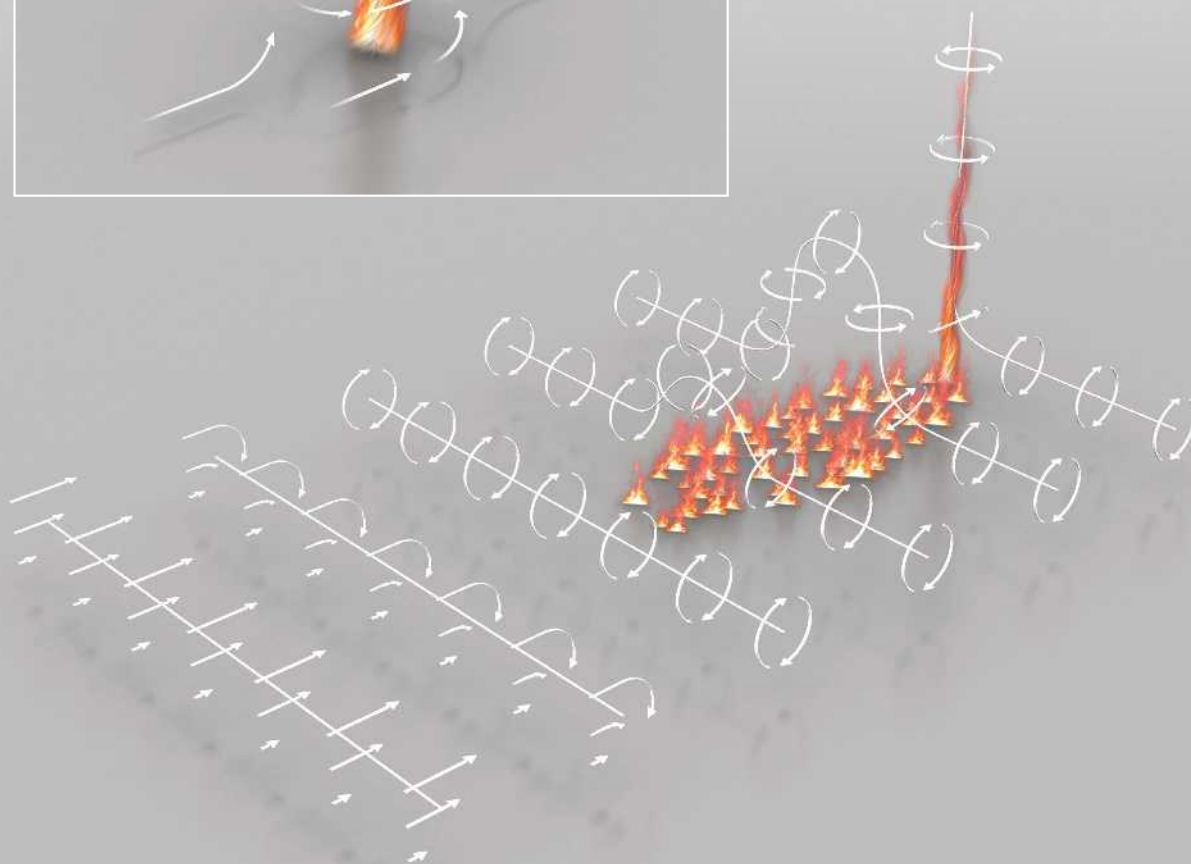


TOURBILLONS DE FEU DE LABORATOIRE

De petits tourbillons de feu créés en laboratoire ont aidé à comprendre la physique des tornades de feu. On constate que ce type de feu tournant consomme son combustible trois fois plus vite que les feux normaux, et conserve son énergie avec une grande efficacité, ce qui lui permet de durer.

MISE EN ROTATION

Plusieurs mécanismes peuvent mettre l'air en rotation et former un tourbillon, à commencer par le vent rasant le sol. Les tourbillons horizontaux nés du frottement entre ce vent et le sol s'élèvent et se redressent en raison de l'air chaud ascendant produit par l'incendie. La combustion des gaz inflammables contenus dans le panache de feu chauffe son contenu et accélère son ascension en étirant le tourbillon et en accélérant sa rotation.



> L'une des plus horribles tornades de feu s'est produite lors des bombardements de Hambourg, entre le 25 juillet et le 3 août 1943, pendant lesquels ont péri plus de 40 000 habitants: selon le géographe Charles Ebert, ce *feuersturm*, c'est-à-dire cette «tempête de feu», mesurait plus de 3 kilomètres de large et 4,5 kilomètres de haut.

L'horreur du *feuersturm* de Hambourg de 1943 le dispute à celle de la tornade du grand incendie de Tokyo de 1923. Un tremblement de terre majeur avait déclenché le feu. Puis une grande tornade de feu s'était formée et avait tué en 15 minutes 38 000 personnes.

DES TOURBILLONS DE FEU CRÉÉS EN LABORATOIRE

Pendant plus d'un demi-siècle, on a expliqué cet événement en supposant qu'une tornade normale s'était formée exactement là où un grand incendie faisait rage. Mais dans les années 1980 et 1990, Seiji Soma et Kozo Saito, de l'université du Kentucky, lurent les récits historiques de l'événement afin de construire une maquette du lieu et d'imiter les vents ayant soufflé ce jour-là par des courants d'air appropriés. Ils reproduisirent ainsi à petite échelle le grand incendie de Tokyo, et mirent en évidence que cet incendie avait lui-même engendré sa tornade de feu.

Cette recherche s'appuyait sur les expériences novatrices réalisées deux décennies plus tôt par George Byram et Robert Martin, à la station de recherche du Sud du Service forestier des États-Unis. Ces deux chercheurs avaient réussi à créer de petits tourbillons de feu dans leur installation de Macon, en Géorgie.

Leur dispositif? Un petit bassin circulaire contenant de l'alcool en train de brûler et entouré de parois cylindriques percées de fentes verticales. Celles-ci forçaient l'air venant alimenter le feu à entrer en rotation. Le tourbillon ainsi formé consommait tout le carburant jusqu'à trois fois plus vite qu'en l'absence de rotation. La présence d'un vent tournant augmente le taux de combustion en amenant les flammes à lécher la surface de l'alcool, ce qui le réchauffe puis enflamme les vapeurs émises. Des recherches ultérieures ont montré que, dans de tels feux, l'énergie dégagée par unité de temps était jusqu'à sept fois plus importante que dans les feux ordinaires.

Quelque chose de semblable se produit dans les tourbillons de feu des incendies de forêt et dans les tornades de feu. Porté à haute température, un morceau de bois produit des centaines de gaz inflammables différents, dont la combustion produit des flammes. Les forts vents horizontaux et tournants de la tornade



À L'AUDITORIUM DE LA GRANDE GALERIE DE L'ÉVOLUTION

Jardin des Plantes
36 rue Geoffroy St Hilaire - Paris 5^e

Entrée libre et gratuite dans la limite des places disponibles

Détails sur jardindesplantesdeparis.fr

POUR LA SCIENCE

Samedi 7 mars - 15h DES GRAINES POUR L'ÉTERNITÉ !

Deux documentaires de création étonnants, poétiques et politiques, consacrés à une banque de graines unique au monde, située dans l'archipel du Svalbard, en Norvège.

NOÉ Réal : Pauline Julier (Suisse - 2010 - 22 min.)

WILD RELATIVES Réal : Jumana Mana (Liban / Norvège / Syrie - 2017 - 65 min. - VOSTF)

Projection suivie d'une présentation d'Eléonore Samira Mobaied, chercheuse au Muséum national d'Histoire naturelle (Département « Homme & Environnement »).

Lundi 9 mars - 19h LES AVENIRS DE L'ALIMENTATION

Venez découvrir le monde de 2040 créé par les CFistes : écouter leurs récits, échanger... Le comité de science-fiction est un atelier créatif qui réunit étudiants, chercheurs et artistes, soutenu par l'Institut de transition environnementale, Sorbonne Université, le Muséum, en partenariat avec Sciences-Po Paris.

Lundi 23 mars - 19h LES GOÛTS ET LES COULEURS DU MONDE

Une histoire naturelle des tannins, de l'écologie à la santé

Ed. Actes Sud, 352 p. 24€. Illustrations d'Arnaud Rafaelian.
Une exploration sensorielle et naturaliste d'une famille de molécules ignorées, les tannins, omniprésents dans notre quotidien.

Présentation de l'ouvrage par l'auteur, Marc-André Selosse, biologiste, spécialisé en mycologie, Muséum national d'Histoire naturelle.

Vente-dédicace de l'ouvrage sur place de 18h15 à 18h45

**AUTOUR DE L'EXPOSITION
JE MANGE DONC JE SUIS DU MUSÉE DE L'HOMME**



de feu rabattent les flammes vers la végétation, ce qui renforce sa combustion.

En 1967, Howard Emmons et Shuh-Jing Ying, de l'université Harvard, ont entouré un feu de laboratoire stationnaire d'un grillage cylindrique que l'on pouvait faire tourner à différentes vitesses, ce qui imprimait une rotation à

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 d'une part des vents ambiants et d'autre part 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. La tornade de feu de l'incendie des Indiens, par exemple, a duré environ une heure. À mesure que la rotation dans une tornade de feu s'accroît, 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 tournoyants. 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 goulument 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. ➤



Les tourbillons de feu conservent assez bien leur énergie de rotation, d'où leur persistance



l'air entrant dans les flammes. Les chercheurs ont mesuré la vitesse du vent et la distribution de la température du tourbillon de feu ainsi créé. Ils ont ainsi 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.

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 au sein de 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'éirement de cette dernière a pour conséquence de faire tourner plus vite le contenu du tourbillon, effet comparable



> 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.

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.

DIVERSES CONDITIONS D'APPARITION

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 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.

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.

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. Forthofer 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.

P.-Y. Colin et al., **La simulation des sautes de feu**, *Pour la Science*, n° 322, pp. 30-37, août 2004.

R. N. Meroney, **Fire whirls, fire tornadoes and firestorms : Physical and numerical modeling**, dans G. Manfrida et D. Contini (éd.), *Proceedings of PHYSMOD 2003*, Firenze University Press, 2003.

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. J'ai demandé à Natalie Wagenbrenner, une collègue de notre laboratoire de Missoula, d'effectuer 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 ? J'ai fini par comprendre que l'on avait 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 66 et 67).

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'amincissant et en l'accéléralant.

Si les incendies de forêt continuent à s'intensifier, il se pourrait que nous soyons confrontés plus souvent à des tornades de feu. Les leçons tirées d'un examen attentif du phénomène pourraient nous aider à prévenir d'autres tragédies dues à ces phénomènes. 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. ■

3 FORMULES AU CHOIX



À renvoyer accompagné de votre règlement à :

PAG20STD



**OUI, je m'abonne
pour 1 an à** **POUR LA SCIENCE**

FORMULE
PAPIER

- 12 n° du magazine papier

59€
Au lieu de

~~82.80€~~

01A59E



FORMULE **PAPIER**
+ **HORS SÉRIE**

- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

79€

Au lieu de
114 ~~40F~~

P1A79E



FORMULE INTÉGRALE

- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

996

99€
Au lieu de
~~174,16€~~

11A99E

☐ M. ☐ Mme

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal Ville:

Téléphone

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science

☐ OUI ☐ NON☐ **Par chèque à l'ordre de Pour la Science**☐ Carte bancaire

Nº

--	--	--	--

--	--	--	--

--	--	--	--

--	--	--	--

Date d'expiration Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire:

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pourlascience.fr>. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour la Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://lebrand.fr/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.