

Hugues Gousse

Centre de recherches sur la terre et le climat Georges Lemaître, Earth and Life Institute

Université catholique de Louvain.

Les incertitudes sur les projections climatiques peuvent être formellement divisées en trois sources. Premièrement, le choix du scénario d'évolution future des forçages influence l'évolution des différentes variables caractérisant le climat. L'exemple le plus simple est le réchauffement à l'échelle globale qui varie, en moyenne pour les modèles climatiques disponibles, de moins de 2°C à la fin du 21^{ème} siècle par rapport aux conditions préindustrielles pour un scénario modéré (RCP2.6) à plus de 4°C pour un scénario plus extrême comme le RCP8.5. La deuxième source d'incertitude est la variabilité naturelle du climat qui se combinera à la réponse aux forçages pour déterminer notre climat futur. On peut dans une certaine mesure la réduire en démarrant les simulations d'un état proche des observations mais la contrainte est en général assez faible et n'a un effet, au mieux, que quelques années, cette variabilité étant dans une très large mesure non prévisible. Troisièmement, les modèles ne sont pas capables de représenter tous les phénomènes importants de manière suffisamment précise. Ils présentent des biais par rapport aux observations et les résultats de modèles différents forcés par les mêmes scénarios de forçage montrent des différences. Cette incertitude est souvent estimée via la gamme couverte par tous les modèles mais cette mesure doit être traitée avec précaution car les différents modèles ont certains points communs et il n'est pas garanti qu'ils incluent toutes les évolutions possibles. L'évaluation de cette incertitude doit donc être combinée avec une compréhension physique des processus impliqués.

La contribution relative de chacune de ces trois sources dépend de la région, de la variable étudiée et de l'horizon de la prévision. Par exemple, pour la température globale, la variabilité interne ne joue un rôle important que pendant quelques années; le scénario est peu important au début mais dominant pour la projection des changements à la fin du 21^{ème} siècle; la contribution des incertitudes de modélisation est significative quel que soit l'horizon de prévision. A l'échelle régionale, la situation est similaire pour la température bien que la variabilité naturelle a une influence durant un temps plus long. Pour les précipitations, les incertitudes sont plus grandes, la contribution liée aux réponses différentes des modèles est souvent dominante et celle liée au scénario assez faible.

Malgré ces incertitudes, de nombreux éléments des projections sont robustes. La température va continuer à augmenter au cours du 21^{ème} siècle. L'augmentation de température en surface sera plus élevée sur les continents que sur les océans, et aux hautes latitudes que dans les régions tropicales. La distribution spatiale des changements de précipitation aura une structure complexe avec une augmentation en moyenne annuelle aux hautes latitudes et une diminution dans beaucoup de régions tropicales et subtropicales, en particulier dans la région méditerranéenne. On s'attend aussi à des changements dans les événements extrêmes avec par exemple des précipitations plus intenses pratiquement partout.

Veranderingen in de cryosfeer en de stijging van het zeeniveau

Philippe Huybrechts
Departement Geografie - Vrije Universiteit Brussel
Pleinlaan 2
B-1050 Brussel
E-mail: phuybrec@vub.ac.be

De cryosfeer, het deel van het aardoppervlak dat ijs bevat, is om evidente redenen een goede graadmeter voor de globale klimaatsverandering, en wordt daarom vaak omschreven als een 'early warning system'. Niettegenstaande dat het grootste deel van de cryosfeer zich in afgelegen streken bevindt, in het bijzonder in de polaire gebieden of op grote hoogte, hebben veranderingen in de cryosfeer wereldwijde effecten. Zo heeft de afname van het Arctische zee-ijs een directe invloed op de hoeveelheid zonne-energie die het aardoppervlak absorbeert. Dat beïnvloedt het temperatuursverschil tussen de polaire gebieden en de gematigde streken, wat op zijn beurt de positie van de jetstream kan veranderen en tot gewijzigde weerpatronen in Europa kan leiden. Een direct gevolg van het versterkt afsmelten van gebergtegletsjers en ijskappen is natuurlijk de stijging van het wereldwijde zeeniveau.

Het vijfde evaluatierapport van het IPCC schetst een consistent beeld van de meest zichtbare gevolgen van de klimaatsverandering op de cryosfeer. Dat uit zich o.a. in de continue achteruitgang van het Arctische zee-ijs, Tussen 1979 en 2012 nam het zomerminimum af met gemiddeld 9.4 tot 13.6% per decade, tesamen met een nog grotere afname van het dikkere meerjarige ijs. Eveneens significant zijn de afname van de seizoenale sneeuwbedekking op de noordelijke continenten sinds het midden van de 20^{ste} eeuw, vooral in de lente en de vroege zomer, de kortere vorstperiode van rivieren en meren, de degradatie van permafrost, en de afname van de diepte en uitbreiding van seizoenaal bevroren grond.

Eveneens een sterke indicator van de opwarming van de aarde is de terugtrekking van bijna alle gletsjers wereldwijd sinds het einde van de 19^{de} eeuw. Deze terugtrekking heeft zich nog versterkt doorgezet sinds de jaren '60 en is een belangrijke bron van zeespiegelstijging. Tussen 1993 en 2009 komt het ijsverlies van gebergtegletsjers buiten Groenland en Antarctica overeen met een stijging van het zeeniveau van 0.76 mm per jaar. Tussen 2005 en 2009 bedroeg deze stijging 0.83 mm per jaar.

Het is nu duidelijk geworden dat de Groenlandse en Antarctische ijskappen beide massa verliezen, en dat de snelheid waarmee dat gebeurt significant toegenomen is tijdens de periode 2002 tot 2011 vergeleken met de periode 1992 tot 2001. Het massaverlies van de Groenlandse ijskap is zowel het gevolg van meer oppervlaktesmelt tijdens de zomer als van een versnelde afvloeï van uitvloeigletsjers in de omliggende oceaan. Tussen 2002 en 2011 kwam dat overeen met een zeespiegelstijging van 0.59 mm per jaar. Voor diezelfde periode bedroeg het ijsverlies van de Antarctische ijskap 0.40 mm per jaar zeespiegelstijging. Deze ijsverliezen situeerden zich hoofdzakelijk op het Antarctische Schiereiland en de Amundsen Zee sector van de West-Antarctische ijskap en zijn hoofdzakelijk het gevolg van de versnelling van uitvloeigletsjers.

Momenteel (1993-2010) stijgt het globale gemiddelde zeeniveau met 3.2 mm per jaar, vergeleken met een gemiddelde stijging van 1.7 mm per jaar tussen 1901 en 2010, oftewel 17 cm per eeuw. De grootste bijdrage in deze stijging is het gevolg van de thermische uitzetting van het warmere zeewater.

Het is zeer waarschijnlijk dat de zeespiegel in de 21^{ste} eeuw sneller zal stijgen dan tot nu het geval was. De waarschijnlijke stijging van de globaal gemiddelde zeespiegel voor de periode 2081-2100 ten opzichte van 1986-2005 zal begrepen zijn tussen 26 en 55 cm voor scenario RCP2.6, en tussen 45 en 82 cm voor scenario RCP8.5. Deze vork werd bekomen met behulp van CMIP5 klimaatsprojecties in combinatie met procesgerelateerde modellen en een inschatting van de gletsjer- en ijskapbijdrage op basis van de beschikbare literatuur. De cijfers zijn een beetje hoger dan deze voor het vierde evaluatierapport van het IPCC omdat er nu rekening wordt gehouden met ijsdynamische processen en omdat er met lichtjes

verschillende referentieperioden wordt gewerkt.

In de RCP projecties is de bijdrage in de zeespiegelstijging van thermische expansie (uitzetting van een warmere oceaan) in de 21^{ste} eeuw begrepen tussen 30 tot 55%, en die van gletsjers tussen 15 en 35%. Op de Groenlandse ijskap zal de toename van afsmelting aan het oppervlak groter zijn dan de toename in sneeuwval, zodat de Groenlandse ijskap een positieve bijdrage zal leveren tot de zeeniveaustijging ten gevolge van veranderingen in de oppervlakte-massabalans. De afsmelting aan het oppervlak van de Antarctische ijskap zal klein blijven maar er wordt wel een toename van de sneeuwval verwacht, wat resulteert in een negatieve bijdrage van de Antarctische ijskap tot zeespiegelwijzigingen ten gevolge van veranderingen van de oppervlakte-massabalans. Veranderingen in de snelheid van uitvloeigletsjers van beide ijskappen zullen een bijdrage tot zeespiegelwijzigingen leveren tussen 3 en 20 cm tegen 2081-2100.

Op basis van de huidige kennis zou alleen een ineenstorten van mariene delen van de West-Antarctische ijskap, indien deze al zouden geïnitieerd worden, een positieve bijdrage tot de zeespiegelstijging in de 21ste eeuw kunnen leveren die boven de waarschijnlijke vork ligt. Er bestaat een gemiddelde graad van betrouwbaarheid dat deze mogelijke bijdrage niet meer zou bedragen dan enkele tientallen cm tegen 2100.

De stijging van de zeespiegel zal niet uniform zijn. Het is zeer waarschijnlijk dat de zeespiegel tegen het einde van de 21^{ste} eeuw zal stijgen over meer dan 95% van de oppervlakte van de oceanen. Ongeveer 70% van de kustlijnen wereldwijd zullen zeespiegelstijgingen kennen die niet meer dan 20% afwijken van het globaal gemiddelde. Voor de Belgische kust wordt verwacht dat de zeespiegelstijging slechts minimaal zal afwijken van het globaal gemiddelde.

Het is zo goed als zeker dat de zeespiegel ook na 2100 nog vele eeuwen zal blijven verder stijgen door thermische expansie en volgehouden massaverlies van de ijskappen. Er is een grote graad van betrouwbaarheid dat een volgehouden opwarming groter dan een bepaalde drempelwaarde zal leiden tot een bijna volledig verdwijnen van de Groenlandse ijskap over een periode van 1000 jaar of langer, wat het zeeniveau met 7 m zou doen stijgen. Deze drempelwaarde is groter dan 1°C (kleine graad van betrouwbaarheid) maar minder dan 4°C (gemiddelde graad van betrouwbaarheid) globale temperatuurstijging ten opzichte van pre-industrieel.

Biografie



Philippe Huybrechts is hoogleraar aan de Vrije Universiteit Brussel, waar hij cursussen doceert in de glaciologie en de klimatologie. Zijn onderzoek situeert zich op het gebied van de numerieke modellering van gletsjers en ijskappen en hun interacties met het klimaatstelsel, met bijzondere aandacht voor de bijdrage van het poolijs tot globale zeespiegelwijzigingen, zowel in het verleden als in de komende 100 tot 1000 jaar. Philippe Huybrechts heeft meegewerkt aan het vijfde evaluatierapport van het IPCC (AR5) voor werkgroep 1 (de natuurwetenschappelijke basis) in de hoedanigheid van review editor voor Chapter 4: Observations: Cryosphere. Tevens was hij nauw betrokken (als contributing author) bij de opmaak van de zeeniveauprojecties in hoofdstuk 13: Sea Level Change, in het bijzonder voor wat betref de inschatting van snelle dynamische processen op de Antarctische en Groenlandse ijskappen, en de

respons van deze ijskappen op de langere termijn. Philippe Huybrechts was tevens Lead Author voor het Third Assessment Report van het IPCC in 2001 voor het hoofdstuk over zeeniveauperanderingen en trad op als contributing author voor het tweede (SAR; 1995) en vierde (AR4; 2007) evaluatierapport van het IPCC.

Meer informatie op: <http://homepages.vub.ac.be/~phuybrec/>

Emissions de CO₂ et objectifs climatiques

Professor Pierre Friedlingstein, University of Exeter, UK

The atmospheric concentration of carbon dioxide (CO₂) has increased to levels unprecedented in at least the last 800,000 years. CO₂ concentrations have increased by 40% since pre-industrial times, reaching 393 ppm in 2011. The milestone concentration of 400ppm will be reached with in the next couples of years. The increase in atmospheric CO₂ concentration is due to anthropogenic CO₂ emissions, primarily fossil fuel emissions and secondarily net land use change emissions.

Annual CO₂ emissions from fossil fuel combustion and cement production were 8.6 ± 0.4 GtC/yr averaged over 2003–2012, with an estimate of 9.9 GtC/yr in 2013, almost 60% above the 1990 level. The current growth rate of fossil fuel emissions is about 2% per year, largely due to the growth in emissions from Asian emerging economies (Emission growth rate is 5.9% per year, for China, 7.7% for India). Per capita emissions for China and EU28 are comparable (1.9 tC/person), 35% above the world average.

Annual net CO₂ emissions from anthropogenic land use change were 0.8 ± 0.5 GtC/yr on average during 2003 to 2012, with small negative trends over the last couple of decades. Confidence in land use changes CO₂ emissions is significantly lower than for emissions from fossil fuel use.

For 2013, total anthropogenic CO₂ emissions (from fossil fuel and land use activities) are estimated to amount 10.7 ± 0.7 GtC/yr, more than 90% arising from fossil fuel sources.

When cumulated over the historical period (defined here as 1870 up to 2013) CO₂ emissions from fossil fuel combustion and cement production have released 380 ± 20 GtC to the atmosphere, while deforestation and other land use change are estimated to have released 160 ± 55 GtC. Altogether, cumulative anthropogenic emissions since 1870 amounts to 540 ± 60 GtC. Emissions prior to 1870 are negligible for fossil fuel activities; early historical land use change activities are poorly quantified. The current best estimate for CO₂ emissions associated to land use changes is about 30GtC prior to 1870.

Of these 540 GtC emitted in the atmosphere since 1870, 220 ± 5 GtC have accumulated in the atmosphere, leading to the observed increase of CO₂ concentration (from about 285ppm to 393 ppm). Ocean and land absorbed respectively 150 ± 20 GtC and 170 ± 65 GtC. The increase in carbon content in the ocean caused ocean acidification.

The increase in atmospheric CO₂ is the dominant driver of the observed increase in the Earth radiative forcing. The estimated current radiative forcing is 2.3 W/m^2 (relative to 1750), of which 1.8 W/m^2 (about 80%) is due to the increase in atmospheric CO₂ concentration, largely contributing to the observed change in the climate system.

Continued emissions of greenhouse gases will cause further warming and changes in all components of the climate system. Limiting climate change will require substantial and sustained reductions of greenhouse gas emissions. Climate change will affect carbon cycle processes in a way that will exacerbate the increase of CO₂ in the atmosphere. The carbon cycle response to future climate and CO₂ changes can be viewed as two strong and opposing feedbacks; a positive concentration–carbon feedback, due to the increase in land and ocean carbon storage in response to elevated CO₂, and a negative climate–carbon feedback due to

the reduction in land and ocean carbon storage in response to climate change. Models agree on the sign, globally negative, of land and ocean response to climate change but show low agreement on the magnitude of this response, especially for the land. It is *virtually certain* that the increased storage of carbon by the ocean will increase acidification in the future, continuing the observed trends of the past decades.

The total amount of anthropogenic CO₂ released in the atmosphere since pre-industrial (often termed cumulative carbon emission, although it applies only to CO₂ emissions) is a good indicator of the atmospheric CO₂ concentration and hence of the global warming response. Cumulative emissions of CO₂ largely determine global mean surface warming by the late 21st century and beyond. The ratio of global mean surface temperature change to total cumulative anthropogenic carbon emissions is called the transient climate response to cumulative carbon emission (TCRE). This quantity is relatively constant and independent of the scenario, but is model dependent, as it is a function of the model cumulative airborne fraction of carbon and the transient climate response. TCRE is likely between 0.8°C to 2.5°C per 1000 PgC, for cumulative carbon emissions less than about 2000 GtC until the time at which temperatures peak.

For the Earth System Models simulations driven by CO₂ concentrations, representation of the land and ocean carbon cycle allows quantification of the fossil fuel emissions compatible with the RCP scenarios. Between 2012 and 2100, these models results imply cumulative compatible fossil fuel emissions of 270 [140 to 410] GtC for RCP2.6, 780 [595 to 1005] GtC for RCP4.5, 1060 [840 to 1250] GtC for RCP6.0 and 1685 [1415 to 1910] GtC for RCP8.5. For RCP2.6, the Earth System Models estimate an average 50% (range 14 to 96%) emission reduction by 2050 relative to 1990 levels. By the end of the 21st century, about half of the models infer emissions slightly above zero, while the other half infer a net removal of CO₂ from the atmosphere.

Based on the assessment of TCRE, limiting the warming caused by anthropogenic CO₂ emissions alone (i.e., ignoring other radiative forcings) to be likely (probability of at least 66%) less than 2°C since the period 1861–1880 requires cumulated anthropogenic CO₂ emissions to be below about 1000 PgC since 1870. Higher emissions in earlier decades therefore imply lower or even negative emissions later on. Accounting for non-CO₂ forcings also contributing to peak warming, reduces these compatible carbon emissions to about 790 GtC. As mentioned earlier, about 540 GtC have been emitted already, leaving about 250 GtC for the future to likely limit global warming below 2°C. That equates to about 25 years at the current level of CO₂ emissions (10GtC/year).

Betekenis van de Regionale Atlas (IPCC-AR5 projecties met RCPs) voor België - Waarnemingen in België

**Piet Termonia
Koninklijk Meteorologisch Instituut (KMI)**

Voor beleidsvorming is het nodig de toekomstige klimaatverandering in te schatten. Tientallen computermodellen, zogenaamde Algemene Circulatiemodellen (Eng. *General Circulation Models, GCMs*), die ontwikkeld worden in diverse onderzoekscentra verspreid over de wereld, werden in het *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)* project gebruikt om de toekomstige klimaatverandering te simuleren.

Geen enkel model is perfect, alle modellen zijn onderhevig aan modelfouten. De performantie van die modellen kan echter ingeschat worden door ze over langere periodes in het verleden te laten draaien en ze te vergelijken met klimatologische waarnemingen. De verschillen tussen de modellen geven een beeld van hun betrouwbaarheid. Een goed beleid vereist dat we rekening houden met die onzekerheden. Daarvoor combineren we de output van de CMIP5 modellen tot ensembles van klimaatsimulaties waarbij de spreiding tussen de ensembleleden een schatting geven van de betrouwbaarheid van de klimaatprojectie.

In het vierde Assessment rapport waren de projecties gebaseerd op emissiescenario's van broeikasgassen, zoals vastgelegd in het *Special Report on Emission Scenario's (SRES)* rapport van het IPCC. Deze emissiescenario's volgen een socio-economische logica, maar aangezien emissies verschillende effecten kunnen hebben in verschillende modellen, zijn ze minder geschikt om de simulaties klimatologisch met elkaar te vergelijken. Daarom wordt de modeloutput in het vijfde assessment rapport (AR5) gepresenteerd in de vorm van Representatieve Concentratie Paden (*Representative Concentration Paths; RCPs*) waarbij de modelsimulaties gegroepeerd worden op basis van hun "opwarmend" vermogen; in vaktermen spreken we *over radiatieve forcing (RF)*, uitgedrukt in watt per vierkante meter (W/m^2), meer bepaald het AR5 beschouwt vier RCPs: het $2.6 W/m^2$, het $4.5 W/m^2$, het $6.0 W/m^2$ en het $8.5 W/m^2$ RCP.

In deze presentatie bespreken we de regionale klimaatatlas van het vijfde assessment rapport. Deze atlas geeft de CMIP5 klimaatprojecties voor 18 regio's in de wereld, met de verwachte klimaatveranderingen en een weergave van hun betrouwbaarheid. We besteden aandacht aan de klimaatverandering voor Noord en Centraal Europa, met speciale aandacht voor België. De informatie in het AR5 kan verder vertaald worden naar het Belgische niveau met behulp van regionale klimaatmodellen. We geven een overzicht van de Belgische activiteiten in de regionale klimaatmodellering en illustreren dit aan de hand van een aantal voorbeelden. Het KMI is als Federale Wetenschappelijke Instelling de internationale referentie voor klimatologische waarnemingen en beschikt over een uitgebreide databank van klimatologische informatie. Een paar voorbeelden zullen getoond worden. Deze presentatie is niet bedoeld exhaustief te zijn, maar heeft tot doel om de dialoog tussen de stakeholders en de onderzoekers optimaal te stimuleren.

Piet Termonia is Hoofd van het Departement meteorologisch en klimatologisch onderzoek van het Koninklijk Meteorologisch Instituut (KMI) en leidt momenteel het internationale ALADIN modelleringsconsortium. Hij is verbonden aan de vakgroep Fysica en Sterrenkunde van de universiteit van Gent, als gastprofessor.