

- composés chimiques ont commencé à s'agréger, faisant ensuite remonter les niveaux de PM 2,5. Selon Carsten Warneke, la reformation des PM 2,5 s'appuierait sur le pyrocatechol, une molécule aromatique (le benzène-1,2-diol) émise par le bois lors d'un feu couvant. Ainsi, en liant la température d'un feu à la production de PM 2,5, l'étude rendait possible la prévision de la quantité de PM 2,5 à l'aide de satellites mesurant l'intensité des incendies.

LE GEL DE L'OZONE

Avec Matt Coggon, de la NOAA, l'équipe a montré que le pyrocatechol jouerait également un rôle clé dans la formation d'ozone. Il n'est pas directement émis par les feux, mais se forme lorsque l'oxyde d'azote, les composés organiques volatiles et la lumière du soleil interagissent. Il y a toujours des composés organiques volatiles dans la fumée, et la lumière du soleil est omniprésente. Cependant, la production d'azote varie selon les conditions. Les feux couvants libèrent de l'ammoniac, une forme non réactive de l'azote, à partir des plantes. En revanche, les feux plus chauds relâchent de l'oxyde d'azote volatil. «Le piège, c'est que la chimie dans un panache est plutôt intense, explique Matt Coggon. En moins d'une heure dans le cas de grands incendies, cette fumée ne ressemblera plus vraiment à celle qui a été émise au départ.»

Lors de grands incendies, l'oxyde d'azote libéré par la combustion des plantes est entraîné dans la fumée puis poussé dans la troposphère supérieure par la chaleur. Durant cette ascension, certains des composés réagissent jusqu'à ce que, après une cascade de réactions chimiques, l'oxyde d'azote devienne du nitrate de peroxyacétyle $\text{CH}_3\text{COO}_2\text{NO}_2$, une molécule relativement stable quand les températures sont assez fraîches. Tant que la fumée dérive en altitude, à des températures plus fraîches, l'azote est enfermé et le processus de formation d'ozone est essentiellement gelé.

Mais quand la fumée commence à redescendre vers des altitudes où les températures sont plus élevées, le nitrate de peroxyacétyle se dégrade et l'oxyde d'azote fait son retour. Soudainement, à des centaines voire des milliers de kilomètres de l'incendie originel, l'ozone peut se former en quantités toxiques pour les humains. On comprend alors mieux pourquoi, durant certains incendies, les niveaux d'ozone grimpent dans des villes du centre des États-Unis et même de l'est, quand les panaches de fumée nés à l'ouest dérivent vers l'orient. Dans les zones urbaines, dont l'air est déjà riche en oxyde d'azote issu des voitures et des usines, la teneur atmosphérique en ozone peut alors bondir bien au-delà des seuils tolérés. Ce scénario explique comment Seattle a été à plusieurs reprises en 2018 la ville où la qualité de l'air était la pire au monde.

D'autres molécules émises par les incendies se comportent-elles de la même façon que le nitrate de peroxyacétyle? Ce serait le cas des catéchols (la famille du pyrocatechol cité précédemment) et des composés nitroaromatiques dérivés de ces derniers. Matt Coggon a développé un modèle chimique où ces composés jouent un rôle clé dans le cycle de vie de l'azote et par conséquent dans la formation de l'ozone. De fait, et de façon schématique, «quand ils sont présents, il y a moins d'ozone», résume le chercheur.

Les incendies produisent également des volumes significatifs de ces composés nitroaromatiques. Par conséquent, en modifiant un outil préexistant, un spectromètre de masse, Carsten Warneke et Matt Coggon ont mis au point un appareil pour analyser la concentration de ces molécules dans l'air tous les dixièmes de seconde. Et ils l'ont embarqué à bord du DC-8. C'est cet instrument qui a mis Matt Coggon sur la piste de quelque chose de remarquable.

DES SIGNAUX DANS LA FUMÉE

Une heure et demie après avoir quitté l'incendie de North Hills, dans le Montana, l'avion a rejoint celui de Tucker, près du mont Shasta, en Californie. Quand l'avion est entré dans le panache, la lumière est devenue orange et une odeur de fumée a envahi la cabine.

Matt Coggon fixait l'écran du spectromètre, qui indiquait une très forte concentration de catéchols. «C'est bien plus que ce que nous avons vu il y a deux jours!» a-t-il remarqué. Le spectromètre ne détectait aucun composé nitroaromatique, seulement leurs précurseurs.

EN MOINS D'UNE HEURE,

LA COMPOSITION DE LA FUMÉE

D'UN GRAND INCENDIE

NE RESSEMBLE PLUS VRAIMENT

À CELLE QUI A ÉTÉ ÉMISE AU DÉPART

Soudain, il rejoignit Wyatt Brown, un étudiant en train de manipuler un autre instrument qui révélait ce que le spectromètre ne pouvait pas voir: des aérosols submicroniques composés justement de composés nitroaromatiques, en l'occurrence des nitrocatechols, qui n'étaient donc pas présents sous forme de gaz, mais de fines gouttelettes.



Depuis le cockpit du DC-8 de la Nasa, on aperçoit le feu de Ridgetop, dans le Montana.

BIBLIOGRAPHIE

A. AKHERATI ET AL., Oxygenated aromatic compounds are important precursors of secondary organic aerosol in biomass-burning emissions, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 54(14), pp. 8568-8579, 2020.

M. PRUNICKI ET AL., The impact of prescribed fire versus wildfire on the immune and cardiovascular systems of children, *Allergy*, vol. 74(10), pp. 1989-1991, 2019.

C. MCCLURE ET D. JAFFE, U.S. particulate matter air quality improves except in wildfire-prone areas, *PNAS*, vol. 115(31), pp. 7901-7906, 2018.

K. DICKMAN, *On the Burning Edge*, Ballantine Books, 2015.

S. PYNE, *Between Two Fires: A Fire History of Contemporary America*, Univ. of Arizona Press, 2015.

Matt Coggon avait donc la confirmation, dans le monde réel, de ce qu'il avait vu dans ses modèles. Mais il lui faudra encore du temps pour déterminer si les nitrocatéchols sont un réservoir d'azote qui, comme le nitrate de peroxyacétyle, retarde la production d'ozone, ou bien s'ils le séquestrent de façon permanente, empêchent la production d'ozone. Chaque scénario a des implications importantes sur la production d'ozone à partir de la fumée et, par extension, sur l'impact de cette fumée sur les populations.

De telles énigmes ont été nombreuses durant la campagne. Il y a eu cet incendie d'une maison accidentellement mesuré lors de l'analyse des feux de biomasse dans le Kansas, une étude de cas potentiellement utile au vu du nombre croissant d'infrastructures humaines détruites par les incendies chaque année. Il y a eu aussi ce feu contrôlé de faible intensité dans les pinèdes de Floride qui s'est traduit par une surabondance d'ozone presque immédiatement après l'embrasement, en contraste avec les incendies accidentels dans l'État de Washington semblant n'en produire quasiment pas. Carsten Warneke espère confirmer par l'analyse des données recueillies son explication: le feu de Floride aurait consommé des combustibles riches en azotes, par un jour ensoleillé et avec une fumée basse, tandis que dans l'État de Washington, les

réactions chimiques auraient été rendues impossibles par la densité de la colonne de fumée empêchant la lumière du soleil d'y pénétrer.

L'élément le plus problématique réside peut-être dans la formation secondaire de PM 2,5. Lors de plusieurs incendies, la quantité de ces particules fines a diminué avant de croître rapidement. Les processus observés en laboratoire étaient-ils à l'œuvre dans la nature?

L'HEURE DU BAIN

Après une heure passée dans le panache de fumée de l'incendie de Tucker, le soleil a décliné derrière l'océan Pacifique. Par le hublot, le feu était encore visible au sol, comme un long ruban orange serpentant dans le noir. Le DC-8 n'avait presque plus de carburant. Les pilotes entamèrent un virage vers l'est, en direction de Boise, et Jim Crawford a rejoint la cabine. «Du point de vue des émissions, ce n'était qu'une goutte dans l'océan, expliqua-t-il. Mais les détails que nous pourrions en tirer seront très précieux.»

Bientôt, les scientifiques se tourneront vers une tâche moins excitante: organiser les données, préparer des articles, mettre au point des outils de modélisation et de prévision... Mais, cette nuit, baignant dans une odeur de fumée, tous se sont serré la main en se félicitant. Et quelqu'un a suggéré un bain pour toute l'équipe. ■