

que le système climatique de notre planète ait durablement basculé vers un nouveau régime. Ils se demandent en particulier si les errements du jet-stream ne pourraient pas être dus au réchauffement régional le plus rapide de toute la planète : celui de l'Arctique.

Un courant d'air méandreux

Pour mieux comprendre la question, commençons par décrire la structure générale d'un courant-jet. Situés entre 9 et 14 kilomètres d'altitude, ces grands couloirs de vent font le tour de la planète dans les deux hémisphères. Le fait que leurs latitudes varient suivant les saisons est important, car ce sont les courants-jets qui guident les dépressions porteuses de précipitations. Celui qui nous intéresse plus particulièrement ici – le jet-stream polaire – court normalement au-dessus du centre des États-Unis et vient s'épuiser au-dessus de l'Europe. En été, il s'approche de la frontière canadienne. De grandes ondes de Rossby le caractérisent, qui influencent beaucoup la météorologie : là où le jet-stream polaire s'incurve vers le Nord, se dessine une crête de haute pression, de sorte que de l'air chaud s'écoule du Sud vers le Nord ; là où le jet-stream s'incurve vers le Sud, se forme une vallée dépressionnaire, et de l'air froid va du Nord au Sud.

Le jet-stream polaire trouve son origine dans le transport de l'énergie des tropiques vers les pôles (voir les deux pages suivantes). Par ailleurs, l'atmosphère accumule plus ou moins d'énergie en fonction du flux solaire, de la forme et de la position des continents, des océans et des courants océaniques, de la présence ou non de chaînes de montagnes, de la quantité de gaz à effet de serre et de poussières, etc. Selon l'évolution de ces facteurs d'une région ou d'une saison à l'autre, les masses d'air qui la composent adoptent des modes de circulation différents, comparables aux modes de vibration d'un système résonnant : ce que l'on nomme des téléconnexions atmosphériques. Une certaine variabilité due à ces téléconnexions peut modeler le jet-stream polaire, de sorte qu'il est difficile de savoir si son comportement récent dénote ou pas un changement durable.

Les deux plus importantes téléconnexions de l'hémisphère Nord sont d'une part le couple associant El Niño – un

■ L'AUTEUR



Jeff MASTERS, météorologue américain, dirige l'entreprise de prévisions météorologiques *Weather Underground*. Il tient le blog météo *WunderBlog*.

Qui a découvert le courant-jet ?

Des cerfs-volants puis des ballons ont signalé la présence de vents rapides de haute altitude dès le XIX^e siècle. Mais le météorologue japonais Oishi Wasaburo (1874-1950) fut le premier à en mesurer la vitesse par des lâchers de ballons-sondes depuis le Mont Fuji. L'Occident, qui ignorait ces travaux, découvrit l'existence de « fortes rivières d'air » à haute altitude grâce à l'aviateur américain Wiley Post (1898-1935) à la fin des années 1920.

réchauffement saisonnier de l'eau du Pacifique dû au courant marin du même nom, qui suit un cycle de trois à huit ans – à l'oscillation australe – une oscillation de la pression atmosphérique dans le Pacifique Sud ; et d'autre part l'oscillation arctique – une fluctuation variable de semaine en semaine de la pression au niveau de la mer entre l'Arctique et les latitudes moyennes.

Nommée ENSO (de l'anglais *El Niño–Southern Oscillation*) dans le jargon climatologique, la première téléconnexion a pour effet d'attirer le jet-stream polaire vers le Sud au-dessus du Pacifique. L'oscillation arctique, la deuxième oscillation, rend pour sa part possible des méandres du jet-stream de grande amplitude, lorsqu'une baisse des différences de pression entre latitudes hautes et moyennes affaiblit ses vents ; cela explique que de l'air froid s'aventure en hiver loin au Sud au-dessus de l'Est des États-Unis, de l'Europe occidentale et de l'Asie orientale.

Or ces téléconnexions atmosphériques peuvent se contrecarrer ou au contraire se renforcer, car elles sont entrelacées. Un changement de l'état de base de l'atmosphère pourrait donc modifier le fonctionnement de l'ENSO et de l'oscillation arctique, et, partant, celui du jet-stream polaire. Les conformations inhabituelles observées récemment s'expliquent-elles de cette façon ?

Une situation jamais vue par les climatologues

C'est ce qu'a pensé Jennifer Francis de l'Université de Rutgers, quand elle a constaté la conformation prise par le jet-stream en 2011. Un jet-stream extrêmement méandreux a en effet cohabité une partie de l'année en question avec un événement La Niña (l'inverse d'un événement El Niño) d'intensité faible à modérée, une situation que les climatologues n'avaient jamais vue. Pour l'expliquer, Jennifer Francis émet l'hypothèse que cet événement inédit était relié à la diminution de la superficie de banquise arctique, laquelle influerait sur l'oscillation arctique. Selon ses propres mots, la question n'est pas de savoir si la diminution de la banquise affecte la circulation atmosphérique, mais plutôt : comment ne le pourrait-elle pas ?

L'Arctique se réchauffe en effet deux fois plus vite que le reste de l'hémisphère Nord, phénomène que l'on nomme « amplification arctique ». Selon Jennifer Francis, l'amplification arctique pourrait perturber

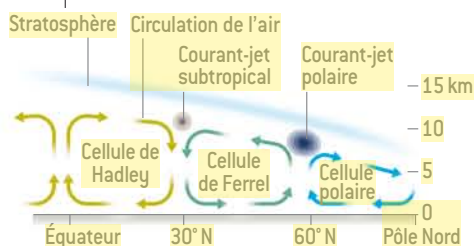
Dans chaque hémisphère, deux grands courants rapides de haute altitude – ou jet-streams – font le tour de la Terre : le jet-stream polaire et le jet-stream subtropical. Les ondulations du courant polaire s'amplifient parfois, amenant de l'air anormalement chaud ou froid vers de vastes régions continentales. Le blocage de ces ondulations plusieurs semaines d'affilée entraîne vagues de chaleur et sécheresses, inondations ou gels prolongés. Deux causes possibles de ces grandes ondulations sont avancées, qui font notamment intervenir le changement climatique (voir la page ci-contre).

LA FORMATION DU JET-STREAM

L'équateur recevant plus d'énergie solaire que les pôles, l'air chaud s'y élève, se heurte à la stratosphère, puis s'écoule vers les pôles. La rotation de la Terre entraîne une circulation de cet air au sein des cellules polaires et subtropicales, aux limites desquelles des jet-streams naissent afin d'équilibrer les différences de pression entre cellules.

QUAND LES JET-STREAMS ONDULENT, FROID OU CHAUD S'ACCROÎT

Quand les ondulations d'un jet-stream polaire s'amplifient, d'énormes masses d'air chaud parviennent bien plus loin au Nord qu'à l'habitude sous certaines longitudes, tandis que des masses d'air froid envahissent le Sud sous d'autres longitudes. Ces ondulations se déplacent vite et changent les conditions météorologiques en quelques jours.



CELLULES ATMOSPHÉRIQUES

Cellule polaire

Cellule de Ferrel

Cellule de Hadley

ANORMALEMENT CHAUD ET SEC

H

ANORMALEMENT FROID ET HUMIDE

B

H Hautes pressions

B Basses pressions

Vents de surface

JET-STREAM POLAIRE NORMAL

JET-STREAM POLAIRE AMPLIFIÉ

JET-STREAM SUBTROPICAL

Il arrive que les ondes de Rossby, c'est-à-dire les incurvations du jet-stream polaire, s'immobilisent. Il s'ensuit alors de longues périodes de conditions inhabituelles.

Rayonnement solaire

Chaleur absorbée

Conséquences à long terme

Si la reconfiguration du jet-stream polaire devenait permanente, tempêtes, sécheresses et autres événements climatiques extrêmes deviendraient dans l'hémisphère Nord la norme plutôt que l'exception.

POURQUOI LE JET-STREAM ONDULE-T-IL DAVANTAGE ? DEUX THÉORIES

1 Les téléconnexions atmosphériques

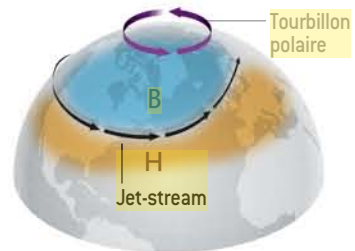
Les téléconnexions, c'est-à-dire les modes de circulation de l'air dans l'atmosphère, peuvent changer, ce qui altère la trajectoire du jet-stream. Deux téléconnexions auraient des effets notables sur le jet-stream polaire : l'ENSO et l'oscillation arctique.



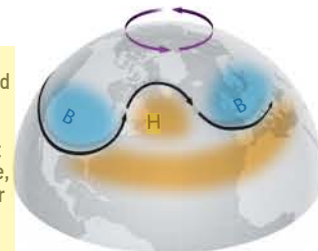
L'ENSO ou la téléconnexion El Niño-Oscillation australe

Cette oscillation de la pression atmosphérique tropicale a deux phases : El Niño, qui déplace vers l'Est l'eau plus chaude de l'océan Pacifique et décale le jet-stream vers le Sud ; La Niña, qui apporte de l'eau froide et décale le jet-stream vers le Nord. La forte amplitude récente de ces phases, liée à la structure du jet-stream, est peut-être liée au réchauffement climatique.

La trajectoire du jet-stream est rectiligne quand la différence de pression entre latitudes polaires et moyennes est grande, ce qui maintient l'air froid au pôle.



Le jet-stream décrit des méandres quand la différence de pression entre latitudes polaires et moyennes est faible, ce qui amène de l'air froid au Sud et de l'air chaud au Nord.



L'oscillation arctique

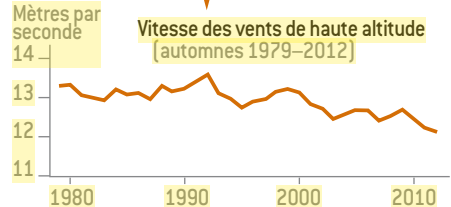
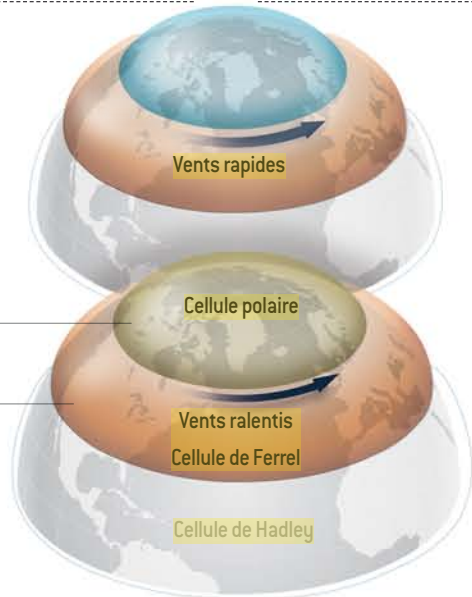
De semaine en semaine, la pression au niveau de la mer entre l'Arctique et les latitudes moyennes varie, ce qui fait évoluer le jet-stream entre les deux états décrits ci-dessus.

2 L'amplification arctique

Dans l'Arctique, l'air se réchauffe deux à trois fois plus vite que sous les latitudes moyennes, surtout à cause de la réduction de la banquise. La faible différence de température entre les latitudes polaires et moyennes (à droite) qui en résulte ralentit le jet-stream et amplifie ses ondulations.



Moins de banquise et de vents
Entre 1980 et 2010, la banquise arctique a perdu 40 % de sa superficie, tandis que les vents de haute altitude traversant l'Amérique du nord perdaient 14 % de leur vitesse. Ce ralentissement est associé à l'apparition de grandes incurvations dans le jet-stream.



Sur le front de la lutte contre le dérèglement climatique

Fin 2014, à Lima au Pérou, les négociations de la COP20 (la 20^e Conférence des Parties signataires de la Convention Climat) ont préparé la signature espérée d'un accord mondial sur le climat lors de la COP21, qui se tiendra en décembre 2015 à Paris.

Cet accord devient urgent, car si le jet-stream est bien sur le point d'entrer dans un régime nouveau, cela ne présage rien de bon. Dans un article publié en août 2014, James Screen, de l'Université d'Exeter en Angleterre, et un collègue en identifient les effets potentiels. Si les oscillations du jet-stream « sont amplifiées en réponse au changement climatique anthropique, comme il a été proposé », écrivent-ils, « nos résultats suggèrent que cela augmentera surtout la fréquence des vagues de chaleur dans l'Ouest de l'Amérique du Nord et en Asie centrale, des vagues de froid

dans l'Est de l'Amérique du Nord ainsi que des sécheresses dans le centre de l'Amérique du Nord, en Europe et en Asie centrale, ou encore des précipitations massives en Asie occidentale. »

Ce nouveau régime signifierait plus de sécheresses estivales massives dans le Midwest. Des séries de tempêtes de neige hivernales, telle le *Snowmageddon* (le « monstre de neige ») qui a isolé Washington en 2010, frapperont souvent l'Amérique du Nord. Étant donné l'augmentation du prix des denrées alimentaires due aux sécheresses à répétition qui affecteront le centre de l'Amérique du

Nord, l'Europe et l'Asie centrale, le nouveau régime du jet-stream signifierait aussi des famines dans le monde entier.

Comme l'illustre l'article de Jeff Masters, de plus en plus de climatologues pensent que le réchauffement climatique est à l'origine de l'évolution du jet-stream. Dès lors, quels sont les espoirs de limiter les dégâts ?

Il en existe, puisque le dialogue international sur les moyens de limiter la hausse de la température terrestre moyenne s'améliore. Tout d'abord, plus aucun pays n'affirme qu'il est trop tôt pour parvenir à un accord, a-t-on constaté pendant la COP20. Les signes encourageants se multiplient par ailleurs. Ainsi, l'Union européenne a fait savoir qu'elle veut réduire de 40 % ses émissions de gaz à effet de serre avant 2030. Par ailleurs, les deux

plus grands pollueurs de la planète se sont pour la première fois accordés sur des objectifs de réduction de leurs émissions. Tandis que les États-Unis veulent les réduire de 26 à 28 % avant 2030, la Chine s'est engagée... à commencer à les faire décroître la même année.

Le ministère français des Affaires étrangères annonce que le but de la COP21 est de parvenir à un « accord ambitieux et contraignant face au défi du dérèglement climatique qui s'appliquerait à tous les pays ». La France, qui accueillera les participants sur le site de Paris-Le Bourget, cherchera à y établir un « agenda de solutions », c'est-à-dire une batterie d'initiatives complémentaires suffisante pour maintenir le réchauffement planétaire à moins de 2 °C.

– François Savatier
Pour la Science

de façon significative la forme et la position du jet-stream dans l'hémisphère Nord. En effet, l'une des principales causes de l'amplification arctique est la disparition de la banquise. La fonte des glaces et un régime de vents défavorables ont fait disparaître 49 % de la superficie moyenne de la banquise depuis 1979, ce qui correspond à six fois la surface de la France ! Or, puisqu'elle est de couleur foncée, la mer absorbe davantage le rayonnement solaire que la banquise. Moins de banquise signifie donc un océan et une atmosphère plus chauds, ce qui signifie moins de banquise, donc plus de réchauffement, etc.

Après avoir emmagasiné de la chaleur pendant le printemps et l'été, l'eau marine la libère en automne et en hiver, ce qui exerce une grande influence sur l'état de l'atmosphère arctique. L'inhabituelle amplification arctique résulte aussi de la diminution de la couverture neigeuse, dont témoignent les trois jours d'avance que prend le printemps chaque décennie récente. En effet, la disparition de la neige expose le sol arctique, qui, étant foncé, absorbe mieux le rayonnement solaire que la neige. Résultat : il sèche, d'où une

saison chaude plus précoce dans les régions arctiques continentales.

L'amplification arctique due à la disparition de surfaces importantes de banquise et de couverture neigeuse a considérablement diminué la différence de température entre les latitudes hautes et moyennes, ce qui réduit l'énergie transférée entre ces régions. De fait, depuis 1979, la baisse de l'écart de température entre les latitudes polaires et moyennes s'est accompagnée d'une réduction automnale de 14 % de la vitesse des vents d'altitude au-dessus de l'Amérique et de l'Atlantique nord.

Le courant-jet ralenti qui en résulte parcourt de larges méandres sinueux, et Jennifer Francis a montré que leur amplitude a augmenté depuis 2000. En conséquence, d'énormes masses d'air chaud ou d'air froid parviennent plus loin que d'habitude, les premières vers le Nord et les secondes vers le Sud. Les modèles physiques montrent que le ralentissement du jet-stream freine la progression des ondes de Rossby vers l'Est, voire l'interrompt, ce qui fait perdurer des conditions climatiques anormales.

Parmi les spécialistes de météorologie, le comportement fantasque du jet-stream

a soulevé une... tempête. Si de nombreux experts s'accordent sur le fait que le jet-stream change, beaucoup notent que l'amplification arctique n'est réellement marquée que depuis 15 ans, une période trop brève pour conclure.

Pas le bon bilan énergétique ?

D'autres doutent que l'amplification arctique puisse expliquer le comportement erratique du jet-stream pour des raisons énergétiques. L'énergie contenue dans l'air déplacé par le jet-stream étant énorme, la quantité de chaleur nécessaire pour faire évoluer la forme du grand courant aérien est considérable. Or Kevin Trenberth, du Centre national américain de recherche atmosphérique, a fait observer que la quantité de chaleur que l'amplification arctique a apportée à la région polaire est dix fois inférieure à celle accompagnant les évolutions naturelles du jet-stream induites par l'ENSO (El Niño-oscillation australe). Avec des collègues, il a montré que dans l'océan Pacifique tropical, les transferts naturels d'énergie visibles ces récentes années sont