



Fig. 1 : Observation du limbe terrestre avant le lever de Soleil à partir de la navette spatiale Columbia le 1er novembre 1992 au-dessus du lac Tanganyika. La couche orange correspond aux nuages de la tropopause tropicale (entre 13 et 18 km. d'altitude), la couche brillante inférieure correspond à la troposphère tandis que l'atmosphère supérieure apparaît en bleu. Toutes ces couches interagissent et ne peuvent être étudiées séparément. Le climat, la météorologie et la qualité de l'air concernent la troposphère où réside l'humanité. © NASA, document STS052-23-022

# Climat et qualité de l'air : même combat

Christian Muller

## Introduction

La Terre forme un système complexe composé des océans, des terres émergées, de l'atmosphère et de leur principale source d'énergie : le Soleil. L'Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) se concentre sur les relations Terre-Soleil et étudie scientifiquement tous ces sujets en se concentrant tout spécialement sur l'atmosphère. Les moyens utilisés sont à la fois les modèles théoriques et les observations à partir de satellites, d'aéronefs et de stations au sol. Depuis sa fondation en 1964, un nouvel acteur a pris une place grandissante : l'influence humaine. Les scientifiques ont observé l'apparition, dans l'atmosphère, de gaz qui n'auraient jamais pu être mesurés auparavant, des phénomènes de pollution qu'on avait cru limités à des zones très restreintes se sont étendus à des continents entiers, la couche protectrice d'ozone de la stratosphère a été affectée par le chlore et les oxydes d'azote industriels et finalement, surtout depuis les années 1970, la température moyenne augmente à l'échelle mondiale.

Ces variations se produisent à l'échelle de la dizaine d'années et sont donc exceptionnelles par

leur rapidité. Elles ont amené le prix Nobel, Paul Crutzen, à proposer une nouvelle ère géologique : l'anthropocène, période où les activités humaines dominent l'évolution du système Terre.

## Observations à partir du sol

Avant l'ère spatiale, la mesure de la composition atmosphérique se faisait par des mesures à partir du sol et de ballons stratosphériques. Les vols ballons furent les premières opérations de l'IASB à sa fondation et l'amènèrent à la découverte et à la mesure de nombreux composants de la stratosphère.

## L'ozone : polluant, gaz à effet de serre et filtre ultraviolet

L'ozone est un gaz composé de trois atomes d'oxygène, identifié au milieu du 19<sup>e</sup> siècle. L'ozone est omniprésent dans l'atmosphère terrestre mais il se trouve principalement (pour plus de 90 %) dans la stratosphère. A sa découverte dans la troposphère, il est d'abord apparu comme bénéfique en raison de ses propriétés désinfectantes. Mais l'ozone troposphérique est formé à partir de précurseurs qui sont eux-mêmes des polluants comme les oxydes d'azote. Au 20<sup>e</sup> siècle, sa concentration élevée a été associée à des pathologies respiratoires et à des dégâts à la

végétation. De plus, cet ozone possède une émission infrarouge vers 10 microns de longueur d'onde qui en fait un gaz à effet de serre. Simultanément à ces découvertes, les propriétés de l'ozone stratosphérique, en tant que filtre UV, étaient mises en évidence. L'ozone stratosphérique protège la vie terrestre des rayonnements UV-B destructeurs de l'ADN (l'UV-B correspond aux rayonnements de longueur d'onde inférieurs à 315 nm). Malheureusement, le 'bon' ozone stratosphérique est détruit par du chlore et du brome transportés depuis la surface par des gaz halogénés d'origine humaine. Ces gaz sont eux-mêmes des gaz à effet de serre. L'ozone stratosphérique est aussi sensible aux oxydes d'azote produits par l'aviation de haute altitude. Le rayonnement UV était considéré comme bénéfique jusqu'à ce qu'on découvre, au milieu du 20<sup>e</sup> siècle, son rôle nocif pour les feuillages et finalement le cancer de la peau humaine. Le rôle protecteur de la couche d'ozone dans la stratosphère est donc très important.

## Comment mesurer les gaz atmosphériques ?

La méthode la plus évidente est l'analyse chimique, celle-ci est effectuée précisément depuis l'année géophysique internationale (1957-1958) et a permis de mettre en évidence la croissance du dioxyde de carbone, premier gaz à effet de serre. L'IASB a toujours donné la priorité aux mesures optiques à partir de plateformes spatiales et, dès 1963, a été pionnier en mesures d'absorption infrarouge lorsque le Soleil passe en-dessous de l'horizon. Ces observations peuvent être interprétées indépendamment de toute mesure au sol et ont été effectuées en ballon et lors de deux vols du spectromètre à grille, conçu en partie par Dirk Frimout, sur la navette spatiale. Elles constituent aussi le principe de mesure de l'instrument NOMAD actuellement en orbite autour de Mars.

La deuxième technique utilisée est la mesure du rayonnement ultraviolet et visible diffusé par l'atmosphère, cette méthode demande une excellente calibration des instruments et la validation des interprétations par des mesures au sol. Là également, l'IASB effectue depuis environ 1980 des développements tant du point de vue de l'instrumentation que des méthodes d'interprétation. Les résultats actuels dépassent toutes les espérances et, à partir de satellites, donnent une couverture globale de dizaines de composants atmosphériques dont évidemment l'ozone.



Fig. 2 : Mesure de haute altitude de la composition atmosphérique par absorption du rayonnement solaire au Jungfraujoch en Suisse. La série de données commencée en 1950 par l'Université de Liège montre l'évolution des gaz à effet de serre dans l'atmosphère 'non polluée' ainsi que celle de la vingtaine de gaz influençant la couche d'ozone. Depuis une trentaine d'années, cette opération est assurée en collaboration avec l'Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique qui possède aussi une station à l'île de la Réunion depuis 2002. L'IASB a également observé au Pic du Midi. Ces mesures au sol assurent à la fois la continuité des séries et la validation des mesures spatiales. ([www.jungfrau.ch](http://www.jungfrau.ch))



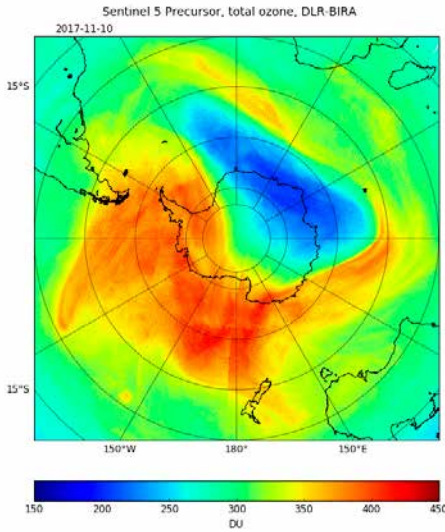


Fig. 3 : Ozone total mesuré par l'instrument européen TROPOMI en novembre 2017 à partir du satellite Sentinel 5 Precursor lancé le 13 octobre 2017. Cet instrument fait partie d'une série développée par l'IASB depuis 1986 commençant par l'instrument tri-national SCIAMACHY (Allemagne, Pays-Bas, Belgique) et continuée par les instruments GOME et TROPOMI. © Document ESA-DLR-IASB

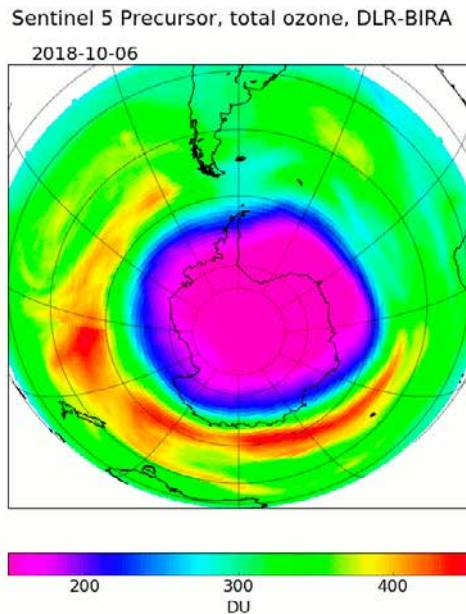
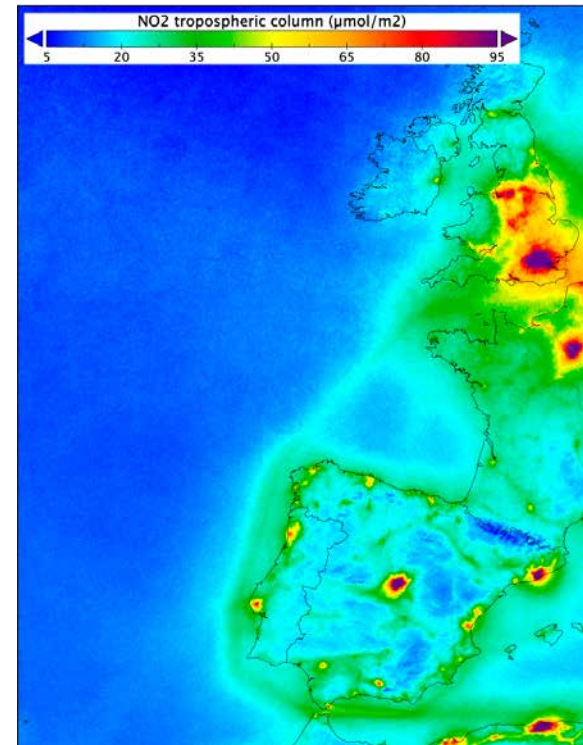


Fig. 4 : 'Trou d'ozone' du 10 octobre 2018 observé par TROPOMI. © ESA-DLR-IASB



La figure 4 montre le maximum d'ozone Antarctique consécutif à la dislocation annuelle du 'trou d'ozone' apparu en 1980 et dont l'origine humaine a été prouvée. La découverte de ce 'trou d'ozone' a conduit au protocole de Montréal pour la protection de la couche d'ozone en 1987. Malgré la réduction des sources de chlore par le protocole de Montréal, le phénomène du trou d'ozone se reproduit régulièrement chaque année probablement en relation avec le renforcement de la circulation atmosphérique et du vortex antarctique lié lui-même au changement climatique. Il est également possible que des sources de gaz détruisant l'ozone comme les chlorofluorométhanes ne soient pas déclarées par les gouvernements. Ce dernier point montre l'importance des mesures spatiales pour assurer la vérification des traités en parallèle aux données basées sur les statistiques nationales.

En conclusion, l'étude de l'ozone atmosphérique que ce soit dans la troposphère ou dans la stratosphère ne peut pas être séparée de celles du climat et de la qualité de l'air. Tout effort pour augmenter la qualité de l'air et ré-

duire l'ozone troposphérique contribue aussi à la réduction des gaz à effet de serre.

#### Gaz à effet de serre et agriculture

L'augmentation de la population humaine et l'amélioration de son alimentation amènent à transformer des milieux naturels en sources de plus en plus importantes de gaz à effet de serre.

Deux gaz sont principalement concernés : le méthane ( $\text{CH}_4$ ) et l'hémioxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Les deux sont produits par des bactéries suivant des processus différents. Les sources anthropiques du méthane vont de l'élevage à l'agriculture, l'élevage bovin et la culture du riz contribuent beaucoup à sa croissance. Le méthane provient également, dans une plus faible partie, de l'extraction des énergies fossiles et cette dernière source est difficile à estimer car, par exemple, les mines de charbon abandonnées continuent à relâcher du méthane. De plus, le dégel du pergélisol (permafrost) de l'arctique, lui-même relié au réchauffement global relâche du méthane en quantité. Le suivi du méthane à partir de l'espace est la seule manière de quantifier

ces phénomènes. La mesure de ces deux gaz avait été une des premières priorités du programme de mesure en ballon de l'IASB il y a 50 ans essentiellement pour des raisons scientifiques : leur interaction dans la stratosphère avec les atomes d'oxygène et le rayonnement solaire non filtré permet de comprendre des processus chimiques qu'il n'est pas possible de reproduire en laboratoire. En 1986, l'IASB en avait donc fait un des objectifs de l'instrument tri-national SCIAMACHY (Allemagne, Pays-Bas, Belgique). Le canal mesurant le méthane avait été réalisé en grande partie par l'industrie belge sous la supervision de l'IASB. Les mêmes principes sont actuellement utilisés par l'instrument TROPOMI.

L'hémioxyde d'azote, actuellement en croissance, est quant à lui produit par des bactéries anaérobiques dans des sols suffisamment acides. Ce phénomène est lié à l'hyper-nitrication des sols due aux engrais. Le  $\text{N}_2\text{O}$  est aussi un gaz à effet de serre mais s'il est relativement stable dans la troposphère, il est dissocié par le rayonnement ultraviolet dans la stratosphère au-dessus de la couche d'ozone et s'attaque donc à l'ozone stratosphérique.

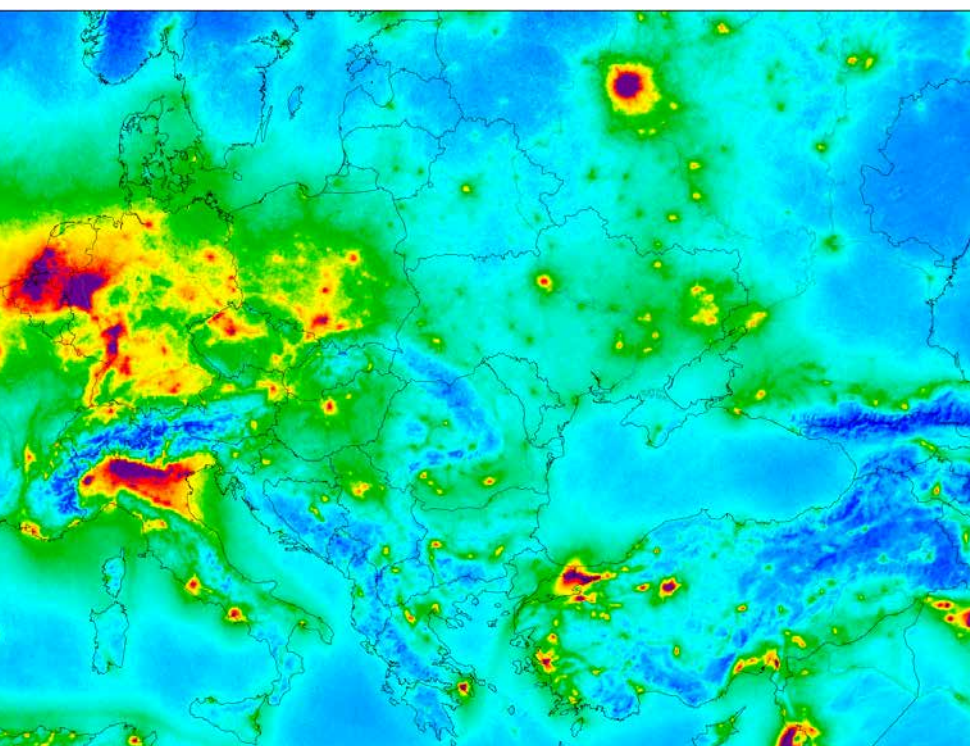


Fig. 5 : Dioxyde d'azote troposphérique mesuré par l'instrument européen TROPOMI entre avril 2018 et mars 2019 à partir du satellite Sentinel 5 Precursor, le KNMI et l'IASB participent à l'interprétation de ces données (© ESA). Les oxydes d'azote sont produits dans les moteurs à combustion interne et sont donc corrélés avec les émissions directes de dioxyde de carbone par les mêmes moteurs. Le triangle logistique Bruxelles-Amsterdam-Cologne est spécialement apparent. La réduction du trafic utilisant ces moteurs diminue non seulement ces gaz toxiques mais réduit également les gaz à effet de serre, à la fois directement et en diminuant la production d'ozone.

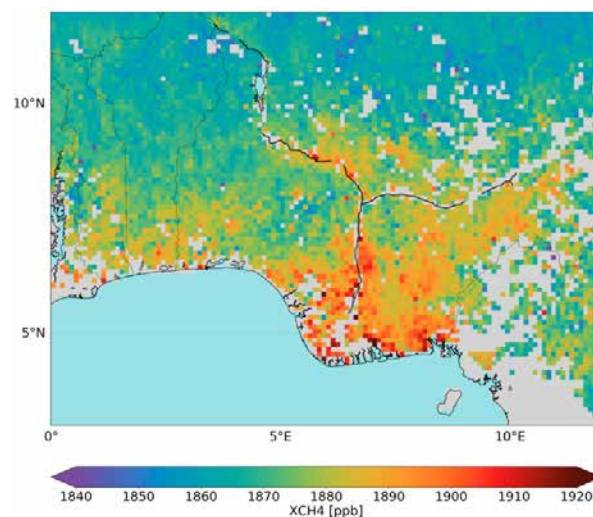


Fig. 6 : rapport de mélange du méthane mesuré par TROPOMI entre novembre 2018 et février 2019 montrant les zones humides du Nigéria. © ESA

Ces mécanismes sont étudiés théoriquement par l'IASB depuis sa fondation et ont conduit l'Institut à être pionnier dans la mesure de tous les oxydes d'azote stratosphériques.

La gestion des sols, le climat et la chimie atmosphérique sont indissociables dans la compréhension du rôle de ces deux gaz dans l'équilibre du système terre.

### Particules de poussière : un problème ouvert

L'étude de la qualité de l'air englobe aussi les particules en suspension dans l'air qui peuvent provenir des combustions liées au trafic, au chauffage mais aussi d'activités industrielles. Leur effet sur le climat est une des principales incertitudes qui subsistent. En suspension dans l'air, elles constituent un obstacle à la pénétration du rayonnement solaire et pourraient donc induire un forçage négatif (un refroidissement). Si ces particules se déposent au sol et spécialement sur la glace ou la neige, elles l'assombrissent et augmentent la quantité de rayonnement absorbé et peuvent donc induire un réchauffement.

## La communauté internationale et le problème d'environnement

La communauté scientifique a été consciente de la nécessité d'étendre les sciences de la Terre au globe entier dès le 19<sup>e</sup> siècle, la première conférence internationale de météorologie eut lieu en 1853 et fut présidée par le directeur de l'observatoire de Bruxelles, Adolphe Quetelet. L'Organisation Météorologique Internationale (OMI) date elle de 1873 avec pour but d'unifier les méthodes de mesure et de constituer des réseaux. Les premiers efforts de recherche internationale débutent avec l'année polaire de 1883 pour culminer avec l'année géophysique internationale de 1957-1958, coordonnée de Bruxelles aussi par Marcel Nicolet, premier directeur de l'IASB.

D'un point de vue plus politique, l'OMI devint une agence des Nations Unies sous le nom d'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), la conscience de l'environnement croissait mondialement et les Nations Unies organisèrent en 1972 le premier 'Sommet de la Terre' à Stockholm. Cette conférence conduisit à la création d'une nouvelle agence des Nations Unies: le 'Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE)', après le protocole de Montréal de 1987 sur les gaz affectant la couche d'ozone, le PNUE et les gouvernements mirent en place un groupe d'étude sur le réchauffement climatique le 'Groupe Intergouvernemental d'Etude du Climat (GIEC)' dans le but de rassembler une information fiable sur un éventuel changement climatique. Ce groupe publie périodiquement des rapports signés de plusieurs centaines de scientifiques. Tous les éléments de ces rapports ont été publiés dans des revues à comité de lecture, ils sont revus ensuite par environ 3000 autres scientifiques dont les remarques doivent être justifiées. Une dernière révision est effectuée par des experts désignés par les gouvernements et donc en plus de leur caractère encyclopédique, ils constituent donc une forme de vérité judiciaire. Le cinquième rapport publié en 2014 concluait clairement que le réchauffement observé à l'échelle planétaire était lié à l'activité humaine et avait conduit les politiques à l'accord de Paris sur la réduction des gaz à effet de serre de 2016. En Belgique, la participation nationale est coordonnée par la Politique scientifique fédérale (Belspo) tandis que la responsabilité politique est partagée par les ministres fédéraux et régionaux en charge de l'environnement.



## L'IASB observe les poussières et les forçages naturels

L'observation des poussières et gouttelettes (aérosols) dans la troposphère supérieure et la stratosphère a été effectuée à l'IASB dans le cadre de l'interprétation des données de l'instrument GOMOS sur ENVISAT et sera un des objectifs de l'instrument ALTIUS en phase finale de développement à l'IASB. En effet, les éruptions volcaniques constituent une source naturelle de ces aérosols et peuvent donc agir sur le climat de manière imprévisible. Le projet ALTIUS sera la première mission belge d'observation de la stratosphère à partir d'un microsatellite PROBA. Outre l'ozone, il permettra de mesurer les profils de concentration de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone, du méthane et des aérosols, ceci avec une couverture mondiale.

Le volcanisme peut donc constituer un forçage naturel pour le climat entraînant un refroidissement général, d'autres hypothèses ont été émises pour une influence extérieure sur le climat, la première étant celle de variations du rayonnement solaire et la seconde de l'influence du rayonnement cosmique dans la formation des nuages. Ces trois aspects continuent à être étudiés dans un but scientifique à l'IASB, ils sont cependant actuellement faibles en termes de forçage par rapport aux effets de l'activité humaine.

## Conclusions

Le cinquième rapport du GIEC ([www.ipcc.ch/report/ar5/syr/](http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/) - 2014) a examiné la situation du changement climatique et a déterminé que la cause du réchauffement exceptionnellement rapide observé actuellement était dû à l'activité humaine. Deux solutions se présentent : l'une est de diminuer les sources des gaz impliqués et l'autre est de capter les gaz émis pour les neutraliser dans le système Terre. Seule la première solution paraît efficace à court terme, les quelques exemples donnés ici montrent que ce processus présente des avantages pour le rétablissement d'autres éléments de l'environnement et notamment la qualité de l'air.

La recherche reste indispensable pour comprendre tous les processus possibles et leur interaction et l'IASB, grâce aux moyens satellitaires et à sa participation à des réseaux de stations au sol, suit l'évolution de pratiquement tous les gaz atmosphériques mesurables à l'échelle globale. L'expertise de l'IASB en matière d'aérosols lui permet de participer à un suivi global de leur évolution et de leur influence sur le climat.

Ces mesures physiques, en plus de leur valeur scientifique, apportent un élément important à la vérification des traités.

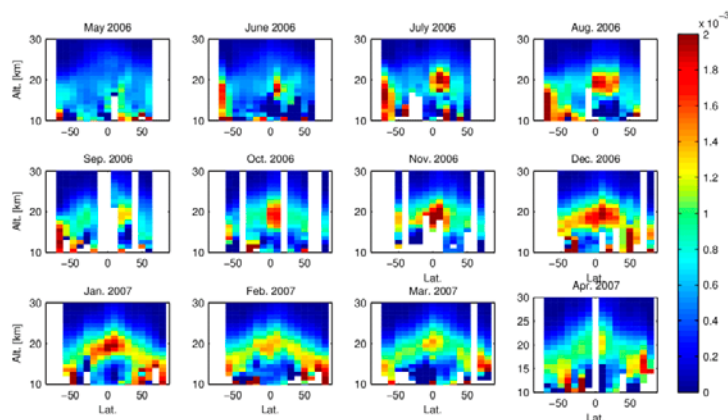


Fig. 7 : évolution de l'extinction par les aérosols mesurée par l'instrument GOMOS sur ENVISAT, la période choisie montre l'éruption du volcan de la Soufrière (Guadeloupe, 16° N) et l'évolution de la ceinture d'aérosols formée (© ESA-IASB-LATMOS). L'image de mai 2006 ne montre pas d'influence volcanique, par contre à partir de juin 2006, une série d'éruptions durant 125 jours, crée une ceinture d'aérosols autour de l'altitude de 20 km et de la latitude de 10-20° N, la situation atmosphérique ne revient à la normale qu'à partir de février 2007 (© ESA-IASB-LATMOS).



Fig. 8 : observations en ballon par l'IASB à partir d'Aire sur l'Adour (France) du nuage volcanique du Mont Sainte-Hélène (Etat de Washington, Etats-Unis) avant son explosion le 18 mai 1980 et quelques mois après. Une éruption volcanique peut provoquer un refroidissement du climat en augmentant l'albedo de l'atmosphère et donc en diminuant le rayonnement reçu au sol. © IASB

## L'auteur

Christian Muller est un scientifique retraité de l'IASB, il a été associé dès 1970 aux recherches sur les oxydes d'azote et a participé aux premières mesures quantitatives de ceux-ci à partir de ballons. A partir de 1976, il a fait partie de l'équipe qui a étendu ces observations à l'espace à partir de la navette spatiale. Après deux vols du spectromètre infrarouge de l'IASB, en 1983 et 1992, il s'est consacré au programme ENVISAT de l'ESA et fut responsable belge de l'instrument SCIAMACHY. A partir de 2000, il a rejoint le B.USOC (Belgian Users support and Operation Centre) situé à l'IASB. Depuis 2010, il assure aussi la révision scientifique et parfois gouvernementale (en support de Belspo) de documents du GIEC.