

ALERTE DANS LES HAUTES LATITUDES NORD : L'ARCTIQUE RÉAGIT AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

Alain Royer

Professeur en géophysique de l'environnement
Université de Sherbrooke

L'Arctique serait-il le canari qui servait autrefois de sentinelle face aux risques du coup de grisou dans les mines de charbon? L'augmentation des températures de l'air à la surface de l'Arctique s'accélère depuis les 20 dernières années. Les variations actuelles du climat des hautes latitudes nord seraient-elles celles que nous pourrions vivre dans les latitudes moindres d'ici 20 ou 50 ans?

Ce phénomène de réchauffement accru serait attribuable à une « rétroaction positive », comme on dit dans le jargon, aussi appelé « effet d'amplification arctique » (EAA). Une « rétroaction » est un processus climatique produit en réponse au réchauffement anthropique global (l'effet de serre). Cette réaction peut soit accélérer ou accentuer le changement initial; on parle alors de « rétroaction positive » si l'augmentation de température est plus forte que la moyenne globale. La rétroaction peut être au contraire « négative » lorsque la perturbation atténue le phénomène initial, par exemple par un refroidissement.

Il est aujourd'hui essentiel de comprendre cet effet d'amplification arctique afin de mieux prévoir le climat futur qui pourrait s'emballer. Ce qui nous attend, ici, dans nos latitudes, pourrait significativement être perturbé par ces anomalies du climat arctique. Nous présentons dans cet article quelques hypothèses avancées pour expliquer ce phénomène d'amplification arctique tout en revenant sur l'état du réchauffement de l'environnement nordique. Nous rappelons à ce titre l'incertitude qui entoure les différents processus d'emballage en lien avec les changements climatiques et qui modifient déjà le climat sous nos latitudes.



Augmentation de la température arctique¹

La littérature recense de nombreux changements de l'environnement du Nord dus à l'impact du réchauffement climatique (voir par exemple les rapports et les récents articles de synthèse suivants : IPCC [GIEC], 2014; AMAP, 2017 et 2019; Blunden, Hartfield et Arndt, 2018; Goosse et al., 2018; RCCC, 2019; Overland et al., 2019; Box et al., 2019). Parmi ces phénomènes, on peut citer, outre une augmentation accrue des températures, la fonte du pergélisol, une diminution de la durée et de la couverture de neige, une augmentation de l'étendue des zones arbustives dans la toundra, la fonte des glaces (glace de mer, glaciers et calottes glaciaires), etc.

Le taux d'augmentation des températures moyennes annuelles de l'air à la surface est deux fois plus important dans l'Arctique (0,4 °C/décennie, avec une anomalie de l'ordre de 1,6 °C pour ces dernières années [2015-2018] par rapport à la période 1950-1980; Overland

1. L'Arctique est définie en général comme la région entourant le pôle Nord jusqu'au cercle polaire arctique (latitude 66° 34'N), mais pouvant aller jusqu'à 55 °N dans l'Est du Canada si l'on prend une définition climatique, limitée par l'isotherme estival de 10 °C, par exemple. La tranche de latitude 60-90°N est souvent prise comme définition de l'Arctique dans les modèles. Globalement, l'Arctique est à moitié océanique (Océan arctique) et à moitié terrestre.

et al., 2019) comparé à la moyenne à l'échelle du globe (0,2 °C/décennie, avec une anomalie actuelle de 0,9° par rapport à la période 1950-1980). On constate ainsi que le seuil de +2 °C inscrit dans l'Accord de Paris est déjà presque atteint en Arctique!

C'est en hiver que ce contraste est le plus important (Figures 1 et 2). Pour l'Arctique (>60°N), on observe un taux moyen de variation de +0,7 °C/décennie, comparée à celui de l'hémisphère Nord qui est de l'ordre de +0,15 °C/décennie (sur la période 1960-2013) [Cohen et al., 2014]. Ces variations ne sont pas uniformes sur l'Arctique et il a été démontré qu'elles dépendent de l'évolution de l'étendue de la glace de mer.

Ce contraste entre les saisons est manifeste pour l'Arctique canadien, avec une augmentation deux fois supérieure l'hiver (+4,83 °C/décennie) que l'été (+2,27 °C/décennie) depuis les 71 dernières années (1948-2018) (Figure 2).

La section suivante discute comment ce contraste pourrait s'expliquer par un EAA plus important en hiver. Cet aspect a été récemment analysé et modélisé par Dai, Luo, Song et Liu (2019).

Effet d'amplification arctique (EAA)

L'augmentation plus importante des températures observée dans le Nord par rapport au reste du globe pourrait s'expliquer par un phénomène de rétroaction positive au réchauffement global anthropique. Cet effet avait déjà été anticipé dans les années 1980 (voir par exemple Manabe et Stouffer, 1979). Plusieurs mécanismes peuvent en effet générer un effet d'amplification des températures, même s'il y a encore beaucoup d'incertitudes sur toutes les raisons en cause (voir la revue de littérature de Serreze et Barry, 2011; 2014; Goosse et al., 2018 et Box et al., 2019). Le réchauffement climatique global génère dans l'Arctique cinq principaux processus de changements, qui sont comparés dans la Figure 3 : 1) un changement du gradient thermique vertical atmosphérique (*Lapse rate*); 2) une modification du coefficient de réflexion du rayonnement solaire à la surface (albédo = rapport entre le rayonnement solaire réfléchi et reçu); 3) une augmentation de la vapeur d'eau atmosphérique; 4) une plus grande couverture nuageuse durant l'hiver et 5) une modification du taux de croissance de la glace de mer selon son épaisseur.

Une récente étude conduite par Dai et al., publiée dans *Nature*, tente pour la première fois de comparer ces

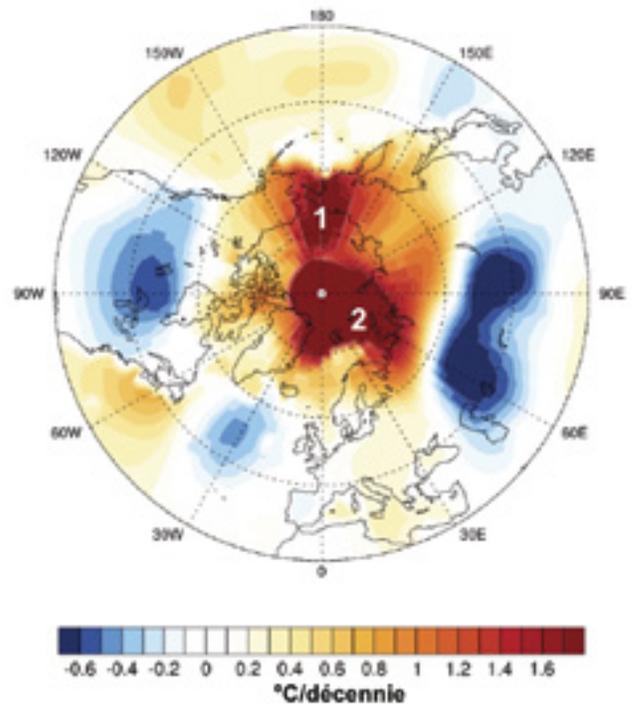


Figure 1. Distribution des changements de température sur la période hivernale (DJF) sur la période 1997-2017 (échelle de couleur) montrant des variations spatiales marquées. Il a été démontré que celles-ci correspondent aux zones de plus fortes variations d'étendue de la glace de mer en hiver (soit la zone 1 dans la mer de Sibérie orientale - Détroit de Béring et la zone 2 de la mer de Barents) et qui contrastent avec les zones de refroidissement des parties centrales de l'Amérique du Nord et de l'Eurasie (45°N). Source : GISS-NASA, courtoisie de X. Zhang and L. Peng, Arctic Research Consortium of the United State.

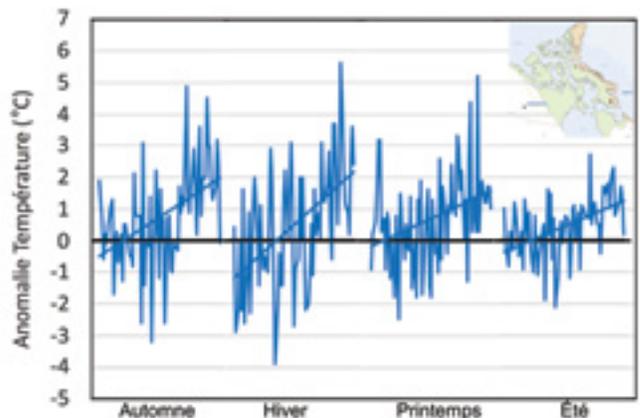


Figure 2. Évolution des « anomalies » de température de la région climatique « Toundra arctique » du Canada (en vert sur la carte en médaillon), de 1948 à 2018, pour les saisons d'automne, d'hiver, de printemps et d'été (écart saisonnier par rapport à la « normale climatique » 1961-1990 moyenne). L'augmentation relative est la plus forte en hiver. L'année 2010 a été le record de chaleur jamais enregistré dans le Nord canadien durant l'hiver (+5,6 °C). Source : Stations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada (2019).

effets exprimés en termes d'énergie relative apportée ou enlevée au système sur 10 ans (exprimés en Watt par m² par décennie). Cela permet de quantifier leur importance relative durant un cycle annuel où les conditions changent complètement entre l'été – quand il fait jour tout le temps, plus chaud, et qu'il y a moins de glace de mer – et l'hiver durant la nuit arctique quand la glace de mer se reforme. Les résultats de cette comparaison, détaillés ci-dessous et synthétisés dans la Figure 3, montrent que les effets 1, 3 et 4 amplifient le réchauffement, alors que les effets 2 et 5 atténuent l'EAA (rétroaction négative).

Dans la Figure 3, l'EAA (courbe noire, notée AA) est définie par le rapport entre la tendance des températures de surface de l'Arctique (définie ici entre 67-90 °N) et celle du globe (une valeur > 1 signifie qu'il y a amplification, soit un réchauffement accru de l'Arctique par rapport au reste du globe). On constate que l'EAA est à son maximum l'hiver, soit entre novembre et avril-mai.

1. La première cause du réchauffement arctique accru est un flux de chaleur émis par la surface plus important l'hiver dans des conditions où il y a moins d'échanges dans l'atmosphère (stratification stable). Ce flux de chaleur est exprimé ici par le changement du gradient thermique atmosphérique notée *Long Wave LW_up* (courbe magenta en W.m⁻²/décennie, Figure 3). Dans un environnement en réchauffement aux hautes latitudes, des conditions de stratification atmosphérique stable dans la basse atmosphère génèrent un réchauffement plus important à la surface que dans la haute atmosphère, en comparaison avec une atmosphère qui serait uniforme, avec plus d'échanges entre la basse et la haute atmosphère. La tendance au changement de *LW_up* est minimale durant l'été (juin, juillet, août) alors qu'elle est maximale durant l'hiver (Figure 3), en phase avec les variations d'amplitude de l'EAA.

2. La deuxième composante importante du bilan d'énergie est la quantité de rayonnement absorbée par la surface, alors que le rayonnement solaire incident atteint son maximum fin juin. Dans la Figure 3, ce bilan est exprimé par le flux solaire net (noté net Short Wave : net SW = rayonnement solaire incident – celui réfléchi, courbe rouge en W.m⁻²/décennie). Une diminution d'albédo, soit une plus grande absorption du rayonnement solaire due à la fonte de glace de mer, se traduit au début de l'été par une augmentation du flux solaire net. À partir de fin juin, le réchauffement global accentue la fonte des glaces, ce qui diminue encore l'albédo qui, à son tour, augmente l'absorption solaire par l'eau libre. Cela suggère que l'énergie supplémentaire absorbée durant cette période contribuera à une fonte accélérée de la glace en automne (minimum du flux solaire net d'août à septembre). L'eau qui reste libre de glace durant l'hiver devient alors une source de chaleur

énorme qui contribue significativement à l'EAA durant l'hiver (on peut avoir une différence de 10 à 30 °C entre les surfaces en eau libre et celle en glace l'hiver).

3. La dernière composante du bilan d'énergie considérée est celle résultant des flux de vapeur d'eau (noté flux de chaleur latente, LH) qui a été additionnée, dans la Figure 3, avec le flux de chaleur sensible (SH), un autre mécanisme d'échange de chaleur par les flux turbulents (SH+LH, trait cyan en W.m⁻²/décennie). Les variations des tendances de l'amplitude de SH+LH durant l'année suivent exactement celles de l'EAA, avec un maximum hivernal. Cette augmentation hivernale de SH+LH résulte d'une augmentation de température de la surface de l'océan, qui entraîne une augmentation accrue de la température atmosphérique durant l'hiver.

4. La physique des nuages est très complexe, car pouvant générer, selon les conditions (été ou hiver) et leur état (nuage de particules de glace ou d'eau, altitude du nuage), aussi bien une rétroaction négative (effet d'écran au soleil), que positive (par effet de serre). Il semblerait qu'une diminution de l'étendue de la glace de mer en hiver provoquerait une augmentation de la couverture nuageuse qui augmenterait la température de surface par effet de serre. Ce mécanisme pourrait accélérer la fonte de la glace de mer (rétroaction positive).

5. Enfin, l'effet de la vitesse de croissance de la glace de mer selon son épaisseur pourrait éventuellement atténuer les processus précédents. En effet, une glace mince croît plus vite qu'une glace épaisse, grâce à sa plus grande conduction de chaleur, pouvant ainsi amortir la réponse aux effets 1, 3 et 4 mentionnés précédemment.

Il ressort ainsi de cette analyse comparative des différents mécanismes en cause pouvant expliquer l'EAA hivernal que l'effet du rayonnement thermique émis par la surface dans une atmosphère fortement stratifiée (effet 1, *LW_up*, Figure 3) est le plus important. L'augmentation de *LW_up* hivernal peut être attribuée à un réchauffement amplifié de l'océan de surface, dû à la combinaison de l'effet d'absorption accrue du rayonnement solaire l'été (albédo de surface plus faible) et de l'ouverture de nouvelles surfaces en eau libre (non englacée) durant l'hiver. L'augmentation des flux sensible et turbulent (effet 3, SH+LH) contribue aussi à l'EAA, mais de façon moindre, la différence relative hiver moins été de SH+LH étant deux fois moindre que celle de *LW_up*.

Les travaux de Dai et al. (2019) montrent aussi que ces observations sont bien reproduites par les modèles, moyenne des simulations provenant de 38 modèles climatiques pour 2006-2016 dans le cadre de l'expérience CMIP5 du GIEC (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, IPCC, 2014) et avec un modèle complètement couplé océan-atmosphère-glace de mer (Hurrell et al.,

2013). Dai et al. (2019) ont en particulier réalisé des expériences de simulations numériques originales isolant l'effet de la glace de mer dans le calcul des flux et montrant la contribution spécifique de l'évolution de la glace de mer arctique sur l'EAA.

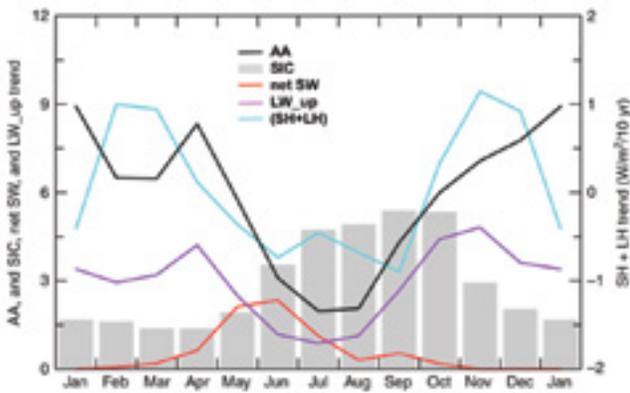


Figure 3. Cycle annuel moyen (1979-2016) des tendances (variations moyennes sur 10 ans) en Arctique (67-90°N) de la couverture de glace (SIC, histogramme en grisé, exprimée en -10^5 km²/décennie), de l'amplification arctique (AA, trait noir) et des flux d'énergie (net SW trait rouge, LW_up trait magenta et SH+LH trait cyan).

Conclusion

L'augmentation de température observée dans le Nord, deux fois plus importante que partout ailleurs sur la planète, résulte d'un effet d'amplification du réchauffement mondial. L'étude récente de Dai et al. (2019) met en évidence certaines relations de causes à effets, en particulier durant l'hiver où des processus de rétroaction positive accélèrent le réchauffement initial.

Ce cas particulier de l'évolution de l'Arctique, différente du reste du globe, est intéressant, car il démontre que ces processus de rétroaction pourraient devenir une source d'incertitude importante pour les prévisions du climat futur s'ils n'étaient pas (ou mal) pris en compte. Le climat futur ne peut être anticipé par une simple extrapolation des tendances actuelles observées.

Enfin, il est d'autant plus important de mieux connaître ces processus d'emballage apparent au niveau de l'Arctique que ceux-ci influencent déjà le climat de nos latitudes. Par exemple, une cause majeure de cet EAA est l'étendue de plus en plus marquée d'eau libre de glace dans le Nord. La chaleur des eaux ouvertes dans l'océan Arctique est libérée dans l'atmosphère, ce qui entraîne un affaiblissement du vortex polaire, aussi appelé courant-jet (*jet-stream*). À la rencontre de l'air froid arctique et l'air chaud du Sud, ce puissant courant aérien résultant du gradient thermique régule les fluctuations de ces masses

d'air. S'il s'affaiblit, il peut laisser « échapper » une masse d'air polaire vers le sud et pousser une masse d'air chaude et humide vers le nord. Ces changements persistants de patrons du courant-jet provoquent ainsi des événements de températures et de précipitations extrêmes, inhabituels à nos latitudes dans l'hémisphère Nord.

AMAP (2019). *AMAP Climate Change Update 2019: An Update to Key Findings of Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017.* Repéré à <https://www.amap.no/documents/download/3295/inline>¹

AMAP (2017). *Snow, Water, Ice, and Permafrost in the Arctic (SWIPA).* Repéré à <https://www.amap.no/documents/download/2987/inline>

Blunden, J., Arndt, D.S. et Hartfield, G. (2018). State of the Climate in 2017. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 99(8), Si-S310. doi:10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1

Box, J., Colgan, W.T., Christensen, T.R., Schmidt, N.M., Lund, M., Parmentier, F.-J. W. ... Olsen, M.S. (2019). Key Indicators of Arctic Climate Change: 1971–2017. *Environmental Research Letters.* <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafc1b>

Cohen, J., Screen, J.A., Furtado, J.C., Barlow, M., Whittleston, D., Coumou, D. ... Jones, J. (2014). Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather, *Nature Geoscience*, 7(9),627-637.

Dai A., Luo, D., Song, M. et Liu, J. (2019). Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO2. *Nature Communications*, 10, 121.

ECCC (2019). *Climate Trends and Variations Bulletin*, Environment and Climate Change Canada. Repéré à <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/science-research-data/climate-trends-variability/trends-variations.html>

IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Repéré à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf

Goosse H., Kay, J.E., Armour, K.C., Bodas-Salcedo, A., Chepfer, H., Docquier, D. ... Vancoppenolle, M. (2018). Quantifying climate feedbacks in polar regions. *Nature Communications*, 9:1919. DOI: 10.1038/s41467-018-04173-0

Hurrell, J.W., Holland, M.M. et Gent, P.R. (2013). The community earth system model: a framework for collaborative research. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 94, 1339-1360.

Manabe S. et Stouffer, R.J. (1979). A CO2-climate sensitivity study with a mathematical model of the global climate. *Nature*, 282, 491-992.

Overland, J., Dunlea, E., Box, J.E., Corell, R., Forsius, M., Kattsov, V. ... Wang, M. (2019). The Urgency of Arctic Change. *Polar Science.* <https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.11.008>.

RCCC (2019). *Rapport sur le climat changeant du Canada.* Repéré à <https://changingclimate.ca/CCR2019/fr/>

Serreze M. C. et Barry R.G. (2011). Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global and Planetary Change*, 77, 85-96.

Serreze, M.C. et Barry R.G. (2014). *The Arctic Climate System.* New York: Cambridge University Press.

1. Dans le cadre du Programme de surveillance et d'évaluation de l'Arctique (PSEA) du Conseil de l'Arctique, le rapport SWIPA est le fruit d'une collaboration d'une centaine de scientifiques du monde entier qui publient régulièrement une synthèse des changements climatiques des régions nordiques et de leurs impacts. Le Conseil de l'Arctique est une instance intergouvernementale réunissant les huit pays circumpolaires : États-Unis, Canada, Russie, Danemark, Finlande, Islande, Norvège et Suède.