



Mission PALAS 2019, paléoclimat à partir des sédiments lacustres de l'archipel de Kerguelen.

Charline Giguet-Covex, Philip Deline, Ludovic Ravanel, Pierre Sabatier,
Fabien Arnaud

► To cite this version:

Charline Giguet-Covex, Philip Deline, Ludovic Ravanel, Pierre Sabatier, Fabien Arnaud. Mission PALAS 2019, paléoclimat à partir des sédiments lacustres de l'archipel de Kerguelen.. [0] Institut polaire. 2019. hal-03455469

HAL Id: hal-03455469

<https://hal.science/hal-03455469>

Submitted on 24 Nov 2023

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NoDerivatives 4.0 International License

Mission PALAS 2019

PALÉOCLIMAT À PARTIR DES SÉDIMENTS LACUSTRES
DE L'ARCHIPEL DE KERQUELEN

Auteurs

Charline GIGUET-COVEX, Philip DELINE, Ludovic RAVANEL,
Pierre SABATIER et Fabien ARNAUD

Laboratoire EDYTEM Univ. Grenoble Alpes,
Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS,
EDYTEM, 73000 Chambéry, France

RÉSUMÉ

L'archipel de Kerguelen se situe dans la zone latitudinale de fluctuations des vents d'ouest qui jouent un rôle majeur dans le fonctionnement du système climatique global. Presque aussi étendue que la Corse, il présente

une multitude de lacs d'origine glaciaire. Les sédiments déposés au fond de ces lacs sont de précieuses archives du climat et des environnements passés. Lors de la mission PALAS 2019, les sédiments de six de ces lacs, situés entre la calotte glaciaire Cook et la Presqu'île de la Société de Géographie, ont été carottés. Avec des carottes longues de 5 à 10 m, nous espérons couvrir plusieurs milliers d'années d'histoire de ces environnements. Les marqueurs glaciaires autour des lacs ont aussi été cartographiés et échantillonnés. Dans le cadre du projet « Southsphere », piloté par Jostein Bakke de l'Université de Bergen (Norvège), des analyses sédimentologiques et géochimiques « classiques » seront réalisées sur les carottes. Il est également prévu d'appliquer des méthodes en plein essor, comme la tomographie 3D, l'analyse de l'ADN sédimentaire lacustre ou encore celle des composés lipidiques spécifiques aux membranes bactériennes, dépendants de la température. La mesure de la concentration en isotopes cosmogéniques des échantillons prélevés sur les moraines, les blocs erratiques et les roches moutonnées permettra de dater les extensions glaciaires. L'ensemble de ces résultats inédits permettra in fine de reconstituer les fluctuations des glaciers pendant l'Holocène et les changements climatiques qui les ont contrôlés, encore mal connus dans cette région très reculée.

farines glaciaires

Les farines glaciaires sont constituées de particules fines (argileuses) formées par l'action abrasive des glaciers sur la roche.

cosmogéniques

Des isotopes cosmogéniques se forment lors de l'interaction entre le rayonnement cosmique de haute énergie et le noyau d'un atome. Ils sont produits dans l'atmosphère ainsi que, pour certains, dans les roches et les sols exposés à ce rayonnement.

INTRODUCTION

L'archipel des Kerguelen se situe à 49°S, c'est-à-dire dans la zone du front polaire antarctique qui sépare les eaux froides polaires, des eaux tempérées des régions sub-antarctiques. Aujourd'hui, cette zone, aussi dite de « convergence antarctique », oscille entre 48° et 61° de latitude selon la saison. Elle est marquée par de très forts vents d'ouest ; Cette zone des vents d'ouest est équivalente à celle que l'on rencontre aux mêmes latitudes dans l'hémisphère nord, mais les vents sont ici plus violents du fait de l'absence de continent dans cette bande de latitude. Dans l'hémisphère sud, ils sont particulièrement violents en raison de l'absence de continents pour les freiner (Figure 1). Ce sont les fameux '40° rugissants' et '50° hurlants' des navigateurs ; pour les climatologues, ils sont un objet d'étude privilégié en raison du rôle essentiel qu'ils jouent dans la régulation du climat de la Terre. En effet, ils isolent l'Antarctique de la chaleur des basses latitudes, stimulent la circulation océanique mondiale via le courant circumpolaire antarctique et régulent l'absorption du CO² dans l'océan Austral. Cette position dans la zone de convergence antarctique fait de Kerguelen un site clé pour la compréhension du système climatique global et de son évolution.

Malgré l'importance de cette bande de latitudes dans le fonctionnement du climat à l'échelle globale, nos connaissances des changements climatiques passés y sont très limitées. Ce contexte s'explique par la forte proportion d'océan par rapport aux continents, rendant difficile l'acquisition d'archives climatiques. Quelques enregistrements ont été obtenus grâce aux moyens de carottages marins, ainsi que sur des archives continentales, principalement en Patagonie puis en Tasmanie, Nouvelle-Zélande et Géorgie du Sud¹. Dans les Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF), les premières études sur des archives continentales sont très récentes. À Amsterdam par exemple, l'analyse des flux et de l'origine des poussières piégées dans de la tourbe a permis de proposer une reconstitution de la dynamique passée des vents d'ouest au cours des derniers 6600 ans. Elle met notamment en évidence une alternance entre des phases de renforcements et/ou déplacement des vents vers l'équateur et des phases d'affaiblissement et/ou déplacement plutôt vers le pôle².



À Kerguelen, une étude de géomorphologie glaciaire a permis de retracer les grandes fluctuations des glaciers au cours des derniers 24 000 ans³. Par ailleurs, à partir d'une approche de modélisation (intégrant des données instrumentales de la station de Port au Français), cette même équipe a montré que le déplacement vers le pôle du front polaire, en entraînant une baisse des précipitations à Kerguelen, expliquait en grande partie le recul spectaculaire de la calotte Cook depuis les années 1960⁴. Il existe donc une relation entre les fluctuations du front polaire et donc des vents d'ouest, et celles des glaciers de Kerguelen, via les précipitations.

La mission PALAS 2019 a été imaginée pour compléter ces connaissances encore lacunaires des fluctuations glaciaires et climatiques passées dans cette région du globe. Pour cela, l'objectif était de recueillir un maximum d'archives sédimentaires lacustres en connexion avec la calotte Cook (Figure 2), afin d'étudier de manière indirecte (i.e., via les processus glaciaires), la dynamique des vents d'Ouest. En effet, les lacs alimentés par des glaciers présentent un fort potentiel d'enregistrement du signal glaciaire au cours du temps, puisqu'une grande partie de leur sédimentation vient de la production de farines glaciaires⁵. Afin de valider ces reconstitutions et de mieux les contraindre dans l'espace, les moraines et autres formes glaciaires autour des lacs ont été cartographiées et échantillonnées lors de la mission de manière à réaliser des datations par isotopes cosmogéniques.

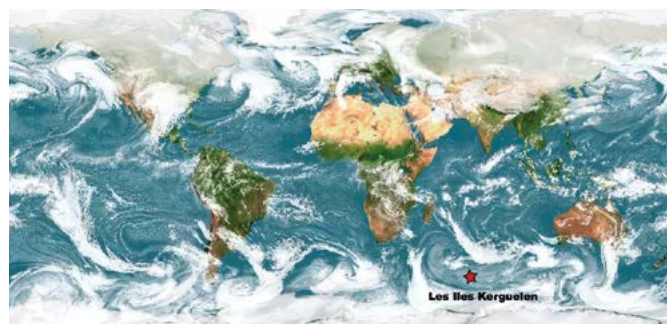


Figure 1. **Illustration de la circulation atmosphérique** (source : Nasa) ; l'évolution de la circulation au cours du temps peut être visionnée ici : <https://svs.gsfc.nasa.gov/3723>

¹ Dätwyler et al., 2018; Fletcher et Moreno, 2011; Kilian et Lamy, 2012; Oppedal et al., 2018; Saunders et al., 2012; Shulmeister et al., 2004

² Li et al., 2020

³ Jomelli et al., 2017

⁴ Favier et al., 2016

⁵ Nesje et al., 1991

De plus, pour déterminer le rôle des températures et des précipitations dans les fluctuations de la calotte Cook, une approche multi-indicateurs est prévue sur les carottes dans le cadre du projet « Southsphere », piloté par Jostein Bakke de l'Université de Bergen (Norvège). Les indicateurs ciblés sont les isotopes de l'hydrogène pour retracer les précipitations et des biomarqueurs lipidiques pour les températures. Les analyses sédimentologiques et géochimiques seront quant à elles utilisées pour retracer les fluctuations des glaciers. Des analyses de restes de végétaux terrestres, de pollens et d'ADN de plantes seront également effectuées pour étudier les fluctuations du couvert végétal, en termes d'étendue et de composition, en lien avec les changements climatiques. Si des pollens exotiques sont retrouvés, ils pourront être utilisés comme indicateurs de changements dans la position des vents d'ouest. Enfin, sur le lac Cartographie (Figure 2), autour duquel un nombre important de lapins a pu être observé lors de la mission, des analyses d'ADN de mammifères et de plantes sont prévues afin de retracer la dynamique des espèces invasives et leur impact sur l'environnement, dans cette zone très éloignée de leur point d'introduction.

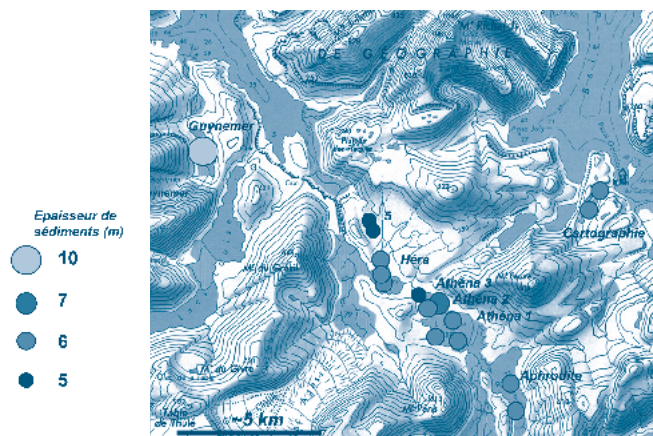


Figure 2. Répartition des sites de carottages et longueurs des carottes prélevées lors de la mission PALAS 2019.

Figure 3. Illustration des techniques appliquées pour le carottage.

A) Photos de la plateforme de carottage utilisée à Guynemer et d'une des carottes prélevées au carottier Nesje. Le schéma de carottier illustre le système de carottier à piston développé par Niederrieter et utilisé à Guynemer ainsi qu'à Athéna pour réaliser les carottes > à 6m de long (par section de 2 ou 3 m).

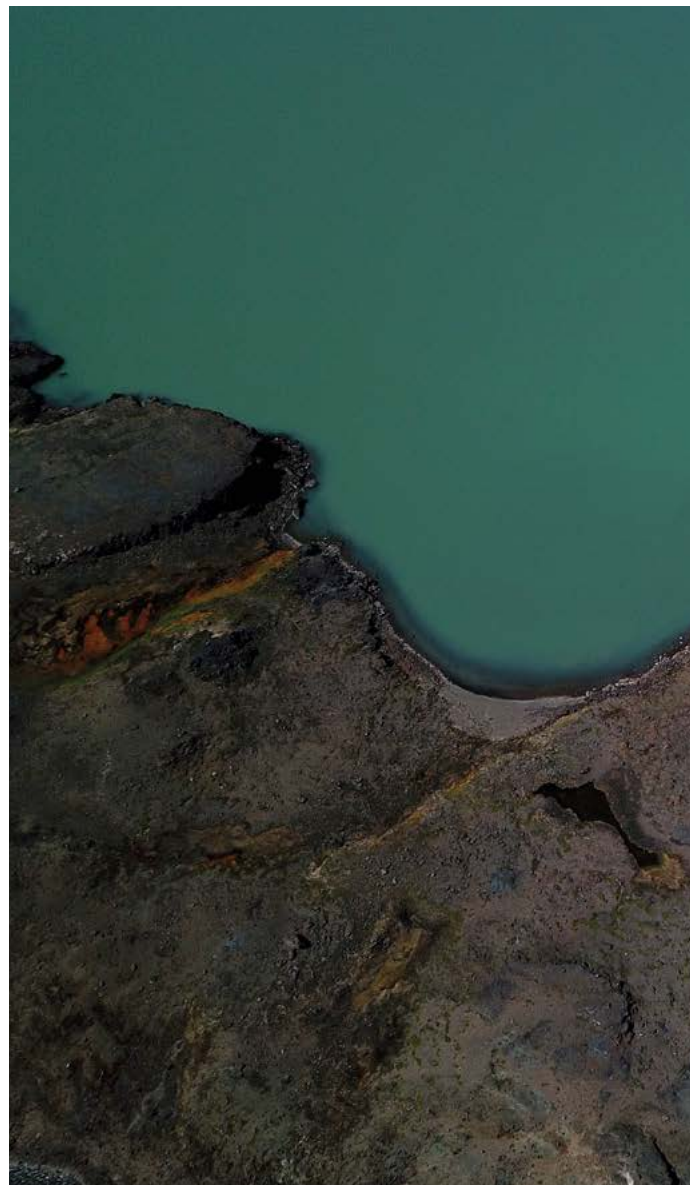
B) Schéma de carottage fourni par l'application « corebook ». Cette application utilisée sur le terrain permet de rentrer les coordonnées du carottage et de représenter la position de chacune des sections en temps réel. Ceci permet d'évaluer les pertes de sédiments et ainsi d'aider le carottier à obtenir toute la séquence de remplissage sédimentaire (i.e. un taux de recouvrement entre les sections de 100%).

<https://svs.gsfc.nasa.gov/3723>

biomarqueurs lipidiques

Les biomarqueurs lipidiques sont des molécules organiques spécifiques qui permettent notamment de tracer l'origine de la matière organique.

© Nesje et al., 1991

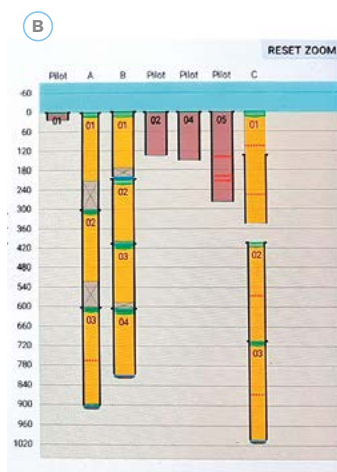


1. MÉTHODES

1.1. ÉVALUATION DE LA BATHYMÉTRIE DES LACS, REMPLISSAGES SÉDIMENTAIRES ET CAROTTAGES

Afin de déterminer la ou les zones de prélèvements des carottes sédimentaires, il est nécessaire de connaître la bathymétrie des lacs. En complément de la morphologie du bassin lacustre, il peut être intéressant de déterminer l'épaisseur du remplissage sédimentaire et d'étudier l'agencement des dépôts. Pour cela, les sédimentologues utilisent un équipement de sismique réflexion qui, grâce aux vitesses de propagation différentes des ondes en fonction des matériaux rencontrés, permet de révéler les couches de sédiments. Les zones les plus profondes, planes et éloignées des deltas sont souvent privilégiées par les paléo-environnementalistes/climatologues. En effet, ce sont les zones les moins affectées par des dépôts de glissements sous-lacustres provenant des pentes du bassin. Ces dépôts instantanés peuvent présenter de fortes épaisseurs et avoir érodé une partie des dépôts antérieurs. Par ailleurs, ces zones présentent des accumulations de sédiments plus faibles, ce qui permet de maximiser la profondeur temporelle couverte par l'archive.

		NEW RUN	NEW PILOT	
GUY : Recovery core I, Hole C (last core : GUY19-I-C-03)				
Name	>01	Pil-05	Pil-04	B-1
Coordinates	1:18	Acq 12:43	Acq 17:57	Acq 14:11
Tool config.	N..	1..	1..	2
Suggested Shift	26,0	N/A	N/A	200
Shift (cm)	12,0	N/A	N/A	200
Water (cm)	0,0	N/A	N/A	N
Lost Bottom	0,0	N/A	N/A	0
Material (cm)	29,0	277,5	150,0	185
Cap to cap	30,0	282,0	154,0	191
Top Material	14,0	N/A	N/A	620
Bottom Mat.	13,0	N/A	N/A	805
Bottom Liner	13,0	N/A	N/A	805
Bottom Run	13,0	N/A	N/A	817
Piston (cm)	14,0	N/A	N/A	620
Core-Catcher Samp.	☐	☐	☐	☐



Lors de la mission PALAS 2019, trois techniques de carottages différentes ont été mises en œuvre. Sur chacun des lacs, des carottages « courts » gravitaires (carottier UWITEC), associant pour la plupart du martelage afin d'augmenter l'épaisseur de sédiments récoltée, ont été effectués. Cette technique de carottage permet de prélever les sédiments sans perturber l'interface et fournit donc des enregistrements indispensables pour bien documenter la sédimentation récente. Sur le lac Guynemer, l'objectif était de prélever la séquence la plus longue possible. Pour cela, nous avons utilisé une plateforme et un carottier à piston stationnaire UWITEC développé par Richard Niederrieter (uwitec.at). Ce type de carottier (Figure 3A) permet de prélever les sédiments par tronçons de 2 (90 mm de Ø) ou 3 m de long (63 mm de Ø). Le principe consiste à descendre le carottier depuis la plateforme à la profondeur désirée puis à bloquer le piston pour pouvoir débiter le carottage en percutant à l'aide de marteaux. Une fois le tube de 2 ou 3 m rempli de sédiments, le carottier est remonté à la surface à l'aide de treuils puis la carotte récupérée. Ensuite, le carottier est renvoyé 2 ou 3 m plus bas afin de prélever la section suivante et ainsi de suite. Un système de « core catcher » hydraulique ou une « peau d'orange » est installé à la base du carottier afin d'éviter la perte de sédiments lors de la remontée de la carotte. Même si ces systèmes fonctionnent correctement, du sédiment correspondant à la place prise par le piston stationnaire, est perdu entre chaque section. Afin de combler cette perte et obtenir 100 % de la séquence sédimentaire, un second carottage (Trou B, Figure 3B) débutant à une profondeur décalée est réalisé juste à côté du premier (Trou A). Le schéma de carottage est construit en temps réel sur le terrain grâce à l'application « Corebook » développée au Laboratoire EDYTEM (Figure 3B). Le troisième système de carottage utilisé est celui développé par Atle Nesje⁶. C'est un système également à piston stationnaire qui permet de prélever en martelage jusqu'à 6 m de sédiment en une fois. Il a été déployé sur l'ensemble des lacs.

⁶ Nesje, 1992



1.2. CARTOGRAPHIE GÉOMORPHOLOGIQUE ET PRÉLÈVEMENTS POUR DATATION

CARTOGRAPHIE

La reconnaissance des extensions passées des glaciers combine l'observation et la cartographie des formes et des formations d'origine glaciaire. L'observation est conduite à plusieurs échelles spatiales et temporelles. Avant la mission terrain, elle a été permise par l'utilisation d'images satellite. Celles disponibles sur Google Earth présentent une résolution satisfaisante depuis 2017, mais la partie la plus à l'Est de notre secteur d'étude (Pic Guynemer) est complètement enneigée car couverte par une image d'août 2006. Cette ressource a permis de reconnaître quelques moraines d'autant plus apparentes que récentes, en particulier dans le secteur de Guynemer. Du fait des conditions de nébulosité et d'enneigement qui caractérisent la région, nous n'avons acquis une couverture tri-stéréo Pléiades que le 16 janvier 2019, près d'un an après leur commande auprès d'Airbus DS dans le cadre du programme ISIS. Le report d'une année de la mission PALAS à l'OP3 de 2019 a donc été, de ce point de vue, bienvenu : le MNT et l'ortho-photographie élaborés à partir de ces images satellite ont en effet favorisé nos observations préalables à la mission. De nombreuses moraines ont pu être reconnues, ainsi que des secteurs à roches moutonnées avec leurs blocs erratiques abondants, jusqu'à de potentiels chenaux d'écoulement des eaux

glaciaires, une reconnaissance qui a guidé l'organisation de la mission terrain. Outre qu'elle a permis de reconnaître, en l'absence du moindre sentier et avec de nombreux cours d'eau infranchissables à pied, des cheminement possibles sur le terrain, cette ressource géomatique a constitué la base du Système d'information géographique (SIG) dans lequel ont été reportées quotidiennement les observations de terrain sous la forme de la carte géomorphologique (cf. : Encadré 1) - laquelle a également bénéficié des images à très haute-résolution acquises par drone dans plusieurs secteurs.

La cartographie géomorphologique vise la reconstitution spatiale des extensions glaciaires holocènes voire tardiglaciaires⁷. Les moraines frontales et latérales témoignent de la géométrie 2D du glacier (et de ses variations temporelles), à partir de laquelle le volume de ce glacier peut être modélisé et des paramètres glaciologiques déduits - l'altitude de la ligne d'équilibre glaciaire et son évolution sont ainsi des indicateurs paléo-climatiques. Un secteur de roches moutonnées indique une extension minimale du glacier en longueur et en altitude ; un bloc erratique, une position du glacier pendant une phase de retrait.

MNT



Le MNT (Modèle Numérique de Terrain) est une représentation de la topographie. Les ortho-photographies sont des images de la surface terrestre (satellites ou aériennes) dont la géométrie a été rectifiée afin de pouvoir se superposer à une cartographie plane.

⁷ Jomelli et al., 2017

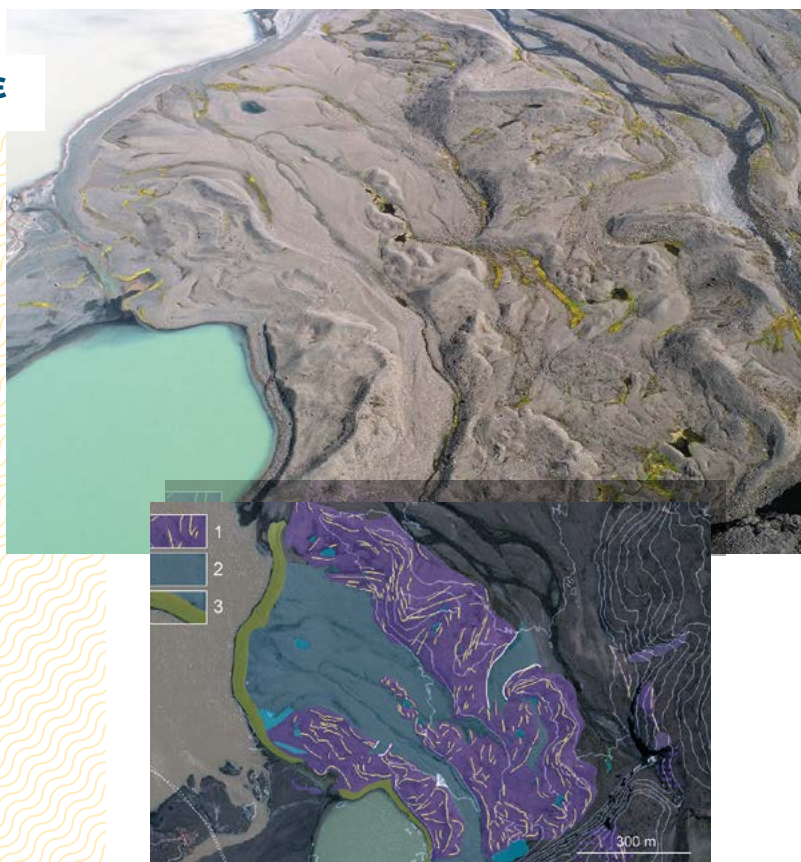
encadré 1.

CARTOGRAPHIE GÉOMORPHOLOGIQUE

Le principe de cette cartographie est de représenter l'ensemble des formes (e.g., moraine, talus d'éboulis, etc.) et formations (e.g., till, remplissage glacio-lacustre...) d'un secteur d'étude, en les associant aux processus qui les ont engendrées (e.g., processus glaciaires, périglaciaires, etc.) tout en intégrant la chronologie (au moins relative) de leur mise en place.

L'objet de notre étude explique que les marqueurs géomorphologiques de la dynamique glaciaire ont été privilégiés - seules quelques formes/formations non-glaciaires ont été cartographiées quand elles participent de la reconnaissance/identification des formes glaciaires (e.g., ravinement et dépôt associé qui affectent une moraine, ou dépôt d'écroulement rocheux qui la jouxte).

Cette figure présente une partie du complexe morainique du glacier Agassiz. On distingue sur la photo prise par drone (haut ; autorisation 2019-158) trois ensembles principaux de moraines. Par le croisement des images satellite (bas) et drone et des observations et photos de terrain, ils ont fait l'objet d'une cartographie détaillée dont témoigne la multiplicité des crêtes (N.B. : les moraines n'ont pas été hiérarchisées ici en fonction de leurs dimensions). L'emprise et la distribution des larges chenaux d'écoulement témoignent de la vigueur des remaniements qui ont affecté à au moins deux reprises ce complexe morainique. Le fetch induit par la taille des lacs, parcourus par des vents fréquents et intenses, et les variations saisonnières de leur niveau expliquent le développement des plages sur leurs rivages.



1: moraine et crête morainique ; 2: chenaux d'écoulement ; 3 : plage lacustre (N.B. : d'autres formes représentées ne sont pas explicitées ici). La ligne en pointillé blanc représente la position du front du glacier en 1963. Equidistance de isohypses : 50 m. Orthophoto : Pléiades, 16/01/2019



dendrochronologie

La dendrochronologie est une méthode de datation qui repose sur le comptage et l'analyse de la morphologie des cernes de croissance des arbres.

fetch

Le fetch est le temps et la distance parcourue par un même vent sur un plan d'eau sans obstacles. Au bout de cette zone « d'élan » l'eau va se lever pour former une vague : plus le fetch sera important, plus la vague sera haute.

⁸ e.g., Le Roy et al., 2015

⁹ e.g., Le Roy et al., 2017

PRÉLÈVEMENTS D'ÉCHANTILLONS POUR DATATION COSMOGÉNIQUE

À cette dimension spatiale des paléo-englacements que donne à voir la carte doit être associé un calage chronologique non seulement relatif mais aussi absolu. Dans la plupart des massifs de montagne, la présence de bois dans les moraines a permis d'établir des chronologies des fluctuations glaciaires par dendrochronologie et datation radiocarbone^a. Faute d'arbres à Kerguelen, c'est la datation par isotopes cosmogéniques (cf. : encadré 2) produits in situ qui a été mise en œuvre⁹ ; (cf. : Encadré 2). Pour cela, des échantillons ont été prélevés sur les complexes morainiques, dans des secteurs de roches moutonnées et sur des blocs erratiques. Ces datations permettront de retracer la dynamique passée des différents glaciers (Guynemer, Agassiz et Chamonix).

Au total, deux dépôts d'origine glaciaires, 10 surfaces de roches moutonnées, 23 blocs erratiques et 75 blocs sur moraines ont été échantillonnés à la disqueuse et au marteau-burin (Figure 4). Ces 110 échantillons de 1 à 2 kg ont été prélevés sur des basaltes (100), dont la calcite permet la production de ^{36}Cl , et sur des filons et géodes de quartz (10) pour y mesurer la concentration en ^{10}Be .

encadré 2.

DATATION PAR ISOTOPES COSMOGÉNIQUES PRODUITS IN SITU

L'interaction du rayonnement cosmique primaire avec les constituants de l'atmosphère crée des nucléides cosmogéniques qui s'adsorbent ensuite à la surface des minéraux dans les roches, en y induisant des réactions nucléaires. Des nucléides cosmogéniques (^{14}C , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{10}Be) commencent alors à y être produits, in situ. La mesure de leur concentration donne une durée de l'exposition de la surface rocheuse, compte tenu du taux de production du nucléide (qui dépend du temps, de l'altitude...), de la topographie locale (masque) et du taux d'érosion éventuel de cette surface. La datation par exposition en surface avec les nucléides cosmogéniques nécessite de prélever un échantillon sur une épaisseur maximale de 3-5 cm, en privilégiant le centre de blocs plats de grande dimension, sur la crête pour une moraine, et les plus stables possible, en relevant leurs dimensions, leur altitude et le masque topographique (Figure 4). L'échantillon fait ensuite l'objet d'une préparation mécanique puis géochimique en laboratoire, longue pour le ^{10}Be : broyage et tamisage, purification, séparation et dissolution avec l'acide fluorhydrique (HF), puis substitution de l'HF, et enfin extraction de l'oxyde de béryllium (BeO) - une préparation beaucoup plus rapide pour le ^{36}Cl . La mesure du rapport isotopique peut alors être réalisée par Spectrométrie de masse par accélérateur (AMS), en France sur l'instrument national ASTER (LN2C, CEREGE). Ce rapport est ensuite converti en concentration, à partir de laquelle est calculé avec un ordinateur en ligne un âge d'exposition, associé à une incertitude (analytique et sur le taux de production) généralement < 5% sauf pour les surfaces très jeunes (derniers siècles).



Figure 4. **Prélèvements d'échantillons** de basalte pour datation de l'exposition de surface par ^{36}Cl . a : prélèvement sur un bloc erratique du replat supérieur ouest du bassin de Guynemer (325 m d'alt.) ; b : échantillon Ker 1991 prélevé sur un bloc de la moraine latéro-frontale Ma-1 (la plus externe) du complexe Agassiz (70 m) ; c : prélèvement et mesure de l'écrantage sur un bloc de la moraine frontale Ma-3 du complexe Agassiz (75 m) ; d : prélèvement sur une roche moutonnée du Mont Fauve (515 m).

2. RÉSULTATS

2.1. BATHYMÉTRIE ET REMPLISSAGE SÉDIMENTAIRE

La bathymétrie du Lac Guynemer est relativement simple avec un bassin unique et très profond (90 m). Par contre, celles du lac Héra et des autres lacs Mythos sont beaucoup plus complexes avec plusieurs bassins et parfois des structures « mamelonnées » que l'on peut voir sur les profils sismiques (Figure 5A). Cette complexité est probablement liée à des apports de sédiments provenant des différents glaciers (Agassiz, Chamonix et Pointu) connectés aux lacs par le passé et à des glissements subaquatiques. Dans ce contexte sédimentaire, on comprend la nécessité de l'équipement de sismique pour définir les zones de carottage les plus appropriées, c'est-à-dire présentant une sédimentation non-perturbée (conservation de l'ordre chronologique des dépôts et sans hiatus), et ainsi pouvoir traiter notre question scientifique.

2.2. BILAN DES PRÉLÈVEMENTS, PREMIERS RÉSULTATS ET PERSPECTIVES

À Guynemer, 10 m de sédiments par sections de 3 m de long et sur 3 trous (A, B et C) ont été prélevés (Figure 3B). De plus, trois autres carottes de 1,40 à 2,90 m de long ont été réalisées à l'aide du système de carottier Nesje. Les carottes seront étudiées à Bergen et Chambéry à partir de juin 2020. Cependant, des observations ont déjà pu être réalisées. En effet, sur les ancrs utilisées pour stabiliser la plateforme de carottage, une quinzaine de centimètres de sédimentation bien préservée et laminée a été remontée lors des manœuvres de désancrage (Figure 6). Ces sédiments montrent de manière claire un changement de couleur marquant une modification récente du type de sédimentation. Dans l'ancre située au sud, au pied du delta constitué par les apports glaciaires du Pic Guynemer (1088 m), a été observé un dépôt glissé et enroulé sur lui-même, typique des glissements de sédiments sous-lacustres. À l'autre bout du lac, dans les sédiments remontés avec l'ancre, un dépôt atypique a aussi été observé, riche en débris végétaux, alors que la profondeur d'eau (80 m) interdit le développement in situ de plantes aquatiques. De futures études permettront de déterminer si ces dépôts sont synchrones

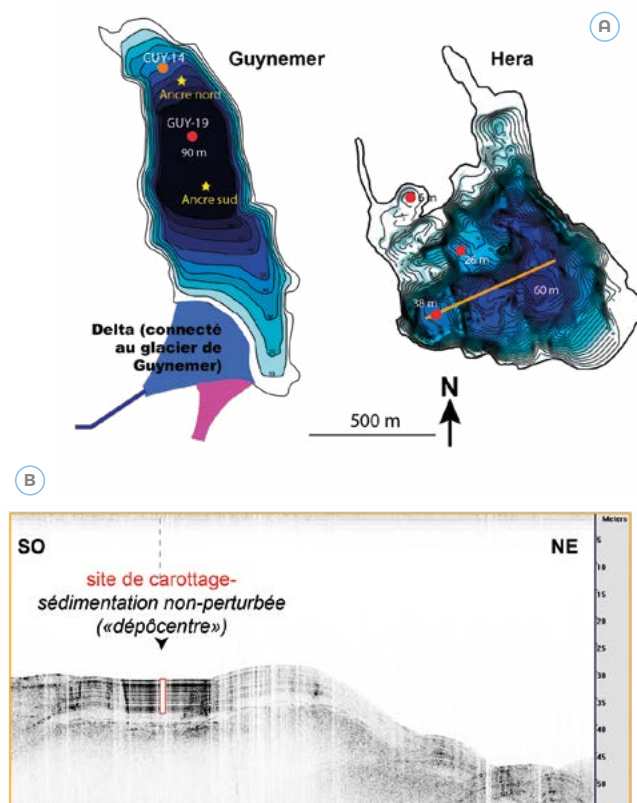
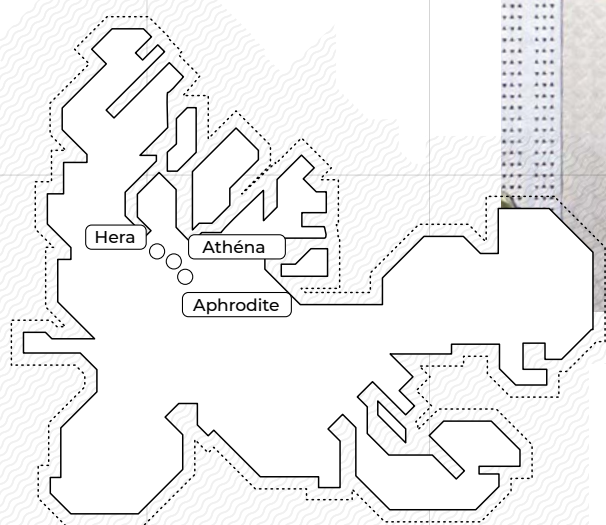
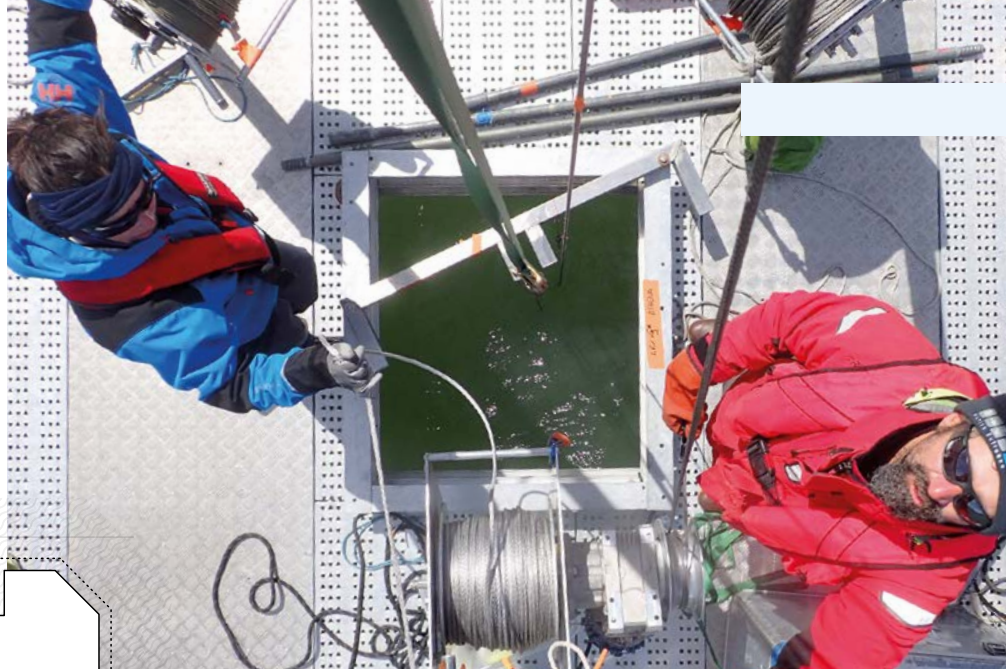


Figure 5. **Bathymétrie et sismique.**
A) Cartes bathymétriques des lacs de Guynemer et Héra illustrant différentes topographies subaquatiques rencontrées sur les lacs situés au nord de la calotte Cook. Les zones de carottage de 2014 et 2019 sont représentées par les points orange et rouge, respectivement. Les positions des ancrs nord et sud, installées pour stabiliser la plateforme lors du carottage, sont représentées par des étoiles jaunes.
B) Profil sismique correspondant au transect SO-NE en orange sur la carte bathymétrique d'Héra. Il met notamment en évidence un petit bassin perché à la sédimentation non-perturbée (contrairement à la zone plus profonde) et dans lequel une carotte de 6 m a été prélevée au carottier Nesje (Nesje, 1992). Sur la partie Nord-Est du transect, des structures « mamelonnées » apparaissent.

et d'en interpréter l'origine. L'une des hypothèses serait qu'un séisme ait déclenché une déstabilisation de la partie aquatique du delta, engendrant un tsunami à l'autre extrémité du lac. Une telle mise en évidence d'une activité sismique récente serait une découverte importante, Kerguelen n'étant pas connue pour être une zone très active sismiquement. Elle viendrait compléter une étude récente menée par notre équipe, qui a mis en évidence dans les sédiments du lac d'Armor les dépôts associés à 8 éruptions volcaniques importantes ayant eu lieu sur la péninsule Rallier du Baty, au cours des 11000 dernières années¹⁰.

¹⁰ <https://eartharxiv.org/5jnu6/>



Sur les lacs dits « Mythos » (i.e., Héra, Athéna 5 et Aphrodite) et un des lacs « Cartographie » (Figure 2), des carottes de 5 à 6 m de long ont été prélevées à l'aide du système Nesje. À Athéna 2, une carotte de 7 m de long a également été prélevée avec le système Nesje jusqu'à 6 m puis avec le système « Niederrieter » jusqu'à 7 m.

Sur les 6 lacs, un total de 14 sites a été carotté, représentant un cumul de 127 m de carottes (Figure 2). Parmi les analyses prévues pour retracer les changements climatiques passés, des analyses d'ADN sédimentaire lacustre seront réalisées. Elles permettront également de traiter des questions de paléocéologies telles que les interactions entre une espèce invasive, le lapin, et l'environnement (cf. : Encadré 3).

Comme pour toutes les archives, l'étape indispensable à l'obtention de reconstitutions paléoclimatiques et paléocéologiques est la datation. Pour les sédiments lacustres couvrant plusieurs milliers d'années, elle s'appuie en grande partie sur les analyses radiocarbone (14C) de macro-restes de végétaux. Cependant, en milieu glaciaire, il peut être difficile de trouver des restes végétaux dans les carottes. La chronologie des éruptions volcaniques, récemment établie par notre équipe sur les sédiments du Lac d'Armor¹¹, pourra être utilisée pour apporter des éléments de datation supplémentaires.

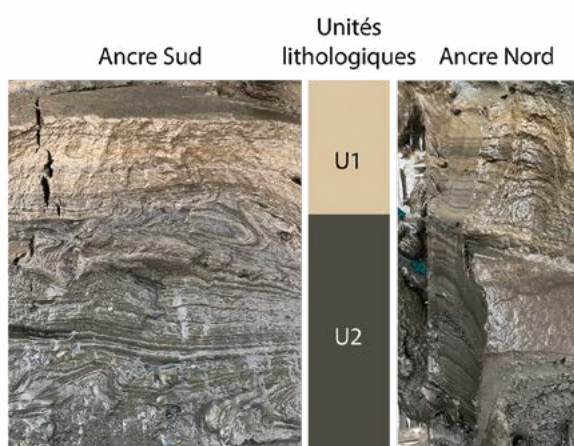
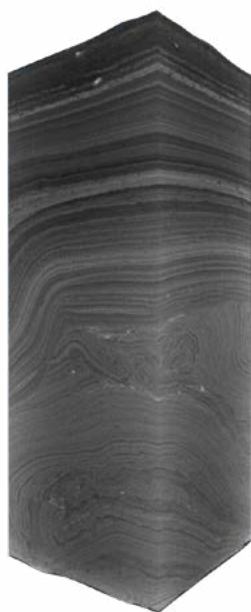


Figure 6. Illustration de la sédimentation du lac de Guynemer.

La partie de gauche de la figure présente une image tomographique (CT-scan) en 3 dimensions de la carotte de sédiments prélevée dans l'ancre située au sud du lac. Elle fait ressortir les sédiments argileux plus denses (en noir), les silts et sables moins denses (en blanc) et met en évidence les déformations en 3 dimensions causés par un glissement subaquatique. La partie de droite montre des photos prises sur le terrain des sédiments remontés des ancrs sud et nord et leur découpage en unités lithologiques.

¹¹ Arnaud et al., 2020



encadré 3.

HISTOIRE DE L'INVASION DES LAPINS À KERGUELEN ET IMPACT ÉCOLOGIQUE

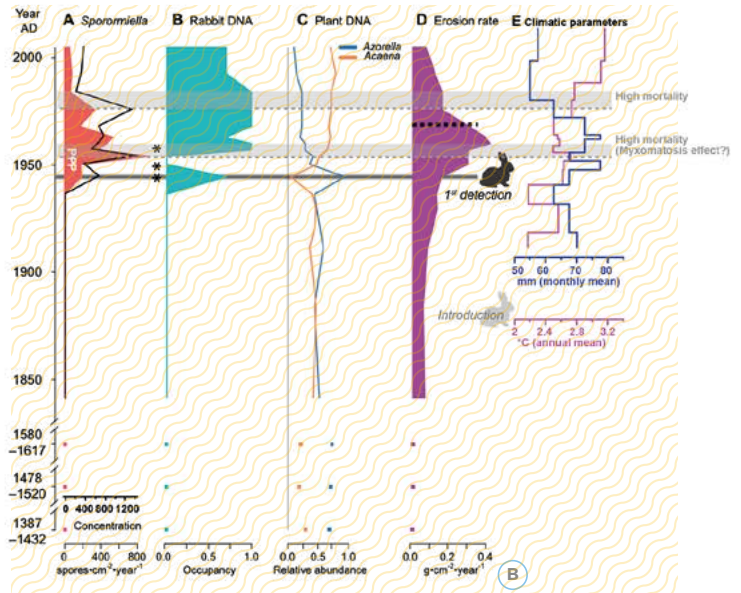
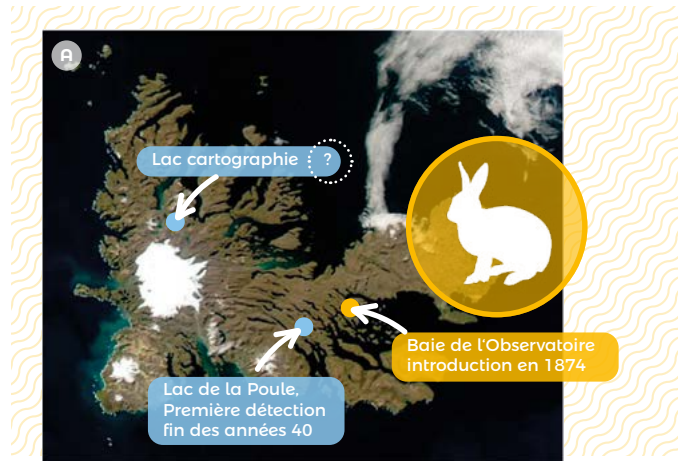
Les lapins ont été introduits dans la Baie de l'Observatoire en 1874 par les navigateurs britanniques de l'HMS Volage. L'objectif était de garantir, notamment en cas de naufrage, une ressource de nourriture sur cette île dépourvue de mammifères. L'introduction a été un succès dans le sens où les lapins ont bel et bien pullulé. En revanche, elle a entraîné une crise écologique majeure. En effet, au cours des missions scientifiques qui ont suivi, c'est tout d'abord l'effet sur la flore endémique, avec la quasi-disparition du chou de Kerguelen (*Pringlea antiscorbutica*), le remplacement des tapis d'*Azorella Selago* par les *Acaena Magellanica*, qui ont été observés, puis l'effet de la dégradation du couvert végétal sur l'érosion des sols.

Bien que les impacts de l'introduction de cette espèce invasive aient été décrits à de multiples reprises, nos connaissances sur la dynamique temporelle de l'invasion et les réponses de l'écosystème sont encore limitées. Les archives sédimentaires lacustres constituent l'unique moyen de remonter le temps pour retracer ces dynamiques.

Lors de la précédente mission PALAS en 2014, les sédiments d'une carotte prélevée dans le lac de la Poule ont fait l'objet d'analyses d'ADN de plantes et de mammifères (Fig. A). Celles-ci ont permis de mettre en évidence l'arrivée du lapin dans le bassin versant vers la fin des années 1940, c'est-à-dire environ 70 ans après leur introduction sur l'île à une dizaine de kilomètres à vol d'oiseau (Fig. B). Cette présence est confirmée par l'observation de spores de champignons coprophiles (*Sporomielia* sp.) se développant sur les déjections des herbivores. L'invasion du lapin provoque très rapidement une crise érosive qui perdure jusqu'au milieu des années 1960. Si l'érosion baisse depuis cette période, le changement de communauté végétale, c'est-à-dire la disparition progressive des *Azorella* au profit des *Acaena*, perdure encore aujourd'hui. Le pic d'*Azorella* dès l'arrivée des lapins s'explique très probablement par la dégradation massive de ces plantes en coussins liée à la construction des terriers (la mobilisation des fragments de coussins étant alors facilitée lors des pluies). Au milieu des années 1950, la forte mortalité des lapins suggérée par les données (chute de la concentration de *Sporomielia* et pic d'ADN dues aux cadavres), pourrait refléter l'introduction de la myxomatose en 1955-1956¹². Une seconde phase de mortalité importante est enregistrée dans les années 1975. Elle pourrait avoir été causée par le virus, la baisse des ressources de nourriture ou une autre raison. Il est intéressant de noter que la baisse de l'érosion intervient avant ce déclin important de la population de lapins, mais qu'elle est concomitante à la baisse des précipitations. La crise érosive lors de l'arrivée du lapin pourrait aussi avoir été accentuée par l'augmentation des précipitations (Fig. B).

Autour des lacs Guynemer et Mythos, seuls quelques lapins vivants ou morts ont été observés lors de notre mission PALAS 2019. Le chou de Kerguelen y est encore relativement abondant et les coussins d'*azorella* également. En revanche, près des lacs Cartographies ou sur les côtes de la baie

du Repos, plus éloignés de la calotte Cook, nous avons pu observer des populations de lapins significatives. Combien de temps a-t-il fallu aux lapins pour coloniser cette zone très éloignée de la Baie de l'Observatoire ? Quelle est l'ampleur de l'impact sur l'érosion et la végétation ? Quelles sont les dynamiques temporelles des réponses de l'écosystème mais aussi des populations de lapins (sommes-nous en phase de déclin comme autour du lac de La Poule ?) ? L'application des analyses ADN sur les sédiments du lac Cartographie permettront d'apporter des réponses à ces questions.



A) Localisation 1) des lacs ciblés pour étudier l'invasion des lapins et ses effets sur l'écosystème (en bleu) et 2) de la baie de l'Observatoire où les lapins ont été introduits (en jaune).

B) Évolution temporelle des spores de *Sporomielia* (A), de l'ADN de lapin (B), d'*Acaena* et *Azorella* (C) et du taux d'érosion dans la carotte de sédiment du lac de La Poule (D)¹³. Les courbes (E) représentent l'évolution des températures (moyenne annuelle) et des précipitations (moyenne mensuelle) depuis 1912 (interpolation à partir de données de stations météo à l'échelle mondiale de l'Université de Delaware)¹⁴.

¹² Chappuis et al., 1995

¹³ Ficetola et al., 2017

¹⁴ Nickl et al., 2014



2.3. CARTOGRAPHIE DES MORAINES ET PRÉLÈVEMENTS POUR DATATION : RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES SUR LA MARGE PROGLACIAIRE DE GUYNEMER

Le glacier de Gwynemer actuel est divisé en quatre parties de dimension inégale, avec une superficie totale de c. 1.4 km². Les deux secteurs inférieurs (0.25 km²) se tiennent 100 à 250 m en contrebas des secteurs supérieurs dont ils sont séparés par des parois non englacées ; leurs fronts descendent jusqu'à 340 et 395 m d'altitude.

La partie du complexe morainique de Gwynemer située à l'amont du cône-delta est très riche : outre les trois principales moraines latéro-frontales (Mg-4 à 6) à l'aval du lac supérieur, entre lesquelles des cordons généralement moins continus sont présents, de très nombreux cordons encadrent ce lac, en particulier sur sa rive nord, marqueurs du retrait glaciaire depuis 1963 ; le flanc interne de la plus grande de ces moraines, dont la partie apparente domine le lac de 30 m, est soumise à un ruissellement actif (Figure 7a). Quelques cordons perchés à > 300 m sur la rive sud sont possiblement raccordés à l'ensemble Mg4-6.

Trois moraines sont présentes autour du lac Gwynemer inférieur : Mg-3 sur le replat intermédiaire de la rive ouest, entre 165 et 200 m d'alt., Mg-2 à son extrémité nord, quelques m au-dessus du lac, et Mg-1 sur un replat de la rive est, à 190 m. 40 échantillons ont été prélevés pour la datation cosmogénique de Mg-1 (2), Mg-2 (3), Mg-3 (3), Mg-4 (7), Mg-5 (8), Mg-6 (5) et sur 12 blocs erratiques distribués à différentes altitudes (maxi : 305 m) autour du lac inférieur y compris sur le seuil qui se tient vers 150 m d'alt. entre les lacs Louise et de Gwynemer.

La même approche cartographique et de prélèvements a été appliquée dans les marges proglaciaires Agassiz (Figure 7b) et de Chamonix. Des échantillons ont également été prélevés sur des roches moutonnées et des blocs erratiques le long d'un transect altitudinal de 500 m entre le Lac Athéna 2 et le sommet du Mont Fauve (Figures 2 et 7c). Ces travaux permettront de documenter des phases d'extension des glaciers Agassiz et de Chamonix.

superficie totale de c.



c. = circa, c'est-à-dire « environ »

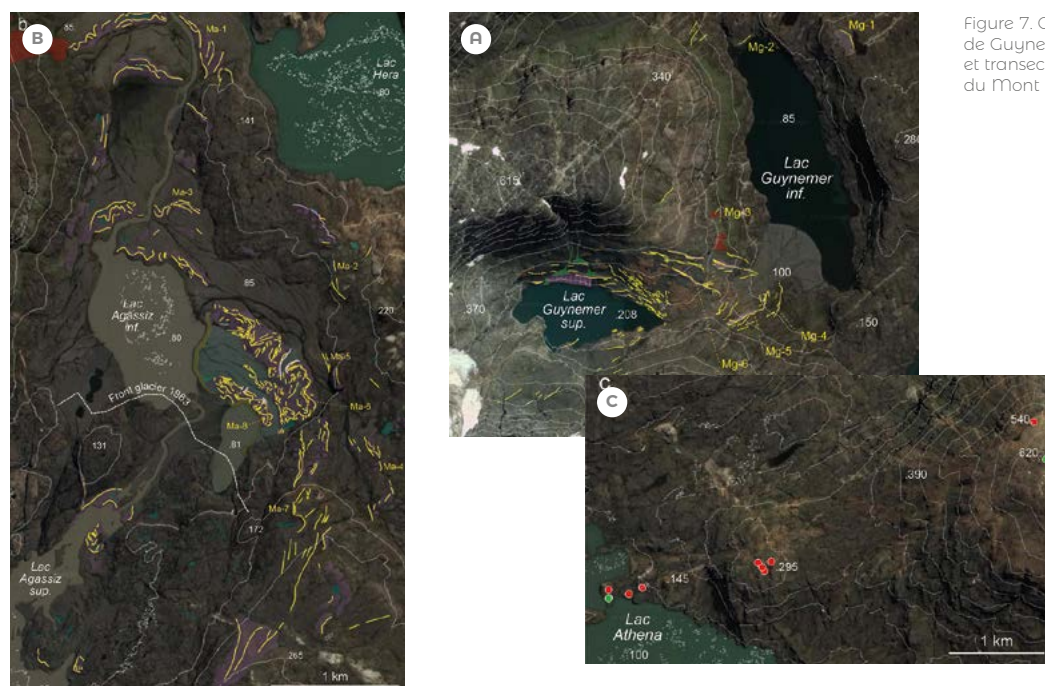


Figure 7. Complexes morainiques de Guynemer (a) et Agassiz (b), et transect d'échantillonnage du Mont Fauve (c).

CONCLUSION

Le travail de cinq carotteurs et trois géomorphologues pendant un mois sur le terrain et la logistique mise en place par l'Institut polaire français ont permis le prélèvement d'une quantité incroyable d'échantillons : 127 m de sédiments et 110 fragments de roches.

Les résultats préliminaires de cette mission ont déjà fourni une cartographie des formations glaciaires de la zone d'étude, située entre la calotte Cook et la presqu'île de la Société de Géographie. Les premières analyses de deux carottes courtes provenant du lac Guynemer montrent déjà des changements récents dans la dynamique de sédimentation et soulèvent des questions sur l'enregistrement potentiel de l'activité sismique en lien avec le volcanisme. La datation de ces carottes permettra d'apporter des réponses à ces questions. L'étude des autres carottes débutera en juin 2020 et les analyses des isotopes cosmogéniques pour dater les formations glaciaires sont en cours. Des reconstitutions des fluctuations des glaciers et paléoclimatiques arriveront donc prochainement.

REMERCIEMENTS

Toute l'équipe PALAS remercie l'Institut polaire sans lequel la campagne PALAS 2019 n'aurait tout simplement même pas pu être imaginée. En particulier, l'équipe de la logistique subantarctique nous a accompagné dès la conception de la campagne. Son professionnalisme et son dévouement total sur le terrain, au service de la science, ont sans nul doute rendu possible ce qui semblait à beaucoup impossible.

RÉFÉRENCES

Arnaud, F., Pierre, S., Leloup, L., Servettaz, A., Moine, B., Develle, A.L., Guédron, S., et al. 2020.

"Holocene Tephrochronology of Kerguelen Archipelago, Subantarctic Indian Ocean." EarthArXiv. May 20. doi:10.31223/osf.io/5jnu6.

Dätwyler, C., Neukom, R., Abram, N.J., Gallant, A.J.E., Grosjean, M., Jacques-Coper, M., Karoly, D.J., Villalba, R., 2018.

Teleconnection stationarity, variability and trends of the Southern Annular Mode (SAM) during the last millennium. *Clim. Dyn.* 51, 2321–2339. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-4015-0>

Favier, V., Verfaillie, D., Berthier, E., Menegoz, M., Jomelli, V., Kay, J.E., Ducret, L., Malbêteau, Y., Brunstein, D., Gallée, H., Park, Y.-H., Rinterknecht, V., 2016.

Atmospheric drying as the main driver of dramatic glacier wastage in the southern Indian Ocean. *Sci. Rep.* 6, 32396. <https://doi.org/10.1038/srep32396>

Ficetola, G. F., Poulenard, J., Sabatier, P., Messenger, E., Gielly, L., Leloup, A., Etienne, D., Bakke, J., Malet, E., Fanget, B., Storen, E., Reyss, J.-L., Taberlet, P., Arnaud, F., 2018.

DNA from lake sediments reveals long-term ecosystem changes after a biological invasion. *Sci. Adv.* 4, eaar4292

Fletcher, M.-S., Moreno, P.I., 2011.

Zonally symmetric changes in the strength and position of the Southern Westerlies drove atmospheric CO₂ variations over the past 14 ky. *Geology* 39, 419–422. <https://doi.org/10.1130/G31807.1>

Jomelli, V., Mokadem, F., Schimmelpfennig, I., Chapron, E., Rinterknecht, V., Favier, V., Verfaillie, D., Brunstein, D., Legentil, C., Michel, E., Swingedouw, D., Jaouen, A., Aumaitre, G., Bourlès, D.L., Keddadouche, K., 2017.

Sub-Antarctic glacier extensions in the Kerguelen region (49°S, Indian Ocean) over the past 24,000 years constrained by 36 Cl moraine dating. *Quat. Sci. Rev.* 162, 128–144. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.03.010>

Kilian, R., Lamy, F., 2012.

A review of Glacial and Holocene paleoclimate records from southernmost Patagonia (49–55°S). *Quat. Sci. Rev.* 53, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.07.017>

Le Roy, M., Deline, P., Carcaillet, J., Schimmelpfennig, I., Ermini, M., 2017.

¹⁰Be exposure dating of the timing of Neoglacial glacier advances in the Ecrins-Pelvoux massif, southern French Alps. *Quat. Sci. Rev.* 178, 118–138. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.10.010>

Le Roy, M., Nicolussi, K., Deline, P., Astrade, L., Edouard, J.-L., Miramont, C., Arnaud, F., 2015.

Calendar-dated glacier variations in the western European Alps during the Neoglacial: the Mer de Glace record, Mont Blanc massif. *Quat. Sci. Rev.* 108, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.10.033>

Li, C., Sonke, J.E., Le Roux, G., Van der Putten, N., Piotrowska, N., Jeandel, C., Mattioli, N., Benoit, M., Wiggs, G.F.S., De Vleeschouwer, F., 2020.

Holocene dynamics of the southern westerly winds over the Indian Ocean inferred from a peat dust deposition record. *Quat. Sci. Rev.* 231, 106169. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106169>

Nesje, A., 1992.

A Piston Corer for Lacustrine and Marine Sediments. *Arct. Alp. Res.* 24, 257. <https://doi.org/10.2307/1551667>

Nesje, A., Kvamme, M., Rye, N., Løvlie, R., 1991.

Holocene glacial and climate history of the Jostedalsgreen region, Western Norway; evidence from lake sediments and terrestrial deposits. *Quat. Sci. Rev.* 10, 87–114. [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(91\)90032-P](https://doi.org/10.1016/0277-3791(91)90032-P)

E. Nickl, C. J. Willmott, K. Matsuura, S. M. Robeson, 2010.

Changes in annual land-surface precipitation over the twentieth and early twenty-first century. *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 100, 729–739

Oppedal, L.T., Bakke, J., Paasche, Ø., Werner, J.P., van der Bilt, W.G.M., 2018.

Cirque Glacier on South Georgia Shows Centennial Variability over the Last 7000 Years. *Front. Earth Sci.* 6, 2. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00002>

Saunders, K.M., Kamenik, C., Hodgson, D.A., Hunziker, S., Siffert, L., Fischer, D., Fujak, M., Gibson, J.A.E., Grosjean, M., 2012.

Late Holocene changes in precipitation in northwest Tasmania and their potential links to shifts in the Southern Hemisphere westerly winds. *Glob. Planet. Change* 92–93, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.04.005>

Shulmeister, J., Goodwin, I., Renwick, J., Harle, K., Armand, L., McGlone, M.S., Cook, E., Dodson, J., Hesse, P.P., Mayewski, P., Curran, M., 2004.

The Southern Hemisphere westerlies in the Australasian sector over the last glacial cycle: a synthesis. *Quat. Int.* 118–119, 23–53. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(03\)00129-0](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(03)00129-0)



