

De klimaatverandering

PHILIPPE MARBAIX, JEAN-PASCAL VAN YPERSELE
EN EMILIE VANVYVE

Inleiding

Het klimaatsysteem haalt zijn energie uit de zonnestrallen. Net als alle warme voorwerpen straalt de aarde warmte naar de ruimte terug in de vorm van infrarode stralen. De samenstelling van de atmosfeer heeft invloed op de mate waarin de atmosfeer zonne- en infrarode stralen doorlaat en dus ook op het klimaat dat het resultaat is van het evenwicht tussen opgevangen en afgestane warmte⁵. Sommige gassen, de zogenaamde 'broeikasgassen', hebben de eigenschap de warmte vast te houden in het klimaatsysteem doordat zij de zonnestrallen gemakkelijk doorlaten maar weinig doorlatend zijn voor de infrarode stralen die weer naar de ruimte worden afgegeven. Deze gassen spelen in zekere zin de rol van de glasplaten die de warmte vasthouden in een broeikas. Het natuurlijke mechanisme van het broeikaseffect, waardoor het klimaat op aarde een algemene gemiddelde temperatuur kent van +15°C in plaats van -18°C (als dit effect niet zou spelen), is hoofdzakelijk toe te schrijven aan waterdamp.

Sinds de industriële revolutie is er evenwel nog een ander gas dat het broeikaseffect in aanzienlijke mate versterkt: CO₂ of koolstofdioxide. Dit gas is een onvermijdelijke afvalstof bij de verbranding van fossiele brandstoffen (steenkool, petroleum en gas, in dalende volgorde van belang) of van organisch materiaal (planten en bossen). Per jaar komt ongeveer 30 miljard ton CO₂ in de atmosfeer terecht, dat wil zeggen gemiddeld 5 ton CO₂ per persoon (en 12 ton per Belg!). Van de uitgestoten koolstof wordt maar ongeveer de helft weer opgeslorpt door de biomassa en de oceanen, de andere helft stapelt zich op in de atmosfeer en blijft daar nog 50 tot 200 jaar aanwezig. Dit bevordert de stijging van de CO₂-concentratie in de atmosfeer (30% meer sinds de tijd voor de industrialisering). De menselijke activiteiten leiden eveneens tot een grotere stijging van de concentratie van andere gassen in de

atmosfeer die het broeikaseffect bevorderen, zoals methaan.

Het is dus duidelijk dat de oppervlaktetemperatuur van de aarde zal stijgen. Maar hoeveel? En wat zullen de gevolgen zijn? Deze vragen worden hoofdzakelijk onderzocht met behulp van numerieke klimaatmodellen. Deze modellen lijken vrij goed op de modellen die ontwikkeld zijn om het weer te voorspellen, maar zijn bovendien verfijnd genoeg om rekening te houden met verschijnselen die slechts langzaam veranderen zoals zeestromingen of de dynamiek van gletsjers.

Het Belgisch klimaat¹ moet natuurlijk worden gezien in de context van het klimaat op wereldschaal, en daarom is het nodig om eerst kort de mogelijke scenario's te beschrijven voor de ontwikkeling van het klimaat op wereldschaal.

Klimaatprojecties voor de 21ste eeuw

In 1988 hebben de Verenigde Naties de Intergouvernementele Werkgroep inzake Klimaatverandering (*Intergovernmental Panel on Climate Change* of IPCC) opgericht. Deze raad is momenteel het meest gezaghebbende orgaan over klimaataangelegenheden, omdat hij erin geslaagd is het merendeel van de specialisten op wereldvlak te laten meewerken aan een uiterst nauwkeurig deskundig onderzoek. Om te antwoorden op vragen over de toekomst van het wereldklimaat, stelt het IPCC een inventaris op van de resultaten van het bestaande onderzoek, vooral op het vlak van klimaatmodellen, en speelt het ook een rol bij het stimuleren van specifiek onderzoek. De belangrijkste publicaties van het IPCC zijn de evaluatierapporten, waarvan het laatste is verschenen in 2001^{4,5,6}.

TABEL 1

SRES-scenario's: 'wereldbeelden' opgemaakt om de vier 'families' van uitstootscenario's te definiëren die een impact hebben op het klimaat. Bron: IPCC

	Meer ontwikkeling 'op korte termijn' ('economisch')	Meer 'duurzame ontwikkeling'
Meer 'globaal' beleid	A1: Snelle economische groei, convergentie in de ontwikkeling van de regio's, zwakke bevolkingsgroei, technologische vernieuwing.	B1: Globale 'duurzame' oplossingen op sociaal, economisch en ecologisch vlak: efficiënt energieverbruik, zuinig gebruik van hulpbronnen... , zwakke bevolkingsgroei.
Meer 'regionaal' beleid	A2: Heel heterogene wereld (meer regionale belangen), matige economische groei, snelle bevolkingsgroei, technologische verschillen.	B2: Oplossingen op lokale schaal voor een duurzame ontwikkeling. Matige economische en bevolkingsgroei, technologische verschillen.

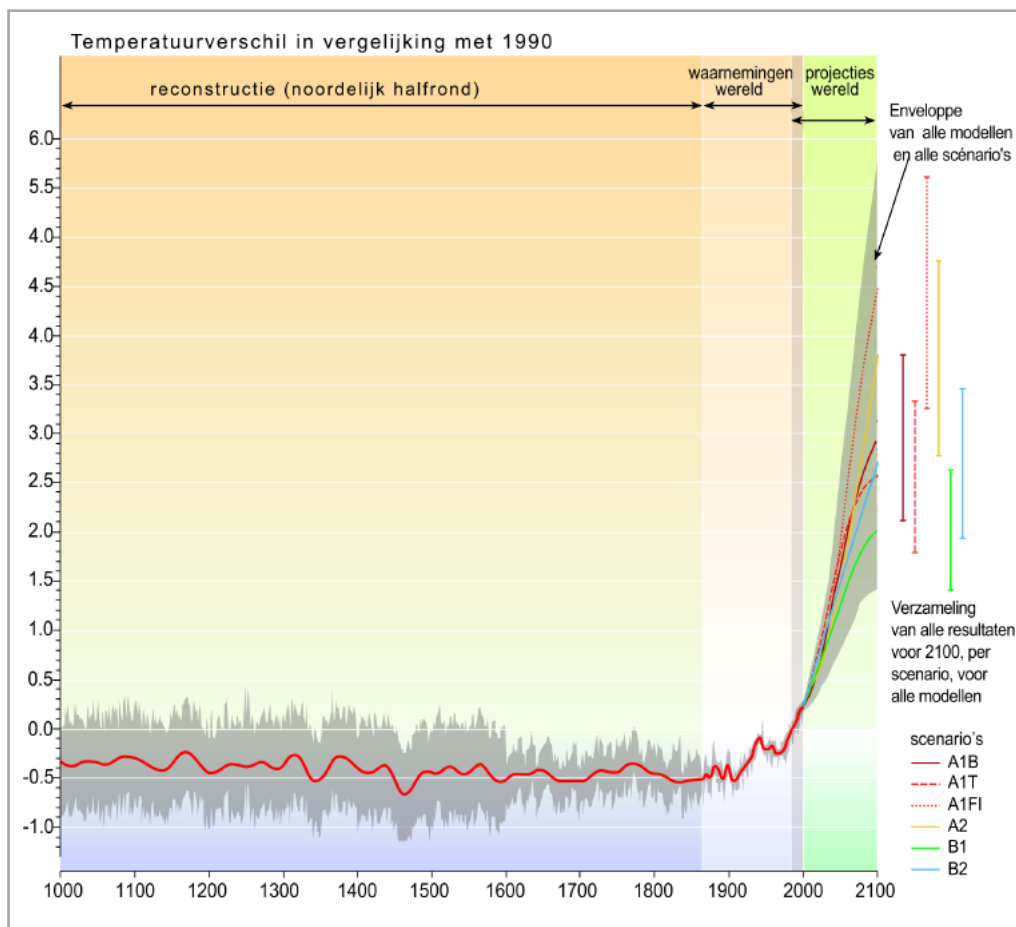
Scenario's

Wanneer we modellen willen opstellen van de klimaatverandering in de 21ste eeuw, moeten we uitgaan van hypothesen met betrekking tot de uitstoot van gassenⁱ in de atmosfeer. Deze uitstoot zal natuurlijk afhangen van veel verschillende factoren, zoals de evolutie van de bevolking, de economische ontwikkeling, het gebruik van energiebronnen... Omdat de toekomstige evolutie van deze factoren grotendeels onbekend is, zijn verschillende scenario's ontwikkeld op basis van 'beelden van de wereld' en van zijn mogelijke evolutie. Vervolgens zijn schattingen opgesteld van de mogelijke uitstoot die daaruit voortvloeit. De uitwerking van deze scenario's stond onder de coördinatie van het IPCC (in het SRES-rapport^{ii,2}); zij worden onderverdeeld in vier 'families', waarvan de principes bondig staan samengevat in tabel 1. Elke familie omvat veel verschillende scenario's, waarvan er geen enkel aanspraak kan maken het meest waarschijnlijke toekomstbeeld te schetsen: het gaat veeleer om 'karikaturen', die telkens wel bestaan uit een coherent geheel van veronderstellingen en die de bedoeling hebben een brede waaier aan toekomstmogelijkheden te onderzoeken. De scenario's van de twee families in groep 'B' besteden met name meer aandacht aan milieubeschermingⁱⁱⁱ.

Resultaten op wereldschaal

Wanneer de keuze voor een uitstootscenario is gemaakt, blijft het probleem nog altijd bijzonder ingewikkeld: zo moet onder andere nog worden bepaald wat op een gegeven moment de concentratie is van gas in de atmosfeer. Die concentratie is het gevolg van verschijnselen zoals de uitwisseling van koolstof tussen de atmosfeer, de biosfeer en de oceanen. Het eigenlijke klimaatonderdeel van de modellen bestaat ook weer uit talrijke elementen – zoals de aanwezigheid van wolken – die slechts een vereenvoudigde voorstelling kunnen vormen van de werkelijkheid: er is dus altijd een onzekerheid verbonden aan deze modellen en elk model heeft zijn sterke en zijn zwakke punten. Daarom houden de projecties van het toekomstige klimaat niet alleen rekening met verscheidene scenario's, maar ook met verscheidene modellen.

De gemiddelde wereldtemperaturen die zo worden verkregen, staan voorgesteld in het rechtse deel van figuur 1. Door rekening te houden met de resultaten van alle onderzochte modellen en van alle scenario's komen we voor de periode 1990–2100 tot een temperatuurstijging van 1,4 tot 5,8°C. Wanneer we een gematigd 'optimistisch' scenario nemen over de uitstoot van broeikasgassen (van



FIGUUR 1

Schommelingen in de oppervlaktetemperatuur (°C), voor de jaren 1000 tot 2100. Voor de periode van 1000 tot 1860: reconstructie (op basis van bomen, korallen, ijs...) voor het noordelijk halfrond; de rode lijn vertegenwoordigt een gemiddelde over vijftig jaar en het grijze deel de onzekerheid (dit interval is voor 95% waarschijnlijk correct). Voor de periode van 1860 tot 2000: gemeten waarnemingen van het gemiddelde voor de wereld; de lijn geeft het gemiddelde per decennium aan. Voor de toekomst: projecties voor 6 uitstootscenario's (gekleurde lijnen) en mogelijke resultaten voor alle scenario's en alle modellen (grijze zone). Bron: IPCC¹.

ⁱ Broeikasgassen en andere gassen die een invloed hebben op het klimaat, zoals zwaveldioxide.

ⁱⁱ *Special Report on Emission Scenarios*. Dit rapport heeft ook betrekking op de sociaal-economische scenario's die samenhangen met de uitstootscenario's.

ⁱⁱⁱ Geen enkel van deze scenario's omvat expliciet een klimaatbeleid: sommige scenario's veronderstellen bijvoorbeeld een rationeler energieverbruik, maar geen enkel scenario bevat expliciet de uitvoering van het raamverdrag van de Verenigde Naties inzake klimaatverandering (UNFCCC) of van het Kyoto-protocol.

type B2) en een model dat gemiddeld gevoelig is voor deze stijging, krijgen we voor de periode 1990–2100 een stijging van de oppervlaktetemperatuur van 3°C. Uit waarnemingen blijkt trouwens dat de globale temperatuur tussen het einde van de 19de en het einde van de 20ste eeuw met 0,6 (+/- 0,2) °C is gestegen. In de loop van ten minste de laatste 10.000 jaar is de temperatuur nooit zo snel gestegen als de stijging die wordt voorspeld voor de toekomst. En de temperaturen die men in 2100 vreest te bereiken, zijn waarschijnlijk sinds verschillende honderdduizenden jaar nooit gehaald.

Deze evolutie beperkt zich uiteraard niet alleen tot de temperaturen, maar heeft ook gevolgen voor het volledige klimaatsysteem. De gemiddelde neerslag op wereldniveau vertoont een stijgende trend, met grote verschillen naar gelang van de seizoenen en de streken.

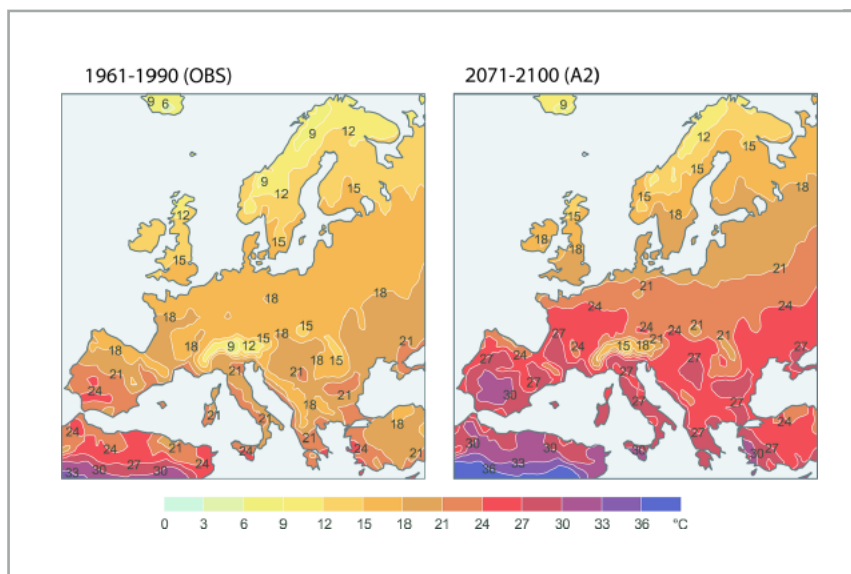
De zeespiegel

Het niveau van de oceanen wordt beïnvloed door twee mechanismen: enerzijds de uitzetting van het zeewater door opwarming; en anderzijds het saldo van de opstapeling van sneeuw en het smelten van de gletsjers in de bergen en van het ijs in Groenland en Antarctica. In de 21ste eeuw zal de grootste invloed waarschijnlijk afkomstig zijn van de opwarming van de oceanen. Er heerst nog vrij veel onzekerheid over de modellen; voor alle modellen en SRES-scenario's samen varieert de mogelijke stijging van het gemiddelde zeepeil voor de periode 1990–2100 van 9 tot 88 cm. De stijging zou niet dezelfde zijn in alle streken van de wereld, maar deze verschillen lijken beperkt en kunnen op dit moment nog niet op betrouwbare wijze worden ingeschat.

Na de 21ste eeuw

Wat er zal gebeuren na 2100 zal grotendeels afhangen van de uitstoot van broeikasgassen tot deze vervaldag en erna. Vooral van de uitstoot van CO₂, waarvan het overschot dat in de atmosfeer terechtkomt lang aanwezig blijft: zelfs na verschillende eeuwen is nog ongeveer een kwart van dit 'overschot' aan concentratie in de atmosfeer terug te vinden. Als we ervan uitgaan dat de concentraties stabiel zouden blijven – wat een sterke vermindering van de uitstoot vereist – zal de temperatuur langzaam blijven stijgen omdat de opwarming van de diepzee heel wat tijd vergt.

Het is heel goed mogelijk dat deze temperatuurstijging zal leiden tot het smelten van een aanzienlijk deel van de ijskap van Groenland en Antarctica. Volgens een scenario op lange termijn dat in het laatste IPCC-rapport als 'gemiddeld' wordt beschreven, zou dit voor de komende 1.000 jaar een stijging van het gemiddelde zeeniveau van 3 à 6 m met zich mee brengen. Als we daar nog 0,5 m aan toevoegen voor de impact van de kleine continentale gletsjers – die op dat moment vrijwel volledig verdwenen zullen zijn – en ongeveer 1,5 m stijging tengevolge van de thermische uitzetting van het zeewater, zou de stijging tot 8 m bedragen in het jaar 3000. En dit is niet eens een extreem scenario.



FIGUUR 2

Waargenomen zomertemperaturen in Europa voor de periode 1961–1990 (links); temperaturen gesimuleerd door regionale klimaatmodellen voor de periode 2071–2100 (rechts), scenario A2, bij wijze van voorbeeld (gemiddelde voor 2 modellen, die de temperaturen in het zuiden van Europa eventueel zouden kunnen overschatten, hoewel andere modellen gelijkaardige resultaten hebben opgeleverd).

Bron: onderzoeksprogramma SWECLIM, geciteerd door Bernes⁸.

Mogelijke grote 'verrassingen'

We denken hierbij vooral aan een verandering in de stromingen in de oceanen op wereldschaal, ook wel thermohaliene circulatie^{iv} genoemd. De Golfstroom maakt deel uit van deze circulatie en voert warmer water naar de Noord-Atlantische Oceaan. In deze streken zou de thermohaliene circulatie trouwens kunnen worden afgeremd door de aanvoer van zoet water aan de oppervlakte, zoals het water dat afkomstig is van het smeltende ijs in Groenland.

Voor de 21ste eeuw tonen de meeste modellen inderdaad een vertraging van de circulatie in de oceanen, maar geen enkele van de huidige projecties toont een stopzetting van de Golfstroom vóór 2100. De stopzetting van de circulatie zou paradoxaal genoeg de opwarming in onze streken kunnen matigen en zou uiteindelijk kunnen leiden tot een afkoeling in Noord-Europa. Men veronderstelt eveneens dat een stopzetting van de Golfstroom een bijkomende stijging zou uitlokken van het niveau van de Noordzee. Maar de voorspelde vertraging volstaat daar niet voor, ten minste niet wanneer er tegelijk een opwarming optreedt op planetaire schaal³. Met de huidige kennis is het niet mogelijk om voor enkele eeuwen te berekenen hoe waarschijnlijk het is dat de thermohaliene circulatie zal stilvallen, maar dit zou sterk kunnen afhangen

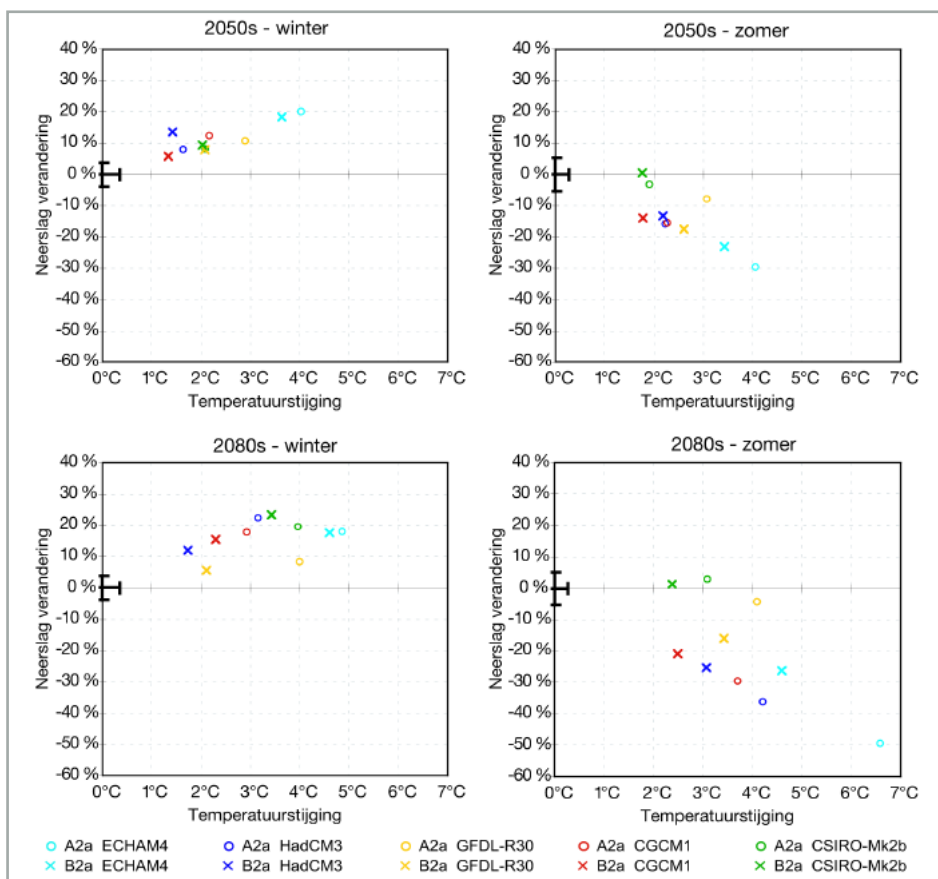
van de mate en het tempo van de evolutie van onze uitstoot van broeikasgassen.

Klimaatprojecties voor België

De verwachte stijging van de gemiddelde wereldtemperatuur is vrij goed bekend, maar dat geldt nog niet in dezelfde mate voor de regionale spreiding van de klimaatverandering en in het bijzonder voor de waterkringloop (regen en bodemvochtigheid). Voor onze streken zijn wel al enkele grote trends vast te stellen.

Temperatuur en neerslag

Aangezien België vrij klein is in vergelijking met de klimaatzones, is het zinvol om eerst even naar Europa te kijken. Figuur 2 vergelijkt de gemiddelde zomertemperaturen aan het eind van de 20ste eeuw met die van een regionaal model^v voor het eind van de 21ste eeuw, voor scenario A2, dat uitgaat van een vrij hoge uitstoot. Om een beeld te krijgen van de verschillende toekomstmogelijkheden voor het eind van de eeuw, zouden we – zoals hierboven uitgelegd – een geheel van alle modellen en scenario's samen moeten onderzoeken. Het gaat hier dus om een voorbeeld, dat in elk geval een van de mogelijke



FIGUUR 3

Gemiddelde resultaten voor een grondgebied dat ongeveer overeenkomt met België van de 5 klimaatmodellen die algemeen in omloop zijn^{vi} en 2 SRES-scenario's (A2 en B2; simulaties gemaakt door de grote wereldcentra op het vlak van modellen en verspreid door het IPCC). Waarden voor de periode 2040-2069 (boven) of 2070-2099 (onder), in vergelijking met de periode 1960-1989. Winter (links) en zomer (rechts). Horizontale as: temperatuurverschillen voor de betrokken periode; verticale as: verschillen in neerslag, als percentage van de waarde voor de referentieperiode. Vetgedrukt half kruisje: standaardafwijking in verband met de natuurlijke schommeling van de ene periode van 30 jaar tot de andere (bij benadering). Bron: UCL, Institut d'Astronomie et de Géophysique G. Lemaître⁴.

^{iv} Samenhangend met geografische verschillen in temperatuur (thermo) en zoutgehalte (haliene), dus in de lichteheid van water.

^v Een model met een hogere ruimtelijke nauwkeurigheidsgraad, specifiek voor de onderzochte regio, altijd gebruikt bij wijze van aanvulling bij de modellen op wereldschaal (met een nauwkeurigheidsgraad van enkele honderden kilometer).

^{vi} Modellen op wereldschaal voor het geheel van het klimaatstelsel (atmosfeer, oceaan...).

situaties voorstelt. Wanneer deze verandering zou plaatsvinden, zou België over minder dan een eeuw gemiddelde temperaturen kennen die vergelijkbaar zijn met die in Spanje aan het eind van de 20ste eeuw! Zonder zelfs zo ver te gaan als deze vrij extreme situatie, stellen we vast dat de gevolgen van de klimaatverandering voor Europa aanzienlijk kunnen zijn.

Om een volledig beeld te krijgen van wat er in België zou kunnen gebeuren, worden in figuur 3 de veranderingen in temperatuur en neerslag weergegeven voor een gebied dat ongeveer even groot is als ons land. Het gaat om de resultaten van modellen op wereldschaal, die de informatie maar verwerken met een nauwkeurigheidsgraad van enkele honderden kilometer. Ondanks deze beperkte nauwkeurigheid is dit soort model toch onontbeerlijk: de atmosfeer en de oceaan zorgen voor een interactie tussen alle streken op aarde, die we dus ook samen moeten bekijken, ook al is achteraf een selectieve regionale verfijning mogelijk. Met 5 modellen en 2 scenario's (A2 en B2) hebben wij hier een overzicht van de klimaatprojecties voor België in de loop van de 21ste eeuw, hoewel een volledige analyse zou moeten gebaseerd zijn op een groter aantal scenario's en simulaties. Deze resultaten wijzen er duidelijk op dat er grote onzekerheden bestaan in de klimaatprojecties op regionale schaal: de modellen leveren resultaten op die vrij sterke onderlinge verschillen vertonen.

Maar toch is het mogelijk enkele trends vast te stellen:

- De temperaturen stijgen, in alle onderzochte gevallen, in een mate die al tegen 2050 vrij aanzienlijk is, zowel voor de zomer als voor de winter. Tussen het einde van de 20ste en het einde van de 21ste eeuw varieert de stijging van de wintertemperatuur tussen 1,7°C en 4,6°C (afhankelijk van het gebruikte model) voor scenario B2 en tussen 2,9°C en 4,9°C voor scenario A2. Voor de zomer varieert de temperatuurstijging tussen 2,4°C en 4,6°C (B2) en tussen 3,1°C en 6,6°C (A2).
- De neerslag stijgt matig in de winter (tussen 6 en 23% aan het einde van de eeuw). In de zomer lijkt de neerslag te dalen, maar de kwantitatieve resultaten verschillen (van een status quo tot een daling met 50%), waarschijnlijk zowel omwille van de huidige beperkingen van de modellen als van de grotere natuurlijke schommelingen in dit seizoen^{vii}.

Overige veranderingen

Gezien de stijging van de gemiddelde wintertemperatuur is het vanzelfsprekend dat het aantal vorstdagen en het aantal dagen dat de sneeuw blijft liggen, zullen dalen. Voor Europa wijzen de modellen erop dat koude winters

zoals die aan het eind van de 20ste eeuw gemiddeld een keer om de tien jaar voorkwamen, in de loop van de eeuw geleidelijk aan zullen verdwijnen. Ook andere veranderingen kunnen zich aandienen: zo zijn er in de loop van de voorbije decennia al kleinere verschillen vastgesteld in de dagtemperatuur (de minimumtemperatuur 's nachts stijgt sterker dan de maximale dagtemperatuur) en het is heel waarschijnlijk dat een van de oorzaken daarvan te zoeken is in de toename van het wolkendek. Volgens sommige modellen zou de bewolking in de winter in de toekomst nog kunnen toenemen.

Extreme verschijnselen

Zouden hittegolven, zoals die van de zomer van 2003 in de toekomst frequenter kunnen voorkomen? Indien de waargenomen temperatuurschommelingen tussen het ene jaar en het andere ongeveer dezelfde blijven als die tijdens de 20ste eeuw, dan zal de stijging van de gemiddelde temperatuur de kans aanzienlijk verhogen op uitzonderlijk warme zomers, met meer ernstige hittegolven. Bovendien hebben onderzoekers recentelijk gesteld dat ook de temperatuurschommelingen tussen de verschillende jaren onderling zouden kunnen toenemen. Aan het einde van de 21ste eeuw zou één zomer op twee ten minste zo warm zijn als de zomer van 2003^{5,6}. Meer precieze gegevens over deze resultaten moeten nog worden bevestigd door andere teams, maar er zijn al eerder gelijkaardige conclusies getrokken^a, vooral voor de scenario's die uitgaan van een sterke uitstoot.

Omdat er nog maar weinig geweten is over de evolutie van de gemiddelde neerslag op regionale schaal, moeten we ook voorzichtig zijn met projecties over periodes met sterke regenval. Het IPCC acht een toename van hevige regenbuien voor veel streken heel waarschijnlijk. Een toename van de gemiddelde neerslag (in de winter) zou waarschijnlijk samengaan met toenemende schommelingen tussen de verschillende jaren^q.

De modellen hebben al enkele aanwijzingen opgeleverd met betrekking tot stormen, maar het blijft moeilijk om een definitieve conclusie te trekken. Verscheidene modellen hebben gewezen op een daling van het aantal depressies met zwakke intensiteit boven de Noord-Atlantische Oceaan en Europa en een toename van sterke depressies, die gepaard gaan met stormwinden^q. Er zijn al verklaringen voorgesteld die een verband leggen met de stijging van de temperatuur, maar daarover bestaat nog geen eensgezindheid. Dankzij het frequentere gebruik van modellen met een hogere nauwkeurigheid, die eventueel beter in staat zijn om depressies voor te stellen, zou het in de toekomst mogelijk moeten zijn meer precieze resultaten te verkrijgen.

^{vii} Een van de modellen, GFDL-R30, vertoont zelfs een tegenstrijdig gedrag: het levert een grotere daling van de neerslag voor scenario B2 overeenstemmend met de zwakste uitstoot (in vergelijking met A2). Dit wordt momenteel onderzocht.