Belgeo

Revue belge de géographie

3 | 2006

Geoarcheology, historical geography and paleoecology

De rol van terrestrisch Sub-Antarctica binnen het klimaatsonderzoek op wereldvlak

The role of sub-Antarctic islands in global climate studies

Nathalie Van der Putten

Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/belgeo/12112>

DOI : 10.4000/belgeo.12112

ISSN : 2294-9135

Éditeur :

National Committee of Geography of Belgium, Société Royale Belge de Géographie

Édition imprimée

Date de publication : 30 septembre 2006

Pagination : 373-388

ISSN : 1377-2368

Référence électronique

Nathalie Van der Putten, « De rol van terrestrisch Sub-Antarctica binnen het klimaatsonderzoek op wereldvlak », *Belgeo* [Online], 3 | 2006, Online op 30 octobre 2013, geraadpleegd op 19 avril 2019. URL : <http://journals.openedition.org/belgeo/12112> ; DOI : 10.4000/belgeo.12112

Ce document a été généré automatiquement le 19 avril 2019.

Belgeo est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution 4.0 International.

De rol van terrestrisch Sub-Antarctica binnen het klimaatsonderzoek op wereldvlak

The role of sub-Antarctic islands in global climate studies

Nathalie Van der Putten

Inleiding

- 1 Het klimaat van de aarde is in het “recente” verleden, het Quartair, niet stabiel geweest maar was een opeenvolging van omvangrijke koudere en warmere perioden (glacialen en interglacialen). Kleinere (kortere en plotse) schommelingen (events) hebben zich voorgedaan tijdens glaciële periodes waardoor men een verdere opdeling heeft gemaakt in stadialen (relatief koud) en interstadialen (relatief warm). Het is dan ook in het verleden dat de bron ligt om klimaatveranderingen te bestuderen en vooral om de oorzaken en de gevolgen van die klimaatveranderingen te achterhalen. Het begrijpen van de wisselwerking tussen de atmosfeer, de oceanen en de continenten bij veranderingen in het klimaat zijn cruciaal om de gevolgen in de verschillende delen van de wereld te kunnen bepalen. Wegens hun extreme omstandigheden hebben de poolgebieden een belangrijke rol gespeeld in de sturing van de klimaatsevolutie. Deze tekst heeft tot doel de bijdrage van ons eigen onderzoek op de sub-Antarctische eilanden in het geheel van het paleoklimatologisch onderzoek voor te stellen.

Methoden

- 2 De evolutie van het klimaat kan voornamelijk uit drie bronnen gereconstrueerd worden. Twee daarvan zijn terug te vinden op het land namelijk sedimenten en landijs. De derde bron is (diep)zeesedimenten. Voor elk van deze bronnen zijn specifieke technieken

ontwikkeld om variaties in neerslag maar vooral in temperatuur, door de tijd heen te registreren.

- 3 Zo maakt men in het geval van ijskernen van zowel de Groenlandse als de Antarctische ijskap gebruik van zuurstofisotopenonderzoek¹ van het ijs. Veranderingen in de verhouding tussen het zwaardere ¹⁸O en het lichtere ¹⁶O in polair ijs hangen samen met de temperatuur boven de ijskap op het moment dat het ijs is gevormd. Door de wijzigingen in die verhouding uit te zetten t.o.v. een diepte- en/of tijdsas kan men de schommelingen van de temperatuur in het verleden reconstrueren.
- 4 Op het land wordt de reactie van organismen op klimaatwijzigingen als techniek gebruikt. De bekendste en meest gebruikte techniek is palynologie (pollenanalyse, onderzoek van fossiele stuifmeelkorrels in veen- of meersedimenten). Direkt aanleunend hierbij kan macrorestenonderzoek van planten- en insektenresten, bewaard in anaerobe omstandigheden (veen- en meersedimenten), eveneens tot een klimaatcurve leiden. Verder zal hier een specifiek voorbeeld van een dergelijk onderzoek worden toegelicht. Ook lagere organismen zoals diatomeën en thecamoeben zijn zeer bruikbare proxies in het kader van klimaatsonderzoek.
- 5 In het geval van diepzeekernen kan men stellen dat beide bovengenoemde technieken worden toegepast. De meest gebruikte proxy in dit geval zijn fossiel bewaarde foraminiferen in zeesedimenten. Men kan via de ecologie van deze micro-organismen nagaan of het oceaanwater relatief kouder of warmer is geweest op het moment dat ze leefden.
- 6 Aangezien zuurstof aanwezig is in het kalkskelet dat fossiel wordt teruggevonden, kan men eveneens ¹⁸O/¹⁶O toepassen. Tijdens een glaciële periode wordt water dat verdampt boven de oceanen opgeslagen in de aangroeiende ijskappen met als gevolg dat het aandeel aan ¹⁸O in het oceaanwater gaat stijgen en bijgevolg ook in de kalkskeletten van de organismen. Zuurstofisotopenonderzoek van foraminiferen geeft dus een evolutie in de tijd weer van het volume ijs dat opgeslagen is op de continenten en vormt dus een aanduiding van koudere en warmere perioden (Magny, 1995). De isotoopschommelingen in deze sedimentsequenties worden aangeduid als *marine-isotope-stages* (MIS) waarbij de oneven getallen duiden op warme perioden (Holoceen is MIS1, het Eemiaan is MIS 5e) en de even getallen op koudere perioden (Westerhoff *et al.*, 2003).
- 7 Zee- en ijskernen hebben ten opzichte van landsedimenten het voordeel dat hun registratie continu is zowel tijdens glacialen als tijdens interglacialen terwijl op het land erosie een belangrijke factor is in het verstoren van stratigrafische sequenties.

Datering

- 8 Een essentieel gegeven voor alle bronnen en technieken is het (absoluut en/of relatief) dateren van de sedimenten of het ijs. Dit is uiteraard belangrijk op zich, maar ook om resultaten te kunnen vergelijken binnen éénzelfde techniek of nog, tussen de technieken onderling.
- 9 In ijskernen wordt de tijdsas opgesteld aan de hand van het tellen van de ijslaagjes die jaarlijks worden afgezet (verschil in verhouding van ¹⁸O/¹⁶O tussen zomer en winter) tot een bepaalde diepte. Op grotere diepten wordt “geëxtrapoleerd”. In de GRIP-kern (European Greenland Ice Core Project), genomen op het hoogste punt van de Groenlandse ijskap en met een lengte van 3 028 m (Dansgaard *et al.*, 1993), werd de gelaagdheid geteld

tot 14,5 kyr BP (thousands of years Before Present), wat overeenkomt met een diepte van ongeveer 1750 m. Dieper werd de tijdsas berekend aan de hand van modellering van de ijsbeweging. Het spreekt vanzelf dat bij deze modellen de ingevoerde parameters (compactie van de laagjes, onverstoorte stratigrafie...) belangrijk zijn en dat de bekomen tijdsas niet zo “absoluut” is als bij het tellen van laagjes.

- 10 In het geval van landsedimenten wordt als absolute dateringsmethode koolstofdatering gebruikt op organisch materiaal. De koolstof ouderdom wordt uitgedrukt in ^{14}C jaren Before Present (BP = Before 1950). De concentratie aan radioactieve koolstof in de atmosfeer was echter niet steeds constant waardoor de ^{14}C -ouderdom niet de ware ouderdom is. Wanneer men dus de effectieve ouderdom (uitgedrukt in cal BP) wil weten moet er gekalibreerd worden via een kalibratiecurve, opgesteld aan de hand van dendrochronologisch onderzoek.
- 11 Het dateren van diepzeesedimenten gebeurt absoluut door ^{14}C -datering (Sánchez Goni *et al.*, 2000, Bond *et al.*, 1993) tot 40 000 jaar terug en voor oudere sedimenten wordt de uranium-thorium methode gebruikt (tot 350 000 jaar terug). Aan de hand van $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ curven van foraminiferen kan relatief gedateerd worden. Hiervoor verwijzen we onder andere naar een publicatie van Martinson *et al.* (1987) waarin aan de hand van *orbital tuning* (koppeling met de orbitale klimaatsinformatie) een continue chronostratigrafie voor de diepzee is opgesteld voor de laatste 300 000 jaar.

Pre-holocene klimaatswijzigingen

Noordelijk Halfrond

- 12 Uit onderzoek van land-, zee- en ijskernen werd duidelijk dat het klimaat tijdens het Quartair allesbehalve stabiel is geweest en dat verschillende glacialen en interglacialen te herkennen zijn, waarbinnen verder stadialen en interstadialen voorkomen.
- 13 De Groenlandse GRIP-ijskern (Dansgaard *et al.*, 1993) waarvan sprake hierboven, geeft een gedetailleerde isotopenstratigrafie die teruggaat tot 250 000 jaar geleden waarin zeer abrupte klimaatswijzigingen waargenomen worden, zowel in de glaciële als interglaciële periodes (behalve het Holocene). Deze snelle koud-warm oscillaties worden *Dansgaard/Oeschger events*² (D/O events) genoemd. In het laatste glaciaal (14-115 kyr BP) zijn 24 events vastgesteld.
- 14 Bond *et al.* (1993) hebben voor de laatste 90.000 jaar de $\delta^{18}\text{O}$ van de GRIP-ijskern gecorreleerd met de wijzigingen in *Sea Surface Temperature* (SST), bekomen uit twee Noord-Atlantische zeekernen (aan de hand van de planktonische foraminifeersoort *Neogloboquadrina pachyderma*). Zij kwamen tot de conclusie dat zowel in de ijskern als in de zeekernen een bijzondere cyclus aanwezig was die correlatie toeliet ondanks de relatief onzekere chronologieën van de drie kernen. Deze “Bond cycli” bestaan uit het bundelen van verscheidene steeds kouder wordende D/O events in langere koude cycli die elk beëindigd worden door een plotse overgang van een zeer koude naar een warme temperatuur. Bovendien culmineert elke Bond cyclus in een enorme uitbreiding van ijsbergen in de Noord Atlantische oceaan (Heinrich event³ net voor de plotse opwarming.
- 15 Men gaat ervan uit dat op de breedten waar de zeekernen zijn genomen de veranderingen in de SST in fase moet zijn met de veranderingen in de lucht temperatuur boven Groenland, zeker op de momenten waar de scherpe temperatuurstijgingen op het einde

van de D/O cycli voorkomen. De correlatie gebeurt door de isotopencurve van de ijskernen lineair uit te rekken zodanig dat de punten waar de scherpe temperatuurstijgingen voorkomen overeenstemmen. Dit onderzoek is een bewijs dat de D/O cycli terug te vinden zijn in zeesedimenten van de Noord-Atlantische oceaan en dat, althans voor de laatste 80 000 jaar, de atmosfeer en de oceaanoppervlakte een gekoppeld systeem zijn geweest in de Noord Atlantische regio.

- 16 Eén van de belangrijkste ontdekkingen in deze studie is de relatie tussen de ijskern temperatuur cycli en het voorkomen van de Heinrich events in de zeesedimenten van de Noord-Atlantische oceaan. Heinrich events doen zich blijkbaar voor op het moment van extreem koude stadialen gevolgd door een abrupte overgang naar een warmer klimaat.

Zuidelijk Halfrond

- 17 Abrupte klimaatswijzigingen komen niet enkel voor in de Atlantische regio. De meest overtuigende data zijn terug te vinden in de ijsarchieven. Chappellaz *et al.* (1993) stelden vast dat de hoeveelheid atmosferisch methaan (CH_4) belangrijke veranderingen onderging tijdens bijna alle D/O events van de laatste 45 000 jaar. Dit is een direct bewijs van veranderingen in de hydrologische cyclus tijdens de D/O events aangezien de bron van de veranderingen in atmosferisch methaan in de tropen en op lage breedten ligt.
- 18 Een veel gestelde vraag is of klimaatveranderingen in het noordelijk halfrond al of niet synchroon verlopen met die in het zuidelijk halfrond. In dit verband is de vergelijking tussen de ijskernen van Groenland en Antarctica een bruikbare strategie.
- 19 Temperatuursvariaties afgeleid van de $\delta^{18}\text{O}$ curve in Groenland zijn gekarakteriseerd door een patroon van plotse snelle opwarming en geleidelijke langzame afkoeling. Antarctische temperatuursvariaties vertonen een verschillend patroon met minder, niet zo duidelijke en meer geleidelijke opwarmings- en afkoelingsevents. De grote uitdaging is dus om het mechanisme te vinden dat schuilt achter het verschillende gedrag van de hoge breedten van de noordelijke en zuidelijke hemisfeer.
- 20 Blunier *et al.* (1998) hebben aan de hand van variaties in CH_4 in luchtballen van twee Antarctische kernen (Byrd en Vostok) en de GRIP ijskern een synchronisatie opgesteld waarbij de relatieve fasering van het voorkomen van events in beide hemisferen kan worden vergeleken. De drie kernen worden gelinkt aan de GRIP tijdschaal (welke niet als absoluut kan worden beschouwd) over een periode van 50 kyr BP tot het begin van het Holoceen. Zij kwamen tot de conclusie dat tussen 47-23 kyr BP, antarctische klimaatveranderingen zich gemiddeld 1-2,5 kyr vroeger voordoen dan de Groenlandse. Antarctische opwarming is niet in fase met de corresponderende D/O events. Terwijl de Antarctische temperatuur reeds stijgt, blijft de temperatuur van Groenland dalen. De antarctische temperatuurstijging wordt onderbroken op het ogenblik dat de temperatuur boven Groenland naar een interstadiaal springt. Vanaf dan koelen beide hemisferen af tot glaciale situaties waarbij deze eerder bereikt worden in Antarctica. Het ziet er dus naar uit dat het zuiden het noorden “leidt”. Later (Blunier en Brook, 2001) werd met dezelfde methode (CH_4) de antarctische Byrd kern gecorreleerd met de Groenlandse GISP2-kern waarbij eenzelfde patroon werd vastgesteld voor de laatste 90 000 jaar.
- 21 Er is echter één belangrijke uitzondering, namelijk de Taylor Dome ijskern (oost-antarctische kust, westelijke kant van de Ross Zee). Steig *et al.* (1998) kwamen bij vergelijking met de GISP2-kern tot de conclusie dat tijdens de laatste glaciaal-

interglaciaal overgang de klimaatveranderingen synchroon of bijna synchroon verlopen in beide hemisferen.

Welke mechanismen drijven de klimaatveranderingen en wat zijn de wisselwerkingen tussen atmosfeer, oceaan en continent?

- 22 Zoals hiervoor reeds vermeld, zijn in Groenlandse ijskernen 24 milde periodes (D/O events) aangetroffen tijdens het laatste glaciaal. De temperatuur boven Groenland zou gecontroleerd worden door de warmte die vrijkomt aan de oppervlakte van de Noord-Atlantische oceaan (Blunier *et al.*, 1998; Bond *et al.*, 1993). Dit warme zeewater wordt naar de Noord-Atlantisch oceaan getransporteerd door thermohaliene circulatie (THC) welke wordt geïnduceerd door de vorming van *North Atlantic Deep Water* of Noord Atlantisch Diep Water (NADW). Door de vorming van zeer koud en dus zwaarder water (NADW) dat naar de diepte zakt op de hogere breedten van de Atlantische oceaan, wordt een circulatie op gang gebracht (THC) waarbij warm oppervlaktewater van de lagere breedten naar het noorden stroomt. Veranderingen in de Atlantische THC worden verondersteld sterk gelinkt te zijn met *ice-rafting* of Heinrich events en geassocieerde smeltwatervorming; het vrijkomen van smeltwater zorgt ervoor dat de NADW vorming wordt verminderd met als gevolg een verkoeling in de Noord-Atlantische regio. De verkoeling op haar beurt vertraagt het smelten wat de vorming van NADW bevordert en voor plotse opwarming zorgt. Door de opwarming komt echter terug meer smeltwater in de oceaan wat dan zorgt voor een geleidelijke stopzetting van de NADW-vorming (Blunier *et al.*, 1998). De vraag is nu wat de oorzaak is van de *ice-rafting* events en de gekoppelde smeltwatervorming. Blunier *et al.* (1998) zien een Antarctische opwarming als mogelijke oorzaak van een *ice rafting* event (mogelijk door een stijging van de zeespiegel). D/O events en corresponderende *ice-rafting* events komen echter meer voor dan Antarctische opwarmingen dus *ice rafting* events kunnen slechts gedeeltelijk worden geïnduceerd door Antarctische opwarming. Voor de D/O events die niet gekoppeld zijn aan een opwarming in Antarctica, weerhouden Blunier *et al.* (1998) interne processen binnen de ijskappen, die resulteren in het afbreken van ijsbergen in de Noord-Atlantische oceaan, als een mogelijk mechanisme voor de aanzet van *ice-rafting* events.
- 23 Het mechanisme van NADW beïnvloedt de diep-water-circulatie op wereldschaal waardoor kan worden gesteld dat klimaatverandering gekoppeld aan de Noord-Atlantische THC gevolgen moet hebben op wereldvlak. Oceaanmodellen suggereren dat een sterkere NA-THC tot afkoeling leidt van minstens bepaalde delen van de zuidelijke hemisfeer en tot opwarming leidt van de hogere breedten van de noordelijke hemisfeer. Omgekeerd zal een stopzetten van de THC, wat een snelle afkoeling in de noordelijke hemisfeer tot gevolg heeft, een opwarming in de zuidelijke hemisfeer veroorzaken omdat warmte niet langer noordwaarts wordt getransporteerd. Dit fenomeen wordt de *bipolar seesaw* genoemd (Blunier and Brook, 2001).
- 24 De vergelijking tussen de antarctische Byrd en Vostok kernen en de Groenlandse GRIP kern brengen een asynchroon patroon naar voor tussen beide hemisferen waarbij de veranderingen zich vroeger voordoen in het hoge zuiden dan in het hoge noorden. Echter, bij een vergelijking tussen de antarctische ijskern Taylor Dome (oost-antarctische kustsite, westelijke kant van de Ross Zee) en de Groenlandse GISP2 kern (Steig *et al.*, 1998) kwam men tot de conclusie dat gedurende de laatste glaciale/interglaciale overgang, de klimaatveranderingen synchroon of bijna synchroon verlopen in beide hemisferen. De

verschillen in de isotopen-temperatuurgeschiedenis van Taylor Dome en de andere antarctische kernen zijn te groot om toegeschreven te worden aan dateringsfouten (Steig *et al.*, 1998). De resultaten wijzen er eerder op dat de gevolgen van de veranderingen in NADW op het circum-polaire klimaat van Antarctica, niet overal gelijk zijn.

- 25 Of meer: misschien zijn de veranderingen in de THC niet de directe en enige oorzaak voor klimaatsconnectie tijdens de laatste deglaciatie. Bard *et al.* (1997) kwamen tot deze conclusie aan de hand van de alkenone methode⁴ voor het bepalen van de SST op verscheidene zeekernen met hoge resolutie van de tropische Indische oceaan tussen 20°N en 20°Z. Ze stelden vast dat de SST stijging ongeveer 15 000 jaar geleden op 20°Z in fase is met de zee- en luchttemperatuursveranderingen in de noordelijke hemisfeer maar verscheidene millennia later begint dan de Antarctische opwarming. Aan de hand van deze vaststellingen kan men concluderen dat veranderingen in THC eventueel niet de enige oorzaak zijn geweest van “klimaatsteleconnectie” tussen beide hemisferen tijdens de laatste deglaciatie. Verwijzend naar Broecker (1996) sluiten Bard *et al.* niet uit dat THC een indirect effect heeft op de zuidelijke hemisfeer, door veranderingen in de dynamiek van de atmosfeer op lagere breedten te induceren. Volgens Broecker zou dit mechanisme kunnen verklaren waarom de grens van klimaatsasynchronie tussen beide hemisferen niet op de evenaar ligt maar op de Antarctische convergentie zone. Denton *et al.* (1999) komen tot een synchroon verloop van de laatste glaciële/ interglaciële overgang tussen beide hemisferen zowel voor het moment en de duur van de LGM (Last Glacial Maximum). Hun data zijn verkregen uit terrestrische bronnen (glaciële geologie en palynologie) uit de gemiddelde breedten van de zuidelijke hemisfeer (Andes, 40°35'-42°25'Z). Bovendien zoeken zij de klimaatslink tussen beide hemisferen eerder in de atmosfeer dan in de oceaan.
- 26 Hierbij kunnen we de volgende bedenking maken. Het lijkt erop dat de hoogste breedten en de lagere breedten van het zuidelijk halfrond anders reageren op de THC. Paleoklimatologisch onderzoek in de sub-Antarctische regio kan hier een uitkomst bieden; onderzoek van diepzeekernen of onderzoek op sub-Antarctische eilanden – waarbij de vergelijking tussen eilanden welke een verschillende ligging (ten noorden of ten zuiden) ten opzichte van de huidige convergentiezone hebben – zou bijzonder interessant kunnen zijn.

Klimaatwijzigingen in het Holoceen

- 27 De aandacht van paleoklimatologen was de laatste decennia vooral gericht op de extreme wijzigingen die zich hebben voorgedaan tijdens het laatste glaciaal. In vergelijking daarmee lijkt het Holoceen ($\pm 11\,500 - 0$ jaar geleden), dat door een relatief warm maar vooral stabiel klimaat wordt gekarakteriseerd, op basis van de isotopenstudie van de GRIP kern van Dansgaard *et al.* (1993), eerder een uitzondering te zijn, zelfs in vergelijking met het vorige interglaciaal, het Eemiaan ($\pm 130\,000 - 116\,000$ jaar geleden (Kukla *et al.*, 2002)). Over het al of niet stabiel zijn van het Eemiaan is men het echter nog niet eens. In verscheidene studies op basis van andere proxies (pollen, land/zee correlatie op basis van pollen, dinoflagellaten) komt men tot de conclusie dat het Eemiaan toch relatief stabiel zou zijn geweest (Cheddadi *et al.*, 1998; Sánchez Goni *et al.*, 2000) in tegenstelling tot de conclusies van Dansgaard *et al.* In een recente studie (NGRIP members, 2004) wordt gesteld dat het diepste deel van de bovengenoemde GRIP kern verstoord is door het plooien van ijs als gevolg van contact van het onderste gedeelte van de ijskap met het

rotsgesteente. Bijgevolg zou de GRIP kern een vertekend beeld geven van het Eemiaan. Men is er tevens in geslaagd om een ongestoorde kern te nemen in noord Groenland die teruggaat tot 123 000 jaar, dus tot in het Eemiaan. Hier komt men aan de hand van isotopen onderzoek op ijs tot de conclusie dat het Eem relatief stabiel en bovendien 5°C warmer zou zijn geweest dan het huidige interglaciaal.

- 28 De laatste jaren is er meer aandacht voor het Holoceen dat, hoewel de klimaatwijzigingen niet de amplitude hebben van die in het laatste glaciaal, toch meer variatie vertoont dan tot hiertoe algemeen werd aanvaard (Mayewski *et al.*, 2004). Men kan dan ook dezelfde vragen stellen als deze van toepassing op het laatste glaciaal namelijk wat zijn de oorzaken van de klimaatwijzigingen; doen ze zich al of niet synchroon voor in de noordelijke en de zuidelijke hemisfeer en wat is het mechanisme van de koppeling tussen beide hemisferen?
- 29 Voor de discussie over het Holoceen gaan we uit van ons eigen regionaal paleoecologisch onderzoek op South Georgia, sub-Antarctica (Van der Putten *et al.*, 2004). South Georgia is een langgerekt eiland (ca. 170 km lang en 2-34 km breed) gelegen in de zuid Atlantische oceaan (54°30' – 55°00'Z, 35°30' – 38°30'W), ongeveer 1300 km ten oosten van de Falkland eilanden (fig. 1a). De Allardyce bergketen culmineert in Mount Paget met een hoogte van 2934 m. Het huidige klimaat is koud-oceanisch met weinig seizoenale variatie. De gemiddelde jaartemperatuur bedraagt +2.0°C, augustus is de koudste maand met een gemiddelde temperatuur van -1.2°C en februari is de warmste maand (+5.6°C gemiddeld). De noordelijke kust is gekenmerkt door diep ingesneden fjorden. Een permanente ijskap en gletsjers, die reiken tot op zeeniveau, bedekken 58% van de oppervlakte van het eiland. Ijsvrije zones zijn bedekt met een toendra-achtige vegetatie. Door het sterk oceanisch klimaat is op de lagere gedeelten van het eiland een aanzienlijke veenbedekking ontwikkeld.

Figuur 1. a. Lokalisatie van de sub-Antarctische eilanden; b. South Georgia met lokalisatie van het Tønsberg schiereiland (= Tønsberg Peninsula); c. Detailkaart van het Tønsberg schiereiland met lokalisatie van de site van de Tønsberg sequence.

- 30 In 1992-93 hebben C. Verbruggen en L. Beyens (persoonlijke mededeling) een veldcampagne ondernomen in Husdal en op het Tønsberg schiereiland, in het zuidelijk deel van Stromness Bay (fig 1b). Tønsberg schiereiland, een uitloper van een transversale bergketen, splitst Stromness Bay in twee kleinere fjords. Glaciale erosie tijdens het laatste glaciaal vormde op het schiereiland meerdere depressies met een diameter van 10 m tot 200 m, welke zijn opgevuld met water (fig. 1c). Op het uiteinde van het schiereiland ontdekte C. Verbruggen een kleine, relatief ondiepe depressie (40 m lang, 25 m breed en 3,20 m diep) opgevuld met veen. De depressie werd bemonsterd door het inslaan van een PVC-buis met een diameter van 11 cm. Het is deze veensequentie die het onderwerp is geweest van een paleobotanische, -ecologische en -klimatologische studie.
- 31 De meest gebruikte techniek in paleo-ecologische onderzoek, namelijk palynologie (pollenanalyse), bleek echter beperkte resultaten op te leveren. Een palynologisch onderzoek door Van Parys (1995) van de Tønsberg sequentie bevestigde wat Barrow (1976, 1977, 1978, 1983) reeds had besloten. Verscheidene redenen kunnen worden gevonden voor deze palynologische deficiëntie. Slechts een twintigtal zaadplanten groeit op het boomloze eiland waarvan drie *Juncaceae*-species welke geen fossiel pollen opleveren. Vele species zijn reeds van in het begin van de registratie aanwezig en de pollencurves geven een vrij indifferent beeld. Macrorestenonderzoek leek een alternatief, zeker na de vaststelling dat in het venige sediment heel wat goed bewaarde mosresten aanwezig waren. De 3,20 m lange sequentie werd bemonsterd (15-20 cm³) om de 20 cm van de top tot een diepte van 180 cm en om de 10 cm beneden deze diepte. Deze stalen werden verwarmd in een 5 % KOH oplossing en daarna nat gezeefd op een zeef met maaswijdte van 250µ. Onder een stereomicroscop werden de mosresten en zaden per

soort uitgepikt, gedetermineerd en gekwantificeerd waarna deze gegevens voorgesteld worden in een diagram. In de Tønsberg kern zijn 31 mostaxa gevonden waarvan de meeste konden worden gedetermineerd tot op soortniveau. Mossen vormen een belangrijke component van de hedendaagse vegetatie. Bovendien hebben heel wat soorten een beperkte ecologische niche en zijn ze gevoelig voor ecologische en klimatologische wijzigingen. Mossen zijn daarom geschikte indicatoren voor het registreren van wijzigingen in omgevingsfactoren (Jonsgard and Birks, 1995). Aan de hand van koolstofdateringen werd vastgesteld dat de depressie tenminste rond 11 000 cal BP ijsvrij was (Van der Putten en Verbruggen, 2005) en dat de kern ongeveer het volledige Holoceen weergeeft (11 500-0 cal yr BP).

- 32 Samenvattend kunnen we drie events in de Tønsberg kern onderscheiden, die klimaatsgebonden en dus onafhankelijk zijn van de lokale evolutie van het veen: de start van de sequentie na de deglaciatie (tenminste 11 000 cal BP) onder warme klimatologische omstandigheden; een periode van non-depositie tussen 9 000 en 8 000 cal BP met een plots vochtiger worden na 8 000 BP; een duidelijk nattere periode na c. 2 600 cal BP.
- 33 Voor South Georgia zijn de bestaande paleoklimatologische gegevens beperkt. Er bestaan enkele studies die ons in de mogelijkheid stellen onze resultaten te vergelijken. Rosqvist en Schubert (2003) komen aan de hand van *Grey Scale Density*⁵ en *Loss on Ignition*⁶ (LOI) analyse op meersedimenten (Block Lake), die de laatste 7 000 jaar van het Holoceen beslaan, tot vier koelere periodes (7 200-7 000, 5 200-4 400, 2 400-1 600, na 1 000 cal BP) (fig. 2). De overgang naar een nattere periode rond 2600 cal BP vastgesteld in de Tønsberg kern wordt eveneens teruggevonden in de Block Lake sequentie hoewel de lage LOI-waarden geïnterpreteerd worden als een verkoeling van het klimaat. Clapperton *et al* (1989) stellen vast dat de grootste Holocene gletsjeruitbreiding op South Georgia culmineert rond c. 2 200 ¹⁴C BP (c. 2 200 cal BP). Deze 2 600 BP event lijkt een mondiaal karakter te hebben. Van Geel *et al.* (1996, 2000) geven een overzicht van de registratie van deze event (koud en/of nat) over de wereld verspreid. Heusser (1995), koppelt een toename van de plant *Astelia pumila* rond 2 630 ± 90 BP in een veenafzetting in sub-Antarctisch Argentinië (54°58'Z, 66° 44'W) aan een plotse daling in temperatuur en een natter en stormachtiger klimaat.

Figuur 2. Schematische voorstelling van de gepubliceerde paleoklimatologische data voor het eiland South Georgia.

- 34 Voor de 9 000-8 000 cal BP event verwijzen we naar een tweede studie van Rosqvist *et al.* (1999) eveneens uitgevoerd op meersedimenten van South Georgia. Deze sequentie is genomen in een meer (Lake 1, fig.1c) op het Tønsberg schiereiland dat zich meer landinwaarts bevindt dan de Tønsberg kern. De kern beslaat een periode van c. 18 500 tot 7 000 cal yr BP. Aan de hand van zuurstofisotopen onderzoek op biogene silica werd een temperatuurcurve opgesteld. Volgens deze resultaten blijft het relatief koud tot ongeveer 8 400 cal BP waarna een warme periode aanbreekt die kort wordt onderbroken door een koud event van 7 800 tot 7 400 cal BP.
- 35 Volgens de gegevens van de Tønsberg kern kan er echter geen twijfel bestaan over een duidelijke warme periode (begin van sedimentafzetting met aanwezigheid van heel wat plantensoorten) van bij het begin van het Holoceen. Deze warme periode wordt onderbroken door een hiaat rond 9 000-8 000 cal BP. Dit is in overeenstemming met de conclusies uit een studie van holocene klimaatwijzigingen gebaseerd op isotopenonderzoek van 11 ijskernen van Antarctica (Masson *et al.*, 2000). Het volledige Antarctische continent blijkt een warm optimum te vertonen tussen 11 500-9 000 cal BP gevolgd door een minimum rond 8 000 cal BP. Er is een opvallende temporele overeenkomst met de 8 200 cal BP event aangetroffen in Groenlandse ijskernen (Alley *et al.*, 1997). Heiri *et al.* (2004) zijn aan de hand van chironomidenonderzoek⁷ in de Alpen tot de vaststelling gekomen dat er zich een sterke daling in zomertemperatuur voordoet in de periode van 8 200 tot 7 600 cal BP.
- 36 Deze koude event blijkt dus eveneens een wereldwijd karakter te hebben (Stager and Mayewski, 1997) en is mogelijk geregistreerd in de Tønsberg kern onder de vorm van een hiaat eventueel als gevolg van drogere klimaatscondities aangezien het peil in de poel drastisch moet zijn verlaagd om de gelaagde sedimenten afgezet net voor het hiaat te verstoren (Van der Putten *et al.*, 2004). De relatie tussen een algemeen aanvaarde koude

event rond 8 200 cal BP en “verdroging” in de Tønsberg site is niet direct evident. Er kan misschien een verband gevonden worden tussen non-depositie (hiaat) en een verkoeling, door de poel gedurende een langere periode te laten dichtvriezen. De koude periode in de kern van Rosqvist *et al.* (1999) start een duizendtal jaren later. In dit onderzoek is de event dus niet als dusdanig geregistreerd. In het kader van een overzichtsartikel in verband met wereldwijde Holocene klimaatwijzigingen (Mayewski *et al.*, 2004) is, voor South Georgia, de studie van Rosqvist en Schubert (2003) opgenomen welke terug gaat tot 7 000 cal BP en dus niet ver genoeg om de 8 200 event te registreren. De Tønsberg kern registreert tussen 9 000 en 8 000 cal BP een wijziging in sedimentatie. Deze gebeurtenis kan echter op basis van de huidige gegevens niet met zekerheid gekoppeld worden met een kouder klimaat.

- 37 Een opmerking kan gemaakt worden bij de stelling van een warm optimum in het begin van het Holocene resulterend uit onze paleobotanische gegevens en de link met de minimum ouderdom van deglaciatie van de lagergelegen delen van het eiland. Rosqvist *et al.* (1999) stellen namelijk dat het Tønsberg schiereiland en zelfs grotere laaggelegen delen van South Georgia al ijsvrij waren rond 18 500 cal BP op basis van boven geciteerde meerkern. In Van der Putten en Verbruggen (2005) zijn data verzameld (^{14}C dateringen van vroeg Holocene ouderdom van de basis van veenafzettingen en van een meerkern op het Tønsberg schiereiland) waaruit blijkt dat de site van Rosqvist *et al.* (1999) eerder een uitzondering is door haar atypische geomorfologische ligging. De ontdekking van een ijsvrije lokatie tijdens de Last Glacial Maximum wijst echter op de mogelijkheid van het bestaan van refugia waar planten het laatste glaciaal mogelijk hebben “overwinterd”. Het feit dat in de Tønsberg kern heel wat plantensoorten (zowel hogere planten als mossen) aanwezig zijn van in het begin van de registratie wijst in dezelfde richting.

Mogelijke oorzaken van de holocene klimaatwijzigingen

- 38 Enkel de hoger besproken events namelijk de “8 200 koude event” en de “2 600 koude/natte event” worden hier behandeld.
- 39 Voor de events die zich tijdens het glaciaal en tijdens de deglaciatie voordeden worden, als mechanisme, verstoringen in de thermohaliene circulatie (THC) naar voor geschoven. De vraag is nu of er voor de events in het Holocene, die kleiner zijn in amplitude, eveneens een link bestaat tussen wijzigingen in temperatuur (en vochtigheid) en wijzigingen in oceaancirculatie.
- 40 Wijzigingen in THC blijken zeker voor de 8 200 event een belangrijke rol te spelen. Deze event is uniek voor het Holocene in die zin dat de event zich voordoet op een moment dat er nog aanzienlijke ijskappen voorkomen in het noordelijk halfrond. Barber *et al.* (1999) geven, als oorzaak van de verminderde THC, een plotse drainage (c. 8 450 yr BP) van de toenmalige proglaciale meren Agassiz en Ojibay (aanvankelijk afgedamd door een restant van de Laurentische ijskap) in de Labrador Zee via Hudson Bay en Hudson Strait. Een dergelijke plotse zoetwatertoevoer vermindert de saliniteit van de oceaanooppervlakte en bijgevolg de THC met de meest abrupte en wijd verspreide koude event tijdens het Holocene tot gevolg.
- 41 Een andere mogelijke oorzaak van gewijzigde THC zijn latitudinale verschuivingen in de grootste drift-ijs uitreidingen in de Noord Atlantische oceaan als gevolg van wijzigingen in energie afkomstig van de zon (Bond *et al.* 2001, Heiri *et al.*, 2004). Veranderingen in

drift-ijs uitbreiding kunnen de saliniteit van het Noord-Atlantische oppervlaktewater beïnvloeden en bijgevolg de THC.

- 42 Heiri *et al.* (2004) besluiten uit hun chironomidenonderzoek in de Alpen dat de door smeltwater veroorzaakte wijzigingen in de THC de meest dominante faktor is voor de holocene zomertemperatuurwijzigingen in centraal Europa. Magny (2004) komt echter door onderzoek naar veranderingen in meerniveau's in centraal Europa gedurende het Holocene (hogere meerniveau's wijzen op een koeler en natter klimaat) en vergelijking van deze data met Noord Atlantische IRD (*Ice Rafted Debris*) data, de GISP2 ijskern en ^{14}C -gegevens, tot de conclusie dat veranderingen in zonneactiviteit een belangrijke rol speelden in de holocene klimaatwijzigingen. De oceaan zou mogelijk de gevolgen van een relatief kleine wijziging in zonnerradiatie hebben versterkt.
- 43 Voor de 2 600 BP event verwijzen we naar van Geel *et al.* (1996) die, gelijktijdig met de klimaatwijziging, een plotse toename van ^{14}C in de atmosfeer vaststelden. Later (van Geel *et al.*, 2000) werd de toename in ^{14}C gekoppeld aan een abrupte daling van zonneactiviteit met een klimaatverandering als gevolg. Wijzigingen in zonneactiviteit hebben een globaal karakter wat wereldwijde registratie van de 2 600 BP event zou kunnen verklaren. De 8 200 event blijkt eveneens een wereldwijde verspreiding te hebben. Indien echter de zoetwaterinflux in de Noord Atlantische oceaan van beide proglaciale meren verantwoordelijk is voor de event met een verminderde THC als gevolg, dan kunnen we ons de vraag stellen waarom geen asynchronie voorkomt tussen beide hemisferen zoals vastgesteld in het glaciaal aan de hand van vergelijking tussen bepaalde Antarctische en de Groenlandse ijskernen. Dit zou kunnen pleiten voor de verklaring van verscheidene auteurs (Bond *et al.*, 2001; van Geel *et al.*, 1999; Magny, 2004), die een veranderende zonneactiviteit vooropstellen als oorzaak van de holocene klimaatsinstabiliteit.
- 44 In een overzichtsartikel (Rohling E.J. & Pälike H., 2005) “ontkoppelen” de auteurs het 8 200 yr BP koude event vastgesteld in de Noord Atlantische regio, gerelateerd aan een vermindering in THC als gevolg van een smeltwater toevoer in de Noord Atlantische oceaan, van een verscheidene eeuwen durende (c. 8 600-8 000 cal yr BP) klimaatsverkoeling welke ongeveer wereldwijd wordt gedetecteerd aan de hand van goed gedateerde klimaatsgegevens. Bovendien wordt verandering in zonneactiviteit als mogelijke oorzaak voor de aanzet van deze koelere periode naar voor geschoven (welke dus duidelijk vroeger begint dan het moment van toevoer van zoetwater in de Noord Atlantische oceaan met de 8 200 BP koude event als gevolg). De Noord Atlantische 8 200 koude event (c. 100 jaar durend) kan dus een relatief lokale klimaatsdeterioratie zijn “geprojecteerd” op een patroon van langer durende klimaatwijzigingen gedurende het Holocene waarvan de laatste de Kleine IJstijd (1450-1850 n.C) is. Dit patroon vertoont bovendien een zeer goede correlatie met de fluctuaties in zonneactiviteit vastgesteld in het Holocene.

Conclusie

- 45 Uit bovenstaand onderzoek mag blijken dat onderzoek op sub-Antarctische eilanden een belangrijke bijdrage kan leveren in het paleoklimatologisch onderzoek op wereldvlak. Deze eilanden zijn de enige landmassa's aanwezig in de circum-Antarctische oceaan en vertegenwoordigen dus belangrijke terrestrische archieven naast de mariene sedimenten en de ijskernen. Bovendien hebben ze een verschillende ligging ten aanzien van het

actuele Polair Front (voorheen Antarctische Convergence) (fig. 1): Crozet, Macquarie, Marion en Prince Edward liggen ten noorden van deze grens tussen gematigd en koud zeewater. South Georgia en Heard liggen ten zuiden ervan en Kerguelen ligt ongeveer ter hoogte van het Polair Front. Vergelijkend paleoklimatologisch onderzoek op deze eilanden en confrontatie van deze resultaten met bestaande gegevens van terrestrisch onderzoek op het Antarctisch continent, ijskernen en mariene kernen zal ongetwijfeld bijdragen tot het verder uitrafelen van de grote klimatologische vraagstukken van onze aarde.

- 46 Het Laboratorium voor Paleo-ecologie en Landschapsgenese van de Vakgroep Geografie, Universiteit Gent, onder leiding van C. Verbruggen, heeft tot op heden vier veldcampagnes op twee verschillende eilanden uitgevoerd: 1992-93 (Verbruggen en Beyens) en 1995-96 (Verbruggen en Van der Putten) op South Georgia; 1998-99 en 2001 (Verbruggen en Van der Putten) op de Crozet-Archipel.

BIBLIOGRAPHIE

ALLEY R.B., MAYEWSKI P.A., SOWERS T., STUIVER M., TAYLOR K.C. & CLARK P.U., (1997), "Holocene climatic instability: a prominent, widespread event 8200 yr ago", *Geology* 25, pp. 483-486.

BARBER, D. C., DYKE, A., HILLAIRES-MARCEL, C., JENNINGS, A. E., ANDREWS, J. T., KERWIN, M. W., BILODEAU, G., MCNEELY, R., SOUTHERN, J., MOREHEAD, M. D. & GAGNON, J.-M. (1999), "Forcing of the cold event of 8,200 years ago by catastrophic drainage of Laurentide lakes", *Nature* 400, pp. 344-348.

BARD, E., ROSTEK, F. & SONZOGNI, C. (1997), "Interhemispheric synchrony of the last deglaciation inferred from alkenone palaeothermometry", *Nature* 385, pp. 707-710.

BARROW, C. J. (1976), "Palynological studies in South Georgia: I. Pollen and spore morphology of the native vascular species", *British Antarctic Survey Bulletin* 43, pp. 63-75.

BARROW, C. J. (1977), *Palynological studies in South Georgia*, Ph-D thesis, University of Birmingham.

BARROW, C. J. (1978), "Postglacial pollen diagrams from South Georgia (sub-Antarctic) and West Falkland Island (South Atlantic)", *Journal of Biogeography* 5, pp. 251-274.

BARROW, C. J. (1983), "Palynological studies in South Georgia: III. Three profiles from near King Edward Cove, Cumberland East Bay", *British Antarctic Survey Bulletin* 58, pp. 43-60.

BLUNIER T. & BROOK E.J. (2001), "Timing of millennial-scale climate change in Antarctica and Greenland during the Last Glacial Period", *Science* 291, pp. 109-112.

BLUNIER T., CHAPPELLAZ J., SCHWANDER J., DÄLLENBACH A., STAUFFER B., STOCKER T.F., RAYNAUD D., JOUZEL J., CLAUSEN H.B., HAMMERS C.U. & JOHNSEN S.J. (1998), "Asynchrony of Antarctic and Greenland climate change during the last glacial period", *Nature* 394, pp. 739-743.

BOND G., BROECKER W., JOHNSEN S., MCMANUS J., LABEYRIE L., JOUZEL J. & BONANI G. (1993), "Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice", *Nature* 365, pp. 143-147.

- BOND G., KROMER B., BEER J., MUSCHELER R., EVANS M.N., SHOWERS W. HOFFMANN S., LOTTI-BOND R., HAJDAS I. & BONANI G. (2001), "Persistent solar influence on North Atlantic Climate during the Holocene", *Science* 294, pp. 2130-2136.
- BROECKER W.S., BOND G., KLAS M., CLARK E. & MCMANUS J. (1992), "Origin of the northern Atlantic's Heinrich events", *Climate Dynamics* 6, pp. 265-273.
- BROECKER W.S. (1996), "Paleoclimatology" *Geotimes* 41, pp. 40-41.
- CHAPPELLAZ, J., BLUNIER, T., RAYNAUD, D., BARNOLA, J.-M., SCHWANDER, J. & STAUFFER, B. (1993), "Synchronous changes in atmospheric CH₄ and Greenland climate between 40 and 8 kyr BP", *Nature* 366, pp. 443-445.
- CHEDDADI R., MAMAKOVA K., GUIOT J., DE BEAULIEU J.-L., REILLE M., ANDRIEU V., GRANOSZEWSKI W., & PEYRON O. (1998), "Was the climate of the Eemian stable? A quantitative climate reconstruction from seven European pollen records", *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 143, pp. 73-85.
- CLAPPERTON, C. M., SUGDEN D. E., BIRNIE J. & WILSON M. J. (1989), "Late-Glacial and Holocene Glacier fluctuations and Environmental Change on South Georgia, Southern Ocean", *Quaternary Research* 31, pp. 210-228.
- DANSGAARD W., JOHNSEN S.J., CLAUSEN H.B., DAHL-JENSEN D., GUNDESTRUP N.S., HAMMER C.U., HVIDBERG C.S., STEFFENSEN J.P., SVEINBJÖRNSDOTTIR A.E., JOUZEL J. & BOND G. (1993), "Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record", *Nature* 364, pp. 218-220.
- DENTON G.H., HEUSSER C.J., LOWEL T.V.G., MORENO P.I., ANDERSEN B.G., HEUSSER L.E., SCHLÜHTER C. & MARCHANT D.R. (1999), "Interhemispheric linkage of paleoclimate during the last glaciation", *Geografiska Annaler* 81, pp. 107-153.
- HEINRICH H. (1988), "Origin and consequences of Cyclic Ice Rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years", *Quaternary Research* 29, pp. 142-152.
- HEIRI O, TINNER W. & LOTTER A.F. (2004), "Evidence for cooler European summers during periods of changing meltwater flux to the North Atlantic", *PNAS* 101, pp. 15285-15288.
- HEUSSER C.J. (1995), "Palaeoecology of a *Donatia-Astelia* cushion bog, Magellanic-Moorland-Subantarctic Evergreen Forest transition, Southern Tierra del Fuego, Argentina", *Review of Palaeobotany and Palynology* 89, pp. 429-440.
- JONSGARD B. & BIRKS H. H. (1995), "Late-glacial mosses and environmental reconstructions at Kråkenes, western Norway", *Lindbergia* 20, pp. 64-82.
- KUKLA, G. J., BENDER, M. L., DE BEAULIEU, J.-L., BOND, G., BROECKER, W. S., CLEVERINGA, P., GAVIN, J. E., HERBERT, T. D., IMBRIE, J. & JOUZEL, J. (2002), "Last Interglacial Climates", *Quaternary Research* 58, pp. 2-13.
- MAGNY M. (1995), *Une histoire du climat, des derniers mammoths au siècle de l'automobile*, Editions Errance, Paris.
- MAGNY M. (2004), "Holocene climate variability as reflected by mid-European lake-level fluctuations and its probable impact on prehistoric human settlements", *Quaternary International* 113, pp. 65-79.
- MARTINSON D.G., PISIAS N.G., HAYS J.D., IMBRIE J., MOORE T.C.JR. & SHACKLETON N.J. (1987), "Age dating and the Orbital Theory of the Ice Ages: Development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy", *Quaternary Research* 27, pp. 1-29.

- MASSON, V., VIMEUX, F., JOUZEL, J., MORGAN, V., DELMOTTE, M., CIAIS, P., HAMMER, C., JOHNSEN, S., LIPENKOV, V. Y. & MOSLEY-THOMPSON, E. (2000), "Holocene Climate Variability in Antarctica Based on 11 Ice-Core Isotopic Records", *Quaternary Research* 54, pp. 348-358.
- MAYEWSKI P.A., ROHLING E.E., STAGER J.C., KARLÉN W., MAASCH K.A., MEEKER L.D., MEYERSON E.A., GASSE F., VAN KREVELD S., HOLMGREN K., LEE-THORP J., ROSQVIST G., RACK F., STAUBWASSER M., SCHNEIDER R.R. & STEIG E.J. (2004), "Holocene climate variability", *Quaternary Research* 62, pp. 243-255.
- NGRIP MEMBERS (2004), "High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period", *Nature* 431, pp. 147-151.
- OCHYRA, R. (1998), *The moss flora of King George Island, Antarctica*, W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Science, Cracow, Poland.
- ROHLING E.J. & PÄLIKE H. (2005), "Centennial-scale climate cooling with a sudden cold event around 8,200 years ago", *Nature* 434, pp. 975-978.
- ROSQVIST, G.C., RIETTI-SHATI, M. & SHEMES, A. (1999), "Late glacial to middle Holocene climatic record of lacustrine biogenic silica oxygen isotopes from a Southern Ocean island", *Geology* 27, pp. 967-970.
- ROSQVIST G.C. & SCHUBER P. (2003), "Millennial-scale climate changes on South Georgia, Southern Ocean", *Quaternary Research* 59, pp. 470-475.
- SÁNCHEZ GONI M.F., TURON J.-L., EYNAUD F. SHACKLETON N.J. & CAYRE O. (2000), "Direct land/sea correlation of the Eemian, and its comparison with the Holocene: a high-resolution palynological record off the Iberian Margin", *Geologie en Mijnbouw/ Netherlands Journal of Geosciences* 79, pp. 345-354.
- STAGER J.C. & MAYEWSKI P.A. (1997), "Abrupt Early to Mid-Holocene Climatic transition registered at the Equator and the poles", *Science* 276, pp. 1834-1836.
- STEIG E.J., BROOK E.J., WHITE J.W.C., SUCHER C.M., BENDER M.L., LEHMAN S.J., MORSE D.L., WADDINGTON E.D. & CLOW G.D. (1998), "Synchronous climate changes in Antarctica and the North Atlantic", *Science* 282, pp. 92-95.
- STOCKER, T. F. (2000), "Past and Future reorganisations in the Climate system", *Quaternary Science Reviews* 19, pp. 301-319.
- VAN DER PUTTEN N., STIEPERAERE H., VERBRUGGEN C. & OCHYRA R. (2004), "Holocene palaeoecology and climate history of South Georgia (sub-Antarctica) based on a macrofossil record of bryophytes and seeds", *The Holocene* 14, pp. 382-392.
- VAN DER PUTTEN N. & VERBRUGGEN C. (2005), "The onset of deglaciation of Cumberland Bay and Stromness Bay, South Georgia", *Antarctic Science* 17, pp. 29-32.
- VAN GEEL B., BUURMAN J., WATERBOLK H.T. (1996), "Archaeological and palaeoecological indications of an abrupt climate change in The Netherlands, and evidence for climatological teleconnections around 2650 BP", *Journal of Quaternary Science* 11, pp. 451-460.
- VAN GEEL B., RASPOPOV O.M., RENSSSEN H., VAN DER PLICHT J., DERGACHEV V.A., MEIJER H.A.J. (1999), "The role of solar forcing upon climate change", *Quaternary Science Reviews* 18, pp. 331-338.
- VAN GEEL B., HEUSSER C.J., RENSSSEN H. & SCHUURMANS C.J.E. (2000), "Climatic change in Chile at around 2700BP and global evidence for solar forcing: a hypothesis", *The Holocene* 10, pp. 659-664.

VAN PARYS V. (1995), *Paleoecologisch onderzoek op South Georgia (peri-Antarctica)*, Licentiaatsscriptie, Universiteit Gent.

WESTERHOFF W.E., DE MULDER F.J., GELUK M.C., RITSEMA I., & WONG Th. E. (eds.) (2003), *De ondergrond van Nederland*, Nederlands Instituut voor Toegepaste Wetenschappen, TNO, 380 p.

NOTES

1. Zuurstof aanwezig in water bevat de stabiele isotopen ^{18}O en ^{16}O .
Het gebruik van de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -verhouding is gebaseerd op twee vaststellingen:
Bij verdamping van oceaanwater bevat de waterdamp een lagere hoeveelheid aan ^{18}O en bij condensatie zal de hoeveelheid ^{18}O groter zijn in het water dan in de waterdamp.
De verhouding $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ is afhankelijk van de temperatuur; de hoeveelheid ^{18}O in neerslag vermindert wanneer de temperatuur daalt (Magny, 1995).
2. Dansgaard/Oeschger events hebben een opvallende temporele evolutie: het klimaat koelt af gedurende verscheidene eeuwen tot 3 kyr, terwijl opwarming plots gebeurt en over een zeer korte periode (jaren tot enkele decennia) (Stocker, 2000).
3. In 1988 publiceerde Heinrich een studie waarin hij bijzondere sedimentlagen in sequenties van het laatste glaciaal (Weichsel) van de oostelijke Noord-Atlantische oceaan beschrijft en verklaart. De lagen zijn te onderscheiden van de normale glaciële diepzeesedimenten door een verschillende sedimentsamenstelling (rijk aan *ice-rafted debris*) en een lage concentratie aan foraminiferen. Ze zijn ontstaan door het afsmelten van landsediment-dragende ijsbergen afkomstig van de grote noordelijke ijskappen tijdens periodes waarbij ijsbergen zich ver in de Noord-Atlantisch oceaan hebben verspreid. Deze lagen van grove lithische sedimenten gevonden in marine sedimenten werden later Heinrich Events genoemd (Broecker *et al.* 1992).
4. Geochemische methode waarbij chemische eigenschappen van alkenonen worden gemeten in specifieke soorten algen bewaard in diepzeesedimenten (Coccolieten). Er bestaat een verband tussen de chemische eigenschappen van alkenonen en de groeitemperatuur van de algen.
5. X-stralen onderzoek van sedimenten met bijhorende beeldverwerking.
6. Het bepalen van de hoeveelheid van organische stof in het sediment door verbranding van het monster bij een bepaalde temperatuur.
7. Paleoklimatologische proxie waarbij de resten van larven van chironomiden (dans- of vedermuggen), bewaard in meersedimenten, worden onderzocht. De larven van chironomiden leven in water (meren, rivieren) en zijn voor hun ontwikkeling sterk gekoppeld aan de heersende zomertemperatuur. Aan de hand van chironomidenonderzoek kan men dus de zomertemperatuur in het verleden reconstrueren.

RÉSUMÉS

Klimaatwijzigingen in het verleden zijn geregistreerd in zowel terrestrische, ijs- als diepzeekernen. De laatste 10 jaar is paleoklimatologisch onderzoek vooral toegespitst op het temporeel correleren van deze verschillende data en het zoeken naar een mechanisme (oorzaken en gevolgen) dat achter de klimatologische wijzigingen, die wereldwijd zijn geregistreerd, schuilt. De Noord-Atlantische regio is de best gekende regio enkel en alleen door de

aanwezigheid van een groot aantal data in de drie domeinen. De klimaatscurves van het zuidelijk halfrond zijn vooral afkomstig van de Antarctische ijskap. Diepzee en terrestrisch paleoklimatologisch onderzoek is hier “ondervetegenwoordigd” en het belang in de paleoklimaatdiscussie van sub-Antarctische eilanden werd in het verleden eerder “verwaarloosd”. Echter, het beperkte aantal gepubliceerde studies en onze eigen gegevens geven aan dat op deze eilanden een groot potentieel aan bruikbare terrestrische archieven aanwezig is, bovendien de enige terrestrische archieven in de circum-Antarctische oceaan.

Past climate change is studied in terrestrial, deep ocean and ice cores. For the last ten years, climatological research has been focused on climatic connections between data from different sources and environments on earth and on the driving mechanism behind these climatic connections. The North Atlantic region is the best known region only because of the many palaeoclimatological data present in this area. Past climate change in the Southern Hemisphere has been attained especially by research of Antarctic ice cores. The number of studies of terrestrial and oceanic cores in the Southern Hemisphere is lower than in the north. The significance of the sub-Antarctic region for the palaeoclimatological discussion has been rather ‘neglected’ in the past. However, the restricted published data and our own research show that sub-Antarctic islands have a great potential for high resolution terrestrial palaeoclimatological research. Moreover, these islands represent the only terrestrial archives in the circum-Antarctic ocean.

INDEX

Keywords : palaeoclimatology, North-Atlantic region, Southern hemisphere, sub-Antarctic, South Georgia, Holocene

motsclesnl paleoklimatologie, Noord-Atlantische regio, zuidelijk halfrond, sub-Antarctica, Holoceen

AUTEUR

NATHALIE VAN DER PUTTEN

Universiteit Gent, nathalie.vanderputten@ugent.be