

RAPPORT ANNUEL IASB 2013-2014





RAPPORT ANNUEL IASB 2013-2014



TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos

1

Aéronomie et climat

6

2

Aéronomie et couche d'ozone

14

3

Qualité de l'air

24

4

Rayonnement UV

32

5

Aéronomie et physique spatiale

38

6

Aéronomie planétaire

48

7

B.USOC

54

8

Services de soutien

58

Publications IASB 2013-2014

Remerciements

COLOPHON

Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB)
Avenue Circulaire 3
1180 Uccle
Belgique
www.aeronomie.be

Editeur responsable
Martine De Mazière

Coordination et rédaction finale
Karolien Lefever, Stéphanie Fratta, Tim Somers

Concept et réalisation
C-company

Dépôt légal
D/2015/678/2

Publication
Novembre 2015

AVANT-PROPOS



L'événement le plus important de 2013 et 2014 a sans aucun doute été notre cinquantième anniversaire, fêté le 25 novembre 2014: l'IASB (Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique) a alors clôturé les festivités de célébration de son cinquantième anniversaire par une séance académique au Palais des Académies à Bruxelles, et par l'édition d'un livre anniversaire relatant 50 ans de recherche à l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique.

Le 24 mars 2014, nous organisons une réunion du Groupe de travail Espace du Sénat sur le thème «50 ans de recherche en aéronomie spatiale: quels défis pour l'avenir?». Le grand public a également été impliqué dans notre anniversaire grâce à un site web spécialement créé pour l'occasion (<http://50.aeronomie.be>), lors d'un week-end portes ouvertes inauguré le 10 octobre par S.A.R. le Prince Laurent, par des expositions itinérantes et par des conférences. C'est avec plaisir que nous nous souvenons de ces festivités.

Nous sommes également fiers que l'institut se soit, en 50 ans, transformé en une institution de recherche mondialement reconnue dans le domaine de l'aéronomie, que le personnel ait augmenté d'un facteur 3, et que les sujets que nous traitons soient de plus en plus diversifiés. Par ailleurs, nous constatons que la pertinence de nos activités pour notre société – dans le contexte des changements globaux – devient de plus en plus évidente.

L'Institut est apparu à maintes reprises dans les médias grâce à la réussite sensationnelle de Rosetta, une mission de l'ESA (Agence Spatiale Européenne) à laquelle l'IASB collabore, et grâce aux premiers résultats scientifiques importants qui ont été obtenus grâce à cette mission, concernant l'origine de notre univers.

Mais à côté des événements et des résultats qui attirent l'attention du public et de la presse, il y a toute une série d'activités et de résultats qui sont moins spectaculaires, mais qui sont pourtant tout aussi importants pour le développement de la science et la progression de nos connaissances. Pour en

citer quelques-uns:

En 2013-2014 l'avant-dernière main a été mise à l'expérience NOMAD, qui doit partir vers la planète Mars en mars 2016 afin d'y analyser la composition de l'atmosphère et, en particulier, pour élucider le mystère du méthane sur Mars et la possibilité de la vie sur Mars. Les scientifiques de l'IASB ont contribué à l'explication de l'origine de ce qu'on appelle l'aurore thêta et cela sur base de données du satellite Cluster de l'ESA.

Grâce au service SACS (Support to Aviation Control Service), les chercheurs belges ont surveillé très activement la propagation du nuage de cendres du volcan Kelut sur l'île de Java. Ils l'ont fait sur base de données satellitaires. SACS a déjà donné un premier avertissement quelques heures après le début de l'éruption le 13 février 2014.

L'instrument Energetic Particle Telescope (EPT), développé par le Centre de radiations spatiales de l'UCL, le département d'ingénierie de l'IASB et QinetiQ Space, a été lancé le 7 mai 2013 à bord de PROBA-V et fournit, depuis lors, de nouvelles données sur les ceintures de radiation entourant la Terre. Les scientifiques de l'IASB analysent activement ces nouvelles données.

En avril 2013, un nouveau centre de coordination européen pour les services de météorologie spatiale a été ouvert à Uccle. Ce centre est dirigé par l'IASB et par l'Observatoire royal de Belgique. Il a, par exemple, livré à l'ESA les dernières prévisions de météorologie spatiale pour e.a., le lancement du satellite Gaia en décembre 2013 et pour la descente de la sonde Venus Express dans l'atmosphère de Vénus en juin 2014.

Pendant trois saisons de croissance, des données uniques sur les émissions de composés organiques volatils par la végétation ont été recueillies au-dessus de la canopée d'une forêt mixte à Vielsalm. Ces données permettent d'évaluer l'influence de la biosphère sur le climat.

Ce ne sont là que quelques exemples; je pourrais en citer plus. Mais il faut dire que les conditions dans lesquelles les scientifiques et le personnel en général doivent travailler sont de plus en plus difficiles: contraintes budgétaires imposées depuis plusieurs années maintenant, contrôle plus strict de la situation budgétaire et gel de recrutement drastique. Nous sommes très heureux d'avoir pu, grâce à la Régie des Bâtiments, inaugurer une nouvelle salle de réunion en octobre 2014, mais les perspectives pour la rénovation de l'atelier de mécanique dont l'état est dangereux pour le personnel qui y travaille, sont mauvaises. L'incertitude quant à l'avenir engendre un sentiment d'insécurité et la démotivation des employés. Je souhaite que cela change en 2015-2016 afin que le rapport en 2017 puisse à nouveau être positif.

Par conséquent, je tiens à remercier tous les employés actuels et anciens pour leurs efforts et leurs contributions au succès de notre 50e anniversaire et pour tous les résultats obtenus au cours des dernières années.

M. De Mazière,
Directeur général a.i. 15 mars 2015.



1

AÉRONOMIE ET CLIMAT

Lorsque nous pensons au climat, nous pensons à la température, aux précipitations, au vent,... Parce que ces paramètres sont ceux que nous voyons changer lorsque le climat change. Les causes de ces variations sont en réalité pour une part importante liées à la composition chimique de notre atmosphère. Les composants chimiques de notre atmosphère, gaz et particules (aérosols), influencent l'équilibre entre le rayonnement solaire entrant dans l'atmosphère et le rayonnement thermique de la Terre et de l'atmosphère qui s'échappe vers l'espace, par leurs propriétés caractéristiques d'absorption dans la partie infrarouge du spectre. Pour cette raison, ils sont appelés, en partie abusivement, des gaz à effet de serre.

L'IASB est, grâce à son expertise dans la composition chimique de l'atmosphère, bien placé pour observer les modifications de cette composition et étudier leurs effets sur le climat. Pour l'étude du climat, il est important de connaître les concentrations de gaz à effet de serre et leurs variations dans le temps et l'espace, sur des échelles de temps d'au moins 10 ans, et ce pas uniquement à la surface mais aussi en fonction de l'altitude dans l'atmosphère. Leur influence sur le climat en dépend effectivement. De plus, les mesures à la surface sont plus sensibles aux conditions locales (vents, émissions localisées) que les mesures plus haut dans l'atmosphère.

Actuellement, nous faisons ces mesures de concentrations en utilisant des méthodes de télédétection basées sur des techniques de spectroscopie. Elles se font depuis le sol et en utilisant des instruments embarqués à bord de satellites. La vision à long terme est obtenue grâce à la mise en place de mesures depuis le sol, répondant à un standard constant de qualité, pendant de nombreuses années successives, autant que possible sur base automatique de manière à réduire les coûts. Les satellites ont rarement une durée de vie supérieure ou égale à 10 ans. Les observations depuis le sol ont donc été mises en place afin de valider les mesures par satellites, d'assurer la cohérence entre instruments satellite successifs et de caractériser leur éventuelle dégradation dans l'espace.

Comment pouvez-vous mesurer les modifications climatiques?

Françoise (conseillère politique)

UN COUP DE CŒUR POUR LE MÉTHANE

Des mesures précises

Le composé le plus connu parmi ceux jouant un rôle dans la problématique du climat est le dioxyde de carbone (CO_2). L'augmentation de CO_2 dans l'atmosphère est, depuis la révolution industrielle, le facteur dominant des changements climatiques. En seconde place se trouve la croissance du méthane (CH_4) dans l'atmosphère. De plus, la croissance récente de l'exploitation du gaz de schiste provoque une augmentation des émissions de méthane, suite aux fuites de gaz.

L'équipe 'Observations dans l'infrarouge de l'atmosphère' met pour l'instant l'accent sur l'étude des concentrations en méthane. Dans la basse troposphère se trouvent environ 1.800 molécules de CH_4 par milliard de molécules d'air, soit 1.800 parts par milliard en volume ('parts per billion in volume' en anglais, ppbv); la croissance actuelle s'élève à environ 5 ppbv par an. Il y a plus de méthane dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud, mais les variations sont faibles. Les concentrations doivent être mesurées avec une très grande précision (meilleure que 2%) pour constituer des informations utiles aux modèles inverses (c'est à dire pour déterminer les flux de méthane sur base de modèles atmosphériques dans lesquels les concentrations mesurées sont assimilées). Cela est encore difficile à obtenir pour les mesures par satellites, mais l'on travaille sans relâche à l'amélioration des données satellite.

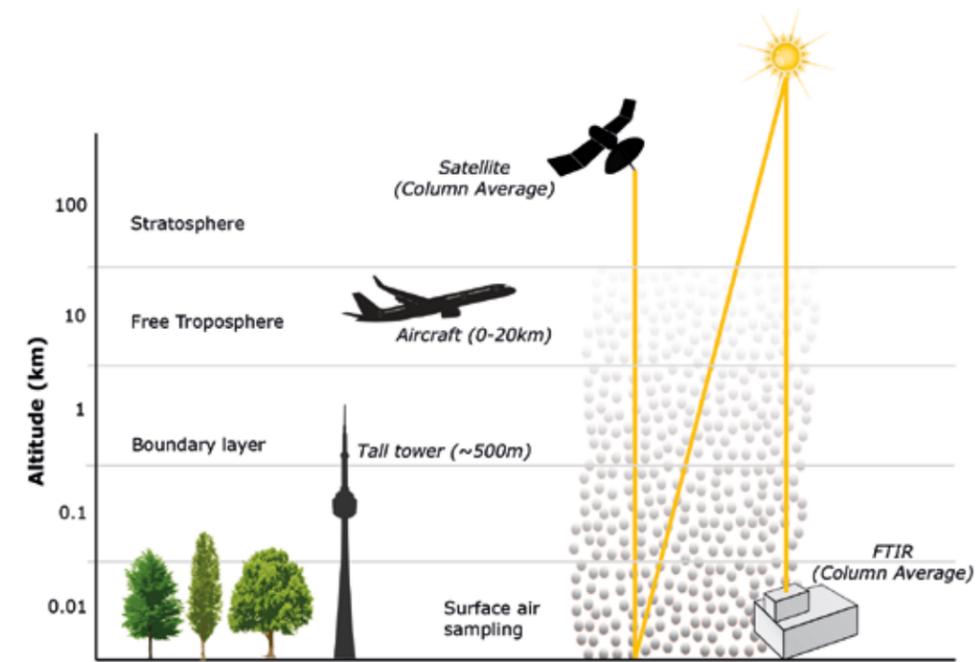
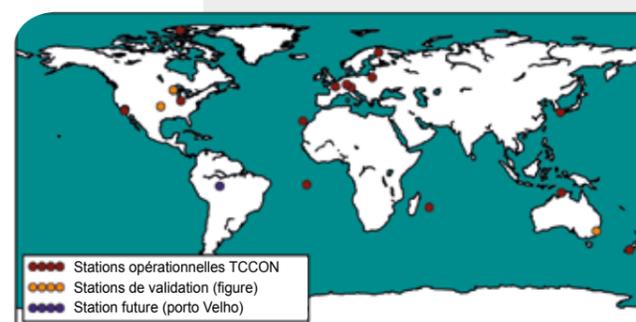
Dans le cadre du projet concernant les gaz à effet de serre au sein du projet ESA Climate Change Initiative (ESA CCI-

GHG), l'IASB est responsable de la validation des données satellites pour le CO_2 et le CH_4 . Cette validation repose sur des comparaisons avec des mesures depuis le sol, dont les caractéristiques sont bien connues, telles que les observations par le réseau TCCON (Total Carbon Column Observing Network). L'IASB contribue également depuis 2011 à ce réseau par des observations de gaz à effet de serre depuis l'île de la Réunion. L'exactitude et la précision obtenues pour le CH_4 sont de l'ordre de 0.2%.

Une première évaluation des résultats de mesures

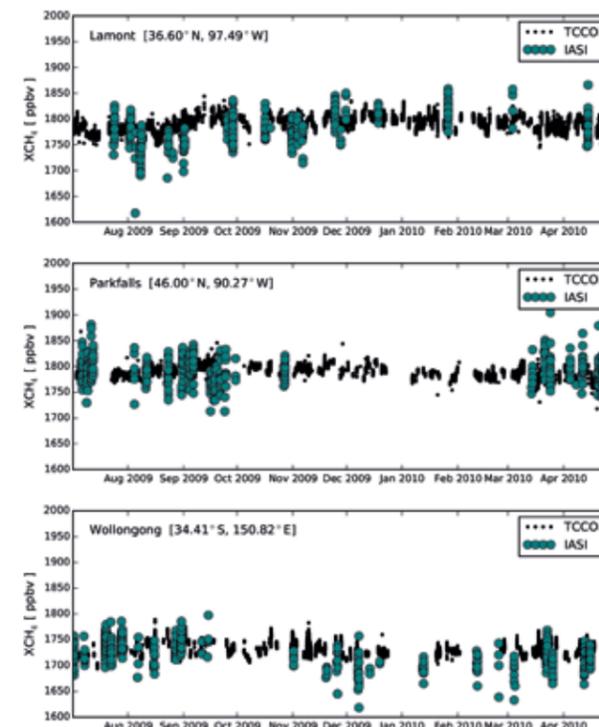
En 2014 une première évaluation des capacités des instruments satellite disponibles pour la mesure des concentrations

Carte des différentes stations TCCON où des mesures sont entreprises



Représentation schématique des techniques et plateformes d'observation. La technique appliquée par l'IASB pour mesurer les gaz à effet de serre est une technique spectrométrique dans laquelle un instrument FTIR est utilisé depuis le sol ou depuis un satellite en visée au nadir.

Comparaison des concentrations en CH_4 dérivées depuis les données IASI par l'IASB avec les mesures TCCON à 3 endroits (stations oranges dans la carte montrée ci-dessus). Les concentrations CH_4 de IASI sont en bon accord avec les mesures TCCON mais présentent pour l'instant une plus grande variance.



de méthane a pu être réalisée sous la direction de l'IASB. Ce sont pour l'instant les mesures de SCIAMACHY (instrument ESA), à bord du satellite Envisat (qui n'est plus opérationnel depuis 2012) et de TANSO-FTS à bord du satellite japonais GOSAT. Selon la validation, les données de CH_4 obtenues au départ des mesures par GOSAT atteignent l'exactitude et la précision nécessaires; ceci n'est cependant pas (encore) le cas pour les données SCIAMACHY (Dils et al. 2014)

La recherche a aussi montré clairement que dans les régions où il n'y a pas de possibilité de validation – parce que dans ces régions il y a pas ou trop peu de mesures depuis le sol, comme en Amérique du Sud, en Afrique, ... – l'incertitude sur la fiabilité des mesures de méthane par satellite reste élevée. C'est pour cette raison que l'équipe de l'IASB a décidé d'établir une nouvelle station TCCON à Porto Velho dans la forêt Amazonienne, en collaboration avec l'université locale (Instituto Federal De Educação Ciencia E Tecnologia De Rondonia) et en partenariat avec l'Université de Leicester, de Brême et l'Instituto De Pesquisas Energeticas E Nucleares (IPEN in Sao Paulo). Ce projet est financé par Belspo dans le cadre des accords de coopération internationale entre la Belgique et le Brésil. Les préparatifs ont débuté en octobre 2013 et nous espérons que la station soit opérationnelle mi-2015.

Perfectionnement des mesures

L'équipe 'Infrarouge' de l'IASB travaille aussi à la génération



de nouveaux jeux de données satellite pour le CH₄. D'une part, l'équipe travaille à l'obtention d'un jeu de données pour la concentration en CH₄ au départ de mesures par l'instrument IASI à bord du satellite MetOp. L'avantage de cet instrument est qu'il fournit des données déjà depuis 2006 et que d'autres instruments sont prévus à sa suite, pour continuer à fournir des données jusqu'environ 2025. C'est donc un instrument particulièrement adapté pour détecter l'évolution à long terme du CH₄.

En 2013-2014 l'accent a été mis sur l'amélioration des données et l'optimisation de l'algorithme afin de pouvoir traiter de grandes quantités de données. Ces données vont être comparées avec celles qui ont été générées par le Laboratoire de Météorologie Dynamique.

D'un autre côté, l'équipe de l'IASB essaie de dériver des données pour le méthane avec une sensibilité accrue à la concentration à la surface (où le méthane est produit) et avec plus de détails concernant sa distribution verticale dans la troposphère. Pour cela, on parlait de la combinaison des différents canaux spectraux de TANSO-FTS/GOSAT dans l'infrarouge proche et thermique. De telles données sont importantes pour le climat et la modélisation inverse. Cette étude a montré qu'il y a encore des disparités entre les différentes régions spectrales, qui sont vraisemblablement dues aux incohérences dans les paramètres spectroscopiques. Deux publications à ce sujet sont en préparation [De Wachter et al., 2015; De Lange et al., 2015].

“En 2013-2014 l'accent a été mis sur l'amélioration des données et l'optimisation de l'algorithme afin de pouvoir traiter de grandes quantités de données.”

AÉROSOLS DÉSERTIQUES

Leur impact sur le climat

Les aérosols de type désertique sont des particules minérales (poussière, sable) mises en suspension dans l'air suite à l'érosion des surfaces arides par des vents cisaillants (ayant une composante parallèle à la surface). Les émissions de ces particules sont majoritairement naturelles, mais dépendent également de l'activité de l'homme via la désertification, la déforestation et l'utilisation des sols. Les aérosols désertiques sont présents principalement dans les Tropiques, mais certaines tempêtes de sable parviennent également en Europe, comme celle qui a submergé Londres au début du mois d'avril 2014.

Ces aérosols influencent le climat de plusieurs manières, les effets étant parfois opposés. Citons pour commencer leur interaction avec l'énergie solaire parvenant à notre planète: les aérosols réduisent, par absorption et diffusion, la quantité de cette énergie qui atteint la surface, menant ainsi à un refroidissement de la surface. Les aérosols désertiques interagissent également avec l'énergie thermique émise par la Terre (à nouveau par absorption et diffusion), en réduisant la quantité de cette énergie qui s'échappe de notre atmosphère et menant cette fois à un réchauffement de la surface de la Terre. Ces deux effets étant opposés, il est très difficile de déterminer l'effet final des aérosols désertiques sur la température de la surface. Celui-ci dépendra de différents paramètres dont l'un des plus importants est la distribution verticale des aérosols.

Comme troisième effet sur le bilan radiatif terrestre, ces

aérosols émettent des radiations thermiques, comme tout corps à une température supérieure au zéro absolu (0K = -273.16°C). Cette émission thermique localisée réchauffe les couches atmosphériques contenant les aérosols (dans la troposphère, généralement sous 6 km d'altitude) et dépend de la température et donc de l'altitude des aérosols. Ces modifications de température de la surface et au sein de l'atmosphère peuvent avoir pour conséquence une modification de la dynamique atmosphérique, en plus des conséquences directes climatiques.

Enfin, les aérosols désertiques sont d'efficaces noyaux de condensation et favorisent la formation de gouttelettes (d'eau et de glace) dans les nuages. Cela a pour effet de modifier la durée de vie des nuages, ainsi que la quantité de pluie. Ces modifications ont elles-mêmes également un effet sur le climat, ce qu'on appelle alors l'effet indirect des aérosols.

IASI, l'Infrared Atmospheric Sounding Interferometer

En 2012, l'équipe infrarouge a développé une méthode permettant d'obtenir la distribution en altitude des aérosols de type désertique, au départ de spectres infrarouges mesurés par l'instrument satellite IASI à une longueur d'onde entre 3 et 16 microns, dans le spectre d'émission thermique de la Terre. L'utilisation de ce type d'instrument permet des me-

sures durant la journée et durant la nuit, puisque la présence de lumière solaire n'est pas nécessaire. IASI est un excellent candidat pour de la recherche liée au climat, étant donné que presque 10 ans de données sont déjà disponibles. En

“Les premiers résultats montrent déjà une détection de poussières bien plus fréquente le matin que le soir, et en des endroits différents, suggérant effectivement un mécanisme différent pour les émissions matinales et nocturnes.”

plus, il est prévu que des instruments du même type soient mis en orbite de manière à poursuivre la série temporelle cohérente pour encore minimum 10 ans.

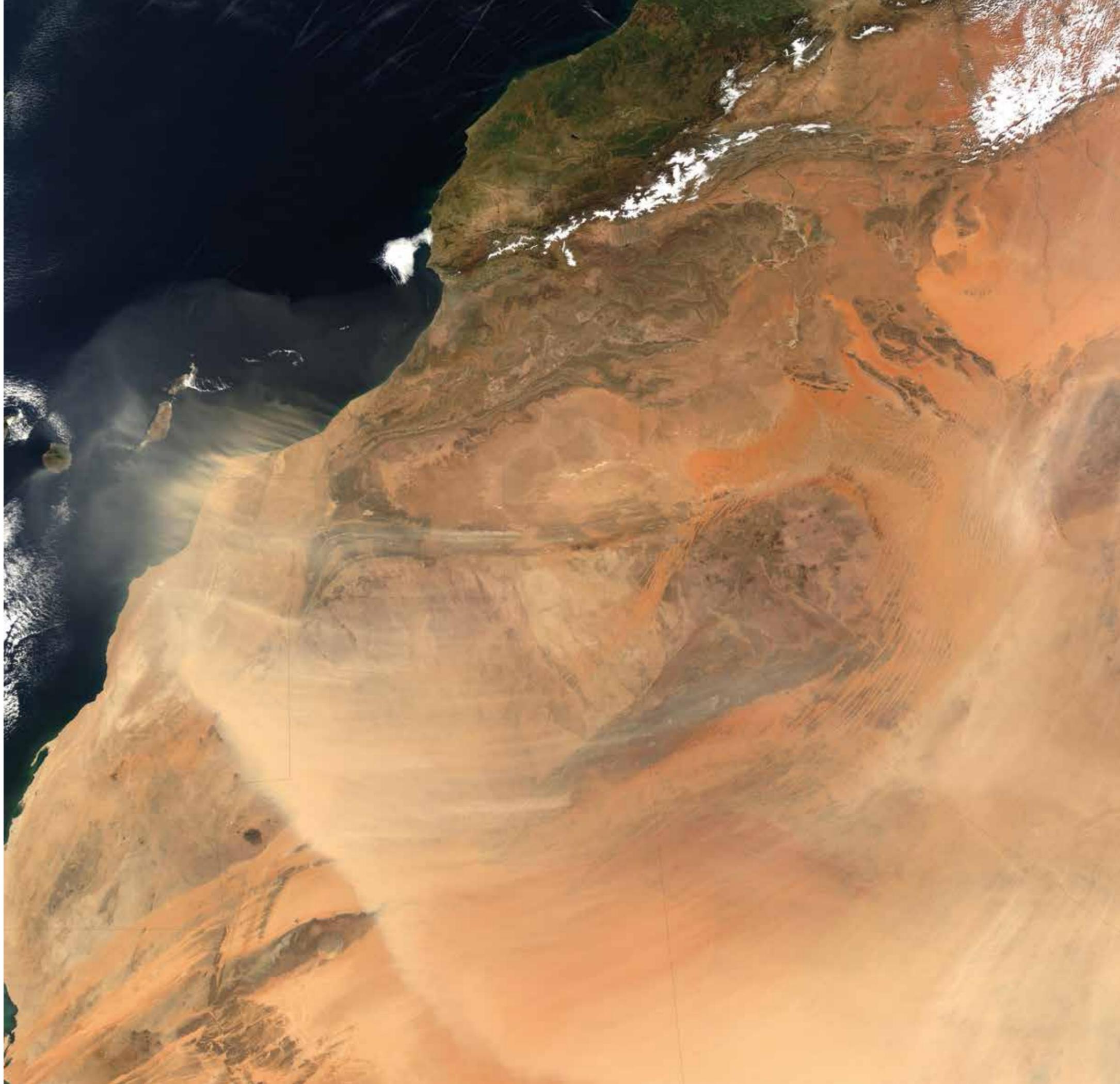
En 2013 et 2014, la méthode a été réétudiée, simplifiée, améliorée et mise dans une chaîne de traitement presque opérationnelle de manière à pouvoir gérer l'énorme quantité de données IASI disponibles, le tout avec un support non-négligeable de l'équipe IT. Un premier test à grande échelle a été réalisé avec le traitement des données IASI pour l'année 2013 au complet, sur la zone géographique la plus affectée par les aérosols désertiques (0°-40°N, 80°O-90°E). L'analyse

des résultats est en cours, mais ceux-ci semblent déjà prometteurs. Les profils verticaux obtenus contiennent environ deux degrés de liberté (deux pièces d'information indépendantes). Cela signifie que même si l'on obtient la concentration en aérosols à 7 altitudes différentes (de 0 à 6 km, par pas de 1 km), le résultat obtenu à chaque altitude est corrélé avec les résultats aux autres altitudes, et l'algorithme est en fait capable de distinguer maximum deux couches d'aérosols. Cela peut sembler faible, mais en réalité c'est un bon résultat pour un satellite à visée au nadir.

Nouvelles perspectives grâce à IASI

En plus des applications liées au climat, la disponibilité de profils verticaux d'aérosols désertiques deux fois par jour (jour et nuit) au-dessus des zones sources permettra une étude des émissions sous un nouvel angle. En effet, la majorité des instruments satellite permettant une bonne couverture géographique fournissent uniquement une information sur la quantité totale d'aérosols (pas d'information sur leur altitude), et uniquement pendant la journée. En particulier, l'instrument MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) qui est très largement utilisé dans l'étude des aérosols, fournit au-dessus du Sahara uniquement une colonne totale d'aérosols en milieu de journée. Ceci est une période à laquelle les émissions de poussières sont les plus faibles.

Notre méthode utilisant les données IASI permet d'obtenir la distribution verticale des poussières désertiques en début de matinée, moment où l'un des mécanismes d'émission est le plus actif, et en début de soirée, à un moment où aucune mesure basée sur le rayonnement solaire ne peut fournir de données. Les premiers résultats montrent déjà une détection de poussières bien plus fréquente le matin que le soir, et en des endroits différents, suggérant effectivement un mécanisme différent pour les émissions matinales et nocturnes. Une étude plus approfondie de ces résultats, et une comparaison avec d'autres études publiées, sont en cours.





2

AÉRONOMIE ET COUCHE D'OZONE

Notre planète est entourée par une fine couche d'ozone qui filtre une partie importante du rayonnement ultraviolet émis par le Soleil. Cette couche d'ozone se trouve dans la stratosphère, entre 20 et 40 km d'altitude, et est endommagée par le chlore contenu dans les chlorofluorocarbones (CFC). La découverte de cette destruction, pendant les années 1980, a fortement inquiété la communauté internationale; pour la première fois, il était prouvé que des activités humaines pacifiques pouvaient endommager gravement notre environnement à l'échelle de la planète. Outre son rôle de protection de la vie sur Terre par son action sur le rayonnement ultraviolet le plus agressif, la distribution géographique et verticale de l'ozone conditionne le bilan radiatif dans l'atmosphère et influence la température, la dynamique et la composition de l'atmosphère. L'évolution de la couche d'ozone est donc intimement liée à celle du climat et réciproquement.

Suite au Protocole de Montréal de 1987 interdisant la production des CFC, leur concentration a commencé à décroître dans la stratosphère à partir de la fin des années 1990. La restauration complète de cette couche protectrice n'est cependant pas attendue avant environ un demi-siècle. Il est crucial de surveiller de près son évolution et d'en comprendre les mécanismes, dans une atmosphère changeant rapidement suite à l'augmentation des gaz à effet de serre. Plusieurs programmes de recherche et de surveillance sont mis en œuvre dans ce but. Ils sont effectués par des organisations internationales sous l'égide des Nations Unies ainsi que par l'Union Européenne à travers le programme Copernicus. Grâce à son exceptionnelle expertise dans ce domaine, l'IASB fournit une contribution de premier plan à ces efforts.

Comment peut-on surveiller l'évolution de la couche d'ozone ?

(Jean, finance manager)

UNE SURVEILLANCE MINUTIEUSE DE LA COUCHE D'OZONE

Des séries temporelles de données d'ozone

L'étude des interactions entre la couche d'ozone et le climat nécessite des observations s'étalant au minimum sur plusieurs décennies. L'IASB apporte une contribution substantielle à cet effort, tant par son implication dans des réseaux de mesure au sol que par sa participation à de grands projets internationaux ayant pour objectif l'établissement de séries temporelles de données d'ozone cohérentes, fiables et précises.

"Cette homogénéisation des données, est le but premier du projet Ozone_CCI."

Un de ceux-ci est l'ambitieux projet Ozone_CCI, financé par l'Agence Spatiale Européenne au sein du programme CCI (Climate Change Initiative) visant à améliorer l'exploitation des observations de l'ensemble des instruments satellitaires européens de sondage atmosphérique. L'IASB est largement impliqué dans ce projet: il en assure la coordination, mais également la production de jeux de données de colonnes totales d'ozone ainsi que le contrôle de qualité, à l'aide d'instruments au sol, des autres jeux de données produits par les partenaires internationaux impliqués dans ce projet. Les colonnes totales, représentant la quantité d'ozone au-dessus

Trous d'ozone au-dessus du Pôle Sud observés depuis l'espace par les instruments GOME, SCIAMACHY et GOME-2 entre 1996 et 2014. Le phénomène se produit chaque année au printemps austral depuis la fin des années 70 avec une intensité variable selon les conditions dynamiques et météorologiques. De par la diminution progressive des concentrations des substances destructrices d'ozone liée au protocole de Montréal et à ses amendements, le phénomène devrait progressivement diminuer au cours des prochaines décades.

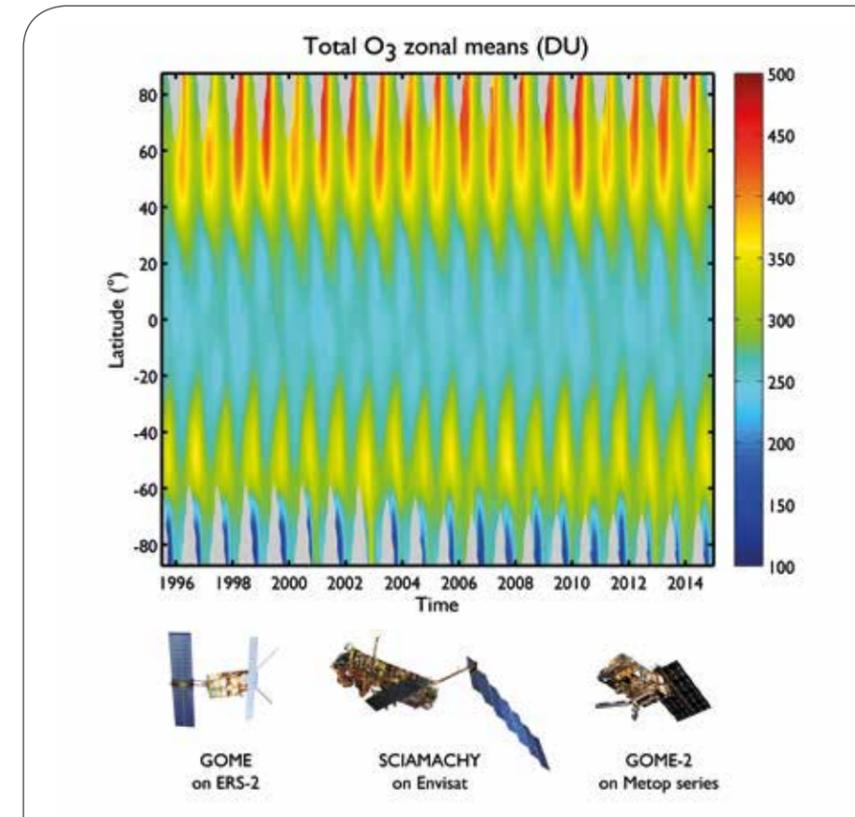
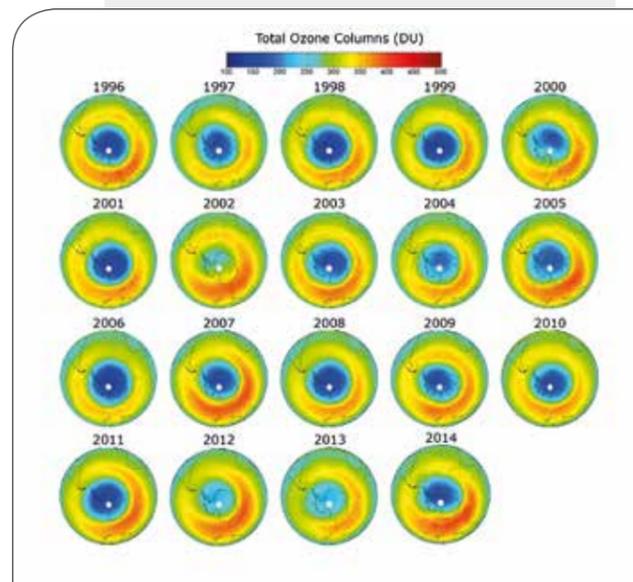


Illustration du jeu de données multi-senseurs de colonnes totales d'ozone produit à l'IASB et basé sur les observations des instruments européens GOME (1996-2003), SCIAMACHY (2003-2006) et GOME-2 (2007-2014). Les colonnes d'ozone moyennes sont montrées en unités Dobson en fonction de la latitude et du temps. Les colonnes anormalement faibles liées à la destruction d'ozone stratosphérique se produisant chaque année au printemps austral sont clairement visibles (zones bleues proches du Pôle Sud).

d'un endroit donné, sont mesurées depuis presque un siècle et constituent un paramètre très important pour caractériser l'évolution à long terme de l'atmosphère.

La cohérence des mesures par des satellites différents

La durée de vie d'une mission satellite étant typiquement d'une dizaine d'années, il est crucial d'obtenir une cohérence maximale entre les observations fournies par différents instruments afin de constituer de très longues séries temporelles utiles à la recherche climatique. Cette homogénéisation des données en tenant compte de leurs caractéristiques propres et des performances réelles de chaque instrument, est le but premier du projet Ozone_CCI. Un des grands succès engrangé fut la production de données multi-senseurs de colonnes totales d'ozone avec les outils d'analyse de l'IASB appliqués aux observations des instruments GOME, SCIAMACHY et GOME-2. La validation de ce jeu de données couvrant près de vingt ans de données a confirmé que sa qualité le rend tout à fait adapté à l'étude de l'évolution du climat. Divers travaux comparant ces séries temporelles à celles obtenues par nos partenaires américains par homogénéisation de leur propres observations satellitaires ont montré le haut degré de cohérence des deux ensembles de données.

Une autre contribution essentielle de l'IASB au projet Ozone_CCI a consisté en l'étude comparative des performances de différents algorithmes pour l'obtention de profils verticaux. Ces profils, qui fournissent une information détaillée en fonction de l'altitude, sont essentiels pour comprendre l'évolution de l'ozone car les mécanismes régissant cette évolution dépendent de la couche concernée: le transport est le processus dominant la variabilité de l'ozone dans la basse stratosphère, alors que la chimie domine celle de la haute stratosphère. En se basant sur les concepts de la théorie de l'information et sur une confrontation avec des données de références provenant de mesures au sol, les points forts et points faibles de chaque algorithme ont pu être identifiés. Cette information fournit ainsi des éléments objectifs pour la sélection finale de l'algorithme répondant le mieux aux besoins de l'utilisateur final.

"L'IASB a mis au point une stratégie d'analyse permettant de déterminer la contribution à la colonne totale de différentes couches en altitudes."

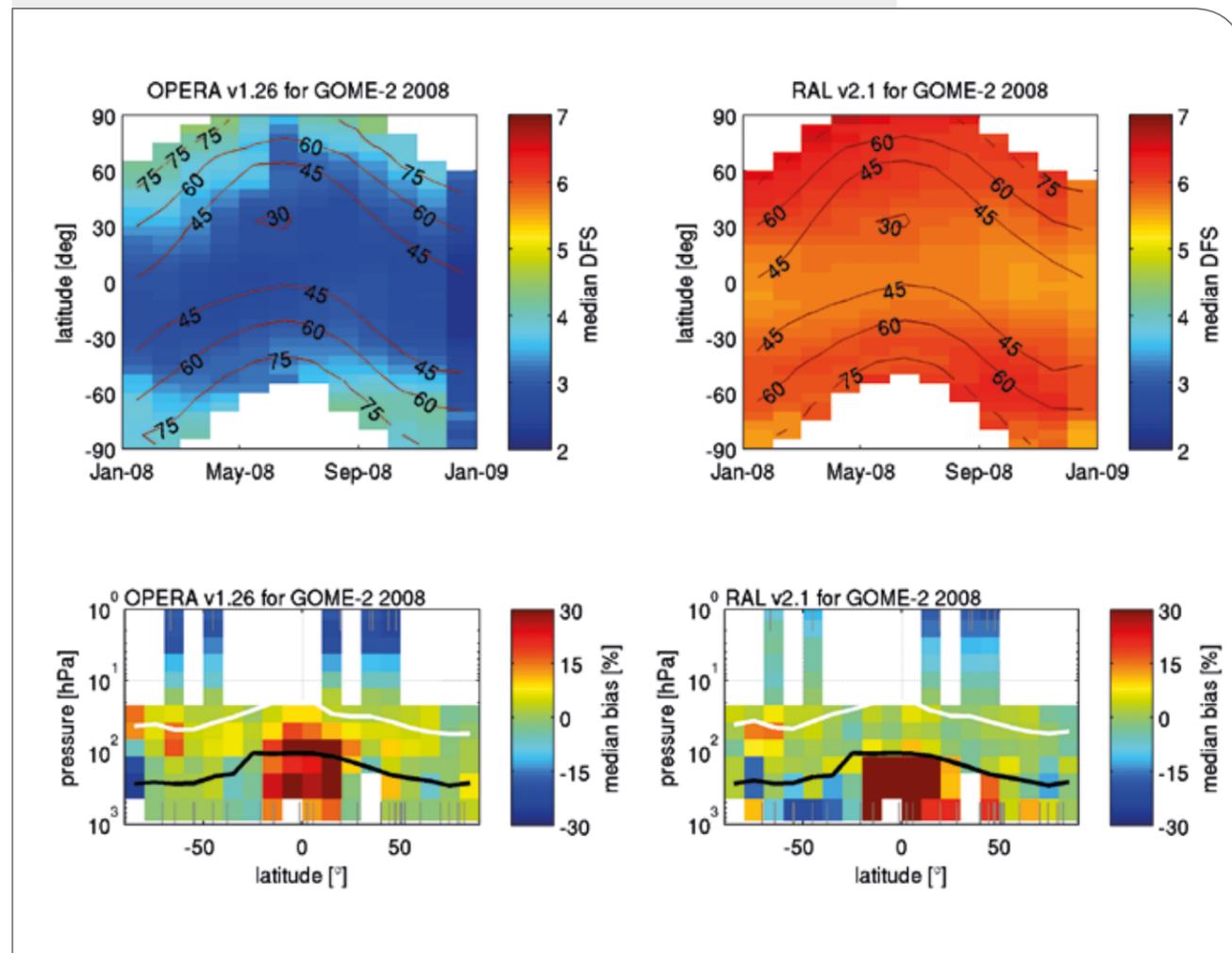
La continuité des observations depuis le sol: une longue tradition au service de réseaux internationaux

L'IASB possède également une longue tradition de mesures d'ozone depuis le sol, notamment à partir de spectromètres FTIR (Fourier Transform InfraRed spectroscopy), et contribue largement à ce titre au réseau international de mesures NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change). Ces mesures de spectres d'absorption solaire permettent de déterminer avec une grande précision (environ 2% actuellement) la colonne totale d'ozone présente au-dessus d'une station de mesures donnée. En analysant plus finement le contenu en information disponible dans les spectres, l'IASB a mis au point une stratégie d'analyse permettant de déterminer la contribution à la colonne totale de différentes couches en altitude. Des colonnes par-

tielles d'ozone ont ainsi pu être dérivées pour quatre zones d'altitudes réparties respectivement dans la troposphère, la basse, moyenne et haute stratosphère, avec une précision de l'ordre de 5 à 6%.

Avec de tels atouts, l'IASB est parfaitement préparé pour continuer à jouer un rôle majeur dans la surveillance de la couche d'ozone depuis le sol comme depuis l'espace, et pour contribuer de manière significative à l'étude de son évolution temporelle liée aux effets du protocole de Montréal mais également aux changements induits par le réchauffement climatique.

Illustration de l'examen de deux critères de sélection (en haut: nombre de degrés de liberté indiquant le contenu en information des données; en bas: erreur systématique montrant des performances clairement différentes pour les deux algorithmes de traitement de données au nadir GOME-2 testés. Les résultats de cette étude comparative effectuée par l'IASB menèrent à la sélection finale de l'algorithme RAL (à droite) pour cette application.



L'ÉVOLUTION DE LA COUCHE D'OZONE SOUS LA LOUPE

Contributions de l'IASB aux études de tendance de l'évolution de l'ozone

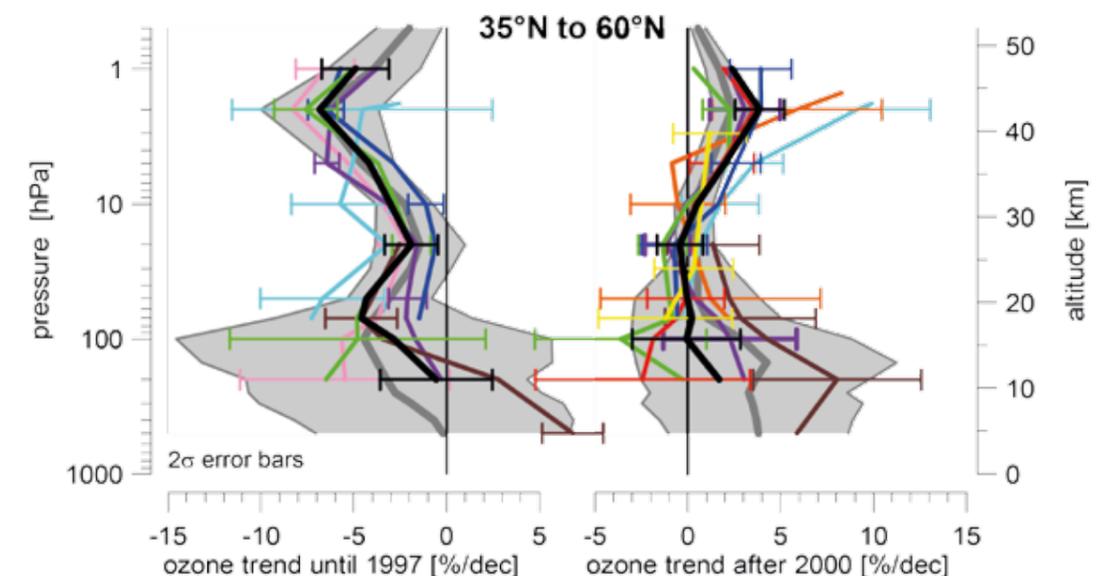
Tous les quatre ans, l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale) et l'Unep (United Nations Environment Programme) établissent un rapport consacré à l'évaluation scientifique de la destruction de la couche d'ozone. La surveillance de cette évolution est rendue difficile par la faible valeur attendue des tendances à long terme (2-3% par décennie) alors que l'ozone possède une très grande variabilité à court et moyen terme. En vue de la préparation du rapport 2014, différentes grandes associations internationales, réunies sous l'initiative commune SI²N (SPARC/IO₃C/IGACO-O₃/NDACC) ont été chargées d'étudier et de documenter les changements affectant la distribution d'ozone au niveau global.

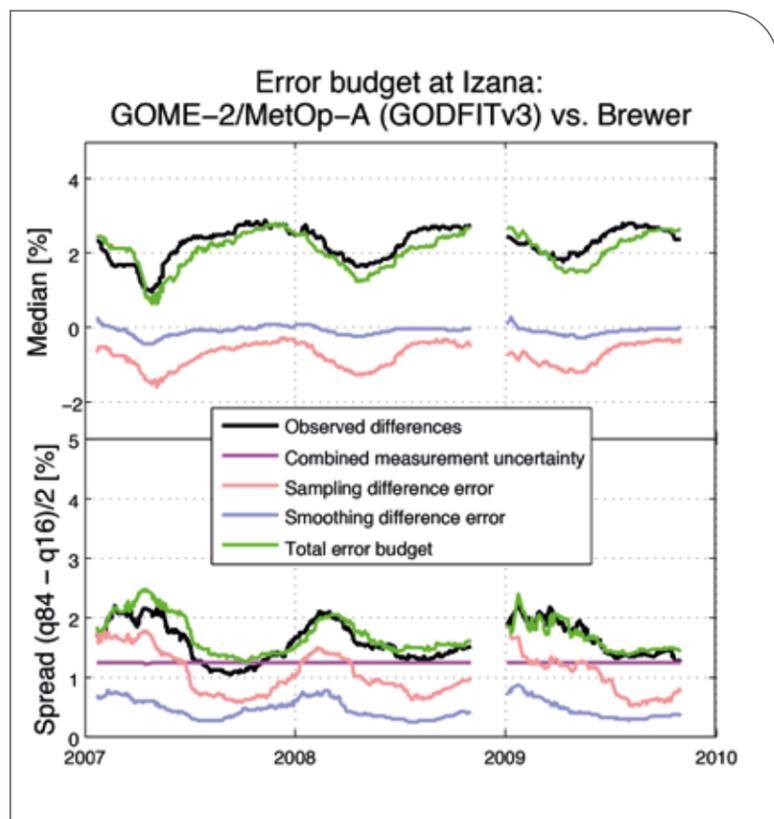
Il s'agit de l'organisation SPARC étudiant les processus stratosphériques régissant le climat, de l'IO₃C (Commission

Internationale pour l'Ozone), du réseau de mesures au sol NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change), ainsi que de IGACO-O₃ (Integrated Global Atmospheric Chemistry Observation-Ozone), une activité de l'OMM ayant pour objectif de regrouper l'ensemble des mesures d'ozone provenant d'instruments au sol, aéroportés ou spatiaux. L'IASB est largement impliqué dans plusieurs de ces organisations et a participé à l'initiative commune SI²N, par l'étude des séries temporelles d'ozone mesurées soit par satellite, soit au sol par des spectromètres infrarouges à transformée de Fourier (FTIR), mais aussi en assurant les aspects de validation.

Les mesures FTIR réalisées au sein du réseau NDACC ont permis d'obtenir une estimation précise des tendances suivies par l'évolution temporelle des profils verticaux

Ce graphique publié dans le rapport 2014 de l'OMM sur l'évaluation scientifique de l'appauvrissement de la couche d'ozone, montre les tendances de l'évolution de la concentration en ozone, pour les périodes avant 1997 (à gauche) et après 2000 (à droite), pour la bande de latitude 35°N-60°N et pour différents instruments et modèles. La courbe jaune relative aux tendances après 2000, avec barre d'erreurs montrant l'incertitude sur la tendance, concerne les mesures FTIR à la station Jungfraujoch traitées par l'IASB. On notera l'inversion de tendance plus marquée dans la haute stratosphère plus sensible aux changements chimiques de l'atmosphère: les tendances d'ozone négatives du passé (à gauche) témoignant de la destruction de l'ozone, ont fait place à des tendances positives pour la période 2000-2012 (à droite). Dans le cas des mesures FTIR, cette tendance positive est encore à la limite de la détection (+0.9±1.0 % par décade).





Budget d'erreur pour les colonnes totales au-dessus de la station Izaña (Iles Canaries) pour une comparaison entre les données satellitaires GOME et les données mesurées depuis le sol entre 2007 et 2009. Les lignes noires montrent les différences observées ; les lignes de couleur reconstruisent les causes de ces différences. Les lignes vertes montrent le total de la reconstruction: leur excellent accord avec les lignes noires démontrent notre capacité à expliquer presque entièrement les raisons des désaccords entre instruments au sol et instruments satellitaires.

d'ozone sur la période 1995-2012, en collectant et en analysant les séries temporelles mesurées par 8 stations réparties sur l'Europe, le Groenland, l'Australie et la Nouvelle-Zélande. Les résultats de cette analyse qui montre des situations contrastées selon les latitudes et la couche atmosphérique envisagée, ont été utilisés dans le rapport d'évaluation 2014 de l'OMM.

“L'IASB met également son expertise en métrologie au service de l'initiative SI²N en assurant les aspects de contrôle et assurance de qualité.”

De même, les séries temporelles de données satellites provenant du projet Ozone_CCI ont contribué à la mise à jour de l'estimation des tendances à long terme des colonnes totales d'ozone. Celles-ci ont cessé de diminuer au milieu des années 90, tendant ainsi à confirmer l'efficacité du protocole de Montréal et de ses amendements. Elles auraient même commencé à augmenter d'environ 1% par décennie depuis l'an 2000. Les incertitudes associées à l'estimation de ces tendances restent toutefois importantes et une extension des jeux de données d'au moins plusieurs

années est indispensable pour affirmer avec certitude que les augmentations de colonnes d'ozone observées résultent bien de la diminution des concentrations de substances détruisant l'ozone. Cela nécessitera donc la continuation des observations au moyen de nouveaux instruments satellitaires. L'IASB s'y prépare en s'impliquant dans la préparation de futures missions spatiales, telles les missions Sentinel-5-Precursor, Sentinel-4-Precursor et Sentinel-5 du programme européen Copernicus. Celles-ci permettront un contrôle permanent de la composition atmosphérique jusqu'à l'horizon 2030.

Contrôle de la qualité des données: une tâche complexe pour un enjeu essentiel

Nombreux sont les types d'instruments utilisés pour dériver ces tendances de l'abondance d'ozone dans la stratosphère: spectromètres FTIR, ondes micrométriques, sondes ozones aéroportées par ballons atmosphériques, lidars, ainsi qu'une série d'instruments satellitaires basés sur différentes techniques de mesure. Obtenir de telles tendances en combinant des données produites par une si grande variété d'instruments et de techniques est un énorme défi nécessitant une excellente compréhension des nombreux facteurs influençant la mesure et son contenu en information: nature et spécificités de la technique utilisée, résolution de

l'instrument, couverture géographique et temporelle, incertitude des mesures. Les algorithmes de traitement de données et leur mise en œuvre influencent également la qualité et les performances des produits obtenus. Enfin, le contenu en information des mesures peut varier en fonction de certains paramètres comme l'altitude.

L'IASB met également son expertise en métrologie au service de l'initiative SI²N en assurant les aspects de contrôle et assurance de qualité. Différentes méthodes d'homogénéisation des données à comparer sont utilisées, et appliquées aux divers jeux de mesures. Dans chaque cas, l'analyse métrologique donne lieu à une évaluation complète de la qualité des données, en fonction de différents critères permettant

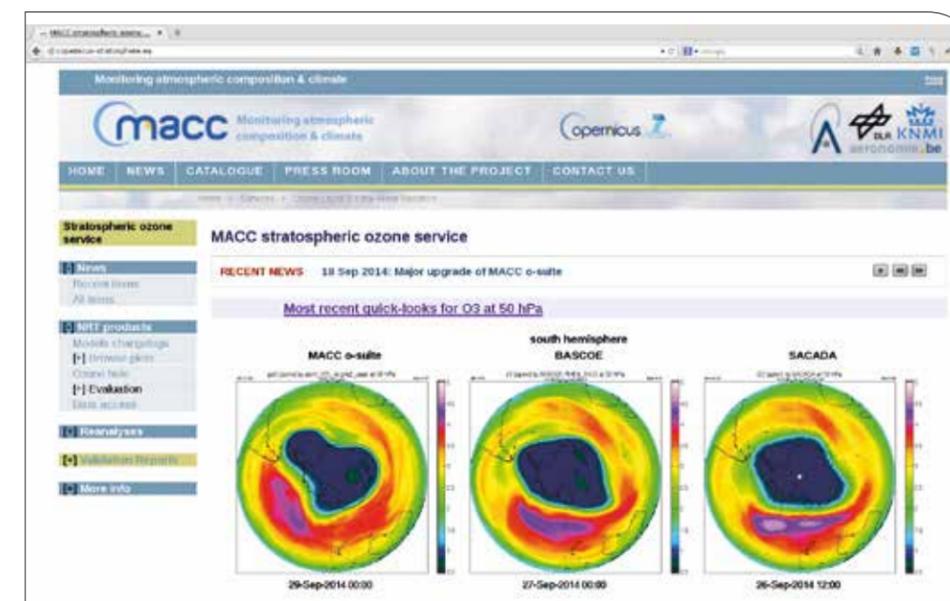
à chaque utilisateur de sélectionner de manière optimale les meilleures données en fonction de l'application envisagée. En joignant ses compétences en matière de mesures d'ozone, de traitement et d'analyse des données, de validation et d'évaluation de la qualité des mesures, l'IASB contribue de manière importante aux efforts déployés par la communauté internationale pour scruter la restauration progressive de la couche d'ozone, et en comprendre les mécanismes dans une atmosphère en rapide évolution.

PARTICIPATION DE L'IASB AU PROGRAMME EUROPÉEN COPERNICUS

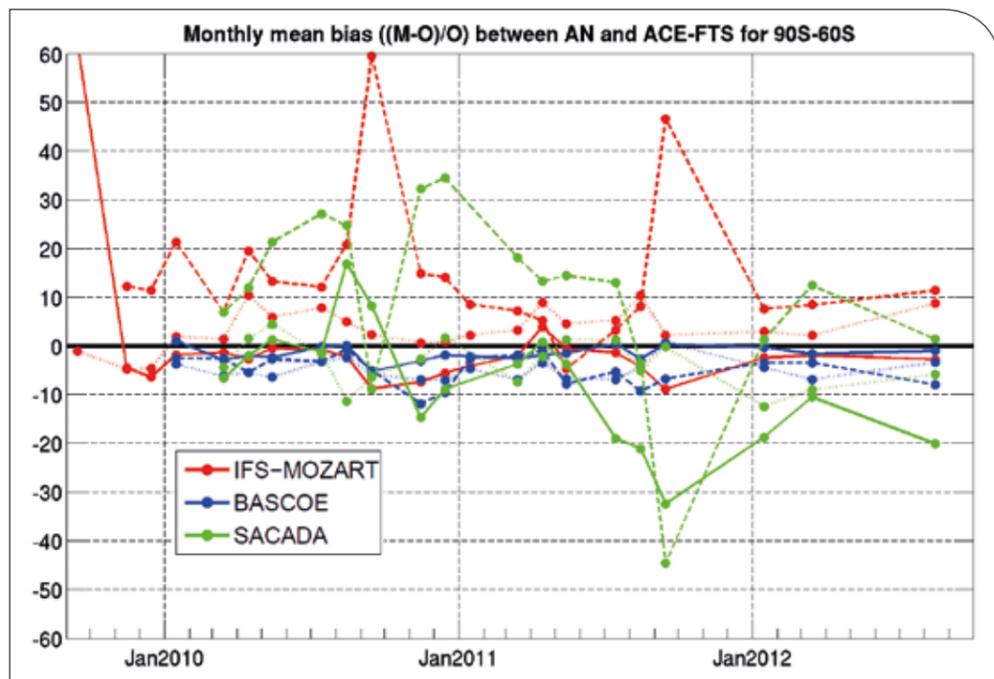
L'état de la stratosphère au jour le jour

Copernicus est le programme-phare de l'Union Européenne pour l'observation de la Terre et la surveillance opérationnelle de notre environnement. La composante atmosphérique de ce programme est fournie par les projets MACC-II et MACC-III (Monitoring Atmospheric Composition & Climate). Parmi les contributions de l'IASB à ces projets, on retrouve

“Le système BASCOE, mis en œuvre grâce au programme Copernicus, fournit non seulement l'abondance de l'ozone mais également d'autres gaz liés à sa destruction.”



Page d'accueil du service MACC pour l'ozone stratosphérique sur le site web de Copernicus (www.copernicus-stratosphere.eu)



Différences relatives entre les quantités d'ozone calculées par trois systèmes d'assimilation et celles mesurées par l'instrument ACE-FTS, au cours des années 2009-2012 et au-dessus de l'Antarctique. Les performances sont meilleures lorsque les lignes sont plus proches de l'horizontale centrale (0%). Les lignes bleues indiquent les résultats du système BASCOE développé par l'IASB.



la surveillance de la couche d'ozone. Celle-ci est assurée par le service de l'ozone stratosphérique, fourni par l'IASB au travers d'un site web dédié.

Ce service exploite des systèmes sophistiqués d'assimilation de données pour fournir des cartes continuellement mises à jour de la quantité d'ozone présente dans la stratosphère. Ces systèmes d'assimilation sont basés sur des modèles numériques calculant non seulement la météorologie mais aussi la composition chimique de l'atmosphère. Ils prennent en compte les observations satellitaires les plus récentes pour fournir la description la plus précise possible de l'état de la stratosphère au cours des derniers et des prochains jours.

L'excellence du service d'assimilation confirmée par des intercomparaisons

Le service d'ozone stratosphérique compare en permanence les résultats fournis par quatre systèmes d'assimilation: BASCOE (Belgian Assimilation System for Chemical Observations), créé et mis en œuvre par l'IASB, et trois autres systèmes fournis par d'autres partenaires européens du projet. L'intercomparaison de ces résultats a été publiée en 2014 dans un journal scientifique, et établit que le système BASCOE délivre les meilleurs résultats grâce à une utilisation judicieuse des données satellitaires.

L'excellence du système BASCOE en a fait la source de données de référence pour la surveillance de la couche d'ozone

stratosphérique, non seulement au sein du programme Copernicus mais également auprès de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Cette agence des Nations Unies émet chaque année une série de bulletins sur l'évolution du trou d'ozone au-dessus de l'Antarctique, car ce phénomène se répète chaque année entre août et novembre (càd. au printemps austral) sous l'effet d'une combinaison de causes météorologiques (la présence d'un cyclone polaire

“L'IASB s'impose donc également comme un partenaire privilégié dans la modélisation et la prévision de l'état de l'atmosphère, et en particulier, de celui de sa précieuse couche d'ozone.”

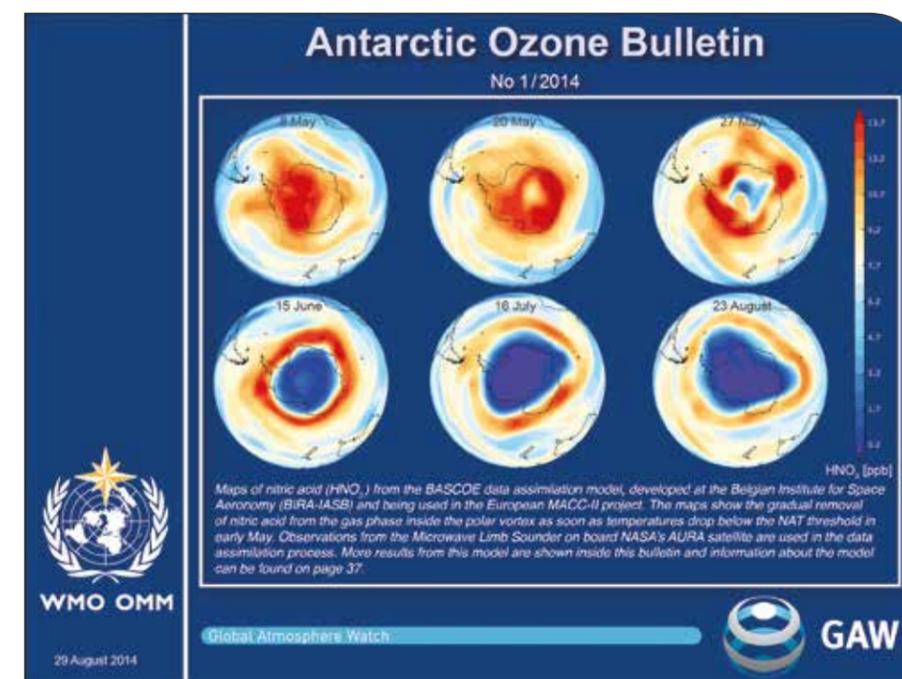
intense et stable persistant pendant l'été et l'automne) et chimiques (les effets du chlore trouvant son origine dans les émissions humaines de CFC). Le système BASCOE, mis en œuvre grâce au programme Copernicus, fournit non seulement l'abondance de l'ozone mais également d'autres gaz liés à sa destruction. Ces résultats sont abondamment utilisés par le bulletin de l'ozone Antarctique de l'OMM, et ont même été choisis pour en illustrer sa page de couverture.

La qualité des analyses fournies par BASCOE est due à un patient investissement de recherche dans le domaine

de l'assimilation des données satellitaires par les modèles atmosphériques. Cette recherche se poursuit par le développement d'une nouvelle version de BASCOE utilisant la méthode du filtrage de Kalman d'ensemble. Grâce à son approche probabiliste, cette méthode fournit pour la première fois une estimation des incertitudes associées aux analyses. Ces développements permettront aux modèles de répondre aux exigences posées par la météorologie et d'évaluer l'évo-

lution à long terme de la couche d'ozone dans le cadre du changement climatique.

A côté des aspects de mesures et de traitement de données, l'IASB s'impose donc également comme un partenaire privilégié dans la modélisation et la prévision de l'état de l'atmosphère, et en particulier, de celui de sa précieuse couche d'ozone.



Page de couverture du premier bulletin de l'ozone Antarctique émis par l'OMM en 2014. Les six cartes représentent l'évolution de la quantité d'acide nitrique présente dans la stratosphère au-dessus de l'Antarctique, telle que calculée par BASCOE entre le 8 mai et le 23 août 2014. La raréfaction de l'acide nitrique (zones bleues) est un indicateur précoce de la destruction de l'ozone au cours des semaines suivantes.



3

QUALITÉ DE L'AIR

Pour vivre, un être humain a besoin d'environ entre 10.000 et 15.000 litres d'air chaque jour, ce qui représente entre 12 et 18 kg d'air. Quand cet air est modifié par des éléments qui sont nuisibles à notre santé et à notre environnement, on dit que l'air est pollué. Les polluants atmosphériques peuvent être d'origine naturelle (émissions volcaniques, plantes produisant des pollens, feux de brousse ...), mais également dues aux activités humaines telles que transport, industrie, chauffage, agriculture, incinération des déchets, etc.

A l'IASB, diverses recherches sont menées en vue de mieux caractériser l'état de la qualité de l'air à l'échelle globale et son évolution dans le temps, et de contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes et processus qui l'influencent. Ces recherches se basent d'une part sur l'observation d'un certain nombre de polluants clés à partir de senseurs optiques UV-visible et infrarouge embarqués à bord de satellites ou déployés au sol ou en avion. Ces mesures nous renseignent sur la distribution globale d'espèces chimiques telles que le dioxyde d'azote, l'ozone, le dioxyde de soufre ou le formaldéhyde qui sont les principaux acteurs de la pollution urbaine mais sont également émis par différents processus naturels tels que la respiration de la végétation ou les éruptions volcaniques.

Par ailleurs l'IASB développe également une recherche axée sur la modélisation des émissions de polluants visant à mieux comprendre les processus influençant la qualité de l'air et à les quantifier en synergie avec les observations. L'étude se concentre en particulier sur les émissions liées à la végétation, qui représente de loin la plus grande source de composés organiques dans l'atmosphère. Les changements dans ces émissions sont par ailleurs intimement liés aux changements climatiques.

Est-ce que la respiration des arbres influence la qualité de l'air ?

Atka (kinésithérapeute, 28 ans)

LES ÉMISSIONS D'ISOPRÈNE PAR LA VÉGÉTATION

Des émissions difficiles à estimer

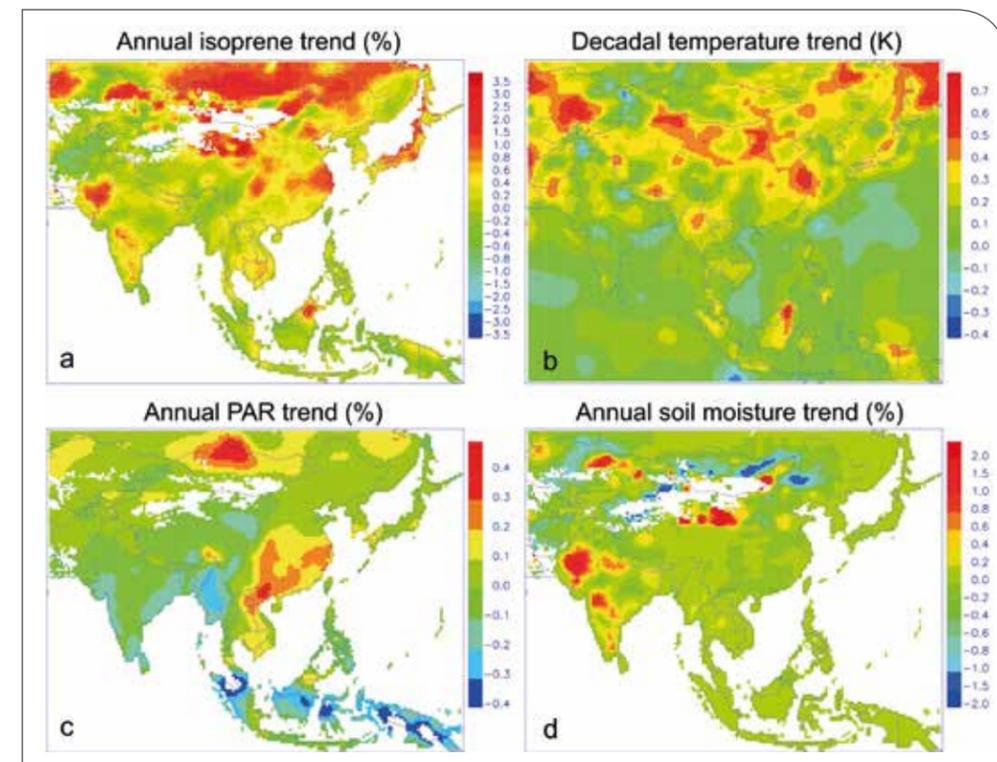
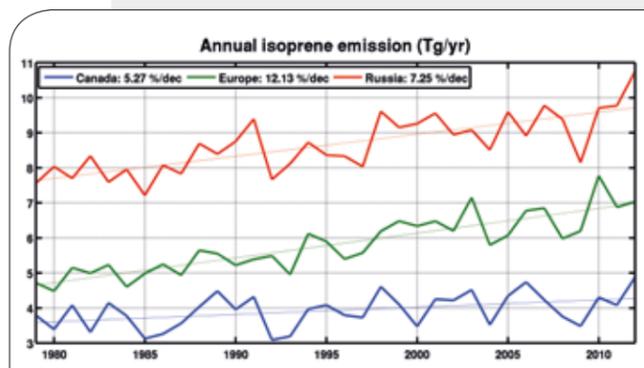
L'isoprène ($\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{CH}=\text{CH}_2$) est le plus important hydrocarbure biogénique, avec des émissions annuelles globales d'environ 500 millions de tonnes. Très réactif, responsable d'une production substantielle d'ozone troposphérique dans des milieux pollués, l'isoprène contribue aussi à la formation de particules fines impliquées dans la détérioration de la qualité de l'air. Ces processus complexes et encore mal compris font l'objet d'intenses recherches, entre autres à l'IASB.

La quantification des émissions d'isoprène est une grande source d'incertitude. Elles dépendent principalement de la nature et de l'abondance des plantes et sont modulées par la météorologie, particulièrement la température et le rayonnement solaire visible, mais aussi l'humidité du sol et la concentration en CO_2 . Pour ces raisons, les émissions sont affectées par la variabilité climatique, les changements d'utilisation des sols (déforestation ...) et les changements de composition de l'air. Peut-on quantifier ces effets ?

“Très réactif, responsable d'une production substantielle d'ozone troposphérique dans des milieux pollués, l'isoprène contribue aussi à la formation de particules fines impliquées dans la détérioration de la qualité de l'air.”

Afin d'estimer ces émissions entre 1979 et 2012, nous avons utilisé le modèle d'émission MEGAN (Guenther et al., GMD, 2012) couplé au modèle micro-météorologique de la canopée MOHYCAN développé à l'IASB. MEGAN se base sur une distribution détaillée des facteurs d'émission déduits de mesures sur le terrain. Il tient compte des effets de la météorologie et de l'âge des feuilles. Les champs météorologiques sont fournis par les analyses du centre européen ECMWF. Notre intérêt s'est focalisé sur l'Asie de l'Est, qui connaît une forte croissance des niveaux de pollution et des changements rapides d'utilisation des sols.

Evolution des émissions d'isoprène (1979-2012) calculées sur des grandes régions de l'hémisphère nord.



Tendance annuelle en %
(a) des émissions d'isoprène
(c) du rayonnement solaire visible
(d) de l'humidité des sols

Tendance par décade en K
(b) de la température

Les calculs sont basés sur des champs météorologiques fournis par ECMWF pour la période entre 1979 et 2012.

PAR= Photosynthetically Active Radiation

Des émissions influencées par les changements de climat

Les changements climatiques induisent des variations substantielles des émissions. La température et le rayonnement solaire conditionnent la variabilité des flux d'isoprène, excepté dans les régions arides, où l'humidité joue un rôle déterminant. Les tendances des flux d'isoprène les plus élevées (1-3% par an) sont calculées en Chine, en Sibérie et dans des régions arides de l'Inde. En Chine, la croissance des flux (5.2% par décade) est surtout due au réchauffement (0.3 degré/décade). Les émissions augmentent plus rapidement encore dans d'autres régions de l'hémisphère nord, comme l'Europe et la Russie. Ces résultats suggèrent que les émissions continueront à augmenter dans l'avenir en réponse aux changements climatiques, et qu'il faudra en tenir compte dans les projections de la qualité de l'air.

Des émissions plus faibles que prévues en Asie du Sud-Est?

Nous avons aussi déterminé à l'aide du modèle couplé les effets (i) des changements d'utilisation des sols, dont l'expansion des palmeraies en Asie du Sud-Est (ii) de l'évolution du rayonnement solaire (« obscurcissement/éclaircissement ») en réponse aux changements de nébulosité et de l'abondance des particules fines, mal pris en compte dans les analyses ECMWF, et (iii) de la révision à la baisse des facteurs d'émission pour les forêts tropicales asiatiques, sur base de mesures récentes.

Ces modifications entraînent une forte réduction des émissions, d'environ un facteur 3.5 en Asie du Sud-Est. La croissance des émissions d'isoprène est renforcée en Chine (7.2% par décade), à cause de la hausse observée du rayonnement solaire dans le sud du pays. Les émissions plus faibles en Asie du Sud sont confirmées par modélisation inverse des émissions contraintes par des observations satellitaires de formaldéhyde (Stavrakou et al., ACP, 2014).

Cette étude a été menée dans le cadre du projet de coopération belgo-chinoise IBBAC (Impact of Biogenic Emissions on Beijing Air Quality and Climate) et du projet PRODEX/ACROSAT (Atmospheric Composition Research using Observations from SATellites) financé par la Politique scientifique fédérale. Elle a été rendue possible par la collaboration entre le groupe de modélisation troposphérique de l'IASB, qui a coordonné l'étude, et l'équipe des observations dans l'ultraviolet-visible de l'IASB.



DIX ANS D'OBSERVATIONS GLOBALES DE LA QUALITÉ DE L'AIR

Exploitation des données de l'Ozone Monitoring Instrument

En préparation du lancement en 2016 de la mission Copernicus Sentinel-5 Precursor et de son spectromètre embarqué TROPOMI (TROPOspheric Ozone Monitoring Instrument), l'IASB est responsable du développement scientifique des algorithmes d'inversion du dioxyde de soufre (SO_2), du formaldéhyde (H_2CO) et de l'ozone (O_3). C'est dans ce cadre

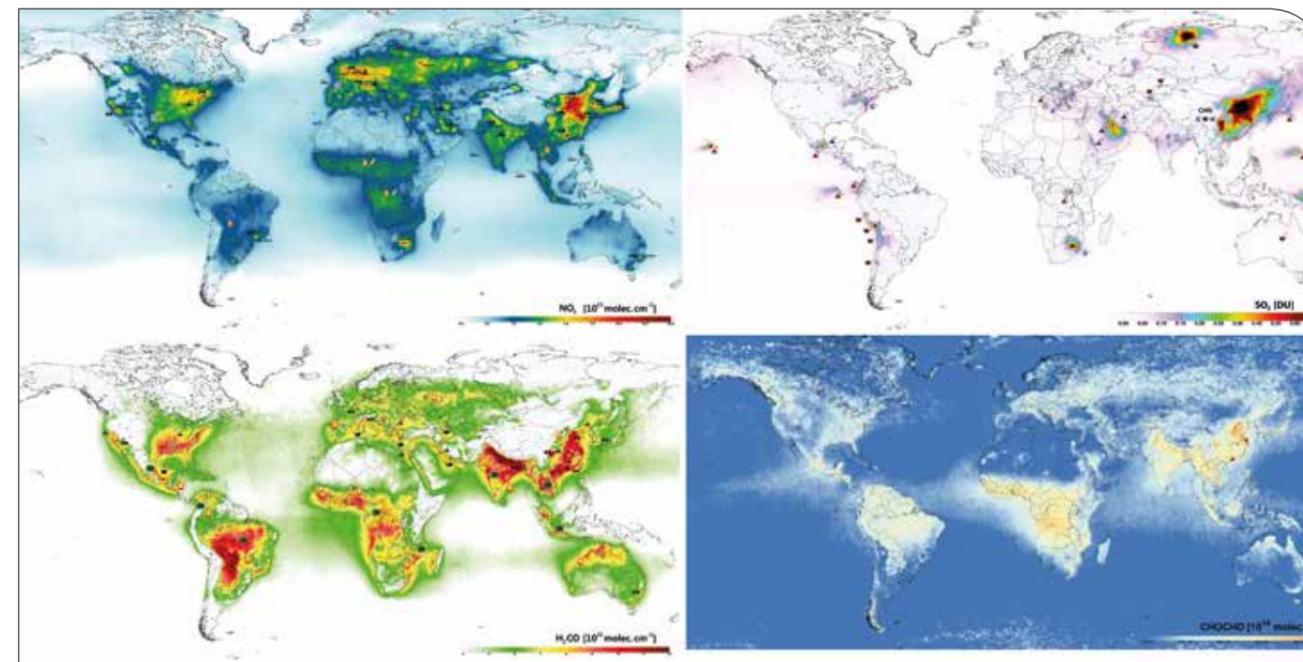
“Les mesures d’OMI sont exceptionnelles par leur couverture spatiale et temporelle.”

que nous avons travaillé sur l'exploitation des données OMI (Ozone Monitoring Instrument), instrument prédécesseur de TROPOMI, volant à bord du satellite américain AURA depuis 2004. Forts de l'expérience de l'IASB dans le domaine de l'inversion des concentrations de gaz en trace à partir de mesures satellitaires au nadir, nous avons développé des algorithmes optimisés pour le traitement de données d'instruments imageur bidimensionnels tels qu'OMI et TROPOMI.

Les mesures d'OMI sont exceptionnelles par leur couverture spatiale et temporelle (observations globales et journalières pendant 10 ans) et par leur résolution horizontale (de l'ordre de $13 \times 24 \text{ km}^2$). Elles complètent les séries d'observations des instruments satellitaires européens que nous avons précédemment exploités, à savoir GOME sur ERS-2, SCIAMACHY sur ENVISAT, et les deux instruments GOME-2 à bord de MetOp-A et B, actuellement en opération (voir par exemple Lerot et al., 2010; 2014; De Smedt et al., 2012; 2015; Theys et al., 2013; 2015, ainsi que les sites <http://www.esa-ozone-cci.org> - <http://h2co.aeronomie.be> - <http://www.temis.nl> - <http://sacs.aeronomie.be>).

Des cartes globales

La figure ci-contre présente les cartes globales des moyennes multi-annuelles des colonnes troposphériques de dioxyde d'azote (NO_2), SO_2 , H_2CO et glyoxal (CHOCHO), que nous avons dérivées à partir des mesures OMI entre 2004 et 2014, en utilisant une méthode d'inversion DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy). Les observations satellitaires de ces molécules sont cruciales pour la surveillance et la compréhension des phénomènes complexes contrôlant la qualité de l'air. En effet, les observations de NO_2 d'une part, et de H_2CO et CHOCHO d'autre part, permettent de quan-



Moyennes multi-annuelles des colonnes troposphériques (VCD) de NO_2 , SO_2 , H_2CO et CHOCHO, dérivées à l'IASB à partir des mesures spectrales de l'instrument satellitaire OMI ($1 \text{ DU} = 2.69 \times 10^{16} \text{ molec.cm}^{-2}$)

tifier respectivement les émissions d'oxyde d'azote (NO) et des composés organiques volatils (COV), qui sont des gaz précurseurs de l'ozone troposphérique, élément central à la qualité de l'air. Le SO_2 est aussi un gaz important de par son impact nuisible pour la santé, son effet sur les pluies acides, parce que c'est un gaz précurseur d'aérosols sulfatés et que ses émissions vont souvent de pair avec les émissions de particules fines.

Sur ces cartes, les sources d'émission peuvent être clairement localisées, comparées et identifiées. La distribution spatiale de ces gaz très réactifs, subissant donc peu de transport dans l'atmosphère, est résolue de façon inédite. Les sources sont à la fois d'origine naturelle (forêts tropicales et tempérées, volcans, feux sauvages) et d'origine humaine (villes, usines, centrales, feux de chauffage et d'agriculture). Grâce à ces observations il est possible de confronter les inventaires d'émissions rapportés par les nations avec les observations satellitaires, en utilisant des modèles de chimie et de transport dans la troposphère développés à l'IASB, tel que par exemple le modèle IMAGES. De tels modèles font le lien entre les émissions au sol et les quantités attendues de ces molécules dans l'atmosphère. Grâce aux satellites, ceci peut se faire à l'échelle globale, et de façon continue sur plusieurs années, permettant de surveiller les change-

ments dans le temps et dans l'espace des sources d'émission (Barkley et al., JGR, 2013 ; Stavrou et al., ACP, 2009 ; 2014)

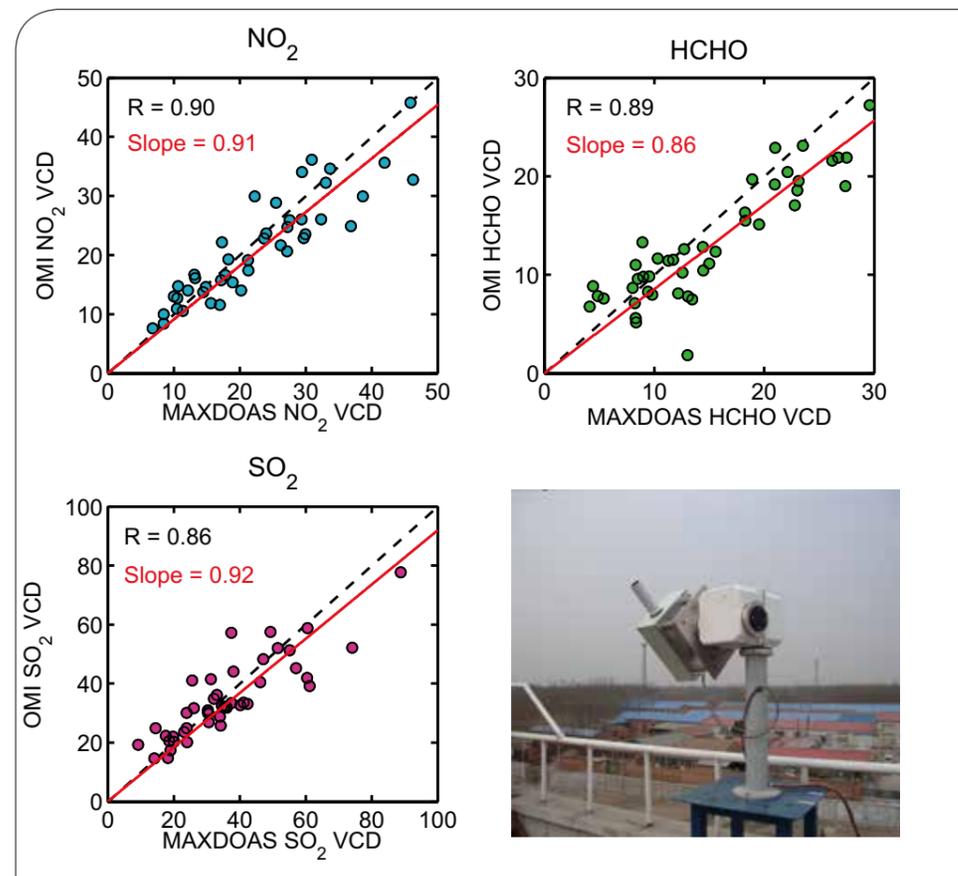
Des spectromètres UV-visible

La validation à l'aide de mesures de référence au sol est une étape importante dans le développement des produits satellitaires tels que ceux décrits ci-dessus. Elle permet notamment de vérifier la fiabilité et la robustesse des données fournies par les satellites et de contribuer à la caractérisation de leurs incertitudes. A cet effet, l'IASB a déployé une série de spectromètres UV-visible de type MAX-DOAS (Multi-AXis DOAS) dans divers endroits du monde qui sont pertinents pour la validation satellitaire comme en Chine (ville de Xianghe au sud-est de Pékin), l'Europe (Bruxelles, Observatoire de Haute Provence et le Jungfraujoch dans les Alpes Suisses) ainsi que l'Afrique Centrale (Bujumbura au Burundi). Il est à noter que ces instruments opèrent dans le cadre du réseau NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, <http://www.ndacc.org>) qui étudie de manière globale les changements chimiques et physiques dans la stratosphère et la troposphère.

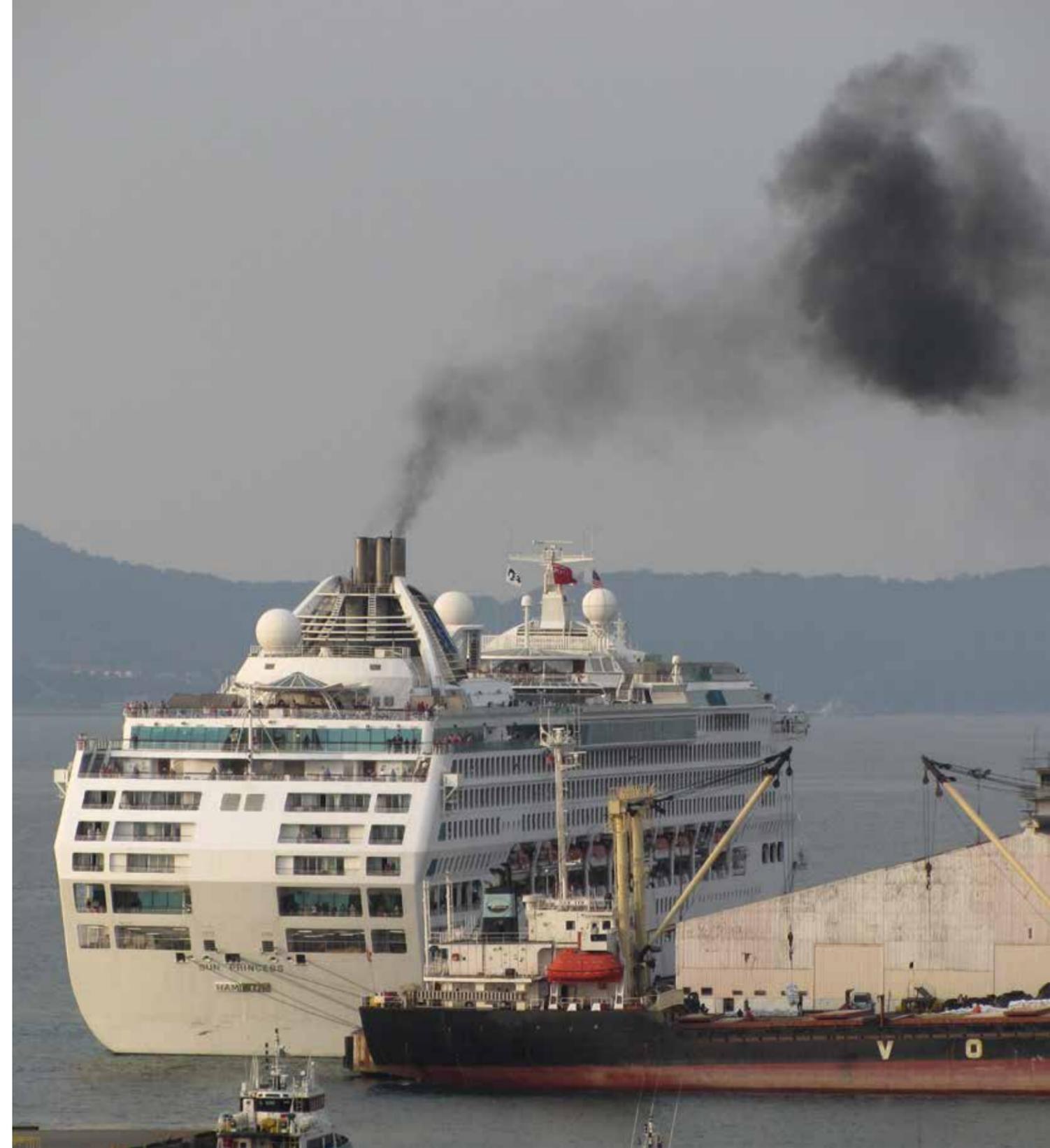
Ces spectromètres, en observant la lumière diffusée à plusieurs angles d'élévation à partir de l'horizon jusqu'au

zénith, fournissent les distributions et colonnes verticales dans la basse troposphère de différents gaz en trace (NO_2 , H_2CO , SO_2 , CHOCHO) ainsi que des aérosols (Hendrick et al., ACP, 2014; Vlemmix et al., AMTD, 2014 ; Wang et al., ACP, 2014). Sur base de nos sites MAX-DOAS et en collaboration avec l'ESA et l'EUMETSAT, nous contribuons de façon continue à la validation des instruments satellitaires GOME, SCIAMACHY, OMI et GOME-2A/B. Dans le cadre du projet FP7 NORS (Demonstration Network Of ground-based Remote Sensing Observations in support of the Copernicus Atmospheric Service) d'importants efforts ont été fournis au cours de ces deux dernières années pour améliorer la caractérisation des mesures MAX-DOAS et permettre leur traitement automatisé afin d'alimenter la base de données NDACC à une fréquence journalière. Ces efforts ont pour but de promouvoir et d'asseoir les observations MAX-DOAS comme jeux de données de référence pour la validation de modèles et de mesures satellitaires, en support notamment à la composante atmosphérique du programme européen Copernicus (<http://atmosphere.copernicus.eu>).

“Grâce aux satellites, ceci peut se faire à l'échelle globale, et de façon continue sur plusieurs années, permettant de surveiller les changements dans le temps et dans l'espace des sources d'émission. ”



Graphiques de corrélation entre les colonnes troposphériques (VCD) de NO_2 , H_2CO , et SO_2 mesurées par l'instrument satellitaire OMI au-dessus de notre station de Xianghe en Chine et les observations MAX-DOAS pour la période comprise entre mars 2010 et décembre 2013 (moyennes mensuelles). En bas à droite: l'instrument MAX-DOAS à Xianghe.





4

RAYONNEMENT UV

Le Soleil est une étoile variable et son spectre électromagnétique couvre un large domaine spectral allant des rayons X aux ondes radio. Il présente une grande variabilité dont l'amplitude augmente généralement pour les courtes longueurs d'ondes. Les périodicités s'étendent de la minute à plusieurs dizaines d'années, le cycle le plus visible étant de 11 ans environ.

L'activité magnétique du Soleil et les structures de surfaces associées (taches solaires, facules) sont responsables de la variation de l'éclairement spectral dont la mesure à partir de l'espace revêt un grand intérêt pour la communauté scientifique. Sa connaissance est un prérequis pour l'étude de la photochimie atmosphérique de la Terre et pour la climatologie.

En physique solaire, de nombreux modèles ont été développés et la mesure de l'éclairement spectral est nécessaire pour la validation de ces modèles. Une mesure à partir de l'espace permet de s'affranchir de l'absorption et de la diffusion du rayonnement solaire par les constituants de l'atmosphère. Elle requiert cependant des technologies avancées pour réaliser en environnement spatial et avec une qualité constante ces mesures du flux solaire selon une échelle photométrique absolue.

Comment l'activité solaire peut-elle être mesurée ?

(Corine, account manager)

L'INSTRUMENT SOLAR/SOLSPEC

Le résultat d'une synergie réussie

L'éclairement spectral est mesuré à bord de la Station Spatiale Internationale (ISS) par l'instrument SOLAR/SOLSPEC. Initialement proposé par le Service d'Aéronomie du CNRS (devenu le LATMOS, France), cet instrument résulte d'une longue collaboration avec l'IASB et l'Observatoire d'Heidelberg (RFA). Dans sa version actuelle pour la

"Il en résulte un instrument d'une certaine complexité mais de hautes performances radiométriques."

mission SOLAR sur l'ISS, l'instrument se compose de trois spectroradiomètres qualifiés pour des mesures spatiales à long terme, permettant de couvrir plus de 96% du flux solaire dans les domaines spectraux UV, VIS et infrarouge (mesures entre 166 nm et 2900 nm).

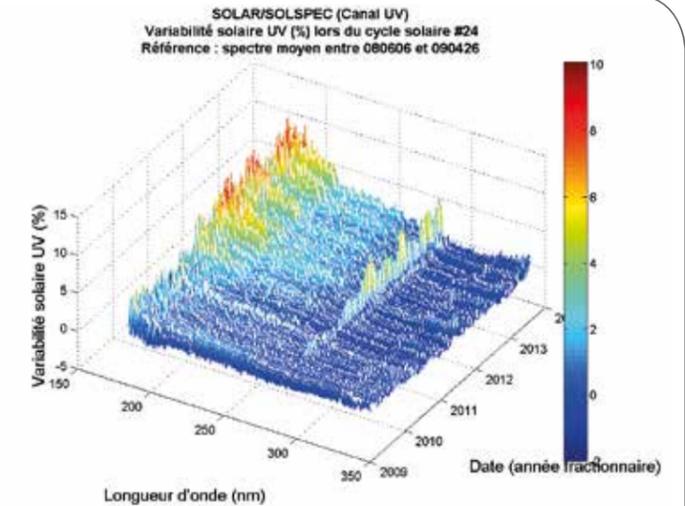
SOLAR/SOLSPEC a été développé grâce à l'expertise de l'IASB pour les applications spatiales, sous les auspices de BELSPO (BELgian Science Policy Office) et en étroite collaboration avec le LATMOS. La version actuelle de SOLSPEC a bénéficié de l'implémentation de nouveaux éléments électroniques, optiques et d'une redéfinition des interfaces mécaniques. Il en résulte un instrument d'une certaine complexité mais de hautes performances radiométriques. Une caractérisation radiométrique approfondie et un étalonnage absolu en

éclairement spectral ont été pris en charge par l'équipe de l'IASB avant la mission. Ces développements ont permis de livrer un instrument robuste et performant pour une mission spatiale. SOLAR/SOLSPEC est le seul instrument actuellement en orbite mesurant l'éclairement solaire jusqu'à une limite proche de 3 µm en longueur d'onde. L'incertitude standard d'une mesure solaire est de l'ordre de 2% en moyenne, mais inférieure à 1% pour la partie centrale du spectre.

La variabilité du rayonnement solaire ultraviolet

SOLAR/SOLSPEC est en orbite depuis 2008 pour une mission d'une durée totale de 9 ans, faisant partie de la charge utile SOLAR arrimée au module européen COLUMBUS de l'ISS. Il est piloté depuis le centre de contrôle B.USOC (Belgian User Support and Operations Centre) implanté à l'IASB qui est en charge de l'interface entre l'ESA et les scientifiques responsables de la charge utile SOLAR.

Un des objectifs scientifiques consiste à établir une base de données de spectres solaires dans l'ultraviolet en révélant la variabilité de l'éclairement pour le cycle solaire actuel de 11 ans. A des fins démonstratives, un spectre moyen a été établi pour la période comprise entre juin 2008 et avril 2009 (minimum d'activité solaire) et la variation relative d'éclairement par rapport à ce spectre de référence a été calculée puis ex-



Gauche : implémentation de la charge utile SOLAR sur l'ISS.

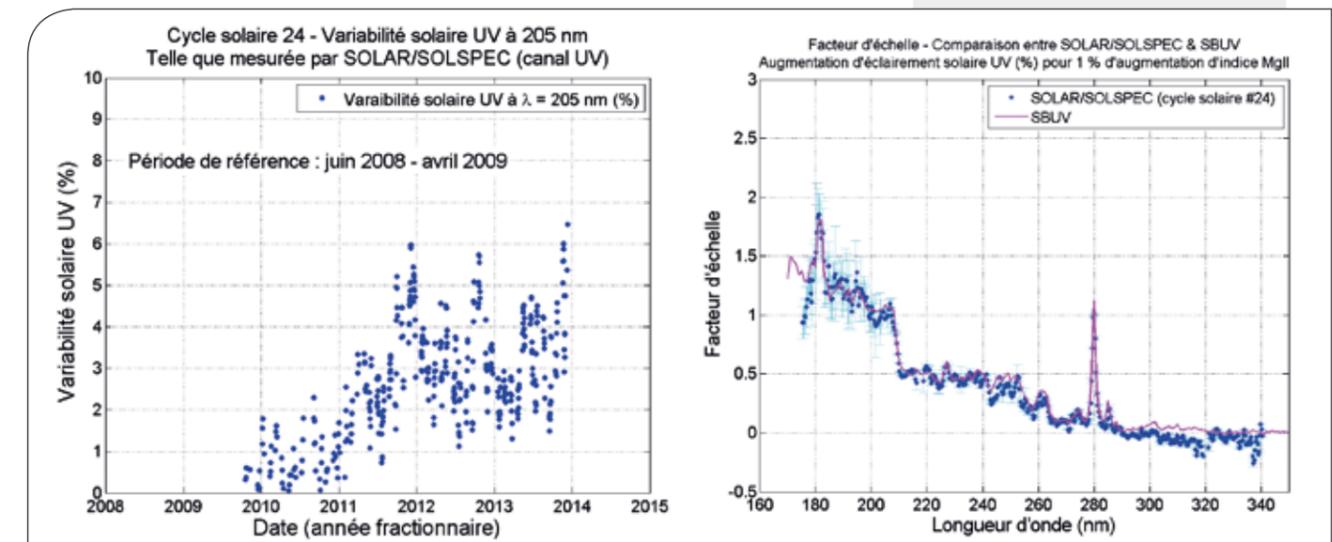
Droite : la variation relative d'éclairement spectral solaire UV, telle que mesurée par SOLAR/SOLSPEC en fonction du temps et de la longueur d'onde lors de la mission SOLAR, entre 2008 et 2014.

primée en % en fonction du temps et de la longueur d'onde.

Les résultats illustrent que l'amplitude de la variabilité croît pour les longueurs d'onde décroissantes. Elle peut atteindre plusieurs % au voisinage de 205 nm, ce qui est une longueur d'onde d'une grande importance pour la chimie de l'ozone dans la moyenne et haute atmosphère. En effet, il existe une 'fenêtre atmosphérique' permettant au flux solaire à 205 nm de pénétrer assez profondément dans l'atmosphère terrestre et de jouer un rôle primordial pour la photodissociation de l'oxygène et la formation de l'ozone.

Gauche : la variation relative de l'éclairement solaire UV à 205 nm lors du cycle solaire actuel, telle que mesurée par SOLAR/SOLSPEC.

Droite : comparaison entre les facteurs d'échelle (variation en % d'éclairement UV par % de variation d'indice MgII) de SOLAR/SOLSPEC et de SBUV.



Mesures de précision

Il existe également des indices d'activité solaire. Il s'agit de quantités physiques associées à une émission issue d'une altitude donnée de l'atmosphère solaire. L'indice MgII, associé à une raie de Fraunhofer à 280 nm, montre une corrélation élevée avec la variation de l'éclairement solaire entre 170 nm et 400 nm. Cela s'exprime par le biais d'un facteur d'échelle, donnant le pourcentage de variation d'éclairement solaire par pourcentage de variation d'indice MgII.

Cet indice MgII est mesuré par SOLAR/SOLSPEC et après comparaison avec les mesures d'éclairement solaire UV, le facteur d'échelle a en conséquence pu être calculé. Les résultats ont confirmé les courbes publiées dans la littérature scientifique, démontrant la capacité de SOLAR/SOLSPEC à mesurer correctement les variations d'éclairement liées à l'activité solaire.

Dans le domaine visible, la très faible variabilité (<0.05% généralement) de l'éclairement solaire n'est plus mesurable par SOLAR/SOLSPEC. Cependant, la détermination d'un spectre solaire VIS-IR en unité radiométrique absolue avec une incertitude limitée à 1% a été réalisée.

Après 6 années de mission, SOLAR/SOLSPEC a confirmé sa robustesse pour des mesures solaires de précision à partir de l'ISS. Les perspectives pour la mission SOLAR jusqu'en 2017 consiste à poursuivre les efforts accomplis pour l'acquisition et la validation des mesures du spectre solaire afin de compléter la base de données actuelle et de publier les résultats sur base de collaboration.

"SOLAR/SOLSPEC a confirmé sa robustesse pour des mesures solaires de précision."

RÉSEAU DE MESURES AU SOL DANS L'UV-VISIBLE

Des instruments modernes

Durant la période 2013-2014, la modernisation des instruments déployés en site aux 6 stations belges de mesures UV-Visible a été poursuivie. A titre d'exemple, des capteurs de durée d'ensoleillement 'EKO' ont été déployés à chaque station et de nouveaux radiomètres à large bande équipent actuellement les stations de Virton, Mol, Redu et du Mont-Rigi. Ces instruments de précision nous permettent une étude globale et fiable de la climatologie 'UV-Visible' en Belgique ainsi qu'au Grand Duché de Luxembourg grâce à la collaboration avec la station du Lycée classique de Diekirch.

Chaque station est équipée au minimum d'un set de 3 radiomètres à large bande (UV-B, UV-A et pyranomètres solaires

total); d'un radiomètre à filtres (6 canaux de mesure étroit dans l'UV (305-395 nm); d'un CIR-4V (mesurant la couverture nuageuse et l'altitude de base des nuages) et d'une station météo (température, pression, humidité relative, vitesse et direction de vent, pluviométrie).

Un site web en temps réel

La station d'Uccle inclut, en plus des mesures spectrales, différents types de radiomètres à filtres (dans l'ultraviolet et dans le visible) pour la mesure du rayonnement solaire global (direct et diffus) et de la durée d'ensoleillement.

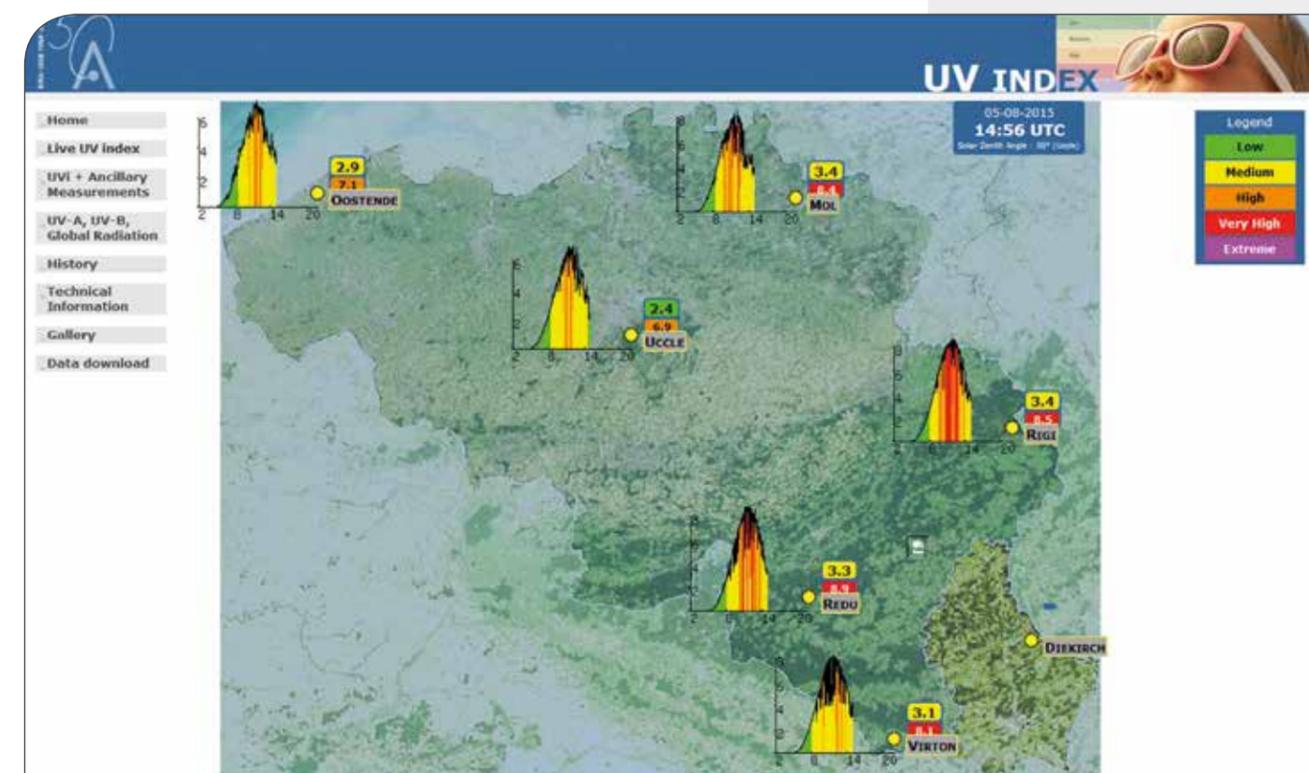
Le site web du groupe 'Rayonnement solaire' (<http://uvindex.aeronomie.be>), entièrement redéfini en 2012 s'est vu doté de quelques applications complémentaires comme le téléchargement des données. Il permet de suivre en temps réel l'évolution des mesures UV-Visible, et en particulier des

"Il permet de suivre en temps réel l'évolution des mesures UV-Visible."

index UV dans les sept stations précitées et localisées sur la carte ci-dessous. En outre, il donne également accès à une page reprenant les conditions atmosphériques générales de chaque station et à toute une série d'informations à propos de l'historique des mesures réalisées, des principales caractéristiques des instruments utilisés, et du type de données disponibles, etc.

Pour la troisième saison, l'IASB poursuit ses mesures du rayonnement UV-Visible à la station Antarctique Princesse Elisabeth, grâce à un set de capteurs UV-B, UV-A et pyranomètre.

Copie d'écran du site web de l'IASB permettant la consultation de l'indice UV en ligne.



5

AÉRONOMIE ET PHYSIQUE SPATIALE

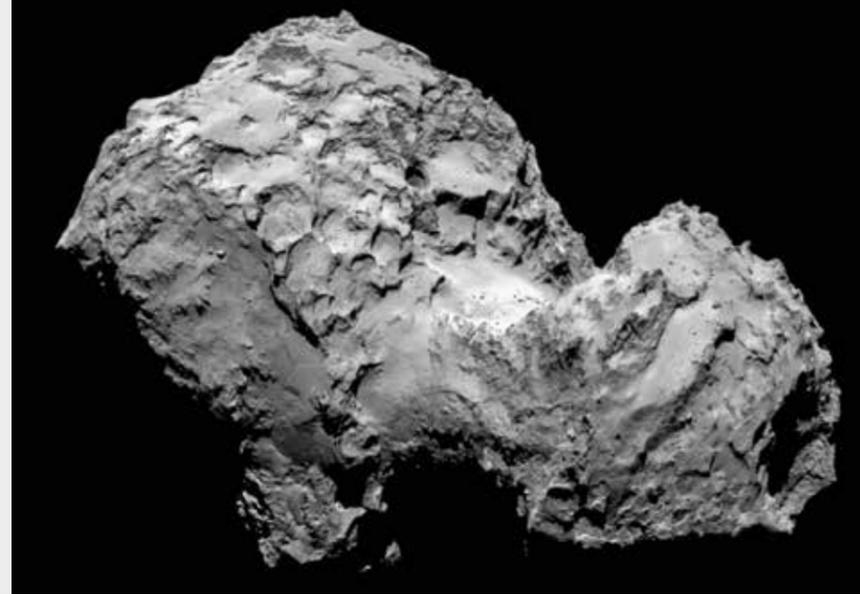
L'IASB étudie non seulement l'atmosphère neutre, qui s'étend approximativement sur 90 km, mais également la région atmosphérique au-dessus de celle-ci: le gaz partiellement ionisé de l'ionosphère qui devient progressivement un gaz entièrement ionisé ou plasma de la magnétosphère. Par extension, nos études portent aussi sur l'interaction entre l'espace interplanétaire et les atmosphères des planètes, des lunes et des comètes.

Pareille exploration spatiale n'est possible que grâce à des investissements technologiques en équipement de mesure et en instruments à bord de sondes spatiales. Après des années de travail de préparation et un voyage de plus de 10 ans, la sonde Rosetta de l'Agence Spatiale Européenne a atteint son objectif en 2014: la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko. A bord de la sonde se trouve l'instrument ROSINA auquel l'IASB a considérablement apporté son concours. Les mesures ont déjà conduit à des découvertes spectaculaires. Cette recherche fondamentale nous aide à comprendre le fonctionnement d'une atmosphère.

L'instrument EPT, un autre appareil de mesure pour lequel l'IASB a apporté une contribution technologique considérable, est entré en phase opérationnelle. Depuis son lancement en 2013, il a fourni un flot de données scientifiques sur les particules énergétiques autour de la Terre. Ces mesures nous aideront à comprendre comment et pourquoi ces particules - qui proviennent principalement du Soleil - affectent l'espace autour de la Terre et l'atmosphère, ce qu'on appelle la météorologie spatiale. Sur base de cette information, nous développons des services qui peuvent, par exemple, aider les astronautes et les ingénieurs à évaluer les risques de rayonnement.

Quelle est l'influence des particules solaires sur l'atmosphère de la Terre?

Anne-Laure (étudiante en sciences biologiques)



EN ROUTE VERS LA COMÈTE 67P

Explorer une comète avec Rosetta

Rosetta est une mission spatiale de l'ESA dont le but est d'étudier de près une comète sur une longue période de temps. La comète 67P/Churyumov-Gerasimenko, ou tout simplement 67P, est l'objectif de Rosetta. 67P est en orbite elliptique autour du Soleil avec une période orbitale de 6.5 années, la distance entre le Soleil et la comète varie entre

“Au cours des premiers mois, Rosetta a étudié de près le noyau de la comète afin de repérer un bon site où pourrait se poser l'atterrisseur Philae.”

1.2 (point le plus proche = périhélie) et 5.7 (point le plus éloigné = aphélie) fois la distance entre la Terre et le Soleil. Le voyage de Rosetta a commencé le 2 mars 2004. Après plus de 10 ans, Rosetta est finalement arrivée le 6 août 2014 à 100 km de 67P et la partie scientifique de la mission a pu commencer. Au cours des premiers mois, Rosetta a étudié de près le noyau de la comète afin de repérer un bon site où pourrait se poser l'atterrisseur Philae. Le 12 novembre 2014, Philae est entré dans l'histoire comme le premier engin spatial à réussir un atterrissage sur le noyau d'une comète. Rosetta continuera d'étudier la comète au périhélie et même après.

La contribution de l'IASB à Rosetta

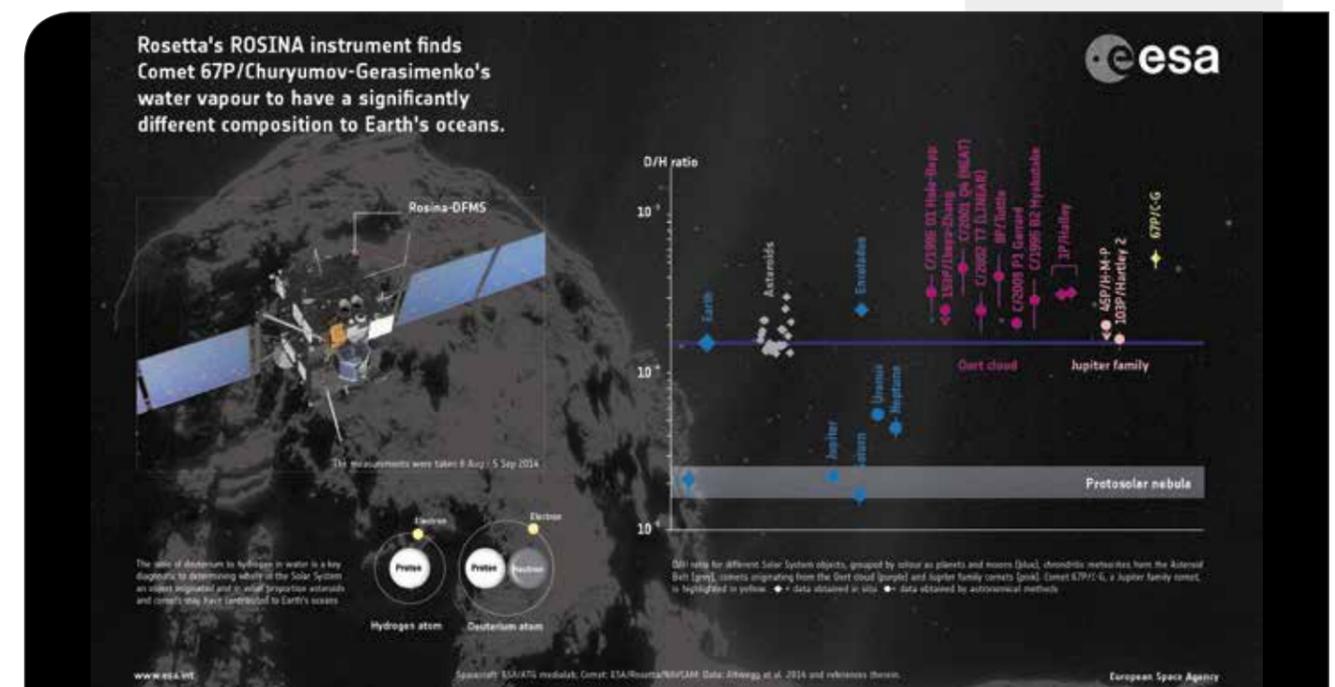
L'IASB, en collaboration avec d'autres partenaires nationaux et internationaux dirigés par l'Université de Berne (Suisse), a contribué à construire l'un des onze instruments embarqués sur Rosetta, il s'agit de l'instrument ROSINA (Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis). ROSINA comprend un capteur de pression et deux spectromètres de masse qui permettent de mesurer les gaz et les particules chargées (ions) dans l'atmosphère de la comète aussi appelée le coma. L'IASB, en collaboration avec les partenaires belges, IMEC (Institut de micro-électronique et composants) et OIP (Optique et de Instruments de Précision), a construit le détecteur du 'Double Focusing Mass Spectrometer' (DFMS).

En 2013, l'équipe de l'IASB a travaillé au système informatique de traitement des données. C'était en préparation au réveil de Rosetta après son hibernation durant le long voyage. Début 2014, lorsqu'il est devenu clair que Rosetta et ROSINA étaient en parfait état, l'excitation a grimpé. Depuis le début du mois d'août 2014, un flot de données ROSINA/DFMS arrivent et nous avons un travail considérable pour les traiter. Le spectromètre de masse DFMS mesure la composition de l'atmosphère de la comète: combien de particules de gaz sont présentes et quelle est leur masse? Le traitement de ces données nécessite deux étapes. Premièrement, les mesures doivent être pourvues d'une échelle de masse correcte. Par la suite, l'intensité du signal doit être traduite en nombre correspondant de particules présentes à l'endroit où se trouve Rosetta. Notre logiciel nous permet d'automatiser en grande partie ce processus.

Les premiers résultats scientifiques

La comète 67P/Churyumov-Gerasimenko est de forme irrégulière et mesure de 4 à 8 km de large. Tout comme d'autres comètes, c'est une 'boule de neige sale' composée principalement de glace (H₂O), mélangée à des particules de différentes tailles. Les températures extrêmement basses qui surviennent lorsque la comète est loin du Soleil, font en

Le rapport D/H pour les différents corps célestes de notre système solaire. La contribution de Rosetta est le point jaune à l'extrême droite du graphique. Notez que 67P/C-G appartient également à la famille 'Jupiter'. © ESA





La comète 67P/Churyumov-Gerasimenko photographiée le 26/02/2015 à 87 km de distance avec la caméra NavCam à bord de la sonde Rosetta. L'atmosphère de poussières autour de la comète est bien visible. © ESA

sorte que certains composés que nous connaissons sur Terre à l'état gazeux, tels que le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde de carbone (CO₂) se trouvent à l'état de glace.

“L'analyse de la composition des comètes nous permet donc aussi de comprendre les conditions dans lesquelles notre système solaire s'est formé.”

Lorsque la comète se rapproche du Soleil, le mélange de glace se réchauffe et le gaz correspondant est libéré, ainsi que la poussière. C'est ainsi que se forme l'atmosphère de la comète ou coma. Les mesures du DFMS permettent de déduire la composition de l'atmosphère.

Lorsqu'une comète se rapproche du Soleil, elle produit plus de gaz. Sous l'influence du Soleil se produisent alors toutes sortes de phénomènes dans le coma lesquels donnent lieu entre autres à la formation des queues de la comète. Mais fin 2014, nous n'en étions pas encore là: la comète se trouvait encore assez loin du Soleil de telle sorte que le processus de production de gaz ne faisait que démarrer.

Le DFMS a déjà permis de répondre à une question importante: la jeune Terre a-t-elle été bombardée de comètes qui auraient apporté sur notre planète l'eau nécessaire à la vie, comme le prétend une certaine théorie? Afin d'élucider cette question, l'eau dans la comète a été étudiée en détail. L'eau présente sur Terre est composée en grande partie de H₂O, mais aussi de 0.03% de HDO, ou eau semi-lourde, dans laquelle un atome d'hydrogène (H) est remplacé par son isotope, le deutérium (D). Le rapport du deutérium à l'hydrogène (D/H) est comme une empreinte digitale de l'eau sur Terre (D/H_{Terre} ~0.015%).

Les mesures de DFMS nous ont appris qu'une valeur du rapport D/H de la comète 67P est ~0.053%, ce qui est nettement plus élevé que sur Terre. Il apparaît donc clairement que les comètes du type de 67P ne peuvent être seules à l'origine de l'eau sur Terre. Comme les comètes sont le plus souvent éloignées du Soleil, elles n'ont pas perdu (ou pas complètement) leurs gaz depuis la formation, il y a 4.6 milliards, du système solaire. L'analyse de la composition des comètes nous permet donc aussi de comprendre les conditions dans lesquelles notre système solaire s'est formé. Dans les prochaines années, nous pouvons nous attendre à d'autres résultats intéressants dans ce domaine de recherche.

PREMIÈRES MESURES DE L'EPT À BORD DU SATELLITE PROBA-V

Lancement réussi sur PROBA-V

L'EPT (Energetic Particle Telescope) est un nouveau spectromètre compact et modulaire conçu pour détecter les particules énergétiques de l'espace. Le premier EPT a été lancé avec succès depuis Kourou en Guyane le 7 mai 2013 à bord du satellite PROBA-V (Vegetation). Volant sur une orbite polaire basse à 820 km d'altitude, ce satellite contient également d'autres instruments dont le plus grand est destiné à l'observation de la couverture végétale terrestre. Ce satellite belge d'un volume d'un mètre cube environ et d'une masse de 160 kg est le troisième de la série PROBA (Project for On-Board Autonomy) développé par l'Agence Spatiale Européenne pour la mise au point de nouvelles technologies spatiales.

L'instrument EPT pour mesurer des particules énergétiques

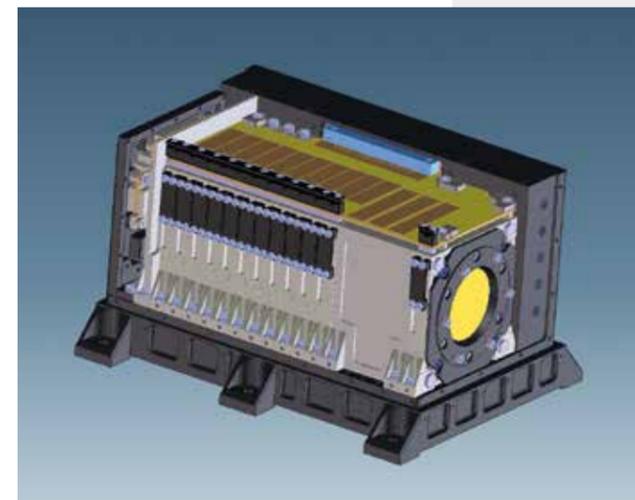
L'EPT mesure les flux d'électrons, protons et ions d'hélium des ceintures de radiations de Van Allen. Ces particules très énergétiques (plusieurs MeV) piégées dans le champ magnétique de la Terre constituent un réel danger pour les astronautes et les satellites en orbite autour de la Terre.

La conception de cet instrument résulte d'échanges fructueux entre scientifiques de l'IASB et de l'UCL (Université Ca-

L'instrument EPT à bord du satellite PROBA-V.



L'instrument EPT

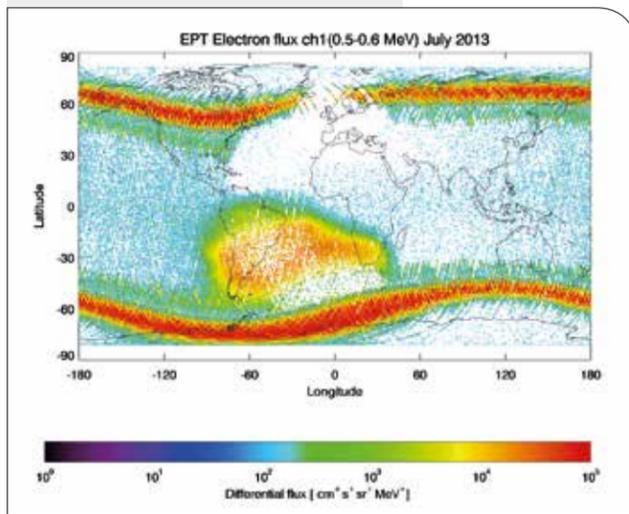


tholique de Louvain). Un consortium a été développé avec également la firme privée Qinetiq Space pour développer ce nouvel instrument avec l'appui de l'ESA et de Belspo.

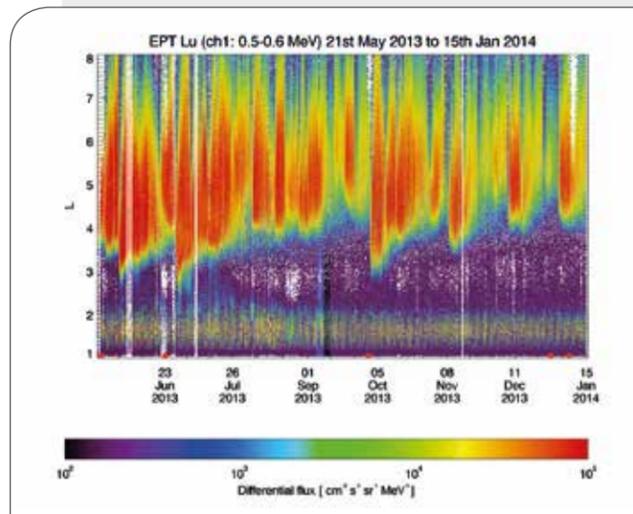
“Ces particules très énergétiques (plusieurs MeV) piégées dans le champ magnétique de la Terre constituent un réel danger pour les astronautes et les satellites en orbite autour de la Terre.”

Au niveau de l'IASB, l'équipe des ingénieurs a pris soin des aspects mécaniques de l'instrument. Le B.USOC (Belgian User Support and Operations Centre) s'est occupé de l'aspect opérationnel de la mission et continue d'assurer la transmission des données en collaboration avec le centre de contrôle de Redu. L'équipe de physique spatiale s'occupe des aspects scientifiques et analyse en particulier les observations de l'EPT pour une meilleure compréhension des mécanismes physiques affectant les radiations spatiales.

Flux des électrons observés par l'EPT à 820 km d'altitude. Les flux sont particulièrement élevés au-dessus de l'Atlantique Sud et dans des bandes situées aux hautes latitudes de chaque hémisphère.



Variation des flux d'électrons en fonction du temps et de L, la distance radiale dans le plan équatorial, en rayons terrestres.



Premiers résultats scientifiques

Les premiers résultats de l'EPT sont très positifs, car l'instrument possède une capacité inégalée de discrimination en vol des espèces de particules. Il fournit des spectres non contaminés et donc plus précis que ceux des anciens détecteurs. La mesure des flux des ions lourds est également une nouveauté. Après une première phase de validation des données, les observations ont été comparées avec différents modèles et avec les mesures d'autres instruments actifs sur d'autres missions spatiales, notamment les satellites Van Allen Probes de la NASA.

“L'analyse de ces variations permettra d'étudier les mécanismes physiques de sources et de pertes et d'ainsi développer des modèles prédictifs plus précis des flux des particules énergétiques qui peuvent endommager les satellites.”

Des cartes mondiales des flux observés par l'EPT à 820 km d'altitude ont été établies pour les différentes espèces de particules et leurs différentes gammes d'énergie. Ces cartes montrent l'Anomalie Sud Atlantique où les flux des électrons et des protons sont particulièrement élevés suite au décentrage du champ magnétique terrestre. Les flux d'électrons de la ceinture externe pénètrent également aux hautes latitudes.

Ces flux de la ceinture externe sont particulièrement variables avec l'activité géomagnétique. Lors de chaque orage magnétique dû à des perturbations du vent solaire, les flux d'électrons de la ceinture externe varient fortement et pénètrent plus profondément. Les protons et les ions d'hélium, eux, ne pénètrent aux hautes latitudes que lors des événements à particules solaires énergétiques (SEP) et seulement pendant quelques jours. L'analyse de ces variations permettra d'étudier les mécanismes physiques de sources et de pertes et d'ainsi développer des modèles prédictifs plus précis des flux des particules énergétiques qui peuvent endommager les satellites.

Perspectives

Basé sur la technologie de l'EPT, un instrument de détection angulaire (3DEES) est également en développement. La modularité de l'instrument EPT permet de l'adapter à d'autres orbites pour de futures missions spatiales.

LE SYSTÈME D'ALERTE COMESEP

Météo spatiale

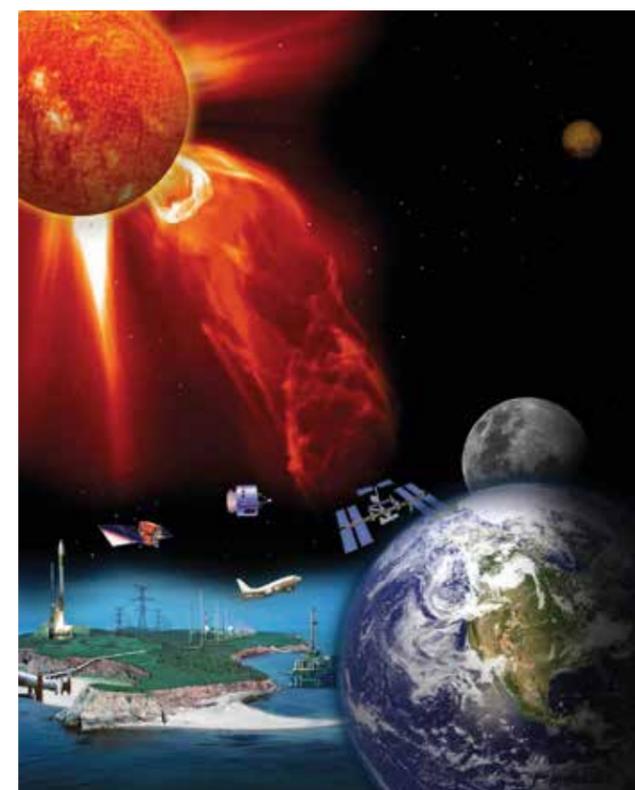
Des éruptions solaires spectaculaires telles que des protubérances éruptives et des éjections de masse coronale (CME) se produisent principalement pendant les périodes de forte activité solaire. Les éruptions solaires sont observées comme des hausses brutales du rayonnement électromagnétique généré dans les régions actives du Soleil. Les CME sont des éruptions de grandes quantités de matière provenant de la couronne (la couche externe de l'atmosphère du Soleil) et se déplacent comme des nuages de plasma dans l'espace interplanétaire. Ces deux types d'éruption sont également capables d'accélérer des particules: les SEPs. Ces événements sont caractérisés par une augmentation soudaine du flux de particules de plusieurs ordres de grandeur par rapport au flux normal du vent solaire.

Les variations du rayonnement spatial et du champ magnétique interplanétaire, découlant principalement des éruptions solaires, et l'impact de ces variations sur l'espace autour de la Terre relèvent du domaine de la météorologie spatiale. Quand une CME atteint la Terre, cela peut influencer la magnétosphère (l'espace autour de la Terre où

le champ magnétique de la Terre a une influence) et causer des tempêtes géomagnétiques. Cela donne lieu à un beau spectacle: les aurores, mais cela peut aussi interférer avec les canaux de communication, les satellites et le réseau électrique. Les rayonnements X et ultra-violet émanant des éruptions solaires peuvent affecter l'ionosphère de la Terre et les communications radio de longues distances. Les SEPs peuvent, de leur côté, endommager les systèmes électroniques sensibles et empêcher les communications dans les régions polaires. En outre, les SEPs, en raison de la radiation élevée, sont potentiellement dangereuses pour les vols spatiaux habités, mais aussi pour les avions de lignes qui volent à proximité des ou au-dessus des régions polaires.

Prédire les tempêtes SEPs avec COMESEP

COMESEP (COronal Mass Ejections and Solar Energetic Particles: forecasting the space weather impact) a développé des prévisions pour les tempêtes géomagnétiques et les tempêtes SEPs. Ce projet européen FP7, qui s'est terminé en janvier 2014, a été mené par l'IASB et est le fruit d'une



Cette figure donne un aperçu des technologies sensibles aux éruptions solaires. COMESEP a développé des prévisions pour avertir les opérateurs de ces systèmes technologiques. © NASA

collaboration entre sept instituts européens et trois membres hors de l'Europe.

“COMESSEP (COronal Mass Ejections and Solar Energetic Particles) forecasting the space weather impact) a développé des prévisions pour les tempêtes géomagnétiques et les tempêtes SEPs.”

Le principal résultat de COMESSEP est la réalisation d'un système d'alerte diffusée et entièrement automatisé distribué pour les tempêtes SEPs et les tempêtes géomagnétiques. Les prévisions sont basées sur la combinaison de données historiques et de données en temps réel, ainsi que sur des modèles analytiques. Il y a aussi un apport important de la recherche en physique fondamentale concernant les relations Soleil-Terre. L'IASB était étroitement impliqué dans l'analyse détaillée des SEPs et était responsable de l'élaboration des prévisions pour les tempêtes SEPs et l'application web qui se trouve derrière ces alertes.

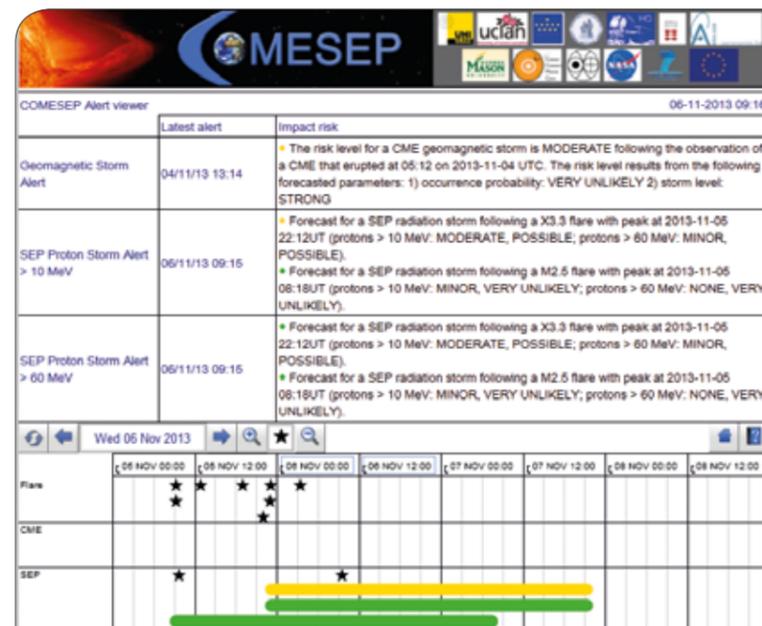
Quand une éruption solaire de classe M ou X est observée, nous évaluons la probabilité de SEPs à proximité de la Terre et leur intensité attendue. Cette évaluation est basée sur une analyse des événements SEPs au cours du cycle solaire précédent (1996-2008). Celle-ci prend en compte non seulement l'intensité de l'éruption solaire, mais aussi la position du Soleil, la vitesse et l'angle de la CME et toute augmentation du rayonnement à la surface de la Terre (ground level

enhancement, GLE) observé dans les moniteurs à neutrons. Toutes ces données sont reçues par l'intermédiaire du système d'alerte. Les rapports antérieurs sont mis à jour quand de nouvelles informations deviennent disponibles. En outre, on utilise un modèle pour calculer la trajectoire des SEPs du Soleil à la Terre par le champ magnétique interplanétaire afin de prévoir l'évolution temporelle du flux de particules.

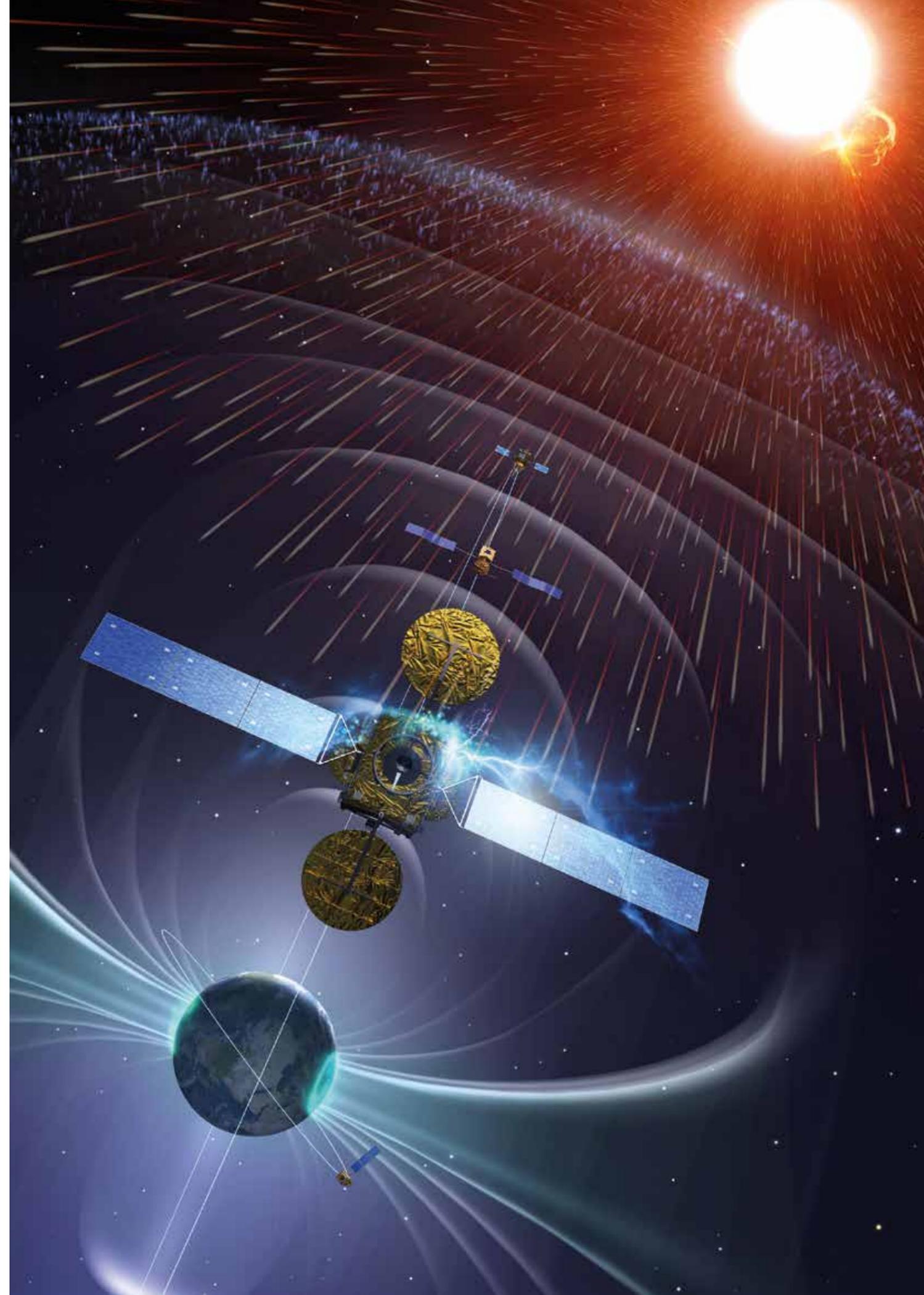
Actif 24h/24, 7jours/7

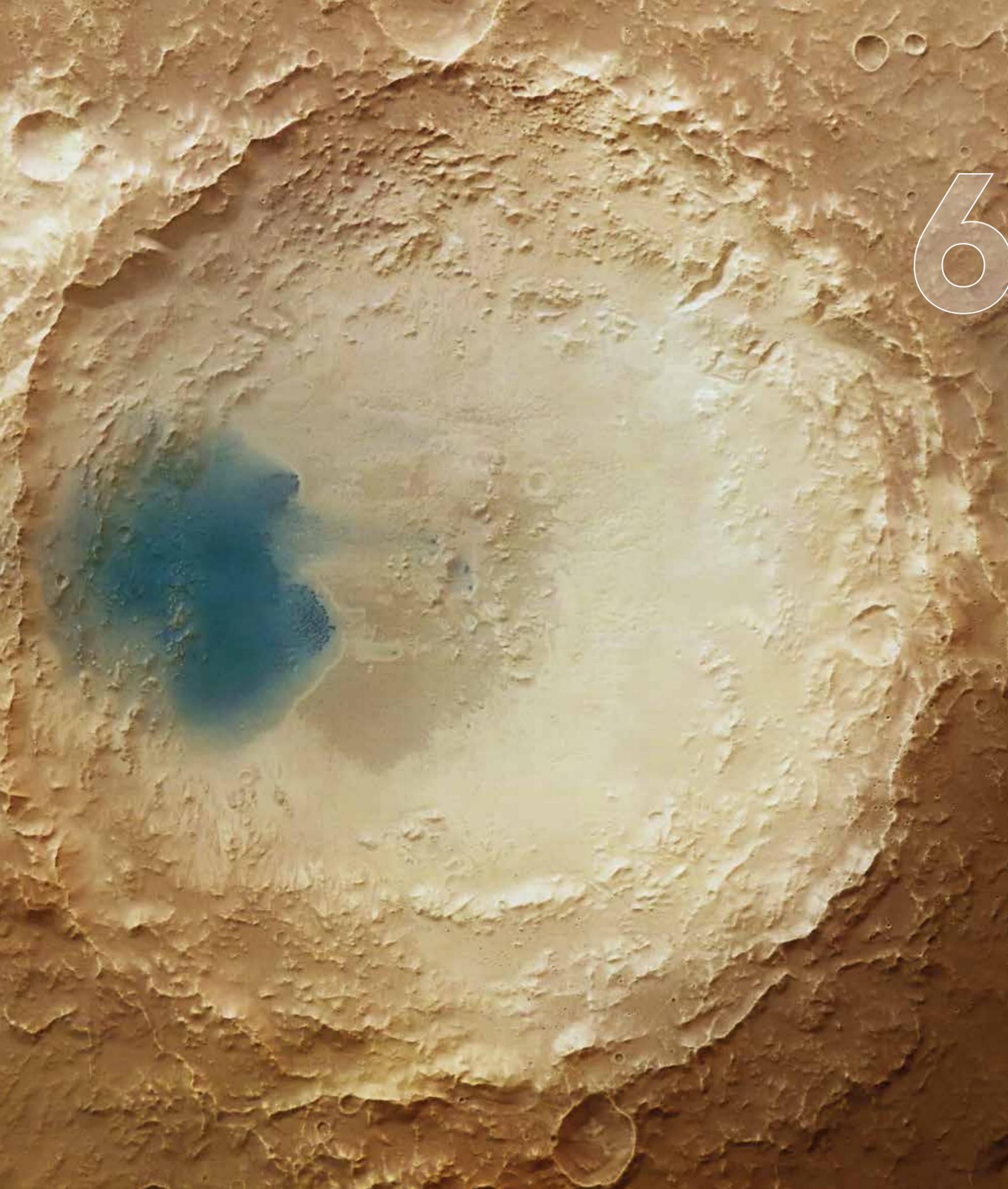
Le système d'alerte offre un service automatique 24h/24, 7jours/7, et se compose d'un certain nombre d'applications automatisées qui sont interconnectées les unes aux autres et sont réalisées à partir de différents endroits. Elles vont de la détection des éruptions solaires, CME et GLE, en passant par des modèles qui calculent le temps d'arrivée des CME près de la Terre pour finalement prédire quel sera l'impact des tempêtes géomagnétiques et SEPs. Cet impact est traduit en termes de risque COMESSEP qui peut aller de faible à extrême mais qui prend aussi en compte la probabilité d'une tempête et son intensité attendue. Les utilisateurs ont accès gratuitement à des prévisions à travers une interface web (<http://www.comesep.eu/alert>) et peuvent s'abonner pour recevoir des alertes par e-mail.

Le système d'alerte COMESSEP est opérationnel depuis novembre 2013 et sa performance est actuellement en cours d'évaluation. L'ESA entend intégrer le système au sein du programme Space Situational Awareness Météo Spatiale. Des projets futurs pourraient être établis sur base de la connaissance qui a été recueillie au cours du projet COMESSEP. De plus, de nouvelles applications améliorées seront intégrées aux prévisions existantes.



Capture d'écran du site d'alerte COMESSEP du 6 novembre 2013, juste après le lancement du projet. La partie supérieure de la page montre un résumé de toutes les tempêtes géomagnétiques et SEPs qui étaient actives à ce moment-là. En bas se trouve une ligne du temps avec toutes les alertes entrantes, indiquées par des étoiles. Elles montrent la durée de la validité des prévisions pour les SEPs, ainsi que pour les orages géomagnétiques représentés sous forme de barres pour lesquelles la couleur correspond à un certain niveau de risque. Des informations détaillées sur chaque alerte peuvent être obtenues en cliquant sur l'icône correspondante.





6

AÉRONOMIE PLANÉTAIRE

L'aéronomie planétaire s'intéresse aux planètes autres que la Terre, et en particulier à leur atmosphère. Les activités de l'IASB sont principalement axées sur Mars et Vénus, mais vont dans le futur s'étendre à Jupiter et ses satellites, ainsi qu'aux exo-planètes.

L'année 2014 a malheureusement vu la fin de la mission Venus Express de l'ESA (European Space Agency). Le satellite avait pourtant survécu à des manœuvres de freinage atmosphérique effectuées en juin et juillet 2014 par l'ESA, afin de tester ses capacités à réaliser de telles opérations. Le contact avec la sonde a été perdu juste avant Noël et n'a pas pu être rétabli depuis. Malgré tout, l'instrument SOIR, développé par l'IASB, a été opérationnel à bord de Venus Express jusqu'au bout. Il a fourni une quantité incroyable de données qui demanderont encore plusieurs années pour être analysées en détail.

L'institut est responsable du développement et de la fabrication de l'instrument NOMAD qui sera à bord de la mission ExoMars gérée par les agences spatiales européenne (ESA) et russe (ROSCOSMOS). NOMAD sera lancé en 2016 sur le premier élément de la mission, l'orbiteur TGO (Trace Gas Orbiter). Les données de l'instrument SPICAM à bord de la sonde Mars Express et celles du modèle de circulation générale GEM-Mars seront exploitées, notamment en vue de la préparation scientifique de la mission ExoMars et de l'analyse des données qui seront fournies par NOMAD.

Quel est l'état de la sonde Venus Express, qui se trouve déjà depuis plus de 8 ans dans l'espace ?

Jack (ingénieur industriel)



VÉNUS

La fin de la mission Venus Express

Après huit années passées en orbite autour de Vénus, la sonde européenne Venus Express a cessé de répondre. On pense qu'elle est arrivée à court de carburant. Elle est maintenant condamnée à brûler dans l'atmosphère de la planète. Lancée en novembre 2005, Venus Express s'était mise en orbite autour de Vénus le 11 avril 2006 avec comme objectif l'étude détaillée de la planète et de son atmosphère. Son orbite fortement elliptique, l'emmenait depuis 66.000 km au-dessus du pôle Sud jusqu'à une altitude d'environ 250 km de la surface au-dessus du pôle Nord.

Sa mission initiale a été prolongée à plusieurs reprises. L'ESA a décidé de tester ses capacités à réaliser des manœuvres complexes en vue de la préparation pour de futures missions, comme la mission ExoMars. En juin a donc débuté une phase de 'freinage atmosphérique', autrement dit un plongeon contrôlé dans l'atmosphère de Vénus. Durant l'été, le satellite a ainsi 'surfé' dans et hors de l'atmosphère, à chacune de ses approches au plus près de la planète, entre 130 km et 135 km.

Ayant survécu à cette expérience, la sonde Venus Express est remontée fin juillet sur une nouvelle orbite, à environ 460 km, pour poursuivre ses observations. Cette orbite s'est dégradée lentement sous l'effet de la gravité, et l'ESA a décidé de réaliser fin novembre une nouvelle série de manœuvres pour la relever et prolonger encore la mission. Mais depuis le 28 novembre, les contacts avec la sonde sont très limités et instables. Les informations disponibles apportent la preuve

d'une perte de contrôle d'altitude de la sonde. Il est donc vraisemblable que Venus Express a épuisé ses réserves de carburant lors des manœuvres planifiées.

"L'atmosphère de Vénus est extrêmement variable."

Cependant, on peut parler d'une vraie réussite. Pendant sa mission autour de Vénus, Venus Express a fourni une étude complète de l'ionosphère et de l'atmosphère de la planète. Elle nous a aussi appris énormément sur sa surface.

L'instrument SOIR

L'instrument SOIR, à bord de Venus Express, a été développé et construit à l'IASB, qui était également responsable de toutes les opérations de gestion de l'instrument, de la planification des observations et de l'archivage des données. En parallèle, les chercheurs de l'IASB ont, bien entendu, analysé en détail les spectres enregistrés par l'instrument afin d'en déduire de nouvelles connaissances sur la composition de l'atmosphère de Vénus.

Une chose est sûre: l'atmosphère de Vénus est extrêmement variable, sur des échelles de temps courts (quelques jours) mais aussi plus longs. Nous avons accès à plus de 8 années

de données maintenant, il nous est donc possible de regarder des fluctuations à long terme. Cependant cette variabilité est encore un mystère inexplicable: il n'y a en effet pas de saisons sur Vénus car son orbite autour du Soleil est quasi circulaire et son axe de rotation est peu penché (tout comme celui de la Terre, d'ailleurs).

Heureusement il nous reste encore beaucoup de données à analyser en profondeur. Celles-ci nous permettront sûrement de mieux comprendre cette planète et son évolution fort différente de celle de notre Terre.



NOMAD

La contribution belge à la mission ExoMars TGO 2016

L'instrument NOMAD a été sélectionné par les agences ESA et NASA en 2010 pour faire partie de la mission ExoMars Trace Gas Orbiter qui sera lancée vers la planète rouge en 2016. L'agence russe ROSCOSMOS a récemment remplacé la NASA. Depuis la sélection, toute l'équipe, composée de

"Les performances de l'instrument nous permettront de réaliser les objectifs scientifiques poursuivis."

scientifiques et d'ingénieurs de l'IASB, prépare l'instrument. La mission scientifique durera 2 années martiennes et débutera en 2017. NOMAD est un consortium international mené par la Belgique (PI: A.C. Vandaele de l'IASB), comprenant des scientifiques et ingénieurs d'Espagne, Italie, UK, mais aussi du Canada et des États-Unis.

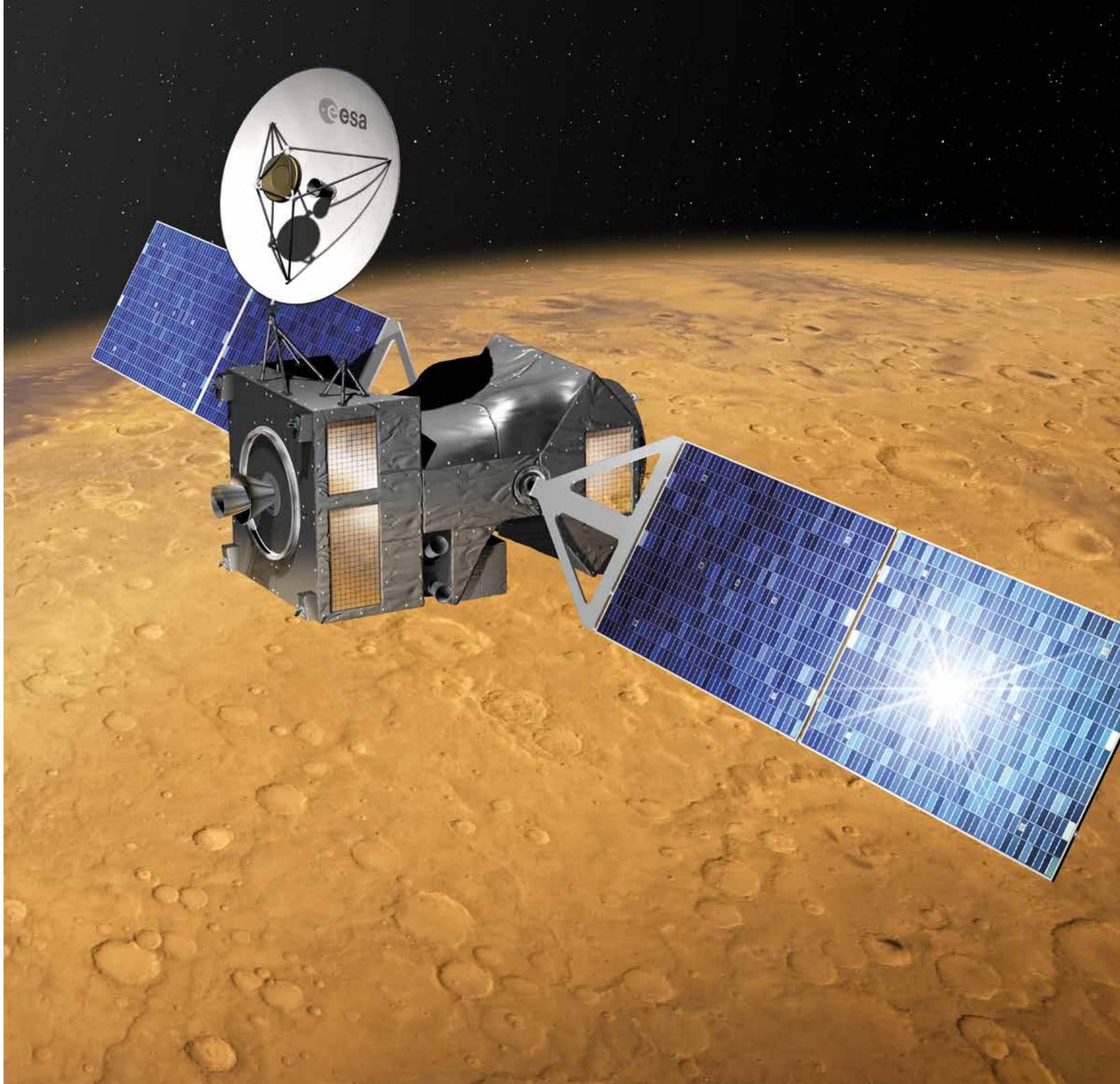
NOMAD est construit en étroite collaboration avec l'industrie. En Belgique, il s'agit d'OIP (Optique et Instruments de Précision, Oudenaarde) pour la gestion générale du projet et la construction des deux canaux infrarouges ainsi que l'intégration des trois canaux, LambdaX (Nivelles) pour la construction du canal UVIS, Thales Alenia Space (Charleroi) pour l'électronique et AMOS (Advanced Mechanical and Optical Systems, Liège) pour une série d'éléments optiques. Trois canaux composent l'instrument: SO (Solar Occultation)

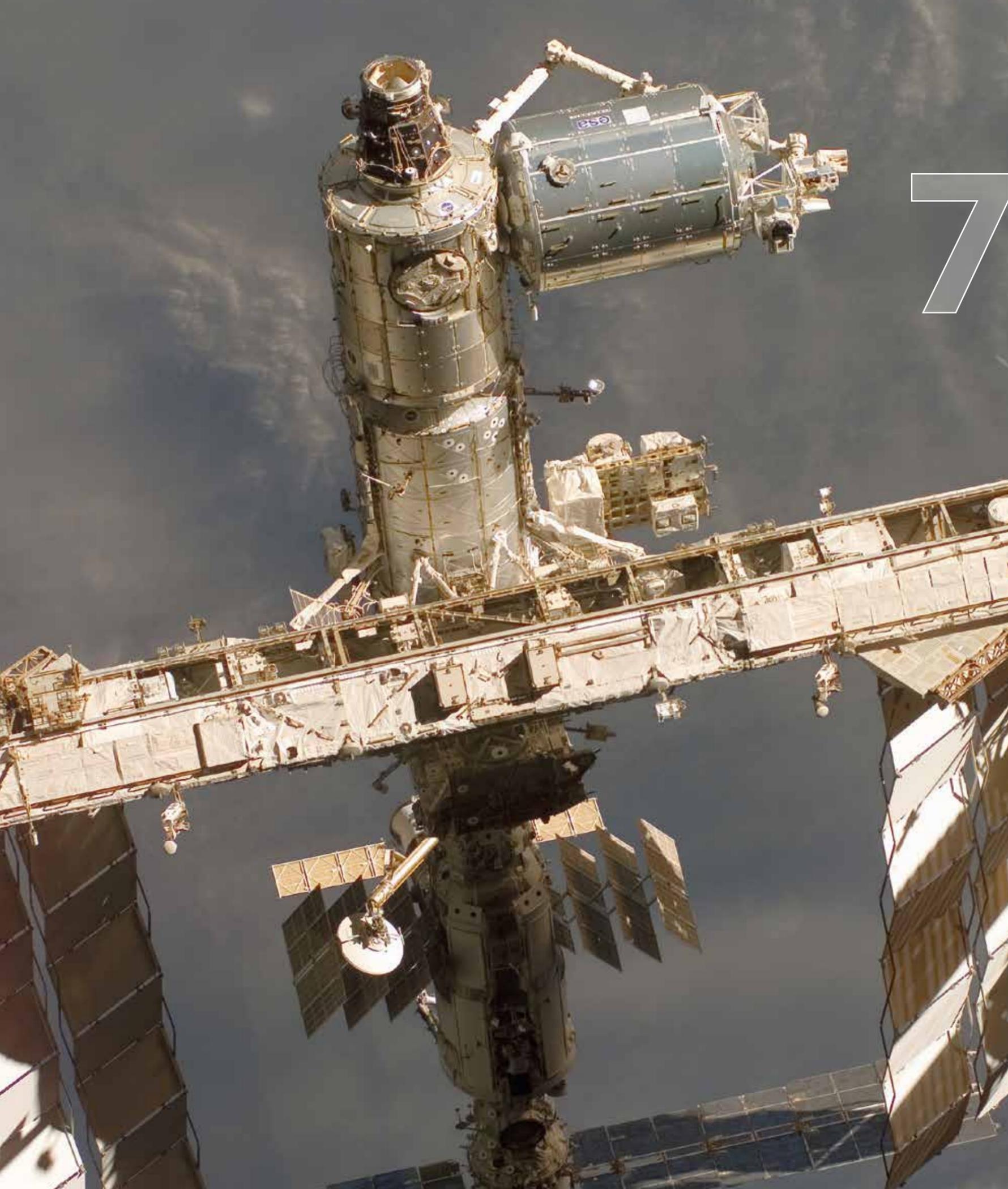
qui est une copie de l'instrument SOIR déjà à bord de la mission Venus Express de l'ESA, LNO (Limb Nadir solar Occultation) qui est une version améliorée de SOIR et UVIS. Un des principaux défis est d'adapter le concept de l'instrument SOIR optimisé pour des observations en occultation solaire aux mesures en pointé nadir, c'est-à-dire pour des observations de la radiation émise et réfléchiée par la surface de la planète étudiée.

La quantité de signal est bien moindre, environ 10.000 fois plus faible que pour des observations du Soleil en direct. Pour obtenir une qualité de mesure suffisante plusieurs améliorations ont été envisagées. Le concept initial était complexe et reposait sur l'utilisation d'un radiateur spécifique pour réduire la température du canal LNO. Malgré des tests encourageants effectués en 2012, il a cependant été décidé de ne pas développer plus avant ce radiateur en raison de sa masse. En effet la masse allouée à l'instrument NOMAD aurait été dépassée ce qui n'est pas acceptable pour une mission spatiale. Bien sûr les performances de l'instrument seront moindres qu'espérées, mais elles nous permettront cependant toujours de réaliser les objectifs scientifiques poursuivis.

Perspectives

En fin d'année 2014, l'instrument est dans sa phase finale de construction: toutes les pièces sont assemblées dans les chambres propres d'OIP. L'instrument subira ensuite toute une batterie de tests au Centre Spatial de Liège. En particulier la calibration finale de l'ensemble y sera réalisée par les chercheurs de l'IASB. Finalement la livraison de l'instrument est prévue pour début avril 2015. Ensuite il sera intégré sur la plateforme et le lancement sera effectué en janvier 2016.





B.USOC

Le B.USOC, Belgian User Support and Operations Center, est un centre de contrôle qui apporte son soutien aux scientifiques belges dans la préparation et le développement de missions ou d'expériences nécessitant un environnement de microgravité. La responsabilité du B.USOC comprend donc la gestion de certaines des principales expériences européennes à bord de la Station spatiale internationale (ISS). Sa mission comprend l'intégration des charges utiles à leur fonctionnement en orbite, la formation des astronautes dans l'exercice des expériences prévues, et le traitement et la diffusion des résultats scientifiques obtenus.

En tant que centre d'opérations, le B.USOC a participé à quatre activités majeures durant la période 2013-2014:

- Les opérations de l'ensemble des instruments SOLAR consacrés à l'observation du Soleil, localisé sur la Station Spatiale Internationale (ISS), et son support scientifique;
- les opérations du satellite du CNES, PICARD, orienté lui-aussi vers le Soleil;
- les tests sur le projet robotique METERON, de nouveau sur l'ISS;
- l'activité de communication avec les radioamateurs et un large public à partir de l'ISS: HAM-video.



La salle d'opération du B.USOC pendant la première opération de mesure d'une rotation solaire complète.



La salle d'opération du B.USOC durant le test METERON du 7 août 2014.

SOLAR

Couvrant une rotation solaire complète

Deux instruments de l'ensemble SOLAR: SOLSPEC et SOL-ACES, mesurent régulièrement l'irradiance spectrale du Soleil entre l'ultraviolet lointain et le proche infrarouge. 2013 et 2014 ont été caractérisées par le maximum irrégulier du cycle solaire 24. L'intérêt de ces données pour la communauté scientifique a été tel qu'à quatre reprises, la position de l'ISS a été modifiée aux solstices de manière à obtenir une période d'observation supérieure à 27 jours (contre une douzaine de jours habituellement) et donc de couvrir une rotation solaire complète. C'était la première fois qu'un objectif scientifique contraignait l'attitude de l'ISS.

Les données sont traitées par les équipes scientifiques du Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM (Allemagne), de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique, et du Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS, France).

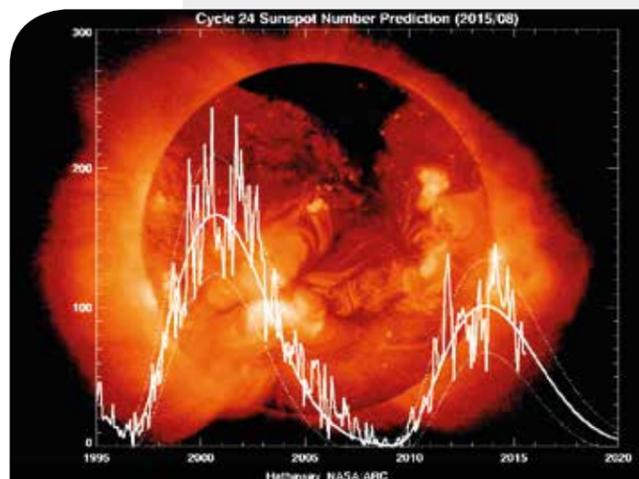
Ces résultats sont non seulement importants pour la physique solaire et le climat terrestre, mais ils peuvent également conduire à de nouvelles analyses de la météorologie spatiale au maximum de l'activité solaire.

PICARD

Mesurer les paramètres solaires

PICARD est dédié lui-aussi à la mesure de différents paramètres solaires dans le but d'étendre et de valider l'usage d'observations antérieures à l'ère spatiale et d'établir une climatologie à long terme de l'activité solaire et de son influence sur le système terre. Les opérations du satellite se sont arrêtées en avril 2014 et le B.USOC a remis toutes les données au CNES à la fin 2014.

Représentation du cycle solaire et des opérations PICARD (© CNES). La mission a atteint son objectif car elle a coïncidé avec la phase ascendante du cycle solaire 24.



METERON

L'utilisation des robots

METERON est un programme à long terme associant l'ESA, la NASA, ROSCOSMOS et le DLR. La future exploration habitée de l'espace impliquera des robots fonctionnant de concert avec les astronautes. Le projet METERON prépare cet objectif. L'ESA a assigné METERON au B.USOC en coopération étroite avec l'ESOC à Darmstadt.

En 2012, un premier essai utilisant un robot élémentaire avait déjà été effectué. L'essai de 2014 impliquait un robot proche en fonctionnalité d'un 'rover' martien, EUROBOT, et le nouveau protocole de communication DTN (Disruptive/Delay Tolerant Network Protocol), permettant de fonctionner dans des conditions de communication très dégradées. L'essai effectué par l'astronaute Alexander Gerst à bord de l'ISS en août 2014 fut un succès complet.

METERON est la première participation du B.USOC au programme d'exploration planétaire et le prépare aux futures opérations de l'ESA.



Le robot EUROBOT utilisé lors des essais METERON de 2014 (© ESA).

HAM VIDEO

Pour plus d'activités audiovisuelles

L'objectif du commissionnement de Ham Video On-Orbit est d'ajouter une activité vidéo à la station ARISS (Amateur Radio on the International Space Station) déjà présente sur la station. Les essais ont eu lieu en mars et avril 2014 et ont aussi pleinement réussi.

Un astronaute de la NASA en conversation avec des stations amateur TV italiennes durant les essais de 2014 de Ham-Video (© ESA-NASA).



8

SERVICES DE SOUTIEN

COMMUNICATION

Aperçu des activités 2013-2014

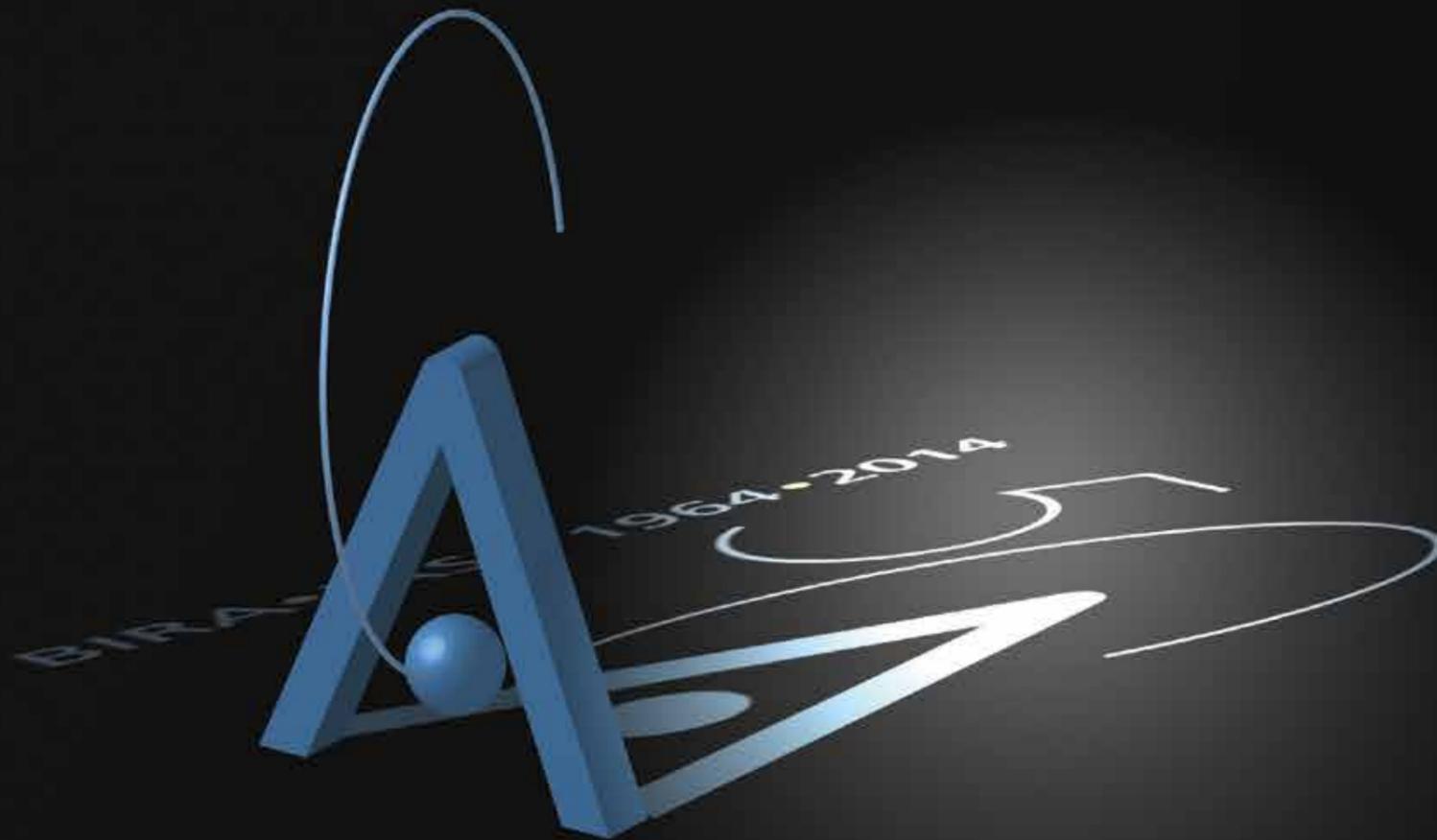
La communication est un outil essentiel aussi bien pour l'élaboration de politiques, que pour les services aux publics et la sensibilisation de ceux-ci. A côté de la recherche scientifique, c'est donc une des tâches clés de l'IASB.

Les activités de communication des deux dernières années ont été axées sur la célébration du 50e anniversaire de l'IASB et sur l'arrivée de Rosetta près de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko. Mais beaucoup d'autres initiatives ont été réalisées.

Par exemple, en 2013, l'IASB s'est pour la première fois associé à un bureau de communication externe pour publier son rapport d'activités bisannuel (2011-2012). Contrastant ainsi avec les éditions précédentes qui étaient entièrement réalisées en interne.

A l'occasion du 100e anniversaire de l'Institut Royal Météorologique (IRM) en 2013 et du 50e anniversaire de l'IASB en 2014, le pôle espace a exceptionnellement ouvert ses portes deux ans de suite. Ces journées portes ouvertes ont suscité un intérêt considérable et ont été accueillies très positivement.

L'Institut a également participé à de nombreux événements de plus petite envergure. Cette participation s'est faite sous la forme de conférences, d'ateliers, d'expositions temporaires, ... Le but est de susciter l'intérêt du public et du monde éducatif pour l'enseignement des 'sciences', mais il s'agit aussi d'attirer l'attention du monde politique sur l'importance des thèmes et des activités de recherche. Ces thèmes de recherche ont reçu un large écho dans les différents médias. La presse écrite et audiovisuelle ainsi que plusieurs sites web connus s'y sont intéressés.





50e anniversaire de l'IASB Un moment exceptionnel en 2014

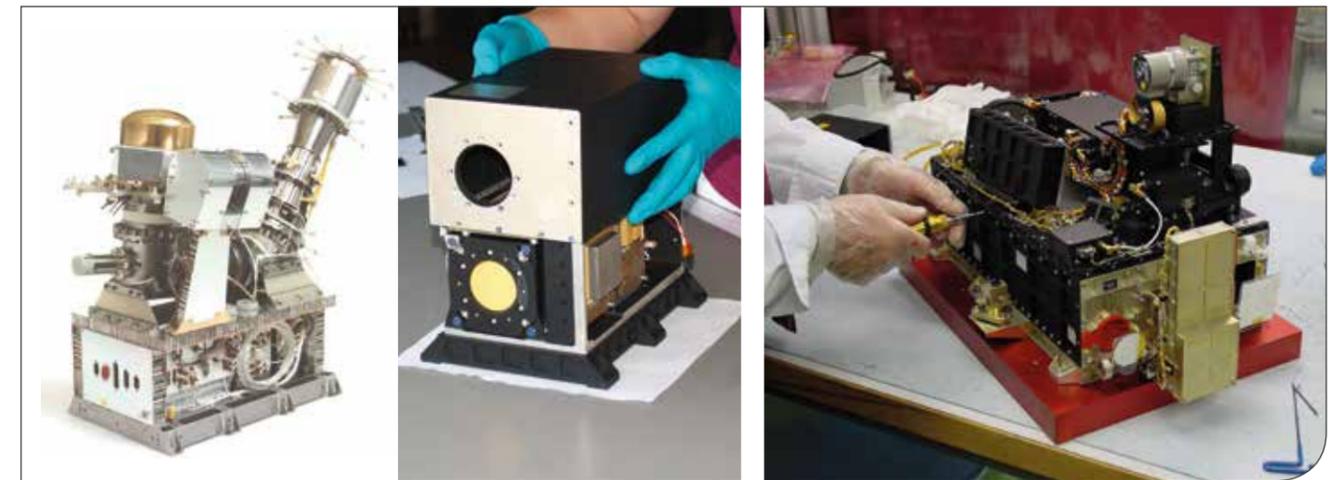
Le 25 novembre 2014, cela faisait exactement 50 ans que l'arrêté royal établissant l'IASB était publié. Marcel Nicolet, qui était jusque-là le responsable du service d'aéronomie à l'IRM, en a été nommé premier directeur. Pour l'institut, cet anniversaire était une excellente occasion de revenir sur son histoire et ses réalisations. En outre, c'était aussi une bonne occasion d'informer le grand public sur les activités de l'institut et l'expertise apportée par celui-ci.

Et comme un 50e anniversaire ne peut évidemment pas passer inaperçu, l'IASB a organisé de nombreuses festivités en 2014:

- En mars: organisation d'une session extraordinaire du groupe de travail 'Espace' du Sénat belge;
- En juin: lancement d'un nouveau site web entièrement dédié aux 50 ans de l'IASB: <http://50.aeronomie.be>;
- De juin à décembre: mise en place d'une exposition itinérante, spécialement réalisée à l'occasion des 50 ans. Celle-ci a sillonné la Belgique depuis le planétarium de l'Observatoire royal de Belgique (Bruxelles), jusqu'à l'Euro Space Center (Redu), en passant par le Centre de Culture Scientifique (Charleroi) pour revenir au plateau d'Uccle;
- En septembre: grande fête autour d'un barbecue en plein air pour le personnel, ancien et actuel;
- En octobre: journées portes ouvertes du Pôle Espace, avec pour la première fois une avant-première pour les écoles. A cette occasion et grâce au soutien de la Politique scientifique fédérale belge (Belspo), une bro-

chure éducative, remplie d'expériences pour enfants et adultes, a été publiée. Une tente éducative permettait aux visiteurs de mener des expériences avec les scientifiques. Cette tente placée pour l'occasion sur le site, a également accueilli une exposition exclusive de photos sur le changement climatique, avec les réalisations du photographe environnemental Gary Braasch, spécialement amenée de Munich au plateau d'Uccle pour l'occasion. Comme l'institut pourra bientôt ajouter le mot 'royal' à son nom, une visite royale était inéluctable. Sa Majesté le Roi a été représentée par Son Altesse Royale le Prince Laurent, qui a officiellement ouvert ces journées portes ouvertes en découpant le ruban tricolore. Après une visite de l'énorme exposition de l'IASB, il a pu s'entretenir, depuis le centre de contrôle du B.USOC, avec l'astronaute Alexander Gerst, alors à bord de la Station spatiale internationale;

- En novembre 2014, l'institut a publié un livre anniversaire sur les activités des 50 années de l'IASB et, peu de temps après, une édition spéciale du Science Connection entièrement consacrée au 50e anniversaire de l'IASB a suivi. Enfin, pour clôturer les festivités en beauté, une session académique a été organisée le jour de l'anniversaire.



Trois projets à succès réalisés par l'engineering team de l'IASB à gauche: DFMS (Rosetta, arrivée à destination en août 2014). au centre: EPT (PROBA-V, lancement en mai 2013). à droite: SOIR (Venus-Express, fin de mission en décembre 2014).

L'arrivée tant attendue de Rosetta près de 'Chury'

Si 2014 a été une année particulière, ce n'est pas seulement à cause de l'anniversaire de l'IASB. 2014 était aussi l'année du réveil de Rosetta (20 janvier), de sa mise en orbite autour de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko (8 août) et de 'l'atterrissage' de Philae à la surface de la comète (12 novembre). Tout cela après un voyage de 10 ans. Rosetta porte avec elle l'instrument ROSINA. Un spectromètre de masse auquel l'IASB a grandement contribué.

Pour mettre en valeur cet événement, une exposition a été mise sur pied début 2014 avec des maquettes, des posters et du matériel vidéo. Cette exposition a été régulièrement mise à jour avec les tout derniers résultats. De nombreuses conférences ont eu lieu aussi un peu partout dans le pays. Un espace était également entièrement dédié à Rosetta lors des journées portes ouvertes.

Début août, la presse était présente en masse à l'IASB pour des entrevues avec les scientifiques et les ingénieurs impliqués. Le 12 novembre, l'IASB a participé à deux événements à propos de l'atterrissage de Philae. Le 1er à l'Université de Gand où tout le monde a pu suivre en direct la descente de l'atterrisseur sur la comète. Le 2e a permis à d'autres personnes, présentes au Berlaymont à Bruxelles, d'assister à l'arrivée des premières données. La contribution belge au projet - et en particulier celle de l'IASB - a ainsi été mise en avant lors de chacune de ces occasions.

INGÉNIERIE

Partenaire et partie-prenante des projets spatiaux

La mission primordiale du département d'ingénierie est d'apporter un soutien technique et technologique. Ce support se situe au niveau de l'électronique et de la mécanique. Voici un aperçu des projets spatiaux auxquels le département ingénierie a contribué de manière importante durant ces deux dernières années:

- NOMAD est un spectromètre optique qui sera placé à bord d'ExoMars-TGO, la prochaine mission de l'ESA vers Mars. Le lancement est prévu en janvier 2016. Le département ingénierie a travaillé au développement de l'instrument mais fut, par la suite, responsable de la gestion de la documentation et d'une partie du système d'ingénierie de NOMAD.
- Dans la continuité du projet EPT (Energetic Particle Telescope), les ingénieurs de l'IASB ont travaillé sur le projet 3DEES, un détecteur de particules qui - contrairement à EPT - peut mesurer dans plus de directions.
- Le département ingénierie a continué à fournir un soutien à la préparation d'ALTIUS (Atmospheric Limb Tracker for the Investigation of the Upcoming Stratosphere), un imageur multi-spectral pour l'observation de l'atmosphère terrestre placé sur un mini-satellite PROBA. La période qui vient de s'écouler a été essentiellement consacrée à la conception d'un canal radiofréquence qui doit alimenter les Acousto-Optical Tunable Filters (AOTF) et à la conception de différentes parties mécaniques associées.



Projet au sol soutenu par l'engineering.
Pointeur solaire pour FTIR/BARCOS.



Projet au sol soutenu par l'engineering.
Cuvette pour PTRMS.

- Dans le cadre du projet PICASSO, ont débuté à la fois la conception et le prototype des sondes de Langmuir.
- En décembre 2014, après huit années de mesures scientifiques autour de Vénus, vint la fin de la mission Venus Express. SOIR, l'un des instruments à succès de l'IASB, se trouvait à bord de cette mission. Durant la période 2013-2014 des centaines d'opérations furent menées par l'équipe de l'Institut.

Malgré le fait que pendant la période 2013-2014 aucune contribution effective n'a été apportée à EPT (Energetic Particle Telescope), et au DFMS (Double Focusing Mass Spectrometer) qui font partie de l'instrument ROSINA à bord de Rosetta, le département ingénierie de l'IASB a continué à assurer une contribution vis-à-vis de ces deux instruments. Une structure mécanique a été construite pour EPT. EPT a été lancé en mai 2013 à bord du satellite PROBA-V et fournit de précieuses mesures du rayonnement en orbite basse de la Terre.

Rosetta se réveilla en janvier 2014 après une longue période d'hibernation et arriva en août 2014 – après un voyage de 10 ans – à sa destination autour de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko. DFMS, le détecteur, ainsi qu'une partie de l'électronique conçue par le département d'ingénierie de l'IASB, fournit des résultats scientifiques innovants au sujet de la composition de la comète et de la naissance de la vie sur Terre.

Partenaire dans des projets 'ground based' et 'air borne'

Le département ingénierie ne travaille pas uniquement sur des projets spatiaux, il participe aussi à d'autres projets.

- L'équipe d'ingénierie a construit un certain nombre de pointeurs solaires et a fourni au groupe infrarouge du soutien sur le plan électronique, mécanique ainsi que technologique (FTIR, BARCOS). Une assistance fut aussi fournie par le département pour assurer l'installation sur site, le service et le suivi de l'appareil.
- Quant au groupe ultraviolet un certain nombre de pièces mécaniques furent fabriquées dans le cadre de

différents projets (MAXDOAS, SOAZ, SWING ...).

- L'ingénierie a également contribué aux aspects électroniques et mécaniques de projets tels que CIMS, PTRMS. Il s'agissait de projets réalisés pour le groupe de travail spectrométrie de masse. Ils consistaient notamment en la construction de cuvettes, d'installations de labos et d'alignement de mesures sur site.
- L'ingénierie a construit des pièces mécaniques pour des antennes et des stations de réception pour l'étude des météorites (BRAMS) et a travaillé sur un instrument de démonstration (Planeterra) qui peut aussi servir pour des mesures de plasmas.

Outre le soutien fourni aux scientifiques par l'ingénierie, un service de support généraliste est offert pour le fonctionnement de l'Institut. Il s'agit notamment de la prévention et de la maintenance de l'infrastructure, des installations électriques, thermiques et informatiques, l'évacuation des déchets, le transport de matériel ou de personnes...



Projet au sol soutenu par l'engineering.
Antenne pour BRAMS.

L'ingénierie met à disposition son infrastructure pour l'ensemble du Pôle Espace, comme par exemple l'utilisation de la chambre propre avec son infrastructure de vide thermique, y compris son opérateur, une imprimante en 3D pour la fabrication de prototypes mécaniques et une fraiseuse de précision pour la fabrication de PCB.

Un projet important NOMAD, Nadir and Occultations for Mars Discovery

TGO, Trace Gas Orbiter est la première des deux missions interplanétaires de l'ESA vers Mars. TGO sera lancé en mars 2016. Un des quatre instruments scientifiques à bord est NOMAD, un spectromètre optique pourvu de trois canaux. Deux canaux fonctionnent dans l'infrarouge (les canaux SO et LNO) et le troisième dans les domaines ultraviolets et visibles du spectre (le canal UVIS). NOMAD permettra de mesurer la composition de l'atmosphère martienne en regardant directement vers la planète (mesures nadir avec les canaux LNO et UVIS) et grâce à la technique de l'occultation solaire (avec les canaux SO et UVIS).

Le responsable scientifique de NOMAD travaille à l'IASB. L'équipe d'ingénierie de l'IASB a apporté une contribution importante à la conception et à la construction de l'instrument. En 2013-2014 NOMAD a évolué de la 'phase de conception préliminaire' à la 'phase critique de conception' (les deux phases étant soumises à un examen approfondi de la part de l'ESA) pour en arriver à la construction de plusieurs modèles de l'instrument. Début 2014, l'EIM (Electrical Integration Model) a été livré au fabricant de satellite, TAS, afin qu'il puisse être installé dans l'Avionics Test Bench, une installation d'essai dans laquelle les interfaces électriques entre le satellite et les instruments sont testées. En novembre 2014, le STM (Structural and Thermal Model) a été livré. Le STM a été intégré avec succès sur le satellite prouvant que

les interfaces mécaniques sont en ordre. Le STM a subi, avec le satellite, des tests de vibrations et des essais thermiques. Par conséquent, il est donc structurellement et thermiquement pleinement représentatif du ProtoFlight Model. Ceci est le modèle de vol final qui, en avril 2015, va remplacer le STM sur le satellite.

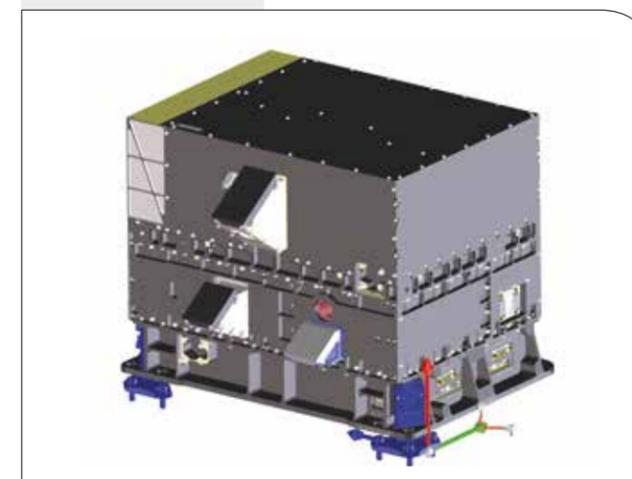
Le canal d'occultation solaire de NOMAD (le canal SO) est une copie de SOIR (Venus Express). Le canal Limb, Nadir et Occultation (LNO) est une version améliorée de SOIR. Il est mieux adapté pour des sources lumineuses plus faibles et peut donc non seulement mesurer en mode occultation solaire mais aussi en mode nadir. L'équipe d'ingénierie était responsable de la conception et la construction de toutes les pièces mécaniques structurelles. En plus de la plaque de base, des parois et du radiateur, les supports des détecteurs, l'électronique, etc. ont été conçus en interne et fabriquée par des partenaires industriels. Un des éléments les plus complexes de NOMAD est le mécanisme de miroir flip par lequel le canal LNO peut utiliser aussi bien le Soleil que Mars comme source de lumière.

À côté de la mécanique, l'électronique pour les canaux de SO et LNO a aussi été conçue par l'équipe de l'IASB. Ces canaux ont été conçus autour de FPGA (Field Programmable Gate Arrays), contenant le firmware. Ce firmware s'assure que toutes les tâches sont remplies: le refroidissement du détecteur, le réglage de l'AOTF, la lecture du détecteur, ainsi que le comptage des pixels et/ou spectres, la mesure des spectres de données d'entretien, ...

Ces données sont transmises à SINBAD, un processeur central développé par une équipe espagnole (IAA, Grenade), et fabriqué sous le contrôle de l'IASB par un partenaire industriel belge (Thales Alenia Space Belgique).

L'équipement de soutien et le logiciel qui sera utilisé à partir du sol a été conçu par l'IASB. Il s'agit des outils mécaniques

NOMAD. Modèle CAD.



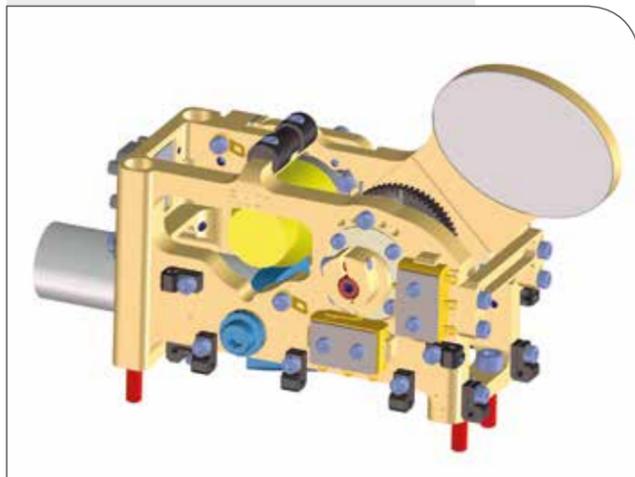
NOMAD. Modèle de vol du canal LNO.



pour manipuler l'instrument, des conteneurs de transport et de l'EGSE (Electrical Ground Support Equipment). Ce dernier est utilisé pour communiquer avec l'instrument et lui fournir l'alimentation de tension correcte et les commandes de commutation.

Tous les éléments ont été fabriqués, intégrés et testés en 2013-2014 en collaboration avec OIP (Optique et Instruments de Précision, Oudenaarde), le maître d'œuvre industriel de NOMAD.

Mécanisme de miroir de NOMAD. Modèle CAD.



Mécanisme de miroir de NOMAD. Modèle de vol intégré dans le canal LNO.



TECHNOLOGIE DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION

Collaboration entre ICT et la recherche

Le service ICT gère et développe l'infrastructure ICT de l'institut et offre du support pour toutes les activités liées à l'ICT. Cela inclut aussi bien l'extension et l'entretien de l'infrastructure de base (réseau, serveurs, stockage, services) que l'achat, l'installation et l'entretien des postes de travail. Cela concerne les PCs, les terminaux et les logiciels installés. Le service ICT offre aussi un support direct aux utilisateurs lorsqu'ils utilisent l'environnement pour la recherche scientifique et/ou pour assurer des tâches opérationnelles. Ce support inclut la gestion et le traitement des données, le développement d'applications, l'utilisation de la bureautique, ...

Le lien entre le développement technologique dans le monde ICT et la demande de moyens pour soutenir la recherche est très étroit. Il en découle une interaction très dynamique entre l'offre et la demande. L'expansion du milieu ICT peut mener à de nouveaux développements au niveau

de la recherche. Mais les besoins de la recherche peuvent mener à d'importants changements de l'infrastructure. Nous avons ainsi réalisé d'importants projets de remplacement de stockage de données et d'extension de l'infrastructure de calcul durant la période 2013-2014. Nous avons aussi investi dans l'optimisation des tâches opérationnelles, dans l'informatisation de l'administration et dans divers projets de gouvernance, impliquant une plus grande professionnalisation de la gestion de l'environnement ICT.

Extension de la virtualisation de l'infrastructure ICT

Depuis quelques années, nous constatons une tendance vers une virtualisation croissante de l'infrastructure ICT. Cette technologie permet avec un nombre réduit (restreint)

de serveurs physiques et d'une couche logicielle additionnelle d'émuler des dizaines, voire des centaines, de serveurs 'virtuels'.

Dans la pratique, cette technologie offre de multiples avantages pour l'extension et la gestion de l'infrastructure ICT. Auparavant, chaque application de service réseau nécessitait l'achat d'un serveur physique. Dorénavant, ces serveurs sont remplacés par des serveurs virtuels. Ils sont configurés à un niveau logiciel (software), présentant ainsi l'avantage de pouvoir initier plus rapidement et de façon plus flexible de nouveaux projets. Il n'est plus nécessaire d'attendre l'achat d'une nouvelle machine pour pouvoir installer une application. De surcroît, les serveurs physiques qui subsistent en petit nombre sont utilisés de façon plus efficace étant donné le plus grand nombre d'applications qu'ils hébergent. En conséquence, les coûts opérationnels, dus à la consommation électrique et l'utilisation de l'espace de la salle d'ordinateur, sont réduits de façon significative.

En quelques années, le nombre de serveurs physiques utilisés pour fournir des services réseau et des applications spécifiques est passé d'une vingtaine à 6. Simultanément, le nombre d'applications spécifiques, de services réseau et de serveurs web a fortement augmenté rendant ainsi le gain encore plus important. A la fin de l'année 2014, environ 80 serveurs virtuels fonctionnaient sur l'infrastructure de virtualisation de l'institut. C'est une croissance considérable en quelques années.

Cette technique de virtualisation au service ICT permet de répondre aux besoins des projets ou groupes de travail de façon plus souple. Il est possible de fournir des machines virtuelles configurées 'sur mesure' afin de satisfaire aux requis d'applications particulières. Cela permet aussi de mieux gérer les applications existantes en créant des versions de développement, de test et opérationnelles distinctes et indépendantes.

Enfin, cette technique présente l'avantage considérable d'augmenter la disponibilité des services. En cas de panne d'un serveur physique, les machines virtuelles sont facilement redémarrées sur un autre serveur physique éventuellement même dans un autre datacenter.

Extension de l'infrastructure de traitement de données

Pour assurer correctement ses missions, l'institut doit disposer de données de base (mesures) précises et pouvoir évaluer l'évolution de l'atmosphère. Ces données sont: les mesures de l'état de l'atmosphère et des facteurs l'influençant les plus importants (émissions, rayonnement, ...). L'évolution technologique des techniques de mesures ainsi que de l'informatique a pour conséquence que les quantités de données acquises augmentent d'année en année. Les nouvelles générations d'expériences spatiales, le nombre croissant et

l'amélioration de qualité des stations de mesures au sol a pour conséquence que les scientifiques réceptionnent quotidiennement plusieurs gigabytes de nouvelles données.

Ces données servent différents besoins et sont traitées de façon fort différents. Une partie des données est utilisée pour la livraison opérationnelle de produits scientifiques. Dans ce cas, les données entrantes sont traitées dès leur réception afin que les résultats en découlant soient disponibles le plus rapidement. Cela concerne les concentrations de certaines particules dans l'atmosphère, les mesures des indices UV ou les résultats d'un modèle. Ce type de traitement est aussi utilisé pour comparer les résultats de différents instruments et de différentes situations géographiques afin de contrôler la fiabilité des mesures et de valider les résultats.

Les données peuvent aussi dans un premier temps être sauvegardées afin d'être traitées en bloc ultérieurement, par exemple mois par mois. Les résultats globaux sont ensuite mis à disposition du monde scientifique. Cela est nécessaire entre autres, pour des analyses plus approfondies que le premier traitement ou pour tenter d'établir des liens entre des différents sets de données. Parfois aussi, un set complet de mesures est traité à nouveau afin d'en améliorer les résultats ou pour l'analyser d'un nouveau point de vue.

La modélisation est un autre flux de traitement de données important où les données sauvegardées servent de source (input) pour des modèles mathématiques. Ces traitements permettent de comparer les résultats d'un modèle pour un processus atmosphérique particulier avec la réalité. Cela permet ensuite dans une phase ultérieure d'extrapoler un processus à partir d'un modèle et de réaliser des prévisions (space weather, chemical weather, ...).

Chaque méthode de travail demande de plus en plus de puissance de calcul avec pour conséquence que l'infrastructure de traitement de l'institut doit suivre la cadence ou éventuellement croître plus rapidement que la quantité de données qui doit être traitée. Dans certains domaines, nous constatons que la capacité de calcul est un facteur limitant pour la recherche qui peut être menée à l'institut. Afin de pallier à ces manquements (besoins), et dans l'attente de l'acquisition pour le pôle Espace d'un grand serveur de calcul, nous avons réalisé d'importants investissements en serveurs de calcul. Durant la période 2013-2014, nous avons ainsi acquis plus de 400 unités de calcul (processor-cores). Nous avons réalisé de gros efforts pour optimiser les flux de données, pour exécuter plus efficacement les codes de traitement et pour automatiser les chaînes de traitement.

L'HUMAIN ET LES CHIFFRES

Le personnel de l'IASB

Durant la période 2006-2012, la croissance en personnel a été de 37%. En chiffres absolus cela représente concrètement une hausse de 113 à 155. Cette augmentation s'est manifestée essentiellement au sein de la population contractuelle qui possède un bagage scientifique, technique ou orienté vers l'ICT. Ceci était lié au fait d'une importante hausse du nombre de projets scientifiques financés de manière externe (ESA, CE, l'Etat Fédéral).

Depuis la mi-2012, le nombre de personnes occupées est resté quasi constant. Fin 2014, tout comme fin 2012, 155 personnes étaient en service, dont 92 scientifiques (59%). La part de fonctionnaires statutaires a été durant ces deux dernières années en légère hausse (+ 5 unités) pour atteindre le nombre total de 55 membres du personnel fin 2014 dont 28 scientifiques.

Au sein de l'IASB, le mouvement du personnel est très limité. Le départ du personnel en 2013 et 2014 représente en moyenne 4,19% et est surtout le résultat de départs naturels

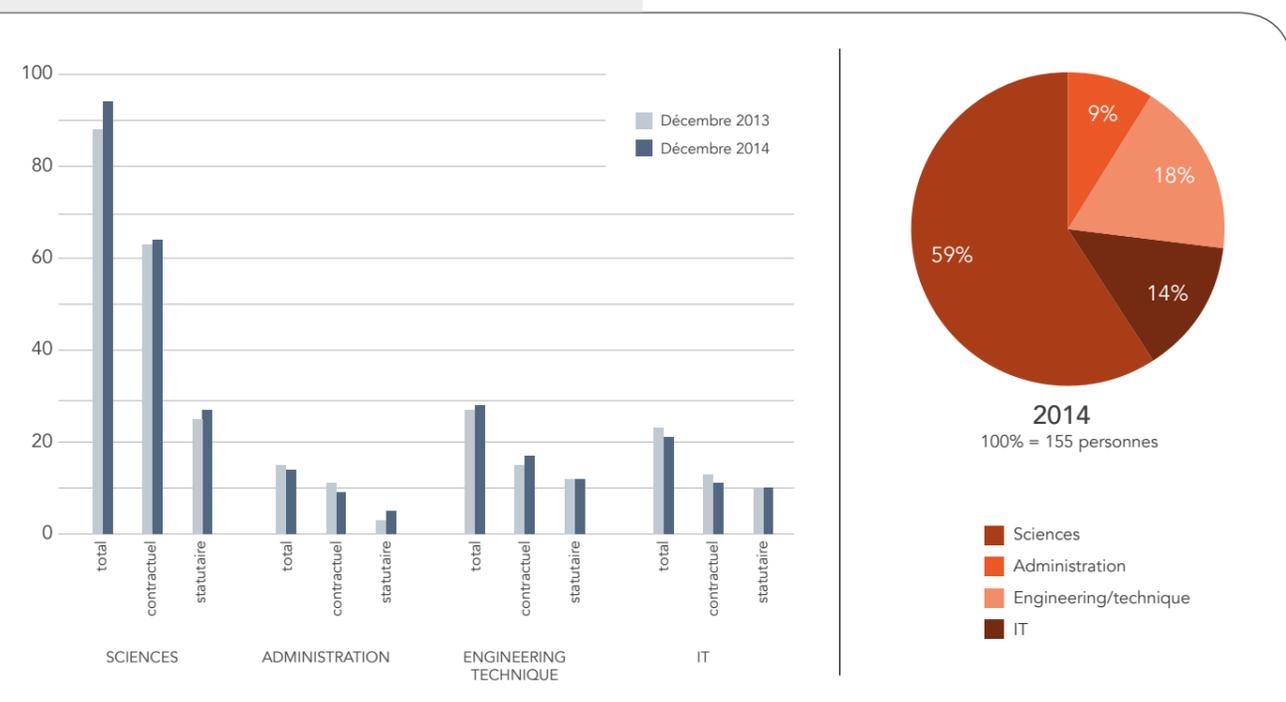
des fonctionnaires qui partent à la pension ou de licenciements à cause de contrats à durée limitée qui ne pouvaient être prolongés.

En tant qu'employeur, l'IASB mène un certain nombre d'efforts pour créer un contexte de travail attractif et stable, p.ex. à travers une offre de perspectives de carrière. Ceci se concrétise par exemple par le fait de prévoir des possibilités de promotion ainsi que l'ouverture de postes de travail statutaires qui donne à notre population contractuelle l'opportunité de concourir pour un emploi stable. Les économies au niveau de l'enveloppe du personnel (dotation de l'Etat Fédérale pour le personnel qui sert principalement pour l'emploi de personnel statutaire) et le gel de recrutement ont freiné certaines ambitions qui auraient pu être réalisées. Un principe a été utilisé, c'est celui de la mobilité interne, principalement au sein des départements scientifiques.

Le télétravail a été mis en place en 2007 et prévoit deux systèmes: une formule structurelle et une variante occa-



La répartition du personnel selon les domaines de fonction (sciences, administration, engineering/technique, informatique) et statut (contractuel/statutaire) en chiffres absolus (gauche) et en pourcentages pour l'année 2014 (droite).



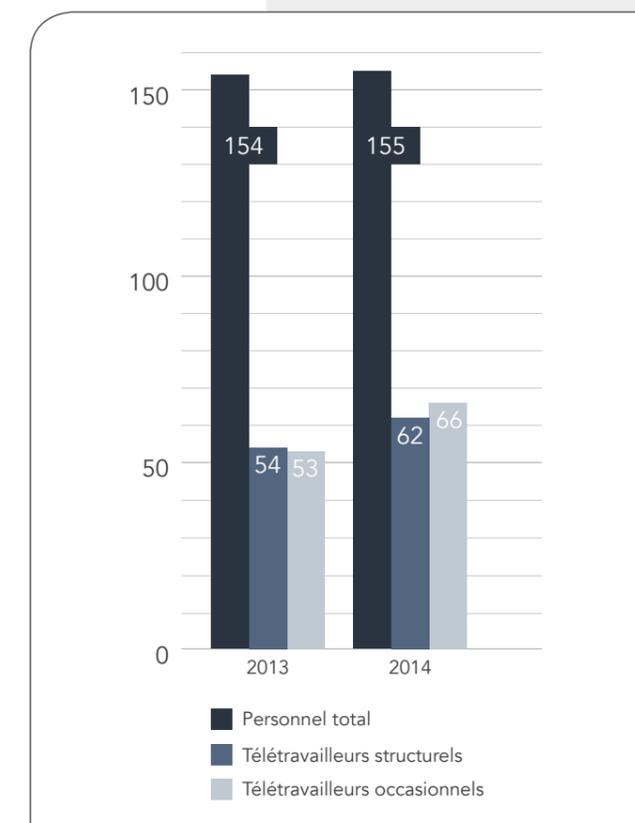
sionnelle. Année après année le succès de cette alternative n'a pas cessé d'augmenter. En 2014, en moyenne 8,3% du temps de travail s'est effectué à travers le télétravail.

La formule télétravail a un impact positif sur le bien-être des fonctionnaires et permet un meilleur équilibre entre vie professionnelle et vie privée. Elle a aussi une influence positive sur l'absentéisme pour cause de maladie. Le pourcentage d'absentéisme pour maladie en 2013 et 2014 fut respectivement de 2,27 et 2,6%. Il s'agit d'une légère baisse en comparaison avec les années précédentes.

De plus ce pourcentage se situe très bas dans la comparaison avec le benchmark fédéral ainsi que celui du secteur privé.

	2013	2014
Promotions (stat./contr.)	7/10	-/2
Recrutement de statutaires dont statutarisations	2 1	4 4
Mobilité interne	3	2

Aperçu des télétravailleurs à l'IASB



ENQUÊTE DE SATISFACTION 2014

Les résultats

En 2014, l'IASB a, pour la première fois, organisé une enquête de satisfaction auprès de son personnel. Le haut niveau de participation de 61% peut être interprété comme un bon critère d'implication et montre un véritable besoin pour le personnel d'exprimer son avis à propos des aspects organisationnels et de gestion, et que cet avis soit repris au niveau de la gestion de l'organisation.

Le taux de satisfaction fut de 88%. Cela signifie que 88% des membres du personnel sont de 'très satisfaits' à 'modérément satisfaits'. Les domaines qui ont reçu des scores allant de bon à très bon sont:

- Le contenu du travail: la diversité du travail, l'utilisation des compétences au sein de la fonction actuelle, l'accès à l'information, la clarté des résultats attendus;
- La responsabilisation, la participation et l'autonomie dans le fonctionnement propre et l'impact sur le fonctionnement et les objectifs de l'équipe;
- Le fonctionnement des services de support et les outils mis à disposition (par exemple dans le domaine de l'informatique, ainsi que le mobilier de bureau)
- La flexibilité dans l'organisation du temps de travail (horaires flexibles et possibilité de télétravail);
- Les relations sociales et les interactions au sein de l'organisation (bonne ambiance, culture de collaboration, respect de l'autre comme la nationalité, le handicap, l'orientation sexuelle ...)

"90% est fier de travailler pour l'IASB."

Les points moins positifs furent:

- L'accessibilité au lieu de travail (temps/distance domicile-lieu de travail) et certaines procédures administratives trop lourdes ou trop de travail administratif;
- Les questions de rémunération sous toutes leurs formes (trop peu de diversité dans les rémunérations/écart de salaire, insuffisance de la rémunération au regard de la charge du travail et des responsabilités);
- La gestion de carrière (les possibilités de carrière et de potentiel d'amélioration, transparence, préparation/formation à une fonction future, statut précaire du scientifique contractuel qui conduit à plus d'incertitude en matière d'emploi et à une plus grande question vers l'emploi statutaire);
- Impact insuffisant au niveau de l'organisation: participation au processus de changement et de restructuration;

- L'offre d'activités extra-professionnelles pendant et en dehors des heures de travail;
- L'offre de communication interne interactive et de flux d'informations.

En tenant compte des actions d'amélioration à apporter, des groupes de travail ont été créés à deux niveaux. Ceci s'est fait au niveau du SPP Politique scientifique fédérale avec des représentants de chaque institution scientifique ayant mené l'enquête de satisfaction. L'objectif est d'établir un plan d'action transversal pour l'ensemble de la politique scientifique et les dix institutions scientifiques. Dans ce groupe, l'accent est mis sur l'amélioration de la communication interne, les initiatives concernant le développement de carrière et les actions visant le leadership et la vision.

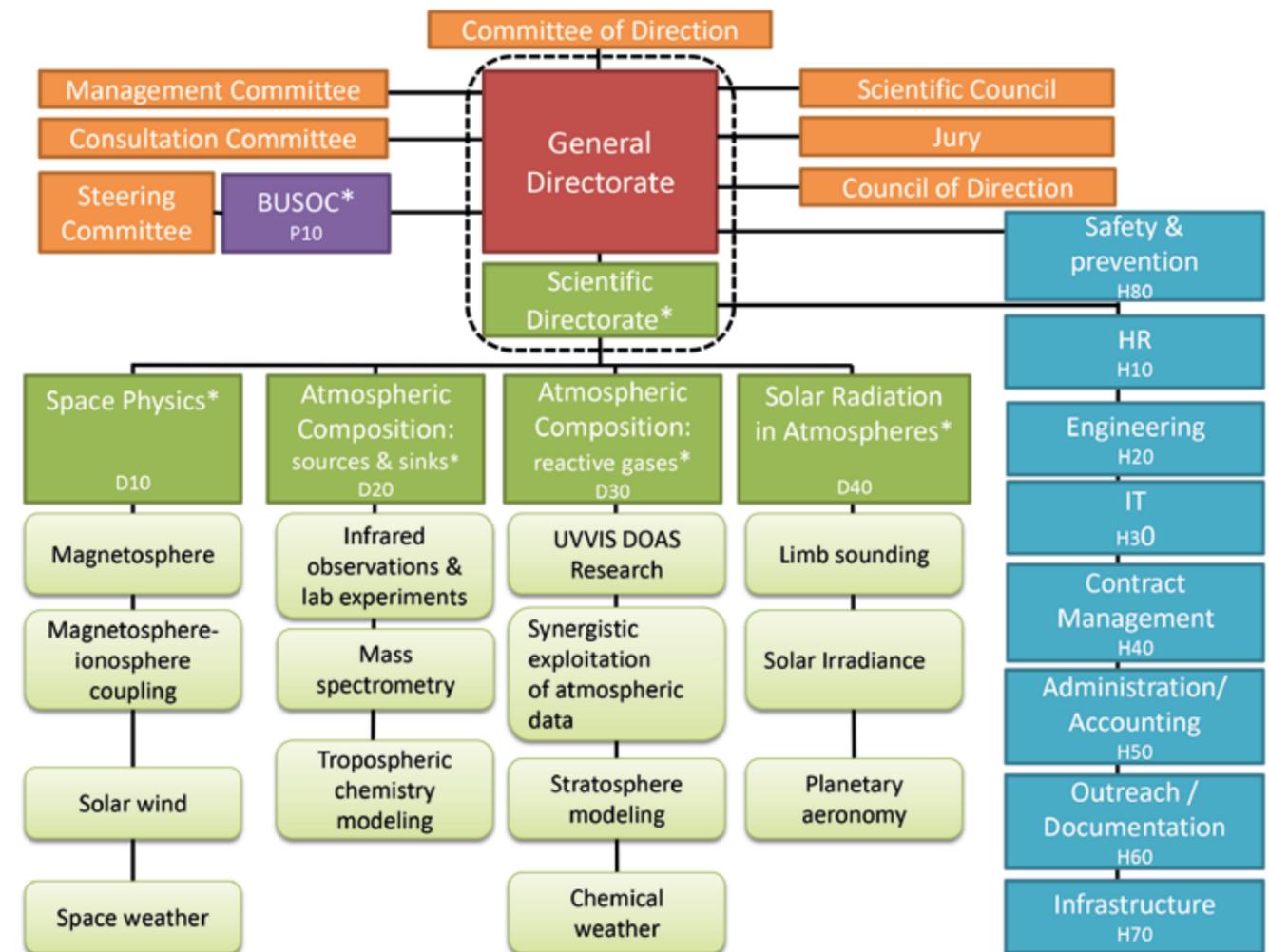
Au sein de l'IASB, un groupe parallèle se composant de 10 membres du personnel reflétant la diversité de celui-ci, a été créé. Cette initiative vise une action locale complémentaire au plan global d'action transversale. Les deux plans seront proposés pour validation en 2015.

Un nouvel organigramme pour une nouvelle structure

En février 2013, le nouvel organigramme fonctionnel, qui a été officiellement approuvé par le Conseil scientifique de l'IASB, est entré en vigueur. Il reflète la structure actuelle de l'institut et confirme la position de chaque membre du personnel au sein de cette structure. Il définit cinq divisions scientifiques dont les dirigeants (chefs de division) ont été choisis parmi un groupe de candidats qui ont postulé après un appel interne pour cette fonction.

Les divisions scientifiques correspondent aux thèmes scientifiques de l'aéronomie qui sont traités au sein de l'IASB. Une direction scientifique joue le rôle de coupole pour assurer une interaction optimale entre les divisions. Chaque division thématique se compose de trois ou quatre équipes scientifiques aussi bien dans la recherche fondamentale que dans les services scientifiques connexes. L'organigramme définit également sept services de support. La particularité du B.USOC au sein de l'IASB est reconnue dans l'organigramme comme un programme scientifique. Pour ce service un chef de programme scientifique a été sélectionné.

La désignation des responsables des différents départements



Des cercles de développement vers les cycles d'évaluation

et programmes scientifiques (chefs de département et chef de programme) remplit d'une manière fonctionnelle la pénurie des postes de direction. Cette pénurie existe depuis 2008, quand les nouveaux statuts ont été publiés dans le cadre de la nomination des titulaires de mandat dans des postes de direction (directeurs des services de support et directeurs opérationnels). Ce genre d'engagement a été initialement gelé au sein de l'IASB dans le cadre du projet de fusion du Pôle Espace de la Politique scientifique fédérale.

Les chefs de tous les départements (divisions et programmes scientifiques et services de support) se réunissent tous les deux mois dans ce qu'on appelle les réunions de staff pour discuter du fonctionnement général de l'institut. La réunion de staff est une instance consultative à l'égard du Conseil de direction, qui se réunit mensuellement et qui prend les décisions. Les autres organes de gestion de l'institution sont également indiqués dans l'organigramme et ont été déterminés selon les statuts des institutions scientifiques fédérales en Belgique.

L'évaluation du personnel administratif et technique, connu sous le nom de cercles de développement, a été utilisé en 2014 dans un nombre limité de départements de l'IASB.

Depuis 2014, les cercles de développement ont été remplacés par les cycles d'évaluation. Ce nouveau système d'évaluation se fonde sur les cercles de développement et donne un rôle central à la carrière en reliant la performance au développement de carrière. De cette façon, la performance est désormais le moteur de la carrière du personnel administratif et technique.

Pour préparer le personnel et les chefs de service à ce changement majeur, des séances d'informations ont été organisées à la fin 2013. 93% des cycles d'évaluation ont débuté par un entretien de fonction (dans le cas où il n'y existait pas de description de fonction) et/ou un entretien de planification où les objectifs pour 2014 ont été déterminés.

COMPTABILITÉ, ADMINISTRATION ET PROJECT MANAGEMENT

Une transition difficile

Suite au décès du comptable de l'IASB, Mr. Delancker, en juin 2012, et le fait que le poste soit resté vacant jusqu'en novembre 2013, la gestion de la comptabilité de l'institut a connu une période très difficile pendant plus d'un an. L'IASB remercie très fort le support qu'elle a reçu de la part de l'Observatoire royal de Belgique et son directeur général pour l'immense soutien de son comptable, Mr. Van Den Meersche qui partage son temps entre les deux instituts afin de nous aider. Toute l'équipe de comptabilité a fait un grand effort sous sa direction partielle afin de maintenir la comptabilité en bon état.

Les moyens financiers de l'Institut proviennent, pour près de 88%, de sources alternatives à la dotation de l'Etat fédéral, grâce à l'acquisition de projets de recherche par les scientifiques de l'IASB. La gestion de tous ces projets (plus de 150 projets actifs simultanément) nécessite d'ailleurs un service 'project management', géré par deux personnes en 2013 et une seule personne depuis juillet 2014.

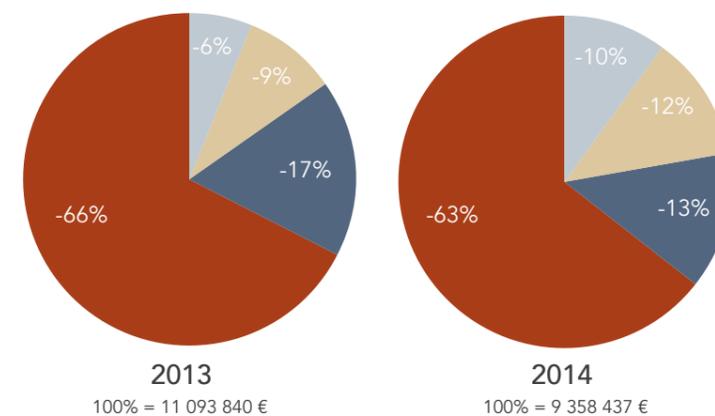
Un outil comptable amélioré

Les procédures administratives, les méthodes de comptabilisation et le mode d'archivage mis en place par l'ancien responsable sont parfaitement fonctionnels. Le système mis en place est parfaitement adapté à la tenue d'une comptabilité dite de caisse¹, telle qu'elle a prévalu dans tous les services publics au moins jusqu'aux années 2000.

Sous la houlette de Mr. Van De Meersche et avec l'assentiment de la direction et le concours de toute l'équipe comptabilité, la paramétrisation du système de comptabilité a été améliorée, les procédures comptables ont été formalisées et des guidances ont été rédigées. Il reste toutefois des structurations à revoir ainsi que le plan comptable en vue du passage à la comptabilité générale en 2016. La collaboration entre les services comptabilité et project management a été intensifiée afin d'avoir un meilleur suivi des actions comptables liées à l'avancement des projets.

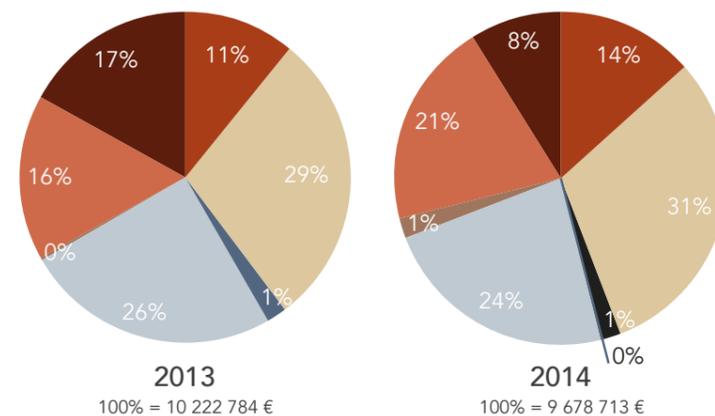
¹ Rappelons qu'en comptabilité de caisse, les recettes et les dépenses ne sont prises en compte qu'au moment de leur paiement, c'est-à-dire seulement à la faveur d'un mouvement de caisse (caisse physique ou compte bancaire).

Engagé: Dépenses par section



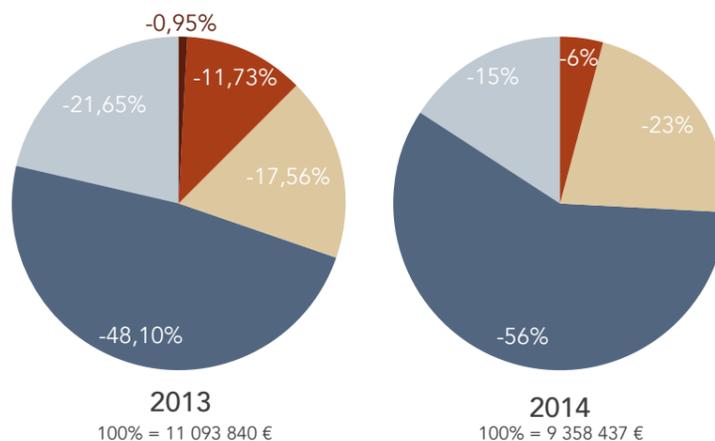
- financée par la dotation consentie par l'Etat fédéral à l'Institut pour l'exercice de ses missions statutaires;
- financée par les recettes commerciales (quasi inexistantes à l'Institut) et les « overheads » transférés des sections 2 et 3 à la section 1 à titre de contribution aux frais généraux;
- financée par les subsides et subventions provenant des pouvoirs fédéraux (Politique scientifique, Loterie Nationale, ...);
- financée par toutes autres sources: entités fédérées (via FNRS, FWO,...), organes internationaux (ESA, Union européenne,...), secteur privé (mécénat, sponsoring, crowd-funding,...).

Engagé: Recettes par source



- Dotation
- ESA
- FNRS & FWO
- Prodex
- Recettes commerciales
- Subvention fédérale
- Union Européenne
- Eumetsat

Engagé: Dépenses par catégorie



- Equipement
- Fonctionnement
- Personnel
- Tft aux cocontractants
- Tft Pôle espace

PUBLICATIONS IASB 2013

Acke, B., P. Degroote, R. Lombaert, B. L. De Vries, K. Smolders, **T. Verhoelst**, E. Lagadec, C. Gielen, H. Van Winckel, and C. Waelkens, Amorphous carbon in the disk around the post-AGB binary HR 4049: Discerning dust species with featureless opacity curves, *Astronomy and Astrophysics*, 551, A76, doi:10.1051/0004-6361/201219282, 2013.

Amelynck, C., N. Schoon, and **F. Dhooghe**, SIFT Ion Chemistry Studies Underpinning the Measurement of Volatile Organic Compound Emissions by Vegetation, *Current Analytical Chemistry*, 9(4), 540-549, 2013.

Baray, J.-L., Y. Courcoux, P. Keckhut, T. Portafaix, P. Tulet, J.-P. Cammas, A. Hauchecorne, S. Godin-Beekmann, **M. De Mazière**, **C. Hermans**, **F. Desmet**, K. Sellegri, A. Colomb, M. Ramonet, J. Sciare, C. Vuillemin, C. Hoareau, D. Dionisi, V. Dufлот, H. Vérèmes, J. Porteneuve, F. Gabarrot, T. Gaudo, J.-M. Metzger, G. Payen, J. Leclair de Bellevue, C. Barthe, F. Posny, P. Ricaud, A. Abchiche, and R. Delmas, Maïdo observatory: a new altitude station facility at Reunion Island (21° S, 55° E) for long-term atmospheric remote sensing and in-situ measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(10), 6371-6408, doi:10.5194/amt-6-2865-2013, 2013.

Barkley, M. P., **I. De Smedt**, **M. Van Roozendael**, T. P. Kurosu, K. Chance, A. Arneth, D. Hagberg, A. Guenther, F. Paulot, E. Marais, and J. Mao, Top-down isoprene emissions over tropical South America inferred from SCIAMACHY and OMI formaldehyde columns, *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 118(12), 6849-6868, doi:10.1002/jgrd.50552, 2013.

Benck, S., M. Cyamukungu, J. Cabrera, L. Mazzino, and **V. Pierrard**, The transient observation-based particle (TOP) model and its potential application in radiation effects evaluation, *Journal of Space Weather and Space Climate*, 3, A03, doi:10.1051/swsc/2013024, 2013.

BenMoussa, A., S. Gissot, U. Schühle, G. Del Zanna, F. Auchère, S. Mekaoui, A. Jones, D. Walton, C. J. Eyles, G. Thuillier, D. Seaton, I. E. Dammasch, G. Cessateur, M. Meftah, V. Andretta, D. Berghmans, D. Bewsher, **D. Bolsée**, L. Bradley, D. S. Brown, P. C. Chamberlin, S. Dewitte, L. V. Didkovsky, M. Dominique, F. G. Eparvier, T. Foujols, **D. Gillotay**, B. Giordanengo, J. P. Halain, R. A. Hock, A. Irbah, C. Jeppesen, D. L. Judge, M. Kretzschmar, D. R. McMullin, B. Nicula, W. Schmutz, G. Ucker, S. Wieman, D. Woodraska, and T. N. Woods, On-Orbit Degradation of Solar Instruments, *Solar Physics*, 286(1), 21-42, doi:10.1007/s11207-013-0290-z, 2013.

Brenot, H., J. Neméghaire, L. Delobbe, N. Clerbaux, P. De Meutter, A. Deckmyn, A. Delcloo, L. Frappez, and **M. Van Roozendael**, Preliminary signs of the initiation of deep convection by GNSS, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(11), 5425-5449, doi:10.5194/acp-13-5425-2013, 2013.

Calders, S., C. Verbeeck, **H. Lamy**, **S. Ranvier**, and **E. Gamby**, Results of Draconid 2011 observations from the BRAMS network, *Proceedings of the International Meteor Conference, La Palma, Canary Islands, Spain, 20-23 September 2012*, 84-87, 2013.

Constantin, D.-E., **A. Merlaud**, **M. Van Roozendael**, M. Voiculescu, **C. Fayt**, **F. Hendrick**, **G. Pinardi**, and L. Georgescu, Measurements of tropospheric NO₂ in Romania using a zenith-sky mobile DOAS system and comparisons with satellite observations, *Sensors*, 13(3), 3922-3940, doi:10.3390/s130303922, 2013.

Crosby, N. B., 'Introduction', in Aschwanden, M. J. (ed.), *Self-Organized Criticality Systems*, pp. 1-22, Open Academic Press, Berlin, 2013.

Darrouzet, F., and **J. De Keyser**, The dynamics of the plasmasphere: Recent results, *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 99, 53-60, doi:10.1016/j.jastp.2012.07.004, 2013.

Darrouzet, F., **V. Pierrard**, S. Benck, G. Lointier, J. Cabrera, **K. Borremans**, N. Yu Ganushkina, and **J. De Keyser**, Links between the plasmopause and the radiation belts boundaries as observed by the instruments CIS, RAPID and WHISPER onboard CLUSTER, *Journal of Geophysical Research A: Space Physics*, 118(7), 4176-4188, doi:10.1002/jgra.50239, 2013.

De Keyser, J., and **M. Echim**, Electric potential differences across auroral generator interfaces, *Annales Geophysicae*, 31(2), 251-261, doi:10.5194/angeo-31-251-2013, 2013.

De Keyser, J., **M. Echim**, and **M. Roth**, Cross-field flow and electric potential in a plasma slab, *Annales Geophysicae*, 31(8), 1297-1314, doi:10.5194/angeo-31-1297-2013, 2013.

De Keyser, J., **D. Pieroux**, and **P. Cardoen**, 'Science sensors and instruments for remote-sensing observations', in Reinhard, R., and C. O. Asma (eds.), *CubeSat Technology and Applications*, VKI Lecture Series 2013-01, pp. 11-25, 2013.

Décréau, P. M. E., S. Kouglénou, G. Lointier, J.-L. Rauch, J.-G. Trotignon, X. Vallières, P. Canu, S. Rochel Grimald, F. El-Lemdani Mazouz, and **F. Darrouzet**, Remote sensing of a NTC radio source from a Cluster tilted spacecraft pair, *Annales Geophysicae*, 31(11), 2097-2121, doi:10.5194/angeo-31-2097-2013, 2013.

Dekemper, E., De ALTIUS missie: een Belgisch ruimteinstrument voor remote sensing van de aardatmosfeer, *Heelal*, 7, 218-222, 2013.

Dekemper, E., **F. Vanhellemont**, **N. Matshvili**, **G. Franssens**, **D. Pieroux**, **C. Bingen**, **C. Robert**, and **D. Fussen**, Zernike polynomials applied to apparent solar disk flattening for pressure profile retrievals, *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(3), 823-835, doi:10.5194/amt-6-823-2013, 2013.

Dominique, M., J.-F. Hochedez, W. Schmutz, E. Dammasch, A. I. Shapiro, M. Kretzschmar, A. N. Zhukov, **D. Gillotay**, Y. Stockman, and A. BenMoussa, The LYRA Instrument Onboard PROBA2: Description and In-Flight Performance, *Solar Physics*, 286(1), 21-42, doi:10.1007/s11207-013-0252-5, 2013.

Duflot, V., D. Hurtmans, L. Clarisse, Y. R'honi, **C. Vigouroux**, **M. De Mazière**, E. Mahieu, C. Servais, C. Clerbaux, and P.-F. Coheu, Measurements of hydrogen cyanide (HCN) and acetylene (C₂H₂) from the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI), *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(4), 917-925, doi:10.5194/amt-6-917-2013, 2013.

Ferrucci, F., **N. Theys**, B. Hirn, L. Clarisse, P. Valks, G. Laneve, R. van der A, S. Tait, C. Di Bartola, and **H. Brenot**, 'Operational integration of spaceborne measurements of Lava discharge rates and Sulphur Dioxide concentrations for Global Volcano Monitoring', in Wenzel, F. and J. Zschau (eds.), *Early Warning for Geological Disasters - Scientific Methods and Current Practice*, Springer, Berlin, pp.307-332, 2013.

Fioletov, V. E., C. A. McLinden, N. Krotkov, K. Yang, D. G. Loyola, P. Valks, **N. Theys**, **M. Van Roozendael**, C. R. Nowlan, K. Chance, X. Liu, C. Lee, and R. V. Martin, Application of OMI, SCIAMACHY, and GOME-2 satellite SO₂ retrievals for detection of large emission sources, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(19), 11399-11418, doi:10.1002/jgrd.50826, 2013.

Franssens, G. R., The convolution and multiplication of one-dimensional associated homogeneous distributions, *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 36(9), 1014-1027, doi:10.1002/ma.2656, 2013.

Gunell, H., **J. De Keyser**, **E. Gamby**, and I. Mann, Vlasov simulations of parallel potential drops, *Annales Geophysicae*, 31(7), 1227-1240, doi:10.1002/ma.2656, 2013.

Gunell, H., **J. De Keyser**, and I. Mann, Numerical and laboratory simulations of auroral acceleration, *Physics of Plasmas*, 20(10), 102901, doi:10.1063/1.4824453, 2013.

Hase, F., B. J. Drouin, C. M. Roehl, G. C. Toon, P. O. Wennberg, D. Wunch, T. Blumenstock, **F. Desmet**, D. G. Feist, P. Heikkinen, **M. De Mazière**, M. Rettinger, J. Robinson, M. Schneider, V. Sherlock, R. Sussmann, Y. Té, T. Warneke, and C. Weinzierl, Calibration of sealed HCl cells used for TCCON instrumental line shape monitoring, *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(12), 3527-3537, doi:10.5194/amt-6-3527-2013, 2013.

Hässig, M., K. Altwegg, H. Balsiger, J. J. Berthelier, U. Calmonte, M. Combi, **J. De Keyser**, B. Fiethe, S. A. Fuselier, and M. Rubin, ROSINA/DFMS capabilities to measure isotopic ratios in water at comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, *Planetary and Space Science*, 84, 148-152, doi:10.1016/j.pss.2013.05.014, 2013.

Hassler, B., I. Petropavlovskikh, J. Staehelin, T. August, P. K. Bhartia, C. Clerbaux, D. Degenstein, **M. De Mazière**, B. M. Dinelli, A. Dudhia, G. Dufour, S. M. Frith, L. Froidevaux, S. Godin-Beekmann, **J. Granville**, N. R. P. Harris, K. Hoppel, **D. Hubert**, Y. Kasai, M. J. Kurylo, E. Kyrölä, **J.-C. Lambert**, P. F. Levelt, C. T. McElroy, R. D. McPeters, R. Munro, H. Nakajima, A. Parrish, P. Raspollini, E. E. Remsberg, K. H. Rosenlof, A. Rozanov, T. Sano, Y. Sasano, M. Shiotani, M., H. G. J. Smit, G. Stiller, J. Tamminen, D. W. Tarasick, J. Urban, A. R. J. Van der A, J. P. Veefkind, **C. Vigouroux**, T. von Clarmann, C. von Savigny, K.A. Walker, M. Weber, J. Wild, and J. Zawodny, SI²N overview paper: ozone profile measurements: techniques, uncertainties and availability, *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 6(6), 9857-9938, doi:10.5194/amtd-6-9857-2013, 2013.

Hewson, W., H. Bösch, M. P. Barkley, and **I. De Smedt**, Characterisation of GOME-2 formaldehyde retrieval sensitivity, *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(2), 371-386, doi:10.5194/amt-6-371-2013, 2013.

Hillen, M., **T. Verhoelst**, H. Van Winckel, O. Chesneau, C. A. Hummel, J. D. Monnier, C. Farrington, C. Tycner, D. Mourard, T. Ten Brummelaar, D. P. K. Banerjee, and R. T. Zavala, An interferometric study of the post-AGB binary 89 Herculis: I. Spatially resolving the continuum circumstellar environment at optical and near-IR wavelengths with the VLTI, NPOI, IOTA, PTI, and the CHARA Array, *Astronomy and Astrophysics*, 559, A111, doi:10.1051/0004-6361/201321616, 2013.

Hollmann, R., C. J. Merchant, R. Saunders, C. Downy, M. Buchwitz, A. Cazenave, E. Chuvieco, P. Defourny, G. de Leeuw, R. Forsberg, T. Holzer-Popp, F. Paul, S. Sandven, S. Sathyendranath, **M. Van Roozendael**, and W. Wagner, The ESA Climate Change Initiative: Satellite Data Records for Essential Climate Variables, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(10), 1541-1552, doi:10.1175/BAMS-D-11-00254.1, 2013.

Hurtig, T., N. Brenning, and **H. Gunell**, Relativistic magnetic flux amplification, *Digest of Technical Papers-IEEE International Pulsed Power Conference*, 6627640, doi:10.1109/PPC.2013.6627640, 2013.

Inness, A., F. Baier, A. Benedetti, I. Bouarar, **S. Chabrilat**,

H. Clark, C. Clerbaux, P. Coheur, R. J. Engelen, **Q. Errera**, J. Flemming, M. George, C. Granier, J. Hadji-Lazarou, V. Huijnen, D. Hurtmans, L. Jones, J. W. Kaiser, J. Kapsomenakis, **K. Lefever**, J. Leit, M. Razinger, A. Richter, M. G. Schultz, A. J. Simmons, M. Suttie, O. Stein, J.-N. Thepaut, V. Thouret, M. Vrekoussis, C. Zerefos, and the MACC team, The MACC reanalysis: an 8 yr data set of atmospheric composition, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(8), 4073-4109, doi:10.5194/acp-13-4073-2013, 2013.

Jones, A. E., E. W. Wolff, N. Brough, S. J.-B. Bauguitte, R. Weller, M. Yela, M. Navarro-Comas, H. A. Ochoa, and **N. Theys**, The spatial scale of ozone depletion events derived from an autonomous surface ozone network in coastal Antarctica, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(3), 1457-1467, doi:10.5194/acp-13-1457-2013, 2013.

Klotz, D., C. Paladini, J. Hron, B. Aringer, S. Sacuto, P. Marigo, and **T. Verhoelst**, Catching the fish - Constraining stellar parameters for TX Piscium using spectro-interferometric observations, *Astronomy and Astrophysics*, 550, A86, doi:10.1051/0004-6361/201220444, 2013.

Kochenova, S., M. De Mazière, N. Kumps, S. Vandenbussche, and **T. Kerzenmacher**, Retrieval of volcanic ash and ice cloud physical properties together with gas concentration from IASI measurements using the AVL model, *AIP Conference Proceedings*, 1531, 103-106, doi:10.1063/1.4804718, 2013.

Laffineur, Q., M. Aubinet, **N. Schoon, C. Amelynck, J.-F. Müller**, J. Dewulf, K. Steppe, and B. Heinesch, Impact of diffuse light on isoprene and monoterpene emissions from amixed temperate forest, *Atmospheric Environment*, 74, 385-392, doi:10.1016/j.atmosenv.2013.04.025, 2013.

Lamy, H., E. Gamby, S. Ranvier, Y. Geunes, S. Calders, and **J. De Keyser**, The BRAMS viewer, an online tool to access BRAMS data, *Proceedings of the International Meteor Conference, La Palma, Canary Islands, Spain, 20-23 September 2012*, 48-50, 2013.

Lapenta, G., **V. Pierrard**, R. Keppens, S. Markidis, S. Poedts, O. Sebek, P. M. Travnicek, P. Henri, F. Califano, F. Pegoraro, M. Faganello, V. Olshevsky, A. L. Restante, A. Nordlund, J. T. Frederiksen, D. H. Mackay, C. E. Parnell, A. Bemporad, R. Susino, and **K. Borremans**, SWIFF: Space weather Integrated Forecasting Framework, *Journal of Space Weather and Space Climate*, 3, A05, doi:10.1051/swsc/2013027, 2013.

Lilensten, J., M. Barthélemy, P.O. Amblard, **H. Lamy, C. Simon Wedlund**, J. Moen, H. Rothkaehl, J. Eymard, and J. Ribot, The thermospheric auroral red line polarization: confirmation of detection and first quantitative analysis, *Journal of Space Weather and Space Climate*, 3, A01, doi:10.1051/swsc/2012023, 2013.

Lilensten, J., G. Provan, S. Grimald, A. Brekke, E. Flückiger, P. Vanlommel, **C. Simon Wedlund**, M.

Barthélemy and P. Garnier, The Planetrella experiment: from individual initiative to networking, *Journal of Space Weather Space Climate*, 3, A07, doi:10.1051/swsc/2013029, 2013.

Lilensten, J. **C. Simon Wedlund**, M. Barthélemy, R. Thissen, D. Ehrenreich, G. Gronoff, and O. Witasse, Dications and thermal ions in planetary atmospheric escape, *Icarus*, 222, 169-187, doi:10.1016/j.icarus.2012.09.034, 2013.

Lointier, G., **F. Darrouzet**, P. M. E. Decreau, X. Vallieres, S. Kouglblenou, J. G. Trotignon, and J.-L. Rauch, Refilling process in the plasmasphere: a 3-D statistical Discussions characterization based on Cluster density observations, *Annales Geophysicae*, 31(2), 217-237, doi:10.5194/angeo-31-217-2013, 2013.

Mahieux, A., M. Lopez-Valverde, M. Lopez-Puertas, B. Funke, **S. Robert, V. Wilquet, R. Drummond, A. C. Vandaele**, and J. L. Bertaux, Venus terminator temperature profiles using SPICAV-SOIR on board Venus Express, *EPSC Abstracts*, 8, A174-1, 2013.

Mateshvili, N., D. Fussen, G. Mateshvili, I. Mateshvili, **F. Vanhellemont**, E. Kyrölä, S. Tukiainen, J. Kujanpää, **C. Bingen, C. Robert, C. Tétard**, and **E. Dekemper**, Nabro volcano aerosol in the stratosphere over Georgia, South Caucasus from ground-based spectrometry of twilight sky brightness, *Atmospheric Measurements Techniques*, 6(10), 2563-2576, doi:10.5194/amt-6-2563-2013, 2013.

Merlaud, A., D.-E. Constantin, F. Mingireanu, I. Mocanu, **C. Fayt, J. Maes**, G. Murariu, M. Voiculescu, L. Georgescu, and **M. Van Roozendael**, 'Small Wiskbroom imager for atmospheric composition monitoring (SWING) from an unmanned aerial vehicle (UAV)', in Ouwehand, L. (ed.), *SP-721 21st ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research*, ESA Communications, Noordwijk, pp. 233-239, 2013.

Muller, C., L'avion de transport supersonique, la politique, la stratosphère et l'environnement: une page d'histoire, *Ciel et Terre*, 129(2), 51-57, 2013.

Munteanu, C., S. Haaland, B. Mailyan, **M. Echim**, and K. Mursula, Propagation delay of solar wind discontinuities: Comparing different methods and evaluating the effect of wavelet denoising, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(7), 3985-3994, doi:10.1002/jgra.50429, 2013.

Pierrard, V., Lancement du Proba-v, *Ciel et Terre*, 129(3), 79-80, 2013.

Pierrard, V., Observation des particules spatiales de haute énergie avec le nouveau spectromètre EPT, *Ciel et Terre*, 129(3), 80-83, 2013.

Pierrard, V., and **Y. Voitenko**, Modification of Proton Velocity Distributions by Alfvénic Turbulence in the Solar Wind, *Solar Physics*, 288(1), 355-368, doi:10.1007/s11207-013-0294-8, 2013.

Pinardi, G., M. Van Roozendael, N. Abuhassan, C. Adams, A. Cede, K. Clemer, **C. Fayt**, U. Friess, M. Gil, J. Herman, **C. Hermans, F. Hendrick**, H. Irie, **A. Merlaud**, M. Navarro Comas, E. Peters, A. J. M. Piter, O. Puentedura, A. Richter, A. Schonhardt, R. Shaiganfar, E. Spinei, K. Strong, H. Takashima, M. Vrekoussis, T. Wagner, F. Wittrock, and S. Yilmaz, MAX-DOAS formaldehyde slant column measurements during CINDI: intercomparison and analysis improvement, *Atmospheric Measurements Techniques*, 6(1), 167-185, doi:10.5194/amt-6-167-2013, 2013.

Pommereau, J.-P., F. Goutail, F. Lefèvre, A. Pazmino, C. Adams, V. Dorokhov, P. Eriksen, R. Kivi, K. Stebel, X. Zhao, and **M. van Roozendael**, Why unprecedented ozone loss in the Arctic in 2011? Is it related to climate change?, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(10), 5299-5308, doi:10.5194/acp-13-5299-2013, 2013.

Ranvier, S., M. Anciaux, H. Lamy, J. De Keyser, S. Calders, and **E. Gamby**, Radio polarization measurement of meteor trail echoes during the 2012 Perseids, *Proceedings of the International Meteor Conference, La Palma, Canary Islands, Spain, 20-23 September 2012*, 51-55, 2013.

Richter, A., M. Weber, J. P. Burrows, **J.-C. Lambert**, and A. van Gijsel, Validation strategy for satellite observations of tropospheric reactive gases, *Annals of Geophysics*, 56(Fast Track-1), 1-10, doi:10.4401/ag-6335, 2013.

Robert, S., Y. G. Borkov, J. Vander Auwera, **R. Drummond, A. Mahieux, V. Wilquet, A. C. Vandaele**, V. I. Perevalov, S. A. Tashkun, and J. L. Bertaux, Assignment and rotational analysis of new absorption bands of carbon dioxide isotopologues in Venus spectra, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 114, 29-41, doi:10.1016/j.jqsrt.2012.08.023, 2013.

Romanova, N., **N. Crosby**, and V. Pilipenko, Relationship of Worldwide Rocket Launch Crashes with Geophysical Parameters, *International Journal of Geophysics*, A297310, doi.org/10.1155/2013/297310, 2013.

Scheepmaker, R. A., C. Frankenberg, A. Galli, A. Butz, H. Schrijver, N. M. de Deutscher, D. Wunch, T. Warneke, **S. Fally**, and I. Aben, Improved water vapour spectroscopy in the 4174-4300 cm⁻¹ region and its impact on SCIAMACHY HDO/H₂O measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(4), 879-894, doi:10.5194/amt-6-879-2013, 2013.

Simon Wedlund, C., H. Lamy, B. Gustavsson, T. Sergienko, and U. Brändström, Estimating energy spectra of electron precipitation above auroral arcs from ground-based observations with radar and optics, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(6), 3672-3691, 2013.

Simpraga, M., H. Verbeeck, J. Bloemen, L. Vanhaecke, M. Demarcke, E. Joó, O. Pokorska, **C. Amelynck, N. Schoon**, J. Dewulf, H. Van Langenhove, B. Heinesch, M. Aubinet, and K. Steppe, Vertical canopy gradient

in photosynthesis and monoterpene emissions: An insight into the chemistry and physiology behind, *Atmospheric Environment*, 80, 85-95, doi:10.1016/j.atmosenv.2013.07.047, 2013.

Sofieva, V. F., N. Rahpoe, J. Tamminen, E. Kyrölä, N. Kalakoski, M. Weber, A. Rozanov, C. von Savigny, A. Laeng, T. von Clarmann, G. Stiller, S. Lossow, D. Degenstein, A. Bourassa, C. Adams, C. Roth, N. Lloyd, P. Bernath, R. J. Hargreaves, J. Urban, D. Murtagh, A. Hauchecorne, F. Dalaudier, **M. Van Roozendael, N. Kalb**, and C. Zehner, Harmonized dataset of ozone profiles from satellite limb and occultation measurements, *Earth System Science Data*, 5(2), 349-363, doi:10.5194/essd-5-349-2013, 2013.

Spurr, R., V. Natraj, **C. Lerot, M. Van Roozendael**, and D. Loyola, Linearization of the Principal Component Analysis method for radiative transfer acceleration: Application to retrieval algorithms and sensitivity studies, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 125, 1-17, doi:10.1016/j.jqsrt.2013.04.002, 2013.

Stavrakou, T., J.-F. Müller, K.-F. Boersma, R. J. van der A, J. Kurokawa, T. Ohara, and Q. Zhang, Key chemical NO_x sink uncertainties and how they influence top-down emissions of nitrogen oxides, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(17), 9057-9082, doi:10.5194/acp-13-9057-2013, 2013.

Tennyson, J., P. F. Bernath, L. R. Brown, A. Campargue, A. G. Csaszar, L. Daumont, R. R. Gamache, J. T. Hodges, O. V. Naumenkoi, O. L. Polyansky, L. S. Rothman, **A. C. Vandaele**, N. F. Zobov, A. R. Al Derzi, C. Fabri, A. Z. Fazliev, T. Furtenbacher, I. E. Gordon, L. Lodi, I. and I. Mizus, IUPAC critical evaluation of the rotational-vibrational spectra of water vapor, Part III: Energy levels and transition wavenumbers for H₂ 16O, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 117, 29-58, doi:10.1016/j.jqsrt.2012.10.002, 2013.

Tétard, C., D. Fussen, F. Vanhellemont, C. Bingen, E. Dekemper, N. Mateshvili, D. Pieroux, C. Robert, E. Kyrölä, J. Tamminen, V. Sofieva, A. Hauchecorne, F. Dalaudier, J.-L. Bertaux, O. Fanton d'Andon, G. Barrot, L. Blanot, A. Dehn, and L. Saavedra de Miguel, OCIO slant column densities derived from GOMOS averaged transmittance measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(11), 2953-2964, doi:10.5194/amt-6-2953-2013, 2013.

Theys, N., R. Champion, L. Clarisse, **H. Brenot, J. van Gent, B. Dils**, S. Corradini, L. Merucci, P.-F. Coheur, **M. Van Roozendael**, D. Hurtmans, C. Clerbaux, S. Tait, and F. Ferrucci, Volcanic SO₂ fluxes derived from satellite data: a survey using OMI, GOME-2, IASI and MODIS, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(12), 5945-5968, doi:10.5194/acp-13-5945-2013, 2013.

Tulunay, Y., **N. Crosby**, E. Tulunay, **S. Calders**, A. Parnowski, and D. Sulic, The COST example for outreach to the general public: I love my Sun, *Journal of Space Weather Space Climate*, 3, A04, 2013.

PUBLICATIONS

IASB 2014

Unger, N., K. Harper, Y. Zheng, N. Y. Kiang, I. Aleinov, A. Arneth, G. Schurgers, **C. Amelynck**, A. Goldstein, A. Guenther, B. Heinesch, C. N. Hewitt, T. Karl, Q. Laffineur, B. Langford, K. A. McKinney, P. Misztal, M. Potosnak, J. Rinne, S. Pressley, **N. Schoon**, and D. Serça, Photosynthesis-dependent isoprene emission from leaf to planet in a global carbon–chemistry–climate model, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(20), 10243-10269, doi:10.5194/acp-13-10243-2013, 2013.

Usanova, M. E., **F. Darrouzet**, I. R. Mann, and J. Bortnik, Statistical analysis of EMIC waves in plasmaspheric plumes from Cluster observations, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(8), 4946-4951, doi:10.1002/jgra.50464, 2013.

Vandaele, A. C., A. Mahieux, S. Robert, S. Berkenbosch, R. Clairquin, R. Drummond, V. Letocart, E. Neefs, B. Ristic, V. Wilquet, F. Colomer, D. Belyaev, and J.-L. Bertaux, Improved calibration of SOIR/Venus Express spectra, *Optics Express*, 21(18), 21148-21161, doi:10.1364/OE.21.021148, 2013.

Vandaele, A. C., A. Mahieux, S. Robert, V. Wilquet, R. Drummond, and J. L. Bertaux, Composition of the upper Venus atmosphere using SPICAV-SOIR on board Venus Express, *EPSC Abstracts*, 8, A141-1, 2013.

Vandenbussche, S., S. Kochenova, A. C. Vandaele, N. Kumps, and **M. De Mazière**, Retrieval of desert dust aerosol vertical profiles from IASI measurements in the TIR atmospheric window, *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(10), 2577-2591, doi:10.5194/amt-6-2577-2013, 2013.

Vigouroux, C., Ground-based FTIR measurements of volatile organic compounds: precious data for model and satellite validation, *NDACC Newsletter*, 5, 23-27, 2013.

Voitenko, Y., and **V. Pierrard**, Velocity-Space Proton Diffusion in the Solar Wind Turbulence, *Solar Physics*, 288(1), 369-387, doi:10.1007/s11207-013-0296-6, 2013.

Wilquet, V., A. Piccialli, **F. Daerden, R. Drummond, A. Mahieux, S. Robert, A. C. Vandaele**, F. Montmessin, and J. L. Bertaux, SPICAV-SOIR mesospheric aerosols observations characterization and modelling, *EPSC Abstracts*, 8, A171-1, 2013

Yahnin, A. G., T. A. Yahnina, H. Frey, and **V. Pierrard**, Sub-oval proton aurora spots: Mapping relatively to the plasmopause, *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 99, 61-66, doi:10.1016/j.jastp.2012.09.018, 2013.

Zyrichidou, I, M. E. Koukouli, D. S. Balis, I. Kioutsioukis, A. Poupkou E. Katragkou, D. Melas, K. F. Boersma, and **M. Van Roozendaal**, Evaluation of high resolution simulated and OMI retrieved tropospheric NO₂ column densities over Southeastern Europe, *Atmospheric Research*, 122, 55-66, doi:10.1016/j.atmosres.2012.10.028, 2013.

Adams, C., A. E. Bourassa, V. Sofieva, L. Froidevaux, C. A. McLinden, **D. Hubert, J.-C. Lambert**, C. E. Sioris, and D. A. Degenstein, Assessment of Odin-OSIRIS ozone measurements from 2001 to the present using MLS, GOMOS, and ozonesondes, *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(1), 49-64, doi:10.5194/amt-7-49-2014 2014.

Bader, W., **T. Stavrou, J.-F. Müller**, S. Reimann, C. D. Boone, J. J. Harrison, O. Flock, B. Bovy, B. Franco, B. Lejeune, C. Servais, and E. Mahieu, Long-term evolution and seasonal modulation of methanol above Jungfraujoch (46.5° N, 8.0° E): optimisation of the retrieval strategy, comparison with model simulations and independent observations, *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(11), 3861-3872, doi:10.5194/amt-7-3861-2014, 2014.

Bolsée, D., N. Pereira, W. Decuyper, **D. Gillotay, H. Yu**, P. Sperfeld, S. Pape, E. Cuevas, A. Redondas, Y. Hernández, and M. Weber, Accurate Determination of the TOA Solar Spectral NIR Irradiance Using a Primary Standard Source and the Bouguer-Langley Technique, *Solar Physics*, 289(7), 2433-2457, doi:10.1007/s11207-014-0474-1, 2014.

Brenot, H., N. Theys, L. Clarisse, J. van Geffen, **J. van Gent, M. Van Roozendaal**, R. van der A, D. Hurtmans, P.-F. Coheur, C. Clerbaux, P. Valks, P. Hedelt, F. Prata, **O. Rasson**, K. Sievers, and C. Zehner, Support to Aviation Control Service (SACS): an online service for near-real-time satellite monitoring of volcanic plumes, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(5), 1099-1123, doi:10.5194/nhess-14-1099-2014, 2014.

Brenot, H., A. Walpersdorf, M. Reverdy, J. van Baelen, V. Ducrocq, C. Champollion, F. Masson, E. Doerflinger, P. Collard, and P. Giroux, A GPS network for tropospheric tomography in the framework of the Mediterranean hydrometeorological observatory Cévennes-Vivarais (southeastern France), *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(2), 553-578, doi:10.5194/amt-7-553-2014, 2014.

Chiou, E. W., P. K. Bhartia, R. D. McPeters, D. G. Loyola, M. Coldewey-Egbers, V. E. Fioletov, **M. Van Roozendaal**, R. Spurr, **C. Lerot**, and S. M. Frith, Comparison of profile total ozone from SBUV (v8.6) with GOME-type and ground-based total ozone for a 16-year period (1996 to 2011), *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(6), 1681-1692, doi:10.5194/amt-7-1681-2014, 2014.

Clarisse, L., P.-F. Coheur, **N. Theys**, D. Hurtmans, and

C. Clerbaux, The 2011 Nabro eruption, a SO₂ plume height analysis using IASI measurements., *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(6), 3095-3111, doi:10.5194/acp-14-3095-2014, 2014.

Coldewey-Egbers, M., D. G. Loyola Rodriguez, P. Braesicke, M. Dameris, **M. van Roozendaal, C. Lerot**, and W. Zimmer, A new health check of the ozone layer at global and regional scales, *Geophysical Research Letters*, 41(12), 4363-4373, doi:10.1002/2014GL060212, 2014.

Compernelle, S., and **J.-F. Müller**, Henry's law constants of diacids and hydroxyl polyacids: recommended values, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(5), 2699-2712, doi:10.5194/acp-14-2699-2014, 2014.

Compernelle, S., and **J.-F. Müller**, Henry's law constants of polyols, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(23), 12815-12837, doi:10.5194/acp-14-12815-2014, 2014.

Cyamukungu, M., S. Benck, S. Borisov, G. Gregoire, J. Cabrera, J.-L. Bonnet, B. Desoete, F. Preudrhomme, C. Semaille, G. Creve, J. De Saedeleer, S. Ilsen, L. De Busser, **V. Pierrard, S. Bonnewijn, J. Maes**, E. Van Ransbeeck, **E. Neefs, J. Lemaire**, E. Valtonen, R. Punkkinen, **M. Anciaux**, K. Litefti, **N. Brun**, D. Pauwels, C. Quevrin, **D. Moreau, A. Helderweirt**, W. Hajdas, and P. Nieminen, The Energetic Particle Telescope (EPT) on Board PROBA-V: Description of a New Science-Class Instrument for Particle Detection in Space, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 61(6), 3667-3681, doi:10.1109/TNS.2014.2361955, 2014.

Dekemper, E., D. Fussen, B. Van Opstal, J. Vanhamel, D. Pieroux, F. Vanhellemont, N. Mateshvili, G. Franssens, V. Voloshinov, C. Janssen, and H. Elandaloussi, ALTIUS: a spaceborne AOTF-based UV-VIS-NIR hyperspectral imager for atmospheric remote sensing, *Proceedings of SPIE Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XVIII*, 9241, 92410L-1, doi:10.1117/12.2063937, 2014.

Dils, B., M. Buchwitz, M. Reuter, O. Schneising, H. Boesch, R. Parker, S. Guerlet, I. Aben, T. Blumenstock, J. P. Burrows, A. Butz, N. M. Deutscher, C. Frankenberg, F. Hase, O. P. Hasekamp, J. Heymann, **M. De Mazière**, J. Notholt, R. Sussmann, T. Warneke, D. Griffith, V. Sherlock, and D. Wunch, The greenhouse gas climate change initiative (GHG-CCI): Comparative validation of GHG-CCI SCIAMACHY/ENVISAT and TANSO-FTS/GOSAT CO₂ and CH₄ retrieval algorithm products with measurements from the TCCON, *Atmospheric*

Measurement Techniques, 7(6), 1723-1744, doi:10.5194/amt-7-1723-2014, 2014.

Fear, R. C., S. E. Milan, **R. Maggiolo**, A. N. Fazakerley, I. Dandouras, and S. B. Mende, Direct observation of closed magnetic flux trapped in the high-latitude magnetosphere, *Science*, 346(6216), 1506-1510, doi:10.1126/science.1257377, 2014.

Fissiaux, L., Q. Delière, G. Blanquet, **S. Robert**, **A. C. Vandaele**, and M. Lepère, CO₂-broadening coefficients in the v₄ fundamental band of methane at room temperature and application to CO₂-rich planetary atmospheres, *Journal of Molecular Spectroscopy*, 297, 35-40, doi:10.1016/j.jms.2014.01.006, 2014.

Franco, B., **F. Hendrick**, **M. Van Roozendael**, **J.-F. Müller**, **T. Stavrakou**, E. A. Marais, B. Bovy, W. Bader, **C. Fayt**, **C. Hermans**, B. Lejeune, **G. Pinardi**, C. Servais, and E. Mahieu, Retrievals of formaldehyde from ground-based FTIR and MAX-DOAS observations at the Jungfraujoch station and comparisons with GEOS-Chem and IMAGES model simulations, *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 7(10), 10715-10770, doi:10.5194/amtd-7-10715-2014, 2014.

Franssens, G. R., Multiplication of the distributions ($x \pm \sigma$)^z, *Journal of Applied Analysis*, 20(1), 15-27, doi:10.1515/jaa-2014-0003, 2014.

Fussen, D., **F. Vanhellemont**, **E. Dekemper**, **D. Pieroux**, **N. Mateshvili**, **C. Tétard**, **G. Franssens**, **C. Bingen**, **C. Robert**, P. Demoulin, E. Arijis, and D. Nevejans, 50^e anniversaire l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique: La télédétection spatiale des profils de concentrations des gaz en traces: cinquante années d'excellence de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique, *Ciel et Terre*, 130(5), 130-136, 2014.

García-Toraño Andrés, E., **B. Langerock**, and F. Cantrijn, Aspects of reduction and transformation of Lagrangian systems with symmetry, *Journal of Geometric Mechanics*, 6(1), 1-23, doi:10.3934/jgm.2014.6.1, 2014.

Gielen, C., **M. Van Roozendael**, **F. Hendrick**, **G. Pinardi**, T. Vlemmix, V. De Bock, H. De Backer, **C. Fayt**, **C. Hermans**, **D. Gillotay**, and P. Wang, A simple and versatile cloud-screening method for MAX-DOAS retrievals, *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(10), 3509-3527, doi:10.5194/amt-7-3509-2014, 2014.

Gogoberidze, G., **Y. Voitenko**, S. Poedts, and **J. De Keyser**, Electrostatic plasma instabilities driven by neutral gas flows in the solar chromosphere, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 438(4), 3568-3576, doi:10.1093/mnras/stt2469, 2014.

Gronoff, G., **R. Maggiolo**, C. Simon Wedlund, C. J. Mertens, R. B. Norman, J. Bell, D. Bernard, C. J. Parkinson, and A. Vidal-Madjar, Theoretical UV Absorption Spectra of Hydrodynamically Escaping O₂/CO₂-Rich Exoplanetary Atmospheres, *The Astrophysical Journal*, 788(2), 191, doi:10.1088/0004-637X/788/2/191, 2014.

Gunell, H., G. Stenberg Wieser, M. Mella, **R. Maggiolo**, H. Nilsson, **F. Darrouzet**, M. Hamrin, T. Karlsson, N. Brenning, **J. De Keyser**, M. André, and I. Dandouras, Waves in high-speed plasmoids in the magnetosheath and at the magnetopause, *Annales Geophysicae*, 32(8), 991-1009, doi:10.5194/angeo-32-991-2014, 2014.

Hao, N., M. E. Koukouli, A. Inness, P. Valks, D. G. Loyola, W. Zimmer, D. S. Balis, I. Zyrichidou, **M. Van Roozendael**, **C. Lerot**, and R. J. D. Spurr, GOME-2 total ozone columns from MetOp-A/MetOp-B and assimilation in the MACC system, *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(9), 2937-2951, doi:10.5194/amt-7-2937-2014, 2014.

Hassler, B., I. Petropavlovskikh, J. Staehelin, T. August, P. K. Bhartia, C. Clerbaux, D. Degenstein, **M. De Mazière**, B. M. Dinelli, A. Dudhia, G. Dufour, S. M. Frith, L. Froidevaux, S. Godin-Beekmann, **J. Granville**, N. R. P. Harris, K. Hoppel, **D. Hubert**, Y. Kasai, M. J. Kurylo, E. Kyrölä, **J.-C. Lambert**, P. F. Levelt, C. T. McElroy, R. D. McPeters, R. Munro, H. Nakajima, A. Parrish, P. Raspollini, E. E. Remsberg, K. H. Rosenlof, A. Rozanov, T. Sano, Y. Sasano, M. Shiotani, H. G. J. Smit, G. Stiller, J. Tamminen, D. W. Tarasick, J. Urban, R. J. Van Der A, J. P. Veefkind, **C. Vigouroux**, T. Von Clarmann, C. Von Savigny, K. A. Walker, M. Weber, J. Wild, and J. M. Zawodny, Past changes in the vertical distribution of ozone – Part 1: Measurement techniques, uncertainties and availability, *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(5), 1395-1427, doi:10.5194/amt-7-1395-2014, 2014.

Hendrick, F., **J.-F. Müller**, K. Clémer, P. Wang, **M. De Mazière**, **C. Fayt**, **C. Gielen**, **C. Hermans**, J. Z. Ma, **G. Pinardi**, **T. Stavrakou**, **T. Vlemmix**, and **M. Van Roozendael**, Four years of ground-based DOAS observations of HONO and NO₂ in the Beijing area, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(2), 765-781, doi:10.5194/acp-14-765-2014, 2014.

Hillen, M., J. Menu, H. Van Winckel, M. Min, **C. Gielen**, T. Wevers, G. D. Mulders, S. Regibo, and **T. Verhoelst**, An interferometric study of the post-AGB binary 89 Herculis II. Radiative transfer models of the circumbinary disk, *Astronomy and Astrophysics*, 568, A12, doi:10.1051/0004-6361/201423749, 2014.

Jiggins, P., H. Evans, P. Truscott, D. Heynderickx, F. Lei, and **E. De Donder**, Long-Term Destructive SEE Risk and Calculations Using Multiple 'Worst-Case' Events Versus Modelling, *IEEE Transaction on Nuclear Science*, 61(4), 1695-1702, doi:10.1109/TNS.2014.2302994, 2014.

Keppens, A., **J.-C. Lambert**, **J. Granville**, G. Miles, R. Siddans, J. C. A. van Peet, R. J. van der A, **D. Hubert**, **T. Verhoelst**, A. Delcloc, S. Godin-Beekmann, R. Kivi, R. Stübi, and C. Zehner, Round-robin evaluation of nadir ozone profile retrievals: methodology and application to MetOp-A GOME-2, *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 7(11), 11481-11546, doi:10.5194/amtd-7-11481-2014, 2014.

Kronberg, E. A., M. Ashour-Abdalla, I. Dandouras, D. C. Delcourt, E. E. Grigorenko, L. M. Kistler, I. V. Kuzichev,

J. Liao, **R. Maggiolo**, H. V. Malova, K. G. Orlova, V. Perroomian, D. R. Shklyar, Y. Y. Shprits, D. T. Welling, and L. M. Zelenyi, Circulation of Heavy Ions and Their Dynamical Effects in the Magnetosphere: Recent Observations and Models, *Space Science Reviews*, 184(1-4), 173-235, doi:10.1007/s11214-014-0104-0, 2014.

Laeng, A., U. Grabowski, T. von Clarmann, G. Stiller, N. Glatthor, M. Höpfner, S. Kellmann, M. Kiefer, A. Linden, S. Lossow, V. Sofieva, I. Petropavlovskikh, **D. Hubert**, T. Bathgate, P. Bernath, C. D. Boone, C. Clerbaux, P. Coheur, R. Damadeo, D. Degenstein, S. Frith, L. Froidevaux, J. Gille, K. Hoppel, M. McHugh, Y. Kasai, J. Lumpe, N. Rappaport, G. Toon, T. Sano, M. Suzuki, J. Tamminen, and J. Urban, Validation of MIPAS IMK/IAA V5R_O3_224 ozone profiles, *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(11), 3971-3987, doi:10.5194/amt-7-3971-2014, 2014.

Langerock, B., **M. De Mazière**, **F. Hendrick**, **C. Vigouroux**, **F. Desmet**, **B. Dils**, and S. Niemeijer, Description of algorithms for co-locating and comparing gridded model data with remote-sensing observations, *Geoscientific Model Development Discussions*, 7(6), 8151-8178, doi:10.5194/gmdd-7-8151-2014, 2014.

Lefever, K., R. van der A, F. Baier, **Y. Christophe**, **Q. Errera**, H. Eskes, J. Flemming, A. Inness, L. Jones, **J.-C. Lambert**, **B. Langerock**, M. G. Schultz, O. Stein, A. Wagner, and **S. Chabrilat**, Copernicus atmospheric service for stratospheric ozone: validation and intercomparison of four near real-time analyses, 2009-2012, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 14(8), 12461-12523, doi:10.5194/acpd-14-12461-2014, 2014.

Lerot, C., **M. Van Roozendael**, R. Spurr, D. Loyola, M. Coldewey-Egbers, **S. Kochenova**, **J. van Gent**, M. Koukouli, D. Balis, **J.-C. Lambert**, **J. Granville**, and C. Zehner, Homogenized total ozone data records from the European sensors GOME/ERS-2, SCIAMACHY/Envisat, and GOME-2/MetOp-A, *Journal of Geophysical Research A: Atmospheres*, 119(3), 1639-1662, doi:10.1002/2013JD020831, 2014.

Lin, J.-T., R. V. Martin, K. F. Boersma, M. Sneep, P. Stammes, R. Spurr, P. Wang, **M. Van Roozendael**, K. Clémer, and H. Irie, Retrieving tropospheric nitrogen dioxide from the Ozone Monitoring Instrument: Effects of aerosols, surface reflectance anisotropy, and vertical profile of nitrogen dioxide, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(3), 1441-1461, doi:10.5194/acp-14-1441-2014, 2014.

Lyubchik, O., and **Y. Voitenko**, Nonlocal nonlinear coupling of kinetic sound waves, *Annales Geophysicae*, 32(11), 1407-1413, doi:10.5194/angeo-32-1407-2014, 2014.

Maggiolo, R., and L. M. Kistler, Spatial variation in the plasma sheet composition: Dependence on geomagnetic and solar activity, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(4), 2836-2857, doi:10.1002/2013JA019517, 2014.

Mahieux, A., Observations de Mars et de Vénus depuis Kitt Peak, Arizona, *Ciel et Terre*, 130(1), 20-23, 2014.

Malovichko, P., **Y. Voitenko**, and **J. De Keyser**, Oblique Alfvén instability driven by compensated currents, *The Astrophysical Journal*, 780(2), A175, doi:10.1088/0004-637X/780/2/175, 2014.

Marais, E. A., D. J. Jacob, K. Wecht, **C. Lerot**, L. Zhang, K. Yu, T. P. Kurosu, K. Chance, and B. Sauvage, Anthropogenic emissions in Nigeria and implications for atmospheric ozone pollution: A view from space, *Atmospheric Environment*, 99, 32-40, doi:10.1016/j.atmosenv.2014.09.055, 2014.

Michel, A., D. Van Hoof, **C. Muller**, J.-M. Wislez, S. Klai, A. Sela, **N. This**, C. Jacobs, A. Boyd, A. Karl, **D. Moreau**, P. Manieri, D. Bolsee, and L. Steinicke, Changing the ISS attitude to maximize science return of the SOLAR payload, *Proceedings of the 64th International Astronautical Congress, Beijing, China, 23-27 September 2013*, Vol. 5, 3667, 2014.

Miller, P. M., M. E. Koepke, and **H. Gunell**, Quasiperiodic mode hopping in competing ionization waves, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 56, 015003, doi:10.1088/0741-3335/56/1/015003, 2014.

Müller, J.-F., J. Peeters, and **T. Stavrakou**, Fast Photolysis of Carbonyl Nitrates from Isoprene, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(5), 2497-2508, doi:10.5194/acp-14-2497-2014, 2014.

Peeters, J., **J.-F. Müller**, **T. Stavrakou**, and V. S. Nguyen, Hydroxyl Radical Recycling in Isoprene Oxidation Driven by Hydrogen Bonding and Hydrogen Tunneling: The Upgraded LIM1 Mechanism, *Journal of Physical Chemistry A*, 118(38), 8625-8643, doi:10.1021/jp5033146, 2014.

Pierrard, V., 50^e anniversaire de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique: Aéronomie et physique spatiale, *Ciel et Terre*, 130(2), 34-40, 2014.

Pierrard, V., and **J. Lemaire**, Plasmasphere dynamics and plasmaspheric outflows, *Proceedings of the General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), 2014 XXXIth URSI*, 1-3, doi:10.1109/URSIGASS.2014.6929908, 2014.

Pierrard V., and **M. Pieters**, Coronal heating and solar wind acceleration for electrons, protons, and minor ions obtained from kinetic models based on kappa distributions, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(12), 9441-9455, doi:10.1002/2014JA020678, 2014.

Pierrard V., and **M. Pieters**, 'Toward a 3D kinetic model of the solar wind', in Hu Q., and G. P. Zank (eds.), *Outstanding problems in heliophysics: from coronal heating to the edge of the heliosphere*, Vol. 484, pp. 168-173, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, 2014.

Pierrard, V., K. Borremans, K. Stegen, and **J. F. Lemaire**, Coronal Temperature Profiles Obtained From Kinetic Models And From Coronal Brightness Measurements Obtained During Solar Eclipses, *Solar Physics*, 289(1), 183-192, doi:10.1007/s11207-013-0320-x, 2014.

Pierrard, V., G. Lopez Rosson, K. Borremans, J. Lemaire, J. Maes, S. Bonnewijn, E. Van Ransbeeck, **E. Neefs**, M. Cyamukungu, S. Benck, L. Bonnet, S. Borisov, J. Cabrera, G. Grégoire, C. Semaille, G. Creve, J. De Saedeleer, B. Desoete, F. Preud'homme, **M. Anciaux, A. Helderweirt**, K. Litefti, N. Brun, D. Pauwels, C. Quevrin, **D. Moreau**, R. Punkkinen, E. Valtonen, W. Hajdas, and P. Nieminen, The Energetic Particle Telescope: First Results, *Space Science Reviews*, 184(1-4), 87-106, doi:10.1007/s11214-014-0097-8, 2014.

Roscoe, H. K., N. Brough, A. E. Jones, F. Wittrock, A. Richter, **M. Van Roozendael**, and **F. Hendrick**, Characterisation of vertical BrO distribution during events of enhanced tropospheric BrO in Antarctica, from combined remote and in-situ measurements, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 138, 70-81, doi:10.1016/j.jqsrt.2014.01.026, 2014.

Schmidt, A., C. S. Witham, **N. Theys**, N. A. D. Richards, T. Thordarson, K. Szpek, W. Feng, M. C. Hort, A. M. Woolley, A. R. Jones, A. L. Redington, B. T. Johnson, C. L. Hayward, and K. S. Carslaw, Assessing hazards to aviation from sulfur dioxide emitted by explosive Icelandic eruptions, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(24), 14180-14196, doi:10.1002/2014JD022070, 2014.

Simon, P. C., 50^e anniversaire de l'Institut d'Aéronomie spatiale de Belgique: Contexte historique jusqu'à sa création en 1964, *Ciel et Terre*, 130(1), 2-9, 2014.

Simon, P. C., M. De Mazière, M. Van Roozendael, and **J.-C. Lambert**, 50^e anniversaire de l'Institut d'Aéronomie spatiale de Belgique: De la nécessité des observations en surface pour l'étude des changements globaux, *Ciel et Terre*, 130(4), 98-104, 2014

Sindelarova, K., C. Granier, I. Bouarar, A. Guenther, S. Tilmes, **T. Stavrakou, J.-F. Müller**, U. Kuhn, P. Stefani, and W. Knorr, Global dataset of biogenic VOC emissions calculated by the MEGAN model over the last 30 years, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(17), 9317-9341, doi:10.5194/acp-14-9317-2014, 2014.

Skachko, S., Q. Errera, R. Ménard, **Y. Christophe**, and **S. Chabrilat**, Comparison of the ensemble Kalman filter and 4D-Var assimilation methods using a stratospheric tracer transport model, *Geoscientific Model Development*, 7(4), 1451-1465, doi:10.5194/gmd-7-1451-2014, 2014.

Sofieva, V. F., J. Tamminen, E. Kyrölä, A. Laeng, T. Von Clarmann, F. Dalaudier, A. Hauchecorne, J. L. Bertaux, G. Barrot, L. Blanot, **D. Fussen**, and **F. Vanhellefont**, Validation of GOMOS ozone precision estimates in the

stratosphere *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(7), 2147-2158, doi:10.5194/amt-7-2147-2014, 2014.

Spinetti, C., G. Salerno, T. Caltabiano, E. Carboni, L. Clarisse, S. Corradini, P. Hedelt, M. E. Koukoulis, L. Merucci, R. Siddans, L. Tampellini, **N. Theys**, P. Valks, J. Vira, and C. Zehner, Volcanic SO₂ measurements by UV-TIR satellite retrievals: validation by using the ground-based FLAME network at Mt. Etna, *Geophysical Research Abstracts*, 16, EGU2014-7956, 2014.

Stavrakou, T., J.-F. Müller, and **M. Bauwens**, Monitoring van luchtkwaliteit vanuit de ruimte, *Science Connection*, 42, 34-35, 2014.

Stavrakou, T., J.-F. Müller, M. Bauwens, I. De Smedt, M. Van Roozendael, A. Guenther, M. Wild, and X. Xia, Isoprene emissions over Asia 1979-2012: Impact of climate and land-use changes, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(9), 4587-4605, doi:10.5194/acp-14-4587-2014, 2014.

Tennyson, J., P. F. Bernath, L. R. Brown, A. Campargue, A. G. Csaszar, L. Daumont, R. R. Gamache, J. T. Hodges, O. V. Naumenko, O. L. Polyansky, L. S. Rothman, **A. C. Vandaele**, and N. F. Zobov, A database of water transitions from experiment and theory (IUPAC Technical Report), *Pure and Applied Chemistry*, 86(1), 71-83, doi:10.1515/pac-2014-5012, 2014.

Tennyson, J., P. F. Bernath, L. R. Brown, A. Campargue, A. G. Csaszar, L. Daumont, R. R. Gamache, J. T. Hodges, O. V. Naumenko, O. L. Polyansky, L. S. Rothman, **A. C. Vandaele**, N. F. Zobov, N. Denes, A. Z. Fazliev, T. Furtenbacher, I. E. Gordon, S.-M. Hum, T. Szidarovszky, and I. A. Vasilenko, IUPAC critical evaluation of the rotational-vibrational spectra of water vapor. Part IV. Energy levels and transition wave numbers for D₂16O, D₂17O, and D₂18O, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 142, 93-108, doi:10.1016/j.jqsrt.2012.10.002, 2014.

Theys, N., I. De Smedt, M. Van Roozendael, L. Froidevaux, L. Clarisse, and **F. Hendrick**, First satellite detection of volcanic OCIO after the eruption of Puyehue-Cordón Caulle, *Geophysical Research Letters*, 41(2), 667-672, doi:10.1002/2013GL058416, 2014.

Thuillier, G., S. M. L. Melo, J. Lean, N. A. Krivova, C. Bolduc, V. I. Fomichev, P. Charbonneau, A. I. Shapiro, W. Schmutz, and **D. Bolsée**, Analysis of Different Solar Spectral Irradiance Reconstructions and Their Impact on Solar Heating Rates, *Solar Physics*, 289(4), 1115-1142, doi:10.1007/s11207-013-0381-x, 2014.

Thuillier, G. **D. Bolsée**, G. Schmidtke, T. Foujols, B. Nikutowski, A. I. Shapiro, R. Brunner, M. Weber, C. Erhardt, M. Hersé, **D. Gillotay**, W. Peetermans, W. Decuyper, **N. Pereira**, M. Haberleiter, H. Mandel, and W. Schmutz, The Solar Irradiance Spectrum at Solar Activity Minimum Between Solar Cycles 23 and 24, *Solar Physics*, 289(6), 1931-1958, doi:10.1007/s11207-013-0461-y, 2014.

Tsigaridis, K., N. Daskalakis, M. Kanakidou, P. J. Adams, P. Artaxo, R. Bahadur, Y. Balkanski, S. E. Bauer, N. Bellouin, A. Benedetti, T. Bergman, T. K. Berntsen, J. P. Beukes, H. Bian, K. S. Carslaw, M. Chin, G. Curci, T. Diehl, R. C. Easter, S. J. Ghan, S. L. Gong, A. Hodzic, C. R. Hoyle, T. Iversen, S. Jathar, J. L. Jimenez, J. W. Kaiser, A. Kirkevåg, D. Koch, H. Kokkola, Y. H. Lee, G. Lin, X. Liu, G. Luo, X. Ma, G. W. Mann, N. Mihalopoulos, J.-J. Morcrette, **J.-F. Müller**, G. Myhre, S. Myriokefalitakis, S. Ng, D. O'Donnell, J. E. Penner, L. Pozzoli, K. J. Pringle, L. M. Russell, M. Schulz, J. Sciare, Ø. Seland, D. T. Shindell, S. Sillman, R. B. Skeie, D. Spracklen, **T. Stavrakou**, S. D. Steenrod, T. Takemura, P. Tiitta, S. Tilmes, H. Tost, T. van Noije, P. G. van Zyl, K. von Salzen, F. Yu, Z. Wang, Z. Wang, R. A. Zaveri, H. Zhang, K. Zhang, Q. Zhang, and X. Zhang, The AeroCom evaluation and intercomparison of organic aerosol in global models, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(19), 10845-10895, doi:10.5194/acp-14-10845-2014, 2014.

Vandaele, A. C., F. Daerden, N. Matshvili, C. Muller, E. Neefs, and **V. Wilquet**, 50^e anniversaire de l'Institut d'Aéronomie spatiale de Belgique: Aéronomie Planétaire, *Ciel et Terre*, 130(3), 66-70, (2014)

Van Geffen, J. H. G. M., K. F. Boersma, **M. Van Roozendael, F. Hendrick**, E. Mahieu, **I. De Smedt**, M. Sneep, and J. P. Veefkind, Improved spectral fitting of nitrogen dioxide from OMI in the 405-465 nm window, *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 7(10), 10619-10671, doi:10.5194/amtd-7-10619-2014, 2014.

Van Gent, J., 'Het Nederlands in de wetenschap', Ruijsdaal, E., and Wermuth, C. (eds.), *Tint-dag 2013*, pp. 49-56, Academia Press, Gent, 2014.

Van Malderen, R., **H. Brenot**, E. Pottiaux, S. Beirle, **C. Hermans, M. De Mazière**, T. Wagner, H. De Backer, and C. Bruyninx, A multi-site intercomparison of integrated water vapour observations for climate change analysis, *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(8), 2847-2512, doi:10.5194/amt-7-2487-2014, 2014.

Vanlommel, P., M. Messori, J. Lilensten, **S. Calders**, K. Bonte, E. D'Huys, and V. Žigman, Exploitation, dissemination, education and outreach in the frame of the COST action ES0803 'developing space weather products and services in Europe', *Journal of Space Weather and Space Climate*, 4, A05, doi:10.1051/swsc/2014002, 2014.

Vigouroux, C., T. Blumenstock, M. Coffey, **Q. Errera**, O. García, N. B. Jones, J. W. Hannigan, F. Hase, B. Liley, E. Mahieu, J. Mellqvist, J. Notholt, M. Palm, G. Persson, M. Schneider, C. Servais, D. Smale, L. Thölix, and M. De Mazière, Trends of ozone total columns and vertical distribution from FTIR observations at 8 NDACC stations around the globe, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 14(17), 24623-24666, doi:10.5194/acpd-14-24623-2014, 2014.

Viscardy, S., Science du mouvement de René Descartes, *Ciel et Terre*, 130(1), 10-19, 2014.

Viscardy, S., Système du monde de Descartes: la théorie des tourbillons, *Ciel et Terre*, 130(4), 105-114, 2014.

Vlemmix, T., **F. Hendrick, G. Pinardi, I. De Smedt, C. Fayt, C. Hermans**, A. Peters, P. Levelt and **M. Van Roozendael**, MAX-DOAS observations of aerosols, formaldehyde and nitrogen dioxide in the Beijing area: comparison of two profile retrieval approaches, *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 7(9), 9673-9731, doi:10.5194/amtd-7-9673-2014, 2014

Wang, T. **F. Hendrick**, P. Wang, G. Tang, K. Clémer, **H. Yu, C. Fayt, C. Hermans, C. Gielen, J.-F. Müller, G. Pinardi, N. Theys, H. Brenot**, and **M. Van Roozendael**, Evaluation of tropospheric SO₂ retrieved from MAX-DOAS measurements in Xianghe, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(20), 11149-11164, doi:10.5194/acp-14-11149-2014, 2014.

Wang, Z., N. M. Deutscher, T. Warneke, J. Notholt, **B. Dils**, D. W. T. Griffith, M. Schmidt, M. Ramonet, and C. Gerbig, Retrieval of tropospheric column-averaged CH₄ mole fraction by solar absorption FTIR-spectrometry using N₂O as a proxy, *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(10), 3295-3305, doi:10.5194/amt-7-3295-2014, 2014.

Wing, S., J. R. Johnson, C. C. Chaston, **M. Echim**, C. P. Escoubet, B. Lavraud, C. Lemon, K. Nykyri, A. Otto, J. Raeder, C.-P. Wang, Review of Solar Wind Entry into and Transport Within the Plasma Sheet, *Space Science Reviews*, 184(1-4), 33-86, doi:10.1007/s11214-014-0108-9, 2014.

Yelle, R. V., **A. Mahieux**, S. Morrison, V. Vuitton, and S. M. Hörst, Perturbation of the Mars atmosphere by the near-collision with Comet C/2013 A1 (Siding Spring), *Icarus*, 237, 202-210, doi:10.1016/j.icarus.2014.03.030, 2014.

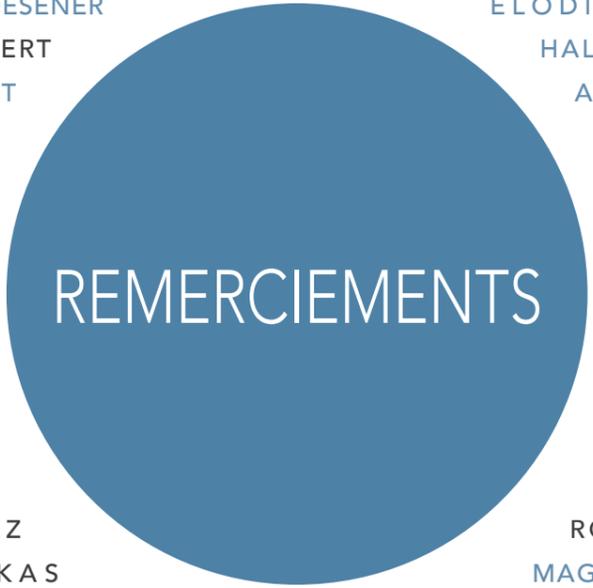
Zhao, J. S., **Y. Voitenko**, M. Y. Yu, J. Y. Lu, and D. J. Wu, Properties of Short-wavelength Oblique Alfvén and Slow waves, *The Astrophysical Journal*, 793(2), 107, doi:10.1088/0004-637X/793/2/107, 2014.

Zhao, J.S., **Y. Voitenko**, D. J. Wu, and **J. De Keyser**, Nonlinear generation of kinetic-scale waves by magnetohydrodynamic Alfvén Waves and nonlocal spectral transport in the solar wind, *The Astrophysical Journal*, 785(2), A139, doi:10.1088/0004-637X/785/2/139, 2014.

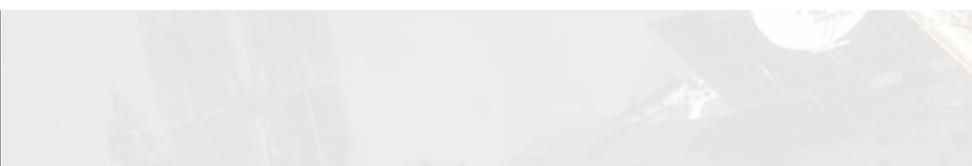
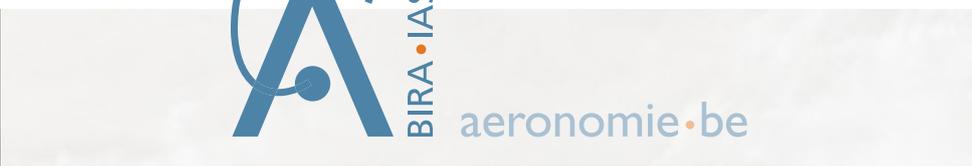
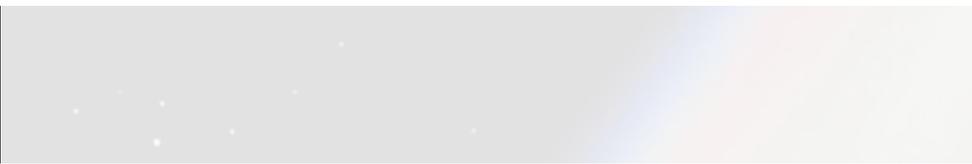
CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES

ESA, ESA/P.Carril, ESA/DLR/FU Berlin, NASA, NASA Earth Observatory, BIRA-IASB, TCCON, AOES Medialab, MACC, WMO-OMM, GAW, Dan Kitwood/Getty Images, IBBAC, ACROSAT, Kari Greer/USFS, EU-METSAT, NDACC, Konstantinos Kourtidis, ESA Rosetta NAVCAM, COMESEP, B.USOC, CNES.

ABJIJ RACHID AMELYNCK CRIST ANCIAUX MICHEL BAUWENS MAITE BERKENBOSCH
SOPHIE BEVERNAEGIE JESSICA BINGEN CHRISTINE BOGAERTS BRIGITTE BOLSÉE
DAVID BONNEWIJN SABRINA BORREMANS KRIS BOTEK EDITH BRENOT HUGUES
BROUCKMANS KRISTIEN BRUN NICOLAS BULCKE JOHAN CALDERS STIJN CAMBIER
PASCALE CARDOEN PEPIJN CESSATEUR GAEL CEULEMANS KARL CHABANSKI SOPHIE
CHABRILLAT SIMON CHAMBERLAIN SARAH CHRISTOPHE YVES CLAIRQUIN ROLAND
COMPERNOLLE STEVEN COUNEROTTE FRÉDÉRIC CROSBY NORMA DAERDEN FRANK
DANCKAERT THOMAS DARROUZET FABIEN DE DONDER ERWIN DE KEYSER JOHAN
DE MAZIÈRE MARTINE DE RUDDER ANNE DE SMEDT ISABELLE DE WACHTER EVELYN
DEKEMPER EMMANUEL DELANOYE SOFIE DEMOULIN PHILIPPE DEPIESSE CÉDRIC
DESMET FILIP DHOOGHE FREDERIK DIA ABLAYE DIERCKXSSENS MARK DILS BART
DRUMMOND RACHEL ECHIM MARIUS EGERICKX TOM EQUETER EDDY ERRERA QUENTIN
FAYT CAROLINE FERRIERE OLIVIER FEDULLO LEONARDO FONTEYN DOMINIQUE
FRANSSSENS GHISLAIN FRATTA STEPHANIE FREDERICK PIERRE FUSSEN DIDIER GAFFÉ
DOMINIQUE GAMBY EMMANUEL GERARD PIERRE GEUNES YVES GIELEN
CLIO GILLOTAY DIDIER GLOESENER ELODIE GRANVILLE JOSÉ
GUNELL KARL NILS HERBERT HALLET STEFAAN HAUMONT
ETIENNE HELDERWEIRT ANUSCHKA HEMERIJCKX
GEERT HENDRICK FRANÇOIS HERMANS CHRISTIAN
HETEY LASZLO HEYMANS CARINE HIZETTE
CHRISTIANE HUBERT DAAN ITERBEKE PHILIPPE
KALB NATHALIE KEPPENS ARNO KOCHENOVA
SVETLANA KRUGLANSKI MICHEL KUMPS NICOLAS
LAMBERT JEAN-CHRISTOPHER LAMY
HERVE LANGEROCK BAVO LECLERE FABIENNE
LEFEBVRE ARNAUD LEFEVER KAROLIEN
LEROT CHRISTOPHE LETOCART VINCENT
LITEFTI KARIM LOPEZ ROSSON GRACIELA MAES
JEROEN MAES LUKAS MAGGIOLO ROMAIN MAHIEUX
ARNAUD MARTINEZ TARIN ANA MASSANO SANTOS CRISTINA
MARIA MATESHVILI NINA MERLAUD ALEXIS MESSIOS NEOPHYTOS MICHEL
ALICE MIDDERNACHT MICHAEL MINION JEAN-LOUIS MOREAU DIDIER MULLER ALEXIS
MULLER CHRISTIAN MÜLLER JEAN-FRANÇOIS NEARY LORI NEEFS EDUARD NEVEN
JOSEPH NOEL CHRISTIAN OOMS TIM PANDEY PRAVEEN PAUWELS DIRK PEREIRA DOS
SANTOS NUNO JOSÉ PIECK GERRY PIEROUX DIDIER PIETERS MICHAËL PIERRARD
VIVIANE PINARDI GAIA QUEIROLO CLAUDIO QUEVRIN CYRIL RANVIER SYLVAIN
RAPORT ELIEN RASSON OLIVIER RISTIC BOJAN ROBERT CHARLES ROBERT SÉVERINE
ROBYNS SOPHIE SAYYED UMAR SCHOON NIELS SCOLAS FRANCIS SKACHKO SERGEY
SOMERS TIM STAVRAKOU TRISSEVGENI TACK FREDERIK TETARD CÉDRIC THEYS
NICOLAS THIS NADIA THOMAS IAN VAN DEN WYNGAERT GUIDO VAN GENT JEROEN
VAN OPSTAL ALBERT VAN ROOZENDAEL MICHEL VANDAELE ANN-CARINE VANDENBUSSCHE
SOPHIE VANHAMEL JURGEN VANHELLEMONT PHILIP VERBRACKE FABIAN VERHOELST
TIJL VERSTRAETEN JEAN-CLAUDE VIGOUROUX CORINNE VISCARDY SEBASTIEN
VOYTENKO YURIY WILLAME YANNICK WILQUET VALÉRIE YU HUAN



REMERCIEMENTS



 BIRA • IASB
aeronomie • be