

Geen betrouwbaar beeld van onze **atmosfeer** zonder waarnemingen vanaf de grond!

Vandaag worden we geconfronteerd met een atmosfeer die verandert: de concentraties van de zogenaamde broeikasgassen in de atmosfeer stijgen, er is het probleem van de afname van stratosferisch ozon en het jaarlijks terugkerend ozongat boven Antarctica, en onze lucht is niet elke dag even gezond...

Maar hoe kunnen we deze veranderingen detecteren en opvolgen, om, indien nodig, maatregelen te treffen om ze tegen te gaan?

Observeren!

Satellieten slagen erin mooie wereldkaarten te leveren van de concentraties van een aantal gassen die aanwezig zijn in onze atmosfeer. Maar hoe betrouwbaar zijn die? En hoe kan je de kaarten die je krijgt van een satelliet die vijf jaar overleeft in de ruimte vergelijken met die van een daaropvolgende satelliet die misschien heel andere kenmerken heeft, om de langetermijnevolutie op te volgen? En bovendien, heeft die eerste satelliet gedurende die vijf jaar niet veel van zijn betrouwbaarheid verloren als zijn optica en elektronica continu aan hoogenergetische straling zijn blootgesteld?

Om op die vragen een antwoord te kunnen geven, hebben we een referentie nodig, waarvan we de stabiliteit en de kwa-

liteit kunnen controleren op lange termijn. Waarnemingen vanaf de grond, met geavanceerde instrumenten die continu geverifieerd kunnen worden wat betreft hun kwaliteit en stabiliteit, leveren hierop een antwoord. In de nationale projecten AGACC-I en -II, die sedert 2006 gefinancierd werden door het Belgisch Federaal Wetenschapsbeleid in het kader van het programma Wetenschap voor een Duurzame Ontwikkeling, hebben vier Belgische onderzoeksinstituten dit soort grondwaarnemingen verbeterd en uitgebreid. Deze instellingen zijn het Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie (BIRA), coördinator van de projecten; het Koninklijk Meteorologisch Instituut; de 'Groupe Infra-Rouge de Physique Atmosphérique et Solaire (GIRPAS)' van het Instituut voor Astrofysica en Geofysica van de Universit  de Liège; en het team van de 'Service de Chimie Quantique et Photophysique' van de Universit  Libre de Bruxelles. De eerste drie teams dragen met hun grondwaarnemingen allen bij tot het globale 'Network for the Detection of Atmospheric Composition Changes (NDACC - www.ndacc.org)', met waarnemingen van de atmosferische samenstelling in Harestua (Noorwegen), Ukkel (België), Jungfrauoch (Zwitserse Alpen), Observatoire de Haute Provence (Frankrijk) en Ile de La Réunion (Indische Oceaan). Sinds 2008 – ter gelegenheid van de Olympische Spelen in Beijing, waarbij



Figuur 1: Het waarnemingsstation van La Réunion.



Figuur 2: Brewer-spectrometer op het dak van het KMI in Ukkel.



Figuur 3: Zonfotometer op het dak van het BIRA in Ukkel.

de luchtkwaliteit nauw opgevolgd moest worden – meten ze ook in Xianghe (China) en sedert november 2013 ook in Bujumbura (Burundi). Deze metingen gebeuren allemaal met behulp van optische spectrometrische methodes. De vierde partner levert de laboratoriumgegevens aan betreffende de spectroscopische karakteristieken van de gassen in de atmosfeer die aan de basis liggen van de analyse van de observaties.

Waarnemingsmethodes

In de AGACC-projecten komen essentieel vier observatietechnieken aan bod: de ozon-, UV- en aerosolwaarnemingen met behulp van Brewer-spectrometers (figuur 2); zonfotometerwaarnemingen (figuur 3) van aerosolparameters zoals hun totale optische dichtheid; waarnemingen van directe zonsabsorptiespectra in het infrarood (tussen 1.25 en 16 micrometer) met hoge spectrale resolutie, hierna aangeduid als FTIR-spectra; en de zogenaamde MAX-DOAS-techniek waarbij het UV en zichtbare deel van het spectrum (300-600 nm) van het verstrooid zonlicht, opgevangen in het zenit of onder verschillende kijkrichtingen boven de horizon, wordt geanalyseerd. Beide laatste technieken laten toe de concentraties van een groot aantal gassen in de atmosfeer te bepalen, en informatie in te winnen over de verdeling van deze gassen in de hoogte. Figuur 4 laat een typisch FTIR-absorptiespectrum zien, waargenomen op Jungfraujoch. De vele absorptielijnen die in deze spectra zichtbaar zijn (de afnames in het spectrum) leveren informatie over de concentratie van een groot aantal gassen in de atmosfeer. Een MAX-DOAS-spectrum ziet er vrij gelijkwaardig uit, maar dan in een ander golflengtegebied.

Voor de toepassing van deze optische spectroscopie-technieken voor de identificatie en kwantificering van stoffen in de atmosfeer, is het natuurlijk noodzakelijk de spectroscopische eigenschappen van deze gassen te kennen, bijvoorbeeld bij welke golflengtes en met welke intensiteit absorberen ze elektromagnetische zonnestraling. Met andere woorden, men moet een zeer gedetailleerde kennis van het absorptiespectrum van de moleculen in de atmosfeer hebben. Deze cruciale informatie wordt in het laboratorium verworven door het bestuderen van de stoffen onder gecontroleerde omstandigheden. Figuur 5 bijvoorbeeld toont een klein deel van het absorptiespectrum van formaldehyde. Dit spectrum heeft smalle structuren (lijnen) waarvan de posities en intensiteiten de unieke afdruk van de molecule voorstellen. De vaststelling ervan in een spectrum van de atmosfeer toont de aanwezigheid van de molecule aan, en de intensiteit van de lijnen bepaalt de hoeveelheid gas die aanwezig is. Alle moleculen die aanwezig zijn op het pad van de elektromagnetische straling tussen de waarnemer en de zon absorberen deze straling. De spectrale afdrukken van al deze moleculen zullen dus zichtbaar zijn in het beschouwde spectrum, waardoor de identificatie en kwantificering van verschillende gassen die gelijktijdig aanwezig zijn op een bepaalde plaats mogelijk is. Dit maakt van spectroscopie een zulke krachtige methode, om bijvoorbeeld de fysisch-chemische processen in de atmosfeer te bestuderen.

Belangrijkste resultaten van AGACC

Metingen van waterdamp

De hoeveelheid waterdamp in de atmosfeer bepaalt mee het klimaat. Daarom is het belangrijk deze hoeveelheid

en haar veranderingen nauwkeurig te meten. In AGACC werden verschillende methodes onderzocht, met elkaar en met satellietmetingen vergeleken, en verbeterd. We leerden onder andere dat de hoeveelheid waterdamp zeer variabel is, met plaats en tijd, wat het onderling vergelijken van verschillende metingen niet vergemakkelijkt, en dat FTIR-metingen de totale geïntegreerde hoeveelheid water kunnen bepalen met een precisie van ongeveer 2%. Tijds-series van radiopielingen van de verticale verdeling van waterdamp in Ukkel sedert 1990 werden gecorrigeerd voor instrumentele fouten. Uit de gecorrigeerde en gehomogeniseerde tijdsserie stellen we vast dat de relatieve vochtigheid in de hoge troposfeer gestegen is tot 2001 om daarna weer af te nemen. Op Jungfraujoch daarentegen nemen we geen beduidende langetermijnevolutie waar van de totale hoeveelheid waterdamp in de atmosfeer tijdens de periode 1988-2012.

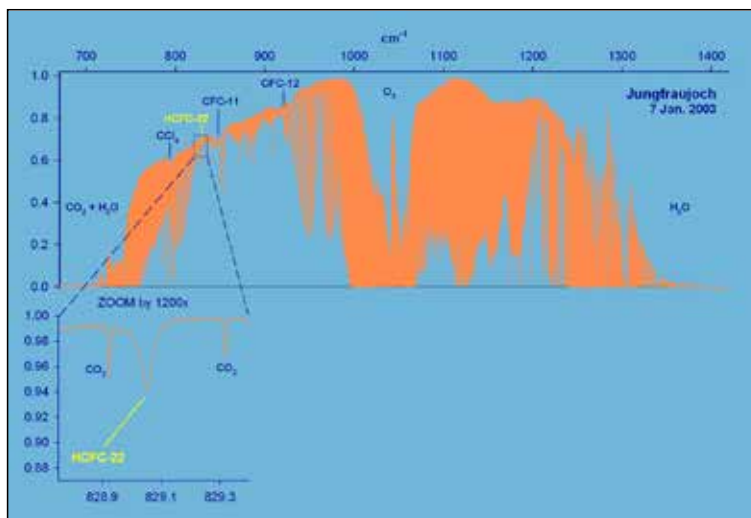
Metingen van aerosoleigenschappen

Een aerosol is een mengsel van kleine deeltjes (vast of vloeibaar) in suspensie in een gas, bijvoorbeeld in de atmosfeer. Deze deeltjes ontstaan ten gevolge van natuurlijke processen (bijv. bosbranden) of door menselijke activiteiten (bijv. industriële verbranding, verkeer, ...). Ze hebben dan ook zeer uiteenlopende karakteristieken qua grootte (nanometer tot 100 micrometer), vorm, chemische samenstelling, optische eigenschappen. Maar ze bepalen mee de zichtbaarheid, de luchtkwaliteit, en het klimaat, en hebben een belangrijke invloed op onze gezondheid en op de totale hoeveelheid UV-licht dat ons bereikt.

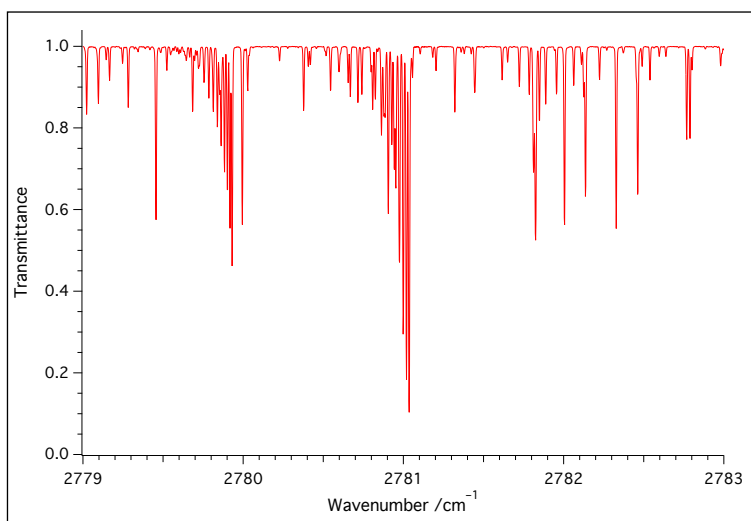
In Ukkel (midden 2006) en in Bujumbura (november 2013) werden een zonfotometer geïnstalleerd voor de continue en automatische opvolging van de totale optische dichtheid en enkele bijkomende optische eigenschappen van de aerosolen: deze gegevens zijn te vinden op <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>.

Aerosol optische dichtheden konden ook afgeleid worden uit de lange serie Brewer-waarnemingen in Ukkel sedert 1984. Ze worden nu dagelijks gebruikt in de voorspellingen van de UV-index, die dankzij deze informatie verbeterd zijn. Bovendien werken we aan de validatie van een model om de aerosolsamenstelling te voorspellen, zodat we de UV-index nog beter zullen kunnen voorspellen.

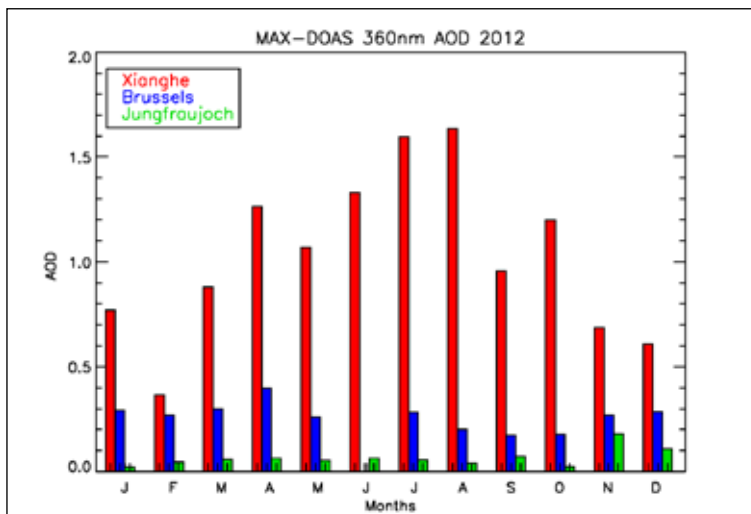
Door het werk in AGACC is aangetoond dat ook de MAX-DOAS-waarnemingen toegang geven tot aerosolinformatie, en meer bepaald de verticale verdeling van de zogenaamde extinctiecoëfficiënt van de aerosoldeeltjes en hun optische dikte (geïntegreerde verticale extinctiecoëfficiënt in de troposfeer). Deze parameters zijn een maat voor de hoeveelheid zonlicht van een gegeven golflengte die door de deeltjes wordt verstrooid en/of geabsorbeerd, en hangt af van het type aerosol. Er is in AGACC hard gewerkt aan het op punt stellen van deze techniek, en we zijn nu zeker van zijn betrouwbaarheid. Hij wordt toegepast in Ukkel, Jungfraujoch, Xianghe en Bujumbura. Figuur 6 toont het verschil in stofconcentratie en dus in het niveau van de luchtvervuiling tussen Xianghe, Ukkel, en Jungfraujoch in 2012.



Figuur 4: Typisch FTIR-spectrum tussen 7 en 14 micrometer. Absorptielijnen van ozon, waterdamp en koolstofdioxide (CO₂) worden geïdentificeerd. Het onderste gedeelte toont een uitvergroting (1200x) van een deel van het spectrum, waardoor men de spectrale afdruk van HCFC-22 kan visualiseren.



Figuur 5: Klein deel van het in het laboratorium waargenomen absorptiespectrum van formaldehyde ('wavenumber' is de inverse van de golflengte van de invallende elektromagnetische straling); de posities en intensiteiten van de waargenomen fijne structuren vormen de unieke afdruk van de molecule.



Figuur 6: Verschil in maandelijkse stofconcentratie, uitgedrukt in aerosol optische dikte (AOD), tussen meetstations in Xianghe (Beijing), Ukkel en Jungfraujoch (Zwitserse Alpen) in 2012. De metingen zijn uitgevoerd met MAX-DOAS-instrumenten en vervolgens geanalyseerd door het BIRA met behulp van het bePRO-stralingstransport computer-model.



Figuur 7: Sedert 2010 gebruikt het BIRA een MAX-DOAS-instrument op Jungfraujoch. Hier vervangen onderzoekers Christian Hermans en Frederik Tack enkele onderdelen van het instrument. © High Altitude Research Stations Jungfraujoch and Gornergrat



Figuur 8: Bij vulkaanuitbarstingen zoals die van Eyjafjallajökull kan informatie verstrekt worden over de aanwezigheid van vulkanisch stof in de atmosfeer. (CC bjarkis-SA 2.0)

Tegelijkertijd is begonnen met het uitbouwen van een netwerk in België van zogenaamde ceilometers, een soort kleine LIDAR's (Light Detection and Ranging), die ook informatie leveren over de verticale verdeling van de aerosoldeeltjes in de troposfeer. We zijn dus nu prima gewapend om bij een vulkaanuitbarsting zoals die van de Eyjafjallajökull in IJsland in 2010 snel informatie te verstrekken over de aanwezigheid van vulkanisch stof in onze atmosfeer, en indien nodig de luchtvaart te waarschuwen. En nu al deze metingen op punt staan, is de studie aangevat van de aerosolkarakteristieken boven Ukkel, hun variabiliteit, hun herkomst, enz. Dit werk is nu volop aan de gang.

Metingen van gassen: ozon- en klimaat-problematiek

De lucht is samengesteld uit 78% stikstof (N_2), 21% zuurstof (O_2), 1% Argon en sporen van honderden verschillende gassen in veel kleinere hoeveelheden, maar daarom niet minder belangrijk voor onze leefomstandigheden. Dit zijn o.a. koolstofdioxide (CO_2), methaan (CH_4), ozon (O_3), en allerlei chloor-, broom-, en stikstofhoudende componenten en vluchtige organische stoffen (VOS). (Figuur 9)

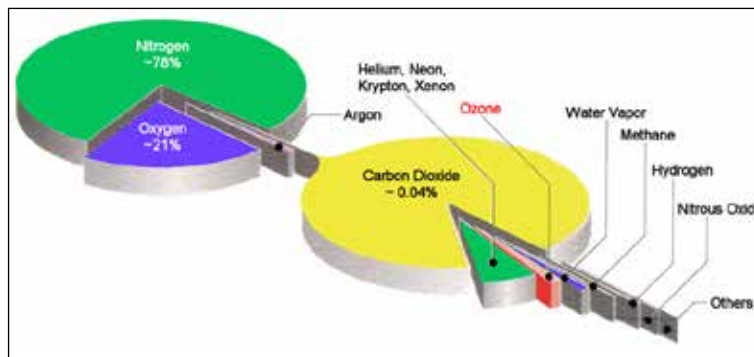
Wij hebben ons in AGACC toegespitst op de verbetering van de detectie van een aantal gassen die óf uiterst belangrijk zijn in het kader van de stratosferische ozonproblematiek, óf in het kader van de klimaatveranderingen, of beide. Het is inderdaad zo dat van verschillende gassen die als vervangproducten in de atmosfeer zijn gebracht na de verbanning van ozonafbrekende gassen door het Protocol van Montreal, en die inderdaad minder schadelijk zijn voor stratosferisch ozon, gebleken is dat ze bijdragen aan de opwarming van het klimaat. De klimaatproblematiek en de ozonproblematiek zijn dus onlosmakelijk met elkaar verbonden! Ozon in de troposfeer is trouwens ook een broeikasgas...

Op Jungfraujoch wordt constant gekeken naar de evolutie van ozon en de gassen die deze evolutie beïnvloeden, namelijk de chloor- en broomhoudende gassen, en in het bijzonder de 'nieuwe' vervangproducten zoals HCFC-142b. De metingen bevestigen de toename van de vervangproducten in de troposfeer, maar de afname van chloor- en broomhoudende gassen in de stratosfeer – daar waar ze verantwoordelijk zijn voor de afbraak van ozon. Recent is vastgesteld dat er de laatste jaren (sedert 2008) terug een stijging te zien is van HCl, een belangrijk chloor-reservoir in de stratosfeer, en dát niet alleen op Jungfraujoch maar ook boven andere NDACC-observatiestations in het noordelijk halfrond. Waarschijnlijk is deze stijging te wijten aan een verandering in het transport in de atmosfeer. Zo zie je maar weer dat verrassingen de wereld nog niet uit zijn en dat continue opvolging niet alleen nuttig maar hoogst noodzakelijk is!

Op Jungfraujoch en Ile de La Réunion is ook werk gemaakt van precieze waarnemingen van de evolutie van de meest prominente broeikasgassen, CO_2 en CH_4 . Op Jungfraujoch konden historische metingen geanalyseerd worden met moderne analysemethoden, om op die manier tot een betrouwbare tijdreeks te komen van de evolutie van CH_4 vanaf 1976 tot nu (figuur 10). Op Ile de La Réunion is een FTIR-spectrometer geïnstalleerd die toegespitst is op de metingen van de broeikasgassen in het nabije infrarood en die sedert 2011 opgenomen is in het Total Carbon Column Observing network (TCCON - www.tccon.caltech.edu). Er is nu een 3-jarige tijdsserie beschikbaar, niet alleen van CO_2 en CH_4 , maar ook van N_2O , CO , H_2O , ... We behalen een nauwkeurigheid van de orde van 0.25% voor CO_2 en 0.3% voor CH_4 .

Op Ile de La Réunion is een belangrijke studie gebeurd naar de detectie van VOS. Verschillende gassen konden

zo geïdentificeerd en gekwantificeerd worden: methanol (CH_3OH), waterstofcyanide (HCN), formaldehyde (HCHO), ethaan (C_2H_6), acetyleen (C_2H_2), mierenzuur (HCOOH), enz. Er is aangetoond dat vele van deze gassen boven Ile de La Réunion terechtkomen ten gevolge van branden in Madagascarië, centraal en zuidelijk Afrika, en zelfs Zuid-Amerika en West-Azië. Emissiefactoren voor de verschillende gassen konden bepaald worden. Deze metingen hebben ook bijgedragen tot de verificatie van satellietwaarnemingen en modellen van atmosferische processen, die aangetoond hebben dat een belangrijke bron van mierenzuur aanwezig is in tropische en boreale ecosystemen (zie *Science Connection* 37, pp. 26-29).

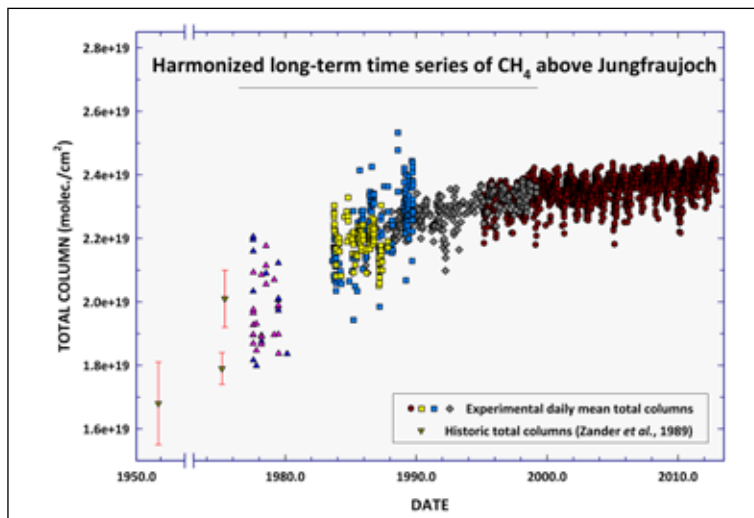


Figuur 9: Schema van de samenstelling van onze aardse atmosfeer.

In Bujumbura komen de eerste gegevens ter beschikking van pollutanten zoals formaldehyde. Ze zijn uiterst belangrijk voor de ondersteuning van de modellen en satellietwaarnemingen boven Afrika waar bijna geen grondwaarnemingen bestaan. Ze zijn ook een belangrijke motivatie voor de plaatselijke studenten om de door ons verzorgde opleiding in atmosferische chemie te volgen en daarna mee te werken in het kader van het observatiestation.

Samenvatting en conclusies: ‘Monitoring matters’

Dankzij het werk in AGACC hebben de grondwaarnemingen nog aan belang gewonnen en zijn we in staat geweest verschillende bijdragen te leveren aan de verificatie en verbetering van satellietwaarnemingen en numerieke modellen van de atmosfeer.



Figuur 10: Tijdsree van methaan, een krachtig broeikasgas. Deze metingen hebben de continue stijging van de concentraties van methaan boven heel Europa met bijna 40% sinds 1950 (!) aangetoond.

De nieuwe of verbeterde laboratoriumgegevens hebben ons geholpen om de resultaten van de metingen te verbeteren. Ze zijn ook geïntegreerd in internationale gegevensbanken die ten goede komen aan al diegenen die bij atmosferische waarnemingen betrokken zijn.

om de observaties en hun analyses zoveel mogelijk te standaardiseren en te automatiseren, is een continue inzet nodig van een aantal wetenschappers om de kwaliteit van de metingen en de resultaten te blijven garanderen.

De nieuwe tijdsseries van concentraties in de atmosfeer boven de AGACC-stations zijn opgenomen in de NDACC-gegevensbank – waardoor ze ter beschikking komen van de ganse wetenschappelijke gemeenschap en ook van beleidsmakers via hun opname in evaluaties van de toestand van de atmosfeer, zoals het 4-jaarlijkse Scientific Assessment of Ozone Depletion door WMO (World Meteorological Organization). De ontwikkelde waarnemingsstrategieën zijn ook overgenomen door andere teams binnen NDACC.

Geen goed beleid zonder correcte wetenschappelijke informatie, geen correcte informatie zonder betrouwbare waarnemingen, geen betrouwbare waarnemingen zonder kwaliteitsvolle en continue waarnemingen vanaf de grond en de onderliggende laboratoriumgegevens! |

De vooruitgang in AGACC laat ons tevens toe een belangrijke rol te spelen in internationale meetcampagnes, bijvoorbeeld ter ondersteuning van de validatie van nieuwe satellieten zoals TROPOMI (www.tropomi.eu/TROPOMI/Home.html).

‘Monitoring matters’
 Dank aan: Netwerkingsproject met Burundi, gefinancierd door Belspo.

De auteurs

Martine De Mazière, Hugo De Backer, Emmanuel Mahieu, Jean Vander Auwera, Whitney Bader, Veerle De Bock, Filip Desmet, Tomas Földes, Clio Gielen, François Hendrick, Christian Hermans, Bavo Langerock, Bernard Lejeune, Alexander Mangold, Marcela Tudorie, Roeland Van Malderen, Michel Van Roozendaal en Corinne Vigouroux.