



**HAL**  
open science

## **Les rivières atmosphériques de l'Antarctique.**

Vincent Favier, Jonathan Wille, Cécile Agosta, Charles Amory, Léonard Barthélémy, Francis Codron, Élise Fourré, Irina Gorodetskaya, Gerhard Krinner, Benjamin Pohl

► **To cite this version:**

Vincent Favier, Jonathan Wille, Cécile Agosta, Charles Amory, Léonard Barthélémy, et al.. Les rivières atmosphériques de l'Antarctique.. La Météorologie, 2022, 117, pp.19-23. 10.37053/lameteorologie-2022-0032 . hal-03666563

**HAL Id: hal-03666563**

**<https://hal.science/hal-03666563>**

Submitted on 12 May 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Les rivières atmosphériques de l'Antarctique

Vincent Favier<sup>1</sup>, Jonathan Wille<sup>1</sup>, Cécile Agosta<sup>2</sup>, Charles Amory<sup>1,3</sup>,  
Léonard Barthélémy<sup>4</sup>, Francis Codron<sup>4</sup>, Élise Fourné<sup>2</sup>, Irina  
Gorodetskaya<sup>5</sup>, Gerhard Krinner<sup>1</sup>, Benjamin Pohl<sup>6</sup>

1. Institut des géosciences de l'environnement, Université Grenoble Alpes / CNRS / IRD / G-INP, Grenoble
2. Laboratoire des sciences du climat et l'environnement, CNRS / CEA-UVSQ / IPSL, Paris Saclay, Gif-sur-Yvette
3. Laboratory of Climatology, Department of Geography, University of Liège, Liège, Belgique
4. Laboratoire d'océanographie et du climat : expérimentations et approches numériques, Sorbonne Université / IRD / CNRS / MNHN, Paris
5. Centre for Environmental and Marine Studies, Department of Physics, University of Aveiro, Portugal
6. Biogéosciences, CNRS / Université de Bourgogne Franche-Comté, Dijon

vincent.favier@univ-grenoble-alpes.fr

(reçu le 16 novembre 2021 ; accepté le 21 février 2022)

## Résumé

Sur une grande partie de l'Antarctique, le bilan de masse (c'est-à-dire de neige) de surface est dominé par quelques événements de précipitations extrêmes. Ces événements dépendent d'intrusions de masses d'air très humide associées à des phénomènes dénommés rivières atmosphériques en provenance de l'Océan Austral. Ces rivières atmosphériques influencent fortement le climat ; pourtant, les caractéristiques, les mécanismes et les impacts associés restent mal connus en Antarctique. Nous résumons ici l'état des connaissances sur la mise en place de ces événements extrêmes et leurs impacts à la fois sur l'accumulation de neige, le réchauffement et la fonte en surface de la calotte.

Le bilan de masse de la calotte antarctique, défini comme la différence entre le bilan de masse de surface et la décharge de glace à l'océan, représente le bilan comptable de la quantité de glace posée sur le continent. Malgré d'importants efforts déployés pour évaluer l'avenir du bilan de masse de l'Antarctique, les estimations de sa contribution à l'élévation du niveau de la mer en 2100 selon le scénario d'évolution Shared Socioeconomic Pathways (SSP8.5) varient entre 3 et 34 cm (Fox-Kemper *et al.*, 2021). La contribution de l'Antarctique sera fortement contrôlée par les pertes de masse dues à la décharge de glace vers l'océan, mais les variations décennales des précipitations et du bilan de masse de surface joueront aussi un grand rôle sur le niveau des mers futur. En effet, les précipitations contrôlent encore la variabilité spatio-temporelle du bilan de masse de l'Antarctique de l'Est, principale zone englacée du globe, et leur augmentation constituera la seule compensation significative à l'élévation future du niveau des mers (Fox-Kemper *et al.*, 2021). Des estimations précises du bilan de masse de surface, et par suite des précipitations et de la fonte, sont donc cruciales.

Malgré la couverture quasi complète du continent par de l'eau solide, l'Antarctique est un vaste désert. Comme dans tous les déserts, les précipitations sont dominées par quelques événements extrêmes (Wille *et al.*, 2021). Paradoxalement, la trajectoire des tempêtes dans l'océan Austral offre des conditions favorables à la circulation zonale de séries de cyclones extratropicaux qui tournent autour du continent en transportant de l'humidité vers le littoral antarctique. Néanmoins, tous les cyclones extratropicaux de l'océan Austral ne constituent pas une source de précipitations pour la calotte. Pour que les précipitations soient significatives, des conditions de blocage sont indispensables pour créer un transport méridien d'humidité, depuis l'océan vers la calotte (Wille *et al.*, 2019). Il a été récemment démontré que des situations d'intenses blocages donnaient parfois lieu à des rivières atmosphériques (figure 1), générant l'intrusion de grandes quantités de chaleur et d'humidité, impactant ensuite l'Antarctique, parfois jusqu'au cœur du continent.

Les rivières atmosphériques restent pourtant peu étudiées aux hautes latitudes. Dans l'hémisphère Nord, elles

## Abstract

Over much of Antarctica, the surface mass balance (i.e. the resultant of snow fluxes at the surface of the ice sheet) is dominated by a few extreme precipitation events. It has recently been shown that these events are linked to intrusions of highly humid air masses related with atmospheric rivers traversing the Southern Ocean. These atmospheric rivers strongly influence the climate, yet their meteorological characterization and associated impacts remain poorly understood in Antarctica. We summarize here the latest research regarding the development of these extreme events and their impacts on snow accumulation, warming, and surface melt on the Antarctic ice sheet.

ont été décrites comme des contributeurs au déclin de la glace de mer de l'Arctique (Komatsu *et al.*, 2018) et à la perte de masse de la calotte du Groenland (Mattingly *et al.*, 2020). Ces impacts proviennent de l'augmentation du rayonnement incident des grandes longueurs d'ondes en surface de la calotte (intense réémission vers le bas du rayonnement terrestre piégé par les nuages chauds de faible altitude) et de l'advection d'air chaud associée à un fort effet de foehn. Aux antipodes, les impacts des rivières atmosphériques sont multiples et ne sont pas encore tous compris, certains n'étant vraisemblablement pas encore décrits. Nous présentons ici un tour d'horizon du consensus actuel sur les situations météorologiques à l'origine des rivières atmosphériques qui atteignent l'Antarctique. Nous résumerons aussi leurs impacts connus à la fois en termes d'accumulation de neige, de réchauffement et de fonte en surface de la calotte.

## Qu'est-ce qu'une rivière atmosphérique ?

Les rivières atmosphériques (Zhu et Newell, 1998) sont décrites dans le glossaire de météorologie de l'American Meteorological Society, comme des flux atmosphériques de forme filamentaire, transportant d'intenses quantités de vapeur d'eau, généralement associés à un jet de basse altitude à l'avant du front froid d'une dépression extratropicale. Ces flux sont aussi associés

à l'ascendance d'importantes masses d'air chaud et humide issues des basses couches du secteur chaud de la dépression et s'élevant rapidement jusqu'à la troposphère supérieure lors de leur déplacement vers le pôle (voir par exemple Dacre *et al.*, 2019). Il en résulte un événement précipitant intense, ou parfois une série d'événements précipitants lorsque le système mis en place perdure en raison de conditions de blocage atmosphérique favorables (Sodemann et Stohl, 2013). Les rivières atmosphériques sont une composante importante du cycle hydrologique mondial. Par exemple, pour les moyennes latitudes, elles représentent environ 90 % du transport méridien de vapeur d'eau, alors qu'elles ne couvrent que 10 % environ de la surface ; quatre ou cinq rivières atmosphériques dans chaque hémisphère peuvent ainsi suffire pour transporter la majorité des flux méridiens sur le globe (Zhu et Newell, 1998).

La plupart des recherches sur les rivières atmosphériques se sont concentrées sur les moyennes latitudes. Jusqu'à récemment, seuls quelques événements particuliers, ayant présenté un fort impact, avaient été décrits pour l'Antarctique (Gorodetskaya *et al.*, 2014). Grâce à la compréhension acquise dans ces études sur les processus mis en jeu, une analyse générale cohérente sur le long terme était possible. Nous avons ainsi récemment développé un algorithme de détection des rivières atmosphériques pour l'Antarctique (Wille *et al.*, 2019), que nous avons testé sur différents produits de réanalyses climatiques (NCEP-NCAR/DOE, CFSR, ERA-Interim, JRA-55, Merra-2 ou ERA5).

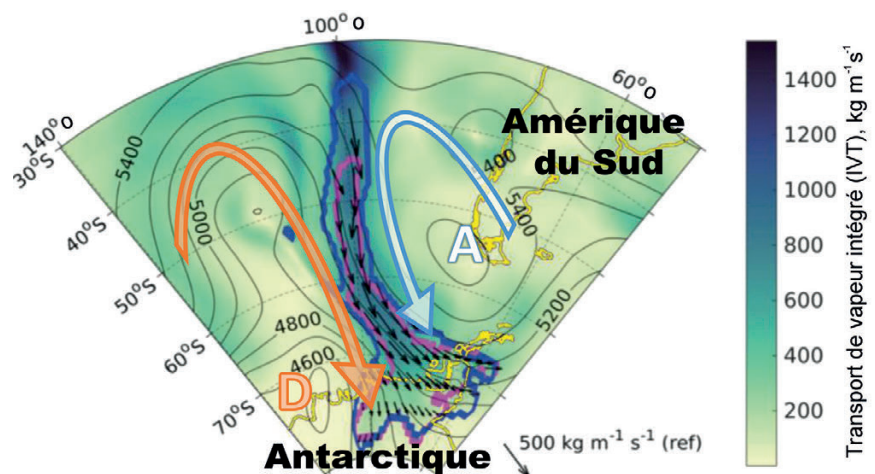


Figure 1. Transport de vapeur d'eau intégré sur l'atmosphère lors de la rivière atmosphérique provoquée par une situation de blocage et ayant contribué à l'intense événement de fonte hivernale du 25 au 30 mai 2016. Le contour violet (bleu) montre les limites de la rivière le 25 mai 2016 identifiée par l'algorithme basé sur le calcul des valeurs de IWV (respectivement de vIVT). Les flèches noires représentent le transport de vapeur d'eau au cœur de la rivière atmosphérique. Les contours noirs représentent l'altitude du géopotential à 500 hPa (en mètres). Les grandes flèches montrent le sens de rotation des masses d'air autour du centre dépressionnaire (D) et de l'anticyclone (A). Figure adaptée de Wille *et al.* (2019).

## Algorithme de détection des rivières atmosphériques pour l'Antarctique

Nous avons développé un algorithme de détection basé sur le calcul de la climatologie de variables décrivant l'intensité du contenu en humidité des masses d'air. Pour un pas de temps donné, la détection d'un événement est obtenue lorsque le contenu en humidité dépasse le 98<sup>e</sup> centile (centiles calculés en chaque point, pour le jour considéré) des valeurs de la variable considérée sur au moins 20° de latitude. Ces critères simples permettent de décrire la cohérence spatiale et le caractère extrême (usage d'un centile élevé) de l'événement. L'algorithme développé présente deux schémas de détection : l'un basé sur la vapeur d'eau intégrée (IWV) et l'autre sur le transport méridional de vapeur d'eau intégré verticalement (vIVT) (Wille *et al.*, 2019, 2021). Les deux schémas donnent des résultats proches en termes d'occurrence de rivières atmosphériques, mais aussi de contour de la zone impactée par chaque rivière atmosphérique détectée (figure 1). Néanmoins, nous constatons que le critère basé sur l'IWV est légèrement plus approprié pour étudier les effets des rivières atmosphériques sur la fonte de surface, car les valeurs extrêmes d'IWV au-dessus de la calotte reflètent le développement de nuages à phase mixte (solide et liquide) émettant un rayonnement de grandes longueurs d'ondes incident anormalement élevé. Les calculs basés sur le vIVT s'avèrent plus pertinents pour étudier le rôle des rivières atmosphériques dans la génération des précipitations. En effet, l'ajout de la composante méridienne du vent dans les calculs permet de prendre en compte les effets dynamiques provoquant l'ascendance des masses d'air

en bordure du continent et les précipitations orographiques (Wille *et al.*, 2021).

## Rivières atmosphériques et bilan de masse de surface

En appliquant ces algorithmes de détection à diverses réanalyses climatiques (voir plus haut), nous avons pu produire des catalogues d'occurrence de ces événements et les comparer aux variations de fonte et de précipitations fournies par un modèle de climat régional (le modèle atmosphérique régional, MAR). Nous avons ainsi constaté que les rivières atmosphériques avaient des impacts forts en Antarctique.

Ces événements sont peu fréquents et se produisent entre deux et dix fois par an dans une région donnée de l'Antarctique. Pourtant, malgré le faible nombre d'événements annuels, les rivières atmosphériques sont responsables des précipitations neigeuses d'intensité extrême. Dans certaines régions, 70 % des événements précipitants les plus intenses – dans le cas présent, les précipitations dépassant le 99<sup>e</sup> centile – ont lieu pendant des rivières atmosphériques. Les cumuls de précipitations associés représentent jusqu'à 20 % des précipitations annuelles dans les régions concernées, notamment en Antarctique de l'Est (Wille *et al.*, 2021). Elles contrôlent ainsi fortement la variabilité interannuelle de l'accumulation de neige en surface (figure 2b). En conséquence, sur la majeure partie du continent, la tendance d'évolution depuis 1980 et la variabilité de l'accumulation sont significativement associées à celle de la fréquence des rivières atmosphériques.

Dans le même temps, en raison de leur impact sur les anomalies de rayonnement de grandes longueurs d'onde incident et la génération d'intenses effets de foehn, les rivières atmosphériques entraînent des valeurs extrêmes de température. Elles déclenchent ainsi les seuls événements de fonte observés en hiver sur les plateformes glaciaires flottantes de la péninsule antarctique. De plus, bien que la fonte soit répandue en été, elles sont la cause de la majorité des événements de fonte estivale sur l'Antarctique de l'Ouest et la plateforme glaciaire de Ross, dont les événements les plus intenses (figure 2a).

Les rivières atmosphériques jouent donc un rôle positif et négatif sur le bilan de masse de surface du continent. Aujourd'hui, les effets positifs (augmentation des précipitations) l'emportent sur les négatifs (fonte et ruissellement de surface), mais nous ne savons pas comment évolueront ces impacts respectifs à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. Pour répondre à cette question, il est indispensable de comprendre les processus physiques à l'origine des rivières atmosphériques. Il faut aussi vérifier que les modèles de climat sont capables de les reproduire correctement pour le climat actuel, avant d'analyser leurs évolutions d'ici à la fin du siècle.

## Importance des blocages et cyclogenèse associée aux rivières atmosphériques

Pour analyser les processus physiques associés aux rivières atmosphériques, nous avons effectué une étude des types de temps en Terre Adélie, sur la zone englobant la station Dumont

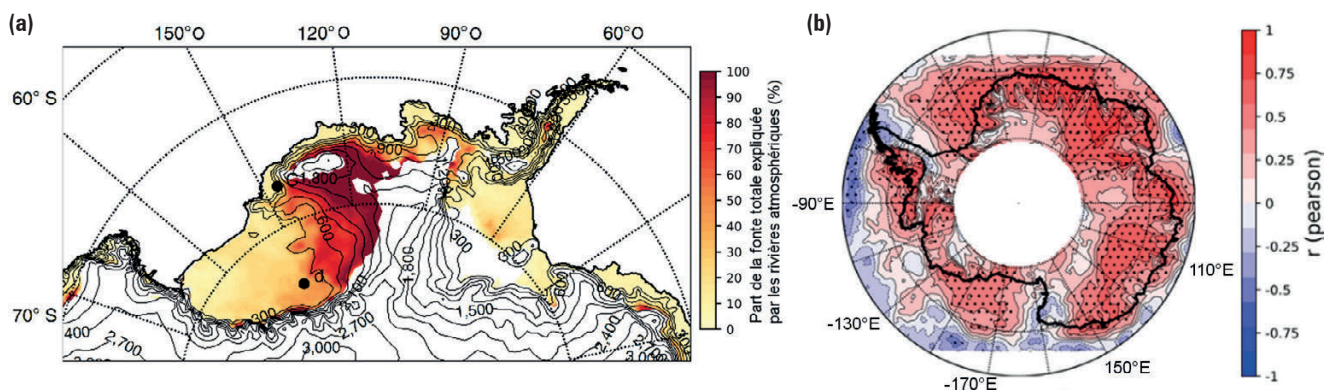


Figure 2. (a) Pourcentage de la fonte totale entre 1979 et 2017, expliquée par l'occurrence d'une rivière atmosphérique en été sur l'Antarctique de l'Ouest et la plateforme de Ross. Figure adaptée de Wille *et al.* (2019). (b) Corrélation entre l'activité annuelle des rivières atmosphériques et les précipitations annuelles (période 1980-2018). Figure adaptée de Wille *et al.* (2021).

d'Urville (secteur Antarctique Est, 45° S-75° S, 110° E-170° E) (Pohl *et al.*, 2021). Les calculs sont basés sur les anomalies quotidiennes de la hauteur géopotentielle à 700 hPa issue des données de réanalyses ERA5 entre 1979 et 2018. Nous avons croisé ces types de temps avec les occurrences des rivières atmosphériques issues de nos algorithmes. Cela nous a permis de mettre en évidence les conditions particulières associées aux rivières atmosphériques atteignant le continent au niveau de la Terre Adélie (voir la figure 3b pour la localisation) (Pohl *et al.*, 2021).

Les rivières atmosphériques qui pénètrent sur le continent sont équiprobables tout au long de l'année. Néanmoins, celles-ci n'apparaissent qu'en cas de régimes de temps présentant un fort blocage atmosphérique sur l'océan Austral, à l'est du domaine d'étude. Ces blocages favorisent l'advection méridienne de chaleur et d'humidité des latitudes tempérées vers l'Antarctique. Les régimes marqués par des blocages sont ainsi associés à des conditions anormalement chaudes et humides au niveau de la zone côtière. Cependant, ces anomalies sont amplifiées lors des événements de rivières atmosphériques : les situations marquées par des rivières atmosphériques sont plus chaudes d'environ 4 °C et rassemblent pratiquement toutes les précipitations. Les régimes de temps et les rivières atmosphériques contrôlent donc de manière significative la variabilité des températures et des précipitations de la zone étudiée.

Il est important de constater que pour chacun des types de temps présentant des rivières atmosphériques les journées associées à ces événements sont significativement différentes des autres journées correspondant au même type de temps. En général, elles correspondent à des configurations

synoptiques caractérisées par des blocages plus forts (la hauteur géopotentielle à 700 hPa présente une anomalie positive de 50 à 100 m, soit un tiers de la valeur de l'anomalie de hautes pressions), toujours situés au nord-est de la Terre Adélie. De fortes anomalies de la hauteur géopotentielle semblent être nécessaires pour le déclenchement d'une rivière atmosphérique. Pourtant, cette condition n'est pas suffisante, car, souvent, des situations analogues aux événements de rivières atmosphériques ne produisent aucun événement. Comprendre pourquoi des situations analogues, c'est-à-dire presque identiques, se voient associés ou non à des rivières atmosphériques reste un mystère. L'intensification de ces phénomènes pourrait provenir de la condensation se produisant avant l'événement au-dessus de mers froides (Terpstra *et al.*, 2021). La libération de la chaleur latente facilite ainsi probablement la convection de l'air chaud en provenance des basses latitudes, mais rien n'est aujourd'hui clair sur ce point.

## Variabilité des rivières atmosphériques en Antarctique

Seules les configurations favorables des jets de moyenne troposphère et les situations de blocage atmosphérique permettent ainsi aux rivières atmosphériques en provenance de l'océan Austral de pénétrer sur le continent antarctique et de transporter de la chaleur et de l'humidité loin à l'intérieur de la calotte (Gorodetskaya *et al.*, 2020 ; Wille *et al.*, 2019, 2021).

En raison de son impact sur l'intensité des pressions au large de l'Antarctique,

le mode annulaire austral (SAM) semble jouer un rôle important sur la variabilité des rivières atmosphériques en Antarctique (figure 3b). Au pas de temps journalier, l'occurrence des rivières atmosphériques en Terre Adélie est légèrement corrélée à l'intensité du SAM (Pohl *et al.*, 2021). Une corrélation plus significative est aussi constatée autour de la péninsule antarctique occidentale, alors qu'une anti-corrélation entre ces variables est observée autour de la mer d'Amundsen-Ross. Enfin, l'augmentation de l'intensité du SAM à la fin du XX<sup>e</sup> siècle semble aussi avoir entraîné une augmentation significative de la position latitudinale des rivières atmosphériques, ainsi que de leur fréquence d'occurrence dans de nombreuses régions de l'Antarctique au cours des dernières décennies (figure 3a). En revanche, des liens avec d'autres indicateurs majeurs de la variabilité climatique globale demeurent plus difficiles à mettre en évidence.

## Perspectives et conclusions

Personne ne sait aujourd'hui si les rivières atmosphériques seront plus fréquentes ou non à l'avenir en Antarctique. Cela dépendra de la future variabilité climatique contrôlant l'activité finale des rivières atmosphériques. L'Antarctique est connu pour présenter une variabilité climatique naturelle particulièrement forte à différentes échelles de temps (interannuelle à multidécaennale). Le signal du changement climatique anthropique ne devrait émerger de la variabilité naturelle qu'aux alentours de 2020-2050 en Antarctique. Dès lors, des variations du mode annulaire austral (Thompson *et al.*, 2011) de l'emplacement et de la force des dépressions semi-permanentes (par exemple en mer d'Amundsen : Hosking *et al.*, 2016) sont à prévoir. Comme nous l'avons vu, le SAM semble exercer un contrôle sur l'activité des rivières atmosphériques, mais ce lien sera-t-il stable dans le temps ? Ces changements induiront-ils des changements dans la fréquence des rivières atmosphériques touchant le continent ? Ce point est d'autant plus critiquable que le mode annulaire austral lui-même évoluera dans le temps. D'autres configurations de large échelle peuvent aussi jouer sur ces événements (par exemple la variabilité associée à l'Enso, El Niño Southern Oscillation). Sans compréhension précise des processus contrôlant les conditions de

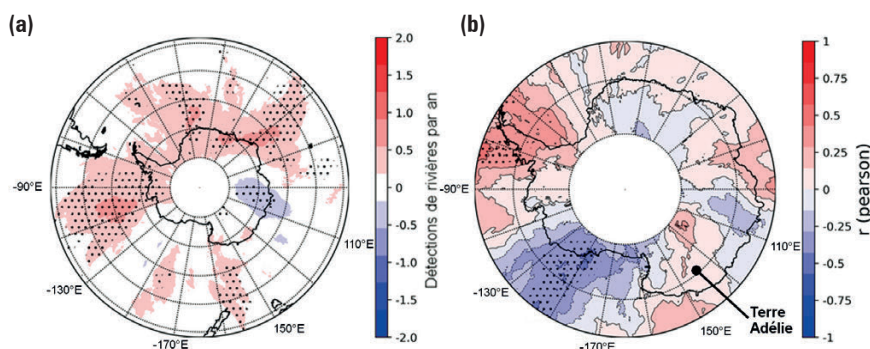


Figure 3. Tendances d'évolution entre 1980 et 2018 : (a) de l'activité annuelle des rivières atmosphériques obtenue à partir des données de réanalyses Merra-2 ; (b) de la corrélation entre l'activité annuelle des rivières atmosphériques et l'indice SAM (mode annulaire austral) annuel. Figure adaptée de Wille *et al.* (2021).

blocage au large du continent, les tendances d'évolution de fréquence et d'intensité des rivières atmosphériques resteront de pures spéculations.

Définir les facteurs contrôlant leur évolution et leur variabilité, au passé, présent et futur est l'objectif du projet Arca (Atmospheric River Climatology in Antarctica). L'analyse des processus atmosphériques mis en jeu lors des événements de rivières atmosphériques sera effectuée à partir d'un large ensemble de simulations des climats préindustriel, actuel et futur. La fréquence et l'intensité des rivières atmosphériques seront ainsi analysées sous différentes conditions climatiques, incluant ou non les forçages anthropiques et internes du climat. Nous nous concentrerons sur la variabilité associée au SAM, mais aussi sur les impacts potentiels de l'Enso.

Pour savoir dans quelle mesure la variabilité future proposée par les modèles est réaliste, il serait nécessaire d'obtenir une base de données de référence à long terme pour évaluer la variabilité naturelle des rivières atmosphériques en Antarctique. Ainsi, un défi supplémentaire du projet Arca est de reconstituer l'intensité et la fréquence des rivières atmosphériques

dans le passé en utilisant les archives que constituent les carottes de glace (analyses chimiques et des isotopes de l'eau). L'objectif est ambitieux, car cela exige de s'assurer que : 1) les masses d'air associées aux rivières atmosphériques présentent une signature isotopique et/ou chimique spécifique et 2) cette signature reste identifiable dans les carottes de glace malgré tous les processus affectant l'archivage et les résolutions de mesure qui ne sont pas celles d'événements de quelques jours.

Plusieurs études ont révélé que la vapeur d'eau atmosphérique peut présenter une anomalie de composition isotopique pendant une rivière atmosphérique. Au Groenland, la vague de chaleur de 2012 associée à une activité de rivières atmosphériques présentait ainsi une signature isotopique associée à une zone d'évaporation source très éloignée. De même, une étude récente compilant 4,5 années de composition isotopique de la vapeur d'eau au Svalbard a permis de retracer les origines des masses d'air (Atlantique ou Arctique) des événements synoptiques fortement humides se produisant en hiver (Weng *et al.*, 2021). Cette étude a montré une évolution significative des signaux isotopiques lors de rivières atmosphériques.

Celles-ci sont enfin associées au transport à longue distance de poussières et de particules biologiques.

Pourtant, même s'il existe un signal atmosphérique associé aux fortes précipitations des rivières atmosphériques, identifier et quantifier ces signaux ponctuels dans les enregistrements isotopiques et d'aérosols des carottes de névé et de glace de l'Antarctique est un challenge dont la faisabilité reste à démontrer. L'analyse des rivières atmosphériques en Antarctique est encore balbutiante et offrira certainement de nombreuses surprises.

## Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence nationale de la recherche pour le financement du projet ANR-20-CE01-0013. Nous tenons aussi à saluer l'investissement de l'ensemble des personnes engagées pour mener à bien ce projet : Alexis Berne, Brice Boudevillain, Olivier Cattani, Xavier Fettweis, Hubert Gallée, Nicolas Jourdain, Michel Legrand, Amaelle Landais, Valérie Masson-Delmotte, Martin Ménégos, Bénédicte Minster, Anaïs Orsi, Frédéric Prié, Susanne Preunkert, Joël Savarino, Tessa Vance, Olga Zolina.

## Bibliographie

- Dacre H.F., Martínez-Alvarado O., Mbengue C.O., 2019. Linking atmospheric rivers and warm conveyor belt airflows. *J. Hydrometeorol.*, 20, 1183-1196. doi: 10.1175/JHM-D-18-0175.1
- Fox-Kemper B. *et al.*, 2021. *Ocean, cryosphere and sea level change. Climate change 2021: The physical science basis*. Contribution of working group I to the Sixth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press.
- Gorodetskaya I.V., Silva T., Schmithüsen H., Hirasawa N., 2020. Atmospheric river signatures in radiosonde profiles and reanalyses at the Dronning Maud Land Coast, East Antarctica. *Adv. Atmospheric Sci.*, 37, 455-476. doi: 10.1007/s00376-020-9221-8
- Hosking J.S., Orr A., Bracegirdle T.J., Turner J., 2016. Future circulation changes off West Antarctica: Sensitivity of the Amundsen Sea Low to projected anthropogenic forcing. *Geophys. Res. Lett.*, 43, 367-376. doi: 10.1002/2015GL067143
- Komatsu K.K., Alexeev V.A., Repina I.A., Tachibana Y., 2018. Poleward upgliding Siberian atmospheric rivers over sea ice heat up Arctic upper air. *Sci. Rep.*, 8, 2872. doi: 10.1038/s41598-018-21159-6
- Mattingly K.S., Mote T.L., Fettweis X., van As D., Tricht K.V., Lhermitte S., Pettersen C., Fausto R.S., 2020. Strong Summer atmospheric rivers trigger Greenland ice sheet melt through spatially varying surface energy balance and cloud regimes. *J. Clim.*, 33, 6809-6832. doi: 10.1175/JCLI-D-19-0835.1
- Pohl B. *et al.*, 2021. Relationship between weather regimes and atmospheric rivers in East Antarctica. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126, e2021JD035294. doi: 10.1029/2021JD035294
- Sodemann H., Stohl A., 2013. Moisture origin and meridional transport in atmospheric rivers and their association with multiple cyclones. *Mon. Weather Rev.*, 141, 2850-2868. doi: 10.1175/MWR-D-12-00256.1
- Terpstra A., Gorodetskaya I.V., Sodemann H., 2021. Linking sub-tropical evaporation and extreme precipitation over East Antarctica: An atmospheric river case study. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126, e2020JD033617. doi: 10.1029/2020JD033617
- Thompson D.W.J., Solomon S., Kushner P.J., England M.H., Grise K.M., Karoly D.J., 2011. Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern hemisphere surface climate change. *Nat. Geosci.*, 4, 741-749. doi: 10.1038/ngeo1296
- Weng Y., Johannessen A., Sodemann H., 2021. High-resolution stable isotope signature of a land-falling atmospheric river in southern Norway. *Weather Clim. Dyn.*, 2, 713-737. doi: 10.5194/wcd-2-713-2021
- Wille J.D., Favier V., Dufour A., Gorodetskaya I.V., Turner J., Agosta C., Codron F., 2019. West Antarctic surface melt triggered by atmospheric rivers. *Nat. Geosci.*, 12, 911-916. doi: 10.1038/s41561-019-0460-1
- Wille J.D. *et al.*, 2021. Antarctic atmospheric river climatology and precipitation impacts. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126, e2020JD033788. doi: 10.1029/2020JD033788
- Zhu Y., Newell R.E., 1998. A proposed algorithm for moisture fluxes from atmospheric rivers. *Mon. Weather Rev.*, 126, 725-735. doi: 10.1175/1520-0493(1998)126<0725:APAFMF>2.0.CO;2