

## HOOFDSTUK 2. WAARNEMINGEN DIE BIJDAGEN TOT HET ONDERZOEK NAAR DE MECHANISMEN ACHTER DE KLIMAATVERANDERING.

### 2.1 Inleiding

Klimaatveranderingen zijn duidelijk meetbaar onder de vorm van temperatuurstijgingen in België (zie hoofdstuk 1) en op wereldschaal. Om te begrijpen waarom deze temperatuurstijgingen plaatsvinden, en om zo goed mogelijk te kunnen voorspellen hoe de temperatuur en ons klimaat in de toekomst zullen evolueren, is het belangrijk om de oorzaken van de temperatuursveranderingen zo goed mogelijk waar te nemen en te interpreteren. Over dit onderwerp is meer informatie beschikbaar in het volledige vijfde rapport van het IPCC van 2014.

Het is de bedoeling om in dit hoofdstuk een overzicht te geven van de bijdragen die het KMI levert in de waarneming en interpretatie van de mechanismen achter het klimaat en de klimaatverandering. Deze bijdragen situeren zich op het vlak van de waarneming van de zonnestraling en haar variaties, de zonnestraling aan de grond en aerosolen, de energiebalans van de aarde en in het bijzonder haar dagelijkse gang en de koppeling met het El Niño/La Niña-fenomeen, ozon, waterdamp, onderzoek in het Prinses Elisabeth Station in Antarctica, paleomagnetisme en de waarneming van kosmische straling.

### 2.2 Zonnestraling

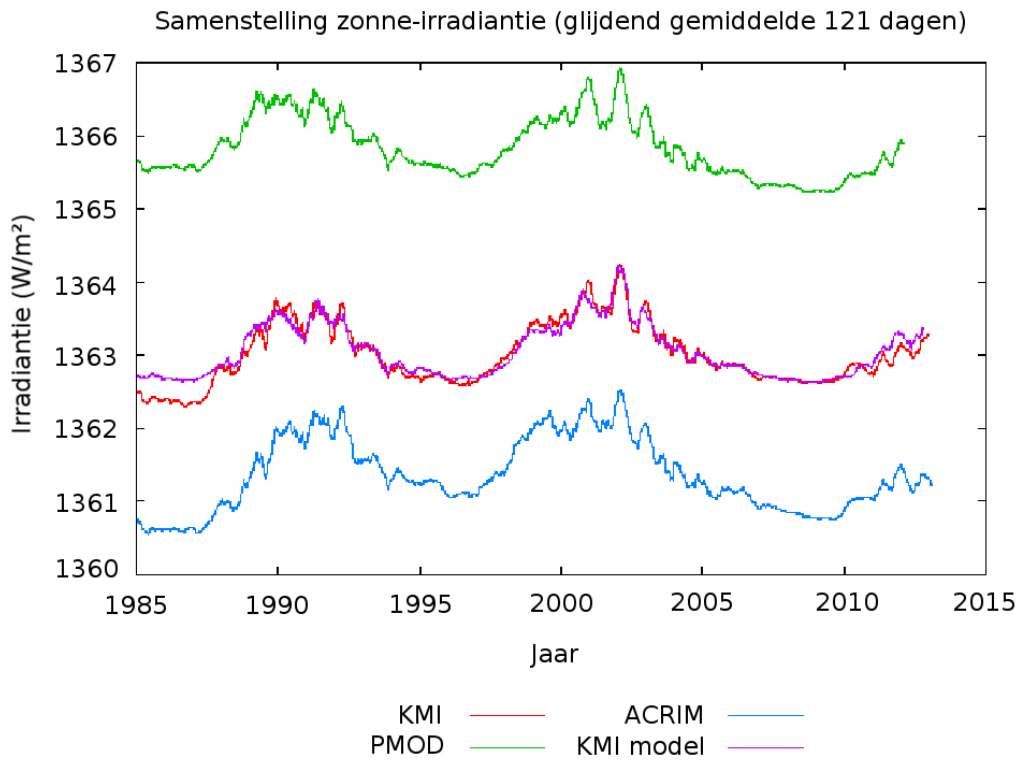
#### Totale zonnestraling

Het KMI vierde in 2013 niet alleen haar honderdjarig bestaan, maar ook de dertigste verjaardag van haar eerste instrument in de ruimte op Spacelab in 1983. In totaal maakte het KMI 11 ruimtevluchten met 6 verschillende instrumenten voor de meting van de totale zonnestraling. Momenteel hebben we een instrument actief in de ruimte, met name het DIARAD/Virgo-instrument op de SOHO-satelliet, dat sinds januari 1996 reeds 19 jaar trouwe dienst levert. Een volledig overzicht van onze ruimtevluchten is te vinden in de tabel hieronder.

<i>Mission</i>	<i>Instrument</i>	<i>Launch</i>	<i>Status</i>
Spacelab 1	Solcon 1	1983	Short-term
Atlas 1	Solcon 2	1992	Returned to ground
Eureca	Sova 1	1992	10 months data, returned to ground
Atlas 2	Solcon 2	1993	Returned to ground
Atlas 3	Solcon 2	1994	Returned to ground
<b>SOHO</b>	<b>Diarad/Virgo</b>	<b>1995</b>	<b>Ongoing</b>
Hitchhiker TAS	Sova 1	1997	Returned to ground
Hitchhiker IEH-3	Solcon 2	1998	Returned to ground
Freestar	Solcon 2	2003	Instrument lost during return
Columbus	Diarad/Sovim	2008	1 year data, failure of power supply
Picard	Sova-P	2010	Mission completed

Tabel 2.1. Ruimte-instrumenten van het KMI voor de meting van de totale zonnestraling.

De totale zonnestraling is het vermogen per eenheid oppervlakte – uitgedrukt in  $W/m^2$  – van de energie onder de vorm van straling die de Aarde ontvangt van de zon. De gemiddelde waarde van de totale zonnestraling wordt ook de zonneconstante genoemd. De totale zonnestraling is de energiebron die de Aarde van warmte voorziet en die onze ‘weer- en klimaatmachine’ aandrijft. Mogelijke variaties van de zonnestraling zouden een rechtstreekse aanleiding voor klimaatveranderingen op Aarde zijn, daarom is haar nauwkeurige langetermijnwaarneming belangrijk.



*Figuur 2.1. Samenstelling van de metingen van de variaties van de totale zonnestraling (in  $W/m^2$  voor de laatste twee elf-jaarlijkse zonnecycli (cyclus 22, 23 en de start van cyclus 24)) door de drie internationale groepen KMI, PMOD en ACRIM. Het KMI-model is een regressiemodel dat gefit werd op de KMI-samenstelling van de metingen.*

Op internationaal vlak is het KMI één van de drie groepen die een samenstelling van de metingen van de zonnestraling (zie figuur 2.1) maakten. De rode curve is onze samenstelling, de groene curve is de samenstelling door onze Zwitserse PMOD-collega's, en de blauwe curve is de samenstelling door onze Amerikaanse ACRIM-collega's. We zijn het erover eens dat op 'korte' termijn (kort op een klimaattijdschaal) de zonnestraling varieert met de elfjarige zonne-activiteitscyclus die bekend is uit de waarneming van zonnevlekken. De elf-jaarlijkse variaties van de inkomende zonnestraling zijn in de orde van 1 per duizend, en ze veroorzaken temperatuurvariaties in de orde van  $0,1^\circ C$ . Alhoewel deze variaties klein zijn, zijn ze niet te verwaarlozen en moeten ze in rekening gebracht worden om de temperatuurstijging ten gevolge van de broeikasgassen en de temperatuurdaling ten gevolge van de aerosolen correct in te schatten.

Sinds de lancering van het TIM/SORCE-instrument in 2003 werd het debat over de waarde van de zonneconstante, dat voordien definitief gesloten leek, heropend. Tegenover de consensuswaarde rond de  $1366 W/m^2$  van de zonneconstante, stelde TIM een nieuwe waarde rond de  $1361 W/m^2$  voor. In figuur 2.1 is het absolute niveau van de PMOD-samenstelling representatief voor de 'oude' consensuswaarde, en is het absolute niveau van de ACRIM-samenstelling representatief voor de 'nieuwe' TIM-waarde. Wij hebben onze absolute waarde kritisch herbekeken en we hebben, op een onafhankelijke wijze, een nieuwe waarde voor de zonneconstante (tijdens het minimum van de zonnecyclus) van ongeveer  $1363 W/m^2$  bekomen.

Naast de relatief kleine variaties op een tijdschaal van de elfjarige zonnecyclus blijft het een open vraag of er ook grotere variaties van de zonnestraling op een langere tijdschaal bestaan. Het zon/klimaat-onderzoek werd tot nu toe gedomineerd door het van de sterrenkundige J.A. Eddy afkomstige idee uit 1976 dat er een overeenkomst bestaat tussen het Maunder Minimum van de zon (een langdurige periode van lage zonneactiviteit rond de periode 1650-1700) en de Kleine IJstijd op Aarde (een langdurige periode van lage temperaturen). Volgens de meest voor de hand liggende verklaring blijkt dat een langetermijnvariatie van de totale zonnestraling (Total Solar Irradiance = TSI), die de energie-input van de zon naar de Aarde kwantificeert, verantwoordelijk was voor de lage temperaturen. Om de Kleine IJstijd te kunnen verklaren, werden talrijke langetermijnreconstructies van de TSI, die het bestaan van een langetermijnvariatie van het zogenaamde 'kalme zon' TSI-niveau moesten postuleren, vooropgesteld.

Recente vooruitgang, ten eerste op het gebied van de meting van de TSI vanuit de ruimte, ten tweede in de langetermijnkarakterisatie van de zonneactiviteit aan de hand van de zonnevlekken, en ten derde door het onverwacht gedrag van de zon zelf tijdens de huidige zonnecyclus 24 die eind 2009 startte, geeft aanleiding om te geloven dat een verandering van paradigma in het zon/klimaat-onderzoek nodig is.

Het verschijnen van donkere vlekken op de zon werd door menselijke waarnemers reeds geregistreerd sinds de uitvinding van de telescoop en zijn eerste gebruik voor de waarneming van de zon in 1610 door Galileo. Onze collega's van de Koninklijke Sterrewacht van België (KSB) zijn verantwoordelijk voor het onderhoud van het 'Internationale Zonnevlekken Nummer', dat de langste reeks van directe waarnemingen van de manifestatie van magnetische activiteit op het zonne-oppervlak is. Sinds 2011 werden een aantal zonnevlekken workshops gehouden die hebben geleid tot de publicatie van een fundamenteel herziene tijdreeks van de zonnevlekken in 2014.

De actuele zonnecyclus (cyclus 24) die begonnen is in december 2008, is heel bijzonder in vergelijking met de laatste voorafgaande cycli (zie figuur 2.1). Deze karakteriseert zich door een langzame stijging van de zonne-activiteit voorgesteld door het aantal vlekken en deze bleef zwak tot het maximum bereikt werd in april 2014. De zonne-activiteit van cyclus 24 is één van de zwakste ooit waargenomen sinds het begin van de 20ste eeuw. Deze cyclus is momenteel in zijn dalende fase.

Tot slot denken wij dat het postulaat van de langetermijnvariatie van het TSI-niveau door 'Kalme Zon', niet langer gerechtvaardigd is. De laatste 300 jaar (sinds het Maunder Minimum) kent de zon in plaats van een langzaam stijgende activiteit, eerder een langetermijnmodulatie met periodes van ongeveer 100 jaar waarbij 'grote minima' bereikt werden rond 1810 en 1910.

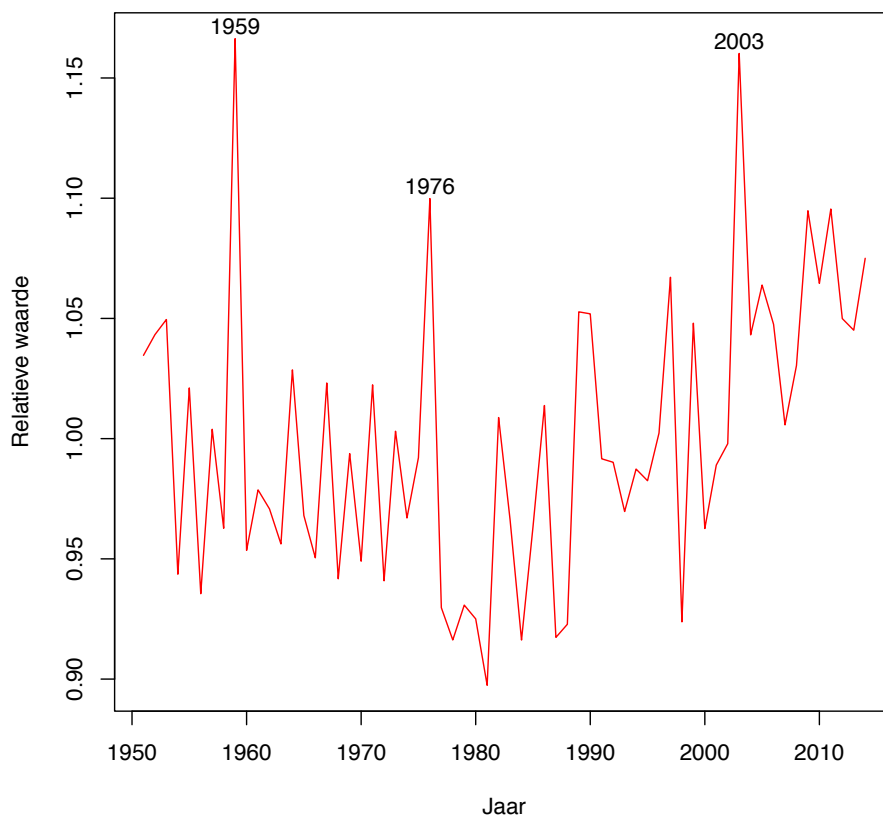
## Zonnestraling en aerosolen in Ukkel

Het KMI meet in Ukkel respectievelijk sinds 1951 en sinds 1985 de globale zonnestraling en de hoeveelheid aerosoldeeltjes in de atmosfeer. Informatie over de zonnestraling op langere termijn is zelfs beschikbaar via de metingen van de zonneschijnduur, die in Ukkel bestaan sinds 1887 (zie hoofdstuk 1).

De globale zonnestraling aan de grond is de hoeveelheid zonne-energie die invalt op een horizontaal vlak. Deze parameter hangt in de eerste plaats af van de hoeveelheid bewolking (een hoge zonnestraling komt overeen met een lage bewolking) en in de tweede plaats van de transmissie van de onbewolkte atmosfeer, die op zijn beurt afhangt van parameters zoals de hoeveelheid waterdamp, de hoeveelheid ozon en de aanwezigheid van aerosolen in de atmosfeer.

De langste meetreeks van de globale zonnestraling in België is deze van Ukkel, die in 1951 gestart werd. De rode curve in figuur 2.2 toont de relatieve waarde van de jaarlijkse cumulatieve waarde (relatief t.o.v. het gemiddelde over de volledige periode 1951-2014 van deze globale zonnestraling, i.e. 990 kWh/m<sup>2</sup>).

### Jaarlijkse globale zonnestraling te Ukkel



Figuur 2.2. Relatieve variatie van de jaarlijkse globale zonnestraling in Ukkel tijdens de periode 1951-2014.

Uit de observaties komen de jaren 1959, 1976 en 2003 naar voren als jaren met een uitzonderlijk hoge zonnestraling. Een gedetailleerde analyse van halfuurlijkse stralingsmetingen waarbij het effect van de variabele bewolking gescheiden wordt van de variaties van de zonnestraling in een wolkeloze atmosfeer, toont aan dat de uitzonderlijk zonnige jaren 1959, 1976 en 2003 te wijten waren aan een uitzonderlijk lage bewolking in deze jaren.

Tijdens de periode van 1951 tot 1984 is er een afname van de zonnestraling met 6,3%, wat overeen komt met de 'global dimming'<sup>7</sup> die internationaal vastgesteld werd. Tijdens de periode van 1984 tot 2014 is er een toename van de zonnestraling met ongeveer 12%, en dit komt overeen met de recente globale stijging die internationaal door het BSRN (Baseline Surface Radiation Network) vastgesteld werd. Deze langetermijnveranderingen van de zonnestraling kunnen enkel verklaard worden door veranderingen in de hoeveelheid aerosolen (zie verder), die samenhangen met de luchtvervuiling. (zie [Wild, 2009] als referentie).

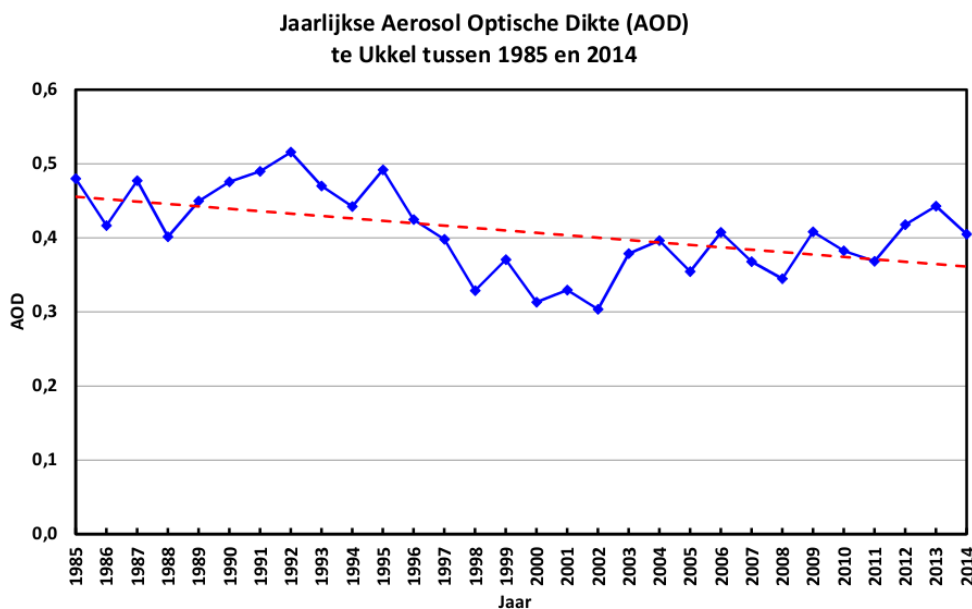
De gemiddelde temperaturen in Ukkel (zie hoofdstuk 1, figuur 1.1) tonen tijdens de periode van de global dimming geen systematische toename. De temperatuursprong in 1987-1988 en de warme anomalie in 2006-2007 (seizoenrecord voor drie opeenvolgende seizoenen van de herfst van 2006 tot de lente van 2007) gebeurden pas tijdens de periode van toenemende zonnestraling.

Sinds 1985 worden de aerosol optische dikten (AOD's) in het uv-B-golflengtegebied in Ukkel gemeten. De AOD karakteriseert de vermindering van de hoeveelheid zonnestraling aan de grond door de aerosolen en is direct verbonden met het aantal deeltjes in de atmosfeer. Als de AOD groter is, zijn er meer deeltjes in de lucht en is de zonnestraling aan de grond lager.

<sup>7</sup> Global dimming: de vermindering van de hoeveelheid zonnestraling die het aardoppervlak bereikt en die op verschillende plaatsen ter wereld werd vastgesteld aan het begin van de jaren 1950 tot ongeveer het midden van de jaren 1980.

De jaarlijkse gemiddelde waarden van de AOD's vanaf 1985 tot 2014 worden samen met een trendlijn in de onderstaande figuur 2.3 getoond. De totale trend is duidelijk negatief (-0,8 %/jaar), wat betekent dat de hoeveelheid aerosoldeeltjes in de atmosfeer gedurende deze periode afgenomen is. Dit verklaart de toename van de zonnestraling in Ukkel (zie figuur 2.2). De daling in AOD vond voornamelijk plaats tussen 1985 en 2002. Sindsdien lijken de AOD-waarden zich relatief gestabiliseerd te hebben.

De hoge AOD-waarden in 1992 zijn toe te schrijven aan de uitbarsting van de Pinatubo-vulkaan in 1991 in het zuidelijk halfrond, waarbij deze vulkaan een enorme hoeveelheid deeltjes in de atmosfeer geblazen heeft. Dit fenomeen illustreert het wereldwijde karakter van de verdeling van aerosolen en dus ook van de hoeveelheid zonnestraling aan de grond.



Figuur 2.3. Aerosol Optische Dikte (AOD) in Ukkel tijdens de periode 1985-2014.

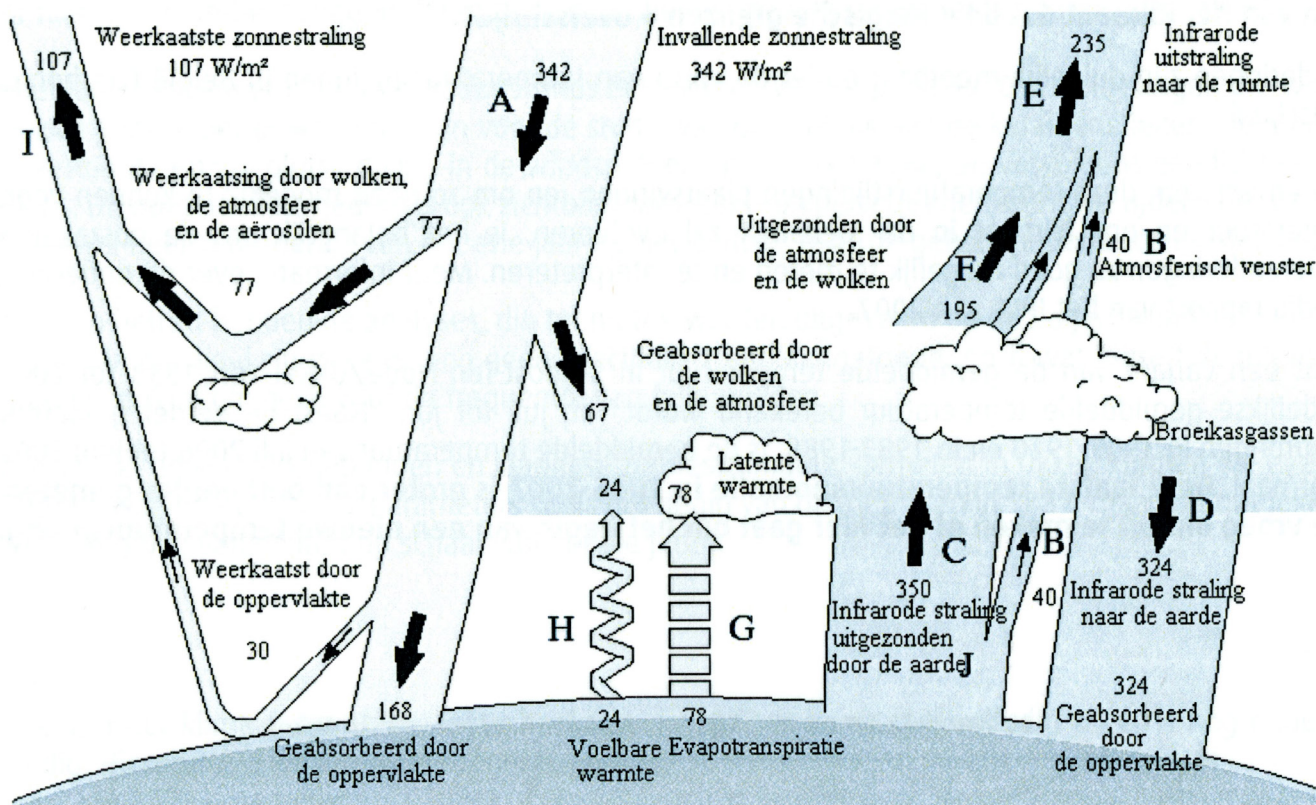
Bijgevolg kunnen we dus niet zonder meer enkel de toenemende broeikasgassen (zie IPCC) verantwoordelijk stellen voor de recente temperatuurstijging, maar moet ook de toenemende zonnestraling in rekening gebracht worden. In de periode van 1951 tot 1984 werd de opwarming door de toenemende broeikasgassen tegengewerkt door de afkoeling door de afnemende zonnestraling, wat de stabiliteit van de temperatuur over deze periode kan verklaren. In de periode van 1984 tot nu werd de opwarming door de toenemende broeikasgassen versterkt door de opwarming door de toenemende zonnestraling, hetgeen de recente opwarming kan verklaren.

De belangrijkste parameter die de langetermijnveranderingen van de hoeveelheid zonnestraling in Ukkel beïnvloedt, is de hoeveelheid aerosolen die waarschijnlijk veroorzaakt wordt door vervuiling van de atmosfeer. De menselijke activiteit heeft dus niet alleen een opwarmend effect door de toename van de broeikasgassen, maar ook een afkoelend effect door de aerosolen afkomstig van de vervuiling van de atmosfeer.

Door het gebrek aan informatie omtrent de verdeling van de aerosolen in de tijd en in de ruimte, zijn ze tot op heden nog steeds één van de grootste onzekerheden binnen de huidige klimaatstudies.

### De energiebalaans van de Aarde gemeten vanuit de ruimte

Het klimaat op Aarde wordt bepaald door het evenwicht aan de top van de atmosfeer tussen enerzijds opwarming door inkomende zonnestraling (middelste pijl bovenaan 'invallende zonnestraling' in figuur 2.4), en anderzijds afkoeling door reflectie van zonnestraling (linkse pijl 'Weerkaatste zonnestraling') en door uitzending van infrarode warmtestraling (rechtse pijl 'Infrarode uitstraling naar de ruimte'). De toename van broeikasgassen in de atmosfeer zorgt voor een netto opwarming van de Aarde doordat ze de uitgezonden infrarode warmtestraling vermindert.



Figuur 2.4. De componenten van de energiebalans van de Aarde: de verschillende soorten energie-uitwisselingen en hun interacties met de atmosfeer en het aardoppervlak. De weergegeven getallen duiden de energiestromen aan, uitgedrukt in W/m<sup>2</sup> als jaargemiddelde waarde voor onze planeet.

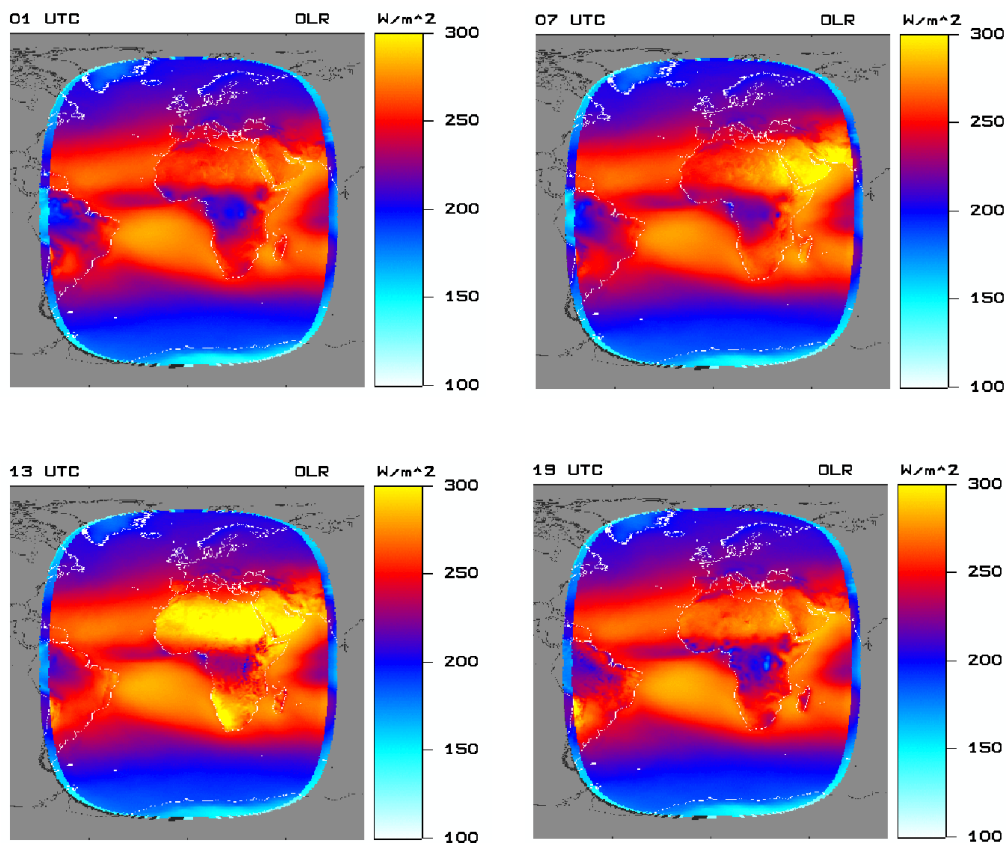
Zowel de reflectie van zonnestraling als de uitzending van infrarode warmtestraling wordt sterk beïnvloed door de aanwezigheid van wolken. Er bestaat nog een grote onzekerheid over de reactie van de hoeveelheid bewolking op de temperatuurstijging ten gevolge van de toegenomen broeikasgassen. Het is zelfs niet geweten of de bewolking zal toenemen en hierdoor de opwarming zal tegenwerken (tegenkoppel-effect), of dat de bewolking zal afnemen en hierdoor de opwarming zal versterken (meekoppel-effect). Om algemene conclusies te kunnen trekken, zijn satellietmetingen over een groot gebied en over een lange periode nodig.

### Klimatologie GERB

Om de dagelijkse variatie van de uitgaande straling van de Aarde te meten, werd het Geostationary Earth Radiation Budget (GERB)-instrument ontwikkeld door het Verenigd Koninkrijk, België en Italië. Het belangrijkste deel van de gegevensverwerking gebeurt door het KMI. GERB maakt sinds 2003 metingen van de energiebalans boven Europa en Afrika vanaf de Europese geostationaire weersatellieten Meteosat 8 en Meteosat 9.

De onderstaande figuur 2.5 toont de door GERB gemeten uitgaande infrarode straling, uitgemiddeld over een periode van 7 jaar van februari 2004 tot en met januari 2011, voor 01:00 UTC, 07:00 UTC, 13:00 UTC en 19:00 UTC. De blauwe zone boven Centraal Afrika komt overeen met de lage infrarode straling van de koude wolke toppen van tropische onweerswolken. De rood/gele zones op de breedtegraden rond 30° komen overeen met de hoge infrarode straling van de grotendeels onbewolkte subtropische hogedrukgebieden. In de loop van de dag warmt de aarde op (verandering van gele naar rode kleur) onder invloed van de zon die zich verplaatst van oost naar west (gele zone aan de oostkant om 07:00 UTC). Eerst krimpt de zone van de tropische onweerswolken doordat ze opgelost worden door de zonnestraling (kleine blauwe zone om 13:00 UTC), later ontstaat nieuwe convectie door het warme aardoppervlak (toegenomen blauwe zone om 19:00 UTC). Dit soort waarnemingen is van groot nut voor de validatie van de parameterisatie van tropische convectie in klimaatmodellen, die nog altijd problematisch zijn.





Figuur 2.5. Dagelijkse variatie van de uitgaande infrarode straling van de aarde gemeten met het Gerb-instrument.

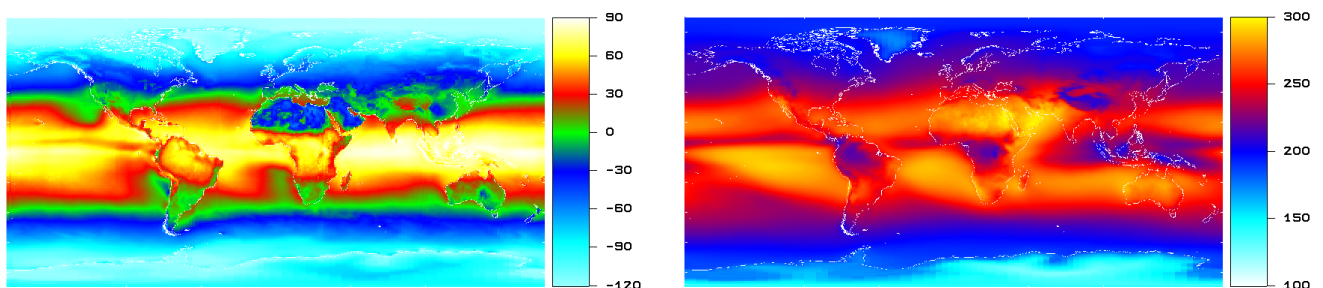
Top links: straling om 01:00 UTC. Top rechts: straling om 07:00 UTC.

Onder links: straling om 13:00 UTC. Onder rechts: straling om 19:00 UTC.

De uuraanduiding UTC (Universal Time Coordinated) is de internationale uurreferentie. In België, tijdens de zomerperiode, is het wettelijke uur 2 uur vooruit op de UTC-uuraanduiding en, tijdens de winterperiode, is deze 1 uur vooruit op de UTC-aanduiding.

## Klimatologie CERES

Het KMI heeft eveneens de metingen van het CERES-instrument op de Terra-satelliet voor de periode van februari 2000 tot maart 2010, bestudeerd.



Figuur 2.6. 10 jaarlijkse CERES-klimatologie van de netto inkomende straling (links) en de uitgezonden thermische straling (rechts). De kleurenschalen duiden energiefluxen in  $W/m^2$  aan.

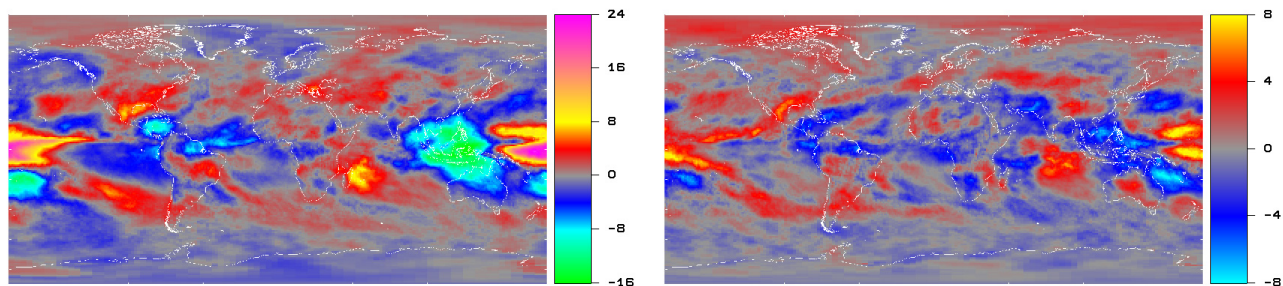
Figuur 2.6 (links) toont de klimatologie van de netto inkomende straling. De rode en gele kleuren in de buurt van de evenaar duiden een netto energietoevoer (opwarming) aan, terwijl de donker- en lichtblauwe kleuren in de buurt van de polen een netto energieafvoer (afkoeling) aanduiden. De algemene circulatie in de atmosfeer en in de oceanen werkt als een gigantische thermische motor die het surplus aan energie rond de evenaar afvoert naar de polen.

Figuur 2.6 (rechts) toont de klimatologie van de uitgezonden thermische straling, ook aangeduid als Outgoing Longwave Radiation (OLR). De blauwe kleuren rond de evenaar duiden de lage OLR-waarden aan die overeenkomen met de koude wolke toppen van de tropische onweerswolken die vooral boven land gevormd worden en overeenkomen met stijgende luchtstromen. De omliggende gele kleuren duiden op hoge OLR-waarden in de subtropische hogedrukgebieden die overeenkomen met dalende luchtstromen. De zogenaamde Hadley-circulatie wordt gevormd door stijgende tropische luchtstromen en dalende luchtstromen in noordelijke en oostelijke richting. De zogenaamde Walker-circulatie wordt gevormd door stijgende tropische luchtstromen en dalende luchtstromen in westelijke en oostelijke richting.

De tropische convectie (onweer) wordt veroorzaakt door de dagelijkse golf van opwarming door de zon die rond de Aarde draait van oost naar west. Het land warmt sneller op dan de oceaan, waardoor de tropische convectie meestal boven land ontstaat. Twee stabiele maxima van convectie (herkenbaar als OLR-minima in figuur 2.6 (rechts)) bestaan boven de landmassa's van Zuid-Amerika en Centraal-Afrika. Een derde convectiemaximum bestaat rond Indonesië, met een westelijke tak boven de Indische Oceaan, en een oostelijke tak boven de Stille Oceaan. Aangezien er niet veel land in dit gebied aanwezig is, is het 'Indonesische' convectiemaximum niet stabiel; deze instabiliteit geeft aanleiding tot de welbekende El Niño<sup>8</sup>/La Niña<sup>9</sup>-variabiliteit, die de belangrijkste meerjaarlijkse klimaatvariabiliteit is.

### Versterking van La Niña sinds 2000

We gebruiken de zogenaamde Multivariate ENSO Index (MEI) om de meerjaarlijkse El Niño/La Niña-variabiliteit te karakteriseren. Over de periode van februari 2000 tot maart 2010, toont de figuur 2.7 (links) de gemiddelde variatie aan tijdens een La Niña-jaar in vergelijking met een El Niño-jaar. Tijdens een La Niña-jaar komen de westelijke en de oostelijke tak van het Indonesische convectiemaximum bij mekaar, en de OLR-waarden verlagen rond Indonesië (zie de groene kleur in figuur 2.7 (links)). De hoge neerslag die overeenkomt met een lage OLR neemt toe en veroorzaakt overstromingen in Indonesië, Zuid-oost-Azië en Australië.



Figuur 2.7.

Links: veranderingen in Outgoing Longwave Radiation (OLR) in La Niña-jaren tegenover El Niño-jaren.  
Rechts: langetermijnveranderingen in OLR van 2000 tot 2010. De kleurschalen duiden de fluctuatie in  $W/m^2$  aan.

De Walker-circulatie zorgt voor een 'communicatie' tussen de drie convectiemaxima. Wanneer één maximum zich verplaatst, verschuiven de andere mee in een 'teleconnectie' patroon. Tijdens een La Niña-jaar neemt de OLR boven bepaalde gebieden (blauw en groen in figuur 2.7 (links)) af en boven andere gebieden (paars, geel en rood in figuur 2.7 (links)) toe. Bijvoorbeeld in de zuidelijke Verenigde Staten is er een toenemende OLR en dus een toenemende droogte tijdens La Niña.

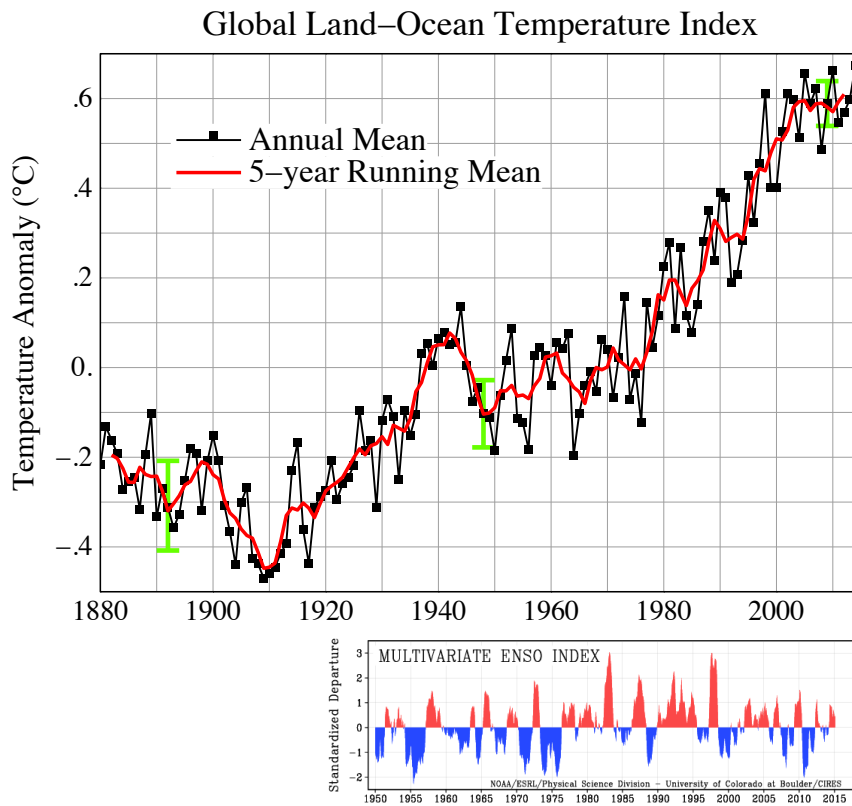
Figuur 2.7 (rechts) toont de systematische variatie van de OLR over de periode van februari 2000 tot maart 2010. De variaties werden berekend door de vergelijking van de gemiddelde OLR over de vijf eerste jaren en de gemiddelde OLR van de vijf laatste jaren. Het algemene patroon van figuur 2.7 (rechts) is gelijkaardig aan dat van figuur 2.7 (links), dus we kunnen besluiten dat er van 2000 tot 2010 een gemiddelde versterking is van La Niña.

8 Een *El Niño* jaar wordt gekenmerkt door oceaantemperaturen die in het oostelijke deel van de equatoriale Stille Oceaan hoger zijn dan normaal en door klimatologische verstoringen in de regio en op grotere schaal.  
9 Een *La Niña* jaar wordt in tegenstelling daarvan gekenmerkt door oceaantemperaturen die in het oostelijke deel van de equatoriale Stille Oceaan zwakker zijn dan normaal, maar eveneens door klimatologische verstoringen.



De bovenste grafiek van figuur 2.8 toont de evolutie van de gemiddelde jaarlijkse temperatuur van de planeet gedurende de periode 1880-2014 volgens de berekeningen van de NASA (GISS). De onderste grafiek van de zelfde figuur toont de waarden van de MEI-index om de fasen van El Niño/ La Niña (zie hoger) aan te duiden voor de periode 1950-2014. De vergelijking van deze twee gegevensreeksen toont dat de gemiddelde versterking van La Niña sinds 2000 gepaard gaat met een ogenschijnlijkke pauze in de opwarming van de Aarde.

Daartegenover staat de periode tussen 1976 en 2000 die gekenmerkt werd door een opmerkelijke stijging van de temperatuur en een reeks intense El Niño-fasen.



Figuur 2.8 Bovenste deel : Globale gemiddelde jaarlijkse temperatuursevolutie tussen 1880 en 2014. Onderste deel: Evolutie van de MEI-index die het fenomeen El Niño/La Niña karakteriseert tussen 1950 en 2014. Tijdens een El Niño-fase is de index hoog (rode waarden) en ze is zwak (blauwe waarden) tijdens een La Niña-jaar.

Er is een opvallende gelijkenis tussen de periode van 1945 tot 1980, en de periode na 2000: beide periodes kenden geen globale temperatuurstijging en sterke Las Niñas.

Voor de periode van 1945 tot 1980 weten we met grote waarschijnlijkheid (Wild, 2009) dat dit te wijten was aan de toename van ‘Westerse’ luchtvervuiling in de Verenigde Staten en Europa, die leidde tot een grotere reflectie van zonlicht, dus minder absorptie van zonnearmte.

Het lijkt alsof de geschiedenis zich herhaalt want recent is er een sterke toename van de luchtvervuiling boven Zuidoost-Azië die samengaat met de economische ontwikkeling van China en Indië en met een globale temperatuurstagnatie na 2000, gelijkaardig aan wat er gebeurd is met de Westerse economische ontwikkeling na 1945.

De grote vraag is wat is de oorzaak en wat is het gevolg van deze globale veranderingen. Wordt alles veroorzaakt door de luchtvervuiling of gaat het gewoon om een natuurlijke variatie?

De eerste hypothese is dat de relatieve afkoeling door minder absorptie van zonnestraling de oorzaak is van de langdurige versterkingen van het La Niña fenomeen en van de plateaus in de globale temperatuur tussen 1945 en 1980 en na 2000.

De alternatieve hypothese is dat de langdurige versterkingen van La Niña uitingen zijn van een natuurlijke oscillatie – genaamd Pacific Decadal Oscillation (PDO) – die gepaard gaat met uitwisselingen van energie tussen de oceaan en de atmosfeer. Tijdens La Niña wordt energie getransfereerd van de atmosfeer naar de oceaan – dus koelt de atmosfeer relatief af, terwijl tijdens El Niño energie getransfereerd wordt van de oceaan naar de atmosfeer.

De onderstaande figuur, overgenomen uit Wild (2012), toont de veranderingen van de zonnestraling aan de grond in verschillende delen van de wereld in de periodes 1950-1980, 1980-2000, en na 2000. Na 2000 is er een duidelijke daling van de hoeveelheid zonnestraling aan de grond in China en in Indië wat te verklaren valt door de toegenomen luchtvervuiling.

	1950s – 1980s	1980s – 2000	Na 2000
<b>VS</b>	-6	5	8
<b>Europa</b>	-3	2	3
<b>China / Mongolia</b>	-7	3	-4
<b>Japan</b>	-5	8	0
<b>India</b>	-3	-8	-10

*Figuur 2.9. Veranderingen in de zonnestraling aan de grond in verschillende regio's met een goede dichtheid van het meetnet gedurende 3 periodes. De periode 1950-1980 (linkse kolom) toont een overwegende daling ("dimming"), de periode 1980-2000 (middelste kolom) toont een gedeeltelijk herstel ("brightening") op verschillende plaatsen, met uitzondering van Indië en de recente ontwikkelingen na 2000 (rechtse kolom) tonen verschillende tendensen. De cijfers duiden op typische schattingen uit de literatuur voor de specifieke regio's en periodes en worden weergegeven in  $w/m^2$  per decade.*

### 2.3 Het KMI en Ozon.

Ozon is een gas dat zich in de atmosfeer bevindt en dat bestaat uit 3 atomen zuurstof (chemische formule  $O_3$ ), in tegenstelling tot de gewone moleculaire zuurstof die slechts uit twee atomen bestaat ( $O_2$ ). De grootste ozonconcentraties bevinden zich in de hogere luchtlagen (20-25 km hoogte).

Ozon ontstaat door de wisselwerking tussen gewone zuurstof, zonlicht en minderheidsbestanddelen in de atmosfeer. Eén van de bijzondere eigenschappen van ozon is de sterke absorptie van uv-straling uit het zonlicht. Door de sterke absorptie van de straling zorgt deze ozonlaag voor het specifieke temperatuurverloop met de hoogte: in de onderste luchtlagen (de troposfeer<sup>10</sup>) neemt de temperatuur af met de hoogte, terwijl dit daarboven (stratosfeer<sup>11</sup>) niet meer het geval is.

Ozon is een zeer onstabiele molecuule waardoor zelfs kleine concentraties van bepaalde chemische stoffen grote verschuivingen in het evenwicht kunnen veroorzaken. Een voorbeeld hiervan zijn de chloorverbindingen die door het gebruik van freonen in spuitbussen en koelinstallaties in de stratosfeer terecht kwamen. Deze chloorverbindingen kunnen bij bepaalde omstandigheden de ozonlaag aantasten met als gevolg een toename van de intensiteit van de schadelijke uv-straling bij de grond. Na de verbanning van de freonen (Protocol van Montreal in 1987) zou op lange termijn de vroegere toestand van de ozonlaag hersteld moeten worden. Om na te gaan of dit effectief gebeurt, is het nodig de evolutie van de ozonlaag waar te nemen.

In de troposfeer stelt zich een ander probleem want ozon is een agressief gas dat bij grote concentraties bijvoorbeeld ademhalingsproblemen kan veroorzaken. Ozonconcentraties in de troposfeer variëren sterk, afhankelijk van de meteorologische omstandigheden en van de concentraties aan bepaalde chemische componenten (luchtvervuiling). In de troposfeer wordt erover gewaakt dat de ozonconcentraties niet te hoog oplopen.

<sup>10</sup> Troposfeer : atmosferische regio waar de temperatuur afneemt met de hoogte (tussen de oppervlakte en 10 km hoogte). De top van de troposfeer wordt 'tropopauze' genoemd.

<sup>11</sup> Stratosfeer : atmosferische regio boven de tropopauze, waar de temperatuur niet meer afneemt met de hoogte (ongeveer tussen 10 en 50 km hoogte).

Om de hoeveelheid ozon in de atmosfeer ("dikte van de ozonlaag") te meten, maakt men gebruik van verschillende technieken:

- Van op de grond meet men de intensiteit van het zonlicht bij specifieke golflengten (in het uv-gebied) en uit de kennis van het absorptiespectrum van ozon leidt men de ozonconcentratie af. Pionierswerk hierover werd uitgevoerd door Dobson, naar wie niet alleen een instrument genoemd is, maar ook een eenheid voor de dikte van de ozonlaag: de Dobson-eenheid (DE). Deze stemt overeen met een dikte van een 100ste van een mm bij een druk van 1 atm (1013.25hPa) en 0°C. Boven onze streken varieert de dikte van de ozonlaag rond de 320 DE, wat dus correspondeert met een laagje van ongeveer 3 mm bij standaardvoorwaarden.

Het KMI gebruikt het modernere Brewer-instrument (zie figuur 2.10) om de dikte van de ozonlaag op lange termijn te meten.



*Figuur 2.10. Het Brewer-instrument op het dak van het KMI*

- Een andere methode om informatie over ozon in de atmosfeer te verwerven, is een chemische sensor aan een ballon (zie figuur 2.11) te laten opstijgen door de verschillende luchtlagen en zo de verticale verdeling van ozon vast te stellen.



*Figuur 2.11. Lancering van een meteorologische ballon met ozonsensor te Ukkel.*

- Waarnemingen vanuit de ruimte geven dan weer een globaal beeld van de ozonverdeling.

Ozon bij de grond wordt meestal gemeten met toestellen die gebaseerd zijn op de uv-absorptie van het gas. Uiteraard geven de ozonpeilingen ook informatie over ozon in de troposfeer. De gevoeligheid van satellietmetingen voor troposferisch ozon is echter klein.

In het kader van internationale bewaking van de atmosfeer voert het KMI reeds geruime tijd ozonwaarnemingen vanaf de grond en met ballonpeilingen uit in Ukkel en hieronder worden enkele resultaten van deze ozonmetingen van het KMI voorgesteld:

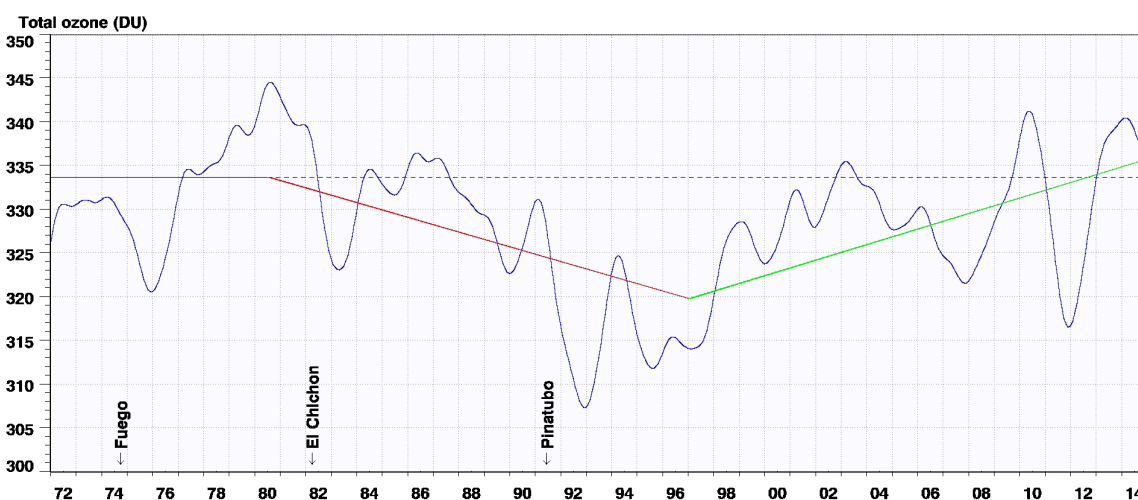
## Een lange traditie in de waarneming van de ozonlaag

Sinds 1969 worden er in Ukkel ongeveer drie keer per week ozonpeilingen uitgevoerd. Deze ballonpeilingen leveren verticale profielen van druk, temperatuur, relatieve vochtigheid, wind en ozon tot een hoogte van ongeveer 32 km. Hierdoor beschikt het KMI, samen met Hohenpeißenberg (Duitsland) en Payerne (Zwitserland), over één van de langste tijdreeksen van ozonprofielen ter wereld. Daarnaast wordt sinds 1971 de totale dikte van de ozonlaag dagelijks gemeten met spectrofotometers. Dit soort tijdreeksen zijn fundamenteel voor het bestuderen van veranderingen in de atmosfeer op lange termijn. Echter, voor deze tijdreeksen bruikbaar zijn, moeten ze gecontroleerd worden op mogelijke instrumentele effecten die de kwaliteit van de waarnemingen negatief beïnvloeden. De tijdreeksen van Ukkel van zowel de peilingen als de spectrofotometers werden grondig nagekeken en verbeterd en zodoende gehomogeniseerd waardoor ze geschikt zijn voor klimatologische studies.

## Evolutie van de dikte van de ozonlaag

Een analyse van de gehomogeniseerde tijdreeks van de totale dikte van de ozonlaag in Ukkel is te zien in figuur 2.12, die het jaarlijks glijdend gemiddelde (blauwe lijn) sinds het begin van de waarnemingen toont.

Uit metingen van de hoeveelheid ozonafbrekende stoffen (in het bijzonder de chloorfluorkoolwaterstoffen of CFK's), uitgevoerd door de Universiteit van Luik, blijkt dat de concentraties van deze stoffen rond het midden van de jaren 1990 een maximum bereikten. Als gevolg van de effectieve uitvoering van het protocol van Montreal<sup>12</sup>, dat de productie van dergelijke stoffen verbood, is er nadien een lichte afname merkbaar. Daarom werd een stapsgewijze trendberekening voor verschillende periodes uitgevoerd. Tot 1980 werd er geen trend verwacht. Deze periode wordt dan ook gebruikt om een referentieniveau te berekenen, voorgesteld door de horizontale zwarte lijn in figuur 2.12. Daarop volgt er een neerwaartse tendens tot midden de jaren 1990 (-0,25% per jaar, rode lijn) met daarna een schijnbaar herstel (+0,28%/jaar, groene lijn).



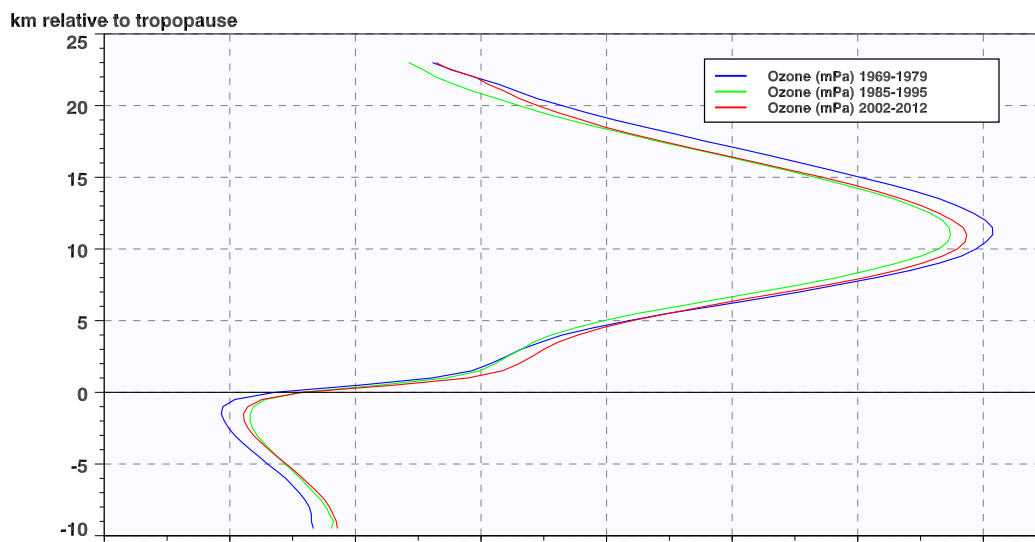
Figuur 2.12. Dikte van de ozonlaag (in DE) boven Ukkel met stapsgewijze trendberekening (1972-2014).

<sup>12</sup> Het protocol van Montreal werd geratificeerd op 16/09/1987 en is in voege getreden op 01/01/1989.

## Interpretatie

Men moet echter voorzichtig zijn met het interpreteren van het schijnbaar herstel van de ozonlaag in die laatste decade omdat die periode nog te kort is voor definitieve conclusies. Naast de mogelijke effecten ten gevolge van de maatregelen van het Protocol van Montreal, kan deze inversie in de trend ook veroorzaakt worden door natuurlijke schommelingen onder invloed van atmosferische omstandigheden. Het is algemeen bekend dat vulkaanuitbarstingen (enkele data van belangrijke uitbarstingen zijn aangeduid in figuur 2.12) een belangrijke invloed hebben op de hoeveelheid ozon in de atmosfeer. Gelijkaardige resultaten zijn te vinden in de internationale wetenschappelijke literatuur met gegevens van satellieten of door combinatie van data van meerdere stations. Hoewel hierdoor de statistische betrouwbaarheid van de berekeningen vergroot, blijken de resultaten zelfs dan nog niet helemaal statistisch overtuigend. Enkel verdere waarnemingen zullen al dan niet kunnen bevestigen of het om een definitief herstel van de ozonlaag, als gevolg van de beslissingen van het Protocol van Montreal, gaat dan wel om een voorbijgaande fluctuatie. Bovendien is ozon zelf een broeikasgas. De wisselwerking die er bestaat tussen de ozonconcentraties in de atmosfeer en de mogelijke opwarming van de aarde, maakt een voorspelling over het tijdstip van volledig herstel uiterst onzeker.

Aan de hand van de profielen kunnen we zien op welke hoogten deze veranderingen plaatsgrijpen. In figuur 2.13 worden de gemiddelden van drie perioden van 11 jaar met elkaar vergeleken. Het is duidelijk dat de vermindering van de totale hoeveelheid ozon volledig toe te schrijven valt aan de ozonlaag in de stratosfeer. Inderdaad, in de troposfeer is een tegengestelde tendens merkbaar (toename van ozon op leefniveau), die te wijten is aan fotochemische productie van ozon. De periode 2002-2012 vertoont zowel in de stratosfeer als in de troposfeer een toename t.o.v. periode 1985-1995.



Figuur 2.13. De verticale verdeling van ozon (in millipascal) als functie van de hoogte t.o.v. de tropopauze voor drie verschillende perioden van 11 jaar (1969-1979, 1985-1995 en 2002-2012).

Al deze waarnemingen gebeuren in het internationaal kader van de "Global Atmospheric Watch" van de Wereld Meteorologische Organisatie. Dit draagt bij tot studies van de veranderingen op lange termijn in de atmosfeer.



## 2.4 Waterdamponderzoek aan het KMI

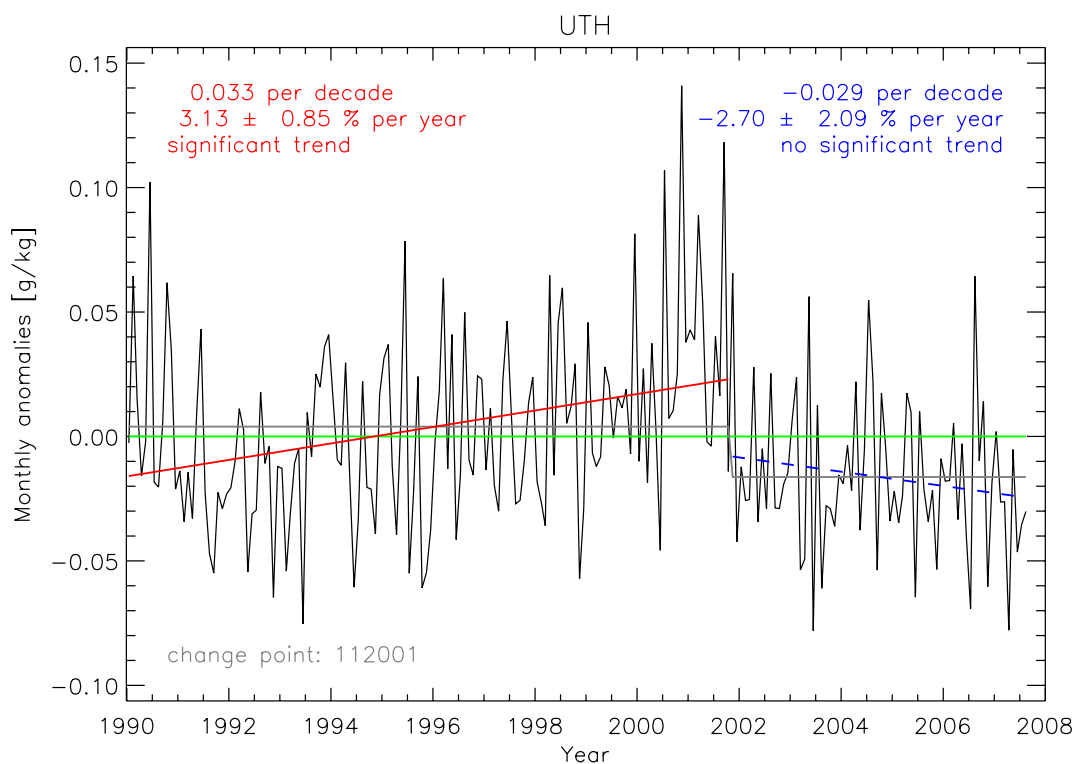
In het hele debat over de opwarming van de Aarde door de broeikasgassen zoals CO<sub>2</sub>, methaan, lachgas, ozon... vergeet men wel eens het voornaamste broeikasgas: waterdamp! Inderdaad, waterdamp houdt ook de warmte (ofwel thermische straling) die de Aarde uitstraalt, gedeeltelijk tegen. Dit zorgt voor een opwarming van de onderste luchtlagen. Waterdamp is alomtegenwoordig in de lagere atmosfeerlagen of de zogenaamde troposfeer die op een hoogte van ongeveer 11 km (in Ukkel) begrensd wordt door de tropopauze, die op haar beurt samenvalt met een lokaal minimum van de temperatuur. De waterdamp in de troposfeer wordt onder meer gevormd door de verdamping van het water uit de oceanen, zeeën en meren. Waterdamp in de atmosfeer is ook verantwoordelijk voor het ontstaan van wolken, die dan weer een gedeelte van de zonnestraling tegenhouden. Het netto effect van waterdamp is toch een opwarming van de aardoppervlakte, al zal het duidelijk zijn dat dit een complexe materie is. Het KMI doet onderzoek in twee domeinen van het waterdamponderzoek.

### Waterdamp in de bovenste troposfeerlagen

In de bovenste troposfeerlagen, als het ware gevangen onder de tropopauze, bevinden zich relatief grote hoeveelheden waterdamp onder ideale omstandigheden (temperaturen) om een grote impact te hebben op de straling uitgezonden door de Aarde. Het is echter een hele uitdaging om de hoeveelheid waterdamp in deze lagen op te meten. Het KMI heeft een studie uitgevoerd (Van Malderen and De Backer, 2010) om de evolutie van de hoeveelheid waterdamp in de bovenste troposfeerlagen in een periode van 18 jaar (van 1990 tot 2007) te onderzoeken. Voor deze periode beschikte het KMI over een homogene tijdreeks van waterdampmetingen in Ukkel met een bepaald type van radiosondes. Radiosondes zijn in feite mini-weerstations die aan een weerballon bevestigd worden en elke 2 seconden waarnemingen van de temperatuur, de druk, de hoogte, de relatieve vochtigheid en de windrichting en -snelheid uitvoeren. Deze radiosondes verschaffen zodoende verticale profielen van de temperatuur, waardoor ze ook informatie betreffende de locatie van de tropopauze boven Ukkel geven. Hierdoor werd het mogelijk om de bovenste troposfeerlagen relatief te definiëren t.o.v. de tropopauze en bijgevolg ook de hoeveelheid waterdamp in deze bovenste troposfeerlagen. Dit is een andere benadering dan de gebruikelijke absolute methode op basis van satellietwaarnemingen van waterdamp, waarbij de tropopauze niet precies kan gelokaliseerd worden.

Uit de studie blijkt dat de tijdsevolutie van de waterdamp in de atmosfeerlagen boven Ukkel gedurende de eerste decade (1990-2000) beïnvloed werd door de uitbarsting van de vulkaan Pinatubo op de Filipijnen in juni 1991. Inderdaad, door de uitstoot van vulkanische stofdeeltjes werd wereldwijd een deel van de zonnestraling afgeblokt, met een globale temperatuurdaling op het oppervlak tot gevolg. Dit had op zijn beurt weer gevolgen voor de hoeveelheid waterdamp die, ook in de bovenste troposfeerlagen en zelfs boven Ukkel, afnam tot ongeveer medio 1994 (zie figuur 2.14). Daarna herstelden zowel de temperatuur als de hoeveelheid waterdamp zich van de vulkaanuitbarsting en detecteerden we een stijging van beide elementen.

Echter, het meest markante feit uit het onderzoek, was de redelijk abrupte daling van de waterdamp in de bovenste troposfeerlagen in Ukkel in de herfst van het jaar 2001 (zie opnieuw figuur 2.14). We konden concluderen dat deze plotse daling gelinkt was aan een plotse stijging van de hoogte van de tropopauze rond hetzelfde tijdstip en bijgevolg een daling van de temperatuur van de tropopauze. Tevens vonden we aanwijzingen dat deze beweging van de tropopauze op zijn beurt veroorzaakt werd door de dynamica van de onderliggende atmosfeerlagen. In de herfst van 2001 vond er immers een significante verticale uitrekking van de troposfeer plaats. Deze gebeurtenis is geen alleenstaand feit voor Ukkel, want ook in de radiosondewaarnemingen van omliggende stations deed zich hetzelfde effect voor!



Figuur 2.14. Tijdreeks van de maandelijkse anomalieën van de hoeveelheid waterdamp in de bovenste troposfeerlagen in Ukkel, uitgedrukt in g/kg. Een maandelijkse anomalie wordt verkregen door elke maand het langetermijnmaandgemiddelde af te trekken van het maandgemiddelde. Deze techniek heeft het voordeel dat de seizoencyclus verdwijnt uit een tijdreeks. De sterke afname van de hoeveelheid waterdamp in de herfst van 2001 is duidelijk zichtbaar.

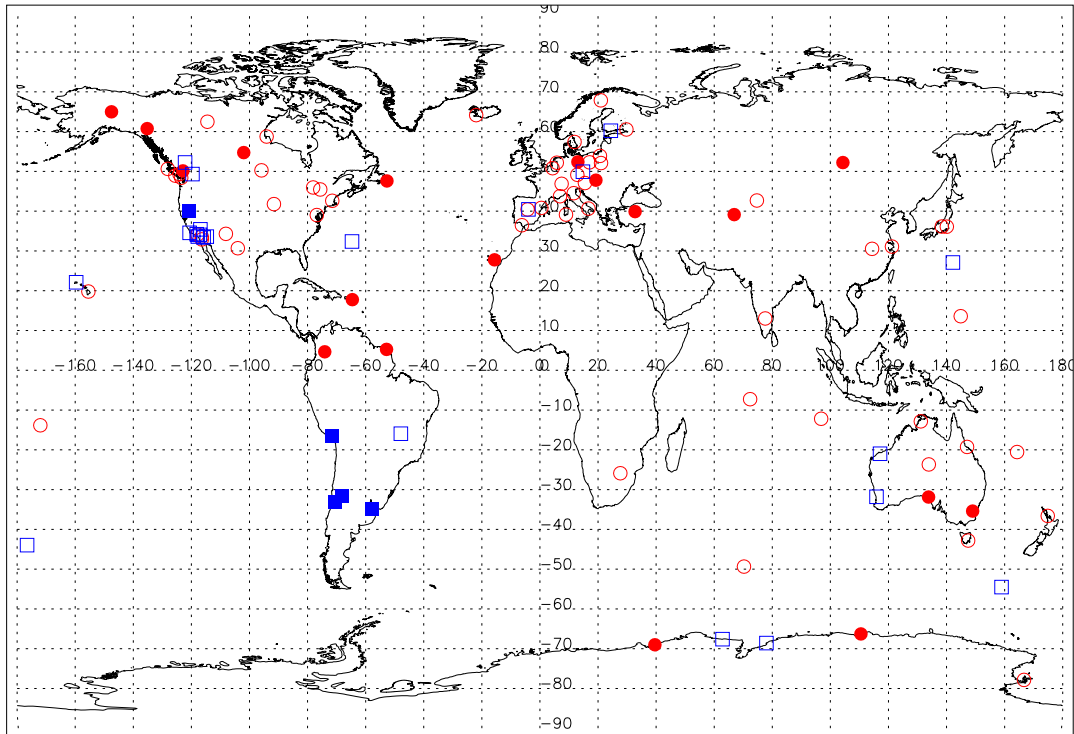
## De totale kolomhoeveelheid waterdamp

Bij het KMI wordt, in het kader van een samenwerkingsverband tussen de 3 wetenschappelijke instellingen van het plateau gelegen in Ukkel (KMI, KSB, BIRA), onderzoek gedaan naar de wereldwijde verandering van de totale hoeveelheid waterdamp (in een kolom). Deze parameter is nog sterker gelinkt aan de oppervlaktetemperatuur op basis van een wet uit de fysica (de vergelijking van Clausius-Clapeyron) die stelt dat de toename van de totale hoeveelheid waterdamp globaal gebeurt naar ratio van 7% per temperatuurstijging van 1 °C. Om deze wet te toetsen aan de waarnemingen, of omgekeerd, heb je uiteraard een betrouwbare en bij voorkeur lange tijdreeks van waarnemingen van de totale hoeveelheid waterdamp nodig.

In de eerste fase van het onderzoek (Van Malderen *et al.*, 2014b) vergeleken we daarom, voor ongeveer 30 sites wereldwijd de metingen van de totale hoeveelheid waterdamp uitgevoerd door 5 verschillende instrumenten: radiosondes, een zonnephotometer, een gps-instrument en 2 satellietinstrumenten (één actief in het ultraviolet/visueel gedeelte van het licht, een ander in het infrarood). Het lijkt misschien vreemd om een gps-instrument te gebruiken om waterdamp te meten, maar toch is dit meer dan zinvol. De aanwezige waterdamp tussen de gps-zender van het station enerzijds en de satelliet in een baan om de aarde anderzijds, is immers verantwoordelijk voor een extra vertraging tussen het uitgezonden en het ontvangen signaal. Uit onze studie blijkt zelfs dat een gps-instrument één van de meest betrouwbare instrumenten is om de totale kolomhoeveelheid waterdamp op te meten! Bovendien levert het data op met een zeer hoge frequentie (om de 5 minuten) en wordt het niet gehinderd door weersomstandigheden, in tegenstelling tot de zonnephotometer en beide satellietinstrumenten die een (minstens gedeeltelijke) wolkeloze hemel vereisen.

Na de vergelijking van de absolute hoeveelheden totale waterdamp, onderzochten we in de tweede fase van het project ook of er verschillen in trends bestaan in de totale waterdamphoeveelheid gemeten door de meest betrouwbare instrumenten van onze selectie en of de trends globaal consistent zijn (satellietwaarnemingen) of consistent tussen verschillende stations wereldwijd (gps). Figuur 2.15 toont een voorbeeld van de trends in de totale kolomhoeveelheid waterdamp voor de 101 gps-stations met data beginnende in 1995-1996, waaruit toch enkele geografische ongerijmdheden blijken. Een gevoeligheidsstudie van de trends berekend uit de gps-waarnemingen én een vergelijking met trends op basis van de langste gehomogeniseerde tijdreeks van satellietwaarnemingen (beginnende in 1995), moet ons in staat stellen om uit te maken of deze geografische ongerijmdheden te wijten zijn aan de waarnemingen zelf, of inherent zijn aan de natuurlijke variabiliteit van waterdamp ten gevolge van

de wereldwijde oppervlaktetemperatuurschommelingen. Globaal gezien kunnen we echter vaststellen dat de totale hoeveelheid waterdamp is toegenomen sinds het midden van de jaren 1990.

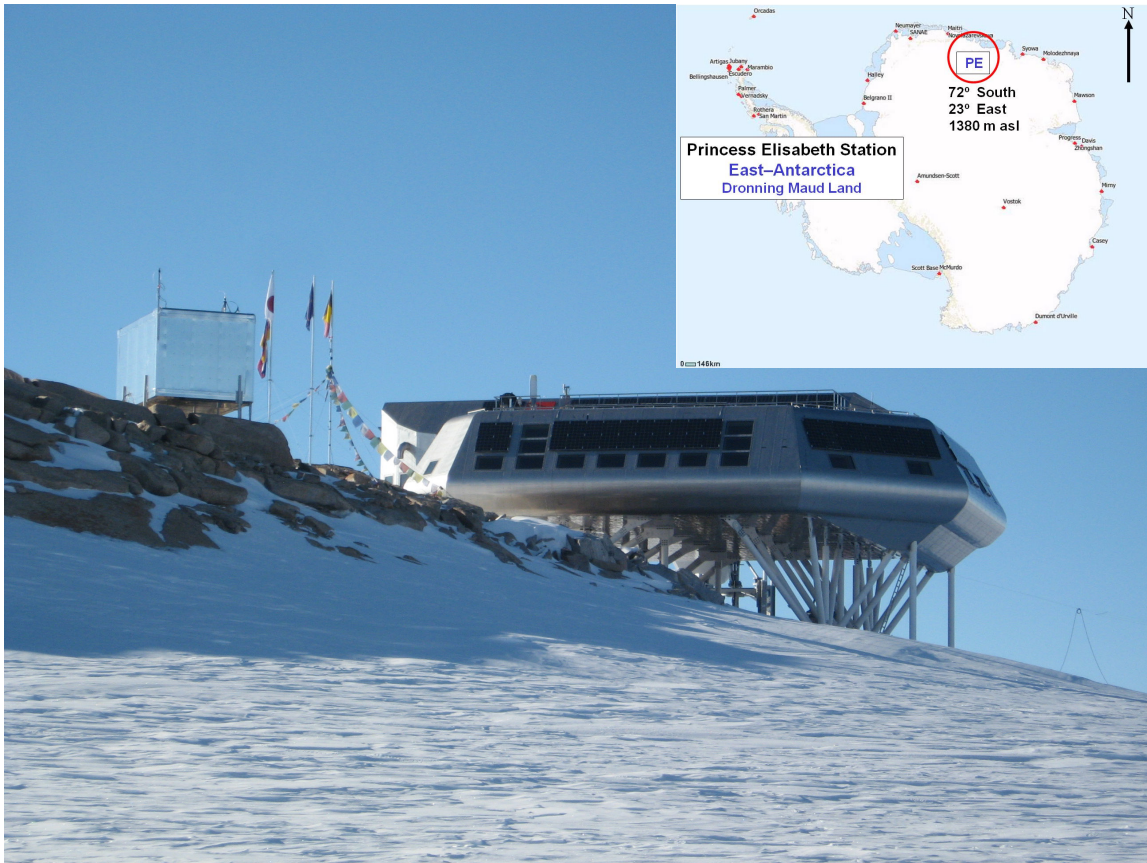


Figuur 2.15. Trends in de totale kolomhoeveelheid waterdamp voor de 101 gps-stations met data beginnende in 1995-1996. Rode cirkels duiden de stations aan met een toename in totale waterdamphoeveelheid, blauwe vierkanten staan voor de stations met een afname in waterdamp. Volle symbolen worden gebruikt voor statistisch significante trends.

## 2.5 Onderzoek in Antarctica door het KMI

Het KMI leidt het wetenschappelijk onderzoek in het Belgisch onderzoekstation in Antarctica, de Prinses Elisabethbasis in Utsteinen in de Sor Rondane Mountains in Dronning Maud Land, Oost Antarctica (zie figuur 2.16). Onder leiding van het KMI en samen met het Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie (BIRA) en de Universiteit van Gent, werd een atmosferisch observatorium voor permanent gebruik geïnstalleerd. Dit bestaat uit een reeks van 8 complementaire instrumenten op de grond die de fysische en optische eigenschappen van atmosferische aerosol, de totale hoeveelheid ozon in de atmosfeerkolom, de totale zonnestraling die de oppervlakte bereikt en de inkomende uv-A- en uv-B-straling meten.

Onze waarnemingen van de samenstelling van de atmosfeer in Antarctica zijn vooral interessant in verband met klimaatonderzoek. Antarctica speelt een belangrijke rol in het klimaat van de Aarde. Het bevat 's werelds grootste zoetwaterreservoir en het smelten ervan zou de zeespiegel aanzienlijk doen stijgen. Haar rol als koudste plaats op Aarde stuurt de circulatiepatronen in de oceaan en de atmosfeer en dus ook de verdeling van de energie rond de Aarde.

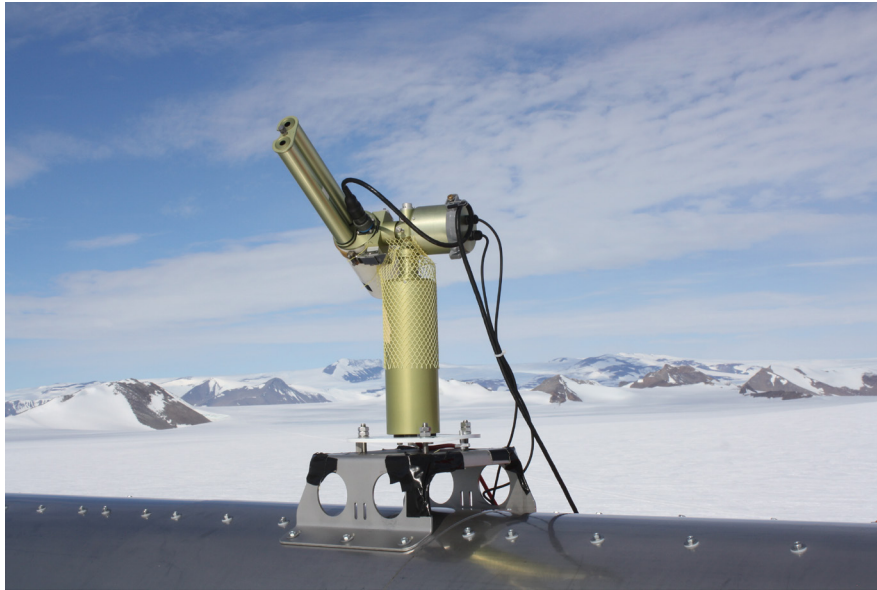


Figuur 2.16. Het Prinses Elisabeth Station op Antarctica. In de kleine container (op de foto links van het station) bevinden zich de instrumenten voor het meten van de kenmerken van de aerosolen. De ingevoegde geografische kaart toont de locatie van het station in Antarctica, evenals van de andere stations in bedrijf.

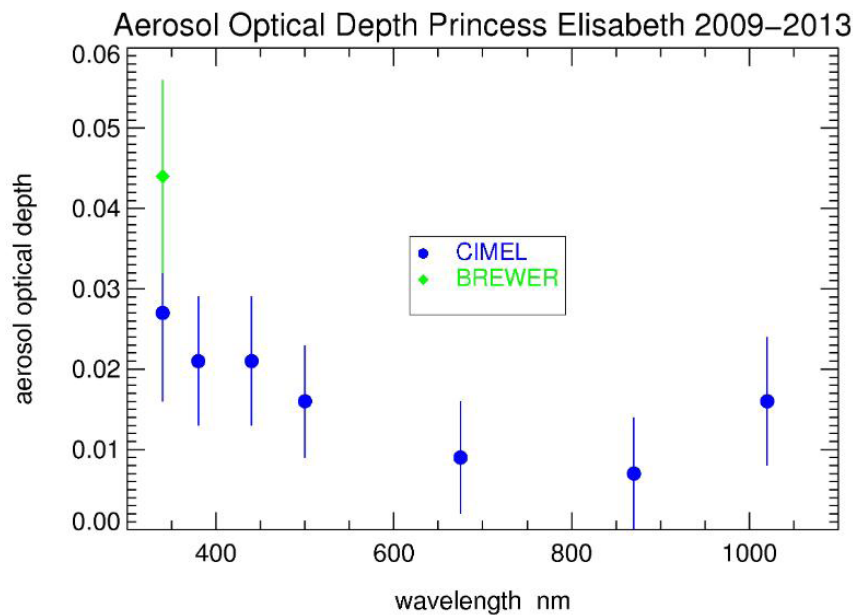
Wat het klimaat betreft, hebben aerosolen een enorm effect door het verzwakken, verspreiden en absorberen van het licht (dit is energie). De aerosolen herverdelen de energie afkomstig van de zon en beïnvloeden zo de temperatuur aan het oppervlak en in de atmosfeer. Bovendien zijn ze onmisbaar voor de vorming van regendruppels of ijskernen. Hierdoor hebben aerosolen een grote invloed op de evolutie en de levensduur van wolken en op de neerslag (en dus op de waterkringloop).

Ozon is een belangrijk atmosferisch gas dat de uv-straling vanaf de grond heel sterk absorbeert en daarom is het belangrijk om de precieze hoeveelheid te kennen. Bijkomend verschijnt elk jaar sinds meer dan 25 jaar tijdens de zuidelijke lente (september-november) het zogenaamde ozongat boven Antarctica en daarom is het belangrijk om de evolutie van de totale hoeveelheid ozon in Antarctica te volgen. Ozonvernietiging gebeurt net op die hoogteniveaus in de stratosfeer waar de ozonlaag een grote invloed heeft op de verticale temperatuurgradiënt. Hierdoor kunnen atmosferische circulatiepatronen op grote schaal beïnvloed worden.

De geïnstalleerde instrumenten in het Prinses Elisabeth Station stellen ons in staat om alle belangrijke fysische en optische eigenschappen van aerosoldeeltjes te bepalen (zie figuur 2.17). Samen met de stralingsmetingen kan de stralingsimpact van de aerosolen worden vastgesteld. Aangezien zowel de verspreidings- als de absorptiecoëfficiënten gemeten worden, kan de zogenaamde enkelvoudige albedoverspreiding rechtstreeks afgeleid worden. Dit is een belangrijke parameter voor stralingsoverdrachtberekeningen en in satelliet verbeterbare algoritmes en voor wereldwijde transport- en klimaatmodellen. Het definieert de verhouding in hoeveel van de zonnestraling geabsorbeerd wordt of verspreid wordt in andere richtingen, en daarom is het dus een indicatie voor het opwarmings- of afkoelingspotentieel van de atmosferische aerosolen.



Figuur 2.17. Zonfotometer gemonteerd op het dak van het Prinses Elisabeth Station, met uitzicht naar het zuidoosten. Deze fotometer meet op verschillende golflengten de demping van het zonlicht door atmosferische aerosolen.



Figuur 2.18. Deze grafiek toont de gemiddelden (met foutmarge) van het ultraviolet (340 nm) tot het dichtste infrarood (1020 nm) voor het 'Aerosol Optical Depth' (AOD, demping van zonlicht door de aerosolen) gedetecteerd door de zonfotometer op verschillende golflengten (blauwe stippen). De groene stip wordt verkregen uit de gegevens van een Brewer spectrofotometer die ook op het dak van het station staat. De gemiddelden werden getrokken uit de gegevens gemeten tijdens elke zuidelijke zomer (december-februari) tussen 2009 en 2013.

De zonfotometer meet de demping van de zonnestraling door aerosolen in de atmosfeer (dit heet de 'Aerosol Optical Depth', AOD). Hoe meer aerosolen er in de atmosfeer aanwezig zijn, hoe meer de zonnestraling gedempt wordt. Gezien het instrument op verschillende golflengten meet, geeft dit ons informatie over de grootte van de aerosolen en laat ons toe om te bepalen of de deeltjes meer absorberend of reflecterend zijn (zie figuur 2.18). In vergelijking met metingen in ons land (zie figuur 2.3), stellen we duidelijk verminderde concentraties van aerosolen in Antarctica (met ongeveer een factor 10) vast en ze zijn meestal zeer reflecterend.



Op het dak van het polaire station is ook een Brewer-spectrofotometer geïnstalleerd. Dit instrument verschaft, naast het meten van de totale hoeveelheid ozon in de atmosfeer, ook gegevens over de demping van zonnestraling door aerosolen in het ultraviolet (bij 340 nm, als een van de golflengten van de zonnefotometer) (zie ook AOD gemeten in Ukkel). In figuur 2.18 merkt men dat de AOD gemeten door de Brewer groter is dan die gemeten door de zonnefotometer; dit verschil kan grotendeels verklaard worden door de meettechnieken. Beide technieken bevestigen onafhankelijk van elkaar, dat de aerosolconcentratie in de atmosfeer in Antarctica zeer laag is.

De uitgebreide aerosolinstrumentatie maakt het ook mogelijk om aanvullende informatie over hun chemische aard af te leiden. Vervolgens kunnen deze gegevens gebruikt worden om de aerosolinvloed op wolken en neerslag te onderzoeken. Gezien dergelijke wolk- en neerslagwaarnemingen in het Prinses Elisabeth Station reeds bestaan, kan het aerosoleffect op wolken en neerslag worden onderzocht. Deze ensemblemetingen maken het mogelijk om verder te evalueren, te valideren en uiteindelijk regionale klimaatmodellen voor Antarctica die de oppervlaktestraling en de massabalans simuleren te verbeteren. Een beter inzicht in en modellering van de massabalans van de Antarctische ijskap is van essentieel belang met betrekking tot de wereldwijde klimaatmodellen.

## 2.6 Andere klimaatgegevens gemeten door het KMI

Zoals reeds meerdere malen in dit document werd aangetoond, is het klimaat een complex en dynamisch fenomeen dat afhankelijk is van talrijke parameters en diverse terugkoppelingsmechanismen die de modellering van zijn evolutie bemoeilijken. Hierdoor is een betere kennis van de natuurlijke variabiliteit van het klimaat van de Aarde van fundamenteel belang om mogelijke toekomstige klimaatscenario's op te stellen.

Eén van de onderzoeksdomeinen van het Geofysisch Centrum van het KMI (GFC) dat in Dourbes (Viroinval) tussen Samber en Maas gelegen is, is de klimaatreconstructie tijdens het Kwartair (dat ongeveer 2 miljoen jaar geleden begon) zich baserend op de magnetische indicatoren in de continentale klimaatarchieven zoals meersedimenten en löss/paleobodem sequenties. Deze laatste komen veelvuldig voor in het centrale deel van Noord China, waar zich een dikke laag löss afzette door de wind die tijdens de voorbije drie miljoen jaar zand en stof vanuit de woestijnen ten noorden van het plateau naar het oosten en het zuiden blies. Er bestaan ook aanzienlijke lössafzettingen in Europa en meer bepaald in Midden-België.

Löss is een glaciaal sediment dat voornamelijk wordt afgezet tijdens koude en droge klimatologische periodes (ijstijden). Tijdens interglaciale periodes wordt löss blootgesteld aan nieuwe omgevingsvoorwaarden zoals een stijging van de temperatuur, een toename van de neerslag en een verhoogde biologische activiteit die het löss geleidelijk omvormen tot een bodem, die op zijn beurt tijdens de volgende glaciële periode weer bedekt wordt door een nieuwe laag van löss.

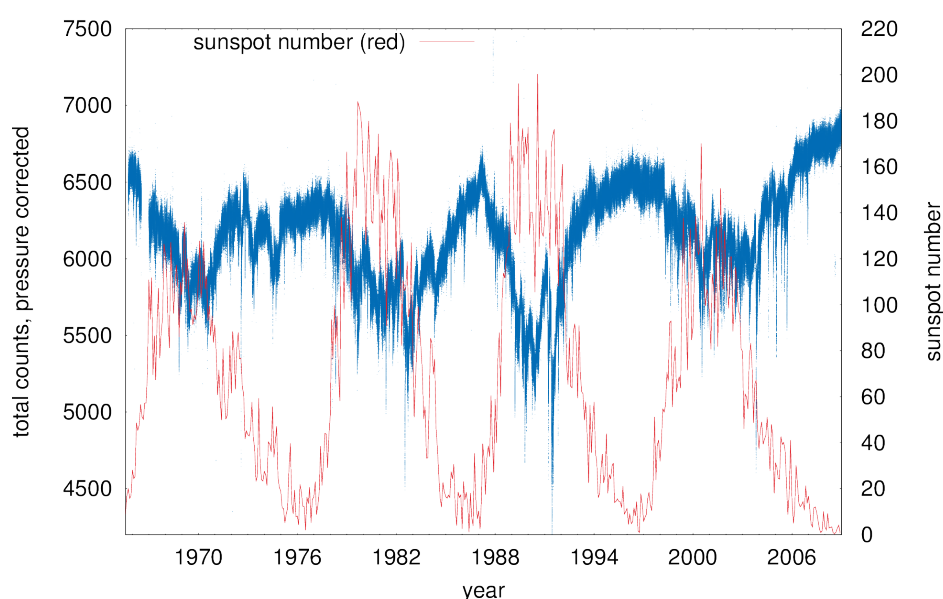
Op het Löss Plateau van China hebben de voormalige klimaatveranderingen gezorgd voor afwisselende lagen van löss en paleobodem, respectievelijk overeenkomend met koude droge en warme vochtige periodes (zie figuur 2.19). De löss- en de paleobodemlagen bevatten elk verschillende hoeveelheden van diverse magnetische ijzeroxiden, waarvan de vorming wordt gecontroleerd door de omgeving (Hus and Han, 1992). Magnetische en magnetostratigrafische eigenschappen van deze afzettingen geven niet alleen een indicatie van de intensiteit en de tijdsperiode van de klimatologische periodes in het verleden, maar ook van de neerslag en maken het zelfs mogelijk om het stelsel van de regionale winden kwantitatief te beoordelen. Deze informatie kan gebruikt worden om de natuurlijke veranderingen van het klimaat te bestuderen nog voor er antropogene invloeden waren, alsook om klimaatmodellen op lange termijn op te stellen. (Jordanova *et al.*, 2007; Djerrab *et al.*, 2013).




*Figuur 2.19. Verticale doorsnede van een löss/paleobodem-sequentie in Jiacun in de buurt van Baoji in de Volksrepubliek China. Lichtgele lagen van löss, afgezet tijdens koude droge klimatologische periodes (ijstijden), wisselen af met donkerbruine paleobodems gevormd tijdens warme vochtige klimatologische periodes (interglaciale tijdperken).*

Tot nu toe werd er weinig aandacht geschonken aan het verband tussen veranderingen in het geomagnetisch veld en klimaatveranderingen. Eén van de mogelijke mechanismen binnen deze relatie, zou de veranderingen in de stroom van kosmische straling zijn, die gemoduleerd door zonneactiviteit en vergezeld van geomagnetische wijzigingen, de vorming van wolken in de lagere atmosfeer en de albedo beïnvloedt en dus uiteindelijk ook het klimaat (zie figuur 2.20).

Bovendien is het niet uitgesloten dat er een oorzakelijk verband zou bestaan tussen de toename van de seculaire (eeuwenoude) verandering in het geomagnetisch veld en klimaatveranderingen op een tijdschaal van honderden jaren. Als dit wordt bevestigd, zou de zonneactiviteit niet de enige externe natuurlijke factor zijn die verantwoordelijk is voor de klimaatverandering. Sommige onderzoekers vonden tijdens het laatste millennium inderdaad een schijnbaar verband tussen snelle veranderingen van de veldintensiteit, bepaald door archeomagnetische technieken, en periodes van algemene afkoeling in West-Europa, bevestigd door historisch gedocumenteerde gletsjeruitbreidingen in de Alpen. Deze vaststellingen verdienen verder diepgaand onderzoek.



*Figuur 2.20. Vergelijking van de kosmische stralen waargenomen in het Geofysisch Centrum van het KMI in Dourbes vanaf 1965 (blauwe kromme, schaal links) met het aantal zonnevlekken (rode kromme en schaal rechts).*



Een ander onderzoeksdomein van het GFC bevat de studie van tweede-orde-effecten die het huidige klimaat beïnvloeden. Kosmische stralen veroorzaken ionisatie in de troposfeer die waarschijnlijk een invloed op het wolkendek heeft. Het experiment CLOUD in 2011 door CERN heeft aangetoond dat ionisatie door kosmische stralen de nucleatie van aerosolen voor zwavelzuur en ammoniak in de boven- en middenlagen van de troposfeer aanzienlijk bevordert, en die condensatiekernen voor wolkenvorming kunnen worden. Het experiment verklaart echter niet de nucleatiesnelheid in de onderste lagen van de atmosfeer. Het gehalte van kosmische stralen hangt, naast de zonneactiviteit, ook af van het aardmagnetische veld dat de biosfeer tegen de impact van energierijke deeltjes beschermt. Naast de atmosferische elektriciteit en de ionosfeer, worden het geomagnetisch veld en de kosmische stralen tijdens de laatste 50 jaren continu gemeten in het GFC.

Het KMI levert aan de wetenschappelijke gemeenschap dan ook sleutelgegevens voor de analyse van tijdreeksen om mogelijke en weinig bestudeerde verbanden tussen het geomagnetische veld, kosmische stralen, zonneactiviteit en wolkenvorming en hun invloed op het huidige klimaat op te sporen. We benadrukken hier dan ook het belang om de metingen van deze geofysische parameters in de toekomst te kunnen verzekeren wegens hun belangrijke rol die ze waarschijnlijk zullen spelen (zelfs indien dit moeilijk in te schatten valt op het huidige moment) in de dynamiek van klimaatsystemen op verschillende tijdschalen.

## Bibliografie

- De Bock, V., De Backer, H., Van Malderen, R., Mangold, A. and Delcloo, A.: Relations between erythemal UV dose, global solar radiation, total ozone column and aerosol optical depth at Uccle, Belgium. *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 12251-12270, 2014.
- Dewitte, S., Clerbaux, N., Ipe, A., Velazquez, A., Baudrez, E., Nevens, S. and Decoster, I.: Climate monitoring with Earth Radiation Budget measurements. *Proceedings of the International Radiation Symposium, AIP2012*, 1531, 612-615, 2012.
- Dewitte, S., Janssen, E. and Mekaoui, S.: Science results from the Sova-Picard Total Solar Irradiance instrument. *Proceedings of the International Radiation Symposium, AIP2012*, 1531, 688-691, 2012.
- Djerrab, A., Spassov, S., Defalía, N., Hus, J., Abdessadok, S., Ruault-Djerrab, M., Bahra, N. and Ech-Chakrouni, S.: The Middle Palaeolithic site of Birzgane (Tebessa, Algeria) : Rock magnetic property characterisation and past rainfall reconstruction. *Quaternary International*, 320, 63-74, 2014.
- Eddy, J.A.: The Maunder Minimum. *Science*, 192 (4245), 1189-1202, 1976.
- Gorodetskaya, I.V., Van Lipzig, N., Van den Broeke, M.R., Mangold, A., Boot, W. and Reijmer, C.H.: Meteorological regimes and accumulation patterns at Utsteinen, Dronning Maud Land, East Antarctic : Analysis of two contrasting years. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 1700-1715, 2013.
- Hus, J. and Han, J.: The contribution of Loess magnetism in China to the retrieval of past global changes - some problems. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 70, p. 154-168, 1992.
- IPCC: *Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]*, IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp, 2014.
- Jordanova, D., Hus, J. and Geeraerts, R.: Palaeoclimatic implications of the magnetic record from loess/palaesol sequence Viatovo (NE Bulgaria). *Geophysical Journal International*, 171, p.1036-1047, 2007.
- Van Malderen, R. and De Backer, H.: A drop in upper tropospheric humidity in autumn 2001, as derived from radiosonde measurements at Uccle, Belgium. *J. Geophys. Res.*, 115, D20114, doi:10.1029/2009JD013587, 2010.
- Van Malderen, R., De Backer, H., Delcloo, A. and Allaart, M.: Identifying the origin of anomalous High tropospheric ozone in the ozonesonde data at Uccle by Comparison with nearby De Bilt. *Atmosphere-Ocean, Ozone Special Issue*, doi:10.1080/07055900.2014.886552, 2014a.
- Van Malderen, R., Brenot, H., Pottiaux, E., Beirle, S., Hermans, C., De Mazière, M., Mies, K., Wagner, T., De Backer, H. and Bruyninx, C.: A multi-site intercomparison of integrated water vapour absorptions for climate change analysis. *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 2487-2512, 2014b.
- Verhulst, T., Stankov, S. and Rasson, J.: The geomagnetic field - an actively changing global phenomenon. *KBVE Review E Tijdschrift - Journal of the Royal Belgian Association of Electrical Engineers (KBVE)*, 130 (2), 1-6, 2014.
- Wild, M.: Global dimming and brightening: A review. *J. Geophys. Res.*, 114, Issue D10, 7 May 2009.
- Wild, M.: Enlightening Global Dimming and Brightening. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 27-37. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00074.1>, 2012.
- Wolter, K. and Timlin, S.: Measuring the strenght of ENSO events – how does 1997/98 rank ? *Weather*, 53, 315-324, 1998.