

LATE QUATERNARY CLIMATE HISTORY OF COASTAL ANTARCTIC ENVIRONMENTS: A MULTI-PROXY APPROACH (LAQUAN).

Wim Vyverman^{1*}, Annick Wilmotte², Elie Verleyen¹, Claire Schmoker², Koen Sabbe¹, Sylvie Cousin¹, Lena De Groot¹, Krzysztof Waleron^{2,3}, Pierre Balthasart², Arnaud Taton², Cédric Lemaire²

¹*Ghent University, Protistology and Aquatic Ecology, Krijgslaan 281 S8, B-9000 Gent, Belgium*

²*University of Liège, Institute of Chemistry - Center for Protein Engineering, Sart Tilman B6, B-4000 Liège, Belgium*

³*Department of Biotechnology, Intercollegiate Faculty of Biotechnology, University of Gdansk & Medical School of Gdansk, ul Kladki 24, 80-822 Gdansk, POLAND*

**wim.vyverman@UGent.be*

In cooperation with:

Dr. Dominic A. Hodgson, British Antarctic Survey, Cambridge, UK

Abstract

The project LAQUAN aimed to contribute to the understanding of the Late Quaternary environmental history of Antarctic coastal regions. Novel biological proxies and inference models were developed using reference lake datasets from modern communities in Antarctic ice-free regions, including cyanobacterial sequences (Taton et al. 2003, 2006a,b), diatoms (Hodgson et al. 2001a, Sabbe et al. 2003, 2004) and pigments (Hodgson et al. 2004). Quantification of the relationship between the compositional data of microbial mat communities and climate-sensitive environmental characteristics resulted in robust inference models (Verleyen et al. 2003), enabling the reconstruction of environmental conditions based on microfossils and their biochemical remains (Verleyen et al. 2004a) preserved in lake sediments. This approach demonstrated the importance of lake sediment archives to understand Antarctic climate history, and revealed important events during the history of late Quaternary variation in climate, ultraviolet (UV) radiation, and relative sea-level in the Larsemann Hills (e.g. Verleyen et al. 2004b, 2005; Hodgson et al. 2005a,b).

The study of modern cyanobacterial diversity showed that each lake is quite unique in terms of diversity. Every single lake studied resulted in the discovery of new Operational Taxonomic Units (OTUs), which suggests that there is a lot more diversity to discover. The majority of the genotypes are restricted to Antarctica and sometimes, even present only in one sample, which hints to the existence of endemic cyanobacteria (Taton et al. 2003, 2006a,b). A taxonomic inventory of the diatom flora from the Larsemann Hills similarly revealed that Antarctic endemics account for about 40 % of all freshwater and brackish taxa.

A protocol was developed to evaluate the use fossil cyanobacterial as a new proxy in paleolimnological reconstructions. Fossil cyanobacterial sequences were found in layers of up to 9000 years old. The validation of fossil sequences of Progress and Heart Lake cores by both laboratories allowed us to assess that a majority of cyanobacterial sequences found in sedimentary core layers were really from fossil organisms. Comparison between the modern and fossil diversity revealed that most fossil sequences were also present in modern samples. The main problems encountered were related to the presence of good-quality bacterial DNA that act as competitor of fossil DNA during PCR, downcore degradation of fossil DNA, and the selective, group-specific resistance of cyanobacterial DNA to degradation.

Biological, biogeochemical, and sedimentological proxies were used to reconstruct paleoenvironmental changes as recorded in lake sediments. During the Last Glacial Maximum one of the main peninsulas in the Larsemann Hills was only partly glaciated (Hodgson et al. 2001b), as evidenced by uniquely long lake sedimentary records extending into the previous interglacial period (Eemian). Diatom-based inference models revealed that this interglacial was probably warmer and

wetter than the Holocene (Hodgson et al. 2005a), which was further supported by the presence of currently sub-Antarctic endemics in the Eemian diatom flora (Hodgson et al. 2006). The last glacial period was characterized by dry and cold conditions prevailing over the Larsemann Hills. The levels of the cyanobacterial UV-screening compound scytonemin in fossil microbial communities from this period were three times higher than the present-day values (Hodgson et al. 2005b). Shortly after 13,500 yr BP, deglaciation of the Larsemann Hills and the continental shelf in Prydz Bay intensified (Verleyen et al. 2005a). The collapse of this part of the East Antarctic Ice Sheet (EAIS) thus coincided and may have contributed to melting water pulse 1A, which was one of the most rapid sea-level rises since the end of the last glacial period. During the Holocene, several warm periods were detected, coinciding with more productive coastal waters (Verleyen et al. 2004a). Marine sediments in isolation basins from these periods are characterized by open water taxa and high chlorophyll a concentrations (Verleyen et al. 2004b,c). Based on a relative sea level curve, we inferred that during the last warm period (the Hypsithermal) increased moisture supply to this part of the EAIS might have contributed to the global sea level fall between 4000 and 2500 yr BP. The high sediment accumulation rate in the isolation lakes further enabled us to identify several dry episodes and periods of higher UV radiation penetration during the past 2000 years (Verleyen et al. 2005b).

Together, our results highlight the potential of coastal Antarctic lakes for the reconstruction of past environmental changes and underscore the need for continued studies of lacustrine sediment sequences from this climate sensitive region.

Key-words: *Paleolimnology, Antarctica, fossil DNA, diatoms, cyanobacteria, fossil pigments, climate change, ice sheet volume, ultraviolet radiation, sea-ice extent, moisture balance, deglaciation, Eemian, Last Glacial Maximum, Holocene*

Samenvatting

Het project LAQUAN beoogde een bijdrage te leveren tot de reconstructie van Laat-Kwartaire klimaat- en milieuveranderingen in Antarctische ijsvrije gebieden. Daartoe werden nieuwe biologische proxies en inferentiemodellen ontwikkeld aan de hand van referentiedatasets voor cyanobacteriële DNA sequenties (Taton et al. 2003, 2006a,b), diatomeeën (Hodgson et al. 2001a, Sabbe et al. 2003, 2004) en pigmenten (Hodgson et al. 2004). Deze datasets werden gebruikt om de moderne diversiteit en distributie van biota in bentische microbiële matten in Antarctische meren te onderzoeken in relatie tot klimaat-gevoelige parameters. Inferentie-modellen voor deze parameters (Verleyen et al. 2003) werden vervolgens aangewend om vroegere klimaat- en milieuveranderingen in Oost-Antarctica kwantitatief te reconstrueren op basis van microfossielen en hun biochemische merkers (Verleyen et al. 2004a) die bewaard worden in meersedimenten. Deze benadering toonde aan dat meersedimenten belangrijke archieven zijn van de klimaathistoriek van kustgebieden in Antarctica, en resulteerde in de reconstructie van vroegere veranderingen in het klimaat, de hoeveelheid ultraviolette (UV) straling en de relatieve zeespiegel tijdens het laat Kwartair in de Larsemann Hills (b.v. Verleyen et al. 2004b, 2005; Hodgson et al. 2005a,b).

Het onderzoek van de moderne diversiteit bij cyanobacteriën bracht aan het licht dat er grote verschillen in rijkdom en samenstelling bestaan tussen meren onderling. Ieder bestudeerd meer resulteerde in de ontdekking van nieuwe 'Operational Taxonomic Units' (OTUs), wat suggereert dat een significant gedeelte van de biodiversiteit van microbiota nog ontdekt moet worden. Het merendeel van de genotypes is bovendien enkel gekend van Antarctica en in sommige gevallen slechts aanwezig in één meer, zodat kan vermoed worden dat een belangrijk aantal cyanobacteriën endemisch is voor dit continent (Taton et al. 2003, 2006a,b). Taxonomisch onderzoek van de diatomeeënflora in de Larsemann Hills bracht aan het licht dat minstens 40% van alle zoet- en brakwater taxa endemisch blijkt te zijn voor Antarctica.

Tijdens het project werd een protocol ontwikkeld om fossiel DNA in meersedimenten te gebruiken als (groep-)specifieke merker voor cyanobacteriën. Sedimenten van 9000 jaar oud bleken nog amplificeerbare sequenties te bevatten. Contaminatie met recent cyanobacterieel DNA werd uitgesloten door de stalen in de laboratoria van beide partners te analyseren. De meerderheid van de sequenties bleek afkomstig te zijn van gefossiliseerd cyanobacterieel DNA. De meeste fossiele sequenties werden eveneens aangetroffen in stalen van recente microbiële matten. De belangrijkste problemen bij de analyse van fossiel DNA van cyanobacteriën, hadden te maken met de aanwezigheid van bacterieel DNA van goede kwaliteit dat in competitie gaat met het fossiele DNA tijdens PCR, de degradatie van DNA in functie

van de tijd, en de mogelijke groepsspecifieke resistentie tegen DNA afbraak.

Het gecombineerde gebruik van biologische, biogeochemische en sedimentologische proxies maakte het mogelijk om de klimaat- en milieu-dynamiek Oost-Antarctica te reconstrueren. Tijdens het Laatste Glaciale Maximum was één van de schiereilanden van de Larsemann Hills slechts gedeeltelijk bedekt met een continentale ijskap (Hodgson et al. 2001b), zodat een aantal meren een continu en onverstoord sediment-archief hebben vanaf het vorige interglaciaal (Eemiaan) tot nu. Door toepassing van onze modellen kon worden afgeleid dat het klimaat tijdens het Eemiaan waarschijnlijk warmer en vochtiger was dan gedurende het Holoceen (Hodgson et al. 2005a). De warmere condities tijdens het voorgaande interglaciaal werden bevestigd door de aanwezigheid van een flora die momenteel voorkomt in meren op warmere, sub-Antarctische eilanden (Hodgson et al. 2005b). Het laatste glaciaal werd gekenmerkt door een droog en koud klimaat in de Larsemann Hills. De concentratie aan scytonemine, een pigment dat cyanobacteriën beschermt tegen hoge dosissen UV straling, was gemiddeld drie keer hoger dan in recente microbiële matten (Hodgson et al. 2005b). De ijskap, die de Larsemann Hills en de continentale shelf in Prydz Bay gedeeltelijk bedekte, desintegreerde kort na 13500 yr BP (Verleyen et al. 2005a). Het afsmelten van dit stuk van de Oost-Antarctische ijskap (EAIS) viel samen met 'melting water pulse 1A', één van de snelste zeespiegelstijgingen sinds het einde van het Laatste Glaciale Maximum. Tijdens het Holoceen konden verschillende warmere periodes worden gedetecteerd die gepaard gingen met productieve kustwateren (Verleyen et al. 2004a). De mariene sedimenten uit isolatiemeren worden tijdens deze warmere periodes immers gekenmerkt door hoge chlorofyl a concentraties en door de aanwezigheid van taxa karakteristiek voor open water condities (Verleyen et al. 2004b,c). Op basis van een relatieve zeespiegelcurve kon worden afgeleid dat tijdens de laatste warme periode (Hypsithermal) een verhoging in de precipitatiebalans mogelijk leidde tot het aandikken van de EAIS en een daarmee gepaard gaande globale zeespiegeldaling tussen 4000 en 2500 yr BP. Gedurende de laatste 2000 jaar was de sedimentatiesnelheid in de isolatiemeren relatief hoog, wat de reconstructie van korte termijn veranderingen in de UV straling mogelijk maakte (Verleyen et al. 2005b).

Onze resultaten onderstrepen het potentieel van Antarctische kustmeren voor de reconstructie van klimaat- en milieuveranderingen, en de nood aan bijkomende meersediment-sequenties van deze klimaatgevoelige regio.

Trefwoorden: *Paleolimnologie, Antarctica, fossiel DNA, diatomeeën, cyanobacteriën, fossiele pigmenten, klimaatveranderingen, ijskapvolume, ultraviolette straling, omvang van het zeeijs, vochtbalans, deglaciatie, Eemiaan, Laatste Glaciale Maximum, Holoceen*

Résumé

Dans le cadre du projet LAQUAN, des nouveaux 'proxy' biologiques et modèles d'inférence ont été développés pour reconstruire les changements environnementaux passés dans les régions libres de glace de l'Antarctique. Des sets de données de référence de séquences cyanobactériennes (Taton et al. 2003, 2006a,b), de diatomées (Hodgson et al. 2001a, Sabbe et al. 2003, 2004) et pigments (Hodgson et al. 2004) ont été construits pour étudier la diversité présente et la distribution des organismes dans les tapis microbiens benthiques de lacs antarctiques. Ces sets de données ont ensuite été utilisés pour la comparaison entre les communautés vivantes et fossiles, ou pour développer des modèles d'inférence (Verleyen et al. 2003) pour reconstruire quantitativement les changements climatiques passés dans l'Antarctique de l'Est. Les analyses paléolimnologiques et l'application des modèles ont révélé l'histoire des variations du climat, des radiations ultraviolettes (UV) et du niveau relatif de la mer au dernier Quaternaire dans les Larsemann Hills.

L'étude de la diversité cyanobactérienne moderne a montré que chaque lac est unique en terme de diversité. Dans chaque lac étudié, on a découvert de nouvelles Unités Taxonomiques Opérationnelles (OTU), ce qui suggère qu'il reste beaucoup de diversité à découvrir. La majorité des génotypes est restreinte à l'Antarctique et parfois même à un seul échantillon, ce qui semble indiquer l'existence de cyanobactéries endémiques (Taton et al. 2003, 2006a,b). Un inventaire taxonomique de la flore des diatomées du Larsemann Hills a également révélé que les endémiques antarctiques représentent à peu près 40% de tous les taxons d'eau douce et saumâtre.

Des séquences de cyanobactéries fossiles ont été trouvées jusque dans des couches vieilles de 9000 ans. La validation des séquences fossiles des carottes des lacs Progress et Heart par les deux laboratoires a permis de déterminer que la majorité des séquences de cyanobactéries trouvées dans les couches sédimentaires provenaient certainement d'organismes fossiles. La comparaison entre la diversité moderne et fossile montre que la plupart des séquences fossiles sont aussi présentes dans les échantillons modernes. Les problèmes principaux rencontrés étaient liés à la présence d'ADN bactérien de bonne qualité qui se comporte comme compétiteur de l'ADN fossile pendant la PCR, la dégradation de l'ADN fossile car les carottes ne sont pas gelées, et la résistance spécifique possible de l'ADN cyanobactérien à la dégradation selon le type d'organisme.

Les résultats principaux concernant les paléoenvironnements peuvent être résumés comme suit. Pendant le dernier Maximum Glaciaire, une des péninsules principales des Larsemann Hills était seulement partiellement recouverte de glaces (Hodgson et al. 2001b), comme montré par des enregistrements sédimentaires lacustres exceptionnellement longs et atteignant la période interglaciaire précédente

(Eemien). Les modèles d'inférence basés sur les diatomées ont révélé que cet interglaciaire était probablement plus chaud et humide que l'Holocène (Hodgson et al. 2005a), ce qui est également supporté par la présence d'endémiques actuellement présentes dans le sub-Antarctique parmi la flore de diatomées de l'Eemien (Hodgson et al. 2006). La dernière période glaciaire a été caractérisée par des conditions sèches et froides dans les Larsemann Hills. Des quantités importantes du pigment scytonémine, protecteur par rapport aux UV, dans les communautés microbiennes fossiles suggèrent que les expositions aux radiations UV étaient trois fois supérieures aux valeurs actuelles (Hodgson et al. 2005b). Peu après 13,500 AC, les déglaciations des Larsemann Hills et du 'shelf' continental dans la Baie de Prydz se sont intensifiées (Verleyen et al. 2005a). La fonte de cette partie de la 'East Antarctic Ice Sheet (EAIS)' coïncide donc et peut avoir contribué au 'pulse' d'eau de fonte 1A, qui fut un des changements de niveau de la mer les plus rapides depuis la fin de la dernière période glaciaire. Durant l'Holocène, plusieurs périodes chaudes ont été détectées, coïncidant avec des eaux côtières plus productives (Verleyen et al. 2004a). Les sédiments marins dans les bassins d'isolation de cette période sont caractérisés par des taxons d'eau libre et de fortes concentrations en chlorophylle a (Verleyen et al. 2004b,c). Sur base d'une courbe des niveaux relatifs de la mer, nous déduisons que durant la dernière période chaude (l'Hypsithermal), un apport supérieur d'humidité à cette partie de l'EAIS peut avoir contribué à la chute globale du niveau de la mer entre 4000 et 2500 ans BP. Le fort taux d'accumulation de sédiments dans les lacs d'isolation ont aussi permis d'identifier plusieurs épisodes secs et des périodes de pénétration des radiations UV plus importantes pendant les dernières 2000 années (Verleyen et al. 2005b).

Pris globalement, nos résultats soulignent le potentiel des lacs côtiers antarctiques pour la reconstruction des changements environnementaux passés et démontrent le besoin de continuer les études des séquences de sédiments lacustres de cette région sensible au climat.

Mots-clé: *paléolimnologie, Antarctique, ADN fossile, diatomées, cyanobactéries, pigments fossiles, changement climatique, volume de la couche de glace, radiation ultraviolette, étendue de glace de mer, humidité, déglaciation, Eemien, Dernier Maximum Glaciaire, Holocène.*

Reference list – Referentielijst – Liste de reference

- Hodgson DA, Vyverman W and Sabbe K. 2001a. Limnology and biology of saline lakes in the Rauer Islands, Eastern Antarctica. *Antarctic Science* 13: 255-270.
- Hodgson DA, Noon PE, Vyverman W, Bryant CL, Appleby P, Gilmour M Verleyen E, Sabbe K and Jones VJ. 2001b. Were the Larsemann Hills ice free through the Last Glacial Maximum? *Antarctic Science* 13: 440-454.
- Hodgson DA, Vyverman W, Verleyen E, Sabbe K, Leavitt PR, Taton A, Squier AH, Keely BJ. 2004. Environmental factors influencing the pigment composition of in situ benthic microbial communities in east Antarctic lakes. *Aquatic microbial ecology* 37: 247-263.
- Hodgson DA, Verleyen E, Sabbe K, Squier AH, Keely BJ, Leng M and Vyverman W. 2005a. Late Quaternary climate-driven environmental change in the Larsemann Hills, east Antarctica, multi-proxy evidence from a lake-sediment core. *Quaternary Research* 64: 83-99.
- Hodgson DA, Vyverman W, Verleyen E, Leavitt PR, Sabbe K, Squier AH and Keely BJ. 2005b. Late Pleistocene record of elevated UV radiation in an Antarctic lake. *Earth and Planetary Science Letters* 236: 765-772.
- Hodgson DA, Verleyen E, Squier AH, Sabbe K, Keely BJ and Vyverman W. 2006. Interglacial environments of coastal east Antarctica: comparison of a Holocene (MIS 1) and an Eemian (MIS 5e) sediment record. *Quaternary Science Reviews* 25: 179-197.
- Sabbe K, Verleyen E, Hodgson DA, Vanhoutte K and Vyverman W. 2003. Benthic diatom flora of freshwater and saline lakes in the Larsemann Hills and Rauer Islands (E-Antarctica). *Antarctic Science* 15: 227-248.
- Sabbe K, Hodgson DA, Verleyen E, Taton A, Wilmotte A, Vanhoutte K and Vyverman W. 2004. Salinity, depth and the structure and composition of microbial mats in continental Antarctic lakes. *Freshwater biology* 49: 296-319.
- Taton A, Grubisic S, Brambilla E, De Wit R and Wilmotte A. 2003. Cyanobacterial diversity in natural and artificial microbial mats of Lake Fryxell (McMurdo Dry Valleys, Antarctica): a morphological and molecular approach. *Applied and Environmental Microbiology* 69: 5157-5169.

- Taton A, Grubisic S, Balthasart P, Hodgson DA, Laybourn-Parry J and Wilmotte A. 2006a. Biogeographical Distribution and Ecological Ranges of Benthic Cyanobacteria in East Antarctic Lakes. *FEMS Microbiology Ecology* 57: 272-289.
- Taton A, Grubisic S, Ertz D, Hodgson DA, Piccardi R, Biondi N, Tredici M, Mainini M, Losi D, Marinelli F and Wilmotte A. 2006b. Polyphasic study of Antarctic cyanobacterial strains. *Journal of Phycology* 42: 1257-1270.
- Verleyen E, Hodgson DA, Vyverman W, Roberts D, McMinn A, Vanhoutte K. and Sabbe K. 2003. Modelling diatom responses to climate induced fluctuations in the moisture balance in continental Antarctic lakes. *Journal of Paleolimnology* 30: 195-215.
- Verleyen E, Hodgson DA., Sabbe K, Vanhoutte K and Vyverman W. 2004a. Coastal oceanographic conditions in the Prydz Bay region (East Antarctica) during the Holocene recorded in an isolation basin. *The Holocene* 14: 246-257.
- Verleyen E, Hodgson DA, Leavitt PR, Sabbe K and Vyverman W. 2004b. Quantifying habitat-specific diatom production: A critical assessment using morphological and biochemical markers in Antarctic lake sediments. *Limnology and Oceanography* 49: 1528-1539.
- Verleyen E, Hodgson DA, Sabbe K and Vyverman W. 2004c Late Quaternary deglaciation and climate history of the Larsemann Hills (East Antarctica). *Journal of Quaternary Science* 19: 361-375.
- Verleyen E, Hodgson DA, Milne GA, Sabbe K and Vyverman W. 2005a. Relative sea-level history from the Lambert Glacier region, East Antarctica, and its relation to deglaciation and Holocene glacier readvance. *Quaternary Research* 63: 45-52.
- Verleyen E, Hodgson DA, Sabbe K and Vyverman W. 2005b. Late Holocene Changes in Ultraviolet Radiation Penetration Recorded in an East Antarctic Lake. *Journal of Paleolimnology* 34: 191-202.