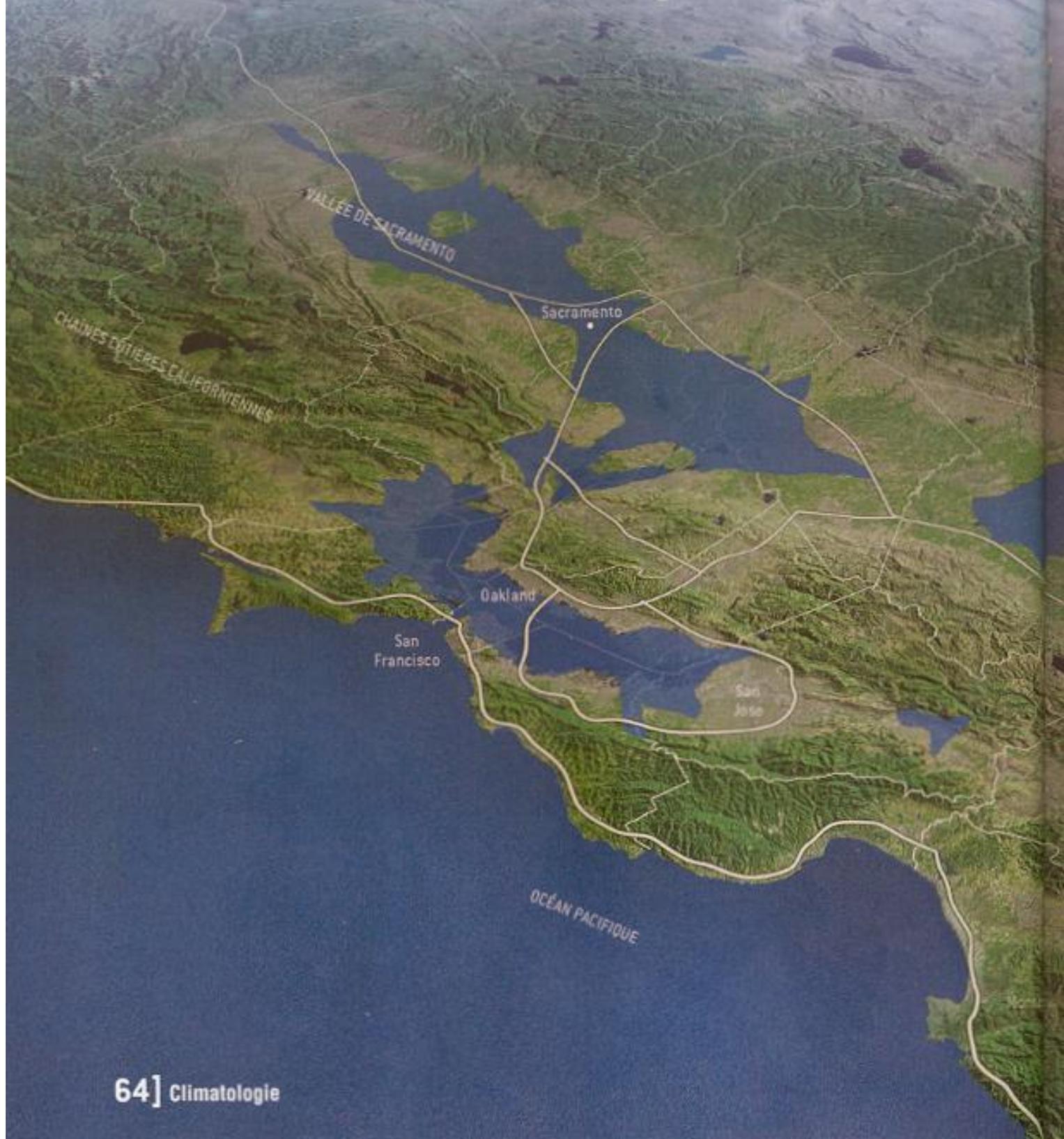
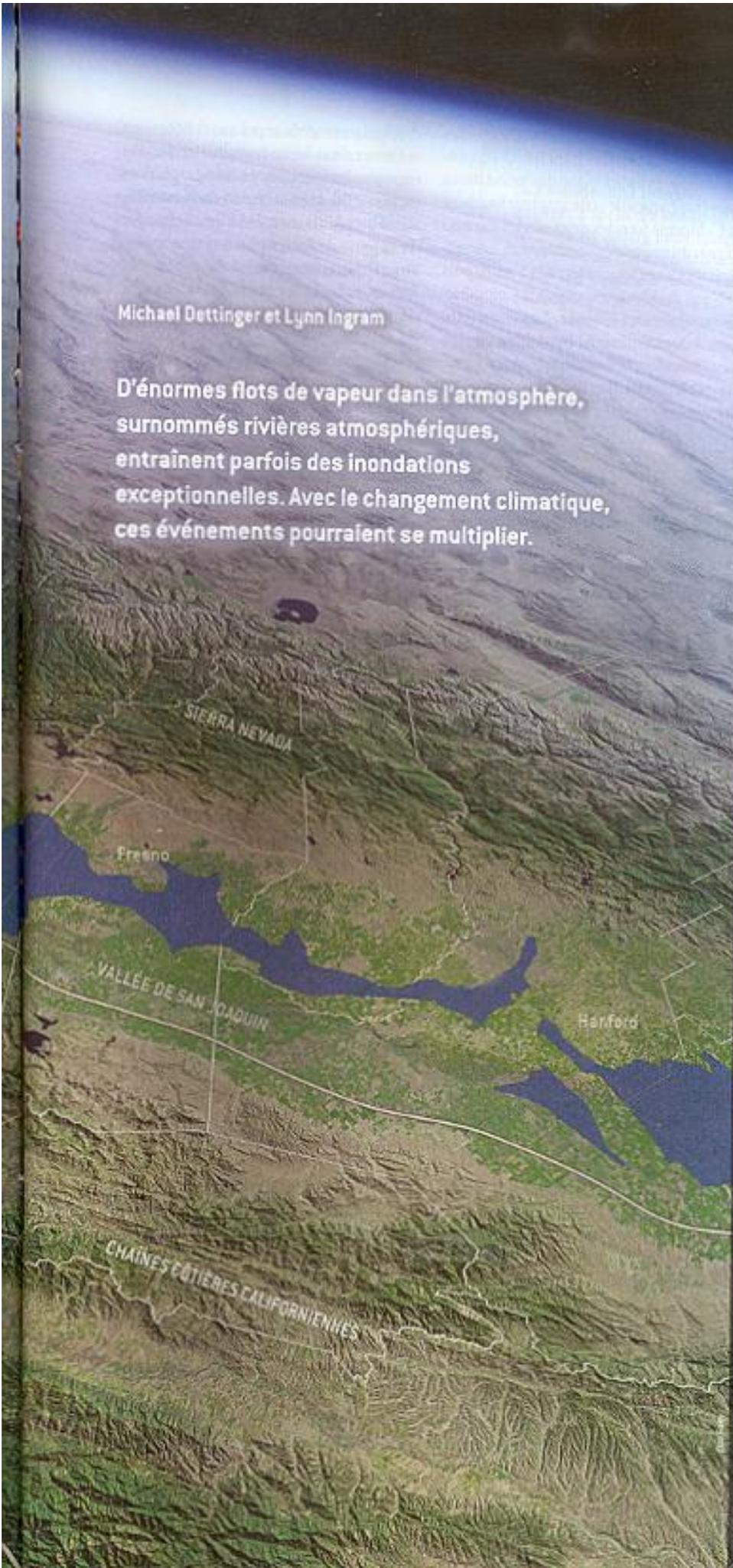


Les rivières atmosphériques





Michael Dettinger et Lynn Ingram

D'énormes flots de vapeur dans l'atmosphère, surnommés rivières atmosphériques, entraînent parfois des inondations exceptionnelles. Avec le changement climatique, ces événements pourraient se multiplier.

La veille de Noël 1861, d'intenses trombes d'eau venues de l'océan Pacifique ont commencé à s'abattre sur le centre de la Californie et se sont prolongées pratiquement sans répit pendant 43 jours. Le déluge a transformé les rivières qui descendent des montagnes de la Sierra Nevada, à la frontière orientale de l'État, en torrents déchaînés. Ces derniers ont balayé des bourgades minières et des villages entiers. Les cours d'eau et les pluies se sont déversés dans la vallée centrale de l'État et l'ont transformée en une mer intérieure de près de 500 kilomètres de long sur 30 de large. On a déploré des milliers de victimes, et un quart des quelque 800 000 têtes de bétail de l'État s'est noyé. Le centre de la ville de Sacramento a été submergé par près de trois mètres d'eau boueuse pleine de débris, issus des nombreux glissements de terrain qui se sont produits sur les pentes escarpées de la région. La législature de la Californie, qui siège à Sacramento, a dû déménager à San Francisco en attendant que la ville sèche... six mois plus tard. À ce stade, l'État était en faillite.

Des inondations exceptionnelles

S'il avait lieu aujourd'hui, un épisode météorologique comparable serait dévastateur. Plus de 6 millions de personnes habitent dans la vallée, dont 1,4 million à Sacramento. La production agricole (dont 70 pour cent de la production mondiale d'amandes) est estimée à 20 milliards de dollars par an. Par endroits, le niveau de la terre a baissé de trois mètres en raison du pompage intensif de la nappe phréatique: ces zones sont encore plus exposées aux inondations.

Des météorologues ont récemment modélisé une tempête aussi importante que celle de 1861, mais ne durant que 23 jours. Ils ont conclu que ce fléau causerait 400 milliards de dollars de dégâts matériels et de pertes agricoles. Des milliers de personnes pourraient perdre la vie si les préparatifs et les services d'évacuation n'étaient pas optimaux.

LA CALIFORNIE A ÉTÉ INONDÉE en 1861. Une rivière atmosphérique, chargée en vapeur d'eau, aurait provoqué la crue qui a transformé la vallée de Sacramento en une mer intérieure (crue simulée sur une carte actuelle).

LES AUTEURS



Michael DETTINGER est chercheur hydrologue à l'USGS (l'Institut américain d'études géologiques) et chercheur associé au Département Climat, science atmosphérique et océanographie physique de l'Institut Scripps d'océanographie à La Jolla, en Californie.

Lynn INGRAM est professeur de sciences de la Terre et de planétologie à l'Université de Californie à Berkeley.

Les inondations de 1861-1862 furent-elles un événement unique? L'analyse des dépôts de sédiments indique que des inondations catastrophiques de cette ampleur touchent la Californie tous les deux siècles environ depuis au moins deux millénaires. Les précipitations ont touché toute la côte, depuis le Nord du Mexique jusqu'à la Colombie-Britannique, au Canada. Les climatologues font maintenant l'hypothèse que ces inondations ont pour origine des rivières atmosphériques, flux de grandes quantités de vapeur conduisant à des précipitations importantes. La Californie pourrait être bientôt de nouveau touchée par un tel événement météorologique, qui ne se limite pas à la côte Ouest des États-Unis, mais concerne aussi d'autres régions du monde.

L'équivalent de dix Mississippi à un kilomètre d'altitude

Les rivières atmosphériques sont de longs couloirs de vapeur d'eau qui se forment à environ un kilomètre d'altitude. Elles font environ 400 kilomètres de large, mais s'étirent sur des milliers de kilomètres. Ce flux transporte, depuis les tropiques jusqu'aux latitudes moyennes, des quantités d'eau équivalent à 10 ou 15 fois celle contenue dans le Mississippi. Quand l'une de ces rivières atteint la côte Ouest des États-Unis et arrive sur des chaînes montagneuses à l'intérieur des terres, telle la Sierra Nevada, la vapeur s'élève, se refroidit et se condense - d'où d'importantes précipitations.

Les habitants de la côte Ouest de l'Amérique du Nord connaissent depuis longtemps des tempêtes surnommées *pineapple express* (express ananas), qui se forment sous les tropiques dans la région de Hawaï, et se déversent sous forme de fortes pluies ou neiges pendant trois à cinq jours. Il s'avère que ces *pineapple express* correspondent à une configuration parmi d'autres des rivières atmosphériques. Chaque année, jusqu'à neuf rivières atmosphériques frappent la Californie. Peu d'entre elles sont assez puissantes pour provoquer des inondations exceptionnelles, mais même les tempêtes « normales » mettent à l'épreuve l'organisation des secours et les services de gestion de l'eau.

Les rivières atmosphériques se manifestent aussi sur les côtes occidentales

d'autres continents, et peuvent à l'occasion se former dans des endroits inattendus. Par exemple, les inondations catastrophiques de mai 2010 dans la région de Nashville, aux États-Unis, ont été alimentées par deux jours de fortes pluies d'une rivière atmosphérique provenant du golfe du Mexique. Les crues ont fait une trentaine de victimes et deux milliards de dollars de dégâts.

La côte Ouest de l'Europe n'est pas en reste. En 2009, d'importantes inondations dans le Sud de l'Angleterre et dans diverses régions d'Espagne étaient imputables à des rivières atmosphériques. Des études ont montré que dix inondations hivernales anglaises depuis 1970 étaient dues à ce phénomène.

Mais c'est le long de la côte Pacifique américaine que les rivières atmosphériques ont été le mieux étudiées. Cependant, malgré les énormes dégâts qu'elles provoquent, les rivières atmosphériques n'ont été découvertes que récemment et par hasard.

En janvier 1998, le Laboratoire des techniques pour l'environnement de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, l'agence américaine responsable de l'étude des océans et de l'atmosphère) a lancé le projet CALJET, dont l'objectif était d'améliorer la prévision des tempêtes les plus importantes qui sévissent sur la côte californienne. L'équipe du météorologue Marty Ralph a alors étudié une tempête hivernale. Celle-ci présentait des vents violents et transportait à elle seule environ 20 pour cent de l'humidité atmosphérique qui remontait des tropiques vers les latitudes moyennes. Ce flux de vapeur était concentré à environ un kilomètre au-dessus de la surface de l'océan, assez haut pour être difficile à identifier par les techniques classiques des observations météorologiques au sol.

La même année, les chercheurs Yong Zhu et Reginald Newell, alors au MIT (l'Institut de technologie du Massachusetts), remarquaient une caractéristique étrange dans les simulations des régimes globaux des vents et de la vapeur d'eau réalisées par le Centre européen de prévision météorologique à moyen terme. Ils trouvaient que, en dehors des tropiques, environ 95 pour cent de tout le transport de vapeur vers les pôles était assuré par cinq ou six bandes étroites, réparties aléatoirement autour du globe et traversant les latitudes moyennes d'Ouest en Est,

L'ESSENTIEL

- Les rivières atmosphériques sont d'étroites bandes de vapeur d'eau évoluant à un kilomètre d'altitude et longues de plusieurs milliers de kilomètres.
- Elles se transforment en précipitations et provoquent des crues exceptionnelles partout dans le monde.
- Les données géologiques montrent qu'en Californie, ces crues se produisent tous les 200 ans environ. L'épisode le plus récent date de 1861.
- Des simulations soulignent les risques humains et matériels d'une nouvelle crue en Californie.

Pour décrire ces bandes, ils ont proposé le terme de « rivières atmosphériques ».

À peu près au même moment, un nouveau système d'imagerie micro-onde embarqué sur un réseau de satellites a mesuré pour la première fois la répartition atmosphérique de la vapeur d'eau. Cette dernière se concentre en longs et étroits couloirs mobiles, qui s'étendent en général de l'air chaud et humide des tropiques jusqu'aux régions plus sèches et plus froides des latitudes supérieures, comme dans les simulations précédentes. De plus, les données montraient que ces coulées de vapeur apparaissent et se dissipent en quelques jours à quelques semaines.

Les météorologues ont vite compris l'importance de ces découvertes. Ils ont multiplié les observations pour caractériser les rivières atmosphériques. Des radars pointés vers le ciel et des systèmes de mesure de la vitesse et de la direction du vent ont été mis en place pour les surveiller. Un programme de la NOAA a été consacré à l'étude du comportement des rivières atmosphériques lorsqu'elles pénètrent au-dessus des continents.

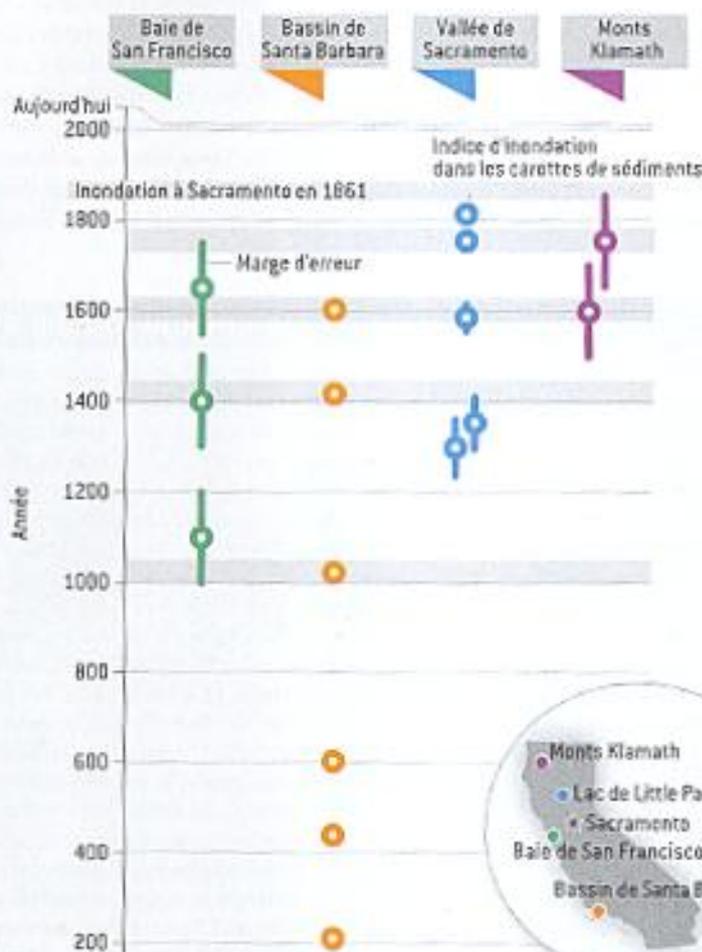
Grâce aux données récoltées, les prévisionnistes savent mieux reconnaître ce phénomène et prévoir son arrivée sur les côtes. Ces dernières années, certaines tempêtes ont été identifiées plus d'une semaine avant de toucher terre. Ce progrès donne en particulier plus de temps aux services de secours pour s'organiser.

Une grande inondation par siècle ?

Malgré une meilleure compréhension scientifique du phénomène, peu de choses sont faites pour limiter les dangers. Les inondations californiennes de 1861-1862 sont pratiquement oubliées aujourd'hui. Depuis un siècle, habitations, industries et exploitations agricoles se sont multipliées sur ces mêmes plaines inondables qui furent submergées il y a 150 ans. Les résidents ignorent ou négligent les risques. Mais, devant l'accumulation d'indices suggérant la possibilité d'une prochaine tempête de grande ampleur, l'inquiétude grandit chez les météorologues.

Pourquoi les spécialistes pensent-ils qu'une nouvelle crise importante pourrait se déclencher d'ici quelques années ? Certains chercheurs ont étudié l'occurrence et la fréquence des inondations en Californie

Des inondations massives ont frappé la Californie tous les 200 ans environ, d'après les analyses des dépôts de sédiments laissés par les torrents en quatre lieux éloignés les uns des autres. Les différentes méthodes de datation utilisées ont des marges d'erreur différentes, mais les résultats sont assez bien alignés. Si cette régularité correspond à la réalité, la Californie pourrait être bientôt confrontée à une nouvelle catastrophe; la dernière inondation importante date de 1861 et avait laissé Sacramento sous les eaux pendant six mois (photographie ci-dessous).



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, rentrent 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 connues 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

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.

400 km

1 km

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.

au Nord de la baie de San Francisco, dans des carottes de sédiments extraites du lac de Little Packer situé dans la plaine inondable du fleuve Sacramento, le plus grand cours d'eau du Nord de la Californie. Pendant les crues majeures, les sédiments transportés par l'eau se répandent dans le lac et se déposent sur le fond, formant d'épaisses couches grossières. Roger Byrne, de l'Université de Californie à Berkeley, et Donald Sullivan ont utilisé la datation au carbone 14 pour déterminer qu'une inondation comparable à la catastrophe de 1861-1862 a eu lieu dans chacun des intervalles suivants: 1235-1360, 1295-1410, 1555-1615, 1750-1770 et 1810-1820.

Certaines méga-inondations ont aussi laissé des traces de leur passage dans d'étroits canyons des Monts Klamath, dans le Nord-Ouest de la Californie. Deux dépôts importants ont été laissés vers 1600 et vers 1750, ce qui concorde une fois de plus avec les autres données.

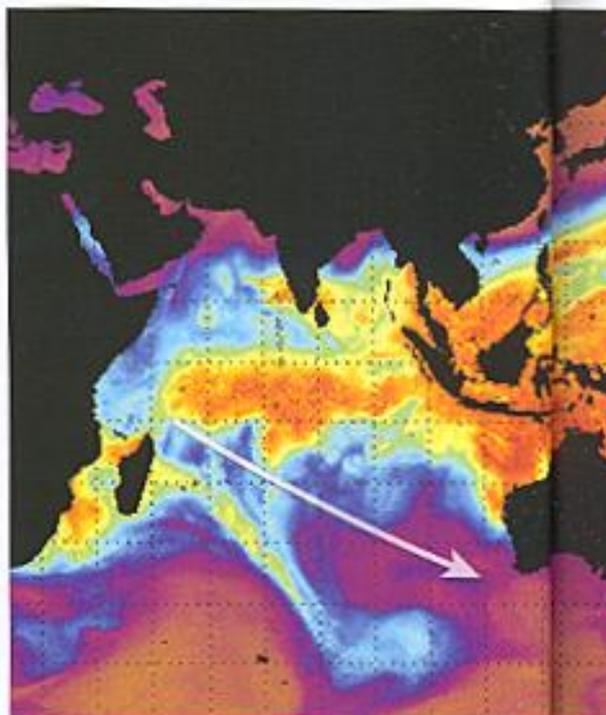
Toutes ces données historiques suggèrent que l'inondation de 1605 était au moins 50 pour cent plus forte que toutes les autres inondations importantes. Et bien que les méthodes de datation par le carbone 14 soient entachées d'incertitudes, une certaine périodicité se dessine: les inondations à l'échelle de celles de 1861-1862 se produisent tous les deux siècles environ. Cela fait maintenant 150 ans que la dernière catastrophe a eu lieu, et il y a toutes les raisons de penser qu'un tel phénomène peut se reproduire en Californie dans un avenir proche.

Plus fréquentes et plus grandes ?

Paradoxalement, les rivières atmosphériques ont parfois un aspect bénéfique. Les plus petites, celles qui se forment chaque année, constituent même d'importantes sources d'eau. Les chercheurs ont analysé les quantités de pluie et de neige que les rivières atmosphériques ont apportées aux côtes de l'Ouest des États-Unis ces dernières décennies, ainsi que les données du manteau neigeux, de l'écoulement fluvial et des précipitations à long terme. Ils ont trouvé qu'entre 1950 et 2010, les rivières atmosphériques ont fourni 30 à 50 pour cent de l'eau californienne, et ce en une dizaine de jours par an seulement. Ils trouvent des proportions similaires le long du reste de la côte Ouest. Mais dans la même période, les

Les rivières atmosphériques se forment au-dessus des eaux tropicales. Leurs trajectoires vers les latitudes moyennes les conduisent au-dessus des côtes occidentales de nombreux continents (ce fut le cas en Angleterre, en novembre 2009). Elles sont fréquentes le long de la côte Pacifique des États-Unis, mais elles peuvent se manifester en des lieux inhabituels, comme le golfe du Mexique (une telle rivière a inondé Nashville, dans le Tennessee, en mai 2010). Avec le réchauffement climatique, ce phénomène risque de devenir plus important encore.

Teneur en vapeur d'eau dans l'atmosphère entre les 17 et 19 décembre 2010.



troubles d'eau ont aussi été à l'origine de 80 pour cent des crues de rivières californiennes et de 81 pour cent des 128 ruptures de digues les plus importantes de la vallée centrale de Californie.

Puisque les rivières atmosphériques jouent un rôle prépondérant dans les inondations et un rôle vital dans l'apport d'eau, il est naturel de se demander quel sera l'effet du changement climatique actuel sur ce phénomène. Dans les modèles climatiques, les rivières atmosphériques se forment spontanément à partir de la dynamique de l'atmosphère et du cycle de l'eau. On les retrouve donc aussi dans les modèles utilisés pour prévoir l'évolution du climat, en particulier dans les évaluations du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat).

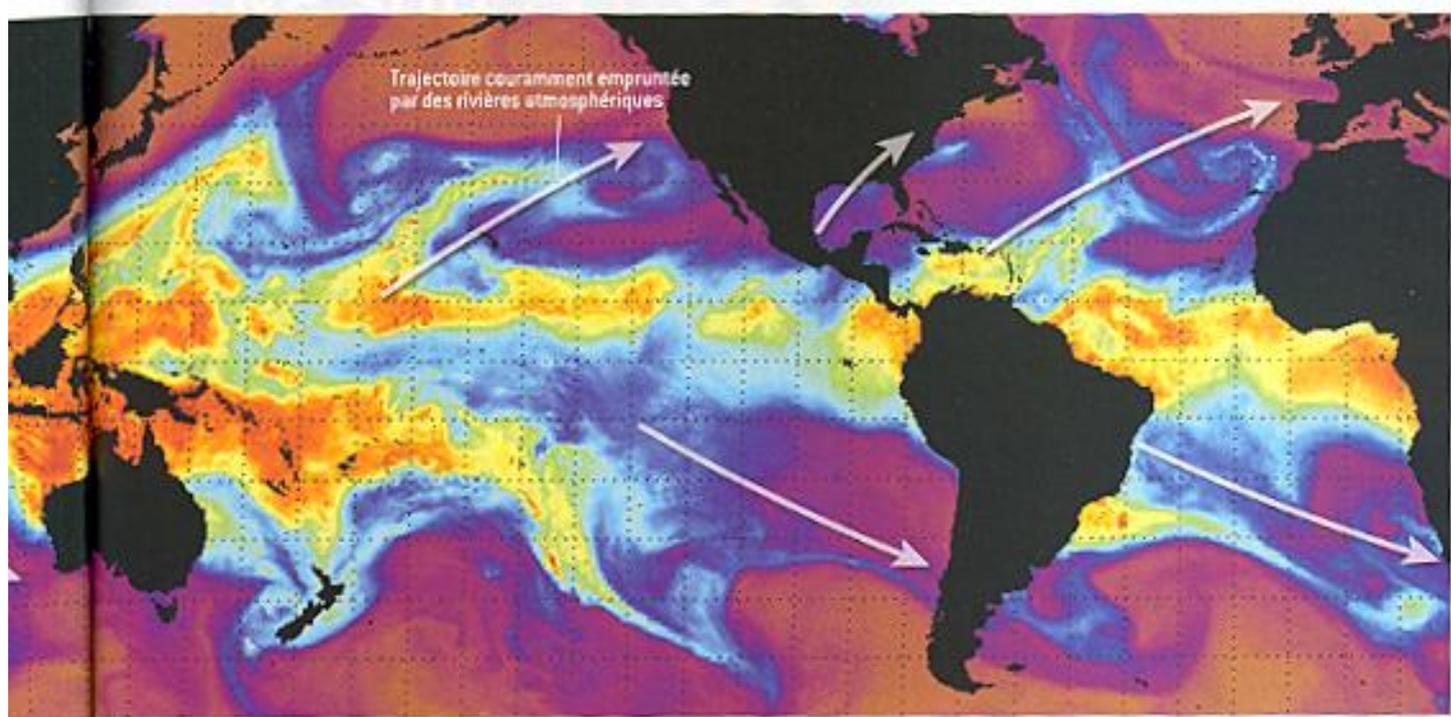
Une analyse récente par l'un d'entre nous (M. Dettinger) de sept modèles climatiques différents indique que des rivières atmosphériques continueront à arriver sur la Californie pendant tout le XXI^e siècle. Dans les projections, les températures de l'air augmentent d'environ deux degrés en moyenne à cause de la hausse des concentrations de gaz à effet de serre. Parce qu'une atmosphère plus chaude contient davantage de vapeur d'eau,

les rivières atmosphériques transporteront probablement plus d'humidité.

En revanche, les mêmes modèles suggèrent que les vents faibliront au-dessus des latitudes moyennes du Pacifique. Le transport d'eau étant le produit de l'humidité par la vitesse du vent, et la première augmentant alors que la seconde diminue, quel effet dominera? Selon les prévisions, l'augmentation d'humidité semble l'emporter. Les précipitations sur la Californie augmenteront de dix pour cent d'ici 2100 et le nombre de rivières atmosphériques atteignant les côtes passera en moyenne de 9 à 11 par an. Cette augmentation est inquiétante, car elle annonce des crues plus fortes.

Le temps de se préparer

Avec des rivières atmosphériques qui risquent de devenir plus fréquentes et plus importantes, il est nécessaire de les anticiper pour prévenir les populations vivant sur leurs trajectoires. Pour donner un exemple, les chercheurs de l'Institut américain d'études géologiques ont développé le scénario d'une grande tempête rivalisant en taille avec celle de 1861-1862, mais ne durant que 23 jours au lieu de 43



(pour que personne ne puisse prétendre que le scénario était irréaliste). Pour s'assurer encore davantage que le scénario, nommé ARkStorm (pour *Atmospheric River 1000 Storm*), soit aussi réaliste que possible, les scientifiques l'ont construit en assemblant les données de deux des plus grosses tempêtes de ces 50 dernières années en Californie, celles de janvier 1969 et de février 1986.

Trois fois le coût d'un grand séisme ?

Les résultats du scénario ont montré que des inondations prolongées pourraient avoir lieu dans la plupart des zones de faible altitude de la Californie. De telles inondations conduiraient à l'évacuation d'un million et demi de personnes. Les dommages et difficultés liés à la montée des eaux, les centaines de glissements de terrain et les vents soufflant en ouragan à certains endroits entraîneraient des dégâts matériels et des pertes agricoles estimées à 400 milliards de dollars. En ajoutant à cela les interruptions prolongées de l'activité économique, le coût total dépasserait sans doute 700 milliards de dollars, soit le

triple de ce qui est estimé dans le cas d'un séisme de magnitude 7,8, autre menace qui pèse sur la Californie.

Toutefois, les capacités de prévision ont été améliorées. Ainsi, si une organisation adéquate est mise en place et si les recherches continuent d'améliorer les capacités de prévision, il sera possible de réduire les dégâts et le nombre de victimes qu'entraînerait un tel événement.

Cet avertissement vaut aussi pour les côtes occidentales d'autres continents. Les scientifiques ont étudié les rivières atmosphériques le long de la côte californienne mieux que nulle part ailleurs dans le monde, mais ils ont peu de raisons de penser que les tempêtes sont moins fréquentes ou plus limitées ailleurs. La prochaine inondation exceptionnelle pourrait aussi bien frapper le Chili que l'Espagne, la Namibie ou l'Ouest de l'Australie.

La population devrait être consciente des risques associés aux rivières atmosphériques et prendre au sérieux les prévisions de tempêtes et d'inondations. Les institutions des États et les élus locaux devraient aussi tenir compte de ces phénomènes lorsqu'ils décident d'investir. Qui oublie le passé risque de le voir se répéter... ■

■ BIBLIOGRAPHIE

D. A. Lavers et G. Villarini, The nexus between atmospheric rivers and extreme precipitation across Europe, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 40, pp. 1-6, 2013.

B. L. Ingram et F. P. Malamud-Paom, *The West without Water*, University of California Press, 2013.

M. D. Dettinger et al., Design and quantification of an extreme winter storm scenario [...], *Natural Hazards*, vol. 60(3), pp. 1085-1111, 2012.

M. D. Dettinger et F. M. Ralph, Storms, floods, and the science of atmospheric rivers, *Eos*, vol. 92(32), pp. 265, 2011.

D. A. Lavers et al., Winter floods in Britain are connected to atmospheric rivers, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 38, L23803, 2011.

F. P. Malamud-Roam et al., Holocene paleoclimate records from a large California Bay estuarine system and its watershed region [...], *Quaternary Science Reviews*, vol. 25, n° 13 et 14, pp. 1570-1598, 2006.