

A close-up photograph of a human eye, where the iris is replaced by a detailed image of the Earth. The eye is looking directly at the viewer, and the eyelashes are clearly visible. The overall color palette is cool, with blues and greys.

Oog voor het klimaat

Koninklijk Meteorologisch Instituut van België

Dankwoord

Bij het publiceren van dit werk brengen we graag hulde aan de opeenvolgende generaties waarnemers in het KMI en elders in het land waaronder de vele vrijwilligers van het klimatologisch netwerk die met veel enthousiasme hebben bijgedragen aan het operationele en wetenschappelijke werk van onze federale instelling.

Auteurs

Algemene coördinatie en inleiding: François Brouyaux

Hoofdstuk 1: Christian Tricot, Luc Debontridder, Andy Delcloo et Marc Vandiepenbeeck

Hoofdstuk 2:

1. Steven Dewitte, Anne Cheymol en Alexandre Joukoff
2. Steven Dewitte, Anne Cheymol en Alexandre Joukoff
3. Hugo De Backer en Andy Delcloo
4. Joseph Hus en Roeland Van Malderen

Hoofdstuk 3: Stéphane Vannitsem en Emmanuel Roulin

Hoofdstuk 4: François Brouyaux en Bernard Mohymont

Besluit: François Brouyaux

INLEIDING

Net als alle nationale meteorologische diensten in de wereld, speelt het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België een cruciale rol in het toezicht van meteorologische fenomenen en in de monitoring van het klimaat¹. De meteorologie is de opvolging van het weer dag na dag en de klimatologie is de studie van de statistische eigenschappen van het weer op een bepaalde plaats. Binnen de WMO² nemen de nationale meteorologische diensten deel aan een uitwisselingsnetwerk van gegevens en ervaringen³ dat iets meer dan 50 jaar geleden gesticht is. Elke dag opnieuw bewijzen deze uitwisselingen hun belang en doeltreffendheid. Het is dankzij deze internationale samenwerking en de daarmee gepaard gaande vooruitgang in de wetenschappelijke kennis, dat er vandaag de dag talrijke schadelijke meteorologische gebeurtenissen meerdere dagen op voorhand voorspeld kunnen worden (denk hierbij aan de tropische cyclonen). Dit laat de openbare instanties toe bepaalde voorzorgsmaatregelen te treffen om de impact ervan te verminderen⁴.

De gegevens die dagelijks door de meteorologische diensten verzameld worden op aarde en boven de zee, via een sondebalken of meer recent met behulp van satellieten vanuit de ruimte, laten overall steeds beter toe de evoluties van het klimaat op planetaire schaal te volgen.

Door de analyse van de thermometrische waarnemingsreeksen, verzameld tussen het einde van de 19de eeuw en de jaren 1940, hebben de klimatologen in de jaren 1950-1960 de aandacht gevestigd op een noemenswaardige stijging van de jaarlijkse gemiddelde temperatuur in de orde van één graad in het noorden van Europa. Deze opwarming is eveneens te zien in de temperatuurgegevens van Ukkel (zie hoofdstuk 1).

Vervolgens, in de jaren 1970, toonde de analyse van de gegevens van de jaren 1950 – 1960 een lichte gemiddelde afkoeling in de noordelijke hemisfeer en sommigen aarzelden niet om de terugkeer van een nieuwe 'Ijstijd' te voorspellen. Deze afkoeling was van korte duur, maar enkele zeer strenge winters tekenen de herinneringen aan die tijd⁵.

Vanaf ongeveer 1975 is een nieuwe globale opwarming duidelijk zichtbaar in de gemiddelde temperatuurgegevens van de noordelijke en zuidelijke hemisfeer. In ons land heeft deze nieuwe opwarming zich voorgedaan in de jaren 1980 met een amplitude gelijk aan de waargenomen opwarming in het begin van de 20ste eeuw (in de orde van 1 °C).

Vanaf het midden van de jaren 1960, maar zeker sinds de jaren 80, hebben de klimatologen stelselmatig meer en meer gesofisticeerde klimaatmodellen op punt gezet waarmee ze probeerden het gedrag van het klimaat te begrijpen. Deze nieuwe discipline, de dynamische klimatologie, kent sindsdien een sterke ontwikkeling en mobiliseert multidisciplinaire groepen van wetenschappers.

De mediatisering van de klimaatveranderingen is begonnen op het einde van de jaren 80 (vooral naar aanleiding van een periode van uitzonderlijke droogte in 1988 in de USA). Deze viel samen met de groeiende bezorgdheid van een deel van de publieke opinie tegenover de milieuproblematiek die zich op wereldschaal voordoet. Deze mediatisering zet zich zelfs tot op de dag van vandaag verder.

Gelijktijdig hiermee zijn vanaf de jaren 1980 internationale onderzoeksprogramma's over de klimaatveranderingen op het getouw gezet, onder andere onder toezicht van de WMO. Het « Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) », dat een groot aantal wetenschappers van verschillende disciplines verenigt, zet zich sindsdien in om de meest consensuele synthese van haar activiteiten te verspreiden onder de besluitvormers.


¹ Het Instituut wordt in deze missie geholpen door een netwerk van vrijwillige waarnemers verdeeld over het federale grondgebied en door professionele waarnemers van de meteorologische diensten van de luchtmacht en Belgocontrol.

² Wereld Meteorologische Organisatie, gespecialiseerd organisme van de Verenigde Naties, waarvan de zetel gelegen is in Genève.

³ Het principe van deze uitwisselingen werd bekrachtigd tijdens de allereerste internationale conferentie over mariene meteorologie, die plaatsvond in Brussel in 1853.

⁴ Naar aanleiding hiervan onderstrepen we, bij wijze van voorbeeld, de samenwerking tussen het KMI en de Regionale diensten die toezicht houden op het debiet van de rivieren waardoor de schade te wijten aan overstromingen beperkt kan worden.

⁵ De winters van 1953-54, 1962-63... waren bijzonder hard in België en elders.



Zie hier hoe het IPCC zich voorstelt op zijn website⁶:

- « Zich bewust van het probleem dat de klimaatsverandering op wereldschaal zou kunnen betekenen, hebben de Wereld Meteorologische Organisatie (WMO) en het Milieuprogramma van de Verenigde Naties (UNEP oftewel United Nations Environment Programme) in 1988 de intergouvernementele groep van experts omtrent de klimaatevolutie opgericht (IPCC oftewel Intergovernmental Panel on Climate Change), waarvan alle leden van de VN en de WMO deel kunnen uitmaken.
- De missie van het IPCC bestaat uit, zonder partij te kiezen en op een methodische, duidelijke en objectieve manier, de informatie van wetenschappelijke, technische en socio-economische aard te evalueren die nodig is voor een beter begrip van de wetenschappelijke funderingen van de risico's die verband houden met de klimaatverandering van menselijke oorsprong, en de mogelijke gevolgen van deze verandering duidelijker afbakenen en eventuele aanpassing- en afzwakkingstrategieën te overwegen. Hun opdracht is niet het ondernemen van onderzoek noch het volgen van de evolutie van de klimatologische variabelen of andere pertinente parameters. Deze evaluaties zijn voornamelijk gebaseerd op wetenschappelijke en technische publicaties waarvan de wetenschappelijke waarde buiten kijf staat.
- Een van de belangrijkste activiteiten van het IPCC bestaat er in om met regelmatige intervallen een evaluatie van de staat van de kennis in verband met de klimaatverandering uit te voeren... ».

De rapporten van het IPCC (verschenen in 1990, 1995, 2001 en 2007) bestaan uit 3 delen. In februari 2007 werd een samenvatting van het eerste deel, dat ging over de fysische grondbeginselen en bestemd was voor de besluitvormers, gepubliceerd in Parijs⁷. De samenvatting van het deel dat ging over de impact van de klimaatsverandering werd gepubliceerd in april 2007 in Brussel, het rapport over de middelen om de klimaatverandering te beperken in mei 2007 in Bangkok en het rapport over de aanpassingsmiddelen in november 2007 in Valencia.

In deze context lijkt het ons opportuun om het grote publiek en de media te informeren over de wetenschappelijke en operationele inbreng van het KMI aan de collectieve internationale inspanningen die van belang zijn voor de studie van het klimaat alsook over het groeiende begrip van de natuurkundige grondbeginselen van « ons » klimaat.

De lezer vindt in deze brochure:

1. De beschrijving van de belangrijkste klimatologische evoluties in België door de analyse van de klimatologische gegevensreeksen (temperatuur, neerslag, sneeuw, wind, zonneshijnduur), onderwerp van hoofdstuk 1.
2. De bijdragen aan wetenschappelijk onderzoek die het KMI op internationaal niveau verderzet (ozon, zonneactiviteit, aërosolen, dynamische klimatologie, hydrologische impact van de klimaatveranderingen...), onderwerpen van hoofdstukken 2 en 3.
3. Een voorstelling van bepaalde van onze pertinente operationele activiteiten in het kader van de preventie van extreme fenomenen of van de steun aan de beslissingen die streven naar de aanpassing aan onze maatschappij van haar veranderende kwetsbaarheid tegenover het klimaat, onderwerp van hoofdstuk 4.

Weet u bijvoorbeeld dat tegenwoordig (zie hoofdstuk 2) sommige satellieten (Europese en andere) uitgerust zijn met instrumenten, ontworpen door onderzoekers van het KMI en dat bepaalde onderzoeksprogramma's, gefinancierd door de Belgische staat, het KMI toelaten bij te dragen aan een uiterst nauwkeurige, voorzichtige en steeds fijnere benadering van het klimaatsysteem? Dat er nieuwe benaderingen van onze rapporten bestaan volgens de « grillen van de meteorologie »? Deze bijdrage van het KMI zal verdergezet worden en zich uitbreiden naar de toekomst voor het algemeen belang.

Op dit moment onderstrepen de meest ontwikkelde globale klimaatmodellen allen de zeer grote waarschijnlijkheid dat de opwarming van de planeet, begonnen in het begin van de 20^{ste} eeuw, zich zal verderzetten in de toekomst. Nog relatief ruw geschetst vanaf de jaren 1980, lijkt deze hypothese bevestigd te worden door de meest recente modellen alsook door instrumentale of andere⁸ waarnemingen in de wereld.

We moeten echter nog niet geloven dat het begrip van de werkzame mechanismen in het klimaatsysteem voltooid is, noch dat de continuïteit van het onderzoek en de waakzaamheid van verschillende klimatologische parameters verwaarloosd mogen worden. Naar aanleiding hiervan wensen we het onomkeerbare karakter van de confrontatie van de klimaatmodellen met de realiteit van de klimaatevolutie op aarde te benadrukken.

⁶ <http://www.ipcc.ch>

⁷ Het 4^{de} compleet rapport van het IPCC over de fysische grondbeginselen bedraagt meer dan 1300 pagina's. De samenvatting voor de besluitvormers bevat er slechts een tiental.

⁸ Als voorbeeld kunnen we de fenologische waarnemingen aanhalen die een geografische distributie of een jaarlijkse ontwikkelingscyclus van de planten weergeven.



PLAN

Plan	
Inleiding	3
Hoofdstuk 1. De evolutie van het klimaat in België	6
1. Inleiding	6
2. Klimatologische tendensen	6
3. Samenvatting	23
4. Perspectieven	24
Hoofdstuk 2. Enkele elementen van het klimaatsysteem bestudeerd op het KMI	25
1. Inleiding	25
2. De zonnestraling en de rol van de aërosolen	27
3. Ozon	35
4. Andere klimaatgegevens gemeten door het KMI	39
Hoofdstuk 3. Onderzoek over klimaatvoorspellingen en klimatologische modellering	41
1. Algemeenheden over voorspelling van het weer en het klimaat	41
2. Hydrologische Impact Studie	47
3. Conclusie	50
Hoofdstuk 4. Hulp bij het beslissingsproces en de aanpassingen	51
1. Extreme weeromstandigheden en aanpassing aan het klimaat	51
2. Berekening van klimaatscenario's : het 3INBO Project	54
Besluit	55
Meer weten	56

Hoofdstuk 1. De evolutie van het klimaat in België

1. Inleiding

Is het klimaat van ons land veranderd? Verandert ons klimaat? Zijn de neerslaghoeveelheden bij onweertijd overvloediger, komen zij meer voor? Zijn er meer hittegolven? Dit zijn enkele van de vele vragen die dagelijks aan het KMI worden gesteld sinds de problematiek van de klimaatveranderingen regelmatig opduikt in de media.

In een poging om op deze vragen een antwoord te geven stellen wij in dit hoofdstuk de resultaten voor van meerdere trendanalyses van de 20ste eeuw, uitgevoerd op een reeks klimatologische parameters. De studie van het klimaat van een bepaalde regio en de evolutie ervan is niet mogelijk tenzij men over reeksen waarnemingen van hoge kwaliteit beschikt die over een voldoende lange periode werden uitgevoerd. Daarom zullen we, voor we een reeks resultaten van de trendanalyses van het klimaat in ons land voorstellen, eerst het netwerk van de waarnemingen, dat door de wetenschappers gebruikt kan worden, beschrijven.

De langste reeksen klimatologische waarnemingen in België zijn die van de regio Brussel, die al sinds 1833 op regelmatige basis uitgevoerd worden. Eerst in Sint-Joost-ten-Node (op de oude site van de Sterrenwacht van België) en daarna in Ukkel vanaf 1886. Toen moest de Sterrenwacht naar de zuidelijke rand van de stad verhuizen om een betere omgeving te hebben voor de astronomische waarnemingen. We beschikken dus over reeksen metingen van meer dan 100 jaar voor de temperatuur, de luchtvochtigheid, de hoeveelheid en het aantal dagen neerslag, de luchtdruk, de windsnelheid, de zonneschijnduur, het aantal dagen met sneeuw en de sneeuwbedekking van de bodem.

Het KMI heeft studies van hoge kwaliteit uitgevoerd op de waarnemingen van Sint-Joost-ten-Node/Ukkel om ze zo goed mogelijk te « homogeniseren ». Deze homogenisering werd dikwijls enkel voor de maandelijkse waarden van de parameters uitgevoerd. Om een klimatologische reeks te homogeniseren moeten de tijdelijke tendensen, die in een reeks voorkomen door niet-klimatologische factoren⁹, geëlimineerd worden. De verplaatsing van het station van Sint-Joost-ten-Node naar de waarnemingsplaats van Ukkel, bijvoorbeeld, heeft gezorgd voor een wijziging in de temperatuurwaarden door de verandering van de eigenschappen van de omgeving (hoogte, openheid van het meetpunt...). Om dit probleem op te lossen werd tussen 1886 en 1890 de temperatuur op beide waarnemingsplaatsen tegelijkertijd gemeten. Na de analyse van de verschillen tussen de twee metingen, werden de gemiddelde maandtemperaturen, gemeten in Sint-Joost-ten-Node tussen 1833 en 1885, « verbeterd » om ze « aan te passen » aan de metingen die daarna in Ukkel uitgevoerd werden. Dankzij dit werk hebben we nu een thermometrische reeks van meer dan 150 jaar waaruit we, door analyse, kunnen afleiden of er tijdens die periode eventueel een thermometrische tendens was in de regio Brussel.

Voor de studie van het regionale klimaat en zijn evolutie worden er heel nuttige data gehaald uit de meetgegevens die het Belgisch klimatologische netwerk ter beschikking stelt. Dit netwerk, met vandaag al meer dan 250 stations, werd opgericht in de jaren 1870. Het bestaat uit quasi vrijwillige waarnemers die elke ochtend, rond 8 uur 's morgens, nauwgezet een aantal waarden opmeten. Deze waarden zijn bijvoorbeeld de hoeveelheid neerslag in 24 uur en enkelen onder hen meten ook de minimum- en maximumtemperaturen. De bedoeling van dit netwerk is metingen te hebben van het hele Belgische grondgebied, maar de homogeniteit van die reeksen is minder zeker dan deze in Ukkel en het aantal stations dat meetreeksen heeft van meer dan 50 jaar is vrij beperkt.

Op de vliegvelden van de Luchtmacht (militaire luchtvaart) en Belgocontrol (burgerluchtvaart) volgen ook professionele waarnemers op elk moment de evolutie van het weer en geven deze waardevolle informatie door aan het KMI. Dit vijftiental stations zijn bijna allemaal al verschillende decennia operationeel; hun waarnemingsplaats is dikwijls zeer open zodat er geen hinderlijke invloed is van obstakels die zich in de buurt bevinden.

2. Klimatologische tendensen

De statistische analyse van de langste klimatologische reeksen van Sint-Joost-ten-Node/Ukkel en van de gegevens van enkele andere stations in het land laten het KMI toe het Belgische klimaat te bewaken en zijn evolutie te analyseren.

⁹ Deze factoren zouden aan de basis liggen van de « heterogeniteit » van de reeks.

In de actuele context van de studie van de klimaatveranderingen op planetaire schaal zullen wij in de mate van het mogelijke antwoorden op de vaakst gestelde vragen van het publiek, de media, de economische wereld en de overheid. De meest voorkomende algemene vragen zijn de volgende:

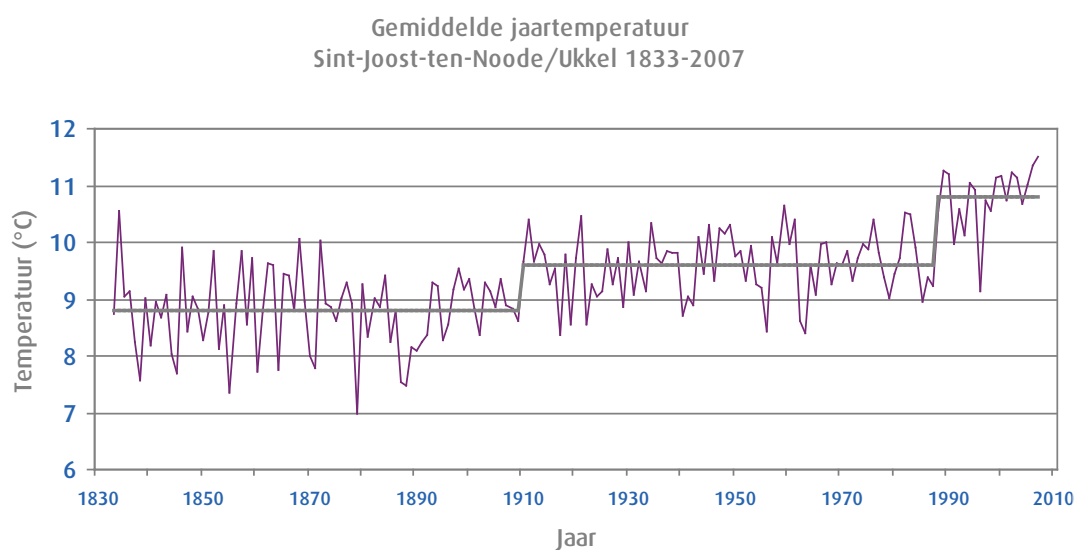
- Stijgt de temperatuur ?
- Zijn er meer hittegolven ?
- Zijn er minder koudegolven ?
- Regent het meer of minder ?
- Komen intense neerslaghoeveelheden vaker meer voor? Zijn ze overvloediger?
- Sneeuwt het minder ?
- Worden de droogteperioden langer ?
- Zijn er meer stormen ?
- Is de zonneschijnduur veranderd ?

In een poging op deze vragen te antwoorden, zullen wij in dit hoofdstuk de resultaten voorstellen van verschillende analyses van de langste en meest betrouwbare waarnemingsreeksen om ons klimaat en zijn evolutie te karakteriseren.

Stijgt de temperatuur ?

De temperatuur en zijn evolutie zijn interessant voor verschillende domeinen of activiteitensectoren, zoals de landbouw, de energieconsumptie, het hogere sterftcijfer bij risicobevolkingen en de geografische spreiding van de fauna.

Om te antwoorden op de gestelde vraag kunnen we best de lange reeksen met temperaturen van Sint-Joost-ten-Node en Ukkel bestuderen. Figuur 1 geeft eerst en vooral de evolutie van de gemiddelde jaartemperatuur tussen 1833 en 2007. We zien dat er een globale opwarming is van ongeveer 2 °C over de beschouwde periode. De stijging van de temperaturen was niet gelijkmatig: zij deed zich voor in twee relatief abrupte etappen: er was een eerste zeer significante¹⁰ stijging rond 1910 en een tweede, eveneens zeer significant, aan het einde van de jaren 1980. In beide gevallen bedroeg deze stijging ongeveer een graad. De verschillende periodes van relatieve stabiliteit van de temperatuur zijn voorgesteld in figuur 1 door horizontale segmenten, die de gemiddelde jaartemperatuur weergeven voor elke periode.



Figuur 1. Gemiddelde jaartemperatuur (in °C), te Sint-Joost-ten-Node/Ukkel tijdens de periode 1833-2007. De rode curve toont de jaarlijkse waarden en de donkere horizontale lijnen de gemiddelde waarden van de parameter tijdens de verschillende periodes wanneer hij relatief stabiel was rond de gemiddelde waarden.

¹⁰ Wij verwijzen naar het kader « statistische detectie van een klimaatverandering » voor een definitie van het « zeer significante » of « significante » karakter van een verandering van de parameter in een tijdsreeks.

Het onderzoek van de reeksen met de seizoenstemperaturen toont aan dat de gemiddelde temperatuur in de winter en in de lente, net zoals de jaarlijkse gemiddelde temperatuur, ook een eerste, vrij abrupte en zeer opmerkelijke opwarming heeft gekend rond 1910 en een tweede tegen het einde van de jaren 1980. De zomer en de herfst hebben ook twee zéér opmerkelijke periodes van opwarming meegemaakt, maar de eerste manifesteerde zich rond 1925-1930 en de tweede rond het begin van de jaren 1980.

Samengevat kunnen we dus besluiten dat er een onweerlegbare stijging is in de jaar- en seizoenstemperaturen vanaf de 19^{de} eeuw. Deze stijging is in twee etappes gebeurd: eerst een opwarming in het begin van de 20^{ste} eeuw en dan een tweede, van een gelijkaardige amplitude, tijdens de jaren 1980. De analyse van de gegevens van andere stations, gedigitaliseerd vanaf het midden van de jaren 1950, toont aan dat de opwarming van de jaren 1980 overal in het land gebeurd is.

In verband met het recentere verleden moeten we wel vermelden dat 2007 het warmste jaar in Ukkel was sinds het begin van de waarnemingen en dat het vorige record, dat dateerde uit 2006, werd gebroken. Drie opeenvolgende, recente seizoenen hebben elk op hun beurt hun temperatuurrecord gebroken: na de herfst van 2006 en de winter 2006-2007, was de temperatuur van de lente 2007 meer dan drie graden hoger dan de normale seizoenstemperatuur. Maar het is echter nog veel te vroeg om hieruit statistisch te besluiten dat een nieuwe drempel in de waargenomen opwarming te Ukkel recent werd overschreden. Enkel de waarnemingen van de volgende jaren zullen dit al dan niet kunnen bevestigen¹¹.

Statistische detectie van een klimaatverandering

Om de klimaatveranderingen te kunnen bestuderen is er een gedetailleerde analyse van de klimatologische tijdsreeksen nodig. Twee testen zijn gezamenlijk nuttig in deze studie om het gedrag van de bestudeerde reeksen te bepalen: de test van Pettitt en de test van Mann-Kendall (voor meer informatie verwijzen we de lezer door naar de gespecialiseerde bibliografie aan het einde van dit boek).

De veranderingen in een reeks kunnen te wijten zijn aan, hetzij een heterogeniteit (zie punt 1 inleiding) te wijten aan een wijziging van de waarnemingsplaats, de gebruikte instrumenten of de waarnemingsmethode, hetzij aan een verandering van de weertypes waarvan de gemiddelden en de extremen het klimaat van een regio bepalen. In het laatste geval kunnen de klimaatveranderingen, schematisch beschouwd, zich onder verschillende vormen (of combinaties ervan) voordoen:

- progressief (min of meer lineaire tendens naar boven of naar onder),
- abrupt (een of meerdere sprongen, naar boven of naar onder in de tijdsreeks),
- cyclisch (opeenvolgende en progressieve tendensen, naar boven of naar onder).

Meestal, over de ganse bestudeerde periode, kan de reeks dalende of stijgende tendensen vertonen. In de discussies over de trendanalyse zullen we soms verplicht zijn een onderscheid te maken tussen tijdelijke tendensen tijdens de beschouwde periode en een globale trend over de gehele periode.

Als we statistische testen toepassen, bepalen we een drempel vanaf dewelke we denken dat er in de reeks een duidelijke verandering waarneembaar is. Meestal neemt men een sleutelwaarde van de statistische test die overeenkomt met de waarschijnlijkheid deze statistische waarde te bekomen in afwezigheid van een verandering (meestal 5 of 10 %). In dit hoofdstuk zal een resultaat als statistisch significant of zeer significant worden beschouwd, als de kans op een toevallige verandering (niet gestoeld op een klimaatverandering) respectievelijk maximaal 10 % en 5 % bedraagt.

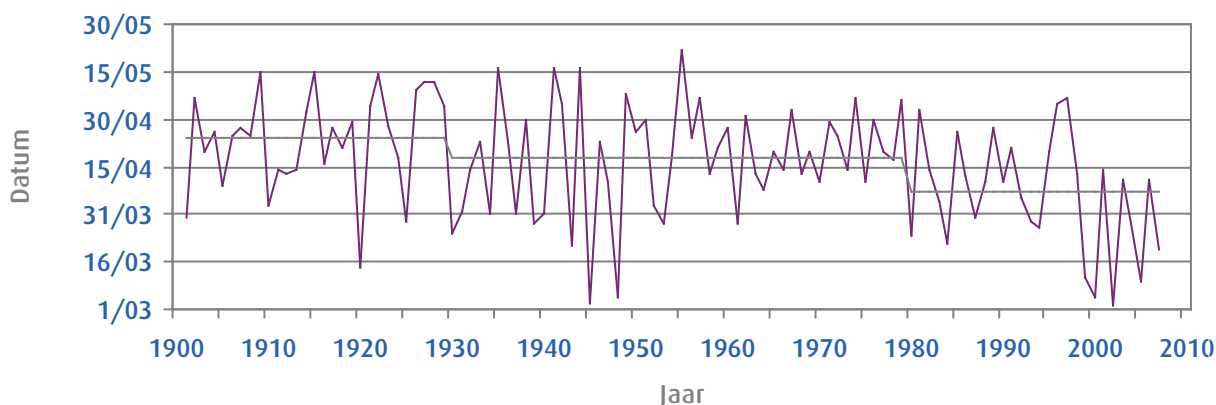
In het vervolg van de tekst zal men zeggen dat de tendens of de evolutie van een parameter « significant » of « opmerkelijk » is als het statistisch resultaat van de waarnemingsreeks van die parameter aangeeft dat de tendens statistisch « significant » is. Indien de verandering van een parameter « zeer significant » is zullen we zeggen dat de tendens « zeer significant » of « zeer opmerkelijk » is. In de andere gevallen zal men zeggen dat de parameter geen enkele significante tendens vertoont of dat hij « stabiel » is.

¹¹ Wij benadrukken dat zowel de zomer als de herfst 2007 « normaal » waren wat de temperaturen betreft. Vervolgens liepen de gemiddelde temperaturen tijdens de winter 2007-2008 en de lente 2008 heel wat hoger op dan de normale seizoenswaarden.

Als we de reeksen met extreme temperaturen in Ukkel sinds 1901 bekijken, valt het op dat de opwarming tijdens de eerste helft van de 20^{ste} eeuw vooral te wijten was aan een zeer significante stijging van de maximale temperaturen, terwijl de opwarming tijdens de jaren 1980 te wijten was aan een zeer opmerkelijke stijging van zowel de maximale als de minimale temperaturen. Het zou interessant zijn om na te gaan of de klimaatmodellen die de evolutie van het klimaat tijdens de 20^{ste} eeuw simuleren in onze regio's hetzelfde gedifferentieerd gedrag vertonen en of ze toelaten dit fysisch te verklaren.

De stijging van de minimumtemperaturen tijdens de 20^{ste} eeuw weerspiegelt zich eveneens in de data van de eerste en de laatste vorstdag in de loop van een jaar. In figuur 2 zien we de evolutie sinds 1901 van de laatste vorstdag, aan het einde van de winterperiode. In de loop van de 20^{ste} eeuw vertoont het einde van de vorstperiode de tendens zich vroeger in het jaar te manifesteren. De statistische analyse van de waarnemingsreeks toont aan dat deze tendens hoofdzakelijk te wijten is aan twee relatief abrupte opmerkelijke stijgingen, de eerste rond 1930 en de tweede rond 1980.

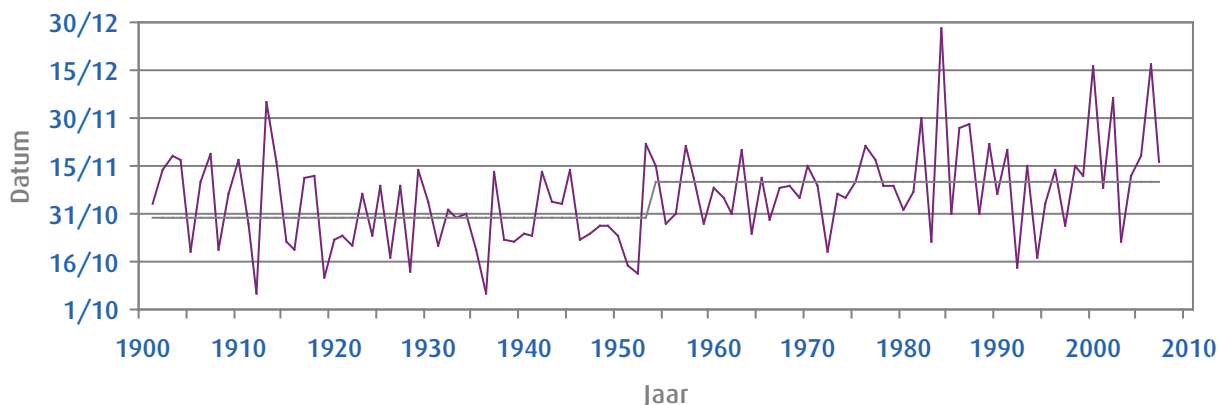
Datum van de laatste vorstdag (einde van de winterperiode)
Ukkel 1901-2007



Figuur 2. Datum van de laatste vorstdag (minimumtemperatuur lager dan 0 °C), op het einde van de winter te Ukkel tussen 1901 en 2007.

Vergelijkbaar hiermee toont figuur 3 de jaarlijkse evolutie sinds 1901 van de datum van de eerste vorstdag bij de aanvang van de winterperiode die eveneens coherent is met de stijging van de temperaturen. In de loop van de 20^{ste} eeuw vertoont de aanvang van de vorstperiode op het einde van het jaar de tendens zich later te manifesteren. Zoals de trend analyse het aangeeft is deze evolutie hoofdzakelijk te wijten aan een relatief abrupte en zeer opmerkelijke sprong rond 1955.

Datum van de eerste vorstdag (aanvang van de winterperiode)
Ukkel 1901-2007



Figuur 3. Datum van de eerste vorstdag (minimumtemperatuur lager dan 0 °C), bij de aanvang van de winter te Ukkel tussen 1901 en 2007.

Het gevolg van de evolutie van deze data van aanvang en einde van de vorstperiodes in de loop van het jaar is een verlenging tijdens de 20^{ste} eeuw van de maximale duur van het aantal opeenvolgende dagen zonder vorst. Twee abrupte sprongen worden gedetecteerd: de eerste, significant, rond 1955 en de tweede, zeer opmerkelijk, nabij het einde van de jaren 1990.

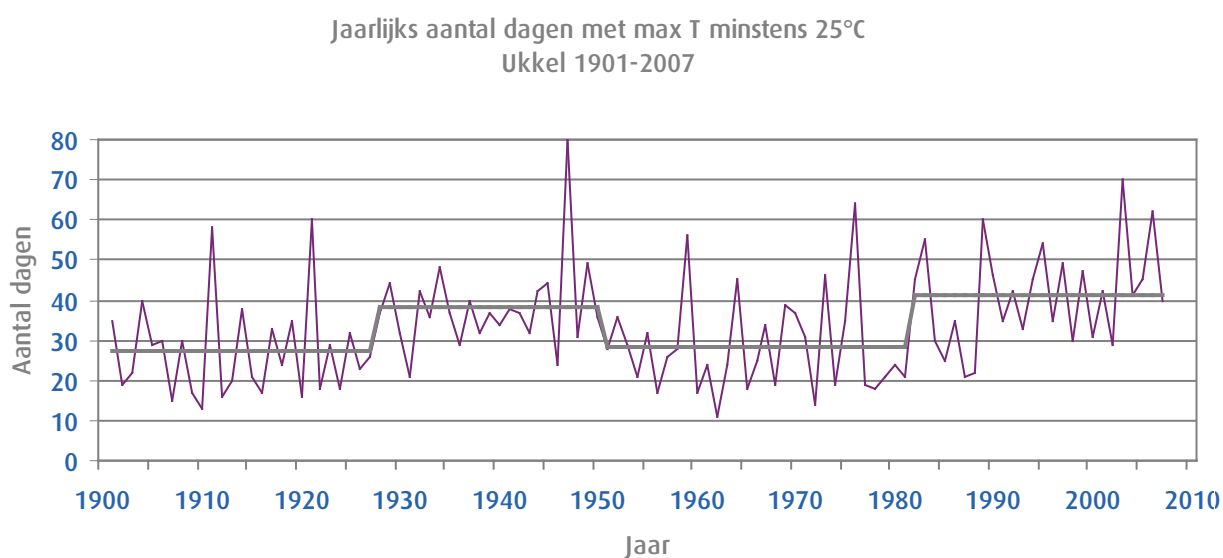
Om te eindigen kan men zich afvragen of de verstedelijking van Brussel niet, althans voor een deel, bijgedragen heeft aan de opwarming die we in Ukkel tijdens de 20^{ste} eeuw konden vaststellen. Een diepgaande studie over dit onderwerp werd tot op heden niet uitgevoerd. Twee elementen laten ons niettemin toe te denken dat het « stadseffect » geen hoofdrol zou gespeeld hebben in de evolutie van de temperatuur te Ukkel sinds 1900. Eerst en vooral moeten we opmerken dat het station te Ukkel zich ten zuiden van de regio Brussel situeert. De overheersende windrichtingen in ons land zijn naar het noordoosten gericht, daaruit volgt dat de luchtsoorten die boven Ukkel circuleren meestal afkomstig zijn van voorstedelijke gebieden. Anderzijds toont een studie van het KMI aan dat de opwarming tijdens de jaren 1980 in Ukkel gelijkaardig is aan deze die zich heeft voorgedaan in andere stations op het platteland, die weinig of niet beïnvloed worden door het stadseffect.

Zijn er meer hittegolven?

Om na te gaan of er een evolutie is in de frequentie en de intensiteit van de hittegolven beschikken we in het waarnemingsstation in Ukkel over verschillende reeksen met dagelijkse thermometrische metingen over min of meer lange perioden. We gebruiken hier de extreme dagtemperaturen (maximale en minimale temperaturen) die sinds 1901 gemeten worden in een halfopen thermometerhut, gelegen in het klimatologische park van het KMI.

Laten we eerst en vooral de evolutie bekijken van het aantal dagen per jaar dat de maximale temperatuur van minimum 25 °C bereikt (zie figuur 4), deze worden zomerdagen genoemd, alvorens een antwoord op deze vraag proberen te vinden.

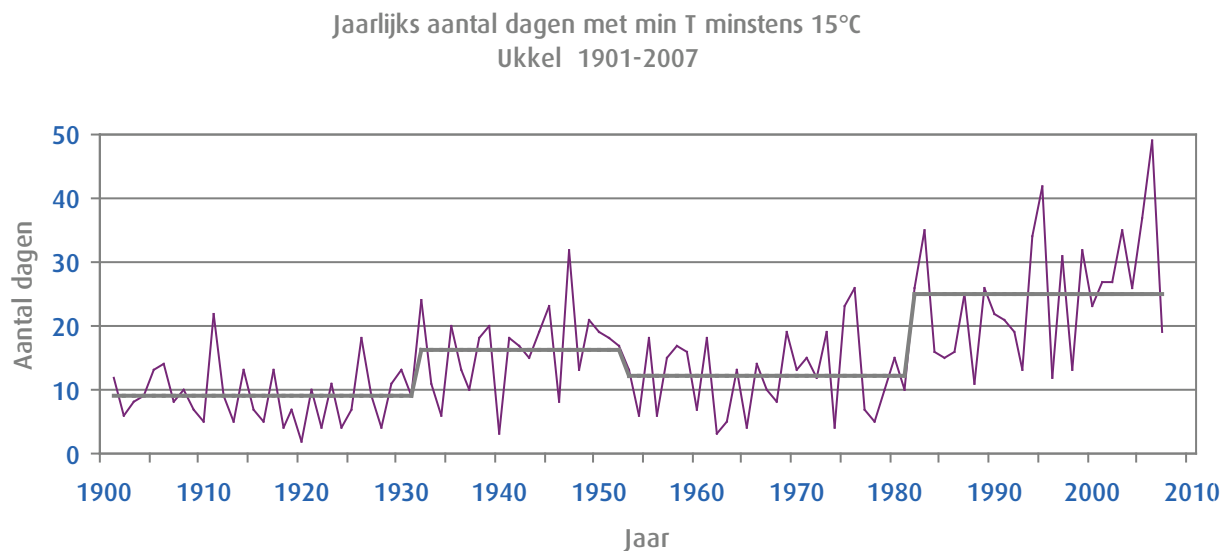
De figuur 4 toont aan dat na de opwarming tijdens de zomer in de jaren 1980 het aantal zomerdagen is toegenomen. Zij bewijst eveneens dat temperatuurswaarden waargenomen aan het begin van de 21^{ste} eeuw al werden waargenomen in het verleden, namelijk in de jaren 1940 (het absolute record dateert van 1947). Er is geen significante tendens merkbaar over de ganse periode, maar wel een belangrijke variabiliteit op schaal van enkele tientallen jaren: na een relatief abrupte stijging van deze parameter rond het einde van de jaren 1920 werd een daling vastgesteld in het begin van de jaren 1950, uiteindelijk gevolgd door een nieuwe stijging die zich in de jaren 1980 voordeed.



Figuur 4. Jaarlijks aantal zomerdagen (maximumtemperatuur ≥ 25 °C), te Ukkel tijdens de periode 1901-2007.

Een gelijkaardige vaststelling is toepasselijk op het jaarlijkse aantal hittedagen, d.w.z. aantal dagen per jaar dat de maximale temperatuur hoger dan of gelijk is aan 30 °C.

Zoals voor de hoogste maximumtemperaturen zijn hoge nachtelijke temperaturen eveneens niet zonder gevolg voor de gezondheid van risicogroepen. Figuur 5 toont de evolutie sinds 1901 van het jaarlijkse aantal dagen dat de dagelijkse minimumtemperatuur minstens 15 °C bereikte (de minima doen zich meestal voor op het einde van de nacht, bij het opkomen van de zon). De stijgende tendens van deze parameter tijdens de 20^{ste} eeuw staat buiten discussie, met een eerste zeer opmerkelijke «sprong» naar omhoog vastgesteld rond het midden van de jaren 1930 en, vooral, een tweede sprong omhoog, eveneens zeer opmerkelijk, in het begin van de jaren 1980. Het is eveneens opvallend dat de waarden die de laatste jaren werden bereikt zeer hoog zijn.

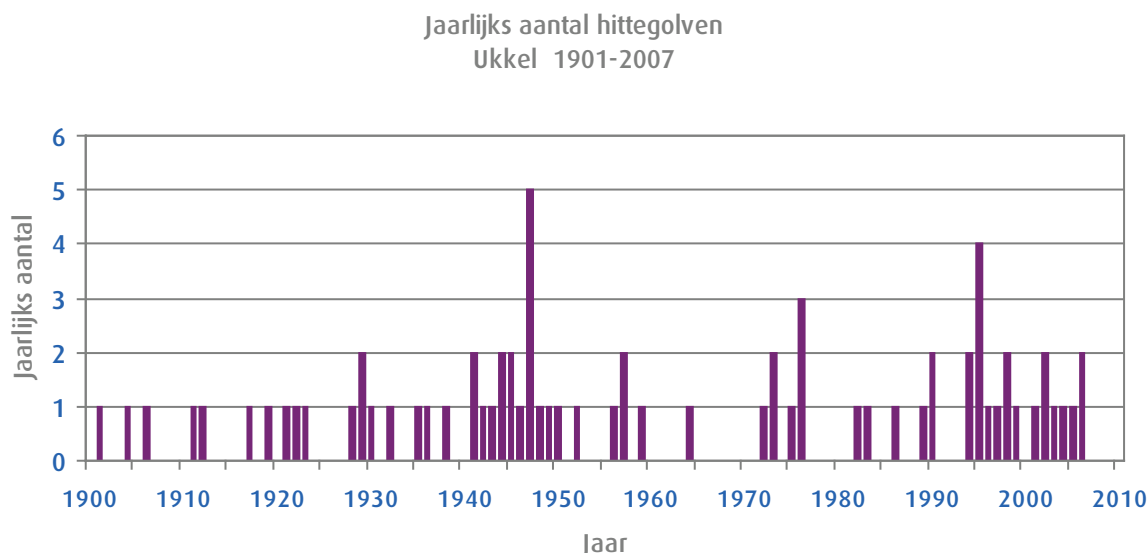


Figuur 5. Jaarlijks aantal dagen met een minimumtemperatuur ≥ 15 °C, te Ukkel tijdens de periode 1901-2007.

Laten we nu proberen om een antwoord te vinden op de vraag betreffende het aantal hittegolven. Wij zullen hier op een eenvoudige manier een hittegolf definiëren als zijnde een periode van vijf opeenvolgende dagen tijdens welke aan de twee volgende criteria gelijktijdig wordt voldaan:

- De maximumtemperatuur bereikt of overtreft elke dag 25 °C,
- De maximumtemperatuur bereikt of overtreft 30 °C tenminste gedurende drie dagen van de beschouwde periode.

Figuur 6 illustreert de evolutie van het jaarlijkse aantal hittegolven te Ukkel sinds 1901. Wij merken op dat er een grote variabiliteit is van het ene jaar naar het andere; gemiddeld tijdens de 20^{ste} eeuw stellen wij vast dat er een hittegolf is bijna elke twee jaar. **De trendanalyse geeft een significante stijging aan van jaarlijks aantal hittegolven rond het midden van de jaren 1990.** Merk op dat de hittegolven frequenter waren tijdens de jaren 1940 en zij dit opnieuw werden sinds een tiental jaren.



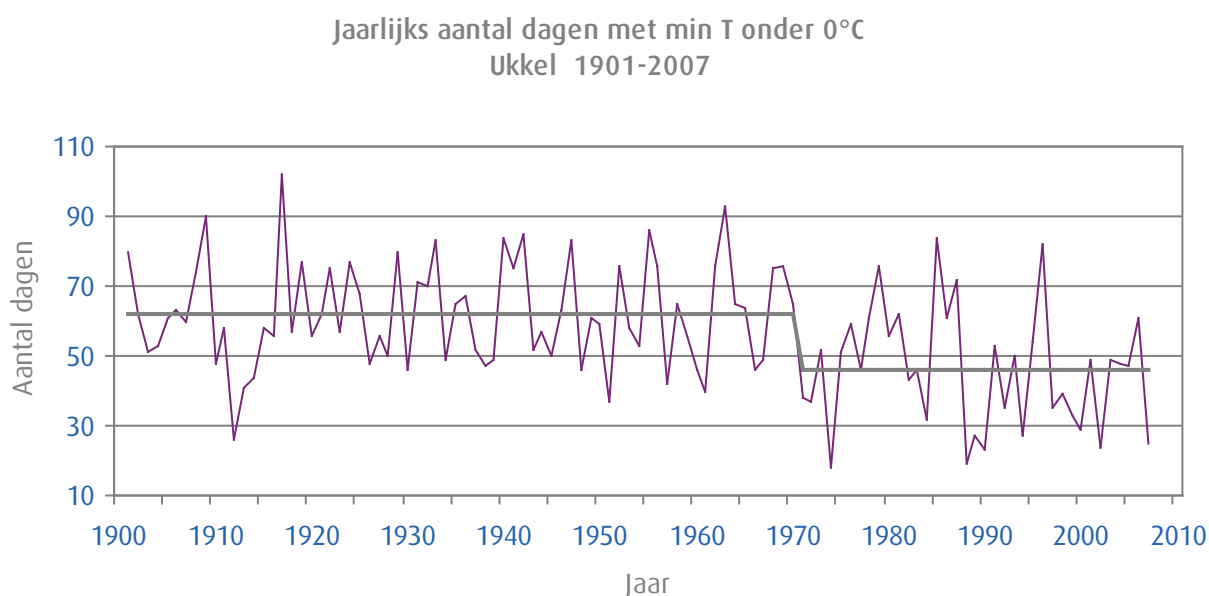
Figuur 6. Jaarlijks aantal hittegolven, te Ukkel tijdens de periode 1901-2007.

Zijn er minder koudegolven?

Hiervoor gebruiken we ook de dagelijkse extreme temperaturen, gemeten sinds 1901 in een halfopen thermometerhut gelegen in het klimatologische park van het KMI.

Voordat we proberen een antwoord op deze vraag te vinden, gaan we ook in dit geval simpelweg eerst de evolutie van het aantal dagen per jaar dat de minimumtemperatuur onder 0 °C lag sinds 1901 bekijken (zie figuur 7). Dit noemen wij het jaarlijkse aantal vorstdagen.

Een onbetwistbare daling van deze parameter wordt waargenomen over het geheel van de 20^{ste} eeuw, met vooral een abrupte daling, statistisch zeer significant, rond 1970.



Figuur 7. Jaarlijks aantal vorstdagen (minimumtemperatuur < 0 °C), te Ukkel tijdens de periode 1901-2007.

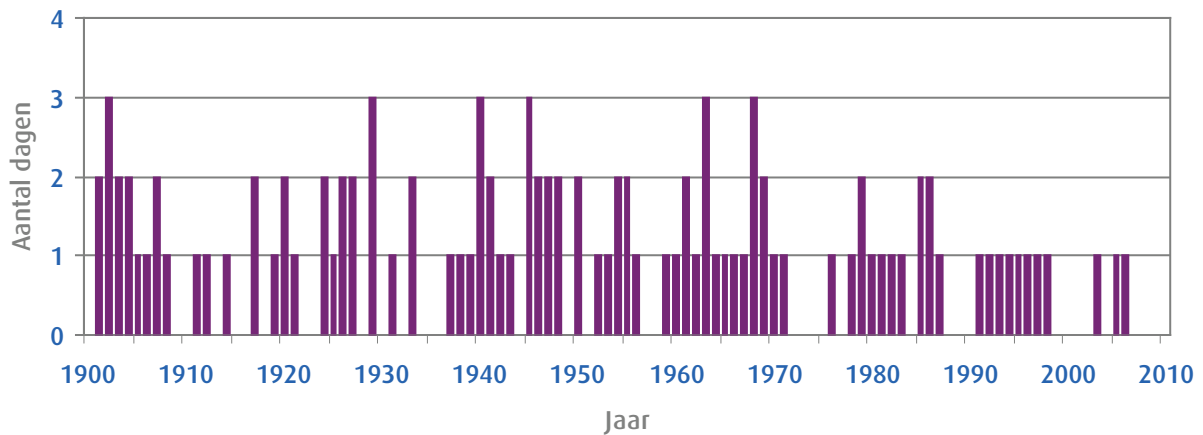
Laten we nu proberen om een antwoord te vinden op de vraag betreffende het aantal koudegolven. Zoals een hittegolf zullen we hier op een eenvoudige manier een koudegolf definiëren: een periode van vijf opeenvolgende dagen tijdens welke aan de twee volgende criteria gelijktijdig wordt voldaan:

- De minimumtemperatuur is elke dag negatief (dit wil zeggen dat elke dag een vorstdag is),
- De maximumtemperatuur is tijdens de beschouwde periode minstens drie keer negatief (dat wil zeggen dat er minstens drie winterdagen zijn tijdens de periode en dat het dus permanent vriest).

Figuur 8 illustreert de evolutie van het aantal koudegolven in Ukkel sinds 1901. Wij merken op dat er een grote variabiliteit is van het ene jaar naar het andere; gemiddeld in de loop van de 20^{ste} eeuw was er praktisch elk jaar een koudegolf. **De trendanalyse vertoont een afname van de frequentie van de koudegolven met een opmerkelijke duik naar beneden rond het begin van de jaren 1970.**

Het is interessant op te merken dat de opwarming die zich heeft voorgedaan tijdens de winter en in de lente in het begin van de 20^{ste} eeuw niet direct aanleiding heeft gegeven tot een afname van het aantal koudegolven, terwijl de afname van het verschijnsel duidelijk verbonden is aan de opwarming aan het einde van de 20^{ste} eeuw.

Jaarlijks aantal koudegolven
Ukkel 1901-2007



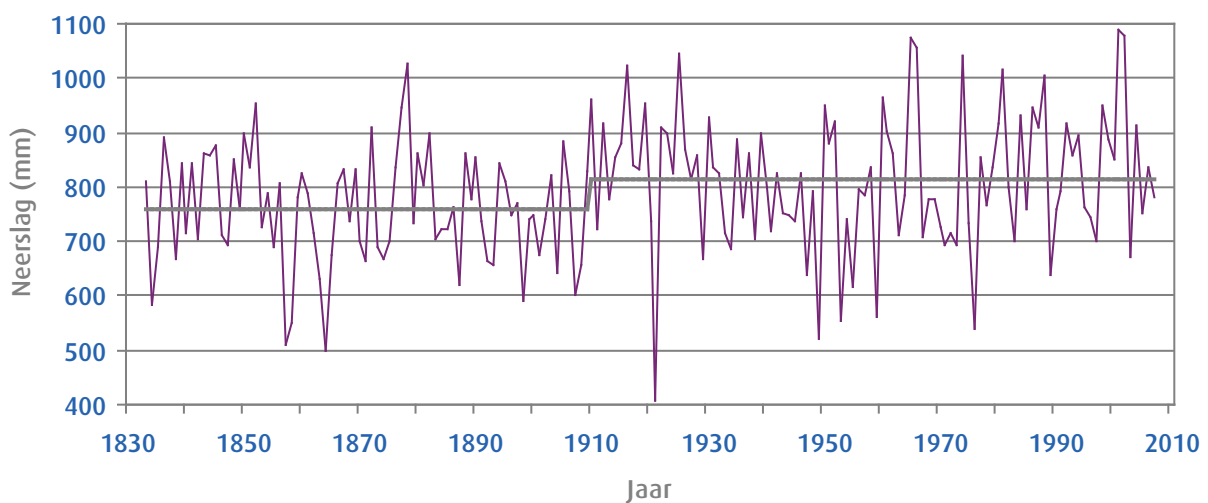
Figuur 8. Jaarlijks aantal koudegolven, te Ukkel tijdens de periode 1901-2007.

Regent het meer of minder?

De neerslaghoeveelheden en hun evolutie zijn interessant voor talrijke sectoren, zoals deze die zich bezig houden met het voorkomen van hoogwaterstanden en overstromingen, de dimensionering van de rioleringsnetwerken, de voorziening van drinkwater en de landbouw.

We beginnen met het bestuderen van de evolutie van het jaarlijks pluviometrisch totaal, dat eerst opgemeten werd in Sint-Joost-ten-Node en later in Ukkel. Figuur 9 geeft de jaarlijkse neerslaghoeveelheden sinds het begin van de regelmatige metingen in 1833. **De analyse van de reeks toont een zeer significante sprong naar omhoog rond 1910, gekenmerkt door een stijging van de orde van 7 % van de jaarlijkse neerslaghoeveelheden.** Op het niveau van de seizoenen vertonen de winterneerslag en de lenteneerslag eveneens een stijging van de orde van 15 %, respectievelijk zeer opvallend rond 1910 en opmerkelijk rond 1965.

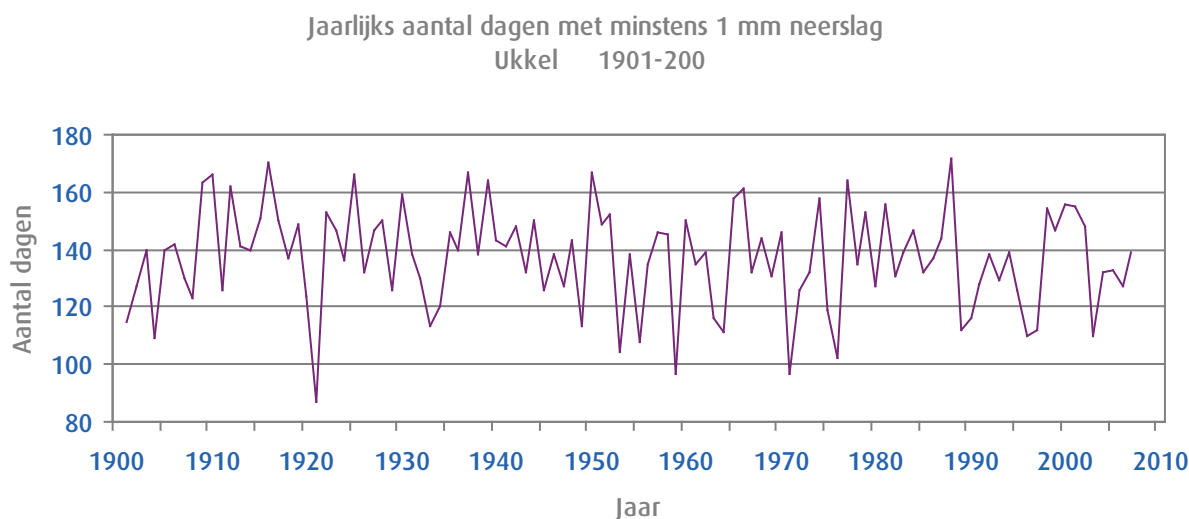
Jaarlijkse hoeveelheid neerslag
Sint-Joost-ten-Node/Ukkel 1833-2007



Figuur 9. Jaarlijkse hoeveelheid neerslag, te Sint-Joost-ten-Node/Ukkel tijdens de periode 1833-2007.

We kunnen ons ook afvragen of de frequentie van het aantal dagen met neerslag veranderd is de loop van de 20^{ste} eeuw. Figuur 10 geeft de evolutie van het Jaarlijks aantal dagen met neerslag waargenomen in Ukkel sinds 1901. Een dag met neerslag is een dag waarop minstens 1 mm neerslag werd waargenomen (zo kunnen we de dagen met een heel kleine gemeten neerslaghoeveelheid elimineren). **We observeren geen opmerkelijke tendens van het jaarlijkse aantal dagen met neerslag tijdens de 20^{ste} eeuw.**

Voor de seizoenen tonen gelijkaardige trendanalyses eveneens geen merkbare evolutie aan tijdens de 20^{ste} eeuw met uitzondering van de lente. Sedert het midden van de jaren 1960 zijn er in de lente significant meer dagen met neerslag.



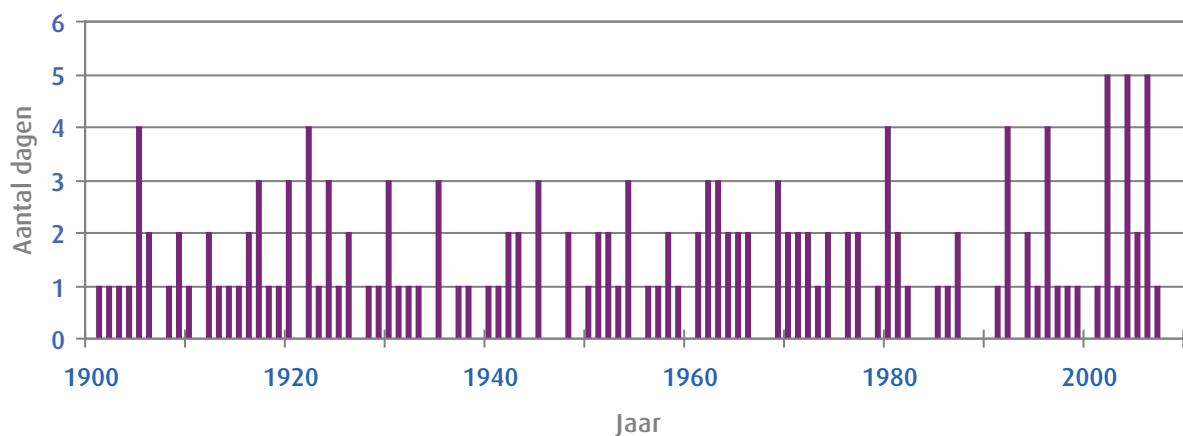
Figuur 10. Jaarlijks aantal neerslagdagen (neerslaghoeveelheid van minstens 1 mm), te Ukkel, tijdens de periode 1901-2007 .

Komen intense neerslaghoeveelheden vaker voor? Zijn ze overvloediger?

Om op dit soort vragen te antwoorden, moeten we eerst kijken of het aantal dagen met overvloedige neerslag al dan niet gestegen is. Figuur 11 toont, voor het station in Ukkel, de evolutie tussen 1901 en 2007 van het aantal dagen met een dagelijkse neerslaghoeveelheid van meer dan 20 mm tijdens de zomer (periode juni-juli-augustus). Intense neerslag komt meestal voor in de zomer omwille van intense onweersbuien die in een korte tijdsspanne vallen (maximaal enkele uren).

Figuur 11 toont geen significante trend voor dit type neerslag. In de loop van de laatste jaren hebben we de drie hoogste waarden van de reeks kunnen waarnemen, maar het is nog te vroeg om hieruit statistisch te besluiten dat de frequentie van dit soort neerslag aan het veranderen is. **Als besluit kunnen we dus stellen dat we niet op een onbetwistbare manier kunnen bevestigen of de overvloedige neerslaghoeveelheden tijdens onweders tegenwoordig frequenter voorkomen dan in het verleden.**

Aantal dagen tijdens de zomer met een totale neerslaghoeveelheid van minstens 20 mm Ukkel 1901-2007

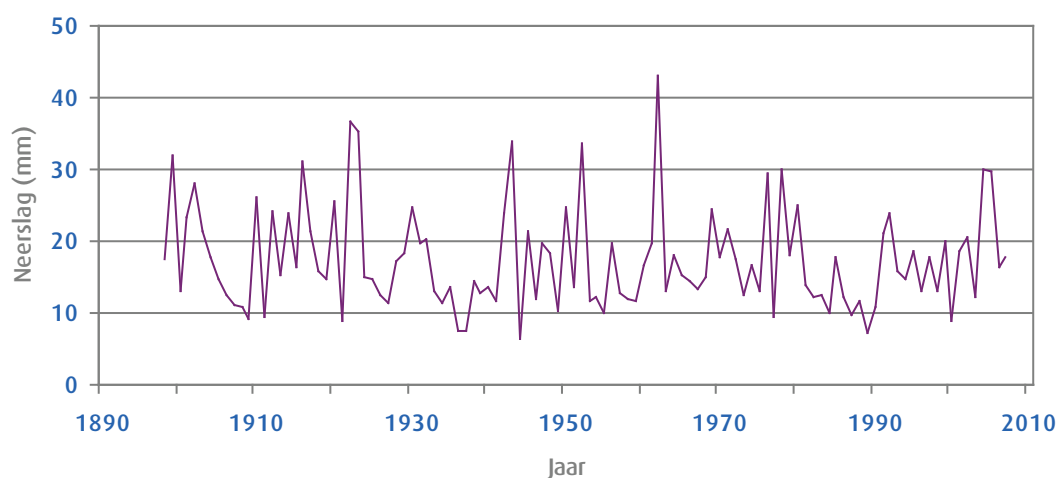


Figuur 11. Aantal dagen tijdens de zomer met een dagelijkse neerslaghoeveelheid van minstens 20 mm in Ukkel, tijdens de periode 1901-2007.

Met de gegevens van de pluviograaf van Ukkel tijdens de periode 1898-2007 kunnen we het gedrag van de extreme neerslaghoeveelheden gedurende tijdsintervallen van 1 tot 24 uur bestuderen. Als voorbeeld illustreert figuur 12 de evolutie van de jaarlijkse maximale uurlijkse neerslaghoeveelheid sinds 1898. De analyse van deze gegevensreeks toont aan dat de overvloedigste jaarlijkse neerslaghoeveelheden gedurende een tijdsspanne van 1 uur tot 24 uur geen enkele opmerkelijke trend vertonen. **Ook hier gaat dit resultaat in tegen het gevoel dat we soms hebben dat de onweersbuien tegenwoordig overvloediger zijn dan in het verleden.**

In verband hiermee moeten we ook nog opmerken dat een recente analyse van de gegevens van het klimatologische netwerk sinds 1951 aantoonde dat in de stations nabij de Kust sinds de jaren 1980 een significante stijging werd waargenomen in de jaarlijkse extreme neerslagwaarden in 24 uur.

Jaarlijkse maximale neerslaghoeveelheid gevallen in een uur Ukkel 1898-2007

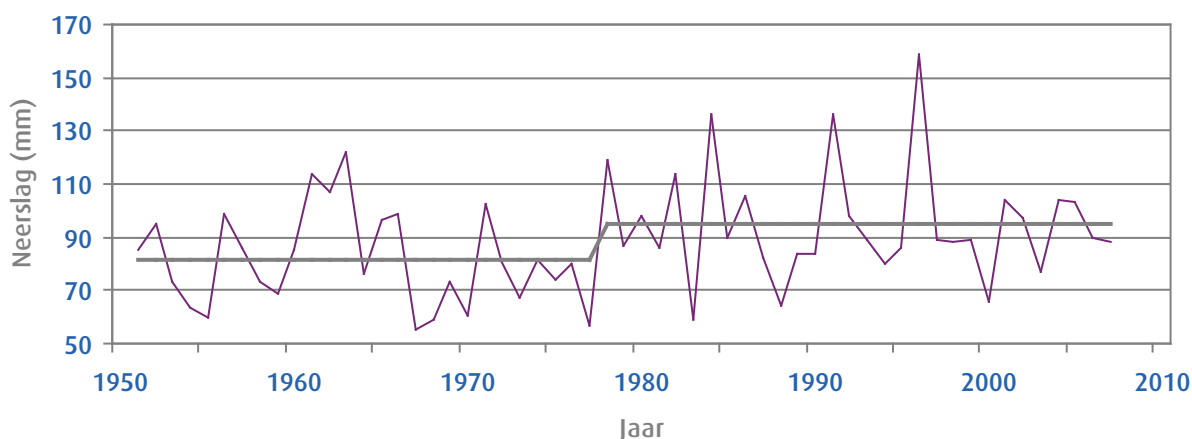


Figuur 12. Jaarlijkse maximale neerslaghoeveelheid gevallen in een uur, te Ukkel tijdens de periode 1898-2007.

In Ukkel zien we dat de jaarlijkse extremen over een periode langer dan een week een zéér significante stijging vertonen, gekenmerkt door een abrupte sprong rond het einde van de jaren 1970 (zie figuur 13). Dit type jaarlijkse extreme waarde komt meestal voor in de winter. We kunnen dit resultaat van Ukkel linken aan het resultaat van een studie die door het KMI in 2002 gepubliceerd werd. Deze studie gaf aan dat, in het algemeen, de analyse van de gegevens van het klimatologische netwerk aantoonde dat, de hoeveelheid winterse neerslag die minstens valt in enkele dagen, overal in het land sinds het begin van de jaren 1950 de neiging heeft toe te nemen. Uit deze studie bleek ook dat er geen waarneembare evolutie van intensere neerslaghoeveelheden was tijdens de zomer, d.w.z. onweersachtige neerslag, tijdens het tweede deel van de 20^{ste} eeuw. Dit resultaat is dan ook coherent met de resultaten van Ukkel voor de hele 20^{ste} eeuw, die hierboven werden voorgesteld.

Het is interessant om te proberen de stijging van de winterse neerslag over verschillende dagen, gedurende de laatste decennia, in relatie te brengen met de verschillende grote overstromingen in ons land. Tijdens de jaren 1990 waren er meer overstromingen dan tijdens de jaren 1980 en zeker meer dan tijdens de jaren 1970. De historische gegevens van voor de jaren 1970 zijn minder precies, zelfs al weten we bijvoorbeeld dat de jaren 1950 gekend waren voor verschillende belangrijke overstromingen. Natuurlijk zouden we in de studie van de evolutie van de frequentie (en de intensiteit) van de winterse overstromingen ook rekening moeten houden met andere factoren zoals de ruimtelijke ordening.

Jaarlijkse maximale neerslaghoeveelheid gevallen in 10 dagen
Ukkel 1951-2007



Figuur 13. Jaarlijkse maximale neerslaghoeveelheid gevallen in tien dagen, te Ukkel tijdens de periode 1951-2007.

We kunnen dus besluiten dat het onderzoek van de neerslaggegevens heeft geleid tot veel minder spectaculaire resultaten dan de studie van de temperaturen. Dit kan gedeeltelijk verklaard worden door de zeer grote variabiliteit van de neerslaghoeveelheden in onze streken.

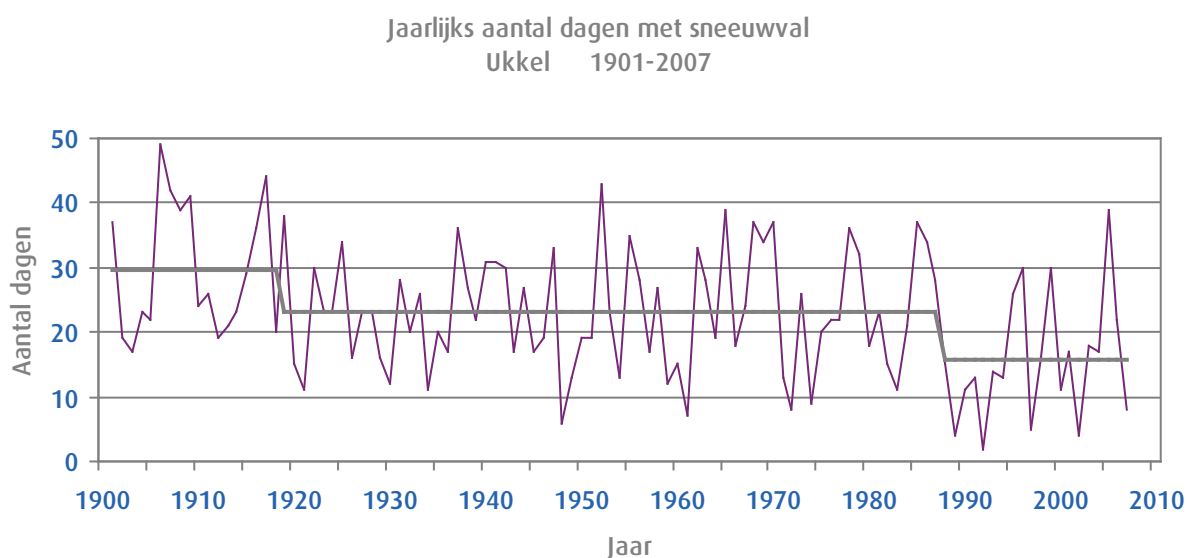
Toch kunnen we onthouden dat **de jaarlijkse gecumuleerde neerslaghoeveelheden, en de hoeveelheden tijdens de winter en de lente, zijn toegenomen in Ukkel sinds de 19de eeuw en dat we hetzelfde patroon zien in het ganse land voor de jaarlijkse extremen van de gecumuleerde neerslaghoeveelheden over verschillende dagen (die zich meestal tijdens de winter voordoen) sinds de jaren 1950.** Bij de jaarlijkse extremen van de totale neerslaghoeveelheden op kortere tijd (van 1 tot 24 uur) echter zien we geen tendens, behalve voor de stations nabij de Kust waar volgens een recente studie de jaarlijkse extreme waarden van de dagelijkse totale neerslaghoeveelheid significant gestegen zijn in het begin van de jaren 1980.

Dat de neerslag van korte duur niet toegenomen is, althans niet in het binnenland, strookt helemaal niet met de indruk die bij het publiek leeft. Vooral de laatste jaren¹² zijn we immers getuige geweest van schade veroorzaakt door intense onweders. We moeten dus besluiten dat, **indien de kwetsbaarheid van de stedelijke woongebieden ten opzichte van de onweersbuien gestegen is, dit waarschijnlijk het gevolg is van andere omgevingsfactoren, zoals de dichtheid van de bebouwing en de ondoordringbaarheid van de bodem.** Wij benadrukken echter het feit dat deze bemerkingen geen voorlopige oordelen zijn betreffende de toekomstige evolutie van de onweersachtige neerslag in ons land en de hieraan verbonden lokale overstromingen.

¹² Onder andere de zomeronweders van 2005 en 2006 in Brussel en elders in het land.

Sneeuwt het minder?

In het station te Ukkel beschikken we over een reeks waarnemingen met het aantal dagen met sneeuwval¹³ sinds 1901. Figuur 14 illustreert de evolutie van het jaarlijkse aantal dagen met neerslag onder de vorm van sneeuw sinds 1901. We merken op dat de waarde van deze parameter heel variabel is van het ene op het andere jaar en **dat het sinds de opwarming aan het einde van de jaren 1980 zeer opmerkelijk minder sneeuwt in Ukkel dan in het verleden**. Er was al een eerste, zeer opvallende daling rond 1920 als gevolg van de opwarming in het begin van de 20^{ste} eeuw. De geobserveerde tendensen voor de sneeuwparameters moeten vooral in relatie gebracht worden met de tendensen van de temperatuur gedurende het koudste deel van het jaar.



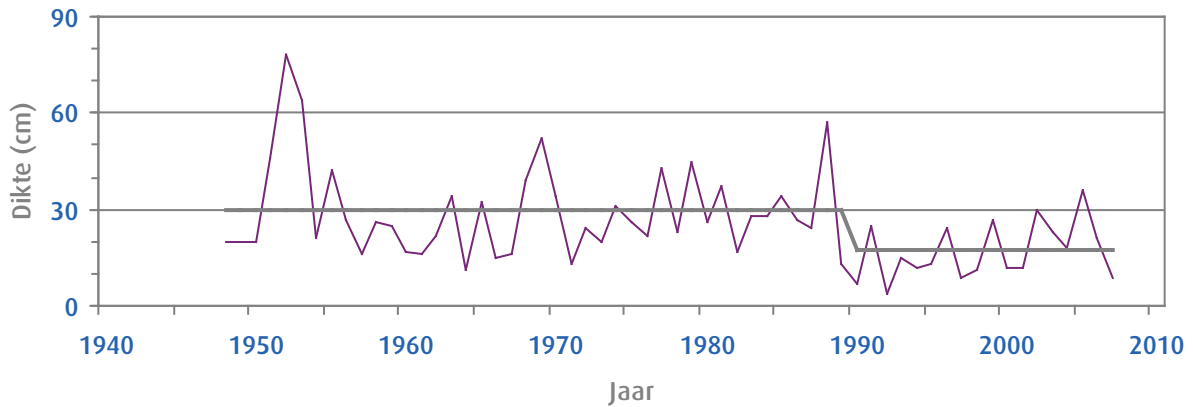
Figuur 14. Aantal dagen met neerslag onder de vorm van sneeuw te Ukkel tijdens de periode 1901-2007.

De dikte van de sneeuwlaag wordt in Ukkel sinds het einde van de 19^{de} eeuw gemeten. De jaarlijkse maximale waarde vertoont een zeer grote variabiliteit van het ene jaar tot het andere. Ook al zijn de gemeten waarden sinds de opwarming tijdens de jaren 1980 vrij laag, **toch kunnen we geen significante tendens vaststellen voor de jaarlijkse maximale dikte van de sneeuwlaag gedurende de 20^{ste} eeuw. Hetzelfde geldt voor het jaarlijkse aantal dagen met sneeuw op de bodem, sinds de jaren 1980 in het algemeen vrij laag in Ukkel, maar voor de 20^{ste} eeuw werd er geen opmerkelijke tendens ontdekt.**

Elders in het land zijn de reeksen met sneeuwmetingen veel korter en vaak minder nauwkeurig. We hebben wel sinds 1948 een heel waardevolle reeks met de dikte van de sneeuwlaag waargenomen in het station van Saint-Hubert, gelegen op het Ardens plateau en eigendom van Belgocontrol. In dit station zien we, na de opwarming van de jaren 1980, **een zeer significante daling van de jaarlijkse maximale dikte van de sneeuwlaag**, vooral tijdens de jaren 1990 (zie figuur 15).

¹³ Met sneeuwval bedoelen we elke soort neerslag die bestaat uit sneeuw (bijvoorbeeld een paar sneeuwvlokken met tegelijkertijd regen, of meer klassieke sneeuwval).

Jaarlijkse maximale dikte van de sneeuwlaag
Saint-Hubert 1948-2007



Figuur 15. Jaarlijkse maximale dikte van de sneeuwlaag in Saint-Hubert, tijdens de periode 1948-2007.

Worden de droogteperiodes langer?

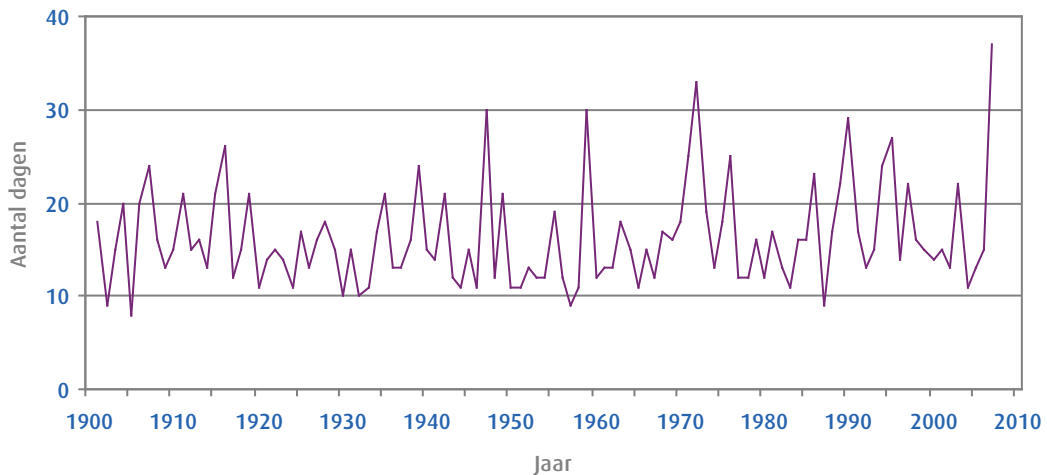
Een lange periode zonder neerslag, of met nagenoeg geen neerslag, kan schadelijke gevolgen hebben voor verschillende sectoren van onze samenleving. Zo verstoort bijvoorbeeld te weinig neerslag tijdens de winterperiode de aanvulling van de watervoorraad in de ondergrondse waterreserves. In de lente en in de zomer vermindert een watertekort het landbouwrendement. Een te lange droogteperiode werkt de branden in de Hoge Venen tijdens de lente in de hand.

Het begrip droogte is niet op een eenvoudige en algemene manier definieerbaar. Zoals we al illustreerden hangt het af van het domein waarin wij ons vooral interesseren. In elk geval speelt het neerslagtekort, beschouwd over een min of meer langere periode, een cruciale rol in het karakteriseren van de ernst van de droogte, maar andere parameters, (zoals de wind, de temperatuur, de hoeveelheid water aanwezig in de bodem,...) spelen hierin eveneens een rol en helpen ons de omvang en de impact ervan in te schatten.

Wij zullen hier enkel de evolutie van de langste periodes zonder opvallende dagelijkse neerslag¹⁴ in de loop van de 20ste eeuw onderzoeken. Figuur 16 illustreert voor de zes warmste maanden van het jaar de duur van de langste periode zonder opvallende neerslag sinds 1901. De trendanalyse toont geen significante evolutie van deze parameter tijdens de 20^{ste} eeuw. Merk op dat het absolute record dateert uit 2007, met 37 opeenvolgende dagen zonder opvallende neerslag te Ukkel tussen 30 maart en 5 mei.

¹⁴ Onder « opvallende dagelijkse neerslaghoeveelheid » verstaan wij een dagelijkse neerslaghoeveelheid die tenminste 0,5 mm bereikt. Dit laat ons toe om een « droge » dag te definiëren als een dag waarop de gevallen neerslaghoeveelheid kleiner dan 0,5 mm is.

Maximum jaarlijks aantal opeenvolgende 'droge' dagen
Ukkel période april-september 1901-2007



Figuur 16. Duur (in dagen) van de langste periode zonder opvallende neerslag (dagelijkse hoeveelheden kleiner dan 0,5 mm) gedurende de zes warmste maanden van het jaar te Ukkel tijdens de periode 1901-2007.

Een gelijkaardig resultaat verkrijgen we wanneer we de evolutie van de langste duur van een periode zonder opvallende dagelijkse neerslaghoeveelheden tijdens de koudste periode van het jaar bestuderen. Geen enkele significante evolutie van deze parameter werd waargenomen tijdens de 20^{ste} eeuw.

Als conclusie kunnen wij stellen dat, rekening houdend met het feit dat de duur van de periodes zonder opvallende neerslaghoeveelheden een aanwijzing zijn voor het karakteriseren van de intensiteit van droogteperiodes, **de resultaten van de uitgevoerde analyses geen indicatie geven dat de droogteperiodes intenser zijn geworden in de loop van de 20ste eeuw.**

Wij benadrukken echter dat deze algemene conclusies niet noodzakelijk van toepassing zijn op alle soorten droogtes en dat complementaire studies nodig zijn om de eerste resultaten die hier werden beschreven te vervolledigen. Bij de bevoorrading van ondergrondse waterreserves is bijvoorbeeld de analyse van de neerslagtekorten over langere periodes meestal vereist (van een seizoen tot enkele jaren) en de droogte-indicatoren, in deze studie gedefinieerd, zijn bijgevolg niet van toepassing in dat domein.

Zijn er meer stormen?

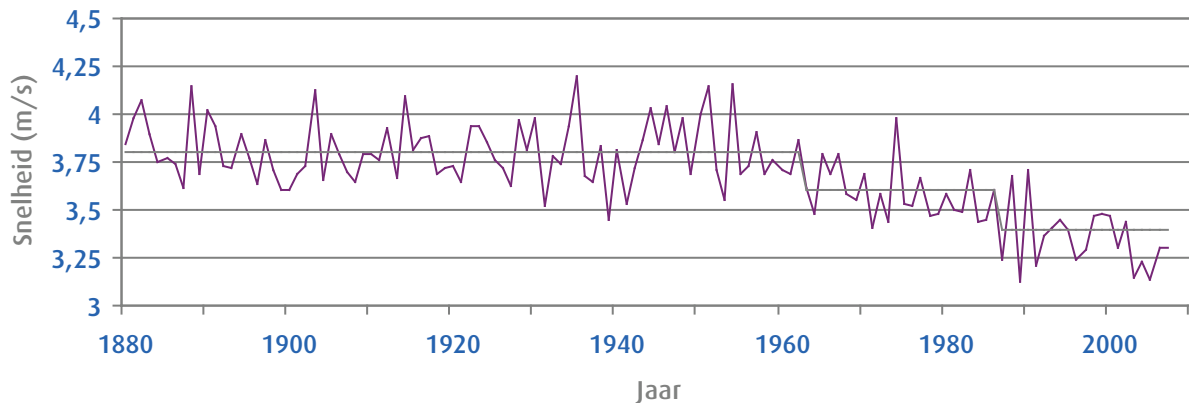
De windmetingen worden in het bijzonder beïnvloed door de kenmerken¹⁵ van de omgeving rond de anemometrische meetmast, maar ook door de ruwheid¹⁶ en de topografie van de omgeving. Elke verandering van deze omstandigheden kan dus de trendanalyse van de anemometrische reeksen bemoeilijken.

We zullen eerst de algemene evolutie van de windsnelheid bestuderen. De langste reeks windmetingen beschikbaar in ons land is de waarnemingsreeks van de klimatologische meetmast te Sint-Joost-ten-Node, daarna die van Ukkel. Figuur 17 illustreert de evolutie van de jaarlijkse gemiddelde windsnelheid vanaf 1880. De analyse van deze gegevens duidt aan dat de gemiddelde windsnelheid in de streek van Brussel tot ongeveer 1960 relatief stabiel is gebleven, maar dat zij tot op heden op een relatief regelmatige wijze afneemt met meer dan 10 %. Toch moet dit resultaat a priori met de nodige voorzichtigheid geïnterpreteerd worden. Er werd immers tijdens de homogenisering van deze reeks wel rekening gehouden met de constructie van een gebouw in de nabijheid van de meetmast in de jaren 1960, maar niet met de evolutie van de vegetatie rondom de waarnemingsplaats.

¹⁵ Bijvoorbeeld de nabijheid van obstakels zoals gebouwen of bomen die de windsnelheid kunnen veranderen of doen afnemen al naargelang het geval.

¹⁶ Aan het aardoppervlak is de aanwezigheid van gelijk welk obstakel een bron van « ruwheid » die de luchtstroming verstoort en dus de windsnelheid beïnvloedt.

Jaarlijkse gemiddelde windsnelheid
Sint-Joost-ten-Noode/Ukkel 1880-2007

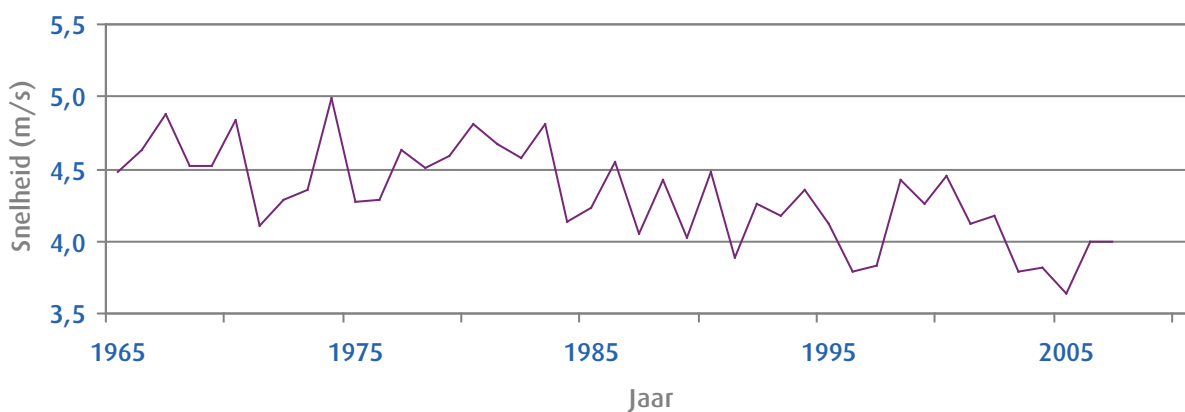


Figuur 17. Jaarlijkse gemiddelde windsnelheid te Sint-Joost-ten-Node/Ukkel tijdens de periode 1880-2007 (in m/s).

Er bestaan ook andere anemometrische reeksen in België, maar gemeten over kortere periodes. Een recente studie van het KMI heeft de waarnemingsplaatsen van de stations onderzocht en de historiek van de metingen zo goed mogelijk beschreven. Zo kunnen we eruit afleiden dat de metingen uitgevoerd op de luchthaven in Zaventem vrij homogeen zijn sinds het midden van de jaren 1960. Figuur 18 toont de evolutie van de jaarlijkse gemiddelde windsnelheid op die plaats vanaf 1965. De windsnelheid is eerst relatief stabiel tot het begin van de jaren 1980. Daarna werd rond 1983 een vrij opmerkelijke daling merkbaar die zich enigszins lijkt verder te zetten. **De vermindering van de windsnelheid tussen het begin van de jaren 1980 en de recentere jaren bedraagt ongeveer 10 %.** Dit resultaat is globaal gezien coherent aan het resultaat dat we verkregen uit de metingen te Ukkel (zie figuur 17), en aan resultaat van het station te Saint-Hubert, in de Ardennen, waar de omgeving, net als in het station te Zaventem, redelijk onveranderd is gebleven sinds het midden van de jaren 1960.

Wanneer we de evolutie van de wind op schaal van de seizoenen sinds 1965 bestuderen, vinden we relatief coherente resultaten voor de drie hier besproken stations. Met uitzondering van de winter (en eveneens de herfst in Ukkel) kenden we in de drie stations tijdens de andere seizoenen een zeer significante afname van de windsnelheid sinds de jaren 1980. Er werd echter geen opmerkelijke tendens waargenomen tijdens de winter, zijnde het seizoen waarin de windsnelheden meestal het hoogst zijn.

Jaarlijkse gemiddelde windsnelheid
Zaventem 1965-2007

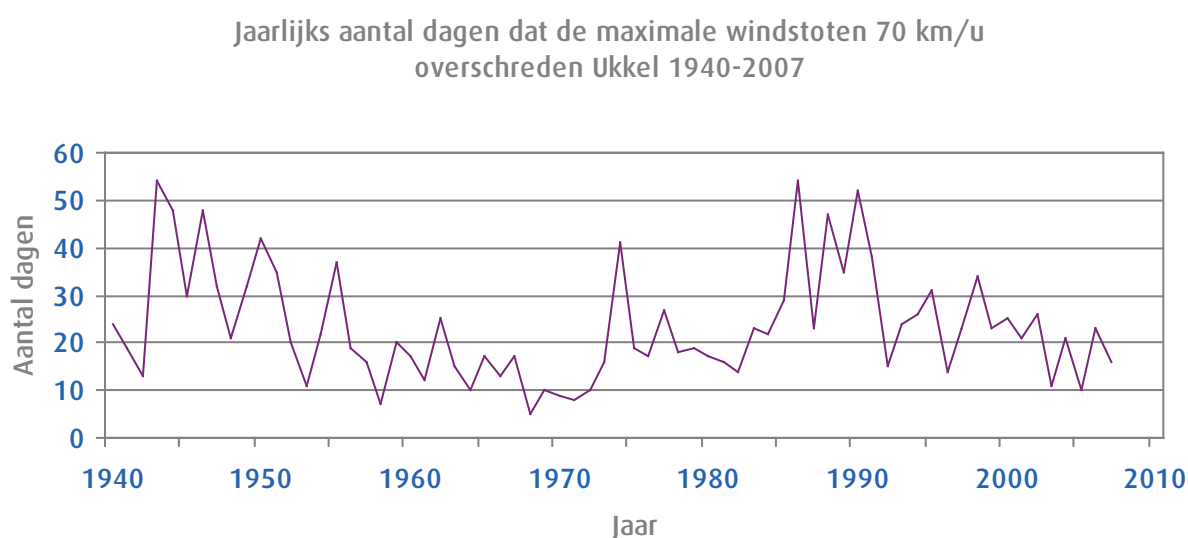


Figuur 18. Jaarlijkse gemiddelde windsnelheid te Zaventem tijdens de periode 1965-2007 (in m/s).

Laten we nu de hoogste windsnelheden eens bekijken, die meestal voorkomen tussen oktober en april en die soms de oorzaak kunnen zijn van belangrijke schade in ons land.

Hier zullen we een stormdag op een gemakkelijke manier definiëren als een dag tijdens welke de windstoten minstens de drempelwaarde van 70 km/h overschrijden

Figuur 19 toont de evolutie van het jaarlijks aantal stormdagen te Ukkel tijdens de periode 1940-2007. Tijdens deze beschouwde periode bedraagt het gemiddelde van deze parameter 24 dagen. De analyse van de evolutie van deze parameter brengt ons tot het besluit dat er globaal bekeken geen significante evolutie van deze parameter tijdens de bestudeerde periode is. Bovendien nemen we hier opnieuw een belangrijke variabiliteit van de waarde van deze parameter waar op de schaal van enkele jaren? We zien vooral een hoge frequentie van het aantal stormdagen rond de jaren 1947 en 1989 en lagere waarden tijdens de jaren 1960 en in het begin van de jaren 1970. De recentste jaren worden eveneens gekenmerkt door een relatief lage frequentie van het aantal stormdagen.



Figuur 19. Jaarlijks aantal stormdagen (maximale windstoot hoger dan 70 km/h) te Ukkel tijdens de periode 1940-2007.

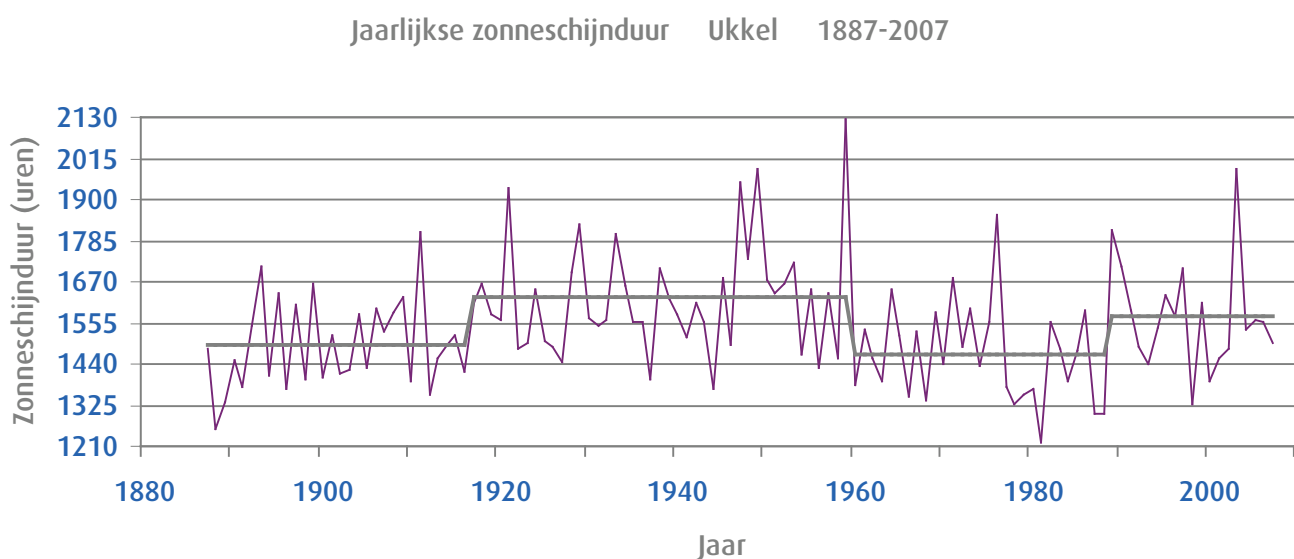
De analyse van de beschikbare gegevens in de andere anemometrische stations sinds 1985 toont ons hetzelfde resultaat als dat van Ukkel: **de terugkeurfrequentie van de stormen (als we deze definitie hanteren) is niet gestegen tijdens de laatste 20 jaar.**

Dezelfde vaststelling van een globale stabiliteit, niettegenstaande een variabiliteit op schaal van enkele jaren is van toepassing op de reeks waarnemingen van de maximale windstoten te Ukkel (sinds 1940) en in de andere stations (sinds 1985). Wij stellen voornamelijk vast dat de maximale windstoten relatief laag zijn geweest tijdens de laatste tien jaren, na een verzameling van hoge waarden tussen 1983 en 1990. Wij kunnen dus op basis van het geheel van de verkregen resultaten besluiten dat **de intensiteit van de stormen in ons land niet is toegenomen tijdens de laatste decennia, in het bijzonder niet tijdens de laatste 20 jaar.**

Om te eindigen merken we nog op dat in de zomer tijdens de onweersdagen de winden soms ook lokaal heel hevig kunnen zijn. In sommige gevallen kunnen er zelfs tornado's ontstaan uit een onweerswolk die soms aanzienlijke schade aanrichten, zoals in Oostmalle in 1967 en in Léglise in 1982. Dit soort meteorologisch fenomeen maken we gemiddeld enkele keren per jaar mee in België. Het KMI beschikt over veel informatie over de tornado's in ons land sinds meer dan een eeuw, maar alleen met een grondige analyse van die informatie en een controle van hun kwaliteit kunnen we misschien vaststellen dat de frequentie van dit extreme fenomeen gestegen is tijdens de 20^{ste} eeuw. Dit soort studie is bijzonder delicaat, rekeninghoudend met de moeilijkheid van het opmaken van homogene waarnemingsreeksen.

Is de zonneshijnduur veranderd?

De zonneshijnduur wordt in Ukkel gemeten sinds 1887. Ze is nauw gecorreleerd met de hoeveelheid wolken in de lucht, die één van de belangrijkste klimatologische parameters is, maar waarvan de waarde niet altijd visueel eenvoudig te bepalen is. Figuur 20 illustreert de evolutie van de jaarlijkse zonneshijnduur in Ukkel sinds het begin van de waarnemingen. **Er is geen globale tendens te zien in deze periode van 120 jaar maar we hebben wel een belangrijke variabiliteit opgemerkt op meerjarige schaal**, met meestal hogere waarden tussen 1920 tot 1950 en meestal lagere waarden tussen 1960 tot 1990. De laatste twintig jaar lag de gemiddelde zonneshijnduur dichtbij het langjarig gemiddelde.



Figuur 20. Jaarlijkse zonneshijnduur (in uren) te Ukkel tijdens de periode 1887-2007.

Als we de tendensen op schaal van de seizoenen bekijken, zien we dat daar ook geen globale tendens waarneembaar is sinds 1887. We zien dat er tijdens de lente, meer dan tijdens de andere seizoenen, duidelijke groeperingen zijn van relatief opvallende waarden, meestal boven het gemiddelde tussen 1910 en 1960 en meestal onder het gemiddelde tussen 1960 en 1990. Na de zomer van 1976, die bijzonder zonnig was, was de zonneshijnduur veel lager voor de volgende tien zomers, met waarden die meestal onder het seizoensgemiddelde lagen. Vanaf 1990 ligt de zomerse zonneshijnduur hoger dan het seizoensgemiddelde.

De evolutie van de globale zonnestraling aan het aardoppervlak, gemeten te Ukkel tijdens de laatste decennia, wordt voorgesteld en besproken in hoofdstuk 2. Over deze periode zijn de hierboven bekomen resultaten voor de zonneshijnduur coherent met deze van de rechtstreekse zonne-energie aan het aardoppervlak, gemeten door de globale zonnestraling.

3. Samenvatting

De regelmatige meteorologische metingen zijn in 1833 begonnen in Sint-Joost-ten-Node in de regio Brussel en werden vanaf 1886 voortgezet in Ukkel wanneer de sterrenwacht naar de actuele waarnemingsplaats van het KMI verhuisde. De lange waarnemingsreeksen uitgevoerd te Brussel hebben ons toegelaten een idee te vormen over de evolutie van het Belgisch klimaat tijdens de laatste 170 jaar. Er werden ook nuttige data geleverd door andere waarnemingsstations, maar over kortere periodes die pas begonnen zijn tijdens de tweede helft van de 20^{ste} eeuw.

Uit het geheel van geanalyseerde gegevens blijkt dat **het Belgische klimaat geëvolueerd is in de loop van de 20^{ste} eeuw**. Meer in het bijzonder deden er zich twee zeer opmerkelijke en vrij plotse stijgingen voor in zowel de seizoenstemperaturen als de jaartemperaturen (van de orde van 1 °C), de eerste in de eerste helft van de 20^{ste} eeuw en de tweede tijdens de jaren 1980.

De frequentie van de hittegolven vertoont een significante stijging in het midden van de jaren 1990. De variabiliteit van deze parameters is nochtans belangrijk tijdens de hele 20^{ste} eeuw en de kenmerken van de hittegolven van de recentste jaren zijn relatief gelijkaardig aan deze waargenomen tijdens de jaren 1940, als gevolg van de zomerse opwarming tijdens het eerste deel van de 20^{ste} eeuw. Daartegenover lijkt de frequentie van de koudegolven op significante manier te zijn afgenomen in het begin van de jaren 1970.

De algemene stijging van de minimumtemperaturen tijdens de 20^{ste} eeuw ligt ook aan de basis van de verlenging van de maximale jaarlijkse periode zonder vorstdagen. Inderdaad, de laatste vorstdag aan het einde van de winterperiode heeft de tendens zich steeds vroeger voor te doen, terwijl de eerste vorstdag bij de aanvang van de winterperiode de trend vertoont zich later te manifesteren.

Wat de neerslag in de Brusselse regio betreft, zien we tussen het begin van de waarnemingen in 1833 en het einde van de 20^{ste} eeuw een stijging van de totale jaarlijkse hoeveelheid van ongeveer 7 % (zeer significant) en een stijging van ongeveer 15 % van de totale hoeveelheid in de winter (zeer significant) en de lente (significant).

Bovendien nemen we in het overgrote deel van de klimatologische stations van ons land tijdens de laatste vijftig jaar een stijgende tendens waar, die significant tot zeer significant is voor de jaarlijkse extreme neerslaghoeveelheden gecumuleerd over verschillende dagen. Deze extreme neerslaghoeveelheden komen meestal voor tijdens de winter. De jaarlijkse maxima op 24 uur (of zelfs voor kortere tijdsduren) zijn echter stabiel, behalve nabij de Kust waar, volgens een recente studie, in de jaarlijkse dagelijkse maxima al een significante stijging aanwezig is.

Uit de analyse van de jaarlijkse maxima sinds 1898, van de neerslaghoeveelheden in een periode van 1 uur tot enkele uren, blijkt dat er in Ukkel geen opmerkelijke evolutie voor deze parameters merkbaar is. Bovendien, niettegenstaande enkele recordwaarden tijdens de recentste jaren, vertoont de jaarlijkse frequentie van het aantal dagen waarop de neerslaghoeveelheid meer dan 20 mm bedroeg tot op heden ook geen significante evolutie in Ukkel.

Tenslotte kunnen we uit het geheel van de geanalyseerde neerslaggegevens besluiten dat noch de intensiteit, noch de frequentie van hevige onweders in de regio Brussel een duidelijke stijging vertoont sinds het begin van de 20^{ste} eeuw. Vanuit de analyse van de jaarlijkse neerslagmaxima opgemeten in het Belgisch klimatologisch netwerk, komen we tot een gelijkaardige conclusie voor het hele land voor de laatste 50 jaar, behalve waarschijnlijk voor het gebied nabij de Kust¹⁷.

Een volledige studie van de evolutie van de droogtes in België zou talrijke analyses vereisen die niet uitvoerbaar waren in het kader van dit werk. Het hoofdresultaat van deze eerste studie duidt aan dat de duur van de langste periodes zonder opvallende neerslag geen enkele significante evolutie vertoont sinds het begin van de 20^{ste} eeuw.

¹⁷ Om dit te bevestigen, zouden we moeten verifiëren of de jaarlijkse dagmaxima, die een stijgende tendens vertonen nabij de Kust, wel degelijk overeenkomen met de neerslaghoeveelheden tijdens onweertijd.

Nauw verbonden met de stijging van de temperaturen in het begin en op het einde van de 20^{ste} eeuw, is het feit dat de neerslag onder de vorm van sneeuw zeer opmerkelijk minder frequent is geworden in Ukkel. De hoeveelheid sneeuw op de bodem is heel veranderlijk van het ene jaar op het andere en we kunnen geen significante evolutie ontdekken in de regio Brussel, zelfs al zijn de hoeveelheden gevallen sneeuw de laatste jaren meestal klein. Op het Ardens plateau, in de regio van Saint-Hubert, is er echter sinds de winterse opwarming van het einde van de jaren 1980 een zeer opmerkelijke daling te zien in de jaarlijkse maximale sneeuwdikte.

In Ukkel nemen we een zeer significante daling waar van de jaarlijkse en seizoensgebonden gemiddelde windsnelheden in de tweede helft van de 20^{ste} eeuw. Door de jarenlange ontwikkeling van vegetatie rondom het meetpunt, kunnen we echter niet met zekerheid zeggen dat deze trend enkel het gevolg is van een klimatologisch effect.

Elders in het land bestaan er in enkele stations sinds het midden van de jaren 1960 windmetingen die waarschijnlijk, klimatologisch gezien, betrouwbaarder zijn voor de studie van de evolutie van de karakteristieken. De analyse van die gegevens vertoont een vrij plotse daling in de windsnelheid in de jaren 1980, en vervolgens een lichte toename van deze tendens. Dit opmerkelijke gedrag is ook zichtbaar op schaal van de seizoenen, behalve tijdens de winter wanneer de wind, hoewel heel veranderlijk van het ene jaar op het andere, over de gehele periode toch « stabiel » is.

Wat de stormen betreft hebben de analyses, die tot nu toe werden uitgevoerd op de hogere windstoten in Ukkel sinds 1940 en elders in ons land sinds 1985, nog geen specifieke trend aangetoond, noch wat betreft de intensiteit van de jaarlijkse, sterkste winden, noch voor de frequentie van felle winden.

Uit de analyse van de seizoensgebonden en jaarlijkse zonneshijnduur, gemeten in Ukkel, kunnen we eveneens geen globale tendens afleiden voor deze parameters sinds het begin van de metingen in 1887, maar we ontdekken wel een algemeen belangrijke variabiliteit op schaal van enkele jaren.

4. Perspectieven

Deze studie van het klimaat van België op schaal van de 20^{ste} eeuw is niet volledig en er is nog onderzoek in dit domein nodig. Hieronder vindt u enkele mogelijke pistes.

- Het zou nuttig zijn de evolutie van andere klimatologische parameters te onderzoeken die hier nog niet bestudeerd werden, hetzij door tijdsgebrek, hetzij bij gebrek aan digitale reeksen zoals de bewolgingsgraad, maar eveneens de gecombineerde evolutie van verschillende parameters.
- Zelfs als de resultaten, bekomen in dit hoofdstuk over de hittegolven, de koudegolven en de stormen betrouwbaar lijken, zou het toch interessant zijn de gevoeligheid ervan te bestuderen aan de hand van de precieze definities die worden weerhouden voor deze fenomenen. In het geval van droogtegolven zijn bijkomende onderzoeken nodig.
- Het project voor het coderen van de langste en oudste waarnemingsreeksen van het klimatologische netwerk zou ons moeten toelaten de resultaten van de uitgevoerde analyses voor die reeksen te vergelijken met de reeds bekomen resultaten van het station te Ukkel.
- Het zou bovendien ook bijzonder interessant zijn de hier besproken veranderingen te linken aan waargenomen veranderingen in de atmosferische circulatie en de frequentie van de weertypes.
- Andere statistische methodes zouden kunnen worden toegepast om de studie over de klimaatevolutie in ons land te vervolledigen en verder uit te diepen.
- De analyse van de evolutie van de verschillende klimaatindexen, die verschillende klimatologische parameters combineren, zou kunnen uitgevoerd worden in samenwerking met onderzoekers die geïnteresseerd zijn in de studie van de impact van de klimaatveranderingen op verschillende domeinen (landbouw, bosbouw, fauna en flora, hydrologie, gezondheid, energie, verzekeringen,...).

Wij hebben in dit hoofdstuk een geheel van resultaten gebundeld, afkomstig van de analyses van de lange klimatologische waarnemingsreeksen uitgevoerd te Ukkel. Het volgende hoofdstuk illustreert de bijdrage van het KMI in onderzoeksdomeinen die de opvolging van het klimaatsysteem betreffen, vertrekkende vanuit recentere meettechnieken. Als aanvulling van hoofdstuk 1 zal in hoofdstuk 2 onder andere de evolutie van andere klimatologische parameters, eveneens gemeten te Ukkel (ozon, zonnestraling, aërosolen), worden voorgesteld, maar over kortere periodes.

Hoofdstuk 2. Enkele elementen van het klimaatsysteem bestudeerd op het KMI

1. Inleiding

In het vorige hoofdstuk werden de klimaatveranderingen beschreven zoals ze naar voren komen uit de waarnemingen aan de grond in België. Deze waarnemingen verschillen niet sterk van onze buurlanden.

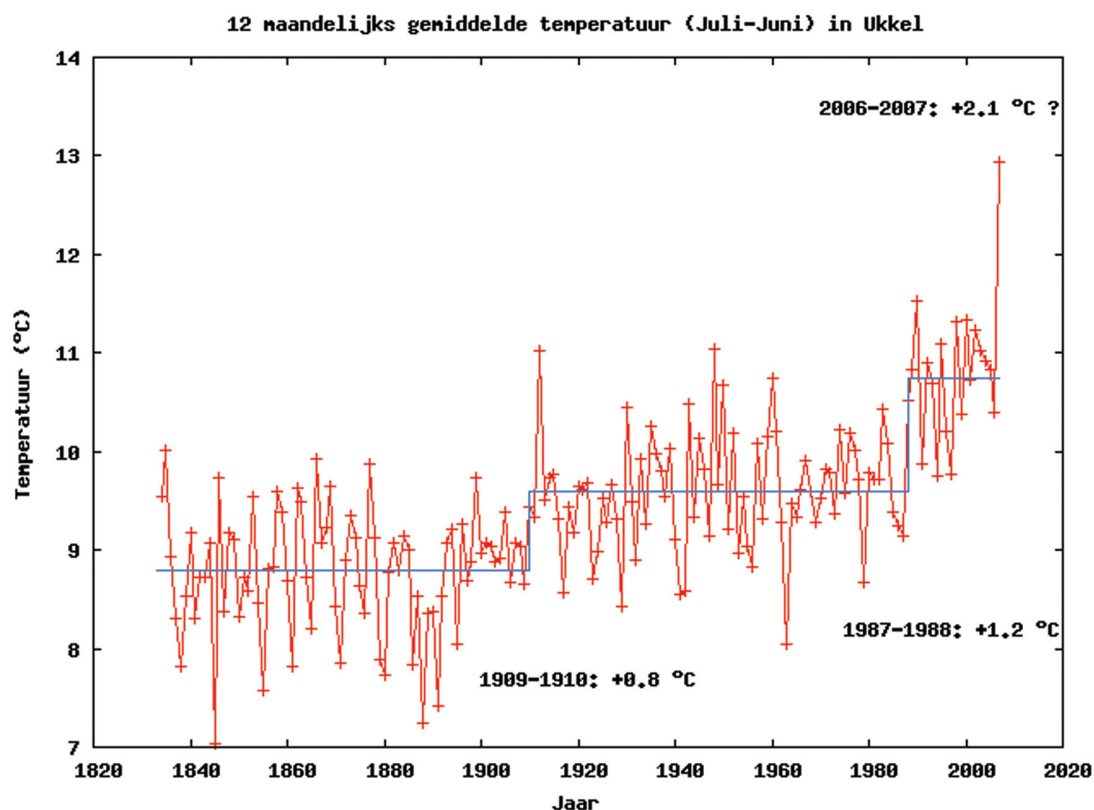
De huidige kennis over ons klimaatsysteem steunt op het geheel van dit type van waarnemingen, verzameld door meteorologen over de hele wereld, maar ook op vele andere gegevens.

Sommige studies worden uitgevoerd door het KMI en leveren waarnemingen die geschikt zijn voor het modelleren van het klimaat dat de « Belgische grenzen » overschrijdt.

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 zal evolueren, is het belangrijk om de oorzaken van de temperatuurveranderingen zo goed mogelijk te meten en te interpreteren. Meer informatie over dit onderwerp vindt u in het volledig rapport van het IPCC van 2007.

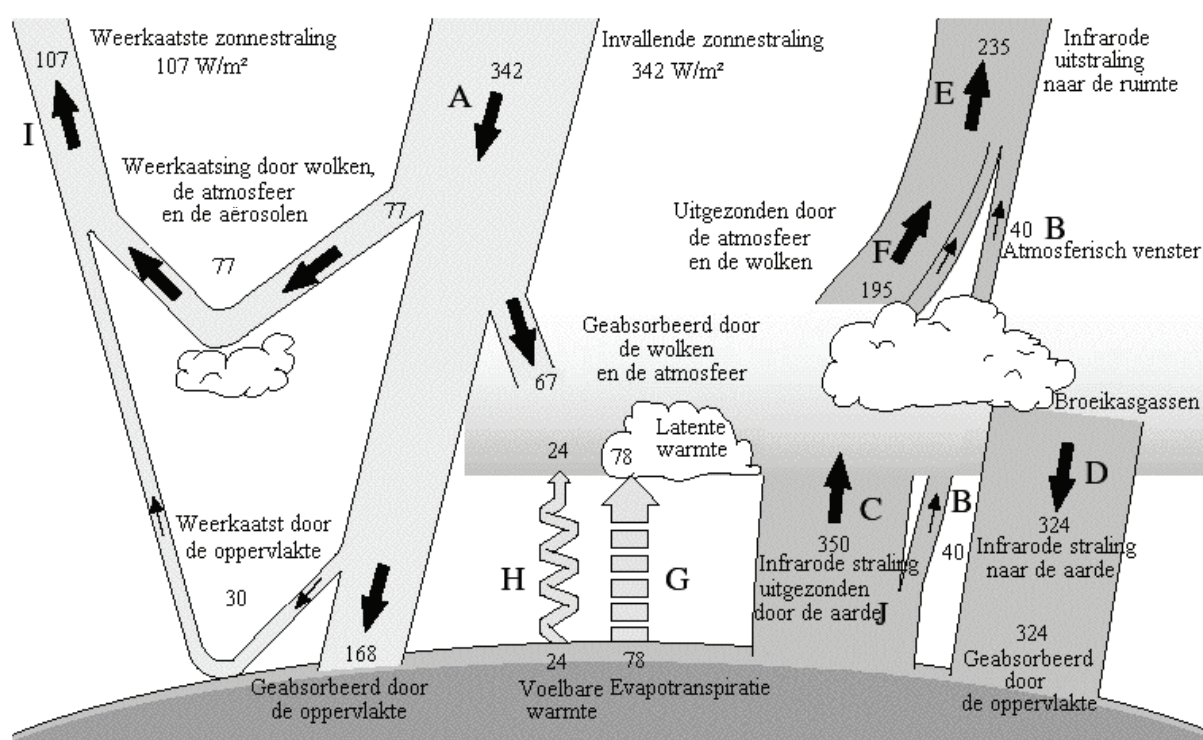
Figuur 1 toont een variant van de gemiddelde temperatuur in St-Joost-Ten-Node/Ukkel van 1833 tot 2007, waar de 12 maandelijks gemiddelde temperatuur berekend wordt van juli tot juni. Naast de eerder geïdentificeerde temperatuursprongen in 1909-1910 en in 1987-1988, is de gemiddelde temperatuur van juli 2006 tot juni 2007 2,1 °C hoger dan normaal. **Deze laatste temperatuuranomalie in 2006-2007 is groter dan ooit eerder gemeten, maar het is nog te vroeg om uit te maken of het hier gaat om het begin van een nieuwe temperatuursprong.**



Figuur 1. Twaalf maandelijks gemiddelde temperatuur (gemiddelde van juli tot juni) in Ukkel van 1833 tot 2007.

Fundamenteel wordt ons klimaat, en dus ook de temperatuur bepaald door de energiebalans van de aarde, waarover meer in de volgende paragraaf. Storingen van de energiebalans van de aarde bepalen of de aarde netto opwarmt of afkoelt. Deze storingen zijn de oorzaak van klimaatveranderingen. Het KMI speelt internationaal een leidende rol op het vlak van de meting van de energiebalans van de aarde.

De energiebalans drukt uit hoe de aarde opwarmt door inkomende zonnestraling en afkoelt door het verlies van straling naar de ruimte (zie figuur 2). Voor de meting van de inkomende zonnestraling vanuit de ruimte was het KMI één van de pioniers op internationaal vlak met metingen vanuit Spacelab in 1983. Sinds 1996 maken we ook referentiemetingen van de inkomende zonnestraling met ons DIARAD/VIRGO instrument op de SOHO satelliet.



Figuur 2. 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 energiefluxen aan, uitgedrukt in Wm^{-2} als jaargemiddelde waarde voor onze planeet *

* In dit vereenvoudigde schema is de waarde van de invallende zonnestraling 4 x lager dan de waarde van de zonneconstante die men gewoonlijk aanneemt, ongeveer $1360 W/m^2$. Inderdaad, de aarde heeft bij benadering een sferische vorm met een oppervlakte van $4 \pi R^2$, terwijl het oppervlak in projectie gezien door de zon πR^2 is (met R = straal van de aarde), vanwaar de factor 4 voor de energie ontvangen door de aarde als een geheel. De zonneconstante wordt gemeten door een satelliet loodrecht op de zonnestralen.

Voor de meting van de afkoeling door verlies van straling naar de ruimte maakt het GERB-instrument metingen vanop de Europese Meteosat weersatellieten vanaf 2003 (zie figuur 3). GERB is de afkorting van « Geostationary Earth Radiation Budget ». Het KMI is het centrum voor de verwerking van de GERB-gegevens. **Die gegevens laten toe de mechanismen achter de temperatuursanomalie van de jaren 2006-2007 in België en elders te bestuderen.**

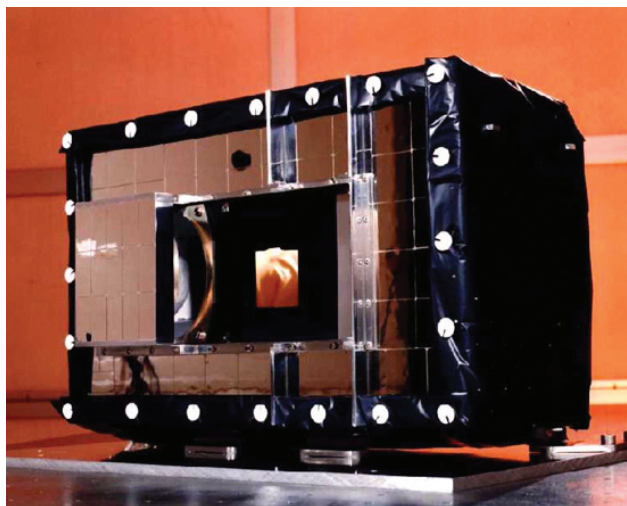
Als indicatie voor de veranderingen van de energiebalans van de aarde voor het begin van het ruimtemetingen, beschikt het KMI over lange meetreeksen van de inkomende zonnestraling aan het aardoppervlak. De langste meetreeks is die van de dagelijkse zonneshijnduur, met start in 1887. Nauwkeurigere en meer gedetailleerde metingen zijn de halfuurlijkse waarden van de zonnestraling, met start in 1951. Sinds het midden van de jaren 1950 tot de jaren 1980 is er een stijging van de inkomende zonnestraling van Ukkel met ongeveer 10 %. Deze stijging kan verklaard worden door een afname van het aantal aërosolen (vervuilende deeltjes in de atmosfeer), die onafhankelijk gemeten worden. Naast de toename van de hoeveelheid broeikasgassen, **zorgt de afname van de klassieke vervuiling voor een bijkomende opwarming van de aarde.** Deze bijkomende opwarming moet in rekening gebracht worden voor de studie van de temperatuursprong in 1987-1988.

In de komende secties worden respectievelijk behandeld: de GERB metingen in verband met de temperatuuranomalië in 2006-2007, de meting van de zonnestraling aan de grond en de aerosolen in verband met de temperatuursprong in 1987-1988 en de meting van de inkomende zonnestraling aan de top van de atmosfeer in verband met temperatuursveranderingen op lange termijn, die zich mogelijk manifesteerden in de temperatuursprong in 1909-1910.

2. De zonnestraling en de rol van de aerosolen

De energiebalans van de aarde gemeten vanuit de ruimte

Het klimaat op aarde wordt bepaald door het evenwicht aan de top van de atmosfeer tussen de opwarming door inkomende zonnestraling (pijl A in figuur 2), de afkoeling door reflectie van zonnestraling (pijl I in figuur 2) en door de uitzending van infrarode warmtestraling (pijl E in figuur 2). De toename van broeikasgassen in de atmosfeer zorgt voor een netto-opwarming van de aarde doordat ze de uitgezonden infrarode warmtestraling vermindert.



Figuur 3. Het GERB-instrument voor de meting van de energiebalans van de aarde.

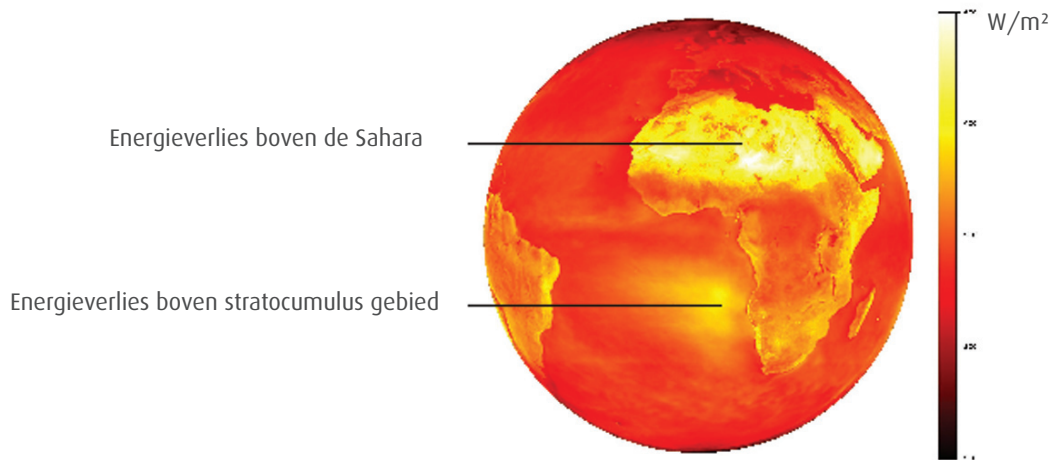
Zowel de reflectie van zonnestraling als de uitzending van infrarode warmtestraling worden sterk beïnvloed door de aanwezigheid van wolken. **Er bestaat nog een grote onzekerheid over de reactie van de hoeveelheid bewolking op de temperatuurstijging** ten gevolge van de toegenomen broeikasgassen¹⁸.

Het is zelfs niet geweten of de bewolking zal toenemen en hierdoor de opwarming zal tegenwerken (tegenkoppel effect) door reflectie van zonnestraling, 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.

Het «GERB» instrument werd ontwikkeld door het Verenigd Koninkrijk, België en Italië. Het belangrijkste deel van de gegevensverwerking gebeurt op het KMI. Sinds 2003 maakt GERB metingen van de energiebalans boven Europa en Afrika vanaf de Europese geostationaire weersatellieten Meteosat 8 en Meteosat 9 sinds 2003. **De analyse van de GERB metingen zal toelaten de verschillende factoren die een rol spelen in klimaatveranderingen (broeikasgassen, aerosolen, verandering bewolking...) te onderscheiden.**

¹⁸ Enkele van de andere onzekerheden worden behandeld in hoofdstuk 3.

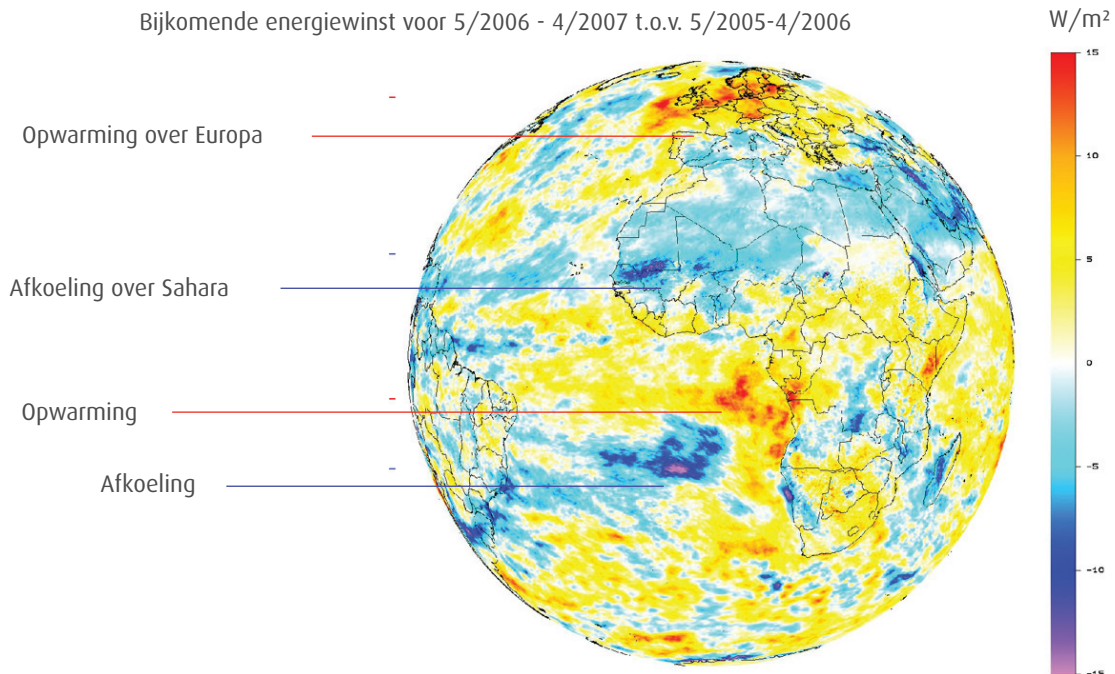
Jaarlijks gemiddelde totaal energieverlies van 5/2005 tot 4/2006



Figuur 4. Energieverlies naar de ruimte binnen het Meteosat gezichtsveld van mei 2005 tot april 2006.

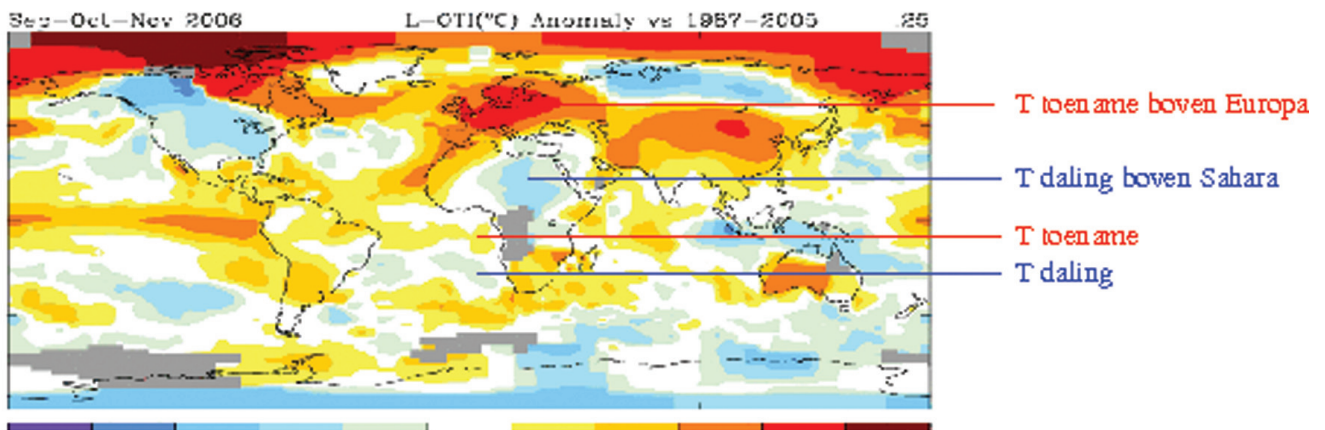
Figuur 4 toont het jaarlijks gemiddelde energieverlies van mei 2005 tot april 2006. Gebieden met een groot energieverlies zijn de Sahara en het stratocumulus gebied aan de westkust van Zuidelijk Afrika. Deze gebieden van sterke afkoeling komen overeen met de dalende luchtstromen van de tropische Hadley-circulatie, terwijl de stijgende luchtstromen van de Hadley-circulatie ontstaan rond de evenaar waar de opwarming door de inkomende zonnestraling maximaal is. Er is dus een direct verband tussen de grootschalige dynamica van de atmosfeer en de ruimtelijke verdeling van de energiebalans van de aarde.

Bijkomende energiewinst voor 5/2006 - 4/2007 t.o.v. 5/2005-4/2006



Figuur 5. Verandering in netto energiewinst binnen het Meteosat gezichtsveld tussen jaar 2 (mei 2006 tot april 2007) ten opzichte van jaar 1 (mei 2005 tot april 2006).

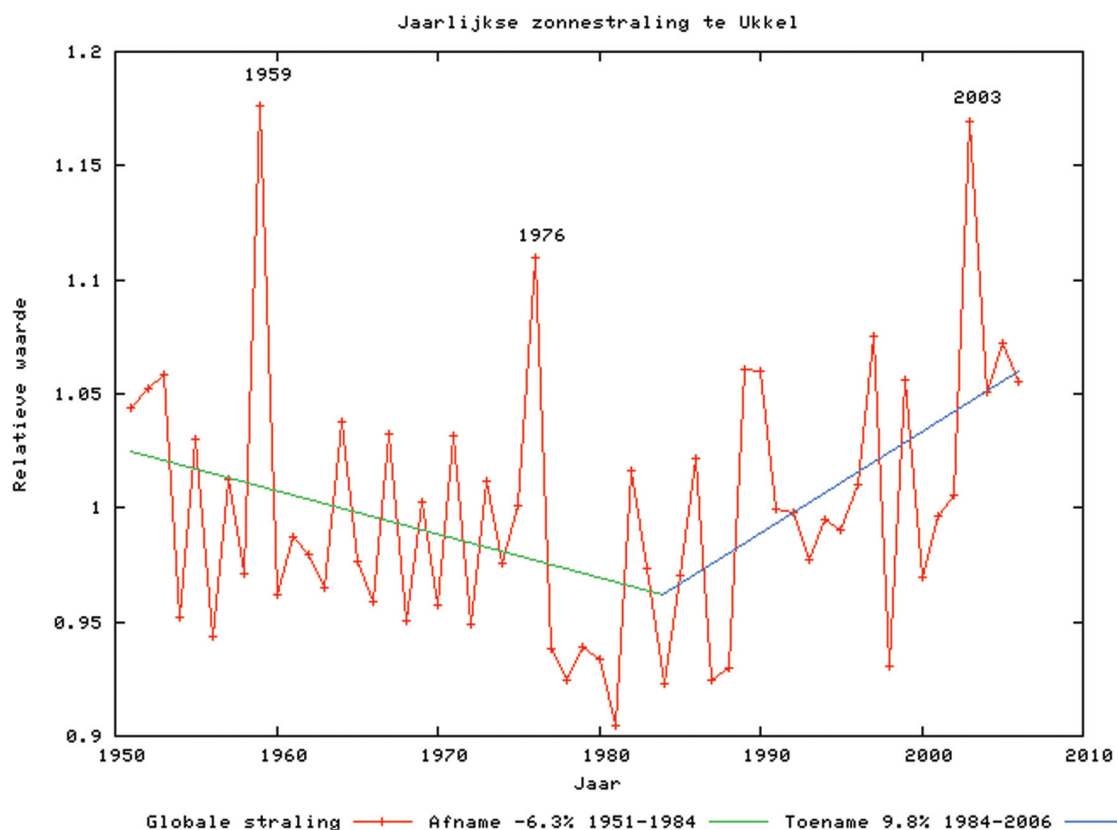
De verandering in netto-energie winst voor jaar 2 ten opzichte van jaar 1 wordt getoond in figuur 5. Het meest opvallend zijn enerzijds een verhoging van de energiewinst (rode kleur) boven Europa, en anderzijds een differentiële opwarming/afkoeling (donkerblauwe en paarse kleur) voor het stratocumulusgebied, die kan verklaard worden door een geografische verschuiving van dit stratocumulusgebied. Er is ook een zwakkere maar geografisch uitgebreide algemene afkoeling (lichtblauwe kleur) boven de Sahara-woestijn.



Figuur 6. Temperatuursanomalie voor september-november 2006 ten opzichte van september-november 1987-2005.

De temperatuuranomalie in 2006-2007 werd niet enkel in België waargenomen. Figuur 6 toont de temperatuurverandering voor de maanden september-november 2006 in vergelijking met de klimatologie van 1987 tot 2005. De figuur van de temperatuurveranderingen toont een opvallende gelijkenis met die van de veranderingen in de energiewinst. In het bijzonder lijkt de temperatuurstoename in Europa na de zomer van 2006 veroorzaakt te zijn door de verhoogde energiewinst gemeten door GERB. Ook de differentiële temperatuurveranderingen in het stratocumulusgebied en de temperatuurdaling boven de Sahara lijken veroorzaakt te zijn door overeenkomstige veranderingen in de energiewinst. Een oorzakelijk verband tussen energiewinst en temperatuurverandering kan verwacht worden vanuit de vergelijking van het behoud van energie. Het GERB instrument is het eerste waarmee dit oorzakelijke verband werkelijk gedemonstreerd wordt. **De klimaatmonitoring en de voorspelbaarheid van toekomstige klimaatveranderingen moeten in etappes verder verkend worden.**

Zonnestraling, aërosolen en radiatieve balans



Figuur 7. Relatieve variatie van de jaarlijkse globale zonnestraling te Ukkel sinds 1951.

Eén van de huidige grote vragen van de wetenschappelijke gemeenschap is te bepalen in welke mate klimaatsveranderingen schade zullen veroorzaken voor de mens, en ook te bepalen in hoeverre de mens zelf verantwoordelijk is voor deze klimaatsveranderingen (IPCC 2001, 2007). In dit kader meet het KMI sinds 1951 de globale zonnestraling en sinds 1984 de hoeveelheid aërosoldeeltjes in de atmosfeer. Informatie op langere termijn over de zonnestraling is zelfs beschikbaar via de metingen van de zonneschijnduur, die in Ukkel bestaan sinds 1887.

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 bewolgingsgraad), 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 aërosolen in de atmosfeer. Aërosolen zijn kleine deeltjes die rondzweven in de atmosfeer (zoals zeezout of stofdeeltjes). Ze bevinden zich hoofdzakelijk tussen het aardoppervlak en een hoogte van 3 km. De verhoging van de aërosolen in de atmosfeer vermindert de zonnestraling aan de grond door de zogenaamde directe en indirecte aërosoleffecten. Het direct aërosoleffect is een afname van de transmissie van de onbewolkte atmosfeer door de toename van de vervuilende deeltjes. Afhankelijk van hun samenstelling absorberen of reflecteren de aërosolen in min of meerdere mate het invallend zonlicht. Het indirect aërosoleffect zorgt ervoor dat er meer waterdruppels in wolken gevormd worden, waardoor de wolken meer zonlicht reflecteren en er dus ook minder zonlicht het aardoppervlak bereikt.

De langste meetreeks van de globale zonnestraling in België is die in Ukkel, met start in 1951. De rode curve in figuur 7 toont de relatieve waarden van de jaarlijkse cumulatieve waarde (relatief t.o.v. het gemiddelde over de volledige periode 1951-2006) van deze globale zonnestraling.

De bekende zonnige en warme jaren (1959, 1976 en 2003) komen naar voor als jaren met een uitzonderlijk hoge zonnestraling. **De opwarming van het aardoppervlak door de hoge zonnestraling kan op zijn minst gedeeltelijk de hoge temperaturen verklaren**, naast een mogelijk transport van warme lucht vanuit de overheersende windrichtingen. Een verdere analyse van de gegevens toont aan dat deze 3 uitzonderlijk zonnige jaren te wijten waren aan een uitzonderlijk lage bewolking in deze jaren.

Over de periode van 1951 tot 1984 is er een afname van de zonnestraling met 6,3 % (groene lijn in figuur 7). Dit komt overeen met de « global dimming »¹⁹ die internationaal vastgesteld werd.

Over de periode van 1984 tot 2006 is er een toename van de zonnestraling met 9,8 % (blauwe lijn in figuur 7). Dit komt overeen met de recente globale stijging die internationaal door het BSRN (Baseline Surface Radiation Network) vastgesteld werd (<http://bsm.ethz.ch/>).

Deze langetermijnsveranderingen van de zonnestraling kunnen enkel verklaard worden door veranderingen in de hoeveelheid aërosolen, die samenhangt met de luchtvervuiling.

De gemiddelde temperaturen in Ukkel (zie figuur 1) tonen geen systematische toename tijdens de periode van de global dimming. De temperatuursprong in 1987-1988 en de anomalie in 2006-2007 gebeurden pas tijdens de periode van toenemende zonnestraling.

We kunnen dus niet zonder meer énkél de toenemende broeikasgassen en in het bijzonder CO₂ verantwoordelijk stellen voor de recente temperatuurstijging, ook de toenemende zonnestraling moet in rekening gebracht worden. In de periode van 1951 tot 1983 werkte de afkoeling door de afnemende zonnestraling de opwarming door de toenemende broeikasgassen tegen, wat de stabiliteit van de temperatuur over deze periode kan verklaren. In de periode van 1984 tot nu versterkt de opwarming door de toenemende zonnestraling de opwarming door de toenemende broeikasgassen, hetgeen de recente opwarming kan verklaren.

Voor de periode van 1887 tot 1950 vertoont de zonnenschijnduur en dus ook de zonnestraling een stijging. De stijging van deze parameters beïnvloedde de stijging van de temperaturen tussen 1887 en 1950.

¹⁹ Global dimming : op verschillende plaatsen ter wereld vastgestelde vermindering van de hoeveelheid zonnestraling die het aardoppervlak bereikt.

De belangrijkste parameter die de langetermijnsveranderingen van de hoeveelheid zonnestraling in Ukkel beïnvloedt, is **de hoeveelheid aërosolen die onder andere zeer 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 aërosolen afkomstig van de vervuiling van de atmosfeer.

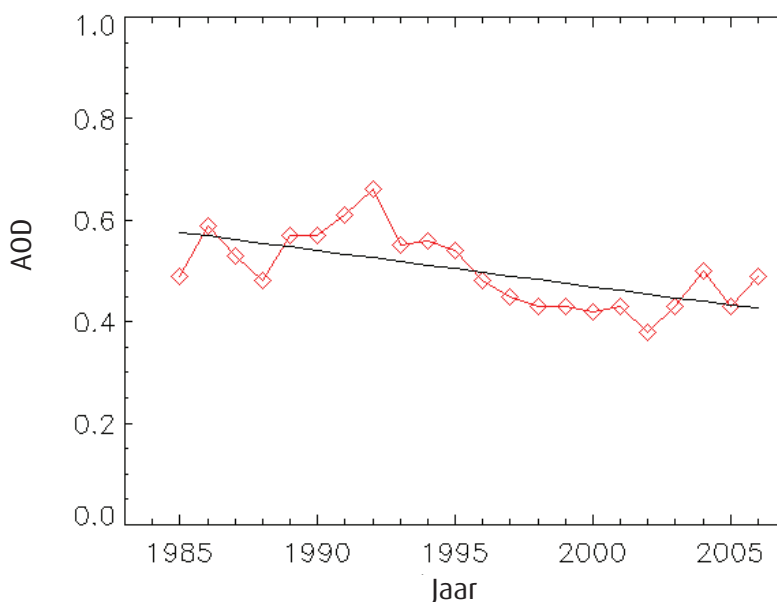
Sinds 1984 worden in Ukkel de aërosol optische dikten (AOD) in het UV-B²⁰ golflengtegebied gemeten. De AOD karakteriseert de vermindering van de hoeveelheid zonnestraling aan de grond door de aërosolen. Zij is direct verbonden met het aantal deeltjes in de atmosfeer: als de AOD groter is, zijn er meer deeltjes in de lucht en is de zonnestraling aan de grond lager.

Figuur 8 toont de jaarlijkse gemiddelde waarden van de AOD sinds 1984 tot 2006, samen met een trendlijn. De trend is duidelijk negatief (-1,42 % per jaar) wat betekent dat de hoeveelheid deeltjes in de atmosfeer verminderd is gedurende deze periode. Dit verklaart de toename van de zonnestraling te Ukkel (zie figuur 7).

Bovendien is er een verhoging van de AOD in 1992 die toe te schrijven is aan de uitbarsting van de Pinatubo in de Filippijnen in 1991 die een enorme hoeveelheid deeltjes in de atmosfeer geblazen heeft.

Dit fenomeen illustreert het wereldwijde karakter (wereldwijd in de zin van de impact over de ganse aardbol) van de verdeling van aërosolen en dus ook van de hoeveelheid zonnestraling aan de grond.

Om de aërosolen op een grotere schaal te bestuderen kan de methode voor de afleiding van de AOD te Ukkel toegepast worden op andere spectrofotometers verspreid over de wereld. Het KMI kan momenteel de AOD berekenen op 14 andere plaatsen ter wereld²¹.

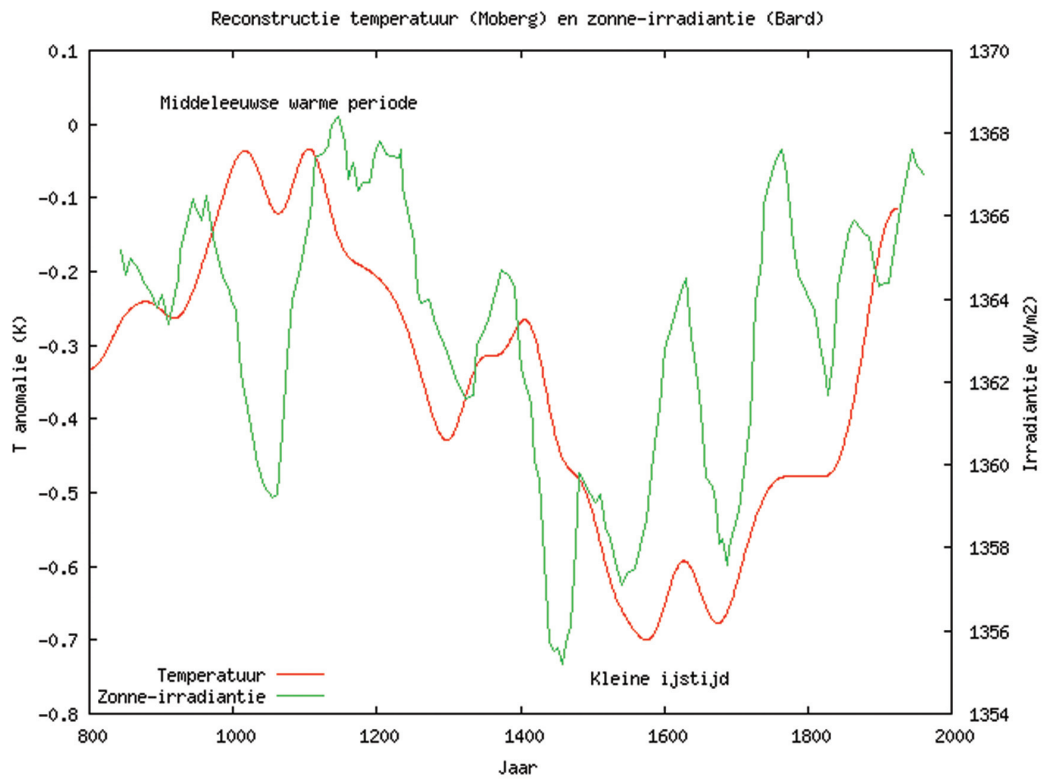


Figuur 8. Aërosol Optische Dikte (AOD) sinds 1985 te Ukkel.

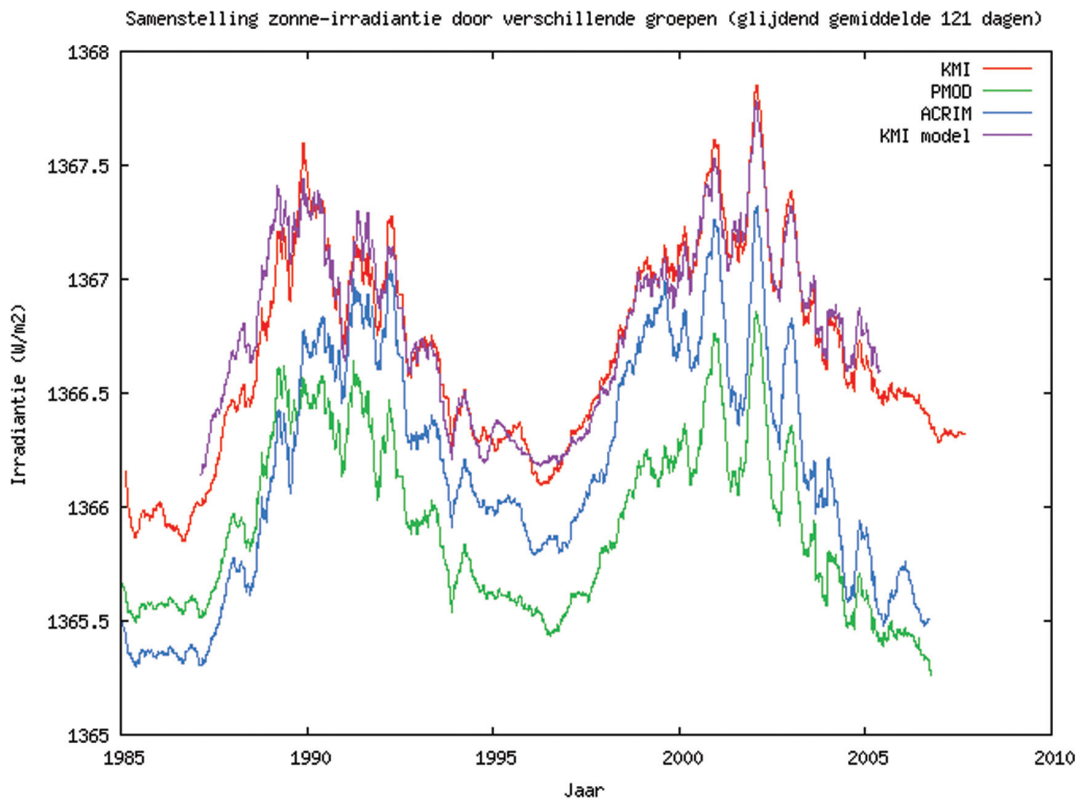
²⁰ De UV-straling bestaat uit ultraviolette zonnestraling waarvan de golflengten kleiner zijn dan 400 nanometer. De UV-B golven hebben een golflengte tussen 280 en 315 nanometer.

²¹ Rome (Italië), Norrköping (Zweden), Toronto en Resolute Bay (Canada), Yakutsk (Rusland), Petaling Jaya (Maleisië), Seoel (Korea), Hong Kong (China), Belgrano (Antarctica), Funchal, Lissabon en de Azoren (Portugal) en El Arenosillo (Spanje).

Reconstructie van de evolutie van de zonnestraling sinds 1200 jaar



Figuur 9. Rode curve met linkse schaal: reconstructie van temperatuursvariaties van 800 tot 2000. Groene curve met rechtse schaal: reconstructie van de zonne-irradiantie.



Figuur 10. Samenstelling van de metingen van de variaties van de zonne-irradiantie voor de laatste twee elfjaarlijkse zonnecycli door drie internationale groepen.



Figuur 11. Het KMI-team voor de bouw van ruimte-instrumenten met het prototype van de Sovap radiometer voor het Picard project. Dit team zet met het onderzoek naar de zogenaamde « zonneconstante » het werk verder dat professor Crommelynck in 1970 aanvatte.

Temperatuur-reconstructies op lange termijn (zie rode curve figuur 9) tonen een « Middeleeuwse warme periode » (temperatuur maximum rond 1100) en een « kleine ijstijd » (temperatuursminimum rond 1600) die het meest aannemelijk verklaard kunnen worden door variaties in de inkomende zonnestraling aan de top van de atmosfeer.

De groene curve in figuur 9 toont een reconstructie van de zonne-irradiantie aan de hand van de meting van de concentraties van de Be10 radio-isotoop in ijskernen. De Be10 concentratie is een indicatie voor de zonneactiviteit. Tijdens de Middeleeuwse warme periode was de zonneactiviteit en waarschijnlijk ook de zonne-irradiantie zeer hoog, tijdens de kleine ijstijd was de zonneactiviteit en waarschijnlijk ook de zonne-irradiantie zeer laag.

Metingen van de zonne-irradiantie moeten vanuit de ruimte gemaakt worden om te ontsnappen aan de storende invloed van de variabele atmosfeer. De eerste bruikbare ruimtemetingen werden gemaakt in 1978. Het KMI was één van de pioniers voor de verbetering van deze metingen met een eerste instrument op Spacelab in 1983 en verscheidene ruimteveervluchten, waaronder de laatste op Columbia in 2003. Momenteel is ons DIARAD/VIRGO instrument dat sinds 1996 actief is op de SOHO satelliet het meest stabiele instrument voor de meting van de lange termijnsvariaties van de zonne-irradiantie.

Op internationaal vlak is het KMI één van de drie groepen (een Belgische, een Amerikaanse en een Zwitserse) die deelnemen aan de metingen van de zonne-irradiantie (zie figuur 10). 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 klimaatstijdschaal) de zonne-irradiantie varieert met de elfjarige zonne-activiteitscyclus die bekend is uit de waarneming van zonnevlekken. De elfjaarlijkse variaties van de inkomende zonnestraling zijn van de orde van 0,1 %, en ze veroorzaken temperatuurvariaties van de orde van 0,1 °C.

Hoewel 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 temperatuursdaling ten gevolge van de aërosolen correct in te schatten.

Er bestaan verschillende standpunten tussen de drie groepen voor de variatie van de zonne-irradiantie tussen de minima van de elfjaarlijkse zonnecyclus. Indien ze bestaan, zijn deze variaties het meest relevant voor klimaatveranderingen.

Wij vonden voor de variatie tijdens de vorige cyclus, tussen de minima in 1986 en 1996 een toename van $0,15 \text{ W/m}^2$, die echter niet significant is ten opzichte van een onzekerheid van $\pm 0,35 \text{ W/m}^2$.

De ACRIM groep vond een toename van $0,8 \text{ W/m}^2$, de PMOD groep vond geen toename. Voor de huidige zonnecyclus, die begon in 1996 en die nu dicht bij een nieuw minimum genaderd is, vinden wij geen verandering met een onzekerheid van $\pm 0,14 \text{ W/m}^2$. De onzekerheid is dus meer dan gehalveerd, wat voor een groot deel te danken is aan de stabiliteit van ons DIARAD/VIRGO instrument. De ACRIM en PMOD groepen vinden een afname voor de huidige zonnecyclus. De afwijkende resultaten kunnen verklaard worden door het gebruik van het ACRIM 3 instrument door de ACRIM groep en door het gebruik van subjectieve instrumentcorrecties door de PMOD groep.

Eind 2007 werd ons DIARAD/SOVIM instrument geïnstalleerd als deel van de Europese Columbus module voor het Internationaal Ruimtestation. Op 7 februari 2008 werd de navette Atlantis succesvol gelanceerd met deze module aan boord.

Uit de ruimtemetingen van de zonne-irradiantie weten we dat de zonne-irradiantie varieert met de elfjaarlijkse zonnecyclus en kunnen we vermoeden dat er over de laatste dertig jaar geen bijkomende langetermijnsvariatie van de zonne-irradiantie bestond.

We weten echter uit de rechtstreekse observatie van de zonnevlekken sinds de 17^{de} eeuw door onder andere Galileo Galilei, dat er van 1650 tot 1700 een lange periode voorkwam dat er op de zon bijna geen zonnevlekken waargenomen werden.

Deze periode wordt het « Maunder minimum²² » genoemd; ze komt overeen met het einde van de kleine ijstijd. Uit de reconstructie van de zonneactiviteit op nog langere termijn uit C14 en Be10 radio-isotopen weten we dat er meerdere dergelijke « grote » zonneminima bestaan hebben, zoals het Wolf en het Spörer minimum tijdens het begin van de kleine ijstijd, en dat er een « groot maximum » bestaat heeft met hoge amplitude van de zonneactiviteit tijdens de Middeleeuwse warme periode. De reconstructie van de zonne-irradiantie gaat ervan uit dat er buiten de gemeten variatie van de zonne-irradiantie tijdens de « kleine » elfjaarlijkse activiteitscyclus, er een extra langetermijnsvariatie bestaat van de zonne-irradiantie evenredig met de « grote » activiteitsveranderingen.

Om de « grote » variaties van de zonne-irradiantie te meten zouden we moeten kunnen terugkeren in de tijd, en bijvoorbeeld het niveau van de zonne-irradiantie meten tijdens het Maunder minimum. Dit zullen we op een onrechtstreekse manier proberen door deelname aan het Picard project in samenwerking met Frankrijk en Zwitserland. Het project werd genoemd naar Abt Jean Picard, astronoom van de Zonnekoning Lodewijk XIV. Picard maakte metingen van de diameter van de zon om de excentriciteit van de baan van de aarde om de zon te bepalen. We hebben ook goede schattingen van de historische diameter van de zon uit de duur van de verduistering van de Zon door Venus. Verwacht wordt dat de zon tijdens « kalmere » fases, wanneer ze minder warmte uitstraalt, een grotere diameter heeft. De combinatie van de Picard metingen met historische metingen van de zonnediameter zullen een schatting van de zonne-irradiantie tijdens het Maunder minimum opleveren.

De historische reconstructie van de variaties van de zonnestraling, gecombineerd met de temperatuursreconstructie, zullen een meting opleveren van de lange termijn reactie van het klimaat op aarde op uitwendige verstoringen van de energiebalans van de aarde. Hierdoor zal ook de nauwkeurigheid van de voorspellingen van toekomstige klimaatsveranderingen verbeterd kunnen worden.

De lancering van de Picard satelliet is voorzien in 2009. Figuur 11 toont het KMI team voor de bouw van ruimte radiometers met een eerste prototype Sovap instrument voor Picard.

²² Edward Walter Maunder, een Engels astronoom (1851-1928), bestudeerde de zonnevlekken en de magnetische zonnecyclus. Door een analyse van de toen beschikbare gegevens en door terug te keren in de tijd kon hij een periode met een zeer lage zonneactiviteit terugvinden, die zich situeerde tussen 1645 en 1715 en nu het minimum van Maunder wordt genoemd, en die hoogst waarschijnlijk verantwoordelijk was voor de afkoeling die bekend staat onder de benaming kleine ijstijd.

3. 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 uit slechts twee atomen bestaat (O_2). 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 UV²³-straling uit het zonlicht. De grootste ozonconcentraties vinden we in de hogere luchtlagen (20-25 km hoogte). Door de sterke absorptie van de straling zorgt deze ozonlaag voor het specifieke temperatuurverloop met de hoogte: in de onderste luchtlagen (de troposfeer) neemt de temperatuur af met de hoogte, terwijl dit niet meer het geval is daarboven (stratosfeer).

Ozon is een zeer onstabiele molecuule. Dit verklaart waarom bepaalde chemische stoffen zelfs in kleine concentraties grote verschuivingen in het evenwicht kunnen veroorzaken. Als voorbeeld vermelden we de chloorverbindingen die in de stratosfeer terechtkwamen door het gebruik van freonen in spuitbussen en koelinstallaties. Deze chloorverbindingen kunnen bij bepaalde omstandigheden de ozonlaag aantasten, waardoor de intensiteit van de schadelijke UV-straling bij de grond toeneemt.

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. Ozon is namelijk een agressief gas, dat bij grote concentraties 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.

Om de hoeveelheid ozon in de atmosfeer (« dikte van de ozonlaag » genoemd) te meten, wordt gebruik gemaakt van verschillende technieken.

- Van op de grond kunnen we de intensiteit van het zonlicht meten bij specifieke golflengten (in het UV-gebied) en vervolgens uit de kennis van het absorptiespectrum van ozon de concentratie afleiden. 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. 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 overeenkomt met een laagje van ongeveer 3 mm bij standaardvoorwaarden.



Figuur 12. Instrumenten die te Ussel de UV-straling meten.

²³ De UV-straling bestaat uit ultraviolette zonnestraling waarvan de golflengte kleiner is dan 400 nanometer.

- Een andere methode om informatie over ozon in de atmosfeer te bekomen, is een chemische sensor door de verschillende luchtlagen te laten opstijgen aan een ballon. Met deze techniek kunnen we de verticale verdeling van ozon vaststellen.



Figuur 13. Lancering van een ballon met sonde te Ukkel.

- Waarnemingen vanuit de ruimte geven ons 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 ook de ozonpeilingen informatie over ozon in de troposfeer. De gevoeligheid van satellietmetingen voor troposferisch ozon is echter klein.

In de volgende paragrafen worden enkele resultaten van de ozonmetingen van het KMI voorgesteld.

Ozon waargenomen vanaf de grond en met ballonpeilingen te Ukkel in het kader van de internationale bewaking van de atmosfeer

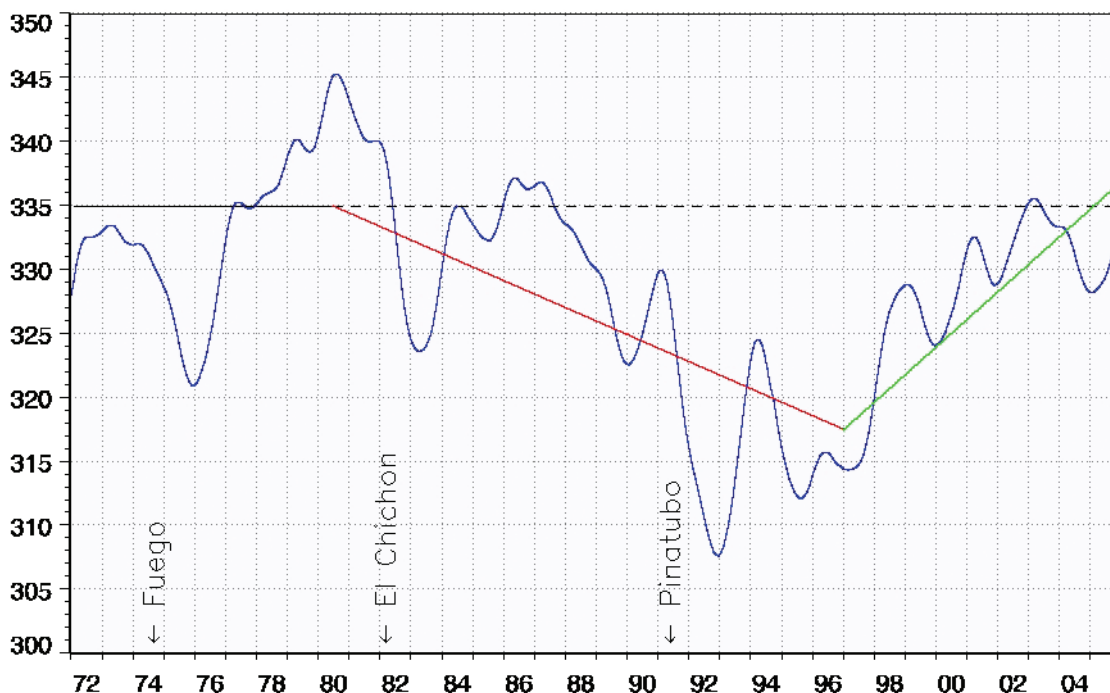
Een lange traditie in de waarneming van de ozonlaag

Sinds 1969 worden er ongeveer drie keer per week ozonpeilingen uitgevoerd te Ukkel. Deze ballonpeilingen leveren verticale profielen tot een hoogte van ongeveer 32 km van druk, temperatuur, relatieve vochtigheid, wind en ozon. Het KMI beschikt zo, samen met Hohenpeißenberg (Duitsland) en Payerne (Zwitserland), over één van de langste tijdreeksen van ozonprofielen ter wereld. Daarnaast wordt de totale dikte van de ozonlaag sinds 1971 dagelijks gemeten met spectrofotometers. Dit soort tijdreeksen zijn fundamenteel voor het bestuderen van veranderingen in de atmosfeer op lange termijn. Vooraleer zij daarvoor kunnen gebruikt worden, moeten ze echter gecontroleerd worden op mogelijke instrumentele effecten die de kwaliteit van de waarnemingen negatief beïnvloeden. De tijdreeksen van zowel de peilingen als van de spectrofotometers te Ukkel werden grondig nagekeken en verbeterd voor dit soort problemen²⁴.

²⁴ Een tijdreeks die op deze manier verbeterd werd, noemen we gehomogeniseerd.

Evolutie in de tijd van de dikte van de ozonlaag

Een analyse van de gehomogeniseerde tijdreeks van de totale dikte van de ozonlaag te Ukkel is te zien in figuur 14. Zij toont het jaarlijks glijdende²⁵ gemiddelde sinds het begin van de waarnemingen.



Figuur 14. Evolutie van de totale dikte van de ozonlaag (glijdend jaargemiddelde) gemeten te Ukkel tussen 1972 en 2004. De dikte wordt uitgedrukt in « Dobson eenheden ». Naast het voortschrijdend jaargemiddelde van de dikte van de ozonlaag (in het blauw) toont de figuur een constante waarde voor 1980 (zwarte lijn) en twee trendlijnen, één tussen 1980 en 1997 en één tussen 1997 en 2004 (groene lijn).

Uit metingen van de hoeveelheid ozonafbrekende stoffen (in het bijzonder de Chloorfluorkoolwaterstoffen of CFK's), uitgevoerd door een ploeg²⁶ van de Universiteit van Luik, blijkt dat hun concentraties rond het midden van de jaren 1990 een maximum bereikten om nadien lichtjes af te nemen, als gevolg van de effectieve uitvoering van het protocol van Montreal²⁷ dat de productie van dergelijke stoffen verbiedt. Daarom werd een stapsgewijze trendberekening uitgevoerd voor verschillende periodes. Tot 1980 wordt er geen trend verwacht. Deze periode wordt dan ook gebruikt om een referentieniveau te berekenen, voorgesteld door de horizontale lijn in de figuur. Dan is er een neerwaartse tendens tot midden de jaren 1990 (-0,32 % per jaar, rode lijn), gevolgd door een schijnbaar herstel (+0,65 %/jaar, groene lijn).

Interpretatie

We moeten wel 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.

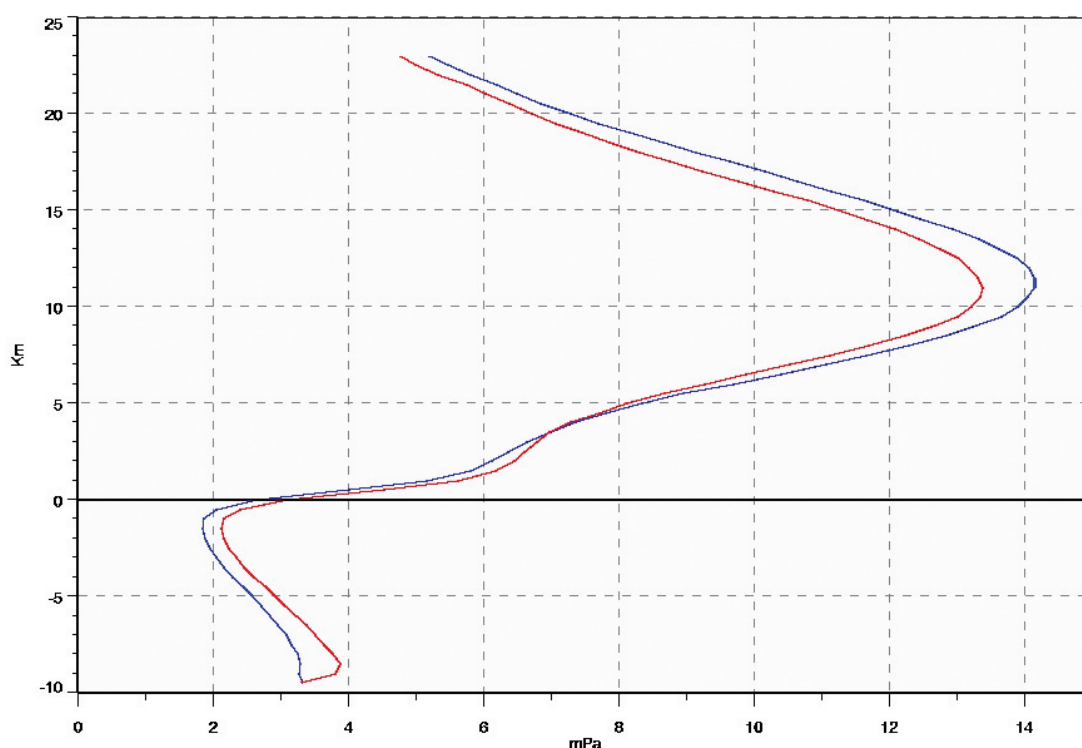
²⁵ Een glijdend gemiddelde is een statistisch begrip berekend met opeenvolgende waarden.

²⁶ De Groupe Infrarouge de Physique Atmosphérique et Solaire (of GIRPAS).

²⁷ Het protocol van Montreal werd geratificeerd op 16/09/1987 en is in voege getreden op 01/01/1989. Het verbiedt de productie van vernielende stoffen van de ozonlaag.

Naast de mogelijke effecten als 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 de figuur 14) 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, waardoor de statistische betrouwbaarheid van de berekeningen vergroot. Maar zelfs dan blijken de resultaten nog niet helemaal statistisch overtuigend.

Enkel verdere waarnemingen zullen al dan niet kunnen bevestigen of het om een definitief herstel van de ozonlaag gaat, als gevolg van de beslissingen van het Protocol van Montréal, dan wel om een voorbijgaande fluctuatie. Ozon is daarenboven zelf een broeikasgas. De wisselwerking die er bestaat tussen de ozonconcentraties in de atmosfeer en de mogelijke opwarming van de aarde, maakt een voorspelling voor het tijdstip van volledig herstel uiterst onzeker.



Figuur 15. Vergelijking tussen de gemiddelde ozonprofielen (in mPa) als functie van de hoogte. In de rode kleur de meest recente periode (1994-2004). In het blauw de vroegere periode (1969-1979). De horizontale zwarte lijn is de tropopauze, de limiet tussen de stratosfeer en de troposfeer.

Aan de hand van de profielen kunnen we zien op welke hoogten deze veranderingen plaatsgrijpen. In de figuur hierna worden de gemiddelden van twee periodes van 10 jaar met elkaar vergeleken. Het is duidelijk dat de vermindering van de totale hoeveelheid ozon volledig op rekening van de ozonlaag in de stratosfeer²⁸ staat. Inderdaad, in de troposfeer²⁹ is er een tegengestelde tendens (toename van ozon op leefniveau), die te wijten is aan fotochemische productie van ozon

Projecten in uitvoering

In het kader van de COST actie 726 « Long term changes and climatology of UV radiation over Europe », werkt het KMI mee aan het opstellen van de reconstructie van de UV intensiteiten over Europa sinds 1950. Dit gebeurt op basis van modellen die gebruik maken van zogenaamde proxies (waarnemingen die indirect verband houden met de UV intensiteiten, zoals de globale zonnestraling). Het KMI zelf heeft waarnemingen van de UV-B intensiteiten sinds 1989.

²⁸ Stratosfeer: gebied in de atmosfeer waar de temperatuur niet langer daalt met de hoogte (tussen ongeveer 10 en 50 km).

²⁹ Troposfeer: onderste laag in de atmosfeer waar de temperatuur gestaag afneemt met de hoogte (tussen de grond en ongeveer 10 km).

4. Andere klimaatgegevens gemeten door het KMI

- **De verschillende rapporten van het IPCC onderlijnen stuk voor stuk het belang van waterdamp als broeikasgas.** Het KMI beschikt over een reeks waarnemingen van goede kwaliteit, afkomstig van peilingen die sinds 1990 in Ukkel uitgevoerd worden en waarmee profielen van de vochtigheidsgraad in de hoogte samengesteld worden. Deze reeks van bijna 15 jaar zal toegevoegd worden aan het geheel van een databank op wereldniveau. Dit zou op termijn opvolging en analyse van deze klimatologische parameter moeten toelaten.

We zouden een vaak voorkomend misverstand willen wegwerken. Het broeikaseffect is een natuurlijk verschijnsel. Waterdamp is zonder twijfel het belangrijkste broeikasgas onder de natuurlijke broeikassgasen zoals methaan, lachgas, ozon en CO₂. Daartegenover staan de erg recente, abnormale storingen die men vaststelde in de CO₂- en methaanconcentraties (wanneer men ze vergelijkt met de paleoklimatologische archieven) en de mogelijke invloed van deze storingen, deels veroorzaakt door menselijke activiteiten, op de stralingsbalans en dus op de opwarming van de planeet.

- Het klimaat is een complex dynamisch fenomeen dat afhankelijk is van talrijke parameters en terugkoppelingsmechanismen die nauwkeurige voorspellingen op gemiddelde en lange termijn aanzienlijk bemoeilijken. Vandaar dat een betere kennis van de natuurlijke variabiliteit van het klimaat van de aarde van fundamenteel belang is om mogelijke toekomstige klimaatscenario's op te stellen.

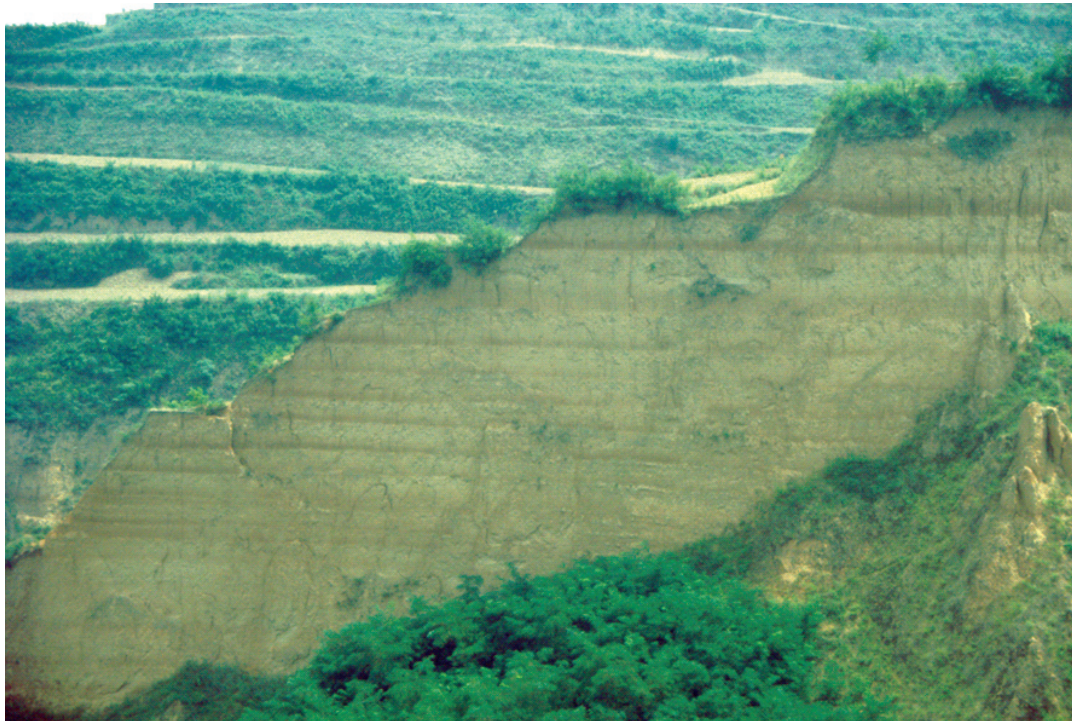
Eén van de onderzoeksdomeinen van het Geofysisch Centrum van het KMI in Dourbes (CPG) zijn **klimaatreconstructies tijdens het Kwartair op basis van magnetische indicatoren in continentale natuurlijke klimaatarchieven** zoals meersedimenten en loess/paleobodem sequenties. Deze laatste komen veelvuldig voor in centraal Noord China waar een dik loesspakket werd afgezet tijdens de laatste 3 miljoen jaren door winden die zand en stofdeeltjes deden opwaaien in de woestijnen ten noorden van het Loess Plateau.

Niet minder belangrijke loessafzettingen komen ook voor in Europa en in het bijzonder in midden-België. Loess is een koud glaciaal sediment, afgezet tijdens koude en droge periodes (glacialen). Tijdens een interglaciale periode wordt de loess blootgesteld aan andere omgevingsvoorwaarden, zoals een verhoging van de temperatuur, een toename van de neerslag en een verhoogde biologische activiteit die de loess geleidelijk transformeren in een bodem, die op zijn beurt weer bedekt wordt met een loesslaag tijdens de daarop volgende glaciële periode. Op het Loess Plateau in China hebben klimaatveranderingen geleid tot een afwisseling van loesshorizonten en paleobodems, respectievelijk overeenstemmend met koude droge en warme vochtige periodes (zie figuur 16). Loess en paleobodems bevatten een verschillende hoeveelheid aan ijzeroxiden waarvan de vorming gecontroleerd werd door het klimaat. Magnetische en magnetostratigrafische eigenschappen van deze afzettingen geven niet alleen aanwijzingen van de tijdschaal en intensiteit van het paleoklimaat, maar ook van de neerslag en laten zelfs toe lokale windregimes kwantitatief te evalueren. Deze informatie is uiteraard van groot nut voor het opstellen van klimaatmodellen op lange termijn.

Weinig aandacht werd tot nog toe besteed aan het verband tussen klimaatveranderingen en veranderingen van het geomagnetische veld. Een mogelijk mechanisme is de flux van kosmische stralen, gemoduleerd door de zonneactiviteit en geomagnetische veldveranderingen, die de nucleatie van wolken in de onderste lagen van de atmosfeer en de albedo beïnvloeden en dus uiteindelijk het klimaat. Bovendien is het niet uitgesloten dat er een causaal verband zou bestaan tussen de seculaire verandering van het geomagnetische veld en klimaatveranderingen op een tijdschaal van de orde van honderden jaren. Indien dit bevestigd wordt, zou de zonneactiviteit niet de enige uitwendige factor zijn die verantwoordelijk is voor de klimaatveranderingen. Sommige onderzoekers vonden inderdaad voor het laatste millennium een schijnbaar verband tussen snelle veranderingen in de veldintensiteit, bepaald door archeomagnetische metingen, en periodes van algemene afkoeling in West-Europa bevestigd door historisch gedocumenteerde gletsjeruitbreidingen in de Alpen. Deze vaststellingen verdienen zeker een verder diepgaand onderzoek.

Een ander onderzoeksdomein van het CPG is dan ook de studie van tweede orde effecten die het klimaat beïnvloeden. **Kosmische stralen zijn verantwoordelijk voor ionisatie in de bovenste lagen van de troposfeer en hebben waarschijnlijk een invloed op het wolkendek.** Afgezien van de zonneactiviteit is de flux van kosmische stralen afhankelijk van het aardmagnetische veld dat de biosfeer beschermt tegen de impact van energierijke deeltjes. Naast de atmosferische elektriciteit en de ionosfeer worden het geomagnetisch veld en de kosmische stralen tijdens de laatste 50 jaren continu gemeten in het CPG.

Het KMI levert dan ook sleutelgegevens aan de wetenschappelijke gemeenschap voor de analyse van tijdreeksen om mogelijke verbanden tussen het geomagnetische veld, kosmische stralen, zonneactiviteit en wolkenvorming en hun invloed op het klimaat op te sporen. We drukken hier dan ook op 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 moeilijk in te schatten op het huidige moment) in de dynamiek van klimaatsystemen op verschillende tijdschalen.



Figuur 16. Verticale doorsnede van een loess/paleobodem sequentie in Jiacun nabij Baoji in de Volksrepubliek China. Lichtkleurige gele loess, afgezet tijdens een koud aride klimaat (glacialen), wisselt af met donkerbruine paleobodems gevormd tijdens een warmer en vochtiger klimaat (interglacialen).

Hoofdstuk 3. Onderzoek over klimaatvoorspellingen en klimatologische modellering

1. Algemeenheden over voorspelling van het weer en het klimaat

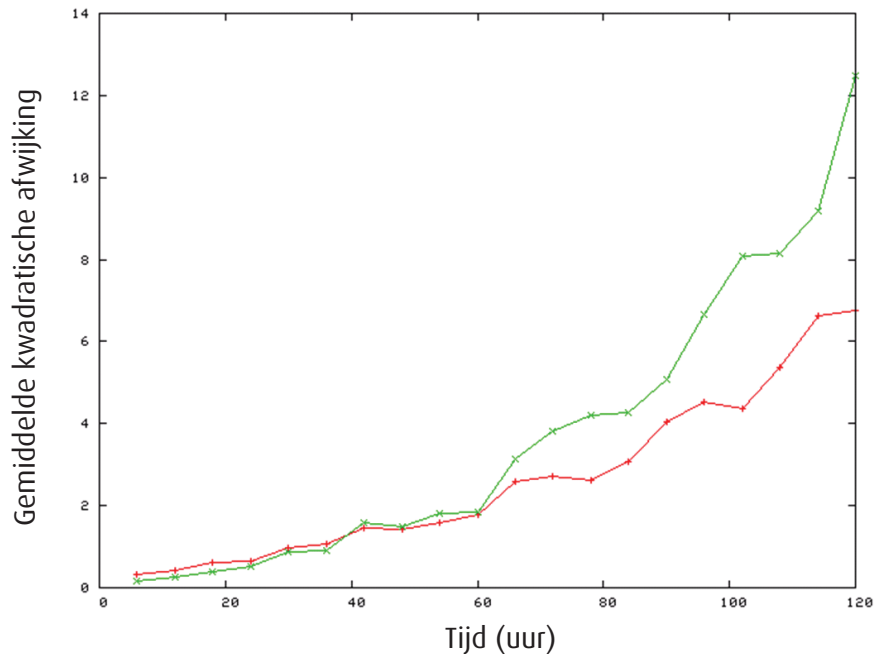
De atmosferische variabelen vertonen een sterke variabiliteit over zeer verschillende tijdschalen, gaande van een minuut tot honderd jaar, en zelfs nog meer. In de vorige hoofdstukken kwamen voldoende voorbeelden van die variabiliteit aan bod. Bovendien verloopt de ontwikkeling van de beschreven variabelen onregelmatig, vaak met algemene regelmatigheden zoals de seizoensgebonden of dagelijkse variaties van de zonneshijn, maar ook met abrupte of zachtere regimeveranderingen. Al deze verschijnselen vloeien voort uit de fysische en chemische wetten die de dynamica beheersen van het klimaatsysteem dat wordt gevormd door de atmosfeer, de hydrosfeer, de cryosfeer, de biosfeer en de lithosfeer. Een van de kernvragen in die context is in welke mate deze fenomenen kunnen worden beschreven door modellen die de verschillende componenten van het klimaat zo goed mogelijk weergeven en binnen welke grenzen zij kunnen worden voorspeld.

Van al die componenten weten we wellicht het meest over de atmosfeer, want zij vormt het natuurlijke milieu waarin we leven. Maar zelfs in dat geval leert onze dagelijkse ervaring ons dat ons voorspellingsvermogen zeer beperkt blijft, ook al beschikken we nu over krachtige computers. Er blijkt met name dat de weersvoorspelling die we krijgen op basis van de modellen na een tiental dagen nauwelijks nog afwijkt van een zuiver toevallige voorspelling waarbij enkel rekening wordt gehouden met de periode van het jaar in kwestie. Figuur 1 illustreert deze dynamica aan de hand van het operationele globale model voor weersvoorspelling van het Europees Centrum voor weersvoorspellingen op middellange termijn (ECMWF). De (gemiddelde kwadratische) afwijking, weergegeven op de verticale as voor de temperatuur bij een druk van 500 hectopascal en een druk van 850 hectopascal in heel België, stijgt met de termijn van de voorspelling. Dat geleidelijke verlies aan voorspelbaarheid kan aan twee oorzaken worden toegeschreven: (i) de aanwezigheid van onvolmaaktheden in de modellering die inwerken op de voorspelling en (ii) de gevoeligheid voor de beginvoorwaarden waardoor elke afwijking van de beginvoorwaarden van een systeem langzaam aan stelselmatig groter zal worden. Op basis van figuur 1 kunnen de twee oorzaken van afwijkingen niet worden onderscheiden, maar het is wel mogelijk om aan te tonen dat de belangrijkste oorzaak in dit concrete geval de afwijking van de beginvoorwaarden is (Vannitsem en Nicolis, 2008).

De twee hierboven beschreven eigenschappen, zijnde de uitgesproken en onregelmatige variabiliteit van de atmosferische variabelen en de gevoeligheid voor de beginvoorwaarden, zijn de twee zichtbare facetten van een dynamica die eigen is aan atmosferische modellen, bekend onder de naam chaotische dynamica of aperiodische dynamica. Het is belangrijk om te benadrukken dat deze geen gevolg is van onze beperkte kennis en onze onvolmaakte beschrijving van de ontwikkelingswetten van de atmosfeer, maar een integraal kenmerk is van het gamma mogelijke dynamische systemen die aan dergelijke wetten zijn onderworpen.

De atmosferische variabelen waarvoor meteorologen en klimatologen zich het meest interesseren zijn wind, temperatuur, luchtdruk, dichtheid, de verschillende fasen van het water, de hoeveelheid aerosolen en de verschillende chemische componenten van de luchtmassa. De evolutie ervan wordt beschreven door de basisvergelijkingen van de vloeistofdynamica, de thermodynamica en de chemische kinetica. Daarbij komt een hele reeks relaties die de faseveranderingen van het water beschrijven en de absorptie, emissie en diffusie van straling door de constituenten in de lucht. Eén van de essentiële bijzonderheden van deze vergelijkingen is dat ze van nature niet-lineair³⁰ zijn. Dit kenmerk ligt ten grondslag aan de bovenvermelde chaotische dynamica en vormt een centraal element in de theoretische en praktische werkzaamheden uitgevoerd in het kader van de dynamische systeemtheorie, een discipline op de grens van de fysica en de wiskunde.

³⁰ Een reactie van een systeem wordt gekwalificeerd als lineair als ze evenredig is met de amplitude van de actie en het principe van superpositie volgt. Dit wil zeggen dat het effect van verschillende acties overeenstemt met de som van die acties. Een reactie is niet-lineair als ze niet in die categorie valt.



Figuur 1. De gemiddelde kwadratische afwijking over twee winters en over heel België, voor de temperatuur bij een druk van 500 hectopascal (ongeveer 5 kilometer hoog, groene curve), en bij een druk van 850 hectopascal (ongeveer 1 kilometer hoog, rode curve). De resultaten zijn afkomstig van de voorspelling van het model van het Europees Centrum voor weersvoorspellingen op middellange termijn (het ECMWF).

Deze theorie kan niet alleen oplossingen van het chaotische type in de niet-lineaire systemen verklaren, maar maakt ook de beschrijving mogelijk van de uitgebreide « zoölogie » van mogelijke oplossingen van deze systemen, onder de naam van attractoren. Een bepaald systeem kan verschillende attractoren hebben en de toepassing van stringen, eigen aan dat soort systemen, kan in bepaalde omstandigheden de overgang van een oplossing naar een andere opwekken. Dat leidt tot min of meer snelle transitie tussen de oplossingen zoals diegene die empirisch werden beschreven in hoofdstuk 1 voor de temperaturen of de neerslag. Deze transitie kunnen een natuurlijk karakter hebben indien de forcering waardoor ze worden opgewekt van natuurlijke oorsprong is, zoals een toename van de zonnenergie die de aarde bereikt, of van antropogene aard wanneer de forcering wordt uitgelokt door de mens, zoals een buitensporige exploitatie van de lokale plantaardige hulpbronnen.

Een spectaculair voorbeeld van deze transitie tussen verschillende toestanden is de ontwikkeling van de neerslag in de Sahel (Oost-Afrika), waar droge en vochtigere periodes elkaar afwisselen. Deze transitie maakten het voorwerp uit van een vereenvoudigde modellering op basis van een niet-lineair model dat de ontwikkeling tussen deze twee toestanden bijzonder goed weergeeft (Demarée en Nicolis, 1990).

Het klimaat en de voorspelbaarheid van de gemiddelden

Traditioneel wordt het klimaat gedefinieerd als het geheel van de statistische kenmerken (gemiddelden, varianties... van de verschillende belangrijke variabelen, zoals de temperatuur of de neerslag) van de atmosfeer. De beschrijving van zijn dynamica gaat uit van dezelfde basisvergelijkingen die worden gebruikt om het weer te voorspellen, aangepast om de statistische hoeveelheden te beschrijven waarvoor men zich interesseert, en uitgebreid met terugkoppelingen naar de andere, eveneens gemodelleerde, elementen van het klimaat, evenals met langzaam variërende externe forceringen die vaak (terecht) worden genegeerd bij de weersvoorspelling. Voor de oceanen volgt de basismodellering dezelfde aanpak als voor de atmosfeer, met dit verschil dat de massa nu een vloeistof op basis van water en zout is (en andere chemische of biologische elementen zoals fytoplankton). Voor de cryosfeer is een dynamisch ijsmodel nodig en voor de biosfeer een model dat de verschillende soorten vegetatie en bedekking op het aardoppervlak beschrijft. **Een van de grootste problemen in deze context is precieze modellering van de diverse uitwisselingen tussen deze verschillende elementen van het klimaatsysteem** (bijvoorbeeld de uitwisselingen van warmte, de evapotranspiratie, de stromen van verschillende gassen waaronder de broeikasgassen, enz.).

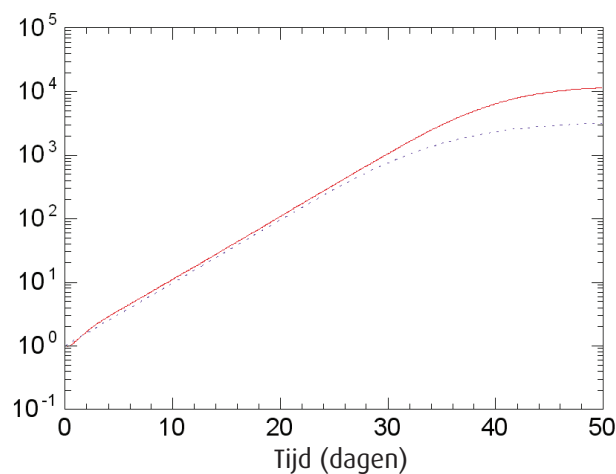
Hoewel deze statistieken sterk worden beïnvloed door de andere elementen van het klimaatsysteem (bijvoorbeeld de hydrosfeer of de cryosfeer) die op langere tijdsschalen evolueren, toch moet erin ook rekening worden gehouden met het onregelmatige gedrag van de atmosfeer dat eerder werd beschreven. Deze natuurlijke vaststelling leidt derhalve tot de vraag in welke mate het klimaat voorspelbaar is, gezien de beperkte horizon van de weersvoorspelling.

De evolutievergelijkingen van het klimaat zijn bijzonder complex. Vaak is het beter om de beschrijving van de fenomenen aanzienlijk te beperken, zodat het probleem waar we ons voor interesseren eenvoudiger wordt zonder dat de essentiële ingrediënten die het eigen karakter ervan uitmaken, over het hoofd worden gezien. Zo zijn zeer eenvoudige modellen ontstaan die specifieke fenomenen beschrijven, zoals het model voor oceaancirculatie van Stommel (zie bijvoorbeeld Dijkstra, 2005), dat wordt beschreven door twee gewone niet-lineaire, differentiaalvergelijkingen gekwalificeerd als een model met een lage dimensionaliteit, of middelgrote modellen die zich situeren tussen de kleine modellen en de operationele modellen voor weer- en klimaatvoorspelling. Deze systemen hebben als fundamenteel voordeel dat ze een uitgebreid onderzoek mogelijk maken zonder dat de essentiële ingrediënten van de basisdynamica over het hoofd worden gezien.

Aan het Koninklijk Meteorologisch Instituut zijn verschillende onderzoeken uitgevoerd met dat soort vereenvoudigde modellen. Een voorbeeld daarvan wordt gegeven in figuur 2, dat de ontwikkeling van de afwijking weergeeft in functie van de voorspellingstermijn voor een middelgroot atmosferisch model, nog voldoende realistisch om de dynamica van de synoptische schalen in de middelbreedtegraden afdoende te beschrijven. De rode curve geeft de ontwikkeling weer van de afwijking voor de variabelen van het oorspronkelijke model en de blauwe curve die van de tijdsgemiddelden over 10 dagen. De afwijking is genormaliseerd door zijn initiële afwijking om de vergelijking te vergemakkelijken. Er blijkt duidelijk dat de initiële toename van de afwijking in beide gevallen vergelijkbaar is en dat de asymptotische convergentie naar een constante waarde (gesuggereerd door de convergentie naar de twee plateaus) zich voor dezelfde tijdsschalen voordoet.

Dit resultaat toont duidelijk aan dat de grens van de voorspelbaarheid van statistische hoeveelheden zoals de temporele gemiddelden, identiek is aan die van het oorspronkelijke systeem en dat de dynamica chaotisch blijft. Bijgevolg is de verbetering van de voorspellingen via een berekening van het temporele gemiddelde van de belangrijke hoeveelheden op het eerste gezicht zinloos, aangezien de horizon van de voorspelbaarheid van dezelfde grootteorde lijkt te zijn als die van het oorspronkelijke systeem.

Deze resultaten suggereren dat de keuze van de beginvoorwaarden van de atmosferische component van relatief weinig belang is in de problematiek van de klimaatvoorspelling, aangezien de afwijking snel wordt gesatureerd na een tiental dagen. Dat sluit echter niet uit dat bepaalde informatie kan worden afgeleid uit een langere voorspelling via de invloed van andere elementen van het klimaat die veel langzamer evolueren. Met een gecombineerd oceaana-atmosfeer model tonen Goswami en Shukla (1991) bijvoorbeeld aan dat de afwijking veel langzamer wordt gesatureerd dan de afwijking die volgt uit de zuiver atmosferische modellen, en dat nuttige informatie kan worden verzameld op de schaal van seizoenen of van verschillende jaren. Bedenk echter dat deze resultaten dan wel hoopgevend mogen zijn, maar dat zich ook snelle en moeilijk voorspelbare veranderingen kunnen voordoen die samenhangen met de niet-lineaire aard van de andere klimaatelementen en de koppeling daarvan met de atmosfeer. Hierna volgt een voorbeeld daarvan.



Figuur 2. Evolutie van het gemiddelde van de absolute waarde van de afwijking in functie van de voorspellingstermijn voor de variabele (in dit geval de stroomfunctie, afgeleid van de wind gegenereerd door het model) van het bestudeerde systeem (rode curve) en dezelfde variabele gemiddeld over 10 dagen (blauwe curve). Dit resultaat is overgenomen uit Vannitsem en Nicolis (1998).

De invloed van de andere componenten van het klimaatsysteem

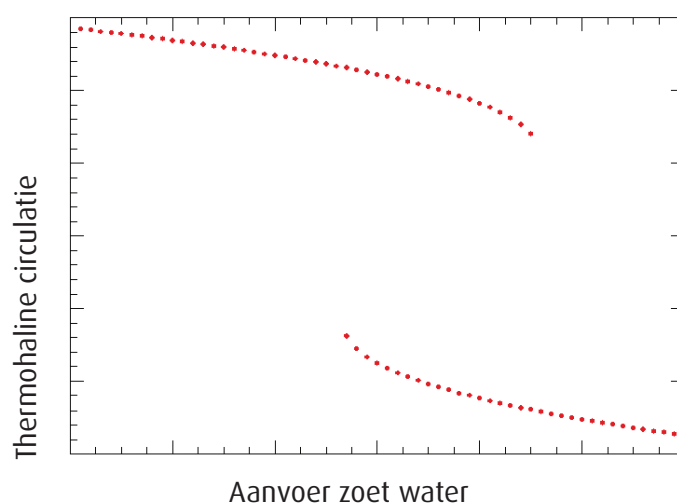
Tallose studies hebben aangetoond dat de oceanen en het ijs een doorslaggevende rol spelen in de dynamica van het klimaat, over langere tijdschalen dan die van de atmosfeer. Hun interactie met de atmosfeer kan tot « klimaatverrassingen » leiden die grote gevolgen kunnen hebben.

Een eerste voorbeeld van deze relatief plotselinge effecten is de opeenvolging van ijstijden en tussenijstijden tijdens het quartaire tijdperk, onderbroken door overgangsfases die vaak veel korter waren dan die periodes zelf. Een eerste element om deze ontwikkeling te verklaren is de treffende gelijkenis tussen deze opeenvolgende veranderingen en de variaties in de excentriciteit van de baan die de aarde maakt (Berger, 1981). De afwezigheid van een perfecte coherentie tussen deze twee « cycli » en de grote variabiliteit in duur van de ijstijden en tussenijstijden bleef echter nog onopgehelderd. Dit gedrag werd later volledig verklaard door de beschrijving van de complexe interactie tussen de wijzigingen van excentriciteit van de baan van de aarde (en dus de zonne-influx) en de temperatuur van het aardoppervlak, waarvan de dynamica een niet-lineaire vergelijking volgt. Deze onderzoeken over de ijsvorming in het quartaire tijdperk liggen onder meer aan de oorsprong van de ontwikkeling van een belangrijke theorie in de fysica, de stochastische resonantie, die verklaart hoe een niet-lineair systeem kan reageren op storingen met een zeer kleine amplitude (Nicolis, 1982, 1991).

Een ander voorbeeld van gedrag dat samenhangt met de aanwezigheid van niet-lineaire klimaatelementen is de mogelijke onderbreking van de zogenaamde thermohaline circulatie. Dat is een belangrijke stroming die alle oceanen van de aardbol doorkruist. Dit transport wordt bepaald door de verschillen in dichtheid van de massa's oceaanwater die zich verspreiden over de aardbol. Die verschillen zijn een gevolg van de verschillen in temperatuur en zoutgehalte (Dijkstra, 2005). Deze stroming speelt een essentiële rol in de overdracht van warmte en massa in de oceanen op aarde en draagt dus in hoge mate bij aan de energieverdeling op aarde. Een eventuele onderbreking van deze stroming zou desastreuze gevolgen kunnen hebben voor het klimaat in verschillende regio's (Baruch, 2007). Stellen we ons eens voor dat de Golfstroom stilvalt, de oceaanstroom die deel uitmaakt van de thermohaline circulatie vanuit de Zuid-Atlantische Oceaan naar onze kusten. Dat zou voor het klimaat in onze regio's tot een spectaculaire lokale afkoeling leiden.

Dat soort overgang tussen deze twee verschillende regimes zou het resultaat kunnen zijn van de aanwezigheid van wat in de dynamische systeemtheorie een bifurcatie wordt genoemd. Zij kenmerkt de manier waarop een systeem zal veranderen van regime (dat wil zeggen van attractor) onder invloed van een wijziging van bepaalde parameters die zijn toestand controleert. Om terug te keren naar het bovenvermelde voorbeeld: de thermohaline circulatie in de Noord-Atlantische Oceaan wordt onder meer gecontroleerd door de hoeveelheid zoet water die in de oceaan komt aan de Noordpool. Als die hoeveelheid te groot wordt (bijvoorbeeld door een snelle smelting van het poolijs), zou

dat de circulatie kunnen verstoren, zelfs tot stilstand brengen of omkeren, en dat zou snel een hele reeks lokale veranderingen opwekken met mogelijk rampzalige gevolgen. Figuur 3 illustreert dat fenomeen aan de hand van een schematisch bifurcatiediagram, afgeleid van een vereenvoudigd, kwalitatief model dat de thermohaline circulatie beschrijft in de Noord-Atlantische Oceaan. Als we in dat model de aanvoer van zoet water verhogen, zal het systeem achtereenvolgens overgaan van een stabiele unieke toestand met een sterke circulatie (rode punten bovenaan op het diagram) naar een situatie waarbij twee mogelijke toestanden stabiel zijn, een intense en een zwakke (of omgekeerde circulatie), en vervolgens naar een situatie waar de stabiele toestand overeenstemt met een circulatie van zwakke intensiteit (of omgekeerde circulatie). Als we ons bovendien op een bepaald ogenblik in de toestand van intense circulatie bevinden en de aanvoer van zoet water toeneemt, dan glijden we langs de bovenste curve en kunnen we vervolgens snel overgaan naar de toestand met zwakke circulatie (of omkering van de circulatie), weergegeven door de onderste curve.



Figuur 3. Bifurcatiediagram van de intensiteit van de thermohaline circulatie in de Noord-Atlantische Oceaan in functie van de aanvoer zoet water bij de Noordpool.

In het algemeen kan de aanwezigheid van niet-lineaire elementen in het klimaatstelsel onverwachte gevolgen hebben, vooral bij tijdsafhankelijke forceringen zoals de toename van de broeikasgassen of de snelle ontbossing van de aarde die de albedo wijzigt en dus de hoeveelheid zonne-energie die kan worden opgeslagen door de aarde en de atmosfeer. **De verandering van zo'n parameter kan ertoe leiden dat het klimaat overgaat van de ene toestand in een andere en dat de statistische eigenschappen van het systeem volledig veranderen.**

Zoals we hierboven reeds hebben besproken, zou de initiële toestand die wordt ingevoerd voor de atmosfeer, relatief weinig invloed mogen hebben op de dynamica van het klimaat. Dat geldt niet voor de andere klimaatelementen, aangezien die over langere tijdschalen evolueren en hun voorspellingsgrens verder ligt dan die van de atmosfeer. Het is dus aannemelijk dat de beginvoorwaarden die worden gekozen voor de oceanen of de verdeling van ijs een belangrijke rol moeten spelen, ook zonder dat de eerder besproken forceringen veranderen. Het is ook een gegronde vraag wat het effect is van wijzigingen van deze forceringen op de dynamica van de overgang tussen de stabiele oplossingen die zich voordoen binnen het systeem, zoals de oplossingen die worden weergegeven in figuur 3. Deze vraag kwam onlangs nog aan bod in het KMI bij eenvoudige modellen en het is gebleken dat de initiële toestand van het systeem aan het begin van de wijziging van de betrokken parameter en de snelheid waarmee die parameter verandert, onverwachte gevolgen hebben zoals de persistentie in een bepaalde toestand, terwijl die toestand niet meer stabiel is wanneer de forcering niet wijzigt (Nicolis en Nicolis, 2004). Al deze effecten moeten in aanmerking worden genomen bij een klimaatprojectie.

Het probleem van de modelfout

Dankzij het gebruik van klimaatmodellen met een verschillende complexiteit krijgen we een beter inzicht in de dynamica van de klimaatveranderingen. Voor voorspellingen schuilt de moeilijkheid echter in de zeer goede weergave van de klimaatprocessen en hun interacties binnen een model. Dit alles gebeurt zowel door de analyse van zeer eenvoudige systemen die een grondige studie mogelijk maken van de mechanismen die inwerken op het klimaat, als door de ontwikkeling van zeer gedetailleerde modellen die rekening houden met alle aanwezige processen. Deze analyse kan leiden tot een raming van de toekomstige ontwikkeling van het klimaat en een evaluatie van zijn voorspelbaarheidshorizon. Dat werk is echter op dit ogenblik allesbehalve klaar, omdat er nog veel onzekerheden bestaan over de processen die een rol spelen en de impact ervan op het klimaat (Baruch, 2007). Dit leidt daarom tot de vraag wat enerzijds de impact is van die onzekerheden op de huidige klimaatprojecties en anderzijds hoe we rekening kunnen houden met deze onzekerheden in de toekomstige projecties.

De vraag welke impact de modelfout heeft op de voorspelling rijst niet alleen bij de klimaatmodellen, maar ook bij de weersvoorspellingsmodellen zoals in figuur 1. Hier wordt de impact van de twee soorten fouten weergegeven, namelijk de afwijking van de initiële toestand en de modelfout, aangezien het voorspellingsmodel slechts een onvolmaakte weergave van de realiteit is. Deze vraag komt momenteel uitgebreid aan bod in het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België bij de ontwikkeling van een fundamentele theorie van de dynamica van de modelfout en de correctie ervan. **Het blijkt dat de aanwezigheid van een modelfout belangrijke gevolgen kan hebben voor de voorspelling. Zo kan een overgang ontbreken naar een ander regime dan datgene wat wordt bestudeerd.** Als het systeem chaotisch is, neemt de modelfout bovendien toe, net zoals de afwijking van de initiële toestand, waardoor het systeem uiteindelijk totaal onvoorspelbaar wordt (Nicolis, 2004; Vannitsem, 2006).

Naar een probabilistische benadering van de klimaatvoorspelling

Alle onzekerheden die tot nog toe werden aangehaald, namelijk de onzekerheid over de begintoestand, over de aanwezigheid van modelfouten evenals over de toekomstige projecties van de forceringen die buiten het klimaatsysteem liggen, of interne forceringen zoals de uitstoot van broeikasgassen, moeten in aanmerking worden genomen om een betrouwbare evaluatie van de evolutie van het klimaat mogelijk te maken. Dit kan enkel via een probabilistische voorspelling.

Deze benadering wordt sinds ruim een tiental jaar gebruikt om het weer te voorspellen door de belangrijkste meteorologische centra die globale voorspellingen leveren voor de volgende dagen of een heel seizoen. De operationele aanpak van dat soort voorspellingen stoelt ofwel op een reeks voorspellingen van het model dat we tot onze beschikking hebben, uitgaand van verschillende beginvoorwaarden, ofwel op het gebruik van een set modellen met verschillende specificaties van de ontwikkelingseigenschappen van bepaalde fysische processen, ofwel ook op een combinatie van de twee technieken.

Bij deze aanpak is het de bedoeling om de voorspellingsfout te ramen en de waarschijnlijkheid van bepaalde meteorologische gebeurtenissen te evalueren, zoals extreme gebeurtenissen. Een voorbeeld van een probabilistische voorspelling van verschillende meteorologische variabelen (neerslag, windsnelheid op 10 meter, temperatuur op 2 meter) voor de kust wordt in figuur 4 gegeven. Een dergelijke weergave van een probabilistische voorspelling heet een pluim, verwijzend naar de rookpluim die regelmatig te zien is als gevolg van de uitstoot van verbrandingen. Maar die pluim geeft hier informatie over de waarschijnlijkheid dat bepaalde waarden van de variabele bereikt worden. De continue lijn in vet geeft het gemiddelde weer van de waarschijnlijkheidsdistributie over een bepaalde termijn (de voorspellingstermijn wordt aangeduid op de horizontale as). De donkerdere volle zone aan weerskanten van het gemiddelde bestrijkt het domein waarvoor de waarschijnlijkheid van de waarde van de variabele 50 % bedraagt. Het domein dat zowel door de donkere zone als door de lichte zone wordt bestreken, stemt overeen met een waarschijnlijkheid van 80 %. Er is dus 20 % kans om zich buiten het domein te bevinden dat is afgebakend door de fijne, continue curven.

Het blijkt duidelijk dat, in het begin van de probabilistische voorspelling, het mogelijke domein van waarden voor de variabele klein is, wat suggereert dat de voorspelling met een enkele integratie van het model van goede kwaliteit is (de onzekerheid over de ontwikkeling van het systeem is klein). Het domein van de mogelijke waarden van de betrokken variabelen neemt daarentegen stelselmatig toe, wat wijst op een mindere kwaliteit van een enkele voorspelling (de onzekerheid over de ontwikkeling van het systeem is relatief groot).

Bij de klimaatvoorspelling begint men deze benadering steeds meer toe te passen zowel via het gebruik van verschillende beginvoorwaarden en meerdere, licht verschillende modellen (Palmer, 2000). Maar we mogen verwachten dat de onzekerheden nog groter zullen zijn bij bepaalde fysische processen (zoals de opname van koolstofdioxide in de oceanen), waarmee men nog maar pas begint rekening te houden in de klimatologische modellering (Baruch, 2007), maar ook in verband met de toekomstige projecties van de productie van broeikasgassen, van bepaalde vervuilende stoffen die een stabiliserend effect kunnen hebben op de opwarming van de planeet, bosbranden of vulkanische activiteit. Het lijkt er dus op dat er momenteel nog niet met alle onzekerheden in verband met ons toekomstig klimaat rekening wordt gehouden en dat de marge van mogelijke ontwikkelingen groter is dan de marge die momenteel naar voren wordt gebracht in de recente rapporten over de ontwikkeling van het klimaat.

Deze probabilistische benadering die allang wordt aangeprezen door de centra voor meteorologische voorspelling, zal erop vooruitgaan als ze wordt uitgebreid tot de hele problematiek van de klimaatvoorspelling, evenals tot de sociaaleconomische oplossingen die nodig zijn voor een correct beheer van goederen en mensen.

2. Hydrologische Impact Studie

Moeten we meer overstromingen of meer droogtes verwachten in de toekomst?

De impact van klimaatveranderingen op de watercyclus zou een groot aantal domeinen van de samenleving kunnen beïnvloeden. Die mogelijkheid wordt vaak geopperd, telkens wanneer zich herhaalde overstromingen of langere periodes van droogte voordoen.

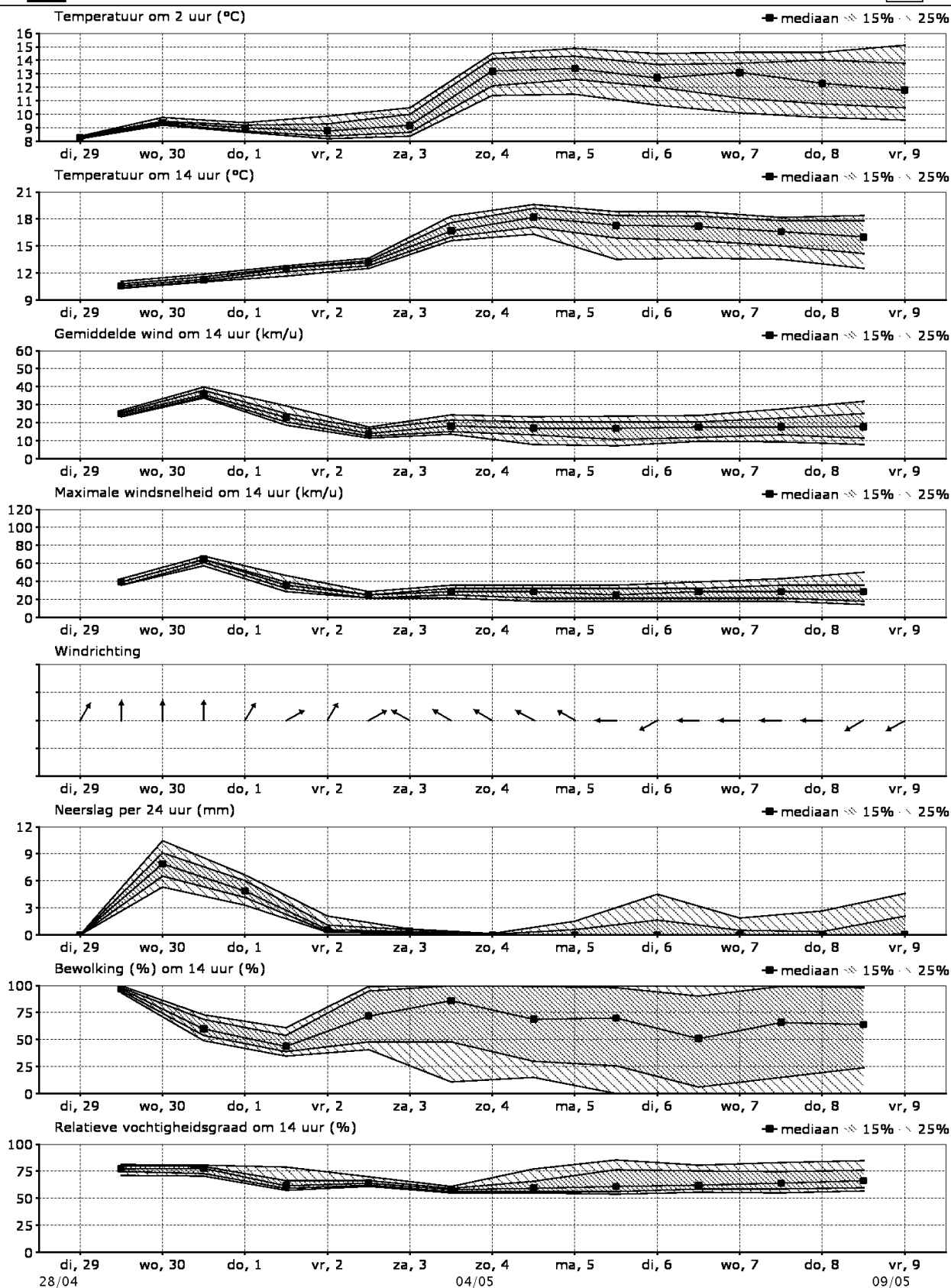
Gezien de eerder besproken cascade van onzekerheden die samenhangen met toekomstvoorspellingen, spreekt het voor zich dat het antwoord op deze vraag niet eenvoudig is. Niettemin is het mogelijk om de gevoeligheid te onderzoeken van een hydrologisch model voor de scenario's die worden voorgesteld door de klimatologen. Deze analyse is enkel mogelijk door gebruik te maken van aangepaste hydrologische modellen, waarmee de belangrijkste kenmerken van de watercyclus en de forcering ervan door meteorologische variabelen kunnen worden beschreven. De gebruikte informatie bestaat over het algemeen uit verschillen tussen de uitkomsten van modellen voor de toekomst en de referentieperiode voor wat de maandelijkse gemiddelden van de temperatuur en de neerslag betreft. De verandering van andere variabelen, zoals het aantal uren zonneshijns of de windsnelheid, die invloed uitoefenen op de verdamping, worden eveneens in aanmerking genomen. Dan wordt een hydrologisch model gebruikt. Een hydrologisch model beschrijft de watercyclus-accumulatie en smelting van een eventuele sneeuwlaag, opvangen van de regen door de vegetatie, infiltratie in de bodem, uitdroging en herbevochtiging van de bodem, voeding van de waterhoudende lagen, afvloeiing.

Het model wordt in eerste instantie gebruikt met waargenomen meteorologische gegevens en maakt het dan mogelijk om het debiet van een rivier op een bepaald punt te berekenen, evenals de verschillende onderdelen van de watercyclus in het stroomgebied gedurende een referentieperiode.

Daarna wordt de reeks meteorologische observaties veranderd, rekening houdend met de klimaatwijzigingen die door het scenario worden beschreven. Daaruit volgt een nieuwe reeks debieten en andere componenten van de watercyclus. De impact op de hydrologische cyclus wordt vervolgens geanalyseerd door een vergelijking van de resultaten van de twee simulaties, uitgevoerd met het hydrologisch model. Deze benadering is zuiver statisch in die zin dat het hydrologisch model niet wordt teruggekoppeld aan het klimaatmodel. Dat is ook een beperking die grote gevolgen kan hebben, zoals we eerder al hebben besproken.

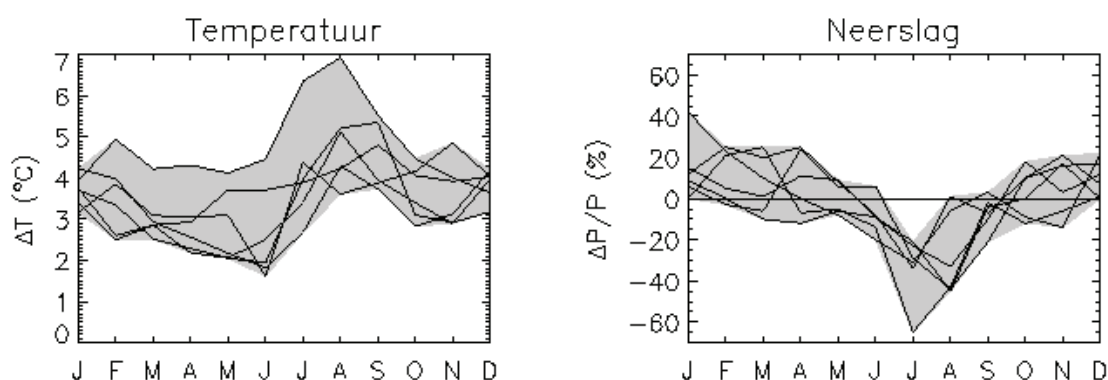


AGROMET-FAX
10-daagse verwachting
Duinen



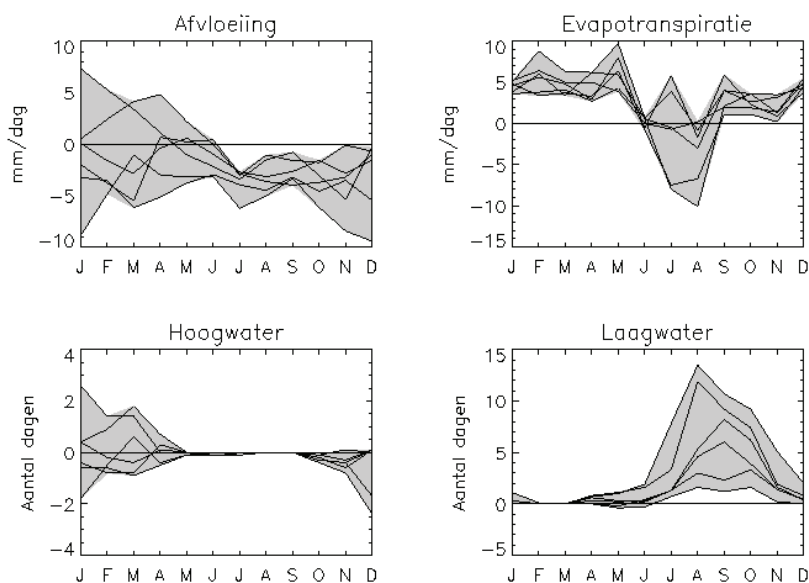
Figuur 4. Weergave van de probabilistische voorspelling van 29 april 2008 van het Europese Centrum voor weersvoorspellingen op middellange termijn voor de kust voor een periode van 10 dagen. Deze probabilistische voorspelling is het resultaat van 51 voorspellingen van een versie van het model van het Europese Centrum, dat uitgaan van licht verschillende initiële omstandigheden (zie ook hoofdstuk 4).

Een van de allereerste wetenschappelijke publicaties op internationaal vlak over dat onderwerp wijst erop dat het KMI zich vanaf de jaren 80 heeft geïnteresseerd voor de mogelijke impact van klimaatwijzigingen op de hydrologie. De hierboven beschreven methode was maatgevend en het eerste rapport van het IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) van 1990 verwees ernaar. Daarna kon door verschillende projecten, waarvan sommige werden gefinancierd door het Belgische Federale Wetenschapsbeleid, worden aangetoond dat de respons van de stroomgebieden verschilde naargelang hun eigen kenmerken, hoofdzakelijk het infiltratie- en accumulatievermogen in waterhoudende lagen (aard van de bodems, topografie...). Immers, de absorptie en de geleidelijke restitutie van de aanwas van hoeveelheden regenwater of, omgekeerd, de ondersteuning van het debiet in de zomer door een watervolume dat in de winter is verzameld, kunnen de effecten van veranderingen in het neerslagstelsel temperen. Uiteindelijk werd de gevoeligheidsanalyse van de hydrologische cyclus veralgemeend naar de bekkens van de Maas en de Schelde, in België maar ook stroomopwaarts in Frankrijk. De daarbij gebruikte klimaatscenario's waren geselecteerd door het IPCC (1998): deze scenario's werden opgesteld op basis van de resultaten van modelsimulaties die rekening houden met de interacties tussen de oceaan en de atmosfeer bij een jaarlijkse verhoging van de concentratie broeikasgas met 1 % tot het einde van de 21ste eeuw. Figuur 5 maakt een vergelijking mogelijk voor de veranderingen van de temperatuur en de neerslag in België voor de periode (2070-2099) en een referentieperiode (1961-1990). Deze scenario's simuleren een temperatuurstijging in elk seizoen. Volgens deze scenario's zou de neerslag afnemen in de zomer in vergelijking met de referentieperiode en toenemen in de winter.



Figuur 5. Scenario's voorgesteld door het IPCC voor de temperatuurveranderingen (T) en de veranderingen in de neerslag (N); voorspellingen voor België en voor de periode van 2070 tot 2099. De curven stemmen overeen met de resultaten van simulaties, verkregen op basis van drie verschillende klimaatmodellen; voor een van deze modellen werden de resultaten van vier simulaties, uitgevoerd op basis van licht verschillende beginvoorwaarden, in aanmerking genomen.

Figuur 6 geeft ons een idee van de impact van dergelijke klimaatveranderingen op de watercyclus in het bekken van de Schelde stroomopwaarts van Antwerpen. De impact op het gemiddelde, maandelijkse debiet (afwatering) wordt berekend als het verschil tussen enerzijds de maandelijkse gemiddelden van de debieten die worden gesimuleerd door het hydrologische model met waargenomen meteorologische gegevens, en anderzijds de gemiddelden van de debieten, gesimuleerd met gegevens die worden gewijzigd op basis van de scenario's van figuur 6. **In de zomer bestaat de impact dan wel duidelijk uit een daling van het gemiddelde debiet, maar in de winter is de impact onzeker.** Figuur 6 toont ook de impact op de evapotranspiratie, dat is de hoeveelheid water die verdampt vanaf de bodem of die wordt afgegeven door de vegetatie. De verdampte hoeveelheid water zou het hele jaar lang groter zijn (omdat het warmer zou zijn), behalve in de zomer, aangezien de waterreserves van de bodem volgens het hydrologisch model gedaald zouden zijn.



Figuur 6. Hydrologische impact van de klimaatscenario's van figuur 5, berekend in het KMI: de afvloeïng (debiet omgerekend naar het oppervlak van het stroomgebied), de evapotranspiratie, het aantal dagen hoogwater en het aantal dagen laagwater van de Schelde.

Om deze risicoanalyse te vervolledigen werd de impact van de scenario's op de frequentie van hoog- en laagwaters geschat door de gesimuleerde debietreeksen voor het huidige klimaat te vergelijken met die verkregen voor een gewijzigd klimaat. Nadat een drempel voor hoogwaters werd vastgelegd, werd het aantal dagen waarop die drempel werd overschreden in de gesimuleerde reeksen voor klimaatveranderingen vergeleken met het overeenkomstige aantal dagen voor het huidige klimaat. We merken op dat **de impact op het aantal dagen hoogwater onzeker is**, ook voor de verste periode waarvoor de scenario's meer neerslag leken te verwachten in de winter. Op vergelijkbare wijze werd vastgesteld dat **het aantal dagen laagwater op zijn beurt duidelijk is toegenomen**, ongeacht welk scenario er werd gebruikt. De resultaten voor het stroomgebied van de Maas zijn zeer vergelijkbaar met de voorgestelde resultaten in figuur 6.

Deze gevoeligheidsanalyse brengt grote onzekerheden aan het licht. Nochtans geven de gebruikte klimaatscenario's niet de volledige onzekerheid weer met betrekking tot de toekomst. Zo zouden bijvoorbeeld recentere klimaatscenario's, die rekening houden met de onzekerheid over de ontwikkeling van de broeikasgassen, moeten worden gebruikt. Met de meer gedetailleerde informatie waarover we nu beschikken kunnen we ook de gebruikte methodologie voor de gevoeligheidsonderzoeken verfijnen. – Dat gebeurt momenteel in een project waaraan het KMI meewerkt.

3. Conclusie

De dynamische systeemtheorie levert een natuurlijk kader om de dynamische eigenschappen van de atmosfeer en het klimaat te bestuderen. Met deze theorie kunnen we niet alleen de mogelijke gedragingen van deze systemen op de voorgrond stellen, maar ook nieuwe stappen voorstellen om de voorspellingen te verbeteren, met name door middel van probabilistische voorspellingen. Het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België werkt mee aan de toepassing en ontwikkeling van de instrumenten en technieken die een beter inzicht kunnen geven in deze dynamica.

Deze werkzaamheden houden een waarschuwing in tegen het idee om klimaatprojecties te doen over tientallen of zelfs duizenden jaren, zonder een betrouwbaarheidsindicatie te verschaffen. Ze wijzen tevens op de noodzaak om rekening te houden met alle onzekerheden die invloed hebben op de voorspelling, via een probabilistische benadering, die bovendien de verdienste heeft dat ze een raming mogelijk maakt van de waarschijnlijkheid van extreme gebeurtenissen.

Fundamenteel onderzoek en de mogelijke toepassingen ervan blijven integraal deel uitmaken van onze werkzaamheden in het KMI. Een belangrijke peiler in die context is een beter inzicht in de dynamische eigenschappen van de atmosferische en klimatologische modellen, en in het bijzonder van hun extreme gebeurtenissen. Maar ook een algemene beschrijving van de dynamica van de afwijking, ongeacht de oorsprong ervan (modelfout en/of afwijking van de beginvoorwaarden), of ook de correctie a posteriori van voorspellingsafwijkingen. Ook het onderzoek van de hydrologische impact van de klimaatveranderingen wordt voortgezet. Klimaatprojecties op een nauwkeurigere regionale schaal komen daarbij aan bod.

Hoofdstuk 4. Hulp bij het beslissingsproces en de aanpassingen

1. Extreme weersomstandigheden en aanpassing aan het klimaat

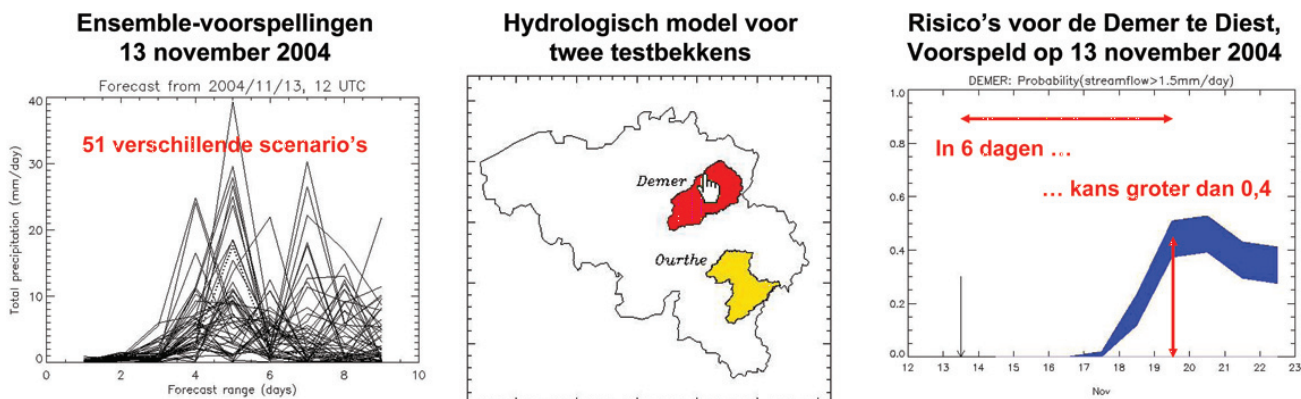
De verhoging van het aantal extreme weersomstandigheden maakt deel uit van de mogelijke oorzaken van een eventuele klimaatwijziging. Gelukkig zal de impact van bepaalde meteorologische fenomenen kunnen worden afgezwakt door de substantiële vooruitgang van de voorspelling ervan; een vooruitgang die al aan de gang is en die nog belangrijker zal worden als men erin wil investeren.

Het is nuttig om weten dat momenteel in gans de wereld het onderzoek in meteorologische voorspellingen (waaraan het KMI op vele gebieden actief deelneemt) zich oriënteert volgens twee complementaire wegen:

- **De zogenaamde « deterministische » voorspellingsmethodes** pogen de resolutie te verhogen van het model. De mazen van de modellen worden steeds fijner om vooral kleinschalige meteorologische fenomenen beter te integreren.
- **De « ensemble » voorspellingsmethodes** pogen het chaotische karakter van de atmosfeer beter in rekening te brengen, verantwoordelijk voor de foutengroei van de voorspelling met de tijd (zoals vermeld in hoofdstuk 3). In deze benadering kijkt men niet enkel naar één berekening, maar naar een verzameling van berekeningen, elk gestart met een licht gewijzigde begintoestand. De voorspelling wordt hier als kansberekening beschouwd met als doel de kans op een meteorologische gebeurtenis in te schatten.

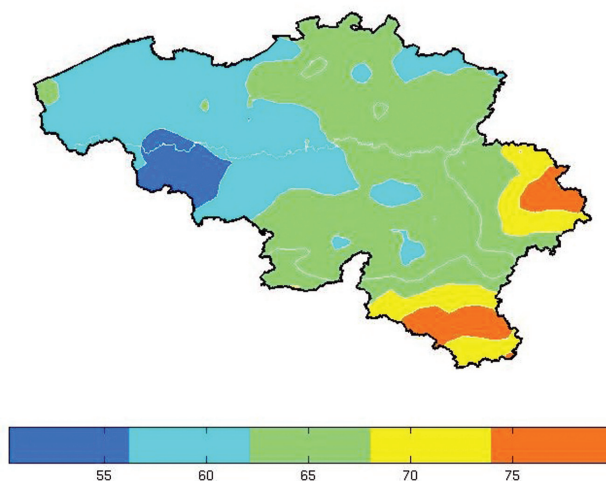
a) **De federale diensten**, verantwoordelijk voor het toezicht op de openbare veiligheid en de gezondheid, hebben een vruchtbare samenwerking met het KMI bewerkstelligd om **alarmsystemen** te installeren die waarschuwen bij mogelijk schadelijke meteorologische omstandigheden voor personen of hun goederen. Vermeldenswaardig zijn de waarschuwingen door de cel « waakzaamheid-gezondheid » bij de hittegolf tijdens de zomer van 2003, die de aandacht vestigden op de kwetsbaarheid van sommigen die behoren tot de meest zwakke groep van onze maatschappij om dit soort extreme weersomstandigheden te trotseren. Daarnaast maken de gezondheidsdiensten er tijdens andere periodes van het jaar ook werk van om bijvoorbeeld te kunnen anticiperen op koudegolven, die eveneens de zwakkeren uit onze samenleving kunnen treffen alsook economische schade kunnen berokkenen.

b) **De regionale diensten**, verantwoordelijk voor het toezicht op de waterlopen en rivieren, doen een beroep op het KMI, enerzijds om hun **waarschuwingmodellen** te voeden (zie figuur 1) en anderzijds voor **de klimatologische analyse van de risico's** (zie figuur 2).



Figuur 1. Risico voorspellingen voor hoge waterstanden voor een termijn van 9 dagen.

- In bovenstaand voorbeeld komt de debietdrempel overeen met een waarde die in 5 % van de waarnemingen overschreden wordt. Deze vrij milde drempel werd gekozen om voldoende voorvallen te verzamelen voor de validatie van de methode, gebruik makend van de archieven van het ECMWF sinds 1997.
- De conclusie van de studie is dat de waarschijnlijkheidsvoorspellingen betrouwbaar zijn: een voorspelde waarschijnlijkheid van 0,4 zal bijvoorbeeld in 40 % van de gevallen inderdaad aanleiding geven tot een debiet dat de drempel overschrijdt. De studie heeft ook aangetoond dat deze voorspellingen tot 9 dagen ver een voorspellende waarde hebben.

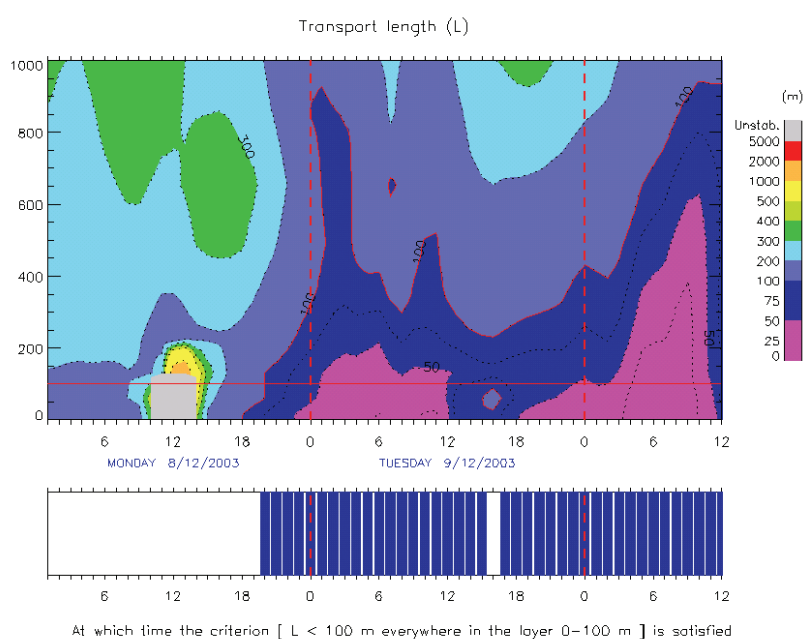


Figuur 2. Voorbeeld van een extreme neerslagkaart van België. De overschrijdingsdrempels van de hoeveelheden per 24 u. die gemiddeld om de 20 jaar voorkomen, worden in een kleurschaal van 50 mm tot 80 mm omgezet.

c) De instanties die de luchtkwaliteit in ons land sinds meerdere jaren bewaken en verzameld zijn in een **interregionale cel**, doen ook een beroep op onze diensten. De ontwikkeling van de numerieke voorspelling laat in feite toe te anticiperen op de momenten waarbij **de meteorologische condities ongunstig zouden zijn voor het verspreiden van verontreinigende stoffen** (zie figuur 3). Deze toepassing werd op punt gezet door een modelleerdersteam van het KMI. Ze zou voor alle regio's van het land moeten leiden tot voorzorgsmaatregelen ten voordele van de gezondheid, conform aan de Europese richtlijnen op dit gebied. Enkele privé-bedrijven, die als pioniers hun negatieve invloed op het milieu willen verminderen, hebben ook interesse voor dergelijke waarschuwingsdiensten.

BRUSSELS

ALADIN forecast initialized on MONDAY 8/12/2003 at 0 UT



Figuur 3. Voorspelling van 8 december 2003 van een kritieke episode aangaande de verspreiding van vervuilende stoffen in Brussel. (met vriendelijke toestemming van de Intergewestelijke Cel voor het Leefmilieu)

Dankzij steeds betere modellen kan de verspreiding van toxische gassen door industriële ongevallen beter worden opgevolgd door het crisiscentrum van de regering. Het is nu veel makkelijker om de richting te bepalen waarin **een toxische wolk zich zal verplaatsen en de bron ervan te vinden**. Ongevals simulaties van dit type werden reeds op Europees vlak tot stand gebracht dankzij de samenwerking tussen Europese meteorologische diensten en andere verantwoordelijken voor het milieu dankzij harmonisatie van hun werkmiddelen. Deze ervaringen hebben onder andere geleid tot geharmoniseerde waarschuwingsmethodes op Europese schaal, waarvan de resultaten kunnen gevolgd worden op de volgende website:

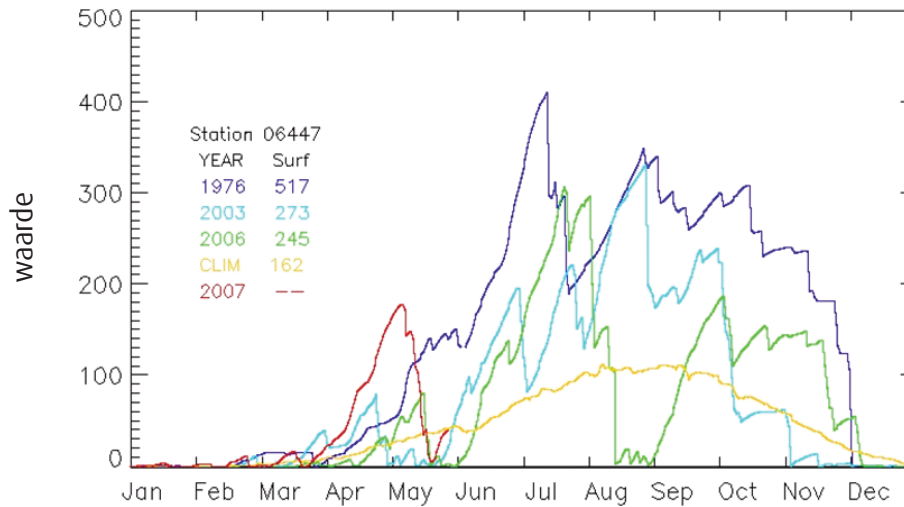
<http://www.meteoalarm.eu/>

Daarnaast heeft de meteorologie een onontbeerlijke bijdrage geleverd in geval van nucleaire ongevallen. Het KMI neemt in dit kader actief deel aan de simulatie van nucleaire risico's op ons grondgebied en daarbuiten.

d) Alle betrokkenen bij ruimtelijke ordening zullen ongetwijfeld interesse hebben voor de karakteristieken van ons klimaat. In dit kader worden wij geholpen door de gegevens van de vrijwillige klimaatwaarnemers over het ganse federale grondgebied en door de validatie en het beheer van de talrijke gegevens. De kwetsbaarheid van het milieu voor meteorologische wisselvalligheden kan meer dan ooit in rekening worden gebracht. Vragen als hoe en waar onweersbekkens bouwen, waar windmolens plaatsen, hoe het energetisch rendement van nieuwe gebouwen optimaliseren, kunnen vandaag beantwoord worden, dankzij onder andere een nieuwe benadering van het risico en het potentieel van het klimaat.

e) De opvolging in quasi reële tijd van de evolutie van bepaalde klimatologische parameters laat tegenwoordig toe sneller te beslissen om hulp te bieden aan specifieke en kwetsbare sectoren zoals de landbouw. Zo wordt de droogte-index « KBDI » berekend met behulp van de maximale dagelijkse temperaturen en de gecumuleerde neerslaghoeveelheden. Figuur 4 illustreert de jaarlijkse evolutie van deze index voor verschillende jaren uit het verleden tijdens dewelke zich droogteperiodes hebben voorgedaan. De periode april-mei 2007 (in het paars) wordt gekenmerkt door zijn vroegtijdig voorkomen in de lente, maar zijn intensiteit moet gerelativeerd worden wanneer een vergelijking gemaakt wordt met andere, ergere perioden (waaronder deze van 1976 in het blauw, de ergste tot op heden, en deze van 2006 in het groen, ernstig tot het einde van de maand juli). De gele curve weerspiegelt de jaarlijkse evolutie van deze index berekend over een periode van 30 jaar.

Jaarlijkse variatie van KBD index



Figuur 4. Een voorbeeld van een droogte-index waarvan de opvolging in quasi reële tijd hulp kan betekenen bij het nemen van beslissingen in domeinen waar de activiteiten bijzonder gevoelig zijn voor dit fenomeen (zie de tekst voor de uitleg bij de figuur).

2. Berekening van klimaatscenario's : het 3INBO Project

Het KMI werkt in 2008 samen met het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) en de Afdeling Hydraulica van de Katholieke Universiteit van Leuven (KULeuven) op het project « Berekening van Klimaatscenario's voor Vlaanderen » uitgeschreven door het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap.

Dit project loopt parallel met het « Climate Change Impacts-Hydrology (CCI-HYDR) » project van Federaal Wetenschapsbeleid waaraan wetenschappers van de KULeuven en het KMI deelnemen.

Klimaatscenario's zijn projecties die proberen een zo consistent en samenhangend mogelijk beeld te geven van een mogelijk toekomstig klimaat. **Het zijn echter geen langetermijnsweersverwachtingen.** In die zin doen zij geen uitspraak over het weer op een bepaalde dag, een bepaalde maand of een bepaald jaar, maar alleen over het gemiddelde weer en de kans op extremen in de toekomst. De klimaatscenario's geven dus een mogelijk beeld van de veranderingen in temperatuur, neerslag, wind en andere klimatologische veranderlijken voor een klimatologische periode van 30 jaar.

Bij de opstelling van klimaatscenario's wordt gebruik gemaakt van de resultaten van een groot aantal computermodellen, waarbij zowel wereldwijd als regionaal de invloed van emissiescenario's op het klimaat werden bestudeerd. De uitkomsten van de klimaatmodellen kunnen gecombineerd worden met meetreeksen van klimatologische veranderlijken. Op basis van de resultaten van de scenario's werd een rekenprogramma ontwikkeld waarbij lange historische tijdreeksen omgebouwd worden naar een toekomstig klimaat. Zo komt informatie naar boven over de jaar-op-jaar variatie, de natuurlijke schommelingen uit het verleden en de ruimtelijke variabiliteit.

BESLUIT

Is het nodig de lezer erop te wijzen dat het onderscheid maken tussen de natuurlijke en antropogene bijdragen tot de klimaatveranderingen één van de belangrijkste op te lossen problemen is in dit begin van de 21ste eeuw? Helaas is het publieke debat regelmatig het slachtoffer van de verwarring tussen de juiste betekenis van verschillende begrippen. Of het nu de verklaring betreft van de oorzaken van de globale opwarming, of de poging om de nefaste gevolgen ervan te beperken, de ideale benadering is ver van een unanieme consensus, zowel in wetenschappelijke middens als bij hen die gemeenschappelijke beslissingen en maatregelen moeten treffen.

Door deze publicatie hebben we de lezer willen informeren over onze activiteiten en een bijdrage willen leveren in het kader van de problematiek rond de klimaatverandering.

Dankzij zijn groepen die fundamenteel onderzoek uitvoeren, de waarnemers, de voorspellers, de informatici en de andere personeelsleden, draagt het KMI sedert lang bij tot de vooruitgang in het begrijpen van atmosferische fenomenen. Het KMI houdt eraan actief mee te blijven werken aan de klimaatproblematiek door de gemeenschap nuttige diensten aan te bieden in het kader van de energiepolitiek, het leefmilieu, de ruimtelijke ordening en de aanpassingen aan de klimaatverandering. Deze brochure wil een etappe zijn op deze weg.

Aan het einde van een werk, dat we toegankelijk wensten te maken voor iedereen, willen wij de belangrijkheid van het principe van voorzorg in vier toepassingsdomeinen onderstrepen.

Het wetenschappelijk onderzoek. Sinds 30 jaar heeft het fundamenteel en toegepast onderzoek zonder enige twijfel vorderingen gemaakt in het begrijpen van het klimaat (in de modellisering van de factoren die aan de basis ervan liggen, in de uitdieping van zijn evolutie, in zijn interacties met de levende wereld). Het is echter ver van voltooid. Het zou fout zijn te veronderstellen dat vanaf nu alles begrepen is. Niets is minder waar, het gaat erom de onderzoekers te steunen bij het verder uitbreiden van onze kennis over het klimaat.

De monitoring van het klimaat. De netwerken van hoge kwaliteit voor aardobservaties moeten verder in stand gehouden worden en versterkt waar verantwoord. Ze zijn noodzakelijk voor de validatie en de verbetering van de gegevens afkomstig van de satellieten die een totaalbeeld geven van onze planeet met een steeds fijnere resolutie. De waarnemingen afkomstig van netwerken en satellieten zijn complementair en vooral onontbeerlijk voor een bewaking van het globaal en regionaal klimaat. Betrouwbare en uitgebreide waarnemingen zijn noodzakelijk voor het valideren van de klimaatmodellen.

Het voorkomen van rampen. De bewaking van extreme meteorologische fenomenen moet verder aangehouden worden. Dit betekent het inzetten van voldoende middelen en gekwalificeerd personeel voor de meteorologische voorspellingen. Om ons beter voor te bereiden op een leefwereld die steeds kwetsbaarder wordt, moeten niet alleen de bestaande voorspellingstechnieken verbeterd worden, maar moet ook de samenwerking met de federale en regionale autoriteiten versterkt worden.

De kwaliteit van het leefmilieu. De huidige consensus om de afhankelijkheid van de samenleving van fossiele brandstoffen te verminderen, berust op relevante argumenten en het klimatologische is er slechts één van. Initiatieven op dit gebied moeten de algemene kwaliteit van onze samenleving verbeteren en het begin van een milieuvriendelijke ontwikkeling bevorderen.

Ondanks al deze waarschuwingen, die het gebruikelijke voorzorgsprincipe in verband met de klimaatveranderingen verbreden, besluiten we toch met een positieve toon.

Volgens ons zou de wetenschappelijke vooruitgang ten gevolge van de belangstelling voor de klimaatsverandering en de meteorologische risico's, nieuwe gelegenheden moeten scheppen voor een betere ontwikkeling die tevens de mens met zijn milieu verzoent.

Meer weten

a) Publicatie voor het groot publiek, vulgarisatie en technisch rapport

Het klimaat van België

- BROUYAUX, F. en C. TRICOT, 2007. Studie ter ondersteuning van het « Regenplan voor Brussel-Hoofdstad », IBGE-BIM 2006, 68 p.
- BROUYAUX, F., MORMAL, P., TRICOT, C., VANDIEPENBEECK, M. en R. VERHEYDEN, 2004. Weer of geen weer. Een eeuw natuurgeweld in België, KMI en Van Halewyck (uitg), 232 p.
- MORMAL, P. et C. TRICOT, 2004. Aperçu climatique des Hautes-Fagnes, IRM, Publication scientifique et technique n°36, 28 p.
- SNEYERS, R., 1981. Les séries climatologiques de Bruxelles-Uccle. La température de l'air, IRM, Publ. Série B, n°110, 39 p.
- SNEYERS, R. et M. VANDIEPENBEECK, 1995. Notice sur le climat de la Belgique, IRM, Publication scientifique et technique n°2, 62 p.
- VANDIEPENBEECK, M., 1996. Fluctuations récentes dans les séries climatologiques de Bruxelles-Uccle (Belgique), Publication de l'Association Internationale de Climatologie, 1997, vol 9.
- VANDIEPENBEECK, M., TRICOT, C., TEMPELS, J. et A. JOUKOFF, 1995. Le climat de la Belgique change-t-il ?, in « Etat de l'Environnement wallon 1994 », 211-219.

Algemene klimatologie en dynamische klimatologie

- BARUCH, J. O. (Coordinateur), 2007. Les trois inconnues du CLIMAT, Dossier, La Recherche, 414, 31-49.
- MICHELSEN, S., VIAENE, P., VANNEUVILLE, W., VAN EERDENBRUGH, K., MOSTAERT, F. en L. DEBONTRIDDER, 2007. Opstellen van een methode voor het inrekenen van de klimaatsverandering in de composiethydrogrammethode: Algemeen rapport.
- MOHYMONT, B. et G. DEMAREE. Généralisation linéaire par morceaux de la formule de Montana pour l'établissement des courbes IDF des précipitations à Uccle, Belgique, submitted in 2007 to « La Houille Blanche, Revue internationale de l'Eau ».
- NICOLIS, C., 1991. Le climat peut-il basculer ?, La recherche, 232, 584-587.
- SNEYERS, R., 1975. Sur l'analyse statistique des séries d'observations, Note Techn. n°143, Organisation Météorologique Mondiale, Genève, 192 p.

b) Gespecialiseerd publicaties, in verband met de verschillende hoofdstukken

Hoofdstuk 1. Evolutie van het klimaat in België

- DEMAREE, G., 1990. Did an abrupt global climate warming occur in the 1920 ?, in « Contribution à l'étude des changements de climat », IRM, Publ. Série A, n°124, 80 p.
- GELLENS, D., 2002. Combining regional approach and data extension procedure for assessing GEV distribution of extreme precipitation in Belgium, J. of Hydrology, 268, 113-126.
- MANN, H. B., 1945. Non parametric test against trend, Econometrika, 13, 245-259.
- PETTITT, A. N., 1979. A non parametric approach to the change-point problem, Appl. Statist., 28, 126-135.
- SNEYERS, R., BÖHM, R. and S. VANNITSEM, 1992. Climatic changes in the Austrian Alps during the period 1775- 1989, Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 15, 195-199.
- VANDIEPENBEECK, M., 1995. Practice climate change detection in the case of a special alternative to randomness, Proceedings of the 6th International Meeting on Statistical Climatology, University College Galway, Ireland, 25-28.
- VANDIEPENBEECK, M., 1998. On a recent urban effect in the time series of the temperature in different stations in Belgium, Proceedings of the 2nd European Conference on Applied Climatology, Cd-ROM, Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Vienna, Austria.
- VANNITSEM, S. et G. DEMAREE, 1991. Détection et modélisation des sécheresses au Sahel. Proposition d'une méthodologie, Hydrol. continent., 6, 155-171.

Hoofdstuk 2. Enkele elementen van het klimaatsysteem bestudeerd op het KMI

Zonnestraling en de rol van de aerosolen


- CHEYMOL, A. and H. DE BACKER, 2003. Retrieval of the aerosol optical depth in the UV-B at Uccle from Brewer ozone measurements over a long time period 1984-2002, *J. Geophys. Res.*, 108(D24), 4800, doi:10.1029/2003JD003758.
- CHEYMOL, A., DE BACKER, H., JOSEFSSON, W. and R. STUBI, 2006. Comparison and validation of the aerosol optical depth obtained with the Langley plot method in the UV-B from Brewer ozone spectrophotometer measurements, *J. Geophys. Res.*, 111, D16202, doi: 10.1029/2006JD007131.
- DEWITTE, S., 2007. The European climate anomaly in 2006 as seen by the Geostationary Earth Radiation Budget instrument, *Eumetsat Conference Proceedings*, available online as <http://gerb.oma.be/gerb/Publications/2006climateanomaly.pdf>.
- DEWITTE, S., CROMMELYNCK, D., MEKAOUI, S. and A. JOUKOFF, 2005. Measurement and uncertainty of the long term total solar irradiance trend, *Solar Physics*, 224, 209-216.
- DEWITTE, S., L. Gonzalez, N. Clerbaux, A. Ipe, C. Bertrand, B. De Paepe, "The Geostationary Earth Radiation Budget Edition 1 data processing algorithms", *Advances in Space Research*, Vol. 41, No 11, pp 1906-1913, 2008, doi:10.1016/j.asr.2007.07.042.
- MEKAOUI, S., S. DEWITTE, "Total Solar Irradiance measurement and modelling during cycle 23", *Solar Physics*, Vol. 247, pp. 203-216, doi: 10.1007/s11207-007-9070-y, 2008.

Ozon

- AUSTIN, J. and R. J. WILSON, 2006. Ensemble simulations of the decline and recovery of stratospheric ozone, *J. Geophys. Res.*, 111, D16314, doi:10.1029/2005JD006907.
- DE BACKER, H., 1999. Homogenisation of ozone vertical profile measurements at Uccle, *Publication scientifique et technique n°7*, IRM, ISSN D1999/0224/007, 26pp, available online as <ftp://ftp.kmi-irm.be/dist/meteo/hugo/publ/1999/o3prof.ps>.
- DELCLOO, A. and H. DE BACKER, 2005. Modelling planetary boundary layer ozone, using meteorological parameters at Uccle and Payerne, *Atmospheric environment*, 39 (28), 5067-5077, doi:10.1016/j.atmosenv.2005.05.013.
- LEMOINE, R. and H. DE BACKER, 2001. Assessment of the Uccle ozone sounding time series quality using SAGE II data, *J. Geophys. Res.*, 106, 14515-14523.
- STOLARSKI, R. S. and S. M. FRITH, 2006. Search for evidence of trend slow-down in the long-term TOMS/SBUV total ozone data record: the importance of instrument drift uncertainty, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 4057-4065.
- YANG, E.-S., CUNNOLD, D. M., SALAWITCH, R. J., MC CORMICK, M. P., RUSSEL III, J., ZAWODNY, J. M., OLTMANS, S. and M. J. NEWCHURCH, 2006. Attribution of recovery in lower-stratospheric ozone, *J. Geophys. Res.*, 111, D17309, doi:10.1029/2005JD006371.

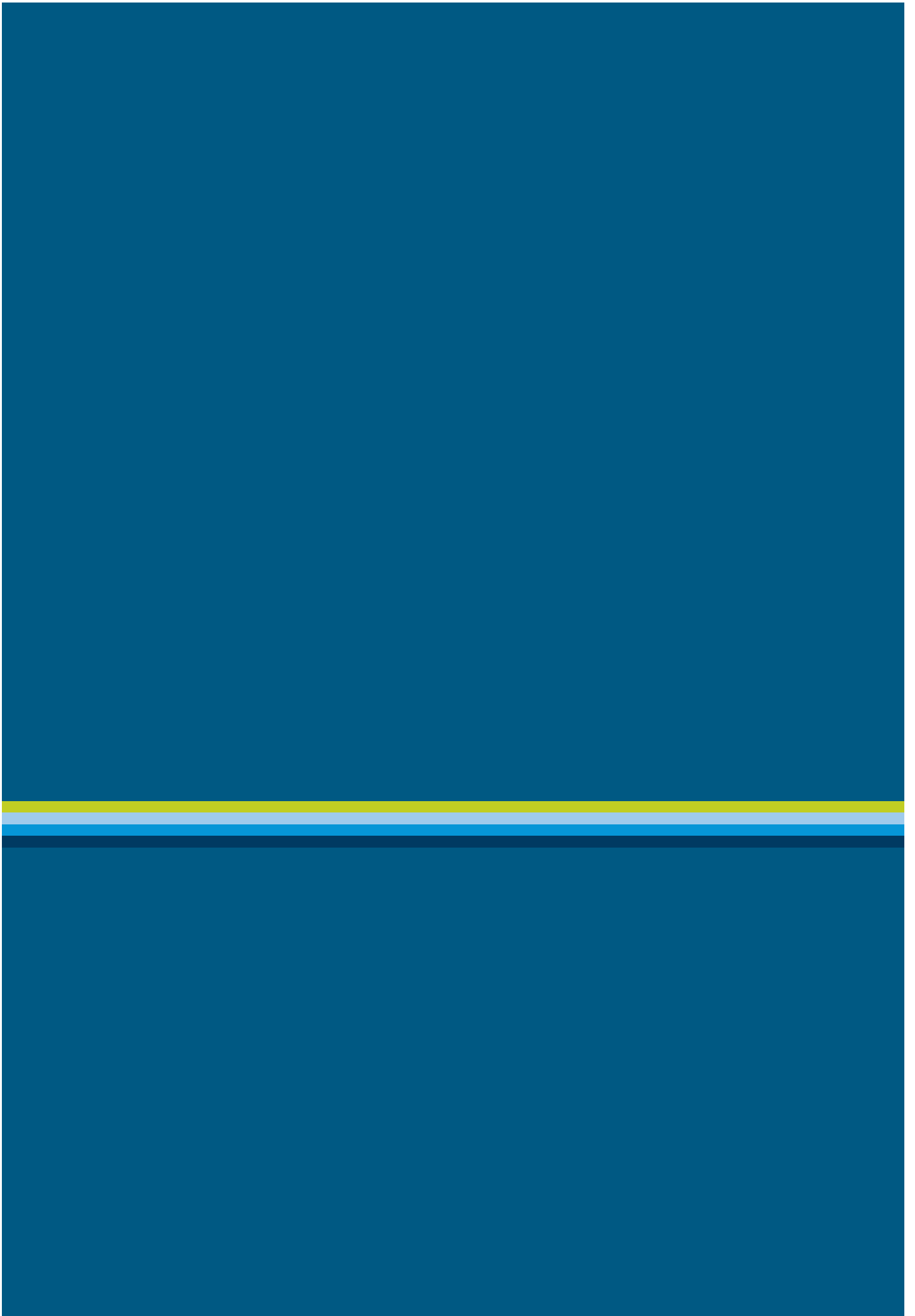
Hoofdstuk 3. Onderzoek over klimaatvoorspellingen en klimatologische modellering

- BERGER, A., 1981. *Climatic variations and variability: facts and theories*. Reidel, Dordrecht.
- DEMAREE, G. and C. NICOLIS, 1990. Onset of sahelian drought viewed as a fluctuation-induced transition, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 116, 221-243.
- DE WIT, M. J. M., VAN DEN HURK, B., WARMERDAM, P. M. M., TORFS P. J. J. F., ROULIN, E. and W. P. A. VAN DEURSEN, 2007. Impact of climate change on low-flows in the River Meuse, *Climatic Change*, 82, 351-372.
- DIJKSTRA, H. A., 2005. *Nonlinear physical oceanography*. Springer, 532 p.
- GELLENS, D. and E. ROULIN, 1998. Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios, *J. Hydrol.*, 210, 242-258.
- GOSWAMI, B and J. SHUKLA, 1991. Predictability of a coupled Ocean-Atmosphere model, *J. Climate*, 4, 3-22.
- NICOLIS, C., 1982. Stochastic aspects of climatic transitions - Response to a periodic forcing, *Tellus*, 34, 1-9.
- NICOLIS, C., 2004. Dynamics of model error: The role of unresolved scales revisited, *J. Atmos. Sci*, 61, 1740-1753.
- NICOLIS, C. and G. NICOLIS, 2004. Noisy limit point bifurcation with slowly varying control parameter, *Europhys. J.* 66, 185-191.

- 
- PALMER, T.N., 2000. Predicting uncertainty in forecasts of weather and climate, *Rep. Prog. Phys.*, 63, 71-116.
- ROULIN, E., 2007. Skill and relative economic value of medium-range hydrological ensemble predictions, *Hydrology and Earth System Science*, 11, 725-737.
- VANNITSEM, S., 2006. The role of scales in the dynamics of parameterization uncertainties, *J. Atmos. Sci.*, 63, 1659-1671.
- VANNITSEM, S and C. NICOLIS, 1998. Dynamics of fine-scale variables versus averaged observables in a T21L3 quasi-geostrophic model, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 124, 2201-2226.
- VANNITSEM, S. and C. NICOLIS, 2008. Dynamical properties of Model Output Statistics forecasts, *Mon. Wea. Rev.* 136, 405-419.

Hoofdstuk 4. Hulp bij het beslissingsproces en de aanpassingen

- KNMI, 2006. *Klimaat in de 21ste eeuw. Vier scenario's voor Nederland*, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, 16 p.
- MOHYMONT, B., DEMAREE, G. R. and D. N. FAKA, 2004. Establishment of IDF-curves for precipitation in the tropical area of Central Africa – comparison of techniques and results, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, 375-387.
- TERMONIA, P. and A. QUINET, 2004: A new transport index for predicting episodes of extreme air pollution, *J. Appl. Meteor.*, 43, 631-640.



Uitgegeven door het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België, Ringlaan 3 - 1180 Brussel. Verantwoordelijke uitgever: Dr. H. Malcorps

ISBN 02008/0224/050