

HET BESCHRIJVEN VAN PALEOCEANOGRAPHISCHE VARIABILITEIT IN HET ZUIDEN VAN DE GOLF VAN CADIZ TIJDENS DE LAATSTE GLACIALE CYCLUS, EEN MULTI-PROXIE AANPAK

de Jonge Cindy

Renard Centre of Marine Geology, Vakgroep Geologie en Bodemkunde, Universiteit Gent, Krijgslaan 281 (S8), 9000 Gent
Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ), Landsdiep 4, PO Box 59, 1790 AB Den Burg, Texel, Nederland
E-mail: Cindy.de.Jonge@nioz.nl

Introductie: situering en methodes

Het verstaan en beschrijven van klimaatveranderingen is een grote wetenschappelijke uitdaging, niet in het minst omdat milieuveranderingen ook een grote impact hebben op de mens. De belangrijke rol van klimaatonderzoek, paleoklimaat in het bijzonder, wordt ook geïllustreerd door het feit dat het een apart hoofdstuk vormt van het Nobelprijswinnende 4^{de} verslag van het 'ipcc intergouvernementele panel over klimaatsveranderingen'. Modellen om het klimaat te voorspellen zijn complex, en worden gevalideerd met wat we weten van vroegere klimaatsveranderingen. Dit is niet enkel gebaseerd op recente instrumentale metingen, maar ook op geologische en klimatologische archieven zoals mariene en lacustriene sedimenten, ijskernen, druipstenen, koralen en boomringen.

Klimaatsreconstructies op glaciale/interglaciale tijdsschaal zijn vaak problematisch op het continent. Hier heeft erosie immers vrij spel, waardoor de meeste klimaatsarchieven onderbroken of onleesbaar geworden zijn. Mariene archieven bieden hier een excellent alternatief. In sommige gebieden laat de bodem van de oceaan een ongestoorde sedimentatie toe, waardoor veranderingen chronologisch behouden blijven. Bovendien zijn sites aan continentale randen niet alleen gevoelig aan continentale klimaatsveranderingen, maar ook aan oceanische. Gebieden met een hogere sedimentatie zijn ideaal voor het bestuderen van deze (geologisch gezien) korte tijdsschaal, aangezien de resolutie dan hoog genoeg is om snelle veranderingen te reconstrueren.

Gesteund door het Europese Wetenschapsfonds, werden verschillende bodemkernen genomen nabij het 'Pen Duick Escarpment', in het zuidelijke deel van de Golf van Cadiz, voor de kust van Marokko. Deze studie is gebaseerd op de eerste 12 meter van de langste kern die momenteel genomen is in dit gebied (30,3m), op een diepte van 642 meter.

De studie site wordt beïnvloed door twee belangrijke oceanische systemen. De invloed van Noord-Atlantische watermassa's op deze breedtegraad varieert naar de sterkte van het polaire front en dus over glaciale/interglaciale tijdsschalen. Ook de intensiteit van Mediterranean Outflow Water (MOW), het water dat via de Straat van Gibraltar uit de Middellandse Zee stroomt, kan worden geëvalueerd. Deze warme, hoog-saliene watermassa wordt geacht een van de belangrijkste drijfveren achter de thermohaline circulatie te zijn. De directe invloed als bodemstroom in het zuiden van de Golf van Cadiz staat echter momenteel nog ter discussie (Llave *et al.*, 2006; Van Rooij *et al.*, 2010).

Mariene sedimenten van het continentaal plat, bevatten zowel terrigene als oceanische componenten. De fossielen van het mariene milieu bevatten een myriade aan organische moleculen, afgeleid van mariene (algen, (cyano)bacteriën, archaea) en terrestrische organismen (hogere planten) die leefden ten tijde van afzetting. Deze zogenaamde biomarkers bevatten informatie die, indien ze goed gebruikt wordt, inzicht kan geven in voorbijgaande klimaatscondities en veranderingen in het paleo-milieu. In het aquatische milieu is de temperatuur van het water één van de belangrijkste indicatoren om de herkomst van watermassa's te bepalen. Indirect, geeft dit ook informatie over de hoeveelheid nutriënten en de primaire productiviteit. Daarom werd de verzadiging van specifieke archaea-bacteriële membraanlipiden (glycerol dialkyl glycerol tetraethers; GDGTs) en van Haptophyte lipiden (alkenonen) bekeken, om zo respectievelijk de TEX₈₆ (Schouten *et al.*, 2002) en de U^K₃₇ (reviewed in Volkman, 2000) te berekenen.

Naast het vergelijken en testen van laatstgenoemde biomarker proxies, werd ook de gelijkenis met δ¹⁸O-isotopen, afkomstig uit het kalkskelet van de foraminifeer *Globigerina bulloides*, geëvalueerd. De waarde van zuurstofisotopen is echter niet enkel gevoelig voor temperatuur, maar registreert ook lokale saliniteitsveranderingen.

Om op de informatie in het organisch materiaal, te kunnen afgaan, moet ook rekening gehouden worden met degradatie. Daarvoor werden niet enkel TOC en C/N metingen uitgevoerd, maar werd ook de BIT-waarde (branched isoprenoid tetraether index) berekend (Hopmans *et al.*, 2004). De BIT-waarde is een maat voor de input van terrigene biomassa, aangezien hij afgeleid wordt van de relatieve hoeveelheid vetten afkomstig van terrigene bodembacteriën.

Om klimaatsveranderingen op het continent te reconstrueren, werd de veranderende invloed van de verschillende transportmechanismes bestudeerd. Veranderingen in neerslag in de Midden-Atlas bergketen, die een invloed hebben op de hoeveelheid aangeleverde riviersedimenten, worden weerspiegeld in de hoeveelheid kleien. Droogtes benedenwinds, nabij de evenaar, worden dan weer aangetoond door de aanwezigheid van grover stof dat rijk is aan ijzer.

Door deze multi-proxie invalshoek wordt het mogelijk de situatie in oceanen direct te linken aan het continentale klimaat, waarbij we het probleem van correlatie, dat bij aparte archieven zou optreden, omzeilen. Dit maakt het mogelijk om ook bij snelle veranderingen, te reconstrueren welke leiden en welke met vertraging gebeuren.

Resultaten en discussie

Datering van deze kern gebeurde door de stabiele zuurstofisotoop curve te vergelijken met die van de GRIP ijskern en de Ca/Fe curven visueel te linken aan die van nabije, gedateerde kernen.

De analyse van het niet-organische sediment, is vooral gericht op het onderscheiden van fluviatiele en eolische afzettingen. De verhouding tussen Fe en Al, een proxie voor droogte in de Sahara (e.g. Rogerson *et al.*, 2006), blijkt duidelijk te reageren op glaciële/interglaciële klimaatsveranderingen. Ook op korte tijdschaal is een periodiciteit zichtbaar, maar datering laat momenteel niet toe deze te berekenen. Terwijl toenames in kalium in vorige studies gebruikt werd om de hoeveelheid sediment door rivieren aangebracht te evalueren (e.g. Yarincik, 2000), lijkt dit in ons geval niet terecht. Een toename in de totale hoeveelheid kleien zou immers resulteren in een kleinere gemiddelde korrelgrootte en dit is niet het geval.

Een eerste mogelijke verklaring is een kwalitatieve, eerder dan kwantitatieve verandering binnen de kleien. Aangezien kalium aanwezig is in Illiet, een mineraal typisch voor mechanisch verweerde kleien, kan zijn voorkomen in het sediment misschien gelinkt worden aan veranderingen in het brongebied of veranderingen in de genese van de kleifractie tijdens deze periodes. Aangezien de K/Fe-ratio hoge waarden vertoont in het begin van Marine Isotope Stage 1 (MIS1), MIS3 en in MIS5e, zou een mogelijke bron hier het smeltwater van de gletsjers kunnen zijn. Directe analyse van de kleifractie (XRD) is echter nodig om dit te bevestigen.

De relatieve hoeveelheid sediment aangebracht door rivieren, afgeleid uit een lagere gemiddelde korrelgrootte, is opvallend hoger tijdens periodes van maximale ijsbedekking. Dit kan verklaard worden door de sterkere erosie van rivieren tijdens periodes met een lagere zeespiegel.

De BIT-index, die eerder al succesvol gebruikt werd om de input van bodemmateriaal te reconstrueren, heeft hiervoor in onze site weinig nut. Aangezien de ratio bestaat uit mariene en terrigene moleculen, verliest die zijn informatie als de lipiden onderhevig zijn aan sterke degradatie. Hierdoor zullen mariene lipiden immers sneller aangetast worden, waardoor de verhouding zal verschuiven. Aangezien lage C/N waarden op een lage input van terrigeen materiaal wijzen, zal een hoge BIT-index tezamen met lage C/N waarden duiden op een sterke oxidatie van organisch materiaal.

De toestand van de watermassa boven onze site, afgeleid uit de evolutie van temperaturen, veranderde ook op glaciële/interglaciële tijdschaal. We gebruiken drie verschillende proxies om de oppervlaktetemperatuur te bepalen. Een eerste groep lipiden (alkenonen, $U_{37}^{K'}$), wordt geproduceerd door fytoplankton, die de evolutie van de temperatuur van de fotische zone registreren. De Archaeale lipiden (GDGTs, TEX_{86}) worden over een groter diepteverloop geproduceerd. De zuurstofisotopen zijn afkomstig van foraminiferen wiens biotoop varieert in diepte tussen 300 en 600m. Het vergelijken van deze proxies biedt dus een inzicht in de verschillende lagen van de waterkolom ter hoogte van onze site.

Al deze proxies rapporteren koudere temperaturen tijdens glacialen en warmere tijdens interglacialen. Naast een constant temperatuurverschil tussen de verschillende proxies, dat mogelijk te wijten is aan een verschil in bloeiseizoen, zien we echter ook dat het verschil in temperatuur tussen de alkenonen en de GDGTs groter wordt tijdens koude periodes, met koudere op alkenonen- en warmere op GDGTs-gebaseerde reconstructies. Dit zou eenvoudig verklaard kunnen worden door de uitbreiding van het opwellinggebied dat momenteel beperkt aanwezig is voor de kust van Cadix.

Dit zou de oppervlakte organismes in diepere en koudere waterlagen dwingen, terwijl de diepere Archaea naar warmere wateren getransporteerd worden en zo een warmer signaal geven. Eerdere micropaleontologische studies rapporteren echter geen opwellinggerelateerde organismen.

Een tweede verklaring is dat het verschil verklaard wordt door degradatie van de vetten. Meer verzadigde vetten zullen immers sneller aangetast worden, waardoor deze sedimenten een andere temperatuurprofiel zullen krijgen. De richting van verandering in alkenonen, waarbij degradatie een 'warm' effect heeft, zou verklaard worden door minder degraderende omstandigheden tijdens glacialen. Algemeen aanvaard wordt dat glacialen en Heinrich Events (HEs) inderdaad gepaard gingen met het vertragen van het thermohalinen systeem, waardoor bodemstromen langzamer en dus minder reducerend zouden worden. Dit komt echter niet overeen met de situatie die geschetst wordt door de BIT-index en vooral de C/N ratio. Deze tonen (vooral in MIS 6 en MIS 8) zeer duidelijke indicaties dat bodemwaters tijdens de koude periodes meer zuurstof bevatten en meer materiaal aangetast werd dan tijdens warme periodes.

De offset tussen onze twee temperatuurproxies kan dan enkel nog verklaard worden door advectie vanuit verschillende brongebieden. De waterkolom ter hoogte van onze site is immers opgebouwd uit verschillende modi stabiele waterlagen die elk een eigen oorsprongsgebied hebben. De twee bovenste waterlagen hebben een subtropische oorsprong (op 40° and 30° N), terwijl de diepste modus in subpolaire breedtegraden zonk (ongeveer 50° N).

Laterale advectie van moleculen wordt verondersteld een grotere impact te hebben op alkenonen dan op GDGTs, maar eerdere resultaten zijn vaak niet eenduidig. Wat wel vaststaat, is dat een sterkere stroming moleculen sneller zal transporteren. Aangezien moleculen in de waterkolom een beperkte levensduur hebben, is de snelheid waarmee ze getransporteerd worden bepalend voor de afstand die ze kunnen afleggen. Deze verklaring voor de grotere offset komt inderdaad overeen met de actievere bodemstromingen die we eerder afgeleid hebben.

Om deze denkpiste te testen, bekeken we de relatie van de biomarkers met de stabiele zuurstofisotopen. Deze registreren immers de omgevingstemperatuur van foraminiferen. Deze laatste zijn veel minder gevoelig aan lateraal transport, omdat ze zwaar genoeg zijn dat ze nagenoeg direct zinken. Een correlatie met de stabiele zuurstofisotopen kan dus mogelijks een nieuw licht werpen. Correlaties van beide biomarker proxies met $\delta^{18}\text{O}$ waarden zijn zeer goed, naast een paar afwijkingen die verklaard kunnen worden door veranderingen in de globale $\delta^{18}\text{O}$ waarden. Zo herkennen we de toename in landijs in te hoge $\delta^{18}\text{O}$ waarden (ten opzichte van de correlatie) tijdens MIS5b, MIS6 en MIS8. Waar $\delta^{18}\text{O}$ waarden lager dan verwacht zijn tijdens bepaalde 'Heinrich Events', kan dit ook verklaard worden door een plotse afname van het globale volume ijs. De TEX_{86} en $\text{U}^{K_{37}}$ lijken dus te reageren op dezelfde temperatuurschommelingen dan de lokaal gevormde foraminiferen. Dit doet ons besluiten dat, mocht lateraal transport plaatsgevonden hebben, het een snel proces was. Mochten vetzuren van een verschillende ouderdom per diepte gevonden worden, zou er immers een verschil in temperatuurreconstructies zijn.

Een opmerking in deze context is ook dat geen invloed van veranderingen in saliniteit merkbaar zijn in de $\delta^{18}\text{O}$ record. Normaal zouden $\delta^{18}\text{O}$ waarden stijgen met stijgende saliniteit. Dit duidt aan dat de aanwezigheid van het MOW in onze site waarschijnlijk niet van die orde was dat onze record erdoor beïnvloed wordt. Evenzeer worden geen tetraonverzadigde alkenonen teruggevonden, die nochtans kenmerkend zijn voor het MOW. Dit is in tegenstelling met de hypothese dat MOW onze site zou bereiken onder de vorm van eddies (Foubert, 2008).

Conclusies

Onze observaties zijn in lijn met vele 'klassieke' studies die de Noord-Afrikaanse passaatwinden beschrijven. Het continentale klimaat in NW Afrika wordt gestuurd door veranderingen in atmosferische patronen die ontstaan op hogere breedtegraad. Hierdoor kunnen we niet alleen glaciale/interglaciale veranderingen zien, maar ook meer lokale fenomenen, zoals Heinrich Events. Dit zien we vooral in de goed gefundeerde en uitgebreid geteste Fe/Al proxie, terwijl variaties in K/Fe iets minder voor de hand liggend zijn. Onze multi-proxie aanpak laat echter toe om deze kennis van het terriëen systeem te linken aan oceanische systemen.

We kunnen bijvoorbeeld besluiten dat bodemstromingen, vooral tijdens MIS6 en MIS8 veel reducerender en dus waarschijnlijk sterker waren dan in de huidige situatie en bevestigen hierbij de hypothese van Van Rooij *et al.* (2010). De aanwezigheid van salien Mediterraan water wordt echter niet bevestigd.

Een ander aspect van deze studie belicht het belang van het simultaan bekijken van verschillende temperatuurproxies. De oceanografische condities in de Golf van Cadix zorgen er immers niet alleen voor dat de TEX_{86} temperaturen gevoelig hoger liggen, maar bovendien ook een -ietwat- ander verloop kennen dan de $\text{U}^{K_{37}}$. Interpretatie van deze proxies moet dus met zorg gebeuren en idealiter

in het kader van een paleoceanografische reconstructie. Uit deze studie blijkt dat snel lateraal transport waarschijnlijk aan de oorsprong ligt van dit verschil.

Om deze studie te vervolledigen, zou een betere datering, gevolgd door een analyse van de golflengtes uitgevoerd kunnen worden. Op deze manier kunnen de cycliciteiten van onze geochemische data gelinkt worden aan reeds gepubliceerde data. Een analyse van de proxies op hogere resolutie zou bovendien de deuren openzetten om de korte, snelle klimaatsveranderingen beter in kaart te brengen.

Dank

Ik zou hierbij graag nog mijn promotor Prof. Dr. David Van Rooij willen bedanken om mij het hele jaar te steunen en mij de kans te geven buitenlandse onderzoeksinstellingen te bezoeken en aan te schrijven voor mijn analyses. Mijn begeleidster Lies De Mol stond altijd voor mij klaar in het sedimentlabo in Gent, dankjewel daarvoor. Mijn co-promotor Dr. Alina Stadnitskaia wil ik graag bedanken voor het vertrouwen dat ik mocht genieten als haar gast tijdens mijn drie maand durende verblijf in het Royal NIOZ, het Koninklijk Nederlands instituut voor Onderzoek van de Zee. Prof. Dr. Jaap S. Sinninghe Damsté, hoofd van het departement organische biogeochemie wil ik graag bedanken voor zijn vanzelfsprekende gastvrijheid.

Nota bene

De data betreffende de stabiele zuurstofisotopen en de C/N waarden heb ik te laat verkregen om opgenomen te worden in mijn manuscript, maar zij maakten wel deel uit van mijn verdediging.

Referenties

- Foubert A., D. Depreiter, T. Beck, L. Maignien, B. Pannemans, N. Frank, D. Blamart and J.-P. Henriët. 2008. Carbonate mounds in a mud volcano province off north-west Morocco: key to processes and controls. *Marine Geology* 248(1-2):74-96.
- Hopmans E.C., S. Schouten, R.D. Pancost, M.T.J. van der Meer and J.S.S. Damsté. 2000. Analysis of intact tetraether lipids in archaeal cell material and sediments by high performance liquid chromatography/atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 14(7):585-589.
- Llave E., J. Schonfeld, F.J. Hernandez-Molina, T. Mulder, L. Somoza, V.D. del Rio and I. Sanchez-Almazo. 2006. High-resolution stratigraphy of the Mediterranean outflow contourite system in the Gulf of Cadiz during the late Pleistocene: the impact of Heinrich events. *Marine Geology* 227(3-4):241-262.
- Rogerson M., P.P.E. Weaver, E.J. Rohling, L.J. Lourens, J.W. Murray and A. Hayes. 2006. Colour logging as a tool in high-resolution palaeoceanography. *The geological society - special publications* 267:99-112.
- Schouten S., E.C. Hopmans, E., Schefuss and J.S.S. Damsté. 2002. Distributional variations in marine crenarchaeotal membrane lipids: a new tool for reconstructing ancient sea water temperatures?. *Earth and Planetary Science Letters* 204(1-2):265-274.
- Van Rooij D., D. Blamart, L. De Mol, F. Mienis, H. Pirlet, L.M. Wehrmann, R. Barbieri, L. Maignien, S.P. Templer, H. de Haas, D. Hebbeln, N. Frank, S. Larmagnat, A. Stadnitskaia, N. Stivaletta, T. van Weering, Y. Zhang, N. Hamoumi, V. Cnudde, P. Duyck, J.-P. Henriët and t.M.M.s. party. Cold-water coral mounds on the Pen Duick Escarpment, Gulf of Cadiz: the MiCROSYSTEMS approach. *Marine Geology* (accepted).
- Volkman J.K. 2000. 'Ecological and environmental factors affecting alkenone distributions in seawater and sediments. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 1(2000GC000061).