



Fig. 1: Observatie van de aardrand voor zonsopgang vanuit de spaceshuttle Columbia op 1 november 1992 boven het Tanganyikameer. De donkeroranje laag komt overeen met de tropische tropopauze-wolken (tussen 13 en 18 km hoogte), de onderste heldere laag komt overeen met de troposfeer, terwijl de bovenste atmosfeer blauw oplicht. Al deze lagen zijn voortdurend in interactie en kunnen niet afzonderlijk worden bestudeerd. Klimaat, meteorologie en luchtkwaliteit betreffen de troposfeer waarin de mensheid leeft. © NASA, document STS052-23-022

Klimaat en luchtkwaliteit: dezelfde strijd

Christian Muller

Inleiding

De aarde is een complex systeem bestaande uit oceanen, continenten, de atmosfeer en hun belangrijkste energiebron: de zon. Het Koninklijk Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie (BIRA) richt zich op de relatie tussen de aarde en de zon en voert wetenschappelijke studies uit van al deze onderwerpen, met een bijzondere focus op de atmosfeer. Het maakt daarbij gebruik van zowel theoretische modellen als waarnemingen van satellieten, vliegtuigen en grondstations. Sinds de oprichting van het Instituut in 1964 heeft een nieuwe speler in het aardsysteem een groeiende plaats ingenomen: de invloed van de mens. Wetenschappers hebben vele verschijningen van deze invloed waargenomen: het verschijnen van gassen in de atmosfeer die nooit eerder hadden kunnen gemeten worden, vervuiling waarvan gedacht werd dat het beperkt was tot zeer kleine gebieden bleek verspreid over hele continenten, de aantasting van stratosferische ozon door chloor en industriële stikstofoxiden, en tot slot, vooral sinds de jaren 1970, de wereldwijd toegenomen gemiddelde temperatuur.

Deze variaties gebeuren op een schaal van slechts tientallen jaren, wat uitzonderlijk snel is. Ze brachten de Nobelprijswinnaar Paul Crutzen ertoe een nieuw geologisch tijdperk voor te stellen: het Antropoceen, een periode waarin menselijke activiteiten de evolutie van het aardsysteem domineren.

Waarnemingen vanop de grond

Vóór het ruimtetijdperk werden metingen van de atmosferische samenstelling gedaan vanop de grond en met stratosferische ballonnen. De ballonvluchten waren de eerste missies van het net opgerichte BIRA, en leidden tot de ontdekking en meting van vele componenten van de stratosfeer.

Ozon: vervuiler, broeikasgas en ultravioletfilter

Ozon is een gas, bestaande uit drie zuurstofatomen, dat geïdentificeerd werd in het midden van de 19de eeuw. Ozon is alomtegenwoordig in de atmosfeer van de aarde, maar bevindt zich voornamelijk (voor meer dan 90%) in de stratosfeer. Toen het in de troposfeer ontdekt werd, leek het eerst gunstig te zijn vanwege zijn ontsmettende eigenschappen. Maar troposferische ozon wordt gevormd uit voorlopers die zelf verontreinigende stoffen zijn, zoals

stikstofoxiden. In de 20ste eeuw werd de hoge concentratie ervan geassocieerd met aandoeningen aan de luchtwegen en schade aan de vegetatie. Bovendien heeft deze ozon een infraroodemissie tot 10 micron golflengte, wat het een broeikasgas maakt. Gelijktijdig met deze ontdekkingen werden de eigenschappen van stratosferische ozon als UV-filter benadrukt. Stratosferische ozon beschermt het leven op aarde tegen DNA-vernietigende UV-B-straling (UV-B komt overeen met straling met golflengte kleiner dan 315 nm). Helaas wordt de 'goede' stratosferische ozon vernietigd door chloor en broom dat van het oppervlak van de aardbol vervoerd wordt door gehalogeneerde gassen van menselijke oorsprong. Deze gassen zijn zelf broeikasgassen. Stratosferische ozon is ook gevoelig voor stikstofoxiden geproduceerd door vliegtuigen op grote hoogte. UV-straling werd als gezond beschouwd totdat in het midden van de 20ste eeuw werd ontdekt dat het schadelijk was voor vegetatie, en dat het een rol speelt in huidkanker bij de mens. De bescherming van de ozonlaag in de stratosfeer is daarom erg belangrijk.

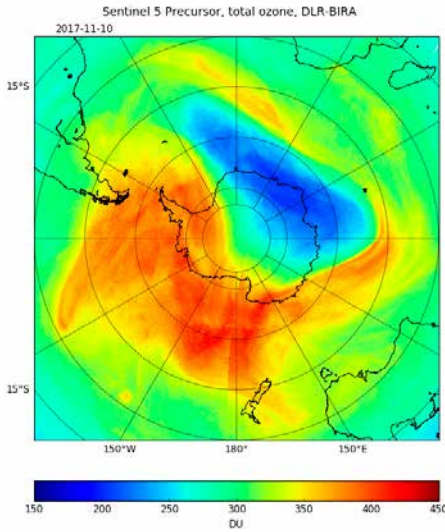
Hoe kan men de atmosferische gassen meten?

De meest voor de hand liggende methode is chemische analyse, die sinds het Internationale Geofysische Jaar (1957-1958) in gebruik is en het mogelijk heeft gemaakt om de groei van koolstofdioxide, het voornaamste broeikasgas, op de voorgrond te brengen. Het BIRA heeft altijd voorrang gegeven aan optische metingen vanaf ruimteplatforms, en was sinds 1963 pionier in infraroodabsorptiemetingen wanneer de zon van achter de horizon schijnt. Deze waarnemingen kunnen onafhankelijk van grondmetingen worden geïnterpreteerd en werden uitgevoerd met ballonnen en tijdens twee vluchten van de raster-spectrometer, voor een deel ontworpen door Dirk Frimout, aan boord van de Space Shuttle. De infraroodabsorptiemetingen vormen ook het meetprincipe van het NOMAD-instrument dat momenteel in een baan rond Mars draait.

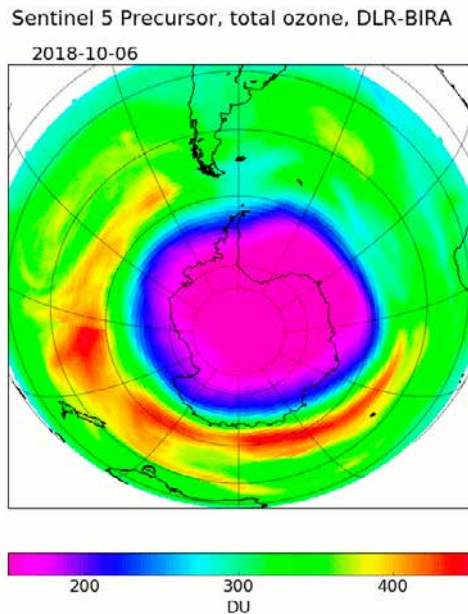
De tweede gebruikte techniek is de meting van ultraviolette en zichtbare straling die door de atmosfeer wordt verspreid. Deze methode vereist een uitstekende kalibratie van de instrumenten en de validatie van de interpretaties aan de hand van metingen op de grond. Ook hier ontwikkelt het BIRA sinds ongeveer 1980 zowel instrumentatie als interpretatiemethoden. De huidige resultaten overtreffen alle verwachtingen en leveren dankzij satellieten globale metingen van tientallen atmosferische componenten, waaronder ozon.



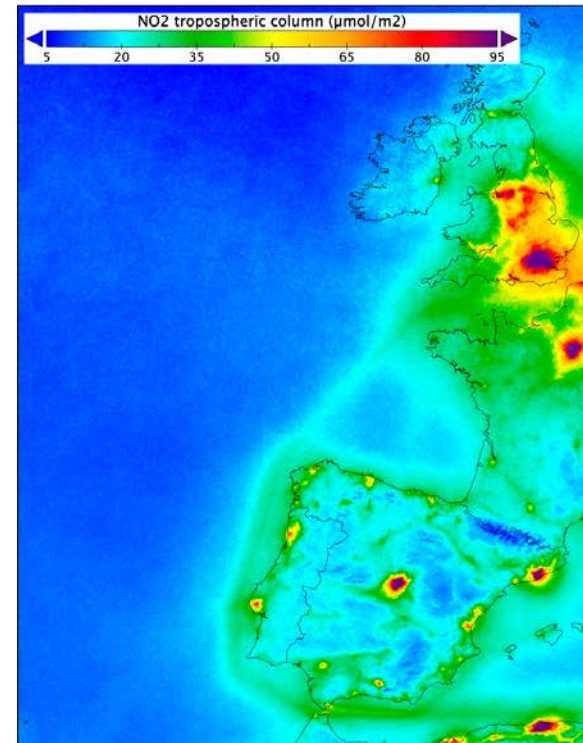
Fig 2: Hoogtemeting van de atmosferische samenstelling door middel van absorptie van zonnestraling vanuit Jungfrauoch in Zwitserland. De datareeks die in 1950 door de Universiteit van Luik gestart werd toont de evolutie van broeikasgassen in de 'niet-verontreinigde' atmosfeer en die van de twintig gassen die de ozonlaag beïnvloeden. Al dertig jaar lang wordt deze operatie in stand gehouden in samenwerking met het Koninklijk Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie (BIRA), dat sinds 2002 ook een station op het eiland Réunion heeft. Het BIRA heeft ook waarnemingen uitgevoerd vanuit het observatorium op de Pic du Midi. Deze grondmetingen waarborgen zowel de continuïteit van de datareeksen als de validatie van metingen vanuit de ruimte. (www.jungfrau.ch)



Figuur 3: Totale ozon gemeten in november 2017 door het Europese TROPOMI-instrument aan boord van de Sentinel 5 Precursor-satelliet, die gelanceerd werd op 13 oktober 2017. Dit instrument maakt deel uit van een reeks die door het BIRA ontwikkeld is sinds 1986, te beginnen met het SCIAMACHY-instrument (Duitsland, Nederland, België) en voortgezet door de GOME- en TROPOMI-instrumenten. © Document ESA-DLR-BIRA



Figuur 4: Het 'ozongat' op 10 oktober 2018 waargenomen door TROPOMI. © ESA-DLR-BIRA



Figuur 4 toont de maximale hoeveelheid Antarcticaal ozon na de jaarlijkse dislocatie van het 'ozongat' dat in 1980 voor het eerst verscheen en waarvan de menselijke oorsprong bewezen is. De ontdekking van dit 'ozongat' leidde in 1987 tot het Montreal-protocol voor de bescherming van de ozonlaag. Ondanks de vermindering van chloorbronnen door het Montreal-protocol komt het fenomeen van het ozongat elk jaar terug. Het fenomeen staat waarschijnlijk in verband met de versterking van de luchtcirculatie en de Antarctische polaire vortex, die zelf samenhangt met de klimaatverandering. Het is ook mogelijk dat ozonafbrekende gasbronnen zoals chloorfluormethanen niet door overheden worden aangegeven. Dit laatste punt toont het belang van ruimtemetingen om het naleven van verdragen te controleren, parallel met gegevens gebaseerd op nationale statistieken.

In conclusie kan de studie van atmosferische ozon, of het nu in de troposfeer of in de stratosfeer is, niet worden gescheiden van die van klimaat en luchtkwaliteit. Elke poging om de luchtkwaliteit te verbeteren en troposferische ozon te verminderen draagt ook bij tot de vermindering van broeikasgassen.

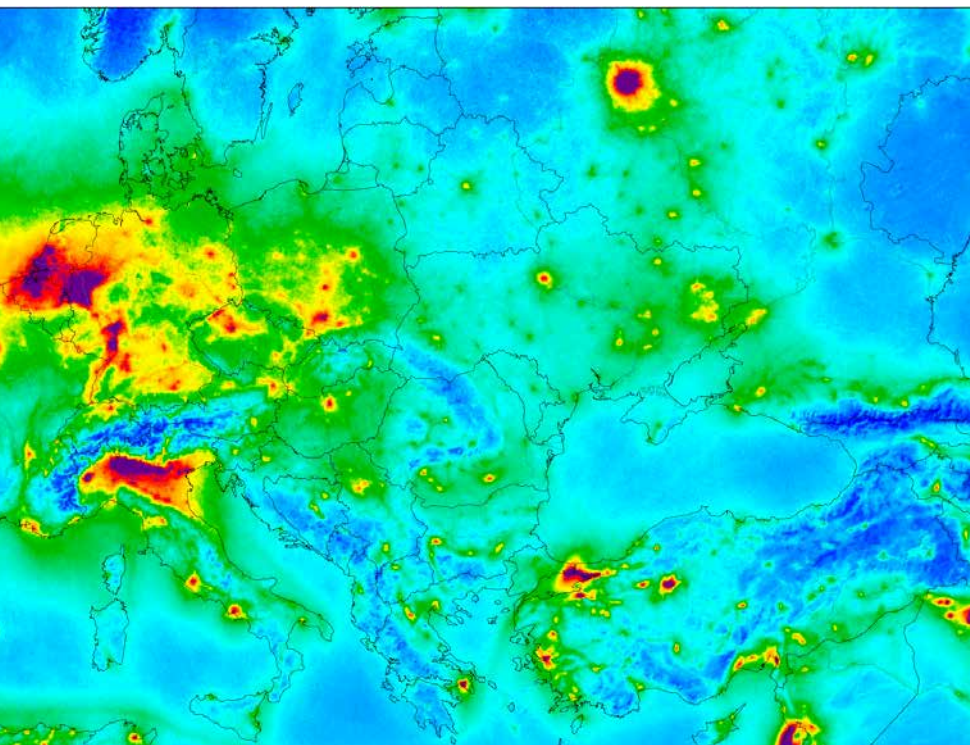
Broeikasgassen en de landbouw

De toenemende menselijke bevolking en de verbetering van de voeding leiden tot de transformatie van natuurlijke omgevingen in steeds belangrijker wordende bronnen van broeikasgassen.

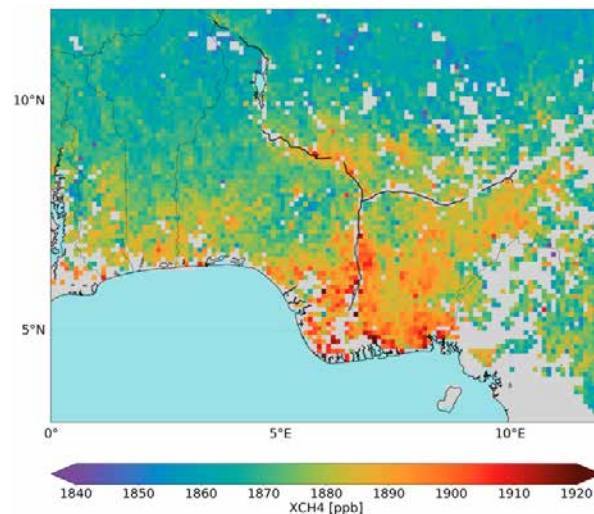
Het gaat voornamelijk om twee gassen: methaan (CH_4) en distikstofmonoxide (N_2O). Beide gassen worden geproduceerd door bacteriën volgens verschillende processen. Veeteelt en landbouw zijn belangrijke antropogene (menselijke) bronnen van methaan. Vooral runderveeteelt en rijstteelt zorgen voor een aanzienlijke toename. Een kleinere hoeveelheid van het methaan komt ook vrij bij de winning van fossiele brandstoffen. De sterkte van deze bron is moeilijk in te schatten omdat, bijvoorbeeld, verlaten kolenmijnen methaan blijven afgeven. Bovendien geeft de ontdoide permafrost van het noordpoolgebied, die zelf gekoppeld is aan de opwarming van de aarde, een aanzienlijke hoeveelheid methaan af. Het monitoren van methaan vanuit de ruimte is de enige manier om deze fenomenen te kwantificeren. De meting van deze twee gassen was een van de eerste prioriteiten van het ballonmetingenprogramma van het

BIRA 50 jaar geleden. Dit was voornamelijk om wetenschappelijke redenen: de interactie van deze gassen met zuurstofatomen en ongefiltreerde zonnestraling laten toe om chemische processen te begrijpen die niet in het laboratorium kunnen worden gereproduceerd. Daarom werden de metingen van methaan en distikstofmonoxide in 1986 een van de doelstellingen van het tri-nationale instrument SCIAMACHY (Duitsland, Nederland, België). Het methaan-meetkanaal werd grotendeels gerealiseerd door de Belgische industrie onder toezicht van het BIRA. Dezelfde principes worden op dit moment toegepast door het TROPOMI-instrument.

Distikstofmonoxide, waarvan de hoeveelheid momenteel toeneemt, wordt geproduceerd door anaerobe bacteriën die in voldoende zure ondergrond leven. Dit fenomeen houdt verband met de hyper-nitrificatie van bodems als gevolg van kunstmest. N_2O is ook een broeikasgas, maar ook al is het relatief stabiel in de troposfeer, boven de ozonlaag in de stratosfeer wordt het afgebroken door ultraviolette straling, waarna het stratosferische ozon aantast. Deze mechanismen zijn theoretisch bestudeerd door het BIRA sinds zijn oprichting



Figuur 5: Troposferische stikstofdioxide gemeten door het Europese TROPOMI-instrument tussen april 2018 en maart 2019 vanaf de satelliet Sentinel 5 Precursor. Het KNMI en het BIRA nemen deel aan de interpretatie van deze gegevens (© ESA). Stikstofoxiden worden geproduceerd in verbrandingsmotoren en vertonen daarom een correlatie met de directe uitstoot van koolstofdioxide door diezelfde motoren. Vooral de logistieke driehoek Brussel-Amsterdam-Keulen is opvallend. De vermindering van het verkeer met deze motoren vermindert niet alleen de giftige gassen, maar vermindert ook de broeikasgassen, zowel direct als indirect door de ozonproductie te verminderen.



Figuur 6: Methaanmengverhouding van de vochtige zones van Nigeria, gemeten door TROPOMI tussen november 2018 en februari 2019. © ESA

en hebben ertoe geleid dat het Instituut een pionier is in de meting van alle stratosferische stikstofoxiden.

Bodembeheer, klimaat en atmosferische chemie zijn onlosmakelijk verbonden met het begrip van de rol van deze twee gassen in het evenwicht van het aardsysteem.

Stofdeeltjes: een openstaand probleem

De studie van de luchtkwaliteit omvat ook in de lucht zwevende stofdeeltjes die afkomstig kunnen zijn van verbrandingsprocessen verbonden aan het verkeer en huishoudelijke verwarming, maar ook aan industriële processen. Hun effect op het klimaat is één van de resterende onzekerheden. Ze zweven in de lucht en vormen een obstakel voor binnendringende zonnestraling, en kunnen dus een negatieve forcering veroorzaken. Als deze deeltjes op de grond terecht komen, en vooral als ze een laag op ijs of sneeuw vormen worden deze verduisterd, wat de absorptie van de straling doet toenemen.

De internationale gemeenschap en het milieuprobleem

De wetenschappelijke gemeenschap was zich in de 19de eeuw al bewust van de noodzaak om aardwetenschappen te globaliseren. De eerste internationale meteorologische conferentie werd in 1853 gehouden en werd voorgezeten door de directeur van de sterrenwacht van Brussel, Adolphe Quetelet. De Internationale Meteorologische Organisatie (IMO) bestaat sinds 1873 met als doel meetmethoden te verenigen en netwerken op te bouwen. De eerste internationale onderzoeksinspanningen begonnen met het Internationale Pooljaar van 1883, en bereikten hun hoogtepunt tijdens het Internationale Geofysische Jaar van 1957-1958, ook gecoördineerd door Marcel Nicolet, de eerste directeur van het BIRA.

Vanuit een meer politiek oogpunt werd de IMO een organisatie van de Verenigde Naties onder de naam World Meteorological Organisation (WMO). Het milieubewustzijn kende een wereldwijde groei en de Verenigde Naties organiseerden in 1972 de eerste 'Aardtop' in Stockholm. Deze conferentie leidde tot de oprichting van een nieuwe organisatie van de Verenigde Naties: het 'Milieuprogramma van de Verenigde Naties' (UNEP). Na het Protocol van Montreal van 1987, betreffende gassen die de ozonlaag aantasten, richtten UNEP en de regeringen een studiegroep op voor de opwarming van de aarde: het 'Intergouvernementeel Panel voor Klimaatverandering' (IPCC), met als taak betrouwbare informatie over een mogelijke klimaatverandering te verzamelen. Deze groep publiceert periodieke rapporten ondertekend door enkele honderden wetenschappers en waarvan alle elementen gepubliceerd zijn in peer-reviewed tijdschriften. Ze worden vervolgens beoordeeld door ongeveer 3000 andere wetenschappers die hun opmerkingen moeten verrechtvaardigen. Een laatste herziening wordt uitgevoerd door deskundigen die door de regeringen zijn aangesteld en bieden daarom, naast hun encyclopedische aard, een vorm van rechterlijke waarheid. Het vijfde rapport dat in 2014 werd gepubliceerd kwam tot de duidelijke conclusie dat de waargenomen opwarming van de aarde verband hield met menselijke activiteit, en leidde het beleid tot de Overeenkomst van Parijs over de vermindering van broeikasgassen in 2016. In België wordt de nationale deelname gecoördineerd door het Federaal Wetenschapsbeleid (Belspo), terwijl de politieke deelname wordt gedeeld door federale en regionale ministers die verantwoordelijk zijn voor het milieu.

De natuurlijke invloed van stofdeeltjes op het klimaat

Waarnemingen van stofdeeltjes en druppeltjes (aerosolen) in de bovenste laag van de troposfeer en in de stratosfeer zijn bij het BIRA uitgevoerd als onderdeel van de interpretatie van de gegevens van het GOMOS-instrument aan boord van ENVISAT, en zullen één van de doelstellingen zijn van het ALTIUS-instrument in de laatste ontwikkelingsfase bij het BIRA. Vulkaanuitbarstingen zijn een natuurlijke bron van aerosolen en kunnen daarom het klimaat op een onvoorspelbare manier beïnvloeden. Het ALTIUS-project wordt de eerste Belgische stratosfeerobservatiemissie vanop een PROBA-microsatelliet. Naast ozon zal het de concentratieprofielen van waterdamp, koolstofdioxide, methaan en aerosolen meten op globale schaal.

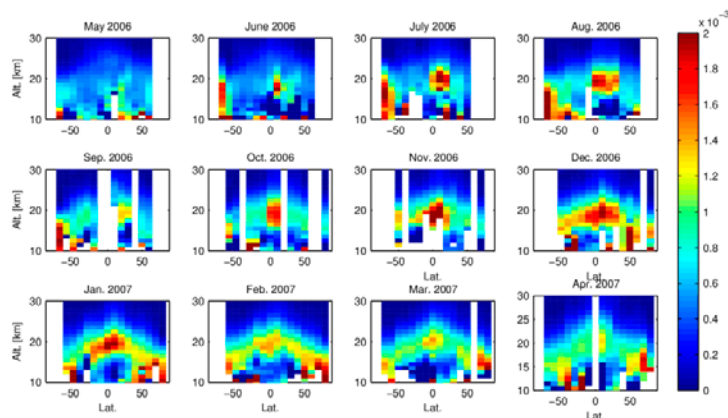
Vulkanisme is een natuurlijk proces dat tot een algemeen afkoelend effect op het klimaat kan leiden. Ook de natuurlijke variaties in de zonnestraling en de invloed van kosmische straling op de vorming van wolken werden als mogelijke externe invloeden op het klimaat naar voren geschoven. Het BIRA blijft deze drie aspecten wetenschappelijk bestuderen, maar in vergelijking met de invloed van de mens op het klimaat blijken deze natuurlijke factoren slechts een heel beperkt effect te hebben.

Conclusie

Het vijfde rapport van het IPCC (www.ipcc.ch/report/ar5/syr/ - 2014) heeft de klimaatverandering onderzocht en stelde vast dat de ongewoon snelle opwarming die momenteel wordt waargenomen te wijten is aan menselijke activiteit. Er zijn twee oplossingen: de ene is om de bronnen van de betrokken gassen te verminderen en de andere is om de uitgestoten gassen op te vangen om ze in het aardsysteem te neutraliseren. Alleen de eerste oplossing lijkt op korte termijn efficiënt. De enkele voorbeelden die hier gegeven zijn laten zien dat dit proces voordelen heeft voor het herstel van andere elementen van het milieu, en in het bijzonder de luchtkwaliteit.

Wetenschappelijk onderzoek blijft essentieel voor het begrip van alle mogelijke processen en hun interactie met elkaar. Het BIRA volgt via satellieten en zijn deelname aan grondstation-netwerken de evolutie van vrijwel alle atmosferische gassen die wereldwijd kunnen worden gemeten. Dankzij de expertise van het BIRA op gebied van aerosolen kan het deelnemen aan een wereldwijde monitoring van hun evolutie en hun invloed op het klimaat.

Deze fysische metingen brengen, buiten hun wetenschappelijke waarde, een belangrijke bijdrage voor de controle van de naleving van internationale verdragen.



Figuur 7: Evolutie van de uitdoving door aerosolen, gemeten door het GOMOS-instrument op ENVISAT. De gekozen periode toont de uitbarsting van de Soufrière-vulkaan (Guadeloupe, 16° N) en de evolutie van de gevormde aerosol gordel (© ESA-BIRA-LATMOS). Het beeld van mei 2006 vertoont geen vulkanische invloed. Vanaf juni 2006 daarentegen, werd een aerosol gordel op een hoogte van ongeveer 20 km en een breedtegraad van 10-20° N gecreëerd door een reeks uitbarstingen die 125 dagen duurde. De atmosferische situatie keert pas terug tot zijn normale toestand in februari 2007 (© ESA-BIRA-LATMOS).



Figuur 8: ballonwaarnemingen uitgevoerd door het BIRA vanuit 'Aire sur l'Adour' (Frankrijk) van de vulkanische wolk van Mount Saint Helens (Washington, VS). Waarneming vóór de uitbarsting van 18 mei 1980 (links) en enkele maanden erna (rechts). Een vulkaanuitbarsting kan een klimaatafkoeling veroorzaken door het albedo van de atmosfeer te verhogen, en dus de hoeveelheid zonnestraling die het oppervlakte bereikt te verminderen. © BIRA

De auteur

Christian Muller is een gepensioneerde wetenschapper van het BIRA. Sinds 1970 was hij betrokken bij het onderzoek naar stikstofoxiden en nam hij deel aan de eerste kwantitatieve ballonmetingen van deze gassen. Vanaf 1976 maakte hij deel uit van het team dat deze waarnemingen heeft uitgebreid naar Space Shuttle-observaties. Na twee vluchten van de BIRA-infraroodspectrometer, in 1983 en 1992, wijdde hij zich aan het ENVISAT-programma van ESA en werd hij de Belgische verantwoordelijke van het SCIAMACHY-instrument. Vanaf het jaar 2000 werd hij lid van het B.USOC (Belgian User Support and Operations Centre) dat zich binnen het BIRA bevindt. Sinds 2010 is hij verantwoordelijk voor de wetenschappelijke, en soms gouvernementele beoordeling (voor Belspo) van IPCC-documenten.