

■ L'AUTEUR



Charles GREENE
est professeur
de sciences
de la Terre
et de l'atmosphère.
Il dirige

le Programme des ressources
et écosystèmes océaniques
de l'Université Cornell,
aux États-Unis.

Cette fonte sans précédent de la glace pérenne a obligé les scientifiques à revoir leurs projections du moment où l'océan Arctique connaîtrait son premier été sans glace. D'après les données collectées avant 2007, le quatrième rapport d'évaluation du GIEC (Groupe international d'experts sur l'évolution du climat) avait estimé que le premier été sans glace se produirait vers la fin du XXI^e siècle. Certains modèles projettent maintenant que cet événement pourrait avoir lieu des décennies plus tôt, entre 2020 et 2040.

La fonte estivale de la banquise est l'un des aspects de l'amplification du réchauffement global qui touche l'Arctique depuis quelques décennies. Alors que le reste du monde a subi une hausse des températures moyennes de l'ordre de 0,8 °C depuis le début du XX^e siècle, les températures moyennes de l'Arctique ont augmenté de plus du double au cours des 50 dernières années. En raison de ce réchauffement rapide, les régimes climatiques arctiques ont été modifiés et de vastes étendues de pergélisol (où le sous-sol est gelé en permanence) ont dégelé. De telles modifications de l'environnement ont per-

turbé des habitats cruciaux pour la faune de la région et menacent la survie à long terme de nombreuses espèces. De même, les populations des régions polaires, bien connues pour leurs adaptations culturelles au froid et aux glaces de leurs contrées, voient leur mode de vie bouleversé.

Bien que ces changements puissent sembler lointains à la plupart de ceux qui vivent bien au Sud des régions polaires, le reste de l'hémisphère Nord est concerné par les effets de l'amplification arctique et de la fonte de la banquise. Les régimes climatiques des latitudes moyennes sont influencés par le climat arctique, ce qui soulève une question clef : le réchauffement global est-il impliqué dans les épisodes récents de froid hivernal intense, ou bien ces épisodes s'inscrivent-ils dans le schéma général des oscillations climatiques naturelles de la planète ?

Des oscillations barométriques

La nature s'est clairement manifestée pendant mon enfance dans la région de Washington, dans les années 1960, quand, avec mes camarades, nous avançons péniblement dans la neige pour aller à l'école en cette décennie aux hivers plus rudes que d'habitude. Les climatologues ont observé que ces hivers froids et neigeux pouvaient être associés à deux variations naturelles du climat qu'on nomme aujourd'hui l'oscillation arctique, OA, et l'oscillation nord-atlantique, NAO (pour *North Atlantic Oscillation*) (voir l'encadré page 65). De nombreux facteurs agissent sur ces deux oscillations, telles les interactions atmosphère-océan. Les effets les plus remarquables des oscillations se produisent en hiver.

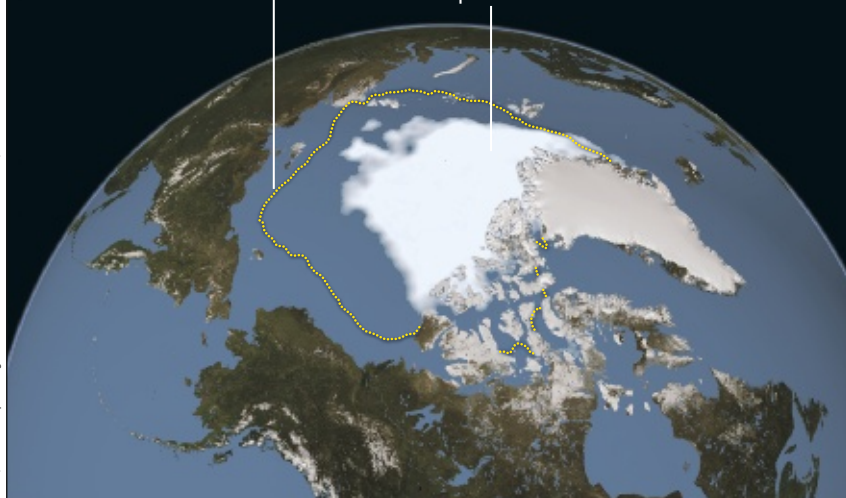
L'intensité de chaque oscillation est caractérisée par un indice qui quantifie les anomalies (par rapport aux pressions moyennes) dans la distribution hivernale de la pression atmosphérique au-dessus d'une région spécifique. Dans le cas de l'oscillation arctique, la région concernée est très vaste ; elle comprend l'essentiel de l'hémisphère Nord, du pôle Nord jusqu'à la limite des tropiques à 20 degrés de latitude Nord (à peu près la latitude de Cuba). L'indice OA peut être positif ou négatif. Les valeurs positives correspondent à des pressions inférieures à la moyenne dans l'Arctique et supérieures à la moyenne dans la région subtropicale. Durant les phases positives de l'indice OA, des pressions très basses dans

UNE BANQUISE QUI RECULE DE PLUS EN PLUS

Durant l'hiver, la glace recouvre l'ensemble de l'océan Arctique. Une partie de cette glace disparaît en été, découvrant la mer. Le réchauffement global du climat a augmenté le recul de la banquise estivale, ce qui a modifié les échanges de chaleur entre l'océan et l'atmosphère, d'où une influence sur le temps hivernal aux États-Unis et en Europe. En 1979, quand les mesures par satellite ont débuté, l'étendue de la banquise estivale avoisinait sept millions de kilomètres carrés. Depuis 2007, le recul estival a augmenté de façon spectaculaire ; un nouveau record d'étendue minimale a été atteint le 16 septembre 2012 avec seulement 3,44 millions de kilomètres carrés.

Moyenne du minimum de couverture en glace (1979-2010)

16 septembre 2012



l'Arctique conduisent à un renforcement du vortex polaire – une circulation permanente des vents d'altitude s'écoulant d'Ouest en Est autour de l'Arctique. Un vortex polaire renforcé tend à retenir les masses d'air arctique froid au Nord du cercle polaire.

À l'inverse, durant les phases d'indice OA négatif, les pressions anormalement élevées dans l'Arctique affaiblissent le vortex polaire. Des masses d'air arctique s'engouffrent au Sud vers les latitudes moyennes, où elles dispensent des épisodes froids et neigeux. La côte Est des États-Unis et le Nord de l'Europe sont en première ligne face à de tels phénomènes lorsque l'indice OA est négatif.

Quant à l'indice NAO, il caractérise les anomalies de la distribution de la pression atmosphérique, en période hivernale, sur

une région beaucoup plus petite, comprenant le secteur atlantique de l'hémisphère Nord allant du centre des hautes pressions subtropicales, près des Açores, au centre des basses pressions subarctiques, près de l'Islande. Comme l'indice OA, l'indice NAO peut être positif ou négatif. Les valeurs positives correspondent à des pressions atmosphériques supérieures à la moyenne au niveau de l'anticyclone des Açores et inférieures à la moyenne près du centre des basses pressions subarctiques.

Quand l'indice NAO est positif, les différences de pression accentuées renforcent les vents d'Ouest sur l'Europe, qui soufflent toute l'année d'Ouest en Est au niveau des latitudes moyennes de l'hémisphère Nord. Les différences de pression aiguillent aussi le courant-

jet ou *jet stream* (un flux d'air rapide qui fait le tour de la Terre) sur une trajectoire Nord-Est depuis la côte Est de l'Amérique du Nord jusqu'à l'Europe septentrionale. Les tempêtes hivernales qui traversent l'Atlantique Nord suivent une trajectoire similaire, apportant un temps plus doux et humide sur l'Europe du Nord.

Le courant-jet débousolé

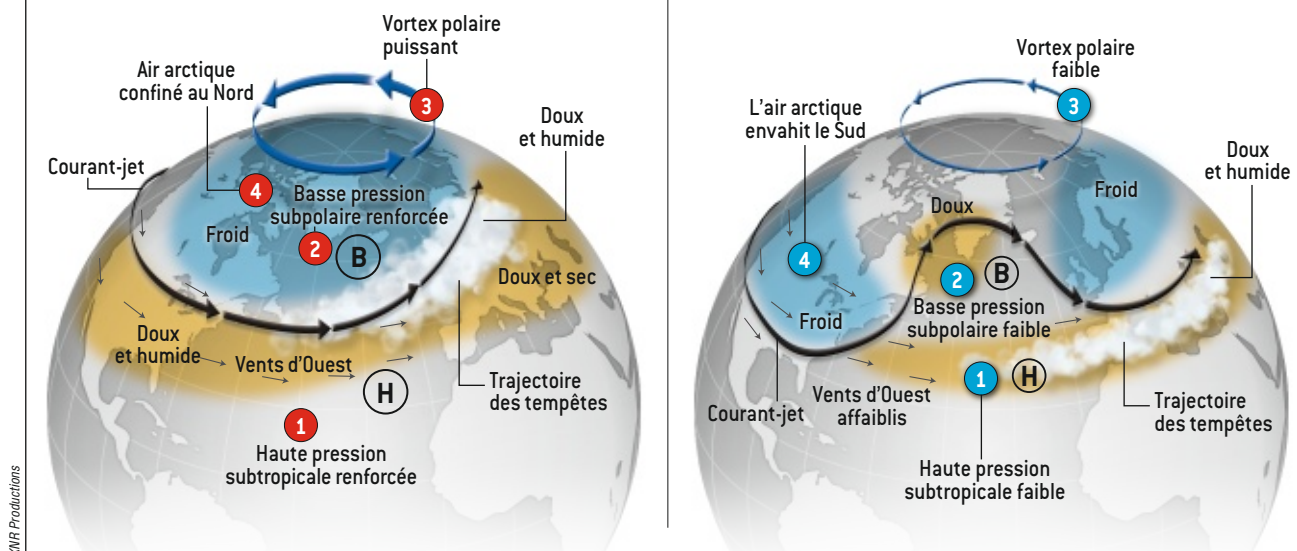
En revanche, avec un NAO négatif, les différences de pression sont moins marquées et affaiblissent les vents d'Ouest, et le courant-jet qui part de l'Amérique du Nord vire plus au Nord, atteignant le Groenland avant de dévier vers le Sud en direction de l'Europe. Mais dans ce cas, la trajectoire des

LIER LE CLIMAT ET LA MÉTÉO

Deux oscillations climatiques naturelles, l'Oscillation arctique (OA) et l'Oscillation nord-atlantique (NAO), peuvent influencer sur le temps hivernal des États-Unis et de l'Europe. Les indices OA et NAO qui caractérisent leur état peuvent être positifs ou négatifs, de façon généralement synchronisée. Le recul important de la banquise arctique estivale a entraîné des modifications climatiques qui favorisent des conditions OA et NAO négatives, conduisant à des hivers plus rigoureux.

Les états d'indices NAO et OA positifs sont caractérisés par un centre de haute pression atmosphérique (H) dans la zone subtropicale (1) et un centre de basse pression (B) dans la zone subarctique (2). Un indice OA positif est associé à un fort vortex polaire (3) ; ce dernier confine l'air arctique froid au Nord (4) et permet à l'air chaud des latitudes plus basses de remonter très au Nord à l'intérieur des États-Unis et en Europe. Dans ces conditions, le courant-jet et la trajectoire générale des tempêtes traversent l'Atlantique en remontant vers le Nord-Est, apportant chaleur et humidité à l'Europe du Nord.

Les états d'indices NAO et OA négatifs correspondent à des pressions atmosphériques plus modérées dans la zone subtropicale (1) et la zone subarctique (2). Un indice OA négatif est associé à un vortex polaire affaibli (3), ce qui permet aux masses d'air froid d'envahir les États-Unis et le Nord de l'Europe (4). Dans ces conditions, le courant-jet emprunte une trajectoire plus sinusoïdale : il passe au Sud de la côte Est des États-Unis et remonte haut au-dessus de l'Atlantique près du Groenland, avant de replonger vers l'Europe du Sud. Les tempêtes tendent à traverser l'Atlantique en filant directement vers l'Est, apportant ainsi de l'humidité au Sud de l'Europe.



tempêtes diverge du courant-jet, traversant l'Atlantique Nord directement vers le Sud de l'Europe et la Méditerranée, où cela apporte un temps plus humide et doux. L'Europe du Nord, au contraire, connaît alors une période de froid sec.

Quant à savoir s'il faut traiter l'OA et le NAO comme deux modes distincts de la variabilité naturelle du climat, les avis des climatologues sont partagés. Certains affirment que le NAO n'est qu'une manifestation nord-atlantique de l'OA ; pour d'autres, les dynamiques sont assez différentes pour justifier un traitement séparé. Si les deux indices sont souvent très corrélés, leurs comportements divergent parfois de façon importante, comme cela fut le cas durant l'hiver 2011-2012.

Il est difficile de distinguer les changements météorologiques liés aux oscillations naturelles du climat de ceux dus aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Comme ces deux phénomènes se superposent, il est nécessaire d'utiliser des méthodes statistiques pour les sépa-

rer. Des études récentes ont apporté de nouveaux éléments qui renforcent l'idée selon laquelle le réchauffement global et la fonte de la banquise arctique modifient nos hivers actuels en perturbant les rythmes normaux de l'OA et du NAO.

Des conditions réunies pour un temps hivernal

En revenant sur les années 1960, nous constatons que les indices OA et NAO étaient surtout négatifs, conduisant à des hivers plus neigeux et plus froids que la moyenne le long de la côte Est des États-Unis et en Europe du Nord. Il n'y a pas de raison de soupçonner que cette décennie d'hivers rudes ait été liée à autre chose qu'à la variabilité naturelle des indices OA et NAO. Cependant, des années 1970 aux années 1990, l'indice NAO a été le plus souvent positif, à une exception près. Il en a résulté des hivers doux, qui ont coïncidé avec la prise de conscience par la société du problème du réchauffement

global. Cela a conduit de nombreux scientifiques à faire l'hypothèse que l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre expliquerait ce qui semblait être une longue série d'hivers à indice NAO positif. Les modèles auxquels le GIEC se réfère prédisaient que cette tendance allait se poursuivre avec l'augmentation continue des gaz à effet de serre. Et pourtant, la prédominance des hivers à indices OA et NAO fortement positifs s'est inversée peu avant l'an 2000.

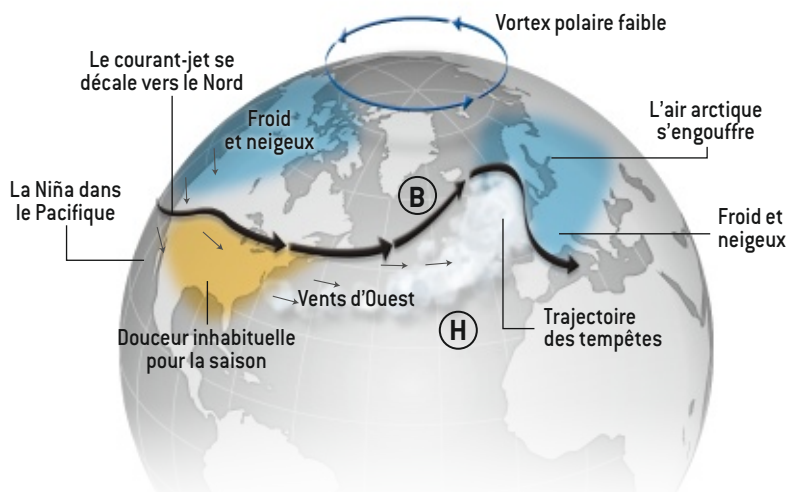
Le fait que cette série d'hivers à indice NAO positif ait pris fin ne signifie pas qu'on se soit trompé en supposant qu'il y avait un rapport entre la hausse des concentrations de gaz à effet de serre et l'oscillation nord-atlantique. Mais ce qui n'avait pas été anticipé à l'époque, c'est l'accélération de l'amplification arctique depuis la fin des années 1990. À partir du moment où les effets du réchauffement global se sont fait sentir au-dessus du cercle polaire, les conditions climatiques ont entamé une phase que Jim Overland et ses collègues de la NOAA ont qualifiée de « période arctique chaude ». Cette période a été caractérisée par un recul rapide de la banquise arctique, du pergélisol et des glaciers continentaux, mais aussi par la fonte en surface de l'inland-sis du Groenland – la calotte de glace qui recouvre 80 pour cent de cette île.

Dans chacun de ces changements, le processus dit de rétroaction glace-albédo jouerait un rôle crucial. Il s'agit de la diminution de l'albédo (la réflexion vers l'espace du rayonnement solaire incident sur une région), diminution due à la fonte de la couverture de glace, des surfaces terrestres et maritimes plus sombres se retrouvant exposées. La rétroaction glace-albédo inquiète beaucoup les scientifiques, car le recul de la banquise estivale expose davantage d'eau de mer. Celle-ci absorbe le rayonnement solaire, ce qui conduit à une hausse de la température des eaux de surface et a deux principaux effets de rétroaction. Premièrement, une partie de la chaleur en excès renforce encore davantage la fonte estivale de la banquise. Deuxièmement, l'océan libère lentement le reste de cet excédent de chaleur dans l'atmosphère au cours de l'automne. La pression atmosphérique et l'humidité augmentent dans l'Arctique et réduiraient les différences de température entre les latitudes arctiques et moyennes.

Une hausse de la pression atmosphérique arctique et une diminution du gradient de

CE QUI S'EST PASSÉ DURANT L'HIVER 2011-2012

Des conditions atmosphériques inhabituelles ont conduit à une étrange combinaison de conditions météorologiques extrêmes aux États-Unis et en Europe en 2012. Les oscillations OA et NAO sont souvent synchronisées, avec des indices soit positifs, soit négatifs pour les deux. Durant l'hiver 2011-2012, les deux indices étaient positifs en décembre et début janvier, mais l'OA est devenu négatif à partir de la mi-janvier et jusqu'au début février. Ce changement a permis à de l'air arctique d'envahir l'Europe centrale et de l'Est, où il a apporté un temps très froid et neigeux. En même temps, la combinaison d'un OA négatif et d'un événement La Niña a entraîné des conditions très froides et neigeuses en Alaska. La Niña a aussi influé sur la trajectoire du courant-jet dans le Nord des États-Unis, permettant à de l'air doux du golfe du Mexique de remonter sur l'Est des États-Unis.



Banquise antarctique : une dynamique différente

Si le déclin accéléré de la banquise Arctique fait depuis quelques années la une des journaux, en particulier à l'occasion des records successifs du minimum d'extension estivale, la situation de l'autre côté de la planète semble bien différente.

Le suivi satellitaire de l'extension des glaces de mer antarctiques sur la période 1978-2012 montre même une faible tendance positive pour l'extension spatiale à certaines saisons (une hausse de 0,3 pour cent par an en automne, mais une baisse de 0,08 pour cent par an en hiver). Ces tendances sont toutefois peu significatives, en raison des fortes fluctuations interannuelles et de l'importante variabilité spatiale. En particulier, le déclin est marqué autour de la péninsule Antarctique et de la mer de Weddell, alors que le secteur de la mer de Ross a plutôt vu une extension récente des glaces de mer vers le Nord. Concer-

nant l'épaisseur, autre paramètre crucial pour juger l'évolution de la couverture de glace, on ne dispose pas, à ce jour, de suffisamment de données dans l'hémisphère Sud pour établir une quelconque tendance. Quoiqu'il en soit, aucun déclin généralisé de la banquise australe n'est observé, contrairement à l'Arctique.

Les raisons de ces différences, encore mal comprises, sont diverses. En premier lieu, à la différence de l'Arctique où, du moins jusqu'aux années 1980, la majeure partie du bassin demeurait prise par les glaces toute l'année, la banquise antarctique est saisonnière, réduite en été depuis longtemps. Cette banquise saisonnière subit des fluctuations interannuelles plus marquées du fait de sa plus faible « inertie », ce qui rend difficile le dégagement d'une tendance à long terme.

Une autre raison pourrait résulter de la combinaison de la géogra-

phie et de la circulation atmosphérique australe. L'Antarctique, continent entouré d'un océan, implique que les glaces de mer sont en « dérive libre ». Cela signifie qu'elles sont entraînées par les vents de surface alors que la glace de l'Arctique est bloquée par les côtes canadiennes et groenlandaises proches, ce qui crée des efforts mécaniques internes à la glace. La composante vers le Nord de la circulation atmosphérique circum-Antarctique étant importante, les glaces de mer peuvent être déportées vers le Nord, ouvrant ainsi plus au Sud des zones d'eau libre qui pourront regeler en surface. Cela pourrait expliquer la variabilité régionale constatée.

En outre, il a été montré récemment que, dans l'Arctique, l'association de l'amincissement de la couche de glace et des contraintes mécaniques, qui fragilisent la banquise, entraîne son déclin. Du fait de la dérive libre de la

banquise australe, la mécanique des glaces jouerait un rôle plus limité sur l'évolution globale en Antarctique.

Par ailleurs, et paradoxalement, l'accroissement (très relatif) des glaces de mer antarctiques résulterait du réchauffement climatique ! En effet, dans les zones polaires, un réchauffement peut renforcer les précipitations neigeuses qui participent au bilan positif de masse de la banquise en l'épaississant par le dessus. Ce mécanisme est souvent évoqué également pour les glaces continentales. En conclusion, si la banquise australe ne joue pour l'instant pas le rôle de sentinelle du changement climatique comme la banquise boréale, son absence d'évolution marquée n'est pas en contradiction avec le réchauffement global.

Jérôme Weiss

Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement, (CNRS/Univ. Joseph Fourier), Grenoble

température favorisaient le développement de conditions OA et NAO négatives au cours de l'hiver. Cette situation affaiblirait le vortex polaire et le courant-jet, qui deviendraient moins efficaces pour empêcher les masses d'air arctique froides, avec leur teneur en eau élevée, de s'étendre vers les latitudes moyennes et d'y apporter des épisodes de froid intense et de chutes de neige importantes. De surcroît, un courant-jet affaibli présenterait une trajectoire plus ondulante, et pourrait ainsi enfermer certaines régions dans un régime froid pendant une durée importante. Combinés, ces motifs perturbés de circulation atmosphérique tendraient à provoquer des épisodes de froid hivernal plus fréquents et plus longs en Amérique du Nord et en Europe.

D'autres facteurs peuvent jouer un rôle. Il en est ainsi du phénomène d'oscillation australe El Niño ou ENSO (*El Niño Southern Oscillation*). Il s'agit d'une autre oscillation climatique puissante touchant l'océan Pacifique tropical, un phénomène très irrégulier dont la période évolue entre deux et sept ans : un réchauffement des eaux de surface de l'Est de l'océan Pacifique tropical (événement El Niño) s'accompagne de hautes pressions atmosphériques dans le Pacifique Ouest ; inversement, un refroidissement des eaux à l'Est de l'océan Pacifique (événement

La Niña) s'accompagne de basses pressions dans le Pacifique Ouest.

L'impact de l'Oscillation australe El Niño/La Niña se ressent jusque sur la côte Est des États-Unis, où le courant-jet se décale vers le Sud au cours des années El Niño, ce qui entraîne un temps hivernal plus froid et humide. Inversement, le courant-jet se décale vers le Nord au cours des années La Niña, ce qui produit un hiver plus doux et sec dans cette même région.

Réunies, les conditions d'indices OA et NAO négatifs pendant les années El Niño pourraient renforcer le risque d'hivers froids le long de la côte Est des États-Unis ; c'est ce qui s'est produit en 2009-2010. Les conditions d'indices OA et NAO négatifs peuvent également s'opposer aux effets de La Niña et empêcher les hivers doux attendus : ainsi, durant l'hiver 2010-2011, les températures basses et les chutes de neige record à New York et à Philadelphie ont surpris les prévisionnistes qui, à partir de l'événement La Niña en cours, attendaient des conditions plus douces.

Les changements dans l'Arctique ont beau suggérer pour l'avenir des vagues de froid plus fréquentes et de durée plus longue, nous ne pouvons jamais savoir avec certitude comment cela se traduira pour une année donnée : les prévisions

■ BIBLIOGRAPHIE

J. A. Francis et S. J. Vavrus, **Evidence linking arctic amplification to extreme weather in mid-latitude**, *Geophysical Research Letters*, vol. 39, L06801, 2012.

C. H. Greene *et al.*, **An arctic wild card in the weather**, *Oceanography*, vol. 25, pp. 7-9, 2012.

J. E. Overland *et al.*, **The recent arctic warm period**, *Tellus*, vol. 60(4), pp. 587-597, 2008.

J. Weiss, **Recul des banquises et réchauffement climatique**, *Dossier Pour la Science*, n° 54, janvier-mars 2007.

C. H. Greene et A. J. Pershing, **Climate drives sea change**, *Science*, vol. 315, pp. 1084-1085, 2007.