

LES GLACES DE L'ANTARCTIQUE, ARCHIVES DE L'HISTOIRE CLIMATIQUE

SOMMAIRE

3 INTRODUCTION

4 L'ESSENTIEL

5 CONSERVÉE DANS LES GLACES, L'HISTOIRE DE NOTRE CLIMAT

6 • LÀ OÙ LES GLACES RÉVÈLENT LEURS SECRETS

10 • DE L'ANTARCTIQUE AUX LABORATOIRES, LE PÉRIPLÉ DES CAROTTES DE GLACE

12 • LIRE DANS LES CAROTTES DE GLACE

16 • LA PALÉOCLIMATOLOGIE, À LA RECHERCHE DES CLIMATS DU PASSÉ

20 L'HISTOIRE DE LA PLANÈTE ET DE L'HUMANITÉ DANS UNE CAROTTE DE GLACE

29 ÉPILOGUE

31 SOURCES

INTRODUCTION

Lorsque les glaciologues arrivent en Antarctique lors de l'Année Géophysique Internationale, ils n'imaginent pas que c'est dans cette région inhospitalière qu'ils vont mener l'une des aventures scientifiques les plus fascinantes du XX^{ème} siècle ! Quelques années plus tard, ils découvrent de précieuses informations au cœur de ce continent de glace. Leurs efforts et leur persévérance leur permettent d'atteindre un trésor : des carottes de la glace couvrant plusieurs centaines de milliers d'années. Ils participent ainsi à l'approfondissement d'une discipline qui se développe alors : la paléoclimatologie, l'étude des climats du passé.

Suite à l'intuition de Claude Lorius, la recherche en glaciologie trouve une direction : l'étude du climat et de l'atmosphère du passé. Les techniques de forage et d'étude des glaces se développent. En étudiant les glaces, il est possible d'y lire l'évolution du climat au cours du temps. En effet, les glaces sont l'une des réserves abritant les archives du climat de notre planète, au même titre que les sédiments marins ou les roches. Mais seule l'étude de la glace polaire et des bulles d'air qu'elle renferme permet de connaître avec précision les températures et la composition de l'atmosphère du passé.

De l'Antarctique, les carottes de glace forées entament un long voyage jusqu'aux laboratoires où elles seront analysées par les chercheurs. Seuls quelques laboratoires au monde disposent de riches carothèques constituées de forages pratiqués dans de nombreux endroits du globe.



© Wild+Touch



Découvrez la vidéo
« Les glaces archives du climat »

L'ESSENTIEL

1

Le Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement protège un véritable trésor ! Une « carothèque » qui abrite près d'un million d'années d'archives climatiques. Poussez la porte de ce laboratoire caché au cœur du campus universitaire de Grenoble.

2

De l'Antarctique aux laboratoires, les carottes effectuent un véritable périple. Elles doivent arriver parfaitement conservées. Pour cela une chaîne de froid est mise en place tout au long de leur parcours.

3

Dans les laboratoires commence l'analyse des carottes de glace avec des instruments plus ou moins complexes. Sans eux les chercheurs n'obtiennent aucune information des carottes.

4

Depuis l'exploration du monde au XV^{ème} siècle, les hommes s'intéressent à leur planète. Depuis des décennies, ils s'intéressent plus particulièrement à l'évolution de son climat. Cette discipline porte désormais un nom : la paléoclimatologie, l'étude des climats du passé.

5

S'il existe de nombreuses archives climatiques sur la planète comme les sédiments marins ou lacustres, les arbres ou encore les coraux, les archives glaciaires sont uniques. Elles conservent précieusement en elles des bulles d'air qui sont les seuls échantillons de l'atmosphère du passé.

6

L'Antarctique est un balcon sur le monde. En forant profondément dans ses glaces, on parvient à lire les événements qui ont marqué l'histoire de notre planète depuis un million d'années : éruptions volcaniques, inversion du champ magnétique, tests nucléaires... Ces traces montrent que nous n'avons qu'une atmosphère : une éruption en Indonésie, comme un test thermonucléaire en Polynésie finissent par se retrouver piégés dans les glaces antarctiques.

CHAPITRE 1

CONSERVÉE DANS LES GLACES,
L'HISTOIRE DE NOTRE CLIMAT

A stylized, light green silhouette of a mountain range is positioned at the bottom of the page. The mountains are jagged and layered, with a white horizontal line cutting across the scene, suggesting a horizon or a snowline. The background is a solid, dark green color.

LÀ OÙ LES GLACES RÉVÈLENT LEURS SECRETS

Les glaces sont l'une des archives du climat de notre planète. Malgré les difficultés des campagnes de terrain, les scientifiques poursuivent leur étude car elles apportent des informations uniques et extrêmement précieuses sur l'évolution du climat et de l'atmosphère de notre planète. L'analyse des carottes de glace se fait dans les laboratoires spécialisés, en France notamment. Poussez la porte de l'un d'entre eux.

LE LABORATOIRE DE GLACIOLOGIE

Au coeur du campus universitaire de Grenoble en France, se trouve le Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement. L'une des plus importantes installations pour étudier les carottes de glace est installée ici, dans l'un des pavillons uniformes qui composent le campus, entre les parkings, les voies de tramway et les arbres. Insoupçonnable! C'est dans ces lieux que Claude Lorius et ses équipes ont mené les premières analyses sur les carottes de glace de Vostok. Aujourd'hui, c'est le glaciologue Jérôme Chappellaz qui nous entraîne dans le dédale de couloirs du LGGE. Aventurier polaire, il partage sa vie entre les missions de terrain en Antarctique et le laboratoire.



© Fonds Claude Lorius





L'ATELIER

Au rez-de-chaussée se trouve l'atelier dans lequel travaillent ingénieurs et mécaniciens. Ils conçoivent les carottiers et les têtes de forages qui permettront à Jérôme Chappellaz et ses collègues de remonter jusqu'à un million d'années dans l'histoire climatique. Un véritable défi technologique !

© Wild-Touch / Sarah Del Ben

© Wild-Touch / Sarah Del Ben

Sur les murs sont exposés des tubes carottiers. S'ils ne servent plus aujourd'hui, ils sont là pour le souvenir et le passage de nombreux visiteurs: ils ont notamment été déployés pour mener les essais du célèbre forage du Dôme C.



© Wild-Touch / Sarah Del Ben



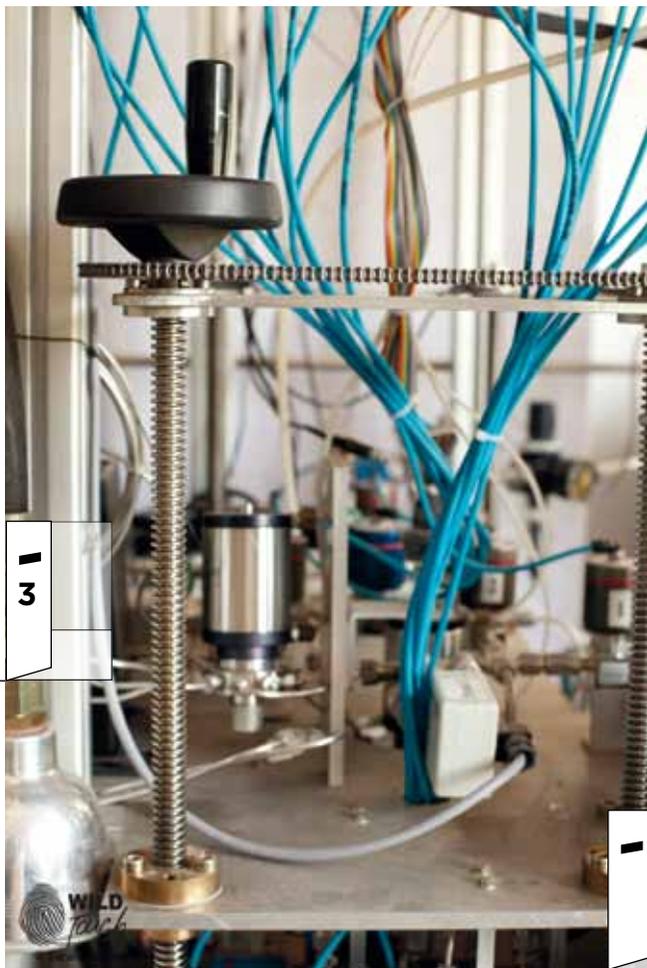
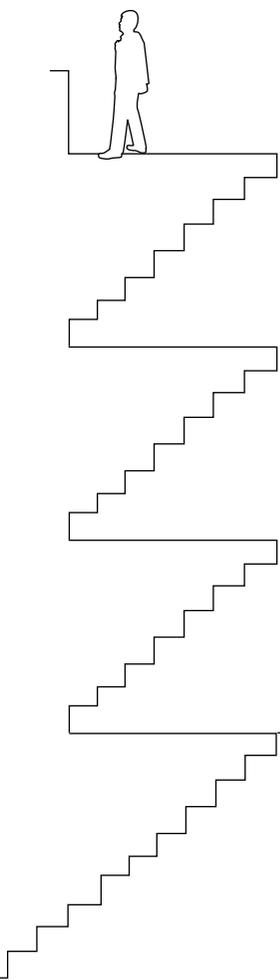
2

Un peu plus loin, plusieurs personnes s'affairent autour d'un centre d'usinage à commande numérique. La matière à usiner est installée dans cet appareil qui la travaille en trois dimensions pour lui donner la forme souhaitée.



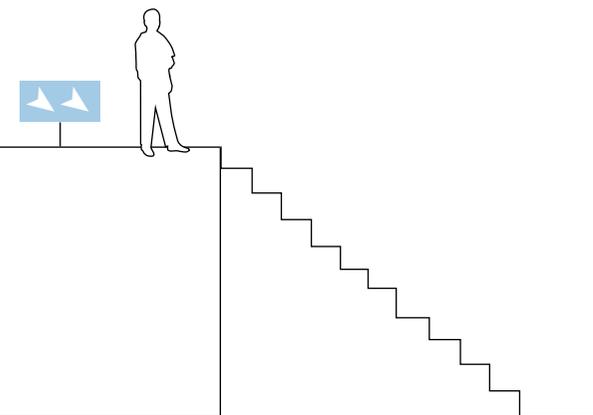
© Wild-Touch / Sarah Del Ben

En montant l'escalier en métal, nous surplombons l'ensemble de l'atelier, le temps de voir cette petite fourmière s'agiter.



LES LABORATOIRES

Nous voilà au premier étage. Derrière une enfilade de portes, se trouvent une série de laboratoires. C'est ici que se déroule la majeure partie des analyses effectuées sur les carottes de glace. Nous poussons la première porte et nous trouvons nez à nez avec un spectromètre de masse. « C'est avec cette machine que nous travaillons sur les isotopes du carbone dans les gaz à effet de serre » explique Jérôme Chappellaz.





© Wild-Touch / Sarah Del Ben

LES SALLES BLANCHES

Plus loin, une porte protégée d'un digicode abrite un couloir distribuant les salles blanches. Dans ces pièces entièrement stériles, les scientifiques ont des allures de cosmonautes. Vêtus de blanc de la tête aux pieds, ils portent des blouses ultrapropres. Ici sont faites les mesures chimiques et biologiques : concentration en aérosols, concentration en bactéries... Jérôme nous présente des machines aux noms complexes, « chromatographes ioniques », « compteur Coulter ». Leurs fonctions ? Révéler les secrets des glaces !

LES CHAMBRES FROIDES

Le moment tant attendu arrive enfin : nous descendons dans les chambres froides où est stockée une partie des carottes de glace. « Il va faire froid ! » prévient Jérôme moqueur. En effet, la plupart de ces chambres froides fonctionnent à -15°C et pourtant ce n'est rien comparé aux conditions polaires ! Nous entrons dans l'un de ces immenses frigidaire, de grandes caisses isolantes blanches sont entreposées les unes sur les autres. Au marqueur noir, des dates et des lieux qui font voyager : EPICA 1996, VOSTOK 1984... Les yeux qui pétillent, Jérôme nous présente plusieurs échantillons, « voici une carotte remontée lors du forage EPICA, elle a permis de retracer 800 000 ans ! ». C'est émouvant de rencontrer enfin cette glace dont on entend parler depuis des mois. Dans les neuf chambres froides du LGGE sont stockées des échantillons décrivant près d'un million d'années d'histoire climatique ! Un vrai trésor au cœur du campus de Grenoble. Des dizaines de kilomètres de carottes attendent patiemment les analyses en laboratoire. Ils sont - eux - stockés dans des chambres froides industrielles dans la proche banlieue de Grenoble. Entre les mains de professionnels du froid, ces carottes sont conservées à -25°C dans des conditions sécurisées.



ENC-99

#2032A DUST

EDC-99

EDC-999 A DUST

TOP

TOP

TOP

EPICA DC - 2

EPICA D

Bag

DE L'ANTARCTIQUE AUX LABORATOIRES, LE PÉRIPLÉ DES CAROTTES DE GLACE



© CNRS Photothèque/IPEV - DELHAYE Claude

Pour parvenir dans les laboratoires, les carottes doivent parcourir un périlleux voyage au cours duquel elles ne doivent absolument pas fondre.

Une partie des carottes qui sont extraites sur le terrain, par exemple en Antarctique, peuvent être stockées sur place. Quand on est à Concordia la température moyenne annuelle

est de -53 degrés Celsius, c'est finalement le meilleur frigo du monde et il ne tombe jamais en panne ! Mais les analyses sur ces carottes doivent être effectuées en laboratoire. Comme il n'en existe pas en Antarctique, cela serait trop complexe et coûteux, il faut acheminer les carottes ou des échantillons vers les laboratoires, en Europe, en Russie, aux Etats-Unis...



Une fois l'aventure du forage terminée, débute alors celle du transport ! Les carottes doivent arriver saines et sauvées dans les labos des chercheurs : ni fondues, ni fêlées. Pour y parvenir, il faut maintenir une chaîne de froid tout au long du parcours. En Antarctique, cela ne pose évidemment pas de problème. Pour atteindre l'Europe, les carottes empruntent des moyens de transports frigorifiques pour empêcher leur fonte. Une fois arrivées dans les labos, les carottes sont stockées dans des chambres froides. On appelle ces stocks des carothèques.

Il y a peu d'endroits au monde où l'on peut trouver une carothèque aussi importante que celle du Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement à Grenoble. Ce laboratoire abrite, dans des entrepôts frigorifiques industriels, plusieurs dizaines de mètres cube de carottes de glace représentant des échantillons de tous les glaciers du monde. On y trouve des glaces du Groenland, de l'Antarctique - dont les fameuses carottes de Vostok mais aussi celles du forage EPICA - des différents glaciers de l'Himalaya, des Andes, des Alpes... C'est exceptionnel ! Un véritable trésor de guerre conservé à -25 degrés pour éviter qu'il ne fonde ou ne se modifie structurellement ou chimiquement. On peut trouver d'autres carothèques importantes aux Etats-Unis, au Japon ou au Danemark par exemple mais aucune ne possédant cette diversité d'échantillons.



© Wild-Touch / Sarah Del Ben

LIRE DANS LES CAROTTES DE GLACE

Pour étudier les archives glaciaires, les scientifiques utilisent des carottes de glace issues de forages. Ce sont des cylindres de 10 centimètres de diamètre et d'environ 1 à 4 mètres de longueur. Ces tubes de glace permettent aux chercheurs de conduire des analyses chimiques et physiques et de les comparer sur des milliers d'années. Ils parviennent ainsi à reconstituer des paramètres du climat et de l'environnement terrestre : l'évolution de la température, la composition de l'atmosphère...

Un mètre de carotte de glace foré au cœur du continent antarctique équivaut à peu près à quatre-vingt années d'accumulation de neige en surface, soit le temps d'une vie humaine.



Dans les laboratoires de glaciologie se trouvent de nombreux instruments de mesure pour effectuer toutes ces analyses. Certains sont très simples, d'autres extrêmement complexes. Voici par exemple cinq instruments indispensables aux scientifiques qui étudient les carottes de glace.

LE SPECTROMÈTRE DE MASSE

Cet appareil sert à étudier les isotopes d'une molécule donnée. On introduit d'abord les molécules sous forme gazeuse que l'on souhaite étudier dans une chambre à vide - enceinte parfaitement hermétique. Un filament au sein duquel circule un fort courant envoie alors des électrons sur ces molécules pour les casser et les transformer en ions chargés électriquement. Les ions passent alors dans un tube à vide autour duquel sont placés des aimants très puissants. Ceux-ci dévient les ions en fonction de leur masse et de leur charge électrique. Les ions lourds seront relativement peu déviés tandis que les ions légers subiront une déviation plus importante par le champ magnétique des aimants. En bout de trajectoire, des collecteurs identifient chaque ion lourd ou léger, ce qui produit un courant électrique infime que l'instrument mesure. On peut ainsi différencier les atomes lourds des atomes légers formant la molécule initiale, et déterminer un rapport entre les deux.

Cette manipulation s'applique notamment aux isotopes de l'eau. La molécule d'eau est H_2O . Le spectromètre de masse la casse pour produire des ions H^+ et des ions O^- . Les isotopes ^{16}O de l'oxygène sont plus légers que les isotopes ^{18}O , ils ne seront pas déviés de la même manière par l'aimant. Le collecteur peut alors compter chaque isotope. Le rapport entre ces deux isotopes permet de déterminer la température à laquelle la neige s'est formée. Il en est de même entre l'isotope lourd de l'hydrogène, appelé deutérium, et l'isotope léger de ce dernier.



LE CHROMATOGRAPHE EN PHASE GAZEUSE

Cet appareil sert à séparer les gaz présents dans un échantillon de l'atmosphère pour en étudier un en particulier. Lorsque l'on introduit un échantillon d'air dans le chromatographe en phase gazeuse, une colonne séparatrice - un tube rempli d'une poudre particulière - va séparer les gaz qui composent cet échantillon : l'azote, l'oxygène et le gaz carbonique par exemple. Chacun de ces gaz va sortir de la colonne à un moment différent, en fonction de son affinité avec la poudre. À la sortie, les scientifiques placent des détecteurs spécifiques au gaz qu'ils souhaitent étudier pour pouvoir les quantifier.

LE CHROMATOGRAPHE IONIQUE

Le chromatographe ionique fonctionne sur le même principe que le chromatographe en phase gazeuse. Mais il sert à travailler sur les aérosols présents dans la glace, en l'occurrence des composés ioniques, comme le sulfate ou le nitrate.

LE COMPTEUR COULTER

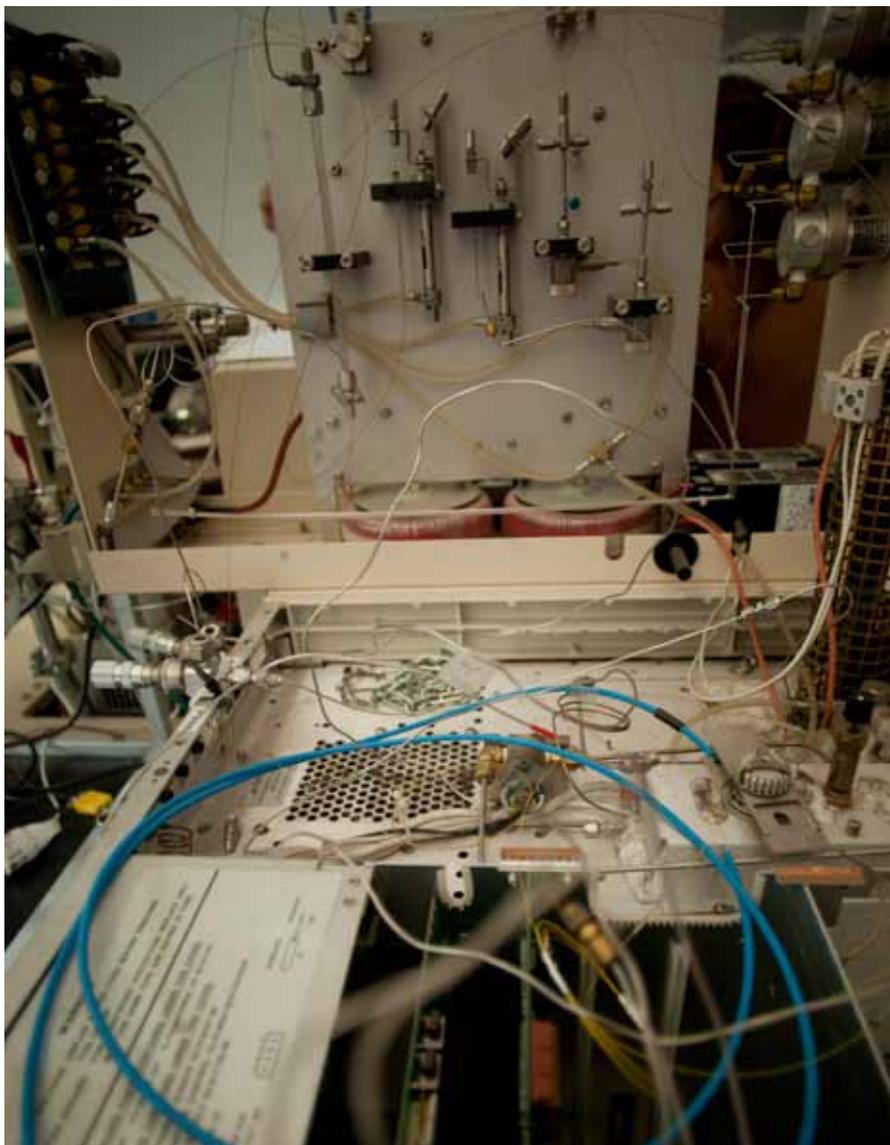
Cet appareil sert à mesurer les particules solides de la glace : les poussières venues des continents voisins de l'Antarctique, ou encore les cendres volcaniques. Il donne des indications sur la quantité mais aussi sur la taille de ces poussières. La solution liquide contenant les particules passe à travers un champ électrique. Chaque variation de ce champ électrique correspond au passage d'une particule.



© Wild-Touch / Sarah Del Ben



© Wild-Touch / Sarah Del Ben



© Wild-Touch / Sarah Del Ben

LE DÉTECTEUR LASER

Par exemple pour déterminer combien un échantillon d'air donné contient de CO_2 , le détecteur laser injecte dans l'échantillon un faisceau laser qui va être absorbé aux longueurs d'onde auxquelles le gaz carbonique absorbe l'énergie. Le dispositif mesure l'intensité du signal lumineux à l'entrée du détecteur et à sa sortie. La différence d'intensité vient des photons qui ont été absorbés dans la cavité optique par les molécules de CO_2 . Cela donne la concentration du CO_2 dans cet échantillon.

UNE MANIPULATION PHYSIQUE SUR LES CRISTAUX DE GLACE

Pour observer les cristaux de glace, pas besoin d'instruments très puissants. Il suffit d'avoir une lame de glace très fine posée sur une lame de verre. Les chercheurs placent une source lumineuse en-dessous qui passe par un filtre polarisant la lumière. Lorsque la lumière traverse un cristal de glace, celui-ci prend une couleur particulière en fonction de l'orientation de son axe optique. Par exemple, lorsque le cristal est orienté parfaitement dans l'axe de la lumière polarisée, il apparaît noir. Observer l'orientation des cristaux de glace permet de mieux comprendre l'écoulement des glaciers. L'observation de leur taille permet de distinguer les périodes chaudes ou froides durant lesquelles les cristaux de glace ne croissent pas à la même vitesse.

L'évolution des technologies et des instruments de mesure a énormément fait évoluer la précision des analyses. Les glaces figurent parmi les archives climatiques les plus précises de notre planète.



LA PALÉOCLIMATOLOGIE, À LA RECHERCHE DES CLIMATS DU PASSÉ

Depuis des décennies, les hommes étudient les climats du passé. Cette étude est désormais une science à part entière : la paléoclimatologie. Elle s'appuie sur l'idée que tous les matériaux qui s'accumulent ou se forment dans un milieu couche par couche, année après année, respectant ainsi une chronologie, constituent alors des archives climatiques. Ils permettent de décrire les conditions climatiques et environnementales qui existaient au moment de leur formation. S'ils parviennent à les étudier et à les décoder, les scientifiques peuvent en extraire de nombreuses informations.

À la recherche d'archives climatiques, les hommes ont d'abord étudié les roches et notamment les faunes et flores fossiles préservées en leur sein, puis les sédiments marins et lacustres, les sols, les arbres, les concrétions calcaires, les coraux, et bien sûr la glace. Tous ces matériaux ont conservé l'empreinte du passé. Datés, ils sont de véritables témoins permettant d'explorer le temps et de reconstituer de façon continue certaines données caractérisant le climat de notre planète, sur des années, des millénaires, voire des dizaines de millions d'années dans le cas des roches ou des sédiments marins. Les informations ainsi archivées dans la nature, nécessitent un important travail de décryptage pour les scientifiques.



Les différentes archives climatiques

Les données météorologiques

Les stations météorologiques enregistrent les températures d'un lieu sur des années et constituent évidemment l'enregistrement le plus direct du climat. Ces enregistrements permettent d'établir des moyennes pour une région voire pour la planète dans son ensemble. Mais ils ne couvrent au mieux que les 150 dernières années.

Les chroniques historiques

Cette pratique était très développée dans de nombreuses régions du monde et rassemble des séries d'observations sur la nature qui couvrent des centaines d'années : inondations, sécheresse, tempête, dates de vendange, floraisons des arbres, migrations des oiseaux... Il s'agit de données indirectes sur le climat.

Les **sédiments** lacustres et les enregistrements des tourbières

Ces archives contiennent des informations sur l'état de la végétation et sur le cycle hydrologique au voisinage du site étudié. L'étude des pollens et des spores préservés dans le sédiment ou le sol donne des informations sur le type de végétation et

DÉFINITION

• **sédiment**

Couche de matière déposée au cours du temps. Ce dépôt peut être régulier ou épisodique. Quand il est régulier, les couches successives offrent un enregistrement continu du climat..

donc sur les températures et les précipitations. La plupart des enregistrements disponibles couvrent au plus la période nous séparant de la dernière période glaciaire.

Les anneaux des arbres (dendroclimatologie)

Cette méthode utilise les variations de l'épaisseur et de la densité des cernes annuels de croissance des arbres, qui dépendent de différents facteurs climatiques affectant la croissance végétale. Elle permet de remonter au-delà du millier d'années. Des arbres fossiles ont permis de remonter jusqu'à environ 12 000 ans. Mais cette méthode n'est efficace que pour les moyennes et hautes latitudes. Les arbres des régions tropicales ne permettent pas de distinguer des cernes annuels de croissance et sont donc difficilement exploitables.



Les sédiments marins (paléocéanographie)

L'étude des séries sédimentaires qui se déposent au fond des océans permet de couvrir des dizaines de millions d'années dans certains cas. Ce sont les archives climatiques les plus longues, avec les séquences géologiques des affleurements rocheux sur les continents. On peut étudier de très nombreux traceurs dans ces sédiments, qui renseignent à la fois sur l'activité biologique dans l'océan et sur la circulation océanique.

Les coraux

Ce sont aussi des archives climatiques car comme les arbres, ils présentent des bandes de croissance. Leur étude permet de remonter dans le temps jusqu'à plusieurs cycles climatiques. Dans plusieurs régions du globe, on rencontre des récifs coralliens émergés, fossiles. Ces derniers sont utilisés pour reconstruire le niveau des mers au cours du temps.

Les spéléothèmes

Il s'agit des dépôts calcaires dans les grottes, conduisant à la formation de stalagtites et de stalagmites. Leur analyse notamment en isotopes de l'oxygène et du carbone renseigne sur l'humidité en surface ou encore sur le type de végétation se développant au-dessus de la grotte. Les spéléothèmes offrent une précision de datation du climat passé tout à fait remarquable.

Les archives glaciaires

Etudier les glaces permet pour le moment de remonter jusqu'à 800 000 ans dans l'histoire du climat de façon très précise, avec des enregistrements très directs de la température régnant au-dessus de la calotte de glace, ou encore de la composition chimique de l'atmosphère.



© Creative Commons/Toby Hudson



© ReMagi



©Fonds Claude Lortius

L'étude des archives de glace est extrêmement complexe - accessibilité des calottes polaires difficile, conditions rudes, instruments délicats... Pourtant depuis des décennies, les scientifiques se relayent pour étudier ces glaces et découvrir leurs secrets. Compte tenu de l'abondance des archives climatiques existantes, cela vaut-il la peine de déployer des moyens considérables pour examiner des carottes de glace ? Si les archives climatiques de la planète sont nombreuses, les archives glaciaires venant des pôles sont uniques ! Elles sont les seules qui recèlent en elles des échantillons de la

véritable atmosphère du passé et permettent de reconstituer le paléoclimat de façon très précise. D'autre part, les glaces captent les moindres retombées atmosphériques : poussières, cendres volcaniques, radioactivité... Retraçant ainsi l'histoire de la planète sur laquelle nous vivons, et ainsi celle de l'histoire des hommes.

Aujourd'hui, les chercheurs parviennent véritablement à lire dans les glaces et à y déceler les événements qui ont marqué notre planète.

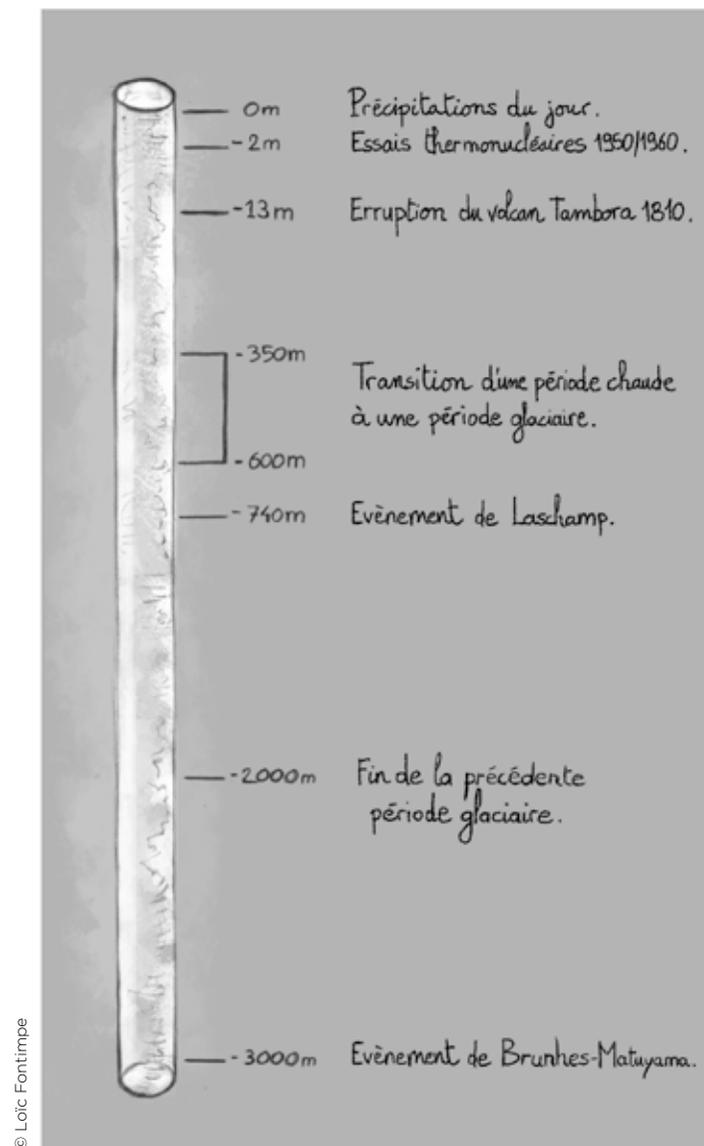
CHAPITRE 2

L'HISTOIRE DE LA PLANÈTE ET DE L'HUMANITÉ DANS UNE CAROTTE DE GLACE





Claude Lorius aime dire que l'Antarctique est le balcon de notre planète. Ses glaces collectent toutes les traces laissées par les grands événements qui ont lieu sur notre planète, des éruptions volcaniques aux tests nucléaires des grandes puissances. Car dès qu'elle a quitté la proximité du sol pour atteindre les 10 km de hauteur, notre atmosphère devient la stratosphère qui tourne tout autour de notre planète, transportant son témoignage jusqu'au cœur des glaces de l'Antarctique. Le continent blanc est le symbole que l'atmosphère de notre planète est unique et globale. Ce qui se passe à n'importe quel endroit sur Terre se retrouve irrémédiablement au cœur des glaces de l'Antarctique.



En descendant le long d'une carotte de glace, de la surface jusqu'aux grandes profondeurs, il est ainsi possible de repérer des événements très particuliers.

Plaçons nous par exemple au site de la base franco-italienne Concordia, en Antarctique. Il y tombe environ l'équivalent de 3 cm d'eau chaque année. Au fur et à mesure que l'on descend en profondeur, nous remontons le temps, vers des années de plus en plus lointaines.



© Wild-Touch/Sarah Del Be.n

Les dix premiers centimètres d'épaisseur à la surface sont de la neige non tassée. Ils correspondent à la précipitation neigeuse qui s'est accumulée au cours de l'année sur le site de Concordia. Les 10 premiers centimètres équivalent donc à 1 an. Compte-tenu de la faible densité de la neige, ces 10 centimètres correspondent à environ 3 cm d'eau.

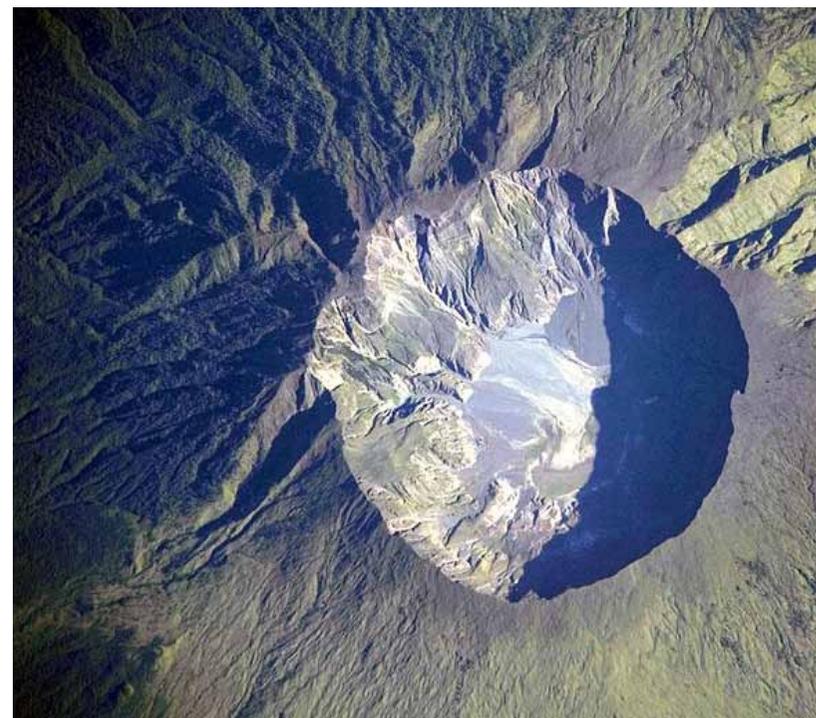
Entre 2 et 3 mètres. Si on mesure la radioactivité de la neige, on observe un pic bien marqué. Il correspond aux retombées des tests thermonucléaires conduits dans les années 1950-1960. A cette époque, Soviétiques, Américains, Français et Britanniques ont envoyé énormément d'éléments radioactifs dans l'atmosphère en faisant des essais de bombe à ciel ouvert. On retrouve cette pollution dans les précipitations neigeuses en Antarctique. On observe deux maximums de radioactivité de la neige qui coïncident aux années 1957-1958 et 1963-1965.



© United States Department of Energy

A 13 mètres. A cette profondeur, on rencontre la trace d'une éruption volcanique majeure qui s'est produite en Indonésie : celle du volcan Tambora en 1810 et 1815. On la retrouve très bien dans notre carotte de glace car elle est marquée par une forte concentration en sulfate. Le sulfate provient de l'oxydation du dioxyde de soufre émis par le volcan et transporté dans la haute atmosphère par les panaches volcaniques. L'éruption du Tambora a envoyé énormément de dioxyde de soufre dans l'atmosphère que l'on retrouve dans cette carotte de glace.

▼ *Le volcan Tambora aujourd'hui. Sa grande éruption, en 1815, a laissé des traces jusque dans les glaces de l'Antarctique.*



© NASA

Entre 350 et 600 mètres. A cette profondeur, nous traversons ce que l'on appelle la déglaciation. Cette transition climatique, entre la période chaude des derniers 11 000 ans et la dernière glaciation il y a environ 20 000 ans, est visible très directement dans la carotte grâce aux cristaux de glace. Si l'on regarde la taille de ces cristaux en lumière polarisée, on constate que les cristaux diminuent soudainement de taille. Leur croissance est ralentie par la température plus froide prévalant au moment de la formation des cristaux.

A 740 mètres. On trouve soudain une très forte concentration d'un isotope d'un élément appelé le béryllium 10. C'est un élément qui est produit dans la haute atmosphère par le rayonnement cosmique. Il se trouve qu'il y a environ 40 000 ans, l'intensité du champ magnétique terrestre a fortement diminué pour pratiquement atteindre zéro, entraînant un flux plus intense de rayons cosmiques dans la haute atmosphère et donc une augmentation de la production du béryllium 10. Cet élément est donc un très bon marqueur pour nous indiquer que 740

mètres de profondeur sur le site de Concordia correspondent à 40 000 ans et à l'événement dit de Laschamp.

A 1265 mètres. On va rencontrer l'éruption du mont Berlin qui est un volcan en Antarctique. Son éruption a produit une fine couche de téphras, c'est à dire de cendres volcaniques, qui a recouvert une grande partie de la calotte de glace antarctique.

Au-delà de 2000 mètres. Par simple examen de la taille des cristaux de glace vus en lumière polarisée, on découvre une alternance de croissances et de décroissances. Elle correspond aux successions de périodes chaudes et de périodes froides.

A 3165 mètres. A une centaine de mètres seulement du socle rocheux, on trouve de nouveau un pic de béryllium 10. Cette fois-ci, ce pic est dû à l'événement de Brunhes-Matuyama. Cet événement qui s'est produit il y a 780 000 ans est une inversion du champ magnétique terrestre. L'aiguille d'une boussole aurait alors pointé vers le pôle Sud au lieu d'indiquer le Nord.





La présence humaine sur Terre visible dans les glaces

RENCONTRE AVEC JÉRÔME CHAPPELLAZ, GLACIOLOGUE

Glaciologue « héritier » de Claude Lorius, Jérôme Chappellaz poursuit aujourd'hui les travaux engagés pour retracer l'histoire climatique. Son objectif ? Parvenir à franchir un million d'années.

QUAND APERÇOIT-ON DANS LA GLACE, LES PREMIÈRES TRACES DE LA PRÉSENCE HUMAINE ?

Les toutes premières traces que l'on trouve dans la glace sont de fortes concentrations en plomb dans les neiges du Groenland, il y a 2 000 ans. Elles correspondent à la forte activité sidérurgique des Romains qui étaient très consommateurs de plomb, pour fabriquer par exemple les jarres qui conservaient le vin.



© Wuid-Touchy/Sarah Del Ben

QUELS SONT LES MARQUEURS DE L'ACTIVITÉ HUMAINE ?

Dans la glace on retrouve de nombreux marqueurs des activités humaines. Il y a tout d'abord les pics de radioactivité qui correspondent aux tests thermonucléaires faits dans les années 1950-1960.

L'évolution des gaz à effet de serre est le marqueur le plus fort de l'impact de l'homme sur son environnement. Le taux de CO₂ par exemple s'envole clairement à partir du XIX^{ème} siècle, lors de la Révolution Industrielle.

Il faut aussi se pencher sur la concentration en métaux lourds, notamment sur celle du plomb, qui est un marqueur anthropique très important. Celle-ci connaît une augmentation

spectaculaire entre 1940 et 1970. Elle correspond à l'utilisation d'essence plombée dans l'industrie automobile (essence tétraéthyle). Dans les neiges du Groenland, on constate une baisse des concentrations en plomb à partir des années 1970 à l'époque où les Etats-Unis et le Canada généralisent l'usage de l'essence sans plomb. Non pas pour rejeter moins de plomb, mais parce que celui-ci endommage les pots catalytiques. Aujourd'hui on trouve des traces d'autres métaux lourds comme le rhodium, le palladium ou le platine qui sont présents dans les pots catalytiques.

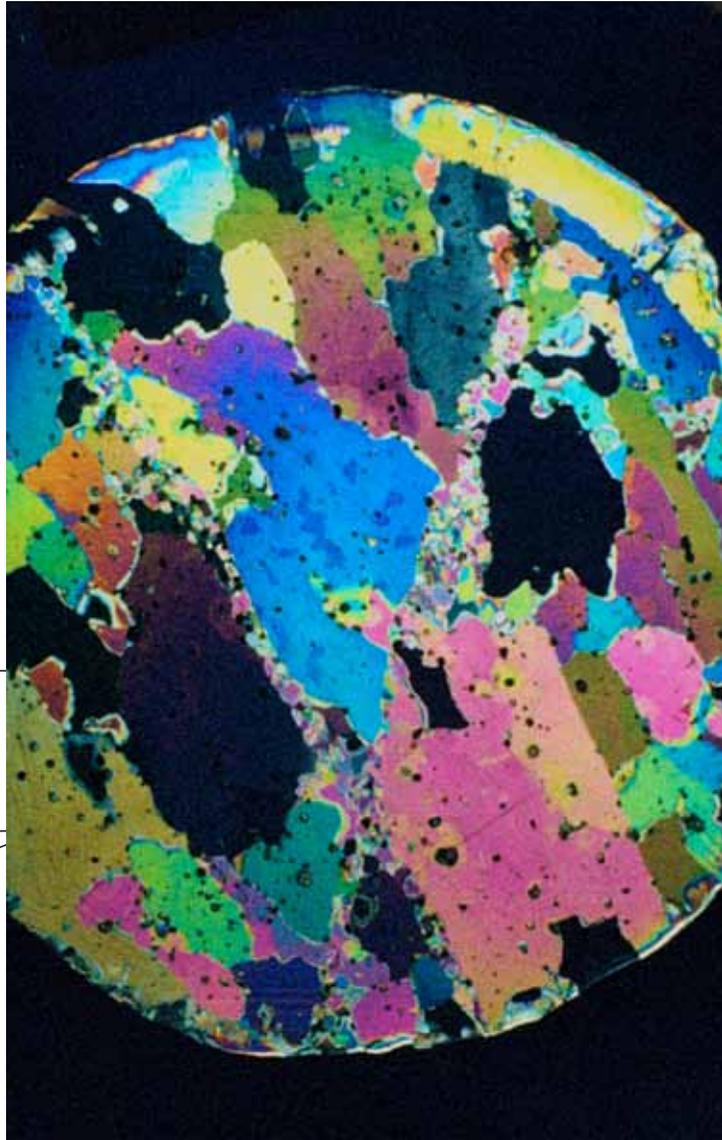
Un autre marqueur de l'activité humaine est la présence d'aérosols, tels que le sulfate et le nitrate. Leur augmentation

est significative ces deux derniers siècles. Pour le premier, elle correspond à la combustion grandissante du charbon à partir du milieu de XIX^{ème} siècle. Celle-ci envoie du dioxyde de soufre dans l'atmosphère qui en s'oxydant dans l'atmosphère se transforme en sulfate. Cette augmentation en sulfate s'est traduite en milieu urbain par des épisodes de forts brouillards donc le plus manifeste est sans aucun doute le smog londonien qui a recouvert la ville plusieurs jours dans les années 1950, faisant 4000 morts. Des procédés de désulfuration du charbon et des fumées ont ensuite été progressivement mis en place, conduisant à une réduction du sulfate dans les précipitations neigeuses plus récentes. Quant au nitrate, il résulte essentiellement de l'oxydation atmosphérique des oxydes d'azote produits par la combustion des énergies fossiles

A QUEL MOMENT LES SCIENTIFIQUES SITUENT-ILS LE DÉBUT DE L'ANTHROPOCÈNE, L'ÈRE À LAQUELLE L'HOMME PAR SES ACTIVITÉS AURAIT COMMENCÉ À MODIFIER LE CLIMAT DE LA PLANÈTE ?

La plupart des scientifiques s'accordent pour dire que l'Anthropocène débute au XIX^{ème} siècle, lors de la Révolution Industrielle. En effet, le taux de CO₂ présent dans l'atmosphère augmente à cette époque de façon sidérante, et le gaz carbonique est un puissant gaz à effet de serre. D'autres chercheurs débattent sur le fait qu'il y aurait déjà des traces d'activités humaines dans les glaces, il y a 5 ou 6 mille ans, au moment du début de l'agriculture et du développement de la technique du brûlis notamment. Ce qui marquerait pour eux véritablement le début de l'Anthropocène.





©Wild-Touch

En analysant les propriétés physiques et chimiques des carottes de glace, les chercheurs parviennent à reconstituer énormément de paramètres qui leur permettent d'étudier l'écoulement du glacier, de comprendre l'évolution du climat et la composition de l'atmosphère... Parfois ces paramètres leur permettent de dater la carotte de glace précisément grâce à la présence de marqueurs significatifs des éruptions volcaniques majeures, des inversions ou des annulations du champ magnétique. A des milliers de kilomètres, au cœur des glaces, les activités humaines produites sur l'ensemble du continent se retrouvent. Tout est conservé ici, en Antarctique.

ÉPILOGUE



© Wild-Touch

La planète est comme un grand livre ouvert dans lequel sont collectées année après année toutes les informations retraçant son histoire et son évolution. Le travail des paléoclimatologues consiste à découvrir l'alphabet qui permet de déchiffrer ce livre et de comprendre les climats du passé. En 1965, Claude Lorius eut l'intuition que les glaces étaient des archives climatiques uniques. Depuis, les glaciologues se sont évertués à découvrir les secrets abrités dans les carottes de glace.

Sur les calottes de l'Antarctique ou du Groenland chaque couche de neige qui s'est accumulée au fil des années serait une page de ce gigantesque livre. En forant la glace, les glaciologues parcourent ce livre et remontent un échantillon de

chacune de ses pages. Leur travail consiste ensuite à traduire ces échantillons. Pour cela, ils étudient le grand livre de glace à la recherche de l'alphabet qui permettra de les décrypter. Les scientifiques cherchent les paramètres physiques et les paramètres chimiques qui représentent les lettres de cet alphabet et qui leur permettra de remonter l'évolution du climat et de la composition de l'atmosphère au cours du temps.

L'Antarctique est un observatoire unique sur le monde. Les glaces, en contact direct avec l'atmosphère, conservent millénaire après millénaire les traces des moindres retombées atmosphériques. Chaque événement majeur se passant sur le globe est archivé au cœur de ce continent des extrêmes.

SOURCES

- *Climat - Une planète et des hommes*, Ouvrage collectif sous la direction de Michel Petit et Aline Chabreuil, Le cherche midi, 2011
- *L'odyssée du climat - Limiter le réchauffement à 2°C*, Gaël Derive, Terre vivante, 2008
- *Planète blanche - Les glaces, le climat et l'environnement*, Jean Jouzel - Claude Lorius - Dominique Raynaud, Odile Jacob, 2008

Les images ne peuvent être réutilisées sans autorisation.
Pour toute demande concernant les photos provenant du fonds CNRS Photothèque, contactez le CNRS Images :
<http://phototheque.cnrs.fr>.

Sous la direction artistique de Luc Jacquet

Équipe éditoriale

Lorette Faivre - rédactrice
Ismaël Khelifa - coordinateur éditorial
Juan Rodriguez - journaliste
Laurent Desse - responsable pédagogique
Loïc Fontimpe - schémas storyboardés
Clément Champau - intégration sur le site internet

Équipe des vidéos pédagogiques

Sarah Del Ben - réalisatrice
Sarah Sitruk - chef monteuse et infographiste
Lucile Fauron - monteuse

Équipe des films d'animation

Loïc Fontimpe - scénariste, réalisateur et dessinateur
Mathieu Vavril - dessinateur
Olivier Jarry - animateur
Julien Pinot - animateur
Olivier Lescot - animateur
Sarah Sitruk - chef monteuse

Équipe de production

Vincent Demarthe
Arnaud Thorel
Antoine Barbaroux
Christelle Bourgeois

Validation scientifique

Jérôme Chappellaz
Anne-Christine Clottu-Vogel
Claude Lorius

Conseil pédagogique

Julien Chambore
Véronique De Tilly
Florence Herrero
Fabrice Morel Tixier

Conception du site

Romain Saillet
Alexandre Bernard
Denis Fongue

Création graphique

Sophie Grappe - Bigbang Communication

Plus d'informations sur
www.education.laglaceetleciel.com

WILD-TOUCH, UN TRAIT D'UNION ENTRE L'HOMME ET LA NATURE

Dans le sillage du succès planétaire de « La Marche de l'Empereur » (Oscar du meilleur film documentaire en 2006), le réalisateur Luc Jacquet crée l'association Wild-Touch. Son engagement: s'appuyer sur la force émotionnelle de l'image, du cinéma et de l'art pour émouvoir sur notre planète et insuffler l'envie de la protéger. La forêt, la glace et le climat, l'eau, le corail, Wild-Touch développe des contenus audiovisuels originaux, à très forte valeur ajoutée éditoriale et émotionnelle.

LA GLACE ET LE CIEL

« La Glace et le Ciel » prend vie dans le sillage d'un grand film de cinéma réalisé par Luc Jacquet. Le projet multimédia conte le destin de Claude Lorius, pionnier de la glaciologie, dont l'aventure scientifique a permis de révéler au monde le changement climatique. Cinéma, télévision, web, programme pédagogique, exposition artistique, s'allient pour former un récit complet, sous le haut patronage d'un comité scientifique international de premier plan.



ON PROTÈGE MIEUX CE QUE L'ON AIME

WILD-TOUCH
education@wild-touch.org
www.wild-touch.org

POUR DÉCOUVRIR L'ENSEMBLE DU PROGRAMME PÉDAGOGIQUE LA GLACE ET LE CIEL ET L'INTEGRALITE DES VIDEOS,
RENDEZ-VOUS SUR

[WWW. EDUCATION.LAGLACEETLECIEL.COM](http://WWW.EDUCATION.LAGLACEETLECIEL.COM)