

impacts ont tendance à se décaler vers l'est. C'est en partie ce qui contribue au renforcement de la signature d'Enso en Atlantique Nord et en Europe, que j'ai évoqué plus haut. L'augmentation de l'intensité des pluies liées à l'Enso avec le réchauffement climatique tend aussi à augmenter l'amplitude des téléconnexions : ce sont les anomalies de pluies qui fournissent la source de chaleur atmosphérique qui active ces dernières.

Quels développements scientifiques ou observationnels attendez-vous le plus au cours des prochaines années pour faire progresser notre compréhension de l'Enso ?

Deux domaines de recherche très actifs sur l'Enso sont ses interactions

avec les autres modes de la variabilité climatique (IOD⁸, NPM⁹, etc.) et sa réponse au changement climatique. Je m'attends à des avancées rapides dans ces deux domaines dans les années qui viennent. Mais je pense également qu'il est faux de considérer la dynamique actuelle d'Enso comme un problème entièrement résolu. À titre d'exemple, des résultats récents obtenus par mon ex-doctorante Fangyu Liu suggèrent que les mécanismes océaniques qui favorisent la transition d'une phase chaude à une phase froide et vice versa n'opèrent en fait

8. Dipôle de l'océan Indien (Indian Ocean Dipole).

9. Mode méridien du Pacifique nord (North Pacific Meridional Mode).

qu'après les événements les plus forts et favorisent alors une évolution prévisible sur 2 ans, avec un horizon de prévisibilité plus court le reste du temps (6 à 8 mois avant le pic). Si nos résultats s'avèrent corrects, ils auront de fortes conséquences en ce qui concerne la manière d'aborder la prévisibilité d'Enso et ses prévisions.

Merci Jérôme pour avoir pris le temps de répondre à nos questions !

Merci !

Damien Altendorff
Météo & Climat

Ice Memory : sauvegarder la mémoire gelée de la planète

Notre génération de scientifiques fait face à une urgence : préserver les archives glacées de la planète avant leur disparition définitive. L'initiative Ice Memory vise à répondre à cette urgence, en reliant les latitudes et les générations par la science et la diplomatie, transformant l'Antarctique en un sanctuaire universel pour la mémoire environnementale future. Depuis plus d'une décennie, cette initiative, portée par une coalition d'institutions scientifiques, de soutiens diplomatiques et de mécènes, a transformé un constat en un projet concret de préservation patrimoniale mondiale.

Les glaciers : un trésor scientifique inestimable

Les glaciers constituent des archives naturelles extraordinaires de l'histoire environnementale. Chaque couche de neige piège des aérosols atmosphériques. En se compactant, la neige transformée en glace conserve les gaz atmosphériques dans des bulles d'air, véritables « capsules » fossiles de la composition atmosphérique passée. Leur analyse permet – entre autres – de reconstituer l'évolution des gaz à effet de serre. La composition isotopique de l'eau trace l'évolution des températures et de l'origine des masses d'air. Les analyses chimiques documentent les éruptions volcaniques, les tempêtes de poussières, les feux de végétation et l'évolution des polluants anthropiques :

métaux lourds, acides, éléments radioactifs, polluants organiques persistants... Sur des millénaires, les strates glaciaires préservent ainsi une mémoire détaillée de l'atmosphère et des cycles biogéochimiques.

Bien que la science des carottes de glace soit relativement récente, elle a fondamentalement transformé notre compréhension du climat terrestre. Par exemple, les analyses de la glace du Groenland et de l'Antarctique ont mis en évidence l'élévation sans précédent de la concentration des gaz à effet de serre depuis la révolution industrielle, formant une base scientifique majeure des rapports du Giec.

Cependant, les glaciers disparaissent, le réchauffement anthropique provoquant

un retrait rapide des glaciers de montagne [1] et des calottes polaires. La fonte en surface altère les signaux dans les couches profondes. Certaines archives sont déjà irrémédiablement dégradées, comme le glacier du Kilimandjaro qui perd sa masse par sublimation. Les scientifiques sont donc engagés dans une course contre la montre. L'initiative Ice Memory vise à créer une bibliothèque mondiale de carottes de glace provenant de glaciers menacés, afin de les sauvegarder pour les générations futures. Les développements technologiques et les nouvelles idées scientifiques nécessiteront en effet cette matière première. On pourrait par exemple mieux exploiter le contenu microbiologique de la glace (bactéries, virus) pour créer de nouveaux antibiotiques ou des traitements médicamenteux.



Figure 1. Deuxième opération de carottage Ice Memory au sommet du glacier Nevado Illimani en Bolivie (6 300 m d'altitude). Crédits : Bruno Jourdain, Université Grenoble-Alpes et Fondation Ice Memory.

De l'alarme scientifique au concept

Ice Memory est née d'une alarme scientifique. En février 2010, lors d'une réunion à Valdivia (Chili), le Programme hydrologique intergouvernemental publiait une résolution soulignant l'urgence de récupérer des carottes de glaciers andins en voie de disparition. En octobre 2013, lors d'une conférence à Porto Alegre (Brésil), j'émettais l'idée de stocker ce trésor en Antarctique. La logique était limpide : aucun congélateur commercial ne garantit un stockage sûr pendant des décennies. En revanche, le plateau est-antarctique offre des températures naturellement basses toute l'année, sans apport d'énergie, assurant une préservation sur des siècles malgré le réchauffement en cours. Il est inutile de mettre en place une logistique coûteuse et impactante, puisque les opérateurs polaires assurent chaque année le transfert de matériel depuis l'Europe vers le continent blanc. Par ailleurs, le traité sur l'Antarctique de 1959 offre un cadre juridique unique, où les souverainetés sont gelées et les décisions prises par consensus, idéal pour optimiser la gestion de ce bien commun.

Le concept s'est consolidé autour d'une bière avec mon collègue professeur Carlo Barbante (Université Ca' Foscari de Venise), qui avait une idée similaire pour les glaciers alpins. Mon collègue Patrick Ginot (IRD) s'impliquait également. Mais il nous fallait un soutien financier et politique dans un contexte où le financement de la recherche est avant tout court-termiste.

Un événement décisif se déroula à Grenoble en novembre 2014. Le prince Albert II de Monaco, en visite privée au LGGE, écoutait ma présentation du concept. Anne-Catherine Ohlmann, directrice de la toute jeune fondation de l'Université Grenoble-Alpes, offrait son soutien. Au printemps 2015, la petite équipe était structurée avec Carlo Barbante, Patrick Ginot, Anne-Catherine Ohlmann et moi-même. Nous soumettions un projet à la Fondation Prince Albert II, mobilisant les ressources privées nécessaires. Avec le soutien d'institutions françaises et italiennes (Université Grenoble-Alpes, CNRS, IRD, Université Ca' Foscari, Conseil national de la recherche italien) et d'autres philanthropes¹, la première démonstration du concept prenait place en août 2016 sur le glacier

du col du Dôme (sous l'arête sommitale du mont Blanc). Trois carottes étaient forées jusqu'au socle à 128 mètres de profondeur, dont une destinée à l'Antarctique.

Une décennie d'efforts jusqu'au transfert en Antarctique

En 2017, un deuxième forage ambitieux avait lieu sur le Nevado Illimani, en Bolivie (figure 1). Deux carottes étaient récupérées, atteignant une glace âgée de 18 000 ans. En 2017, l'Unesco rejoignait l'initiative en produisant deux décisions de son conseil exécutif, exhortant les États membres à soutenir le projet. Un atelier à son siège à Paris réunissait des scientifiques de 12 pays. La Suisse se joignait au petit groupe de pilotage via la professeure Margit Schwikowski (Institut Paul Scherrer).

1. Fondation Prince Albert II, Findus, Claude Lorius, Fondation Didier et Martine Primat, Thermo-Fisher Scientific, Fondation Air Liquide, Tupack Group, BNP Paribas, Fondation Petzl, Fondation Richard Lounsbery, Elcom, Alizentt, Decathlon, GMM, Pressario, Lexinov Avocat, Aku, Karpos, Polibox.

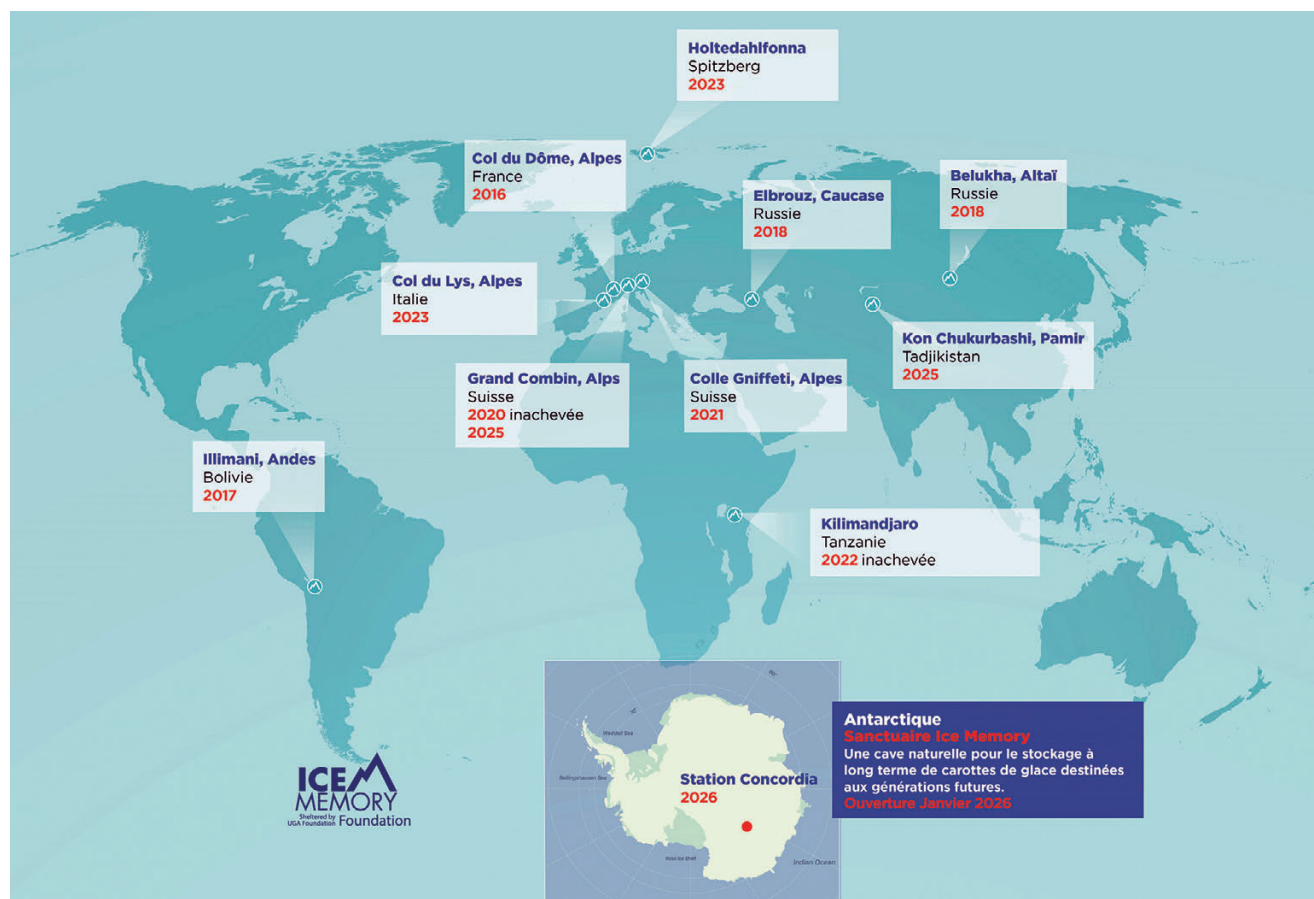


Figure 2. Répartition géographique des opérations de carottage de glace Ice Memory conduites entre 2016 et 2025 et localisation du sanctuaire en Antarctique. Droits : Fondation Ice Memory.

En 2021, nous créons la Fondation Ice Memory (FIM) en tant qu'entité juridique. Le prince Albert II en devenait le président d'honneur. Les sept membres fondateurs (Université Grenoble-Alpes, CNRS, IRD, Université Ca' Foscari, Conseil national de la recherche italien, Institut Paul Scherrer, Institut polaire français Paul-Émile Victor ou Ipev) adoptaient des principes clés : sélectionner des glaciers à haute valeur scientifique, privilégier les sites menacés, préserver au moins une carotte intacte, créer des bases de données ouvertes et assurer une gouvernance internationale.

De 2018 à 2025, les campagnes se sont étendues aux Alpes, au Caucase, à l'Altaï, au Svalbard et au Tadjikistan. Onze opérations ont été organisées, livrant neuf carottes patrimoniales. Ice Memory est ainsi aujourd'hui à mi-chemin de sa cible de vingt glaciers (figure 2).

Le défi antarctique : logistique et diplomatie

Stocker la glace en Antarctique pour des siècles ne constitue pas la moindre des ambitions d'Ice Memory. L'acceptation d'un dépôt de glace non antarctique implique une diplomatie complexe, le protocole de Madrid (1991) interdisant en effet l'introduction d'organismes étrangers (dont bactéries et virus). Convaincre les États parties nous prit des années. Après ma présentation initiale aux États parties en 2018 à Buenos Aires, en tant que directeur de l'Ipev et membre de la délégation française au Traité, le concept réclama des années de discussions aux réunions RCTA (Réunion consultative du traité de l'Antarctique) à Prague, Paris, Berlin et Helsinki. Ce n'est qu'après la réunion d'Helsinki en 2023, sans nouvelle objection des États parties, que le ministère italien des Affaires étrangères validait notre évaluation d'impact environnemental et donnait le feu vert au transfert de la glace.

La station Concordia (opérée par l'Ipev pour la France et le Programma Nazionale di Ricerche in Antartide pour l'Italie) a été choisie pour son froid stable (-52 °C) et son faible taux d'accumulation de neige (3 cm d'équivalent-eau par an), contrairement au pôle Sud. Une cave de 35 mètres de longueur a été conçue à 10 mètres de profondeur dans la neige, utilisant un ballon gonflable, pour durer plusieurs décennies.

La logistique de l'ensemble de l'initiative Ice Memory représente une gageure. Après le carottage en altitude, la glace est transportée par hélicoptère ou sur le dos de porteurs, puis par camions réfrigérés et/ou navires porte-conteneurs. En 2025, la FIM a saisi une belle opportunité : le brise-glace italien *Laura Bassi*, revenu en Italie, a permis de transporter deux carottes (2 tonnes) issues des Alpes à la station antarctique italienne Mario Zucchelli. Un avion *Basler BT-67* équipé de skis a ensuite livré le tout à Concordia.

Le sanctuaire a été inauguré le 14 janvier 2026. Après une décennie de travail, les premières carottes des Alpes sont désormais déposées dans un sanctuaire stable pour des siècles, un rare et beau témoignage de coopération internationale et de responsabilité intergénérationnelle au service de la science et de nos sociétés.

Défis restants

En 2026, la priorité pour Ice Memory consiste à compléter les forages sur dix glaciers restants afin de couvrir des zones non ou mal couvertes, telles que l'Himalaya, le plateau tibétain, l'Asie centrale et les Andes. Chaque année qui passe voit ces archives se détériorer. Mais il faut un soutien des équipes qualifiées et des financeurs prêts à investir pour un retour sur bénéfice qui n'arrivera peut-être que dans un siècle.

Le défi de la gouvernance est majeur. Comment mettre en place des

accords internationaux robustes dans un contexte de fortes tensions géopolitiques ? En 2023, la FIM a débuté le financement d'une chaire « Droit et gouvernance » à l'Université Grenoble-Alpes. Qui décidera de l'accès aux carottes ? Qui gèrera ce patrimoine plus généralement ? La FIM vise à transférer la gestion à une organisation internationale dans dix ans. L'Unesco, l'Organisation météorologique mondiale et le traité sur l'Antarctique servent de cadre. Un traité « Ice Memory » pourrait être signé par les États ayant contribué ou stocké la glace, la Décennie des Nations Unies pour les sciences de la cryosphère (2025-2034) offrant un contexte idéal. La capacité de stockage à Concordia pourrait également devenir limitante sur le plan géopolitique. Des sites parallèles pourraient alors être créés dans les stations antarctiques Kunlun (Chine), Vostok (Russie) ou Dome Fuji (Japon).

Depuis mars 2025, le professeur Thomas Stocker, ancien co-président du groupe de travail sur la physique du climat du Giec, a pris ma succession et dirige la FIM. Sa grande expérience à l'interface science-diplomatie constitue un véritable atout. L'initiative Ice Memory représente plus qu'un projet scientifique : c'est un acte de responsabilité civique, en reconnaissant que la glace offre un livre d'histoire dont les pages se déchirent. En choisissant l'Antarctique comme dépositaire, nous avons fait un choix de neutralité et de pérennité, assurant que la mémoire de l'environnement planétaire sera lue par les générations futures, dotées de technologies inimaginables aujourd'hui. C'est un legs pour l'avenir, une promesse tenue par la science et la diplomatie.

Jérôme Chappellaz

École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)
et CNRS
Président de la Fondation Ice Memory
de 2021 à 2025

Bibliographie

[1] Hugonnet R., Millan R., Mouginot J., Rabatel A., Berthier E., 2023. Un atlas mondial pour caractériser la réponse des glaciers au changement climatique. *La Météorologie*, 120, 37-45. https://lameteorologie.fr/issues/2023/120/meteo_2023_120_37