

au cours des deux derniers millénaires. Ils ont passé au crible les données archivées dans les sédiments des fonds lacustres, des plaines inondables, des marais et des bassins sous-marins de la région. Lorsqu'elles s'écoulent, les eaux d'inondation emportent de l'argile, du limon et du sable. Quand les flots ralentissent en atteignant une plaine inondable, un marais, un estuaire ou l'océan, ils libèrent leur charge de sédiments : d'abord les gros graviers, puis les sables, enfin les limons et les argiles qui se déposent sur le fond. La nature reprend ses droits après chaque crue et, au bout d'un certain temps, les dépôts d'inondation sont enfouis sous de nouveaux sédiments laissés par les écoulements normaux.

Les chercheurs ont extrait des carottes verticales de ces sédiments, ont analysé les couches préservées et ont daté les différents événements. Par exemple, des dépôts d'inondation ont été trouvés dans les marais littoraux du pourtour de la baie de San Francisco, dans le Nord de la Californie. Typiquement, les eaux fluviales ne déposent que de minces traces des éléments les plus fins (des argiles et des limons). Les flots plus vigoureux des crues importantes charrient des particules plus grosses et déposent des couches plus épaisses et plus grossières. On peut dater ces couches de sédiments à l'aide de la méthode de la datation au carbone 14,

qui, dans cette application, a une précision d'une centaine d'années. Une étude des carottes des marais par l'un d'entre nous (Lynn Ingram) et la géographe Frances Malamud-Roam a révélé des dépôts liés à des inondations massives vers 1100, 1400 et 1650. Toutefois, il est difficile de distinguer une couche correspondant à l'épisode de 1861-1862, car l'extraction hydraulique d'or dans les contreforts de la Sierra Nevada au cours de la décennie précédant et suivant les inondations a déplacé de grands volumes de limon et de sable. Cela a effacé les traces qu'auraient pu laisser les crues.

Les crues du passé enregistrées dans les sédiments

Des carottes de sédiments récupérées dans la baie de San Francisco elle-même indiquent qu'en 1400, la baie s'est emplie d'eau douce (comme ce fut le cas en 1861-1862), traduisant une crue exceptionnelle.

Les géologues ont trouvé davantage d'indices dans le Sud de la Californie, où vivent deux tiers des 38 millions d'habitants de l'État, le long de la côte de Santa Barbara. Des sédiments se déposent sur le fond marin tous les printemps (formant une couche claire contenant des diatomées, des

micro-algues unicellulaires) et à nouveau en hiver (formant une couche sombre de limon). Les eaux profondes de la baie étant pauvres en oxygène, il n'y a pas d'animaux qui vivent sur le fond, remuent le sol et s'y enfouissent. Les couches annuelles de sédiments sont restées intactes pendant des millénaires. Les carottes de sédiments révèlent six grandes inondations distinctes, qui se traduisent par d'épaisses couches grises de limon correspondant aux années 212, 440, 603, 1029, 1418 et 1605. Les trois dates les plus récentes sont compatibles avec les dates approximatives de 1100, 1400 et 1650 indiquées par les dépôts des marais autour de la baie de San Francisco; cela confirme que des inondations généralisées ont bien lieu régulièrement à quelques siècles d'intervalle.

La couche la plus épaisse laissée par des inondations dans le bassin de Santa Barbara correspond à un dépôt de 1605. À quelques kilomètres au large, ces sédiments font cinq centimètres d'épaisseur. Les inondations de 440 et de 1418 ont laissé des couches de plus de 2,5 centimètres. C'est à comparer avec les couches de six et deux millimètres que l'on trouve vers le haut de la carotte, et qui ont été déposées par les tempêtes de 1958 et 1964, parmi les plus importantes du siècle dernier.

Des traces d'énormes inondations ont aussi été trouvées à environ 250 kilomètres

Un phénomène qui touche aussi l'Europe

Que l'humidité de l'atmosphère soit transportée des tropiques vers les pôles par un petit nombre de « rivières » étroites a été une réelle découverte de la fin des années 1990, sans doute facilitée par les nouveaux moyens d'observation de la Terre.

En revanche, il est moins étonnant que ce transport soit lié aux cyclones extratropicaux, ou dépressions des latitudes moyennes. C'est en effet aux bords d'un tel cyclone – dans son front – que se concentre l'eau atmosphérique et que sont créés des vents transversaux très forts. Le cyclone est donc responsable de la formation d'une bande atmosphérique qui transporte l'humidité rapidement, à de grandes distances. C'est ce mécanisme bien connu qui crée les tempêtes et les pluies sous nos latitudes. Mais si le bord du cyclone arrive à puiser

dans le réservoir d'air très humide que représentent les régions tropicales, la quantité d'eau transportée peut être colossale.

Dans l'hémisphère Nord, il existe deux principales régions où se forment et évoluent des cyclones extratropicaux; ce sont des régions tellement importantes pour le climat que les scientifiques les ont nommées *stormtracks*, ou « rails des dépressions » en français. Il s'agit de la région du Pacifique, dont traite l'article de M. Dettinger et L. Ingram, et de la région euro-atlantique, qui nous concerne tout particulièrement.

Ainsi, la région atlantique se prête aussi bien que la région du Pacifique à une analyse en termes de rivières atmosphériques. En 2011, David Lavers, de l'Université de Reading, en Angleterre, et ses collègues en ont établi le lien avec des épisodes d'inon-

dations en Grande-Bretagne. En effet, les dix plus graves inondations des 40 dernières années, y compris celle de 2009 dans le Nord-Ouest de l'Angleterre, sont imputables à des rivières atmosphériques. D. Lavers et Gabriele Villarini ont par la suite élargi l'analyse à toute l'Europe et, là aussi, établi un lien entre rivières atmosphériques et précipitations extrêmes.

Ils ont pu mettre en évidence qu'au moins la moitié des plus intenses épisodes de précipitation des 30 dernières années – surtout en hiver – sont associés à des rivières atmosphériques. Les régions les plus concernées sont celles de la partie occidentale du continent : la péninsule ibérique, la France, la Grande-Bretagne et la Scandinavie. Mais on a aussi observé des filaments d'humidité pénétrant dans le continent

et provoquant des précipitations intenses sur les reliefs. Un exemple notable est la tempête Lothar qui a dévasté de nombreuses régions le 26 décembre 1999.

Ces épisodes sont aussi déterminés par des conditions atmosphériques de grande échelle qui sont bien connus des climatologues. Typiquement, les fortes précipitations dans l'Europe du Sud ont lieu durant des phases négatives de la NAO (l'Oscillation Nord-Atlantique) et, dans l'Europe du Nord, au cours de sa phase positive. L'influence des rivières atmosphériques semble porter davantage sur l'intensité des pluies que sur leur probabilité d'occurrence.

Fabio D'Andrea

Laboratoire de météorologie dynamique, Institut Pierre Simon Laplace, École normale supérieure, Paris

LES RIVIÈRES DU CIEL

Une rivière atmosphérique est une coulée étroite de vapeur qui se forme au large, sous les tropiques, et qui s'étend sur des milliers de kilomètres. Elle peut transporter une quantité d'eau équivalant à 15 fois le contenu du fleuve Mississippi. Elle se manifeste par une série de tempêtes qui sévissent plusieurs jours d'affilée, voire durant des semaines entières.

Force ascensionnelle

La masse d'air chaud et humide s'élève et passe au-dessus de la chaîne de montagnes; ce faisant, l'air se refroidit et l'humidité se condense en pluies ou neiges abondantes. La rivière finit par se désintégrer en tempêtes locales.

Orientation

Si une rivière atmosphérique atteint perpendiculairement une chaîne de montagnes, une grande partie de la vapeur se condense. Si elle l'atteint de façon oblique (*petite flèche bleue*), il se crée un « jet de barrière montagneuse » qui déverse les précipitations sur le flanc de la montagne.

Jet de barrière
montagneuse

Origine

Les rivières atmosphériques arrivent en général par le Sud-Ouest, en apportant de l'air chaud et humide des tropiques.

Durée

Une tempête exceptionnelle peut durer plusieurs semaines et se décaler le long de la côte (*flèche verte*). Chaque année arrivent de petites rivières atmosphériques qui durent entre deux et trois jours; en Californie, elles viennent tout droit de la région de Hawaï.

Rivière
atmosphérique

Précipitations

Il peut tomber plusieurs centimètres de pluie ou de neige par jour sous une rivière atmosphérique. Les tempêtes modérées peuvent apporter plus de 40 centimètres de pluie.

Transport de vapeur d'eau

L'humidité est concentrée en une couche située à une altitude comprise entre 800 et 1 600 mètres au-dessus de l'océan. Les vents forts au sein de cette couche apportent de l'air très humide des tropiques, mais la rivière peut aussi attirer à elle l'humidité atmosphérique qu'elle rencontre en chemin.