De dertigste verjaardag van het Montreal Protocol: een waar succesverhaal!

Martine De Mazière en
François Hendrick

Het was op 16 september 1987, nu exact dertig jaar geleden, dat de initiële versie van het 'Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer' of kort gezegd 'Montreal Protocol' onderschreven werd. Het trad in werking op 1 januari 1989. In deze bijdrage willen we toelichten wat de achtergrond is van het Montreal Protocol, wat zijn krachtlijnen zijn, welke gevolgen het gehad heeft tot op de dag van vandaag en wat de toekomstperspectieven zijn. U zal zien dat het om een waar succesverhaal gaat in de internationale milieupolitiek!

Achtergrond van het Montreal Protocol

De aardse atmosfeer bevat ozon, een molecule die bestaat uit 3 zuurstofatomen (chemische notatie O_3) en ontstaat wanneer hoog-energetische straling (bijv. ultraviolet licht met een golflengte kleiner dan 242 nm) invalt op moleculair zuurstof (O_2), daarbij zuurstofatomen (O) vrijzet die dan recombineren met de beschikbare O_2 en aldus ozon vormen. Je kan ozon ruiken in de nabijheid van een sterke UV-lamp of bij een fel onweer met hevige bliksems; de naam ozon komt trouwens van het Griekse woord 'ozein' wat 'ruiken' betekent.

Ozon is alomtegenwoordig in de aardse atmosfeer maar bevindt zich voor ongeveer 90% in de stratosfeer, in de zogeheten 'ozonlaag' tussen 25 en 40 km boven het aardoppervlak. Stratosferisch ozon beschermt ons en de biosfeer tegen de sterke UV-straling van de zon; de ozonlaag is dus onmisbaar voor het leven op aarde. Deze ozon is niet te verwarren met de ozon die dichtbij het aardoppervlak voorkomt, in de lucht die we inademen. Gelukkig komt ozon hier in veel mindere mate voor (~10% van alle ozon in de atmosfeer), want dit zogenaamd troposferisch ozon is voor ons en de levende wezens een toxisch gas.

Baron Marcel Nicolet

M.J. Molina (CC http://science.in2pic.com-SA 3.0)

F.S. Rowland (CC Markus Pössel (Mapos)-SA 3.0)

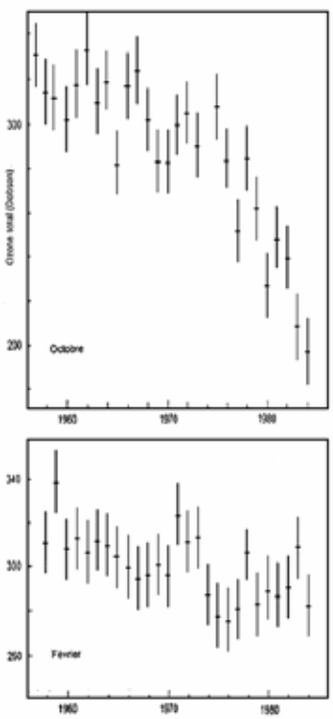
Vooral sedert 1930 is er uitgebreid onderzoek gedaan naar atmosferisch ozon, o.a. door Baron Marcel Nicolet, een van de pioniers van het ozononderzoek en de eerste directeur van het Koninklijk Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie (BIRA). Sedertdien is ozon een van de belangrijkste onderzoeksthema's van het BIRA gebleven.

Stratosferisch ozon is dus onmisbaar voor het leven op aarde en als deze ozonlaag verdunt of verdwijnt is er een goede reden om ons zorgen te maken. Dat is wat gebeurde in de voorbije eeuw, vanaf de jaren zeventig. De mensheid startte de ontwikkeling en productie van chloor-fluor-koolstofverbindingen (CFK's, ook soms freonen genoemd) voor toepassingen in afkoelingstechnieken en gebruik in schuimrubbers, of als drijfgas in spuitbussen. Deze gassen komen deels in de atmosfeer terecht en stapelen er zich op, omdat ze heel inert zijn op lage hoogte: ze hebben levensduren van de orde van tientallen tot meer dan honderd jaren. Pas als ze diffuseren naar grotere hoogten, tot in de stratosfeer, worden ze afgebroken onder invloed van energetische zonnestraling. Daarbij komen halogenen vrij: voornamelijk chloor, broom en fluor. Chloor en broom zijn daarbij bijzonder reactief en reageren onder meer met ozon, die omgezet wordt in moleculaire zuurstof. Deze reactie kan zich bovendien meerdere keren herhalen (we spreken van een katalytische reactie) omdat het chloor- of broomatoom blijft bestaan en een nieuwe ozonmolecule kan aanvallen. Dit heeft tot gevolg dat de hoeveelheid stratosferisch ozon in de atmosfeer vermindert. Halogenen zijn van nature in de atmosfeer aanwezig maar in mindere mate. Bijvoorbeeld, in 1990 was minder dan 20% van de bronnen van chloor in de stratosfeer nog van natuurlijke oorsprong.

De eersten die dit gevaar opmerkten waren F. S. Rowland en M. J. Molina, in 1974[(1)]. Maar het gevaar werd pas au sérieux genomen toen in 1985 een dramatische afname van stratosferisch ozon werd vastgesteld boven Halley Bay in Antarctica, tijdens de plaatselijke lente (Farman et al, 1985). Deze vaststelling gebeurde uitgaande van een continue tijdreeks van ozonwaarnemingen sedert 1956. Figuur 1 toont een aangepaste versie van de originele figuur uit het voornoemde artikel. De wetenschappelijke gemeenschap sloeg meteen alarm! Ten eerste was zulk dramatisch fenomeen - een afname van ozon met een derde in een tijdspanne van minder dan 10 jaar tijd - niet als dusdanig voorspeld door de toen bestaande theorieën en dus moest bijkomend onderzoek

gebeuren. En ten tweede realiseerden de wetenschappers zich dat er dringend maatregelen nodig waren om verdere degradatie tegen te gaan. Twee jaar later was het Montreal Protocol geboren!

Jonathan Shanklin aan het werk met een Dobson spectrometer op Halley Bay in 1982. (bron: J. Shanklin)



Figuur 1: Tijdreeks van totale ozonkolommen boven Halley Bay, Antarctica, in oktober (boven) en februari (onder) voor de periode 1956 tot 1984, uitgedrukt in Dobson Units (DU). 1 DU stemt overeen met 2,69 10^{16} molec/cm^2. Figuur aangepast uit Farman et al., 1985.

Krachtlijnen van het Montreal Protocol

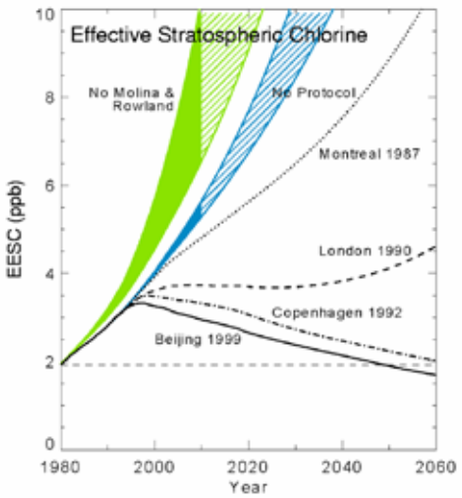
Voorafgaand aan het Montreal Protocol werd op 22 maart 1985 de 'Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer' aangenomen: het betrof een raamovereenkomst ter bescherming van de ozonlaag op wereldschaal, die van kracht werd op 22 september 1988. België was van bij het begin medeondertekenaar van beide akkoorden en ratificeerde de Conventie van Wenen op 17 oktober 1988 en het Protocol van Montreal op 30 december 1988. Op 16 september 2009 werden de Conventie en het Protocol de eerste verdragen in de geschiedenis van de Verenigde Naties die universeel geratificeerd werden, met 197 onderschrijvende partijen.

Het Montreal Protocol heeft als doel de productie en consumptie van ozonafbrekende stoffen (zoals de CFK's) te reduceren en/of stop te zetten. Een van de sterktes van het Protocol was dat het de deur openzette naar Aanpassingen en Wijzigingen (Amendementen), die toegelaten hebben om de getroffen maatregelen te verstrengen naarmate de tijd vorderde en de wetenschappelijke waarnemingen en kennis de noodzaak aantoonden tot een strenger optreden; ook werden bijkomende chemische stoffen toegevoegd aan de lijst van de te verbannen producten. Het is opvallend dat de 4-jarige WMO[(2)] Scientific Assessments of Ozone Depletion bijna systematisch gevolgd werden door een bijkomende wijziging van het Montreal Protocol: een mooie interactie tussen wetenschap en politiek! Zo werd het Londen-amendement van kracht in 1992, het Kopenhagen-amendement in 1994, het Montreal-amendement in 1999 en het Beijing-amendement in 2002. Het heel recente Kigali-amendement zou op 1 januari 2019 van kracht moeten gaan. Het voert beperkingen in op HFK's (fluorkoolwaterstoffen of koolwaterstoffen waarbij enkele waterstofatomen vervangen zijn door een fluoratoom).

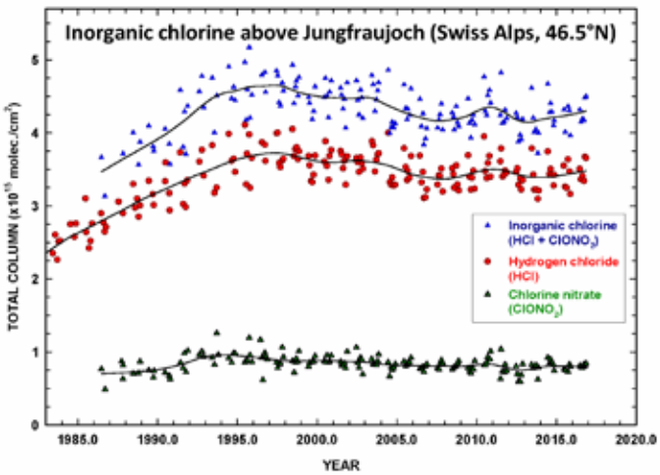
Succes van het Montreal Protocol

Het verwachte effect van het Montreal Protocol en zijn Aanpassingen en Wijzigingen is geïllustreerd in figuur 2. De verticale as (EESC of *Equivalent Effective Stratospheric Chlorine*) geeft een maat voor de hoeveelheid effectief ozonafbrekende halogenen (chloor en broom) in de stratosfeer. Het is duidelijk dat het oorspronkelijke Protocol geen voldoende afname van de ozon-boosdoeners zou teweeggebracht hebben, maar dat de opeenvolgende aanpassingen ervoor gezorgd hebben dat men kan verwachten dat het niveau van ozonafbrekende stoffen terug zal gedaald zijn tot het niveau van 1980 (wat algemeen wordt aanvaard als het achtergrondniveau) tussen 2030 en 2050. De bestaande langetermijnwaarnemingen bevestigen de Beijing-curve van figuur 2: het maximumniveau van de ozonafbrekende stoffen in de stratosfeer werd bereikt rond 1997, en sedertdien is een duidelijke afname zichtbaar. Figuren 3 en 4 tonen de resultaten van langetermijnwaarnemingen door Belgische teams, respectievelijk van de totale hoeveelheid anorganisch chloor in de atmosfeer boven Jungfraujoch in de Zwitserse Alpen, en van de totale hoeveelheid broomoxide in de stratosfeer boven Harestua in Noorwegen. De hoeveelheid anorganisch chloor is representatief voor de chloorhoudende gassen in de stratosfeer: de maximumconcentratie werd bereikt in 1997, en sedertdien zien we een min of meer gestage afname. De beperkingen op broomhoudende gassen werden ongeveer 3 jaar later ingevoerd in het Montreal Protocol en we zien dan ook dat de hoeveelheid broom in de stratosfeer is blijven stijgen tot 2001 en pas daarna is beginnen dalen.

Algemeen kan men stellen dat EESC gedaald is met 16.2 ± 0.4% en 8.9 ± 1.2%, op middelbare breedtegraad en aan de polen, respectievelijk, tussen het moment waarop het maximum werd bereikt tot 2012.



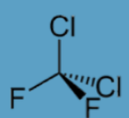
Figuur 2: Evolutie van EESC in ppb tussen 1980 en 2060 volgens de opeenvolgende aanpassingen aan het Montreal Protocol, en in de veronderstelling dat de productie van CFK's zou verdergezet zijn volgens het ritme van 1974 ('No Rowland en Molina') of volgens dat van 1987 ('No Montreal Protocol'). (bron: G. Velders, RIVM)



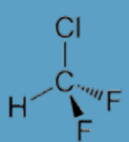
Figuur 3: Chloorreservoirs in de stratosfeer. Tijdreeksen van de maandelijkse gemiddelde hoeveelheden van de belangrijkste chloorreservoirs in de stratosfeer over meerdere decennia: waterstofchloride (HCl: rode cirkels) en chloornitraat ($ClONO_2$: groene driehoekjes) afgeleid uit infraroodwaarnemingen gerealiseerd vanuit het wetenschappelijk station in Jungfraujoch. De tijdreeksen zijn hier beperkt tot de maanden juni tot november, die gekenmerkt worden door kleinere atmosferische variaties. De twee reservoirmoleculen samen (blauwe driehoekjes) geven een goede indicatie van de evolutie van de totale hoeveelheid anorganisch chloor op gemiddelde breedtegraden in de noordelijke hemisfeer gedurende de laatste 30 jaar. (bron: GIRPAS – Université de Liège, 2017)

Een beetje chemie

CFK (chloor-fluor-koolstofverbinding): dit zijn koolwaterstoffen, moleculen bestaande uit koolstof- (C) en waterstof- (H) atomen waarvan de waterstofatomen zijn vervangen door chloor- (Cl) en/of fluor- (F) atomen.
Voorbeelden van een koolwaterstofverbinding: methaan, ethaan, … Voorbeeld van een CFK: CFK-12 of freon-12 of CCl_2F_2

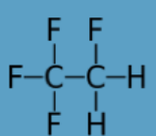


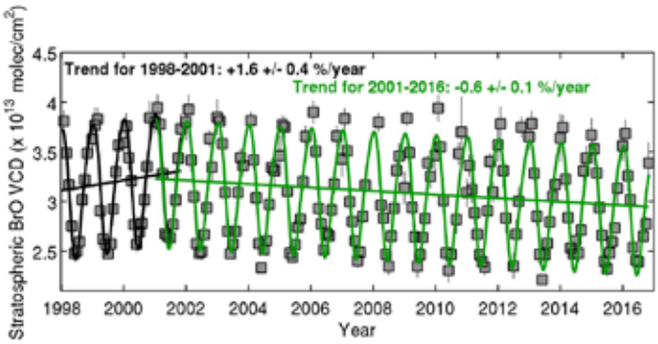
HCFK (chloor-fluor-koolwaterstofverbinding): dit zijn zijn koolwaterstoffen, moleculen bestaande uit koolstof- (C) en waterstof- (H) atomen waarvan sommige waterstofatomen zijn vervangen door chloor- (Cl) en/of fluor- (F) atomen, maar dat nog steeds 1 of meerdere waterstofatomen bevat.
Voorbeeld van een HCFK: HCFK-22 of $CHClF_2$



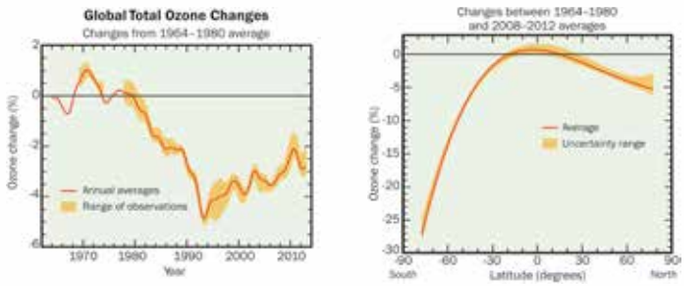
HBFK (broom-fluor-koolwaterstof-verbinding): dit zijn koolwaterstoffen waarvan sommige waterstofatomen vervangen zijn door broom- en/of fluoratomen.
Voorbeeld van een HBFK: CHF_2Br (zelfde structuur als $CHClF_2$ hierboven, waarbij het chloor-atoom door een broom-atoom vervangen is).

HFK (fluor-koolwaterstof-verbinding): dit zijn HCFK die geen chloor noch broom meer bevatten, enkel koolstof, fluor en waterstof.
Voorbeeld van een HFK: HFK-134a of $C_2H_2F_4$





Figuur 4: Tijdserie van stratosferisch broomoxide (BrO) gemeten door BIRA boven Harestua, Noorwegen sinds 1998. De serie toont een stijgende trend tussen 1998 en 2001 met 1.6% ± 0.4% per jaar, en daarna een dalende trend met -0.6% ± 0.1% per jaar. (bron: F. Hendrick en M. Van Roozendael, 2017)



Figuur 5: Veranderingen van de gemiddelde totale ozonkolom als functie van de breedtegraad tussen de periode 1964-1980 en 2008-2012 op basis van observaties. De rode lijn is het gemiddelde, de oranje zone toont de onzekerheidsmarge. De grootste veranderingen zijn opgetreden in de polaire gebieden, en in het bijzonder boven de Zuidpool ten gevolge van het Antarctisch ozongat. (bron: Heggelin et al., 2015)

Zien we dan ook dat ozon zich terug herstelt?

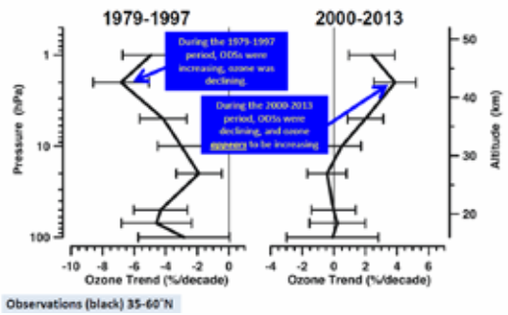
Om het herstel van ozon te kunnen waarnemen, hebben we lange tijdreeksen nodig met voldoende nauwkeurigheid (van de orde van 1%) die toelaten om de seculaire langetermijntendens van ozon (van de orde van enkele percenten – zie figuur 5) te onderscheiden van zijn natuurlijke variaties, van dag tot dag, met de seizoenen en van jaar tot jaar, of ten gevolge van bijzondere fenomenen zoals de uitbarsting van de Mt. Pinatubo-vulkaan in 1991 die een tijdelijke bijkomende afname in ozon heeft veroorzaakt. Deze natuurlijke variaties zijn van een grootteorde van 1 of meerdere 10-tallen %, afhankelijk van de locatie op aarde. Zulke langetermijnwaarnemingen zijn een belangrijke drijfveer voor het Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC, zie www.ndsc.ncep.noaa.gov) waartoe België een belangrijke bijdrage levert sedert de start van het netwerk (1991) en waarbij BIRA bovendien de rol van co-chair waarneemt sedert 2013 (De Mazière et al., 2017).

Ook de samenvoeging van de opeenvolgende tijdreeksen van satellietwaarnemingen van ozon zoals die bewerkt worden in het kader van het ESA Climate Change Initiative project voor ozon (www.esa-ozone-cci.org) dat door het BIRA geleid wordt, is een belangrijke bron van informatie over de ozontendens sedert 1979.

Figuur 5 toont de verandering in de gemiddelde totale hoeveelheid ozon tussen de referentieperiode 1964-1980 (toen er nog geen beduidende ozonafname was) en de periode 2008-2012, op verschillende breedtegraden. Daaruit zien we dat bijvoorbeeld op onze breedtegraad (52°N) de afname van ozon 3 à 4 % bedroeg.

Het observatorium van Harestua, Noorwegen. (Foto G. Pinardi)

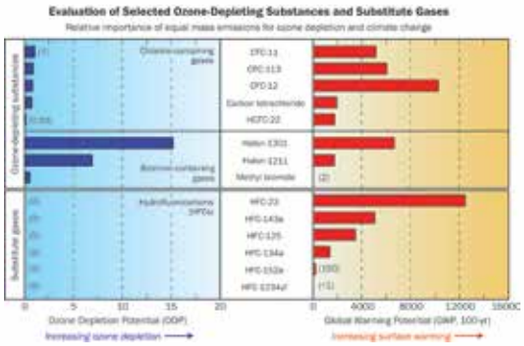
De meest recente studies (Bhartia et al., 2016 en recente updates) hebben aangetoond dat men op middelbare breedtegraad (tussen 30 en 60°) het beginnend herstel van ozon waarneemt in de hogere stratosfeer (tussen 35 en 45 km hoogte) – zie figuur 6. Het herstel van het ozongat in Antarctica wordt later verwacht maar volgens het onlangs verschenen artikel van S. Solomon (2016) zijn de eerste tekenen van herstel nu ook daar zichtbaar.



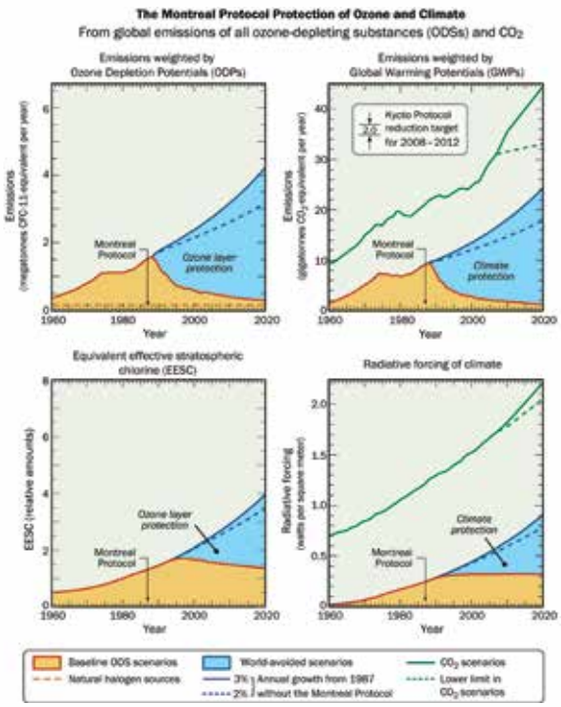
Figuur 6: Trends (in percent per 10 jaren) in de verticale verdeling van ozon tussen 15 en 50 km hoogte (of 100 en 0,5 hPa), vanaf 1979 tot 1997 (links) en tussen 2000 en 2013 (rechts). ODS staat voor ozonafbrekende stoffen (in het Engels: Ozone Depleting Substances). In de periode 1979-1997 neemt ozon op alle hoogten af. In de recentere periode 2000-2013 zien we boven 35 km een positieve trend, m.a.w. een stijgende ozonconcentratie, van enkele percenten per decennium. De modellen vertellen ons dat deze trend te wijten is, niet enkel aan de afname van ODS maar ook aan de klimaatveranderingen (stijging van de broeikasgassen die een afkoeling in de stratosfeer veroorzaken). (bron: J. Pyle, Cambridge University, UK, 2017).

Het Montreal protocol en het klimaat

Zoals eerder gezegd hebben de opeenvolgende aanpassingen van het Montreal Protocol stelselmatig nieuwe producten toegevoegd aan de lijst van de te verbannen producten. Dit heeft vooral te maken met het feit dat er in eerste instantie gekeken werd naar het schadelijk effect van de gassen op ozon, waarvoor als maat de zogenaamde Ozone Depleting Potential (ODP)[3] wordt genomen, maar in tweede instantie ook naar de impact van deze gassen op het klimaat, waarvoor klassiek als maat de *Global Warming Potential (GWP)*[4] wordt genomen. Het is namelijk zo dat de CFK's ook bijdragen aan de opwarming van het klimaat, en dat de vervangproducten die na de inwerkingtreding van het Protocol van Montreal werden ingevoerd - voornamelijk van het type HCFK (zie kader 'Een beetje chemie') - wel minder schadelijk waren voor stratosferisch ozon, maar niet minder voor de klimaatopwarming! Figuur 7 toont voor een aantal belangrijke CFK's enerzijds de ODP en anderzijds de GWP. De uitdaging is dus om vervangproducten te vinden voor de CFK's en de HCFK's die niet enkel een onbeduidende ODP, maar ook een minimale GWP hebben. Het is ook in die zin dat de laatste wijziging aan het Montreal Protocol, namelijk het Kigali-amendement, moet begrepen worden: in dat amendement wil men de HFK's (de meest recent ingevoerde vervangproducten met een verwaarloosbare ODP maar een beduidende GWP) verbannen, om hun nadelige impact op de klimaatopwarming tegen te gaan zonder daarbij het herstel van de ozonlaag in het gedrang te brengen.



Figuur 7: Impact van een aantal CFK en HCFK en HFK op ozon uitgedrukt in termen van de ODP (links), en op het klimaat, uitgedrukt in termen van de GWP (rechts). Hoe groter zijn ODP, hoe schadelijker het gas is voor ozon; hoe groter zijn GWP, hoe meer het gas bijdraagt aan de opwarming van het klimaat. (bron: Heggelin et al., 2015)



Figuur 8: Het belang van het Montreal Protocol voor het klimaat. De emissies van ozonafbrekende gassen worden gewogen volgens hun GWP of CO_2-equivalente massa. De blauwe oppervlakte duidt het regime aan dat vermeden is dankzij het Protocol van Montreal waarbij zonder Montreal Protocol een groei van de emissies met 3% per jaar (volle blauwe lijn) of met 2% per jaar (blauwe stippellijn) wordt aangenomen. De oranje oppervlakte duidt het huidige scenario aan met implementatie van het Protocol van Montreal. Ter vergelijking: de volle (gestippelde) groene lijn stelt een (minimaal) CO_2-emissiescenario voor, en ook de beoogde emissiereductie tijdens de initiële periode van het Kyoto Protocol wordt aangegeven. (bron: Heggelin et al., 2015)

Het is duidelijk dat, hoewel de prioritaire bedoeling van het Montreal Protocol de bescherming van de stratosferische ozonlaag was, het Protocol tegelijkertijd een uiterst positieve rol heeft gespeeld in het bestrijden van de klimaatopwarming. Figuur 8 toont het effect van het Montreal Protocol en zijn Amendementen op de emissies van alle ozonafbrekende stoffen, uitgedrukt in gigaton CO_2-equivalenten per jaar, als functie

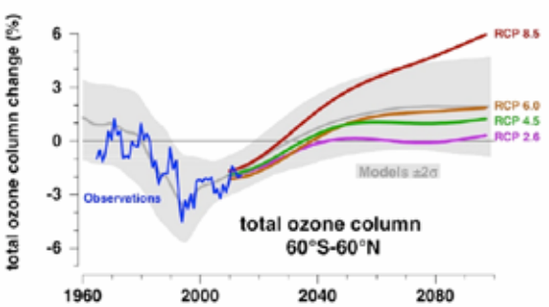
van de tijd vanaf 1960 tot het eind van dit decennium. Tegen 2020 zal de reductie van de emissies overeenstemmen met een reductie van bijna 24 (volle blauwe lijn) of 18 gigaton (blauwe stippellijn), een cijfer dat moet vergeleken worden met de verwachte emissies van CO_2 in 2020 ten belope van 44 gigaton per jaar of 33 gigaton per jaar in het meest optimistische scenario. Het cijfer van 24 gigaton komt overeen met ongeveer 50% en kan vergeleken worden met de doelstelling van het Kyoto Protocol m.b.t. de opwarming van de aarde, die slechts een vermindering met 2 gigaton (of ongeveer 5%) CO_2-equivalenten per jaar bedraagt over de periode 2008-2012. In het recente klimaatakkoord van Parijs is de doelstelling van de Europese Unie om tegen 2030 de emissies van broeikasgassen te reduceren met 40% t.o.v. 1990.

Waarom is het gelukt om het Montreal Protocol zo efficiënt te implementeren?

In vergelijking met de huidige moeilijkheden om in de internationale gemeenschap tot een klimaatakkoord te komen en effectief de uitstoot van de zogenaamde broeikasgassen te verminderen, is de invoering van het Montreal Protocol en zijn Amendementen veel vlotter gegaan. De redenen daarvoor zijn: (1) de beperkte economische impact van de vervanging van CFK's en (2) alternatieven voor CFK's waren al deels ontwikkeld door de industrie, vanuit het oogpunt van concurrentie en het zoeken naar nieuwe toepassingen. Daartegenover staat dat de bestrijding van de klimaatopwarming maatregelen vergt die veel drastischer ons sociaal-economisch systeem beïnvloeden.

Perspectieven

Figuur 9 toont de waargenomen en verwachte evolutie van de gemiddelde totale ozonkolom, met uitsluiting van de polaire gebieden: de modellen voorspellen dat ozon zal teruggekeerd zijn naar het niveau van 1980 ergens tussen 2030 en 2050. Die grote onzekerheid heeft te maken met de belangrijke koppeling die bestaat tussen de evolutie van stratosferisch ozon en die van het klimaat, en de onzekerheid op de toekomstige evolutie van het klimaat, die vertaald wordt in verschillende toekomstscenario's RCP 2.6, 4.5, 6.0 en 8.5.[5] De klimaatveranderingen maken dat ozon zich sneller herstelt dan zou verwacht worden enkel op basis van de afname van EESC: het EESC-niveau zal pas gedaald zijn tot het niveau van 1980 tegen het einde van deze eeuw.



Figuur 9: Waargenomen en verwachte evolutie van de gemiddelde ozonkolom buiten de polaire gebieden. De blauwe curve stelt de observaties voor, de gekleurde curves stellen modelberekeningen voor waarin verschillende klimaatscenarios (RCP) worden aangenomen. De grijze zone stelt de onzekerheidsmarge voor. (bron: J. Pyle, Cambridge University, UK, 2017)

Noten

[1] F.S. Rowland, M.J. Molina en P. J. Crutzen ontvingen in 1995 de Nobelprijs voor scheikunde voor hun baanbrekend werk in atmosfeerchemie en de studie van het ozongat.

[2] WMO: World Meteorological Organisation; Scientific Assessments of Ozone Depletion zijn beschikbaar op https://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/

[3] De ODP wordt weergegeven relatief t.o.v. de ODP van CFK-11 - dat dus een ODP gelijk aan 1 heeft. De ODP is een maat per massa eenheid van het gas.

[4] De GWP wordt weergegeven relatief t.o.v. van die van CO_2 - dat dus een GWP gelijk aan 1 heeft. De GWP is een maat per massa eenheid van het gas.

[5] RCP (Representative Concentration Pathway) 2.6, 4.5, 6.0 en 8.5 zijn vier scenario's betreffende de toekomstige evolutie van de concentratie van broeikasgassen in de loop van de 21ste eeuw, opgesteld door het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in hun 5de Assessment Report.

Referenties

- Bhartia, P.K., N. Harris, M. Van Roozendael, M. Weber, R. Eckman, D. Loyola, J. Urban, C. von Savigny, M. Dameris, S. Godin-Beekmann (Editors), Changes in the vertical distribution of ozone – the SI2N report, Special issue jointly organized between Atmospheric Chemistry and Physics, Atmospheric Measurement Techniques, and Earth System Science Data.
- De Mazière, M., Thompson, A. M., Kurylo, M. J., Wild, J., Bernhard, G., Blumenstock, T., Hannigan, J., Lambert, J.-C., Leblanc, T., McGee, T. J., Nedoluha, G., Petropavlovskikh, I., Seckmeyer, G., Simon, P. C., Steinbrecht, W., Strahan, S., and Sullivan, J. T.: The Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC): History, status and perspectives, Atmos. Chem. Phys. Discuss., https://doi.org/10.5194/acp-2017-402, in review, 2017.
- Farman, J.C., B. G. Gardiner and J. D. Shanklin, Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interactions, Nature, Vol. 315, 16 May 1985.
- Heggelin, M., D.W. Fahey, M. McFarland, S.A. Montzka, E.R. Nash, Twenty questions and answers about the ozone layer: 2014 update. Scientific Assessment of Ozone Depletion 2014, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2015.
- Solomon, S., Diane J. Ivy, Doug Kinnison, Michael J. Mills, Ryan R. Neely III, Anja Schmidt, Emergence of healing in the Antarctic ozone layer, Science 10.1126/science.aae0061 (2016).
- Scientific Assessment of Ozone Depletion 2014, World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 55, 2014

De auteurs

Martine De Mazière is Algemeen Directeur a.i. van het Koninklijk Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie en leidt er de onderzoeksgroep voor infrarood observaties en labo-experimenten.

François Hendrick is werkleider in de 'UVVIS DOAS Research' groep van het Koninklijk Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie.