

A vertical orange line is positioned to the left of the text.

Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique  
Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie

Aperçu des activités

2004-2005

Overzicht van de activiteiten



<b>Avant-propos</b>	7
<b>Introduction:</b> Au cœur de l'enquête sur le changement global : des réponses aux questions de la société sur l'état de notre atmosphère	9
<b>Chapitre 1:</b> Rapport d'activités de l'IASB	17
<b>A. Physique et chimie des atmosphères</b>	17
Ozone mésosphérique et stratosphérique et espèces reliées	17
Les instruments GOME et SCIAMACHY	17
L'instrument GOMOS	18
Colonne totale d'ozone	19
Les gaz en trace stratosphériques apparentés à l'Ozone	19
Aérosols stratosphériques	20
Nuages Stratosphériques Polaires (PSC)	21
Nuages mésosphériques polaires (PMC)	22
Espèces météoriques dans la mésosphère	22
Le système d'assimilation de BASCOE	23
Composition troposphérique, ozone troposphérique et ses gaz précurseurs; interactions avec la biosphère	24
Émission des composés organiques par la végétation : comparaison de la modélisation et des mesures	25
Modélisation de la chimie des composants organiques	26
Modélisation inverse des émissions	28
Étude en laboratoire des réactions d'ion/molécule en appui à la détection de VOCs biogéniques oxygénés par CIMS	28
Etudes en laboratoire de l'oxydation des monoterpènes initiées par l'OH (en présence de NO et de O <sub>2</sub> ) avec un nouveau réacteur rapide turbulent à haute pression d'écoulement associé à un spectromètre de masse d'ionisation chimique	28
Préparation de la contribution à la mission IASI	29

Développement du module d'aérosol destiné à être intégré dans ASIMUT	30
Dioxyde d'azote et récupération de formaldéhyde de GOME et de SCIAMACHY	31
Observations satellites des NO <sub>2</sub> et HCHO troposphériques	32
Espèces atmosphériques et processus influençant la qualité de l'air	33
Les gaz à effet de serre	35
Exploitation des observations	36
Validation de gaz à effet de serre à Evergreen	38
Campagnes d'observation	39
Ile de la Réunion	39
Campagne Dandelion	43
Synergies entre les données au sol, les données des ballons et les données satellites	45
Contenu d'information des mesures des émissions infrarouges du limbe	47
Maturation des algorithmes d'extraction opérationnels GOME	48
Validation géophysique de données satellites	49
Rayonnement solaire et UV spectrale sur Terre	51
Les stations de surveillance UV-B au sol	51
Expérimental	51
L'instrument SOLPEC sur la station spatiale internationale (ISS)	54
Sommaire de l'état actuel de l'instrument (mi-2006)	54
Atmosphères planétaires	55
Etude de l'atmosphère Martienne: la mission SPICAM	55
SPIDEX : exploitation de données SPICAM pour l'étude UV de la surface martienne	57



Modélisation de la chimie et de l'atmosphère de Mars	58
Perspectives	58
Contribution aux expérimentations de spectroscopie optique en laboratoire	59
<b>B. Milieu interplanétaire</b>	61
La météorologie spatiale	61
Le plasma : le quatrième état de la matière	61
Le Soleil et le vent solaire	62
Le vent solaire	62
Les ions lourds du vent solaire	65
La magnétosphère terrestre	66
Les satellites CLUSTER	67
Etude de l'interaction du vent solaire avec la magnétosphère terrestre	67
La plasmasphère	70
Les aurores	72
La turbulence dans les cornets polaires	75
Les ceintures de radiation de Van Allen	76
<b>C. Valorisation and Exploitation</b>	77
Le ESA SPace ENVironment Information System (SPENVIS)	78
BASCOE	82
Le B.USOC	86
TEMIS et PROMOTE	91
Instruments 2004-2005	94
Rosina on Rosetta	94
Spicav/SOIR on Venus Express	97
Netlander GPR	98

Programme de recherche ESA pour ISS	99
<b>Chapitre 2 : Gestion (personnel, communication, budget, IT)</b>	100
<b><i>A. Effectif du personnel et aspects organisationnels</i></b>	100
<b><i>B. Communication</i></b>	103
<b><i>C. Aspects budgétaires</i></b>	109
<b><i>D. ICT</i></b>	112
<b>Chapitre 3 : Coopération internationale</b>	114

## Avant-propos

Ces dernières années, la reconnaissance internationale de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique s'est renforcée dans la recherche scientifique de l'atmosphère de la Terre et des autres planètes mais aussi dans la recherche portant sur l'influence du Soleil sur notre environnement terrestre. Cette recherche s'est manifestée, au sein de l'Institut, par la détermination des objectifs suivants :



- la création en Belgique d'un Centre de compétence en aéronomie conçu pour le 21e siècle
- l'équilibre entre la recherche scientifique fondamentale et la prestation de services scientifiques
- l'intégration dans les structures internationales de recherche et en particulier dans l'Espace européen de la recherche (EER)
- la revalorisation des valeurs scientifiques, socio-économiques et sociales
- des structures de gestion efficaces
- le bien-être et sécurité du personnel, protection des ressources

En tant que nouveau Directeur Général, engagé dans le cadre de la réforme Copernic de l'Etat Fédéral en 2005, je voudrais tout d'abord exprimer mon estime pour le potentiel humain (scientifique, technologique, etc.) sur lequel nous allons pouvoir construire l'avenir.

Nous souhaitons renforcer ce potentiel dans la recherche scientifique, en mettant l'accent sur la valorisation des résultats obtenus dans des buts sociaux et socio-économiques. Le vent solaire, les tempêtes magnétiques, les changements globaux, l'effet de serre, les aérosols, l'ozone et la qualité de l'air, sont des termes auxquels nous sommes tous les jours confrontés dans le cadre d'une vision d'avenir de notre monde. L'IASB est, avec les universités et les partenaires internationaux, un pionnier dans la recherche dans ces domaines et dans la modélisation pour l'amélioration des prévisions à court et à long terme, ainsi que dans la recherche qui permettra des améliorations éventuelles.

A côté de la recherche scientifique et des services scientifiques, l'IASB veut renforcer sa valeur ajoutée. Pour les mesures de ces différents paramètres, des instruments (senseurs) doivent être construits, tant pour les mesures au sol que pour les mesures via satellites. Une nouvelle collaboration s'est créée à cet effet avec l'industrie belge.

Cette stratégie permet d'optimiser les différents éléments dans les deux domaines stratégiques de l'Institut :

- la physique et chimie des atmosphères
- les plasmas spatiaux

Pour réaliser les objectifs susmentionnés, l'organisation est devenue le reflet de trois axes thématiques :

- Physique et chimie de l'atmosphère
- Plasmas spatiaux
- Valorisation et Exploitation

Ces axes sont complétés par différents services (dont la construction des instruments).

Le programme cadre et le plan de gestion de l'institut décrivent ces buts aux pouvoirs publics dans leur approche thématique, mais aussi en termes de structure et de moyens qui permettront à l'IASB de maintenir sa reconnaissance, son positionnement et sa compétitivité internationales, dans le cadre d'une recherche de plus en plus axée sur le questionnement.

Les activités du B.USOC, comme la promotion des programmes de recherche sur l'espace et des opportunités de vols pour les communautés scientifiques, seront intégrées dans la cellule « Valorisation et exploitation » afin d'atteindre une synergie et une masse critique maximale pour les futures missions telles que:

- activités de services
- opérations
- contrôle des missions par satellites
- exploitation de la station spatiale internationale (ISS)

À l'avenir, une attention toute particulière sera portée sur la communication externe dans le but de donner une plus grande visibilité de l'IASB vis-à-vis des différents publics intéressés.

## Introduction

### **Au cœur de l'enquête sur le changement global: des réponses aux questions de la société sur l'état de notre atmosphère**

Surveiller et gérer la qualité de l'atmosphère constituent l'un des grands défis de l'humanité pour ce XXIème siècle. Ce sont, entre autre, les objectifs d'une science pluridisciplinaire qui se nomme aéronomie. Cette science relativement jeune fut officialisée en 1954 par l'Union de Géodésie et de Géophysique Internationale ([www.iugg.org](http://www.iugg.org)) avec la création de l'Association Internationale de Géomagnétisme et d'Aéronomie (IAGA). L'aéronomie étudie les propriétés physiques et chimiques des régions supérieures de l'atmosphère où les phénomènes de dissociation et d'ionisation des gaz sont conséquents. C'est précisément la spécialité des chercheurs, ingénieurs et techniciens de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB), qui a vu le jour en 1964, après que les premiers satellites soient lancés pour observer l'atmosphère d'en haut, à partir de l'espace.



L'atmosphère, depuis la formation de la Terre, il y a environ 4,6 milliards d'années, a continuellement évolué. Elle continue à le faire de façon naturelle et sous l'influence des activités humaines. Cette dernière influence ne cesse d'ailleurs de croître. La société d'aujourd'hui est confrontée au problème de son développement durable. Il s'agit d'un problème qui est lié aux questions du changement global de l'atmosphère, de son réchauffement et de son évolution.

L'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique est une institution fédérale de recherche. Les études qui y sont menées couvrent :

- les processus chimiques et physiques dans la haute atmosphère - et par extension jusqu'à la surface de la Terre -, afin de les comprendre, de les expliquer et de les modéliser ;
- Les processus physiques dans l'espace interplanétaire et dans les régions planétaires ionisées (la physique des plasma spatiaux), dans le but d'appliquer cette connaissance aux effets sur la vie biologique ainsi que sur les systèmes technologiques (la météorologie spatiale).

Il y a donc non seulement la recherche de base qui est entreprise à l'IASB mais aussi la valorisation et l'exploitation des résultats de ces études.

L'aéronomie est une science qui embrasse la quasi-totalité de l'environnement atmosphérique, y compris les relations entre Soleil et Terre, entre biosphère, atmosphère et climat. Et elle s'intéresse par extension, en établissant des bilans comparatifs, aux atmosphères des planètes et des comètes.

Cette science s'appuie sur un réseau mondial de stations de mesures, le Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC), ainsi que sur l'emploi de détecteurs miniaturisés à bord de satellites, de sondes spatiales et de ballons stratosphériques. L'avantage du satellite réside dans sa vision globale. Il donne une vue d'ensemble sur la composition chimique de l'atmosphère, sur les interactions entre la dynamique atmosphérique et sa chimie, sur les influences de l'environnement de l'espace.

### **Le fil rouge de l'atmosphère**

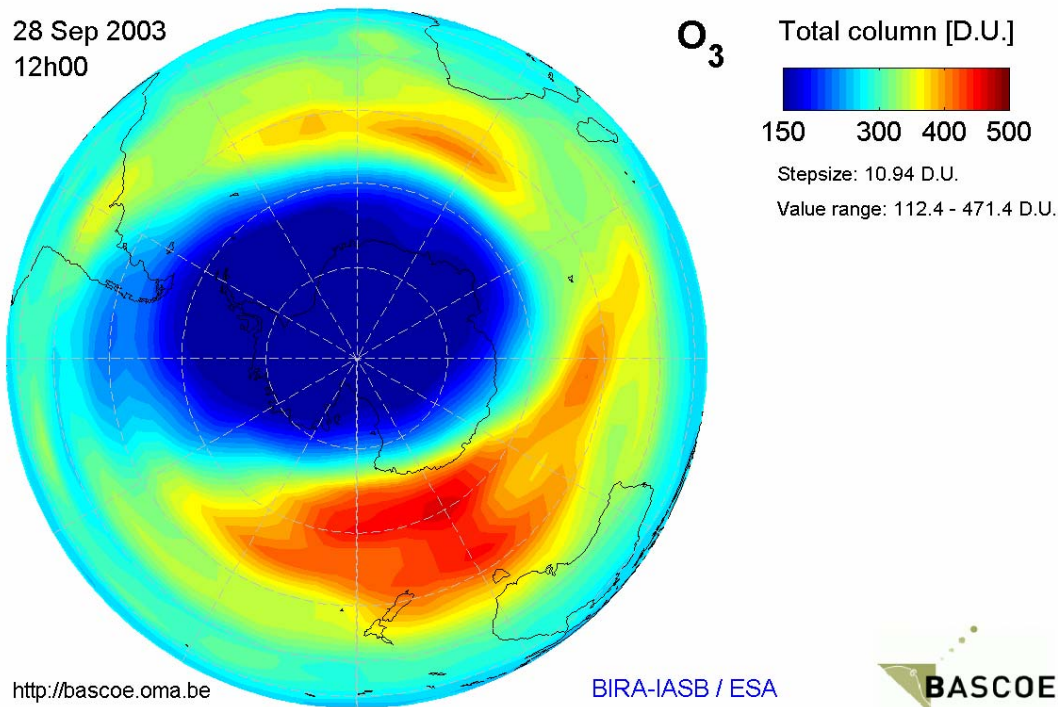
Dès les années 50, il y a plus d'un demi-siècle, un chercheur belge, le Professeur Marcel Nicolet - véritable pionnier de l'aéronomie et fondateur de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique - se penchait sur le problème des changements physico-chimiques dans l'atmosphère. Depuis, la Belgique a contribué de façon substantielle à la recherche scientifique de l'atmosphère par les études de terrain, en laboratoire, et théoriques. Les mesures réalisées à partir des stations au sol se trouvaient renforcées par des observations « in situ » au moyen de détecteurs placés à bord de ballons-sondes et de fusées, et par l'utilisation des satellites. Quasi simultanément, les liens entre les changements globaux de la composition de l'atmosphère moyenne et supérieure et les changements de climat ont émergés. Ceci impliquant le besoin d'une coordination pluridisciplinaire à tous les niveaux, du régional au global, pour l'étude - dans un souci de continuité - à la fois de la troposphère et de la stratosphère au moyen de techniques sophistiquées à bord de différentes plates-formes d'observation et sur de longues périodes.

### **Le précieux ozone en question**

Au-dessus de la troposphère, cette partie de l'atmosphère où se déroulent les phénomènes météorologiques, on veut connaître et comprendre ce qui

influence la stratosphère, la mésosphère et l'ionosphère. La découverte en 1985 du trou dans la couche d'ozone stratosphérique au-dessus de l'Antarctique a incité l'Institut à en savoir plus, scientifiquement, sur ce phénomène. Les études internationales à ce sujet ont permis une prise de conscience du problème et ont conduit à des mesures d'urgence telles que le Protocole de Montréal, ratifié par de nombreux pays et mis en route en 1987. Ce Protocole se fixe pour objectif une diminution progressive de toutes les causes, générées par l'activité humaine, du trou d'ozone.

### Prévision d'ozone grâce aux données du satellite ENVISAT



Le « trou d'ozone » est un problème de taille car le rôle de l'ozone stratosphérique, en absorbant jusqu'à 98 % du rayonnement intense du Soleil dans l'ultraviolet, est vital. Quand, au-dessus de l'Antarctique, le trou dans la couche d'ozone stratosphérique est devenu évident et que le problème de l'appauvrissement de la couche d'ozone aux latitudes élevées s'est posé, les chercheurs belges avaient le savoir-faire pour aborder ce problème. Ils ont activement participé aux efforts européens et internationaux afin de mesurer les changements par des observations sur le terrain et pour identifier les causes et les processus incriminés en mettant en oeuvre et en exploitant les modèles atmosphériques développés à l'Institut. Ces travaux sont recoupés avec les observations qui sont faites par l'Institut Royal Météorologique pour la couche la plus proche de la surface et par l'Observatoire Royal de Belgique en ce qui concerne l'influence du milieu spatial. Le savoir-faire scientifique de l'Institut se situe entre les deux, même si les frontières des compétences respectives sont parfois ténues.

## **La santé des êtres vivants en jeu**

La découverte et l'étude de l'appauvrissement de la couche d'ozone ont montré un accroissement du rayonnement nocif du Soleil au niveau du sol, qui est dangereux pour la vie sur Terre. La recherche, à laquelle l'IASB prend part de façon très active, a révélé une diminution temporelle moyenne du « bon » ozone dans la stratosphère et une augmentation du « mauvais » ozone dans la troposphère. Les modèles de calcul démontrent que ces deux changements sont principalement d'origine anthropogéniques, liés au développement industriel.

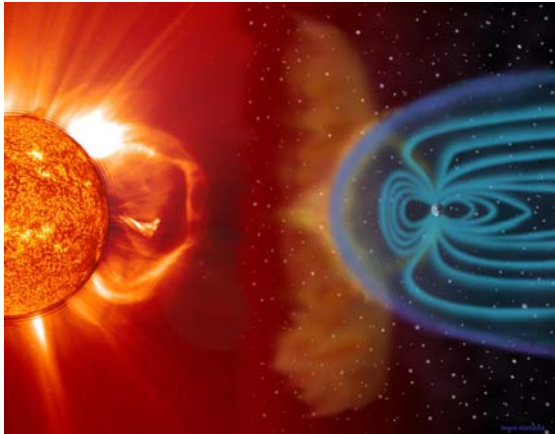
Les chercheurs de l'IASB ont étudié la corrélation entre une diminution de la concentration d'ozone stratosphérique et une augmentation des rayons ultraviolets de type B à la surface terrestre. Or, ces rayons UV-B touchent la santé publique, puisqu'ils sont à l'origine d'une augmentation des problèmes de cataracte, des coups de soleil, du vieillissement de la peau, des cancers de la peau et des changements du système immunitaire. Les mesures effectuées par l'IASB, au moyen de stations situées à Uccle (Bruxelles), à Redu (Libin) et à Ostende, permettent, pour l'ensemble du territoire belge, d'évaluer les risques et d'alerter la population.

Le coupable le plus connu du trou d'ozone est le rejet dans l'atmosphère des Chlorofluorocarbures (les fameux CFC). Le gros problème est dû à l'accumulation de liaisons chlorées qui se stabilisent dans l'atmosphère. Depuis fin 1995, le Protocole de Montréal interdit la production de ces sources de liaisons chlorées dans l'Union et tous les pays qui ont souscrit au Protocole. Le rôle des chercheurs de l'IASB est de rester vigilants quant à la présence et à la diffusion des substances qui détruisent l'ozone stratosphérique. Il est très important de mettre en relation ces émissions de CFC avec les études à long terme de la charge en azote, en chlore, et en brome de la stratosphère. Ce sont ces gaz qui causent la majeure partie de l'érosion de la couche d'ozone protectrice.

Les programmes de contrôle dans le cadre du réseau NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change) ont prouvé que la charge en chlore stratosphérique au-dessus de l'Europe a atteint un pic à la fin des années 90, tandis que la charge en brome stratosphérique continuait à augmenter. Les modèles de calculs qui se réfèrent à des décennies de mesures des gaz à effet de serre (principalement le CO<sub>2</sub>, le méthane et la vapeur d'eau) et sur les scénarios évolutifs réalistes pour les composants halogènes qui appauvrissent l'ozone ne prévoient pas un retour de la couche d'ozone à son état d'avant son appauvrissement avant plusieurs décennies et seulement à la condition que les Etats, sur l'ensemble de la planète, respectent les engagements qu'ils ont pris à la suite du Protocole de Montréal. L'IASB suit par ailleurs l'évolution des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, dont la stabilisation a fait l'objet du Protocole de Kyoto en 1992. Les concentrations de ces gaz augmentent, menant à la crainte que le climat de la Terre pourrait se réchauffer de plusieurs degrés Celsius.



## Effets du plasma spatial



Si la composition chimique de l'atmosphère se modifie sous l'influence de l'activité solaire et sous l'effet de l'activité humaine, son comportement physique est aussi influencé par notre étoile. Cette activité solaire se manifeste sous la forme d'un vent de plasma, appelé « vent solaire », flux rapide (plus de 400 km/s) et permanent s'échappant du Soleil.

Notre planète génère son propre champ magnétique. Celui-ci est déformé par l'action du vent solaire créant une espèce de « bulle magnétique » qui constitue notre magnétosphère et protège la Terre des particules énergétiques du vent solaire. Elle s'étend du sommet de l'ionosphère (1000 à 1500 kilomètres), jusqu'à 70.000 kilomètres environ du côté du Soleil. Du côté opposé, la queue de la magnétosphère s'étire sur plusieurs millions de kilomètres. Toutefois, la magnétosphère n'est pas figée. Sous l'action dynamique du vent solaire, elle évolue sans arrêt. Ce qui n'est pas sans effet sur les couches supérieures de l'atmosphère.

Le vent solaire est un plasma de très haute énergie, essentiellement composé de noyaux d'hydrogène (protons) et d'hélium (particules alpha). Il prend une sérieuse acuité lorsque des éruptions d'une extrême violence ont lieu dans la couronne du Soleil. Ce rayonnement corpusculaire présente un réel danger pour les astronautes et les satellites en orbite autour de la Terre. Les astronautes risquent d'être exposés à des doses de radiations importantes et il leur faut s'abriter dans des habitacles aux structures renforcées. Les engins spatiaux sont victimes de décharges électriques et leurs panneaux solaires se trouvent endommagés.

Les particules du vent solaire, lorsque celui-ci redouble d'intensité de façon soudaine, provoquent des perturbations magnétiques importantes, appelées orages magnétiques. Ces changements peuvent affecter la santé, la sécurité et le bien-être économique. Ils induisent des courants électriques dans l'ionosphère et au sol, qui peuvent être à l'origine de pannes de courant, accélérant la corrosion de kilomètres de pipelines (de gaz et de pétrole), notamment dans le Grand Nord. Ces orages perturbent, voire interrompent la diffusion des ondes radio, ce qui est préjudiciable au bon fonctionnement des satellites de télécommunications et à la précision de la navigation par satellites (signaux du Global Positioning System, GPS). L'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique étudie le plasma spatial et particulièrement les influences du rayonnement corpusculaire du Soleil sur l'environnement terrestre.

## Prévisions de « météorologie spatiale »

C'est ce qui amène l'IASB, grâce à ses travaux de recherche fondamentale sur la physique des relations Soleil-Terre, à faire de la « météorologie spatiale ». Son but, dans le cadre de travaux pour l'ESA (Agence Spatiale Européenne) et en collaboration avec d'autres institutions et universités, est de mieux comprendre comment le vent solaire interagit avec la magnétosphère en vue de suivre les effets des orages magnétiques et de prévoir les événements susceptibles de causer des désagréments aux activités humaines. Il s'agit de protéger les systèmes et les hommes des risques liés à leurs effets. Il vise à prédire l'arrivée des éjections de masse coronale et leur impact au niveau de la magnétosphère terrestre. Il visualise l'influence de l'activité solaire sur l'environnement terrestre, pour la sécurité des systèmes de télécommunications, de navigation, de distribution d'électricité... Il donne lieu à des produits utiles qui sont distribués via un réseau européen d'informations.

Le groupe « plasma de l'espace » de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique met au point des modèles physiques du milieu interplanétaire, qui doivent pallier l'empirisme dominant la météorologie spatiale dans son état actuel afin d'améliorer la fiabilité des prévisions. Il étudie la magnétosphère, région de l'espace qui est contrôlée par le champ magnétique terrestre, à partir du phénomène des aurores et à l'aide des mesures d'engins spatiaux européens : la sonde interplanétaire Ulysses en orbite autour des pôles du Soleil et le quatuor des satellites Cluster qui évoluent dans la magnétosphère pour en établir une cartographie en 3D.

## Présence dans l'espace extraterrestre

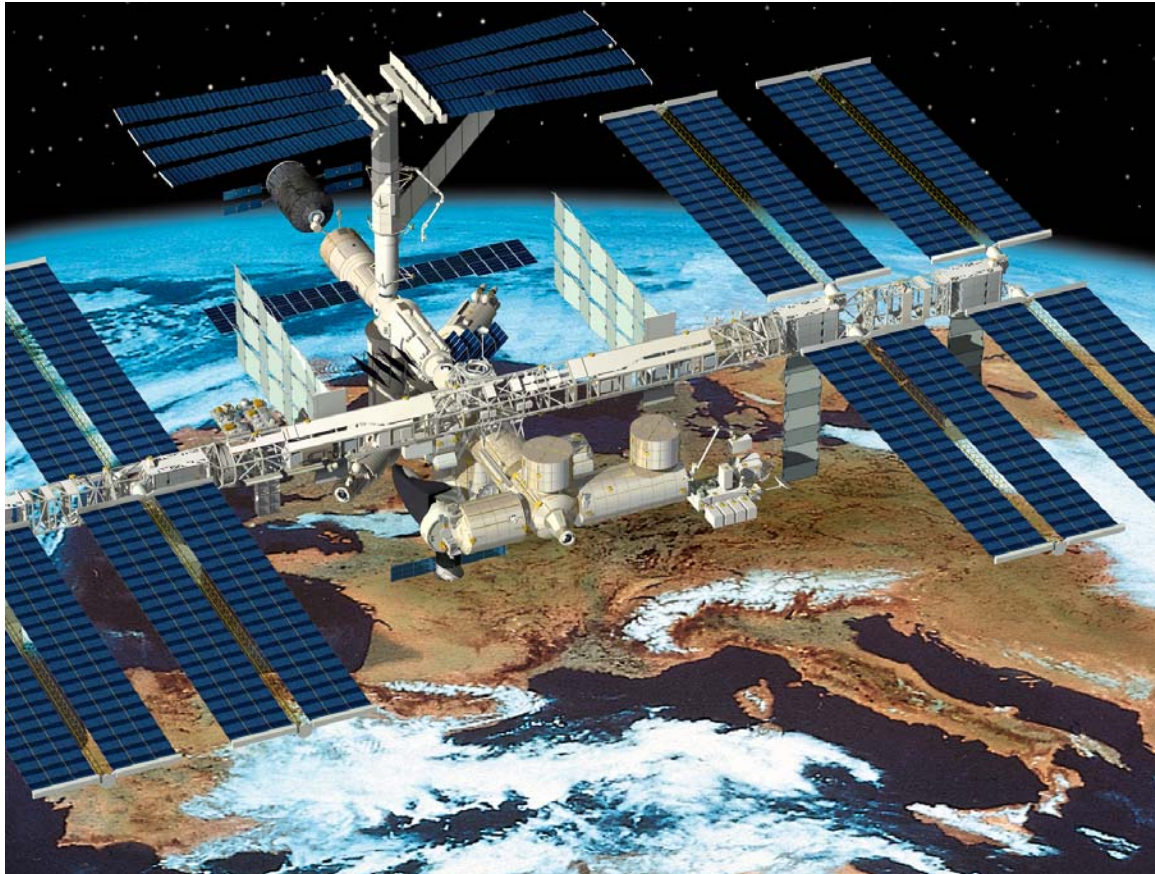


L'IASB fait de la Terre un objectif prioritaire, mais il s'intéresse aux autres planètes - notamment à Mars - pour comprendre pourquoi leur environnement atmosphérique a évolué différemment du nôtre, ainsi qu'aux caractéristiques des queues lumineuses de comètes. Il participe à des expériences à bord des sondes européennes Rosetta (en route vers le noyau de la comète Churyumov-Gerassimenko), Mars Express et Venus Express.

La méthodologie qui est employée dans l'étude des atmosphères des planètes et des comètes est fort proche de celle qui sert à étudier l'atmosphère terrestre. Ainsi ce sont les mêmes types d'instruments qui doivent sonder les couches d'atmosphères différentes grâce au principe d'occultation. On visionne la lumière du Soleil à travers l'atmosphère de ces planètes, permettant d'en déduire la composition chimique.

Les missions spatiales et en particulier interplanétaires ont des contraintes techniques importantes pour la masse, l'encombrement, la télémesure des équipements. Les ingénieurs de l'IASB doivent faire preuve d'ingéniosité pour rendre léger et compact, peu gourmand en énergie, l'instrumentation qu'on veut

faire voler dans des milieux planétaires et cométaires. Ils ont développé avec l'industrie belge une filière de spectromètres à grille pour des observations autour de la Terre, de Mars et, récemment, de Vénus. La collaboration avec d'autres institutions d'aéronomie, notamment en France, a tissé des liens entre des équipes de chercheurs. C'est le cas pour les instruments SPICAM sur Mars Express autour de la Planète Rouge et SPICAV pour Venus Express autour de l'Etoile du Berger.



A l'heure de la Station Spatiale Internationale (ISS), les chercheurs de l'IASB seront présents dans le cadre des trois instruments de l'expérience SOLAR qui sera disposée avec son système de pointage sur le module Columbus. Ce laboratoire habitable de l'ESA devrait être installé par la navette spatiale sur la station fin 2007. SOLAR comprend une version améliorée du spectrographe SOLSPEC (Solar Spectral irradiance measurements) développé par l'Institut pour mesurer le rayonnement solaire de l'ultraviolet à l'infrarouge. Il s'agit de la troisième génération de cet instrument qui a volé à quatre reprises dans l'espace (de 1992 à 1994). Il observera un spectre plus étendu. Cette participation des chercheurs de l'IASB à l'ISS s'inscrit dans une tradition des vols habités dans lesquels la Belgique est partie prenante. Au printemps 1992, la première mission ATLAS (Atmospheric Laboratory for Applications & Science) dans la soute de la navette Atlantis comprenait plusieurs expériences de l'IASB, ainsi qu'un de ses anciens chercheurs, Dirk Frimout.

Pour mener à bien – en temps réel – des expériences scientifiques et technologiques sur orbite, notamment dans l'ISS, l'IASB dispose des

installations de télé-opérations du B.USOC (Belgian User Support & Operation Centre). Celles-ci sont intégrées au sein de l'Institut, dans le contexte de ses activités Valorisation et Exploitation. Elles servent d'infrastructure de support pour des expériences d'autres institutions scientifiques et laboratoires universitaires. Ainsi le B.USOC servira à la mission Picard, dans le cadre d'une coopération avec le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales, France). Le nom « Picard » a été donné à un microsatellite de la famille Myriade qui observera les variations du disque solaire et de son rayonnement. Il sera lancé en 2008 pour des observations pendant deux ans.

### **Positionnement de l'IASB**

L'IASB fait partie de ces centres de recherche dont le fil rouge des activités est le comportement physico-chimique de l'environnement atmosphérique lequel réagit au milieu spatial (lui-même influencé par l'activité de notre étoile, le Soleil), aux phénomènes naturels d'origine terrestre et au développement des activités de la société humaine. Comme institution fédérale de recherche au caractère multidisciplinaire, il coopère avec d'autres centres et laboratoires en Belgique, en Europe et dans le monde.

Les travaux de l'IASB se sont vite révélés d'une grande actualité, voire d'une urgente nécessité. Il faut à tout prix assurer leur pérennité. Ils ont servi à tirer le signal d'alarme au sujet de la santé du cocon atmosphérique dont l'évolution physico-chimique était en train de s'emballer suite à un développement industriel accéléré. Au sein de la communauté scientifique internationale, l'IASB est devenu et constitue un maillon essentiel pour dresser un diagnostic détaillé des éléments qui polluent et modifient l'atmosphère, pour établir avec pertinence et dans la continuité le bulletin de santé de l'atmosphère.

## Chapitre 1 : Rapport d'activités de l'IASB

### A. Physique et chimie des atmosphères

#### **Ozone mésosphérique et stratosphérique et espèces reliées.**

*Notre vie de tous les jours est largement concernée par des processus qui se déroulent dans toute l'atmosphère, depuis sa base jusqu'à ses frontières atmosphériques extérieures. Plus particulièrement, les gaz et les particules atmosphériques régulent les rayonnements solaires entrants et sortants par l'absorption et la dispersion optiques. Le cas de l'ozone stratosphérique est bien connu, une molécule de gaz en trace qui, en dépit de sa faible teneur, protège de manière efficace les êtres vivants des rayonnements extraterrestres nuisibles à courtes longueurs d'ondes. Au cours des deux dernières décennies, il est devenu évident que les niveaux d'ozone diminuent graduellement, vraisemblablement à cause de l'émission anthropogène de gaz halogénés. Des règlements internationaux ont été imposés dans le cadre de ces émissions, et la surveillance de l'ozone est devenue un sujet primordial en vue de l'évaluation de l'impact de ces dispositions. Dans ce contexte, des missions satellitaires ont été mises sur pied par l'Agence Spatiale Européenne (ESA), dans le but de contribuer à la surveillance de la couche d'ozone à l'échelle globale. Celles-ci ont été inaugurées en 1995 avec le lancement de l'expérience GOME à bord du satellite ERS-2, suivi en 2002 par le lancement du ENVironmental SATellite (ENVISAT), avec à son bord trois capteurs de chimie atmosphérique (MIPAS, GOMOS et SCIAMACHY), tous principalement destinés à l'étude de l'ozone et des gaz en trace contrôlant son budget chimique. L'IASB a participé à la préparation et/ou à l'exploitation des données de toutes ces expériences, plus particulièrement en ce qui concerne les projets GOME, GOMOS et SCIAMACHY. Les activités suivantes ont été entreprises durant la période 2004-2005.*

#### **Les instruments GOME et SCIAMACHY**

GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) - expérience de surveillance de l'ozone à l'échelle du globe – est un spectromètre destiné à l'observation du nadir, mis en orbite en avril 1995 à bord du satellite ERS-2. Le principal résultat géophysique ciblé par GOME est la distribution globale précise des colonnes totales d'ozone. L'information spectrale continue disponible dans le domaine spectral de 240 à 790 nm a cependant été utilisée avec succès pour récupérer des informations de colonne pour un certain nombre d'autres gaz en traces, dont le NO<sub>2</sub>, le HCHO, le BrO, le OClO, le SO<sub>2</sub> et la vapeur d'eau. La couverture nuageuse et la pression au sommet des nuages ont également été observées. Par ailleurs, différentes études ont été menées sur la récupération de profils d'ozone provenant des mesures de GOME. Quoique sa capacité de couverture globale ait été perdue en juin 2003, GOME est actuellement encore opérationnel et continue de produire des enregistrements plus de 10 ans après son lancement.

GOME a, en réalité, été conçu comme une version à échelle réduite de l'instrument plus complexe SCIAMACHY, qui fut mis en orbite en 2002 sur la plateforme ENVISAT de l'ESA. SCIAMACHY, dont le modèle est similaire à GOME, inclut un



mode complémentaire d'observation du limbe (alternant avec le mode nadir) qui permet la détermination des profils stratosphériques verticaux de l'ozone et d'autres gaz en traces (NO<sub>2</sub>, BrO, OClO). Il est également équipé de canaux additionnels dans la région du proche infrarouge, grâce auxquels des molécules importantes pour le climat, tels le CO, le CO<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub> peuvent être observées.

L'éventail de thèmes scientifiques qui peut être abordé par cet instrument est dès lors étendu puisqu'il comprend l'ozone atmosphérique, troposphérique, la qualité de l'air, ainsi que les gaz à effet de serre qui affectent le climat à l'échelle du globe.

Depuis le lancement de GOME, l'IASB a largement contribué au développement des algorithmes d'extraction de l'ozone et d'autres gaz en trace (BrO, NO<sub>2</sub>, OClO, HCHO et SO<sub>2</sub>), ceci en partie par le biais d'un appui direct à la section opérationnelle de l'ESA. Elle a, en outre, largement contribué aux programmes de validation des instruments de chimie atmosphérique sur ERS-2 (GOME) et ENVISAT.

### ***L'instrument GOMOS***

GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars) -surveillance de l'ozone global par occultation des étoiles- fut lancé à bord du satellite européen Envisat le 1<sup>er</sup> Mars 2002 et est jusqu'à présent totalement opérationnel. Il s'agit, globalement, d'un spectromètre UV/Visible/rayons I.R. proches, qui fonctionne en mode d'occultation des étoiles : tout en tournant en orbite autour de la Terre, l'instrument mesure la transmission de la lumière des étoiles qui se couchent derrière l'horizon de la Terre. Lors de son passage à travers l'atmosphère terrestre, la lumière des étoiles est partiellement dispersée ou absorbée par les gaz et particules atmosphériques. Les mesures peuvent dès lors être utilisées pour extraire les profils verticaux d'extinction des aérosols et de différents gaz dont l'ozone. GOMOS est équipé d'un miroir scrutateur et d'un traqueur d'étoiles pour repérer et observer continuellement les étoiles. Plusieurs centaines d'occultations sont ainsi mesurées chaque jour offrant une bonne couverture globale. Les mesures sont prises tant sur la face jour (limbe éclairé), que sur la face nuit (limbe obscur) de la Terre, et certaines occultations se déroulent à la limite jour/nuit (au crépuscule). Il s'agit là d'un élément primordial : tandis que de nombreuses autres expérimentations satellites effectuent des mesures de l'atmosphère illuminée en ayant recours au Soleil comme source de lumière, GOMOS permet lui de surveiller des espèces atmosphériques durant la nuit. En outre, les mesures au crépuscule sont extrêmement intéressantes puisqu'elles procurent potentiellement un aperçu de la concentration photochimique active des espèces, susceptible de varier rapidement.

GOMOS est équipé de deux photomètres dont les signaux sont utilisés, d'une part, pour corriger le spectre de scintillement dû à la turbulence atmosphérique, et d'autre part, pour extraire des profils de températures à haute résolution.

En pratique, il est apparu qu'un petit composant scintillant induit par une turbulence horizontalement inhomogène se trouve encore dans le spectre et perturbe sérieusement la qualité des récupérations. A l'heure actuelle, ce problème non résolu demeure le défi le plus important pour le traitement de données.

Jusqu'à présent, seules les mesures de l'année 2003 ont été traitées par l'algorithme officiel de l'ESA. Il présente, malgré tout, de nombreuses défaillances. Le problème de scintillation décrit est insuffisamment étudié, le modèle utilisé pour le spectre d'extinction d'aérosol est probablement erroné, la dépendance des mesures à différentes altitudes est partiellement ignorée, et de nombreuses espèces intéressantes restent inexplorées. Etant donné que les mesures GOMOS sont tellement uniques, nous pensons qu'il nous incombe d'améliorer la situation de manière significative.

### ***Colonne totale d'ozone***

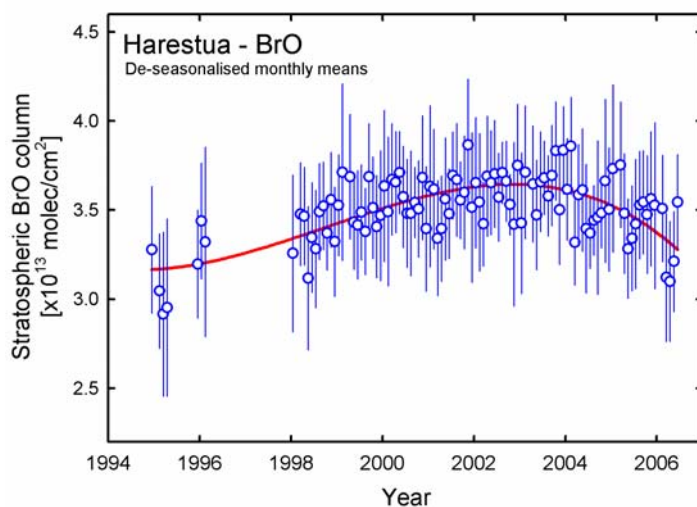
L'Ozone absorbe fortement dans l'UV (bandes d'absorption de Hartley et Huggins) ainsi que dans les bandes visibles de Chappuis. L'Ozone est la substance principalement ciblée par GOME et par tous les instruments de chimie atmosphérique à bord d'ENVISAT (y compris GOMOS, SCIAMACHY et MIPAS). GOME et SCIAMACHY ont plus spécifiquement été conçus pour poursuivre les séries de mesures d'ozone de haute qualité et à long terme initiées par les instruments TOMS de la NASA. En pratique, il a fallu de nombreuses années et de nombreuses révisions de l'algorithme opérationnel de GOME avant que la précision attendue puisse être établie. L'aide des scientifiques de l'IASB pour l'accomplissement de cet objectif s'est révélée essentielle, tant du point de vue des développements algorithmiques qu'au niveau du contrôle de la qualité du produit résultant, basé sur une validation de fond au moyen des réseaux internationaux GAW/NDACC. Les versions actuelles des algorithmes opérationnels de GOME et SCIAMACHY sont basées sur des développements scientifiques réalisés à l'IASB, avec le financement direct de l'ESA. Ce travail fut réalisé dans le cadre de différents projets entamés entre 2002 et 2005, et est toujours en cours au sein du projet *GODFIT Phase B*, dont l'objectif est d'établir un nouvel algorithme d'extraction de la colonne totale d'ozone de très haute précision, destiné à être appliqué aux instruments de l'ESA, à savoir GOME, SCIAMACHY ainsi que le futur instrument GOME-2 (dont le lancement est prévu sur la plateforme EUMETSAT METOP en octobre 2006).

### ***Les gaz en trace stratosphériques apparentés à l'Ozone***

L'air neutre contribue au spectre en raison de la diffusion de Rayleigh. Des gaz tels le NO<sub>2</sub>, le BrO, le OClO et le NO<sub>3</sub> jouent un rôle distinct dans la chimie de l'ozone stratosphérique. Le NO<sub>3</sub> est uniquement présent au cours de la nuit, étant donné qu'il est photolysé par la lumière solaire.

Les espèces bromées ont un rôle similaire aux espèces chlorées dans la stratosphère : elles agissent comme des agents catalyseurs dans la diminution de l'ozone. Le BrO laisse une empreinte distincte (bien que faible) dans le spectre UV/Visible. L'OClO est formé par la réaction de BrO avec ClO et sa présence est par conséquent un bon indicateur de l'activation chimique du chlore ainsi que de la présence de composés actifs bromés dans les tourbillons polaires stratosphériques. Très récemment, des traces d'OClO furent détectées dans les spectres de GOMOS par les chercheurs de l'IASB. La même molécule a également été mesurée dans le spectre crépusculaire de GOME à la frontière du terminateur polaire et a été utilisée pour évaluer la chimie polaire à l'aide du système de modélisation BASCOE (voir

section X). La distribution globale du BrO a également été étudiée en détails à l'IASB à l'aide, d'une part, de mesures effectuées par les instruments GOME et SCIAMACHY dans le cadre du projet DUP-2 TEMIS (<http://www.temis.nl>), et d'autre part, grâce à des observations au sol effectuées dans le cadre du réseau NDACC (voir section X). Plus spécifiquement, les apports relatifs de BrO dans la troposphère et la stratosphère ont été estimés pour la première fois en région tropicale sur base des mesures effectuées par l'IASB à l'île de la Réunion. Sur d'observations à plus long terme obtenues à Harestua dans le sud de la Norvège, la tendance à long terme du Brome montrant un déclin récent résultant de régulations des émissions anthropogènes a pu être identifiée (voir image).



*Evolution temporelle de la colonne stratosphérique de BrO mesurée à Harestua, en Norvège (60°N) par spectroscopie UV-visible au sol. Ces observations mettent en évidence la décroissance attendue du contenu en brome dans la stratosphère, suite aux mesures prises dans les années 1990 pour réguler les sources de gaz bromés dans l'atmosphère.*

### **Aérosols stratosphériques**

En dépit du fait que certaines particules solides aient été trouvées dans la stratosphère peu après de violentes éruptions volcaniques, le terme 'aérosols stratosphériques' réfère généralement à un ensemble de gouttelettes fluides, composées d'un mélange d'eau et d'acide sulfurique. Dans un contexte normal, on suppose qu'elles résultent de gaz précurseurs tels le OCS et le CS<sub>2</sub>. suite à de fortes éruptions volcaniques telle celle du Mont Pinatubo en 1991, les aérosols proviennent de l'injection de quantités importantes de gaz SO<sub>2</sub> dans la stratosphère. La charge d'aérosol peut augmenter de plusieurs ordres de grandeur, et plusieurs années peuvent s'écouler avant que la couche d'aérosol (également appelée couche de Junge) ne reprenne sa condition normale.

En règle générale, la teneur en aérosol stratosphérique atteint son maximum juste au-dessus de la tropopause, et décline avec l'altitude. On pense généralement qu'aucun aérosol ne peut être trouvé au-dessus de 35 Km d'altitude, bien que le transport vertical puisse éventuellement induire la présence d'aérosols au-dessus de cette altitude. Des graphiques de densité d'aérosols exprimés en fonction de la



latitude et de l'altitude prennent la forme typique d'un 'sombbrero', résultant du transport isentropique méridional. De telles observations suggèrent que les aérosols peuvent être considérés comme des traceurs atmosphériques. C'est probablement le cas dans un contexte normal. Cependant, les travaux menés à l'IASB-BIRA ont démontré qu'après une éruption volcanique forte, d'autres processus, tels que la coagulation de particules, la sédimentation et le transport vertical concurrencent le transport méridional dans l'explication des dynamiques d'aérosol observées.

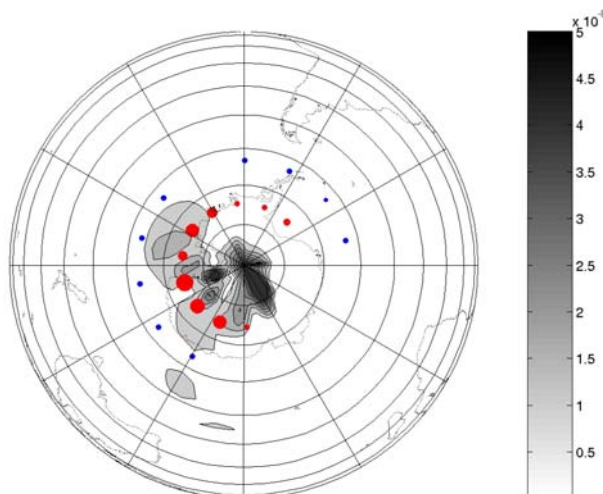
*L'intérêt scientifique pour les aérosols stratosphériques est multiple. L'appauvrissement de la couche d'ozone est principalement dû aux réactions hétérogènes sur la surface des aérosols. Et, comme déjà mentionné, l'habilité des aérosols à absorber et disperser la lumière les transforme en acteurs incontestables dans l'équilibre radiatif total de notre planète. C'est pour cette raison qu'il est important de quantifier les niveaux d'aérosols stratosphériques au moyen de mesures et des analyses.*

### **Nuages Stratosphériques Polaires (PSC)**

A l'heure actuelle, il est avéré que l'appauvrissement de la couche d'ozone polaire peut être expliquée par des réactions hétérogènes sur la surface de particules de glace ou de gouttelettes dans la stratosphère, qui forment des Nuages Stratosphériques Polaires (Polar Stratospheric Clouds), qui peuvent être observés au sol à l'œil nu.

Par temps froids, en présence de PSC, le réservoir stable des espèces HCl, ClONO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> disparaît sous l'action de réactions hétérogènes intervenant à la surface des particules pour former du HNO<sub>3</sub> dans les particules de PSC, qui sont éventuellement éliminées de la stratosphère par sédimentation lors d'un processus appelé dénitrification. Les autres produits de la réaction sont la photodissociation en présence de la lumière du Soleil (à la fin de l'hiver polaire, avec le retour du Soleil) pour activer les espèces chlorées, responsables de la destruction catalytique de l'ozone.

Une classification s'effectue de la manière suivante : Type Ia NAT PSCs (cristaux de trihydrate d'acide nitrique) et Type Ib SAT PSCs (gouttelettes surfondues d'acide sulfurique) qui se forment en deçà de 195 Kelvin, et Type II PSCs (cristaux d'eau congelés) formés en deçà de 188 Kelvin.



Cette classification est probablement trop rudimentaire. Nous ne possédons pas assez d'informations concernant la taille des particules, la morphologie des cristaux ou leur composition. A plus

grande échelle, des informations complémentaires sont nécessaires concernant les propriétés des nuages, telles la forme, l'épaisseur et la densité. Les mesures satellitaires peuvent procurer cette information : les PSC sont facilement repérables lorsque des extinctions optiques élevées sont observées à l'intérieur d'un vortex polaire.

L'image représente des mesures de GOMOS des épaisseurs optiques de la trajectoire oblique durant l'hiver 2003 en Antarctique. Des occultations consécutives par une étoile hors du vortex polaire (taches bleues de taille proportionnelle à l'épaisseur optique) ne montrent pas de valeurs particulières alors que les occultations à l'intérieur du vortex (taches rouges) dénotent des événements inhabituels, en corrélation avec les densités de surface (en  $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ ) calculées sur base de données assimilées de MIPAS par le modèle BASCOE.

### ***Nuages mésosphériques polaires (PMC)***

*Appelés à l'origine 'nuages noctilucents' et signalés pour la première fois en 1885, les nuages mésosphériques polaires sont visibles uniquement dans le ciel sombre, longtemps après le couché du Soleil. Ils sont d'apparence similaire à de fins nuages de cirrus, mais se trouvent à une altitude nettement supérieure, de 80 à 87 Km, proches de la mésopause. Les PMC apparaissent seulement à haute latitude, pendant l'été (quelques semaines avant et après le solstice), quand la mésosphère devient très froide (avec des températures aussi basses que 100 Kelvin). Différentes preuves, incluant des échantillons de fusée, suggèrent qu'ils seraient composés de très petites particules de glace d'eau (0.05 – 0.1 microns). Il est plus ou moins admis que les PMC sont des indicateurs sensibles du changement atmosphérique global. La source de la vapeur d'eau mésosphérique est le méthane. Partant de la troposphère, le méthane est transporté vers la mésosphère, où il est alors oxydé par des espèces chimiques actives (O(1D) et OH). L'augmentation des niveaux de méthane troposphérique est dès lors présumée avoir causé la multiplication du nombre d'observations de PMC au cours du siècle dernier. Des traces évidentes d'émission de PMC ont été détectées mais aucune trace d'absorption de PMC, pour laquelle une analyse de données plus rigoureuse serait nécessaire, n'a encore été détectée.*

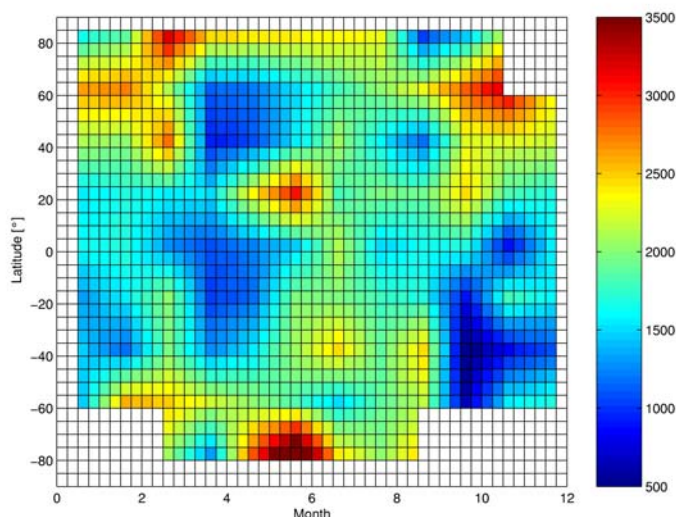
### ***Espèces météoriques dans la mésosphère***

Une riche variété d'atomes et d'ions métalliques est présente dans la mésosphère. Il est établi qu'ils sont issus de l'ablation ou de l'évaporation de météorites qui pénètrent dans l'atmosphère. Des spectromètres de masse, attachés à des fusées, ont démontré que la concentration d'ions métalliques augmente de façon proportionnelle après une pluie de météorites. Les espèces typiques que l'on peut trouver près de la mésopause sont le fer, le sodium, le calcium et le magnésium. En raison de l'entrée météorique continue, un flux régulier d'atomes métalliques est probablement présent dans toute la mésosphère et dans la stratosphère.

Le sodium est historiquement particulièrement intéressant puisqu'il permet la transition de résonance dans le spectre visible, et est, par conséquent observable depuis le sol, à la lumière du ciel diurne ou nocturne. La couche mésosphérique de sodium neutre se trouve à peu près entre 82 et 105 Km et grimpe généralement

jusqu'à 91 Km. Des émissions de jour du doublet de résonance (589.6, 589.0 nm) de raies oranges du sodium  $\text{Na}(^2\text{P}_{1/2,3/2} \rightarrow ^2\text{S})$  sont causées, par excitation, par le biais d'absorption directe de radiation solaire. D'un autre côté, les émissions nocturnes de ces raies orange du sodium sont beaucoup plus faibles. La lumière émise résulte, dans ce cas, d'un cycle d'oxydoréduction impliquant des espèces NaO.

Le sodium mésosphérique a déjà été détecté en mode d'absorption par notre équipe, et il existe fort probablement également des lignes d'émission. Par ailleurs, des recherches très récentes effectuées par notre groupe suggèrent la présence de lignes spectrales, associées avec le Mg II ion, dans le spectre GOMOS.



*La colonne globale de sodium mésosphérique (les unités sont en  $10^9 \text{ cm}^{-2}$ ), mesurée pour la première fois par GOMOS [Fussen et al. Geophysical Research Letters, 31, L24110, doi: 10.1029/2004GL021618, 2004]*

### **Le système d'assimilation BASCOE**

Le Système d'Assimilation Belge d'Observations Chimiques d'Envisat (BASCOE) est un service d'assimilation de données chimiques et de données modélisées, pour l'étude détaillée et la surveillance de la stratosphère de la Terre. Le modèle au cœur de BASCOE est un modèle chimique tridimensionnel de transport (3D-CTM), incluant la chimie complète et des microphysiques détaillées des nuages stratosphériques polaires (PSC).

Il s'inscrit dans un système chimique variable d'assimilation de données en 4D, développé par l'IASB et qui était, en 2002, le premier système chimique opérationnel d'assimilation de données accompagné une description chimique complète.

Le modèle BASCOE, qui a également été développé à l'IASB, décrit les interactions de 57 espèces chimiques dans 200 réactions chimiques (143 réactions en phase gazeuse, 48 réactions photolysées et 9 réactions hétérogènes) et leur transport par des champs de vent externes, procurés par le Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (ECMWF). En outre, le modèle BASCOE est associé en ligne à un modèle détaillé pour les nuages stratosphériques polaires (PSC), développé par Niels Larsen de l'Institut de Météorologie du Danemark (DMI).

Ce modèle décrit la formation et l'évolution des PSC, qui sont un élément clé de l'appauvrissement de la couche d'ozone au printemps et de la formation du trou d'ozone au-dessus de l'Antarctique.

Au cours de l'année 2005, l'appariement en ligne des modèles de CTM et de PSC a été optimisé. La configuration eulérienne du modèle permet une modélisation détaillée de la sédimentation. Des processus polaires hivernaux tels la formation de PSC, la dénitrification, la déshydratation, l'activation de chlore et l'appauvrissement de l'ozone ont été étudiés avec ce modèle et les résultats ont été comparés à un ensemble varié d'observations par satellite.

## **Composition troposphérique, ozone troposphérique et ses gaz précurseurs; interactions avec la biosphère**

Des études de chimie troposphérique menées à l'IASB en 2004-2005 ont principalement porté sur les émissions, la chimie et le rôle des composants de produits chimiques impliqués dans le bilan de l'ozone et des aérosols organiques dans la troposphère. *L'ozone troposphérique est un gaz à effet de serre d'importance considérable, en même temps qu'un polluant majeur causant des insuffisances respiratoires et entraînant une diminution des rendements agricoles. Les précurseurs de l'ozone comprennent les oxydes d'azote (NOx), l'oxyde de carbone (Co) et les composés organiques volatiles (VOC). Leurs émissions sont partiellement naturelles (végétation, microbes dans les sols, etc.), partiellement anthropogènes (utilisation des combustibles fossiles, des industries, des engrais, des feux de végétation, etc.). Une classe importante des composés organiques est représentée par les Composés Organiques Volatiles Biogéniques (BVOC). Sur une échelle globale, des quantités énormes de BVOC sont émises par la végétation terrestre (~1150 Tg C année<sup>-1</sup>). L'oxydation complexe de ces BVOC (principalement initiée par l'OH et O<sub>3</sub>) peut avoir pour conséquence la formation caractéristique d'oxydant et la formation d'aérosols organiques secondaires (SOA) et dès lors avoir un impact sur la qualité de l'air (visibilité, problèmes de santé) et sur le climat. On estime que l'isoprène et les monoterpènes sont responsables d'environ la moitié de ces émissions. L'autre moitié est probablement constituée en grande partie de composés organiques volatiles oxygénés (OVOC). Les BVOCs ont fait l'objet d'importantes recherches à l'ASB-BIRA : des modèles ont été utilisés et développés afin de modéliser leurs émissions et leur chimie, et des expérimentations en laboratoire ont étudié leur détection par la spectrométrie de masse d'ionisation chimique (CIMS) et leur oxydation atmosphérique. Le bilan global et la distribution des principaux précurseurs de l'ozone ont également fait l'objet de plusieurs études de modélisation, notamment dans le cadre d'un effort international visant à déterminer les éventuels changements futurs de la composition de la troposphère. Des observations actuelles par satellite de la composition troposphérique, telle celle fournie par MOPITT et SCIAMACHY sur Envisat, seront complétées à partir de fin-2006 avec des observations d'IASI à bord de MetOP1. Des algorithmes visant à contribuer à l'analyse des données d'IASI ont déjà été préparés.*

## ***Émission des composés organiques par la végétation : comparaison de la modélisation et des mesures***

Un modèle détaillé (MOHYCAN), décrivant les émissions des hydrocarbures biogéniques par la végétation, a été développé à l'IASB au cours des dernières années, en collaboration avec un groupe basé à Boulder (Etats-Unis). Ces émissions dépendent des facteurs comme l'intensité de la lumière et de la température, les espèces végétales, les conditions subies par les feuilles au cours des jours ou semaines précédentes, etc. Des algorithmes dont l'objectif est de tenter de représenter ces impacts ont été proposés. MOHYCAN est conçu comme un outil de vérification de la validité de ces algorithmes. Il est également conçu pour fournir des évaluations améliorées d'émissions pour l'utilisation dans les modèles atmosphériques globaux. Le modèle MOHYCAN a été testé au cours de plusieurs campagnes de mesure dans différents écosystèmes : une forêt tempérée dans le Massachusetts, une forêt tropicale au Brésil, deux sites dans la savane en Afrique du Sud. Dans chacun des cas, l'impact des modèles de prédiction et des paramétrages a été examiné. Dans certains cas, les divergences entre le modèle et les données sont très importantes, indiquant la nécessité d'améliorer les algorithmes et/ou de disposer de bases de données plus complètes pour les facteurs d'émission relatifs aux espèces végétales. Cependant, en général, la variabilité temporelle des émissions est raisonnablement bien capturée par le modèle. Un nouvel inventaire global des émissions biogéniques de VOC a été réalisé, sur base de ce modèle, avec une résolution de 0.5°.

## ***Modélisation de la chimie des composants organiques***

Les monoterpènes (de formule générale  $C_{10}H_{16}$ ) sont une classe d'intérêt particulier parmi les hydrocarbures biogéniques puisque leur dégradation dans l'atmosphère génère des composants qui pourraient condenser sur les aérosols existants, ou même s'agglomérer pour former de nouvelles particules. Les aérosols organiques constituent une part importante du contenu total d'aérosols dans le troposphère. En outre, ils peuvent agir en tant que Noyaux de Condensation de Nuage (CCN) et jouer un rôle dans la formation et pour les propriétés radiatives des nuages.

Cependant, leur formation demeure mal comprise en raison notamment des mécanismes de dégradation extrêmement complexes des monoterpènes. En collaboration avec le groupe du prof. Peeters de la KULeuven, nous avons incorporé, dans un modèle chimique, un mécanisme détaillé d'oxydation chimique d'un monoterpène important. Ce mécanisme est d'une précision sans précédent, et chacune de ses nombreuses étapes (environ 2000) a été évaluée sur des bases objectives. Le modèle a été utilisé pour tester le mécanisme en présence d'une série élaborée de mesures de laboratoire. Une concordance satisfaisante a pu être établie, sauf en ce qui concerne certains sous-produits particuliers (par exemple l'acétone) et dans certaines conditions. Le modèle a permis d'évaluer la pertinence des séquences de réactions halogènes proposées par le groupe de la KULeuven. Le mécanisme explicite a également été réduit à un nouveau mécanisme chimique de taille maniable (30 composés, env. 100 réactions) permettant son usage dans un modèle tridimensionnel de chimie troposphérique. En outre, un modèle a été développé dans le but de fournir des évaluations améliorées pour les pressions de vapeur des nombreux intermédiaires oxygénés trouvés dans l'oxydation des

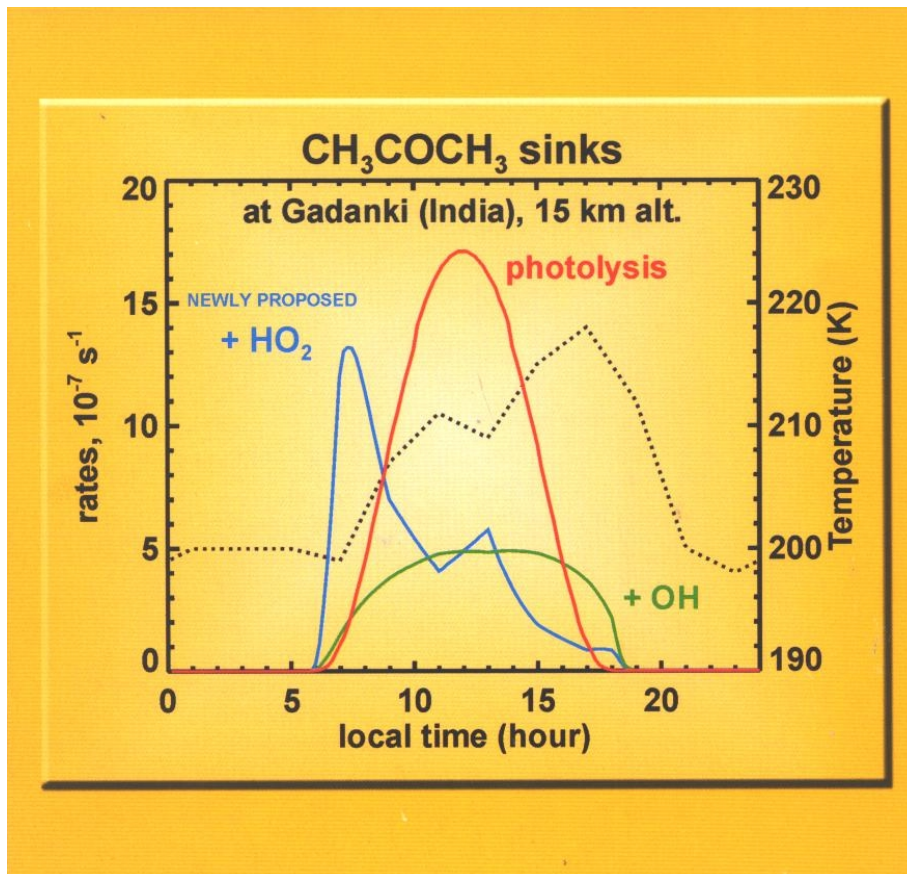
terpènes complexes. La pression de vapeur est un paramètre critique pour l'estimation du nombre d'aérosols susceptibles d'être formés par l'oxydation des monoterpènes dans n'importe quel contexte. Cet outil est nécessaire à cause de la pénurie des mesures effectivement réalisables en conditions atmosphériques réelles. La méthode de prévision a été testée à l'aide de mesures en laboratoire, et utilisée dans un modèle combiné de gaz phase/aérosol afin de calculer les concentrations gazeuses et particulaires des composés organiques. La confrontation des résultats avec des données de laboratoire indique une grande disparité entre le modèle et les données, bien qu'elle s'avère inférieure que dans de précédentes études de modélisation basées sur les mêmes présomptions générales et sur la même méthodologie. Cette dissemblance suggère que des réactions hétérogènes pourraient avoir lieu (formation, par exemple, de polymère et d'oligomère dans la phase de particules) et explique la sous-estimation, par le modèle, des produits de particule-phase. D'autre part, l'impact des séquences de réactions nouvellement découvertes a été évalué, en collaboration avec la KULeuven, au moyen d'un modèle atmosphérique global. Ces séquences concernent le sort de classes importantes de composés organiques, les aldéhydes et les cétones. On constate que leur réaction au radical d'hydroperoxyde (HO<sub>2</sub>) joue un rôle important lorsqu'il s'approche de la tropopause (la frontière entre la troposphère et la stratosphère), où les basses températures empêchent la décomposition des radicaux formés dans la réaction. Ces réactions sont une source jusque-là inconnue d'acides organiques dans la région de la tropopause.

### ***Modélisation inverse des émissions***

Les inventaires d'émission des polluants utilisés dans les modèles atmosphériques sont des évaluations optimales basées sur la connaissance actuelle des processus causant les émissions, tels les activités économiques, les feux de végétation, etc. Ces évaluations comportent d'importantes incertitudes, particulièrement dans le cas des émissions naturelles. Une méthode alternative pour l'estimation de ces émissions repose sur l'utilisation des observations atmosphériques conjointement à l'utilisation d'un modèle atmosphérique. Le principe de la modélisation inverse consiste en la recherche des émissions qui réduisent au minimum la différence globale entre les modèles de calculs et les observations, tout en tenant compte des incertitudes relatives aux observations.

Dans l'approche appelée Bayésienne, une contrainte additionnelle est imposée par la condition selon laquelle les émissions optimisées ne doivent pas être trop différentes de la conjecture a priori présentée par l'inventaire d'émissions "ascendantes". Cette méthode présente de nombreuses difficultés, par exemple liées au comportement non linéaire des gaz réactifs (comme le CO et le NO<sub>2</sub>) ou liées au choix des paramètres d'émission à optimiser et aux erreurs a priori sur ces paramètres. Des polarisations possibles du modèle ou des mesures doivent également être prises en considération.





Calcul du taux de destruction d'acétone par la photodécomposition (rouge), de réaction à l'OH (vert) et de la réaction nouvellement proposée avec le HO<sub>2</sub> (bleu) sur un site en Inde. La température est représentée par la ligne pointillée. La réaction HO<sub>2</sub> était a priori totalement imprévisible (couverture de *J. Phys. Chem.* Mai 2005).

Au cours des dernières années, nous avons développé un outil puissant pour optimiser les émissions des polluants troposphériques, basé sur l'adjoint du modèle troposphérique global IMAGES. L'adjoint fournit le dérivé de la majorité des polarisations du modèle de données pour un ensemble de paramètres de commande. Cette méthode coûteuse au niveau informatique, est cependant parfaitement adaptée à l'optimisation des émissions des gaz réactifs. Nous avons démontré la faisabilité et l'intérêt de cette approche au cours de deux études. Dans la première étude, les émissions annuelles de CO, de NO<sub>x</sub> et des hydrocarbures biogéniques en de vastes régions (l'Europe, Afrique, etc.) ont été simultanément optimisés, tout en tenant compte de leurs interactions chimiques. Ces informations sont significatives, notamment en raison de l'impact important de ces composantes sur la teneur du radical d'hydroxyle (OH), qui est l'agent nettoyant principal de l'atmosphère. Les observations utilisées dans ce cas-ci étaient des observations au sol de CO et de colonnes NO<sub>2</sub> troposphériques dérivées par satellite. Dans la deuxième étude, nous avons utilisé des colonnes de CO de l'instrument MOPITT, afin de fournir des évaluations améliorées de CO et d'émissions biogéniques de VOC. Cependant, dans ce cas-ci, nous avons optimisé les émissions de chaque modèle Pixel et de chaque mois, et pour chacune des trois catégories principales d'émission (anthropogènes, brûlure de biomasse, biogénique). Le nombre de paramètres optimisés est d'environ 30,000. Des corrélations entre les erreurs relatives aux émissions de différents endroits et à différents moments ont été

également présentées. Elles s'avèrent nécessaires afin de produire des solutions significatives au problème d'optimisation.

### ***Étude en laboratoire des réactions ion/molécule en appui à la détection de COV biogéniques oxygénés (COVO) par CIMS.***

Il a été établi que la Spectrométrie de Masse à Réaction par Transfert de Proton (PTR-MS), une technique CIMS basée sur le transfert de proton des ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  aux espèces ayant une affinité protonique plus grande que celle de  $\text{H}_2\text{O}$  (694 kJ mol<sup>-1</sup>), est très utile pour la mesure des concentrations et des flux de COVO émis par la végétation (les forêts aussi bien que les herbes ou les cultures).

PTR-MS, malgré qu'elle soit une technique en ligne très rapide et sensible, et qu'elle continue à gagner de l'importance dans le domaine de la chimie atmosphérique, présente cependant des lacunes au niveau de la sélectivité : les composantes isobares (les isomères en particulier) ne peuvent pas être distinguées. Une solution pour pallier à ce problème est l'utilisation de différents ions sources (par exemple  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{NO}^+$  et  $\text{O}_2^+$ ) qui peuvent résulter en différentes chimies pour les composantes isobares. Par conséquent, dans un premier temps, les constantes de vitesse et les distributions des ions produits ont été déterminées pour les réactions des ions CIMS  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{NO}^+$  et  $\text{O}_2^+$  (aussi bien que  $\text{H}_3\text{O}^+.\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{NO}^+.\text{H}_2\text{O}$ ) avec un certain nombre de COVO biogéniques intéressants : 2-méthyl-3-buten-2-ol, cis-3-hexen-1-ol, acétate de cis-3-hexenyl, 1,8-cineole, 6-méthyl-5-hepten-2-one, camphre et linalool. Les distributions des ions produits des réactions des trois espèces ioniques avec des alcools terpénoïdes nérol et géraniol (qui sont des isomères de linalool) ont été également obtenues, en plus de ces sept COVO.

Les mesures ont été effectuées dans un réacteur à écoulement à ions présélectionnés (Selected Ion Flow Tube - SIFT) à 1.5 mbar et 297 K. Il a été établi que toutes les réactions s'effectuent à une vitesse proche de la vitesse collisionnelle, telle que calculée avec le modèle de Su et Chesnavich, en utilisant la polarisabilité et le moment dipolaire électrique des composants neutres dérivés des calculs de chimie quantique au niveau B3LYP/aug-cc-pVDZ (Groupe de chimie quantique, université de Gand).

Ces mesures seront poursuivies dans un futur proche par l'examen de la faisabilité de l'établissement d'une distinction entre les isomères des alcools biogéniques C<sub>5</sub>, C<sub>6</sub> et C<sub>8</sub> en utilisant simultanément des ions réactifs  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{NO}^+$  et  $\text{O}_2^+$ .

### ***Etudes en laboratoire de l'oxydation des monoterpènes initiées par l'OH (en présence de NO et de O<sub>2</sub>) avec un nouveau réacteur à écoulement rapide turbulent à haute pression, couplé à un spectromètre de masse à ionisation chimique.***

Un réacteur à écoulement rapide à haute pression (High Pressure Turbulent Flow Reactor - HPTFR), associé à un spectromètre de masse à ionisation chimique à basse pression (0.8 torr) (CIMS), a été construit afin de détecter et de quantifier certains des produits d'oxydation de réactions atmosphériques importantes de radicaux de OH avec des monoterpènes. Ses avantages majeurs par rapport aux réacteurs à écoulement rapide traditionnels sont : le brassage turbulent, un meilleur



contrôle des processus de pertes de OH et la possibilité d'étudier des réactions dans l'azote (gaz vecteur) à des pressions élevées (jusqu'à 200 Torr). Des radicaux d'hydroxyle sont fabriqués dans l'injecteur externe par la réaction du NO<sub>2</sub> avec les radicaux H, qui eux-mêmes sont produits dans l'injecteur interne dans une cavité micro-ondes de type Surfatron. Des COV réactifs sont introduits en amont dans l'injecteur externe. En glissant l'injecteur externe le long de l'axe du réacteur principal, la source entière d'OH est glissée sans altérer les conditions de production de l'OH et le temps de réaction d'OH/COV est simultanément modifié. Les gaz réactifs et les produits des réactions OH/COV sont échantillonnés sur l'axe sur l'extrémité en aval du réacteur HPTFR et détectés dans le CIMS, qui est un réacteur à écoulement « flowing afterglow » en métal inoxydable associé à un spectromètre de masse quadripolaire. La détection s'effectue en utilisant les réactions ion/molécule appropriées qui résultent en des ions produits spécifiques qui représentent des « empreintes » des molécules à détecter.

Dans ce nouvel instrument HPTFR/CIMS, la réaction OH/ $\beta$ -pinène a été étudiée à 200 Torr et à température ambiante.

Les rendements du nopinone et de l'acétone, deux principaux produits d'oxydation de l'OH avec du  $\beta$ -pinène, ont été mesurés à plusieurs temps de réaction, à plusieurs concentrations initiales en  $\beta$ -pinène et en OH, et avec ou sans ajout de NO. Par ailleurs, l'utilisation du H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> et du NO<sup>+</sup> en tant que ions sources a permis d'éviter des quantifications incorrectes de produits d'oxydation dues aux complications de la chimie ionique.

### ***Préparation de la contribution à la mission IASI***

IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) fait partie de la charge utile opérationnelle de la série de satellites du Système Polaire METOP d'EUMETSAT, dont le premier satellite sera lancé fin 2006. IASI effectuera des mesures à vision nadir du rayonnement atmosphérique en haute résolution spectrale dans la gamme infrarouge thermique. Consacré à la météorologie opérationnelle, il vise à fournir des profils verticaux de la température, de l'humidité et de l'ozone. Des algorithmes ont été développés, d'une part, dans le cadre d'un projet qui vise à exploiter d'avantage IASI pour des études de chimie troposphérique (1), d'autre part pour contribuer à la récupération des produits de chimie atmosphérique d'IASI (2), et enfin pour l'évaluation de l'effet des aérosols troposphériques sur les extractions des gaz, et pour récolter éventuellement les caractéristiques des aérosols eux-mêmes. Les algorithmes devraient englober les aérosols localisés sur la couche limitrophe et à plus haute altitude dans la troposphère libre, soit au-dessus de la mer, soit au-dessus du sol en tenant compte de l'émissivité de la surface du sol. Ils devraient fournir des valeurs de profondeur d'aérosols (AOD), du moyen infrarouge à l'infrarouge thermique, qui seraient complémentaires aux données extraites dans la gamme visible. Le programme ASIMUT a été développé pour exploiter la synergie existante entre le nombre croissant de différents instruments fonctionnant sous différentes géométries. Les particularités essentielles de ce programme sont :

- La possibilité d'extraire simultanément des colonnes et/ou des profils de constituants atmosphériques de différents spectres, qui sont susceptibles d'avoir été enregistrés par différents instruments ou obtenus sous différentes

géométries. Ceci permet d'effectuer des extractions combinées, par exemple, d'une mesure basée au sol et d'une mesure effectuée par satellite sondant la même masse d'air, ou de spectres enregistrés par différents instruments sur la même plateforme ;

- Les dérivés analytiques des Jacobiens;
- L'utilisation de la Méthode Optimale d'Evaluation (OEM), recourant aux matrices diagonales ou de covariance complète;
- Sa portabilité;
- Sa modularité qui permet l'ajout de nouveaux dispositifs

L'algorithme ASIMUT a fait ses preuves en matière de modélisation des facteurs de transmission et des radiances atmosphériques, ainsi que sa capacité à extraire des profils atmosphériques verticaux de radiances mesurées. Développé initialement pour l'atmosphère terrestre, son applicabilité sera élargie aux atmosphères extraterrestres, par exemple, l'atmosphère de Venus dans le cadre de l'expérience SPICAV au cours de la mission à bord du Venus Express.

### ***Développement du module d'aérosol destiné à être intégré dans ASIMUT***

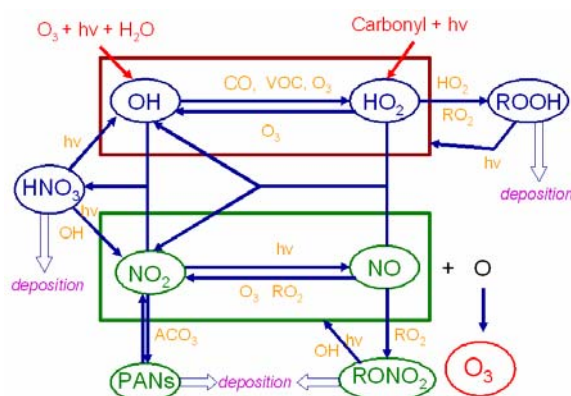
Dans un premier temps, un algorithme non empirique a été développé pour extraire la profondeur optique d'aérosol de faible altitude, au-dessus de l'océan, des spectres à haute résolution de rayonnement de nadir dans l'infrarouge thermique. Il implémente une méthode optimale d'évaluation (OEM) pour retourner des données d'aérosol de couche limitrophe et des températures de surface des rayonnements spectraux d'IASI dans la première bande ( $645-1210 \text{ cm}^{-1}$ ). Afin d'évaluer son potentiel, l'algorithme a été appliqué pour rechercher la profondeur optique d'aérosol de l'infrarouge moyen de la mer salée, au-dessus de l'océan, des rayonnements spectraux observés par le Moniteur Interférométrique pour les Gaz à effet de serre (IMG) à bord de la plateforme d'ADEOS, en décembre 1996. Néanmoins, la récupération est mise en péril par l'effet contaminant des nuages et par des incertitudes quant aux données auxiliaires (comme par exemple la vapeur d'eau et le profil de température). Le développement d'une version élaborée de l'algorithme a été initié afin de couvrir les aérosols troposphériques de plus haute altitude (tels que les aérosols de combustion de la biomasse transportés et la poussière de Sahara) et afin d'intégrer les effets de dispersion au sein de la couche d'aérosol. Présument l'existence d'une fine couche horizontale d'un mélange de deux types d'aérosols situés à une hauteur arbitraire, la première partie de cet algorithme implémente l'interaction radiative entre la surface et trois couches atmosphériques (la couche d'aérosol et deux couches claires supérieure et inférieure). Une méthode de redoublement simple est appliquée pour évaluer la contribution de la couche d'aérosol. Les profondeurs optiques verticales moléculaires seront obtenues à partir du code ASIMUT, ligne par ligne. Les Jacobiens associés à la température de surface et à la densité d'aérosols nécessaires dans le formalisme d'OEM, sont dérivés analytiquement. Cette nouvelle version du module d'aérosol sera appliquée aux spectres d'IASI, une fois que ceux-ci seront disponibles. Les extractions d'aérosol seront axées autour des deux aérosols sel marin et de poussière, transportés depuis le Sahara au-dessus de l'Océan Atlantique.

En préparation de futures missions de chimie atmosphérique, l'IASB a participé à une étude des besoins pour le sondeur infrarouge (IRS) qui fera partie de la

plateforme géostationnaire opérationnelle MTG qui sera normalement disponible vers 2015. L'instrument IRS traitera le spectre infrarouge thermique de 667 to 2500  $\text{cm}^{-1}$  avec une haute résolution spatiale et temporelle. Il procurera des observations sur l'Europe et sur l'Afrique qui pourraient aider les programmes de décomposition chimique et de qualité de l'air. Dans le cadre de cette étude, nous avons évalué les effets des aérosols sur la surveillance du monoxyde de carbone (CO) par l'instrument IRS dans la gamme spectrale de 2000-2200  $\text{cm}^{-1}$ . Il a pu être établi que les charges d'aérosols de haute stratosphère et des nuages de cirrus peuvent causer des distorsions de 10 à 30% sur la colonne de CO totale tandis que les aérosols troposphériques ont un impact réduit sur la récupération de CO dans cette région spectrale.

### Dioxyde d'azote et formaldéhyde troposphériques

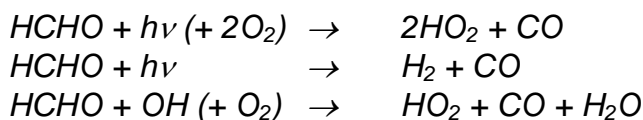
Le formaldéhyde et les oxydes d'azote jouent un rôle central dans la chimie troposphérique et en particulier dans la production d'ozone troposphérique. Les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) sont des catalyseurs clés dans la formation de l'ozone troposphérique. Le cycle photochimique de  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ , et  $\text{O}_3$  résulte d'une production nette d'ozone uniquement en présence d'oxydants autres que l'ozone. Par conséquent, le second indice de production urbaine de l'ozone est la présence des composants organiques volatils (VOC) et de monoxyde de carbone. C'est l'effet synergique de  $\text{NO}_x$ , de CO, et des hydrocarbures volatils qui produit le brouillard photochimique. Le  $\text{NO}_x$  et les composés organiques volatils sont émis en grande quantité en raison d'activités humaines telles que le trafic et l'industrie. Le bilan chimique de l'ozone dans la troposphère est dès lors largement déterminé par les concentrations relatives de  $\text{NO}_x$  et de VOC. Une connaissance améliorée de la distribution globale troposphérique de ces constituants est essentielle pour la surveillance de la qualité de l'air. Le  $\text{NO}_x$  contribue également à la formation de pluies acides et au forçage radiatif. Les sources de  $\text{NO}_x$  sont naturelles (émissions des sols, les feux sauvages, la foudre) et anthropogène (principalement l'incandescence de combustibles fossiles et de biomasse). Par conséquent, le  $\text{NO}_2$  est également un gaz en trace important pour la surveillance de la qualité de l'air.



Production de l'ozone troposphérique (J.F. Müller)

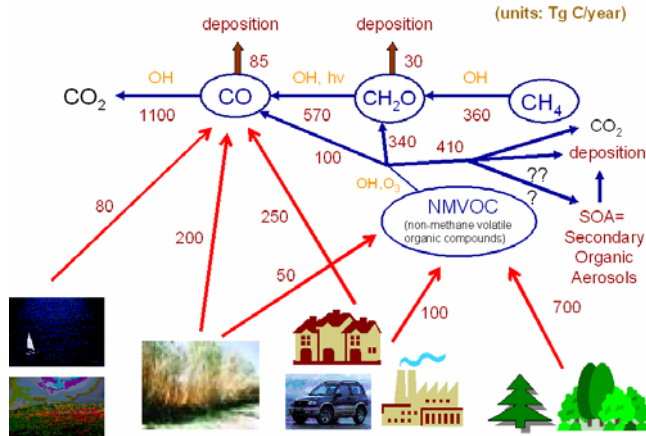
Le formaldéhyde ( $\text{HCHO}$ ) est le composant carbonyl le plus abondant dans l'atmosphère. Il est présent tant dans l'atmosphère non polluée (appelée aussi atmosphère éloignée) que dans les atmosphères urbaines. Dans la troposphère non polluée, l'oxydation du méthane est la source principale du formaldéhyde. Dans les zones continentales, le formaldéhyde est généré par l'oxydation d'hydrocarbures

biogéniques, tels que l'isoprène et les terpènes, et par l'oxydation d'hydrocarbures anthropogéniques. Il est également généré directement par le biais des processus incomplets de combustion, tant par l'inflammation de la biomasse que par les moteurs à combustion interne. Il constitue un indicateur important des émissions d'hydrocarbures dans la troposphère. La durée de vie du formaldéhyde est courte. Son oxydation par des radicaux OH génère le radical hydro peroxyde (HO<sub>2</sub>), qui réagit avec la production de NO<sub>2</sub> par le NO, précurseurs de l'O<sub>3</sub> troposphérique. Le HCHO est également photodissocié pour former le HCO, qui réagit avec l'oxygène pour former le CO. En tant que source majeure de CO, le HCHO joue un rôle important dans le bilan global de CO dans la troposphère naturelle. Dans les deux cas, le HCHO exerce une influence sur la capacité d'oxydation de l'atmosphère.



La quantification de l'abondance globale de formaldéhyde à l'aide d'instruments satellitaires est susceptible de contribuer à une réduction plus efficace des émissions de VOC non méthanés (NMVOC) utilisés dans des modèles de chimie et transport courants (CTM). Elle pourrait également réduire les incertitudes quant à la teneur en CO, qui joue un rôle essentiel dans le contrôle de la teneur d'ozone troposphérique et d'OH, le radical hydroxyle. Enfin, le formaldéhyde est un indicateur intéressant pour la combustion de la biomasse, des champs de riz et des activités industrielles.

### The reactive carbon cycle



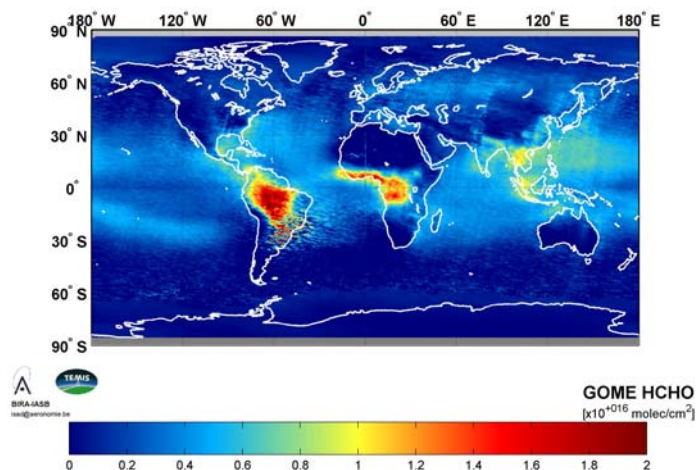
Cycle du carbone réactif (J.F. Müller)

### Observations satellitaires du NO<sub>2</sub> et du HCHO troposphériques

Les spectromètres UV-visible tels que GOME à bord de ERS2 et SCIAMACHY à bord d'ENVISAT ont démontré leur capacité à observer les espèces troposphériques comme le NO<sub>2</sub> et le HCHO. Le principal avantage des satellites réside dans leur capacité à sonder la composition atmosphérique à l'échelle globale. Après le filtrage des nuages, GOME procure, à peu près toutes les semaines, un aperçu complet des distributions du NO<sub>2</sub> et du HCHO dans la troposphère. SCIAMACHY ne fournit pas une couverture aussi complète, mais détecte en revanche des informations plus détaillées grâce à sa résolution spatiale plus précise. La dérivation précise de l'abondance de colonne du NO<sub>2</sub> et du HCHO troposphériques sur base des données

satellites, reste cependant un défi important. En effet, des incertitudes majeures subsistent concernant la sensibilité des mesures à basse altitude, dont l'effet des nuages, ainsi que les incertitudes liées à l'albédo de surface et au profil vertical des gaz en trace mesurés. L'IASB a participé, en collaboration avec le KNMI, au développement de produits scientifiques concernant le NO<sub>2</sub> troposphérique (voir activités liées à la qualité de l'air) et plus particulièrement le formaldéhyde. En ce qui concerne ce dernier, le modèle de chimie-transport IMAGES a été utilisé pour produire des profils d'HCHO utilisés pour le calcul des facteurs de masse d'air. IMAGES décrit la distribution globale de 59 constituants chimiques entre la surface de la Terre et le niveau de pression de 50 hPa (càd. approximativement 22,5 Km d'altitude). Il stimule les concentrations de 40 gaz à temps de vie long (transportés) et de 19 espèces éphémères. IMAGES a recours à des émissions biogéniques récemment mises à jour pour l'isoprène et les terpènes, ainsi que pour le méthanol et d'autres composants organiques non méthanés. Les émissions de la biomasse incandescente sont dérivées de l'inventaire GFEDv2. Ces profils de HCHO sont validés à l'aide de mesures prises depuis des avions. Des séries chronologiques de données de GOME et de calculs du modèle IMAGES sont comparées pour différentes régions où le formaldéhyde issu d'émissions biogéniques et de combustion de biomasse est observé. La comparaison devrait permettre de mieux évaluer les incertitudes dans l'inventaire des émissions. Dans un avenir proche, les colonnes de HCHO dérivées à partir de GOME et SCIAMACHY seront utilisées conjointement avec des colonnes de CO mesurées par MOPITT afin de contraindre les émissions de CO et des NMVOC, dans le cadre d'une modélisation inverse effectuées à l'IASB.

#### GOME HCHO, 01/1997 - 12/2001



Carte globale de HCHO extraite des mesures de GOME pour la période de 1997 à 2001.

### **Espèces atmosphériques et processus influençant la qualité de l'air**

*En dépit des efforts fournis au cours des dernières décennies en vue de réduire les émissions de polluants dans de nombreux pays industrialisés, la qualité de l'air ambiant demeure une question d'intérêt public. A l'échelle globale, la situation dans les pays en développement rapide tels que p.ex. la Chine cause actuellement des inquiétudes et requiert des réglementations améliorées et des moyens de surveillance accrus. L'impact des polluants primaires et secondaires sur la santé de*

*l'Homme sont nombreux, causant, par exemple, des irritations aux yeux, de la toux, des difficultés respiratoires (O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>), des maladies cardiaques (CO et PM<sub>10</sub>) ou encore des maladies pulmonaires (PM<sub>10</sub>). Les polluants émis dans les secteurs urbains ou proches de zones urbaines sont dispersés dans la campagne avoisinante et, selon la durée de vie atmosphérique du polluant ou selon son(ses) produit(s) réactifs, ils se répandent à l'échelle du globe. En effet, le transport à longue portée des polluants dans l'atmosphère est à la base de nombreux problèmes environnementaux qui sont apparus au cours des 50 dernières années. L'effet des polluants ne se limite donc pas au niveau local. Il a également été démontré qu'il existe un lien entre la qualité de l'air et le changement du climat étant donné que l'évolution chimique et la dispersion des polluants sont affectés par les changements de température et les variations du vent. Les températures estivales élevées en Europe pourraient, par exemple, résulter de divers processus comme des concentrations substantiellement plus élevées de polluants atmosphériques tels que l'ozone troposphérique et les aérosols, qui affectent de manière significative la qualité de l'air sur le continent. On prévoit que de telles anomalies climatiques résultant de changements climatiques globaux et affectant la qualité de la vie sur Terre, vont se multiplier dans les 10-20 années à venir. Il est important, afin de mieux aborder les problèmes concernant la qualité de l'air, de développer des techniques d'observation et de modélisation plus efficaces, ainsi que des moyens de soutien avancés en laboratoire.*

### **Observations**

Au cours de la période 2004-2005, l'IASB a contribué à l'étude de la qualité de l'air grâce au développement d'algorithmes d'analyse de données par satellite, centrés sur le dioxyde d'azote troposphérique (NO<sub>2</sub>), le formaldéhyde (HCHO) et le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>). Ces activités sont exercées dans le cadre des programmes ESA DUP et GSE PROMOTE.

### **Résultats des études en laboratoire**

Les activités en laboratoire du groupe de spectrométrie de masse liées aux problèmes de la qualité de l'air ont porté sur l'étude des réactions ion/molécule impliquant des aldéhydes et des cétones importants pour la chimie atmosphérique, en vue de leur détection par la spectrométrie de masse par ionisation chimique (CIMS).

- 1. Etude de la cinétique et du mécanisme de réactions ion/molécule pour la détection, par CIMS, d'aldéhydes et de méthyl vinyl cétone, importants au niveau atmosphérique.*

Des constantes de vitesse et des distributions des ions produits des réactions en phase gazeuse des ions H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>, NO<sup>+</sup> et O<sub>2</sub><sup>+</sup> avec le *méthyl vinyl cétone* (MVK), le méthacroleine (MaCR), le pivaldéhyde, le 2-méthyle-butanale, le glyoxal et le o-, m- et p-tolualdéhyde ont été effectués dans un « Selected Ion Flow Tube (SIFT) » à 1.5 mbar et 297 K. Certaines de ces espèces sont directement émises par des sources anthropogéniques (par exemple, les tolualdéhydes des échappements de véhicules motorisés) ou sont le produit de la photo-oxydation de polluants aromatiques (par exemple, le glyoxal de l'oxydation du toluène, les tolualdéhydes de l'oxydation des xylènes). D'autres sont des produits de l'oxydation de composants organiques

volatils d'origine biogénique (par exemple, le méthyl vinyl cétone et la méthacroléine de l'oxydation de l'isoprène). Les objectifs de cette étude étaient les suivants :

- Mesurer les paramètres fondamentaux requis pour la quantification de ces espèces par CIMS
- Tester si l'usage simultané de différents ions sources ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{NO}^+$  et  $\text{O}_2^+$ ), qui peuvent provoquer des mécanismes de réaction complètement distinctes, est utile pour la détection d'isomères.
- Appliquer une nouvelle méthode pour la détermination de constantes de vitesse d'ions mono-hydratés de  $\text{H}_3\text{O}^+$  et  $\text{NO}^+$  avec des gaz réactifs, relatif aux constantes de vitesse des ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  et  $\text{NO}^+$  avec ces mêmes gaz.

## 2. L'étude expérimentale SIFT, de la dépendance en pression de la réaction d'association de $\text{NO}^+$ /acetone

Cette étude fait partie d'un projet avec l'LPCE (CNRS, Orléans, France) et l'Université de Bordeaux I (France), qui traite la question de la possibilité de l'utilisation simultanée d'ions  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{NO}^+$  et  $\text{O}_2^+$  pour la détection atmosphérique sélective de l'acétone, du propanal et du glyoxal par CIMS. La dépendance en pression de la réaction d'association  $\text{NO}^+$ /acétone a été étudiée, à basse pression, dans l'Hélium dans le SIFT (IASB) ainsi que dans l'azote dans un réacteur à écoulement turbulent (LPCE), à pression moyenne. Une étude (Université de Bordeaux) concernant le calcul théorique de constantes de vitesse collisionnelle de  $\text{NO}^+$ /acétone, recourant à des calculs *ab initio* et à la théorie statistique RRKM, est menée actuellement pour vérifier la compatibilité des données expérimentales obtenues avec les deux instruments.

## Les gaz à effet de serre

*Le  $\text{CO}_2$  est le gaz ayant le plus grand impact sur le forçage radiatif (à peu près 50%) en raison de son augmentation depuis la période préindustrielle. Mais la contribution du méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de l'ozone ( $\text{O}_3$ ), s'élevant respectivement à approximativement 17 et 16%, ainsi que celle de l'oxyde nitrique ( $\text{N}_2\text{O}$ ), d'à peu près 3%, ne peut pas être négligé. Notons que les valeurs effectives du pourcentage de contribution au forçage radiatif sont relativement incertaines, en raison de non linéarités importantes dans le système associé de chimie climatologique. Des gaz à effet de serre indirects doivent aussi être pris en compte. Par exemple, la contribution indirecte d'une augmentation du  $\text{CH}_4$ , par le  $\text{O}_3$  additionnel qu'il produit, est un effet d'égale importance à son effet direct. En ce sens, le monoxyde de carbone ( $\text{CO}$ ) et l'éthane ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) sont des gaz à effet de serre, parce qu'ils contribuent à la production d'ozone troposphérique. En outre, ils jouent un rôle central en chimie troposphérique en raison de leurs réactions avec le radical hydroxyle ( $\text{OH}$ ). Une meilleure estimation des tendances actuelles en concentrations et en émissions (les sources et les réservoirs) des gaz susmentionnés présente un intérêt primordial dans le contexte du protocole de Kyoto et des réglementations concernant la qualité de l'air. La fertilisation et la modification progressives de la biosphère terrestre sont présumées être la cause principale de l'augmentation du  $\text{N}_2\text{O}$ . Le  $\text{CH}_4$  est produit par des processus biosphériques tels les marais, la combustion des biomasses ainsi que les fuites de systèmes de distribution de gaz. Le  $\text{CO}$  est libéré à la surface par une combustion incomplète associée avec des brûlages de fuels fossiles et de biomasses*



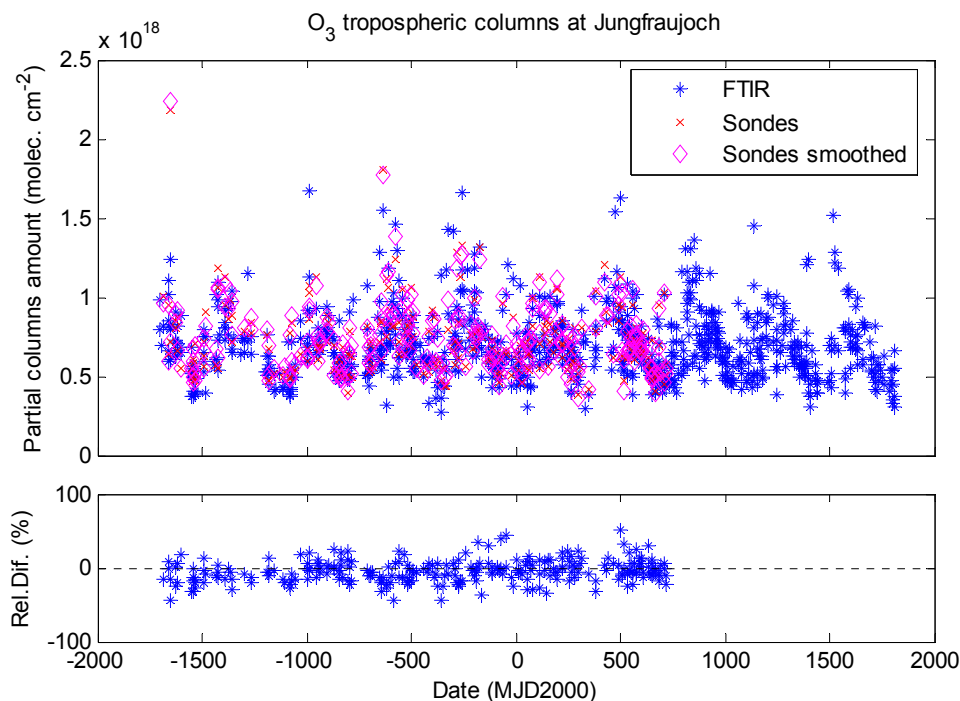
*liquides fossiles (industries, trafic routier etc.); il est également produit par l'oxydation de méthane et d'autres hydrocarbures. Les sources majeures anthropogéniques d'hydrocarbures non-méthanés, parmi lesquels l'éthane (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), sont le combustible fossile, les émissions de gaz naturel et le traitement industriel des déchets et des produits chimiques ; la combustion de biomasse est également une source importante dans les régions non-industrielles. L'augmentation de l'ozone troposphérique résulte de processus photochimiques complexes impliquant des émissions industrielles et biogéniques d'oxydes de nitrate, d'hydrocarbures et de certains autres composants organiques.*

Les observations FTIR sont complémentaires aux observations de surface existantes pour l'étude des gaz à effet de serre : elles procurent des informations relatives à la teneur totale et à la distribution de gaz en traces dans l'atmosphère. Ces informations sont importantes parce que la teneur totale de forçage radiatif causé par les changements de concentration dépend des altitudes auxquelles les changements apparaissent.

### ***Exploitation des observations FTIR des gaz à effet de serre dans le cadre du projet européen conjoint UFTIR***

L'IASB-BIRA a coordonné le projet européen UFTIR. Ce projet, centré sur la détermination, depuis un réseau européen FTIR basé au sol (<http://www.nilu.no>), de séries temporelles de différents gaz présents dans la troposphère supérieure libre, a débuté en février 2003 et s'est terminé en janvier 2006,. Il a impliqué 10 partenaires européens et a associé un nombre important de membres non européens du Groupe de Travail Infrarouge du NDACC. Le projet a porté sur 6 gaz qui sont, directement ou indirectement, des gaz à effet de serre, notamment le CH<sub>4</sub>, l'ozone (O<sub>3</sub>), le N<sub>2</sub>O, le CO, le C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, et le HCFC-22. Les objectifs majeurs du projet étaient (1) d'établir des stratégies communes et optimales d'extraction et de caractérisation des distributions verticales de gaz cibles, (2) de réanalyser les séries chronologiques existantes pour l'évaluation des tendances dans la troposphère (et dans la stratosphère) et (3) d'intégrer les résultats obtenus concernant les abondances des 6 gaz cibles et leur tendance dans des modèles troposphériques – ceci afin d'améliorer les modèles et de vérifier leur consistance avec les émissions connues. Les objectifs du projet ont été atteints. En plus des tâches de coordinations scientifique et de gestion, l'IASB a principalement participé à la conception et à l'implémentation des stratégies d'extraction d'O<sub>3</sub> ainsi qu'à l'analyse des séries temporelles existantes à la station du Jungfraujoch





Graphique supérieur: séries chronologiques de l'ozone troposphérique au-dessus du Jungfraujoch, sur base des observations d'absorption solaire FTIR (étoiles rouges) et des sondages d'ozone à Payerne, réduits à la même résolution verticale que les données FTIR (diamants magenta). Graphique inférieur: différences relatives en pourcentage entre deux ensembles de données. La date est comptée relativement au 1<sup>er</sup> janvier 2000.

Depuis 1995. Il a également été responsable pour la vérification des données extraites de l'ozone par le réseau UFTIR.

Les données UFTIR seront très précieuses pour la validation des données satellitaires, en particulier dans la troposphère, et de nombreux modèles numériques de l'atmosphère, pour délimiter les inventaires d'émissions. Un exemple d'usage de données verticalement résolues pour la validation satellitaire est procuré dans la section X (synergies entre données au sol, données procurées par le biais de ballons et par le biais de satellites). Un autre objectif de UFTIR a été la dérivation de tendances à long terme dans les ressources troposphériques des gaz cibles. Une méthode empirique de rééchantillonnage a été implémentée à cet effet. Les tendances effectivement obtenues et leurs variabilités estimées dérivées de séries chronologiques au cours de la dernière décennie (1995-2005) sont reprises dans le tableau I en pourcentage relatif aux valeurs de l'année 2000. Nous pouvons observer des tendances positives pour le CH<sub>4</sub>, le HCFC-22 et le N<sub>2</sub>O, ce dernier concordant avec la tendance signalée par l'IPCC de (0.25 ± 0.05)% pour du N<sub>2</sub>O de surface. Le C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> semble diminuer depuis la dernière décennie, sauf à Izana. Les tendances ne sont pas significatives pour l'ozone troposphérique et le CO (sauf pour une tendance positive à Izana).

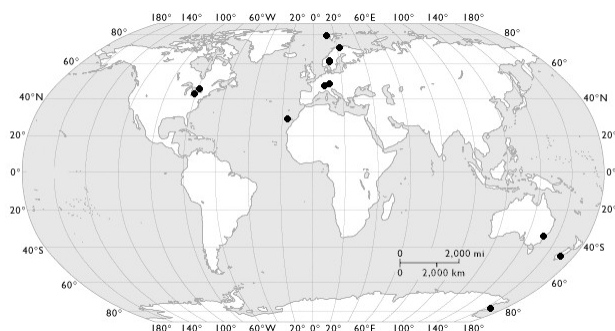
Site	Latitude	Altitude (km)	Annual Trend in Tropospheric Column (as % of 2000 value)					
			CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO	HCFC-22	N <sub>2</sub> O	O <sub>3</sub>
Ny Alesund	79° N	0.02	0.08 (±0.08)	-0.74(±0.54)	-0.62 (±0.72)	2.68(±1.10)	0.35 (±0.22)	0.47 (±1.09)
Kiruna	68° N	0.4	0.11 (±0.06)	-0.75 (±0.38)	-0.21 (±0.37)	4.67 (±0.24)	0.26 (±0.07)	0.22 (±0.58)
Harestua	60° N	0.6	0.40 (±0.05)	-0.85 (±0.36)	-0.13 (±0.28)	3.83 (±0.13)	0.38 (±0.06)	-1.15 (±0.92)
Zugspitze	47° N	2.96	0.17(±0.05)	-1.09 (±0.62)	-0.12 (±0.53)	1.76 (±0.81)	0.18 (±0.06)	-0.14 (±0.76)
Jungfraujoch	47° N	3.58	0.11(±0.04)	-1.34 (±0.39)	-0.25 (±0.29)	2.48 (±0.19)	0.24 (±0.03)	-0.23 (±0.69)
Izana	28° N	2.36	-0.26(±0.09)	0.09 (±0.95)	1.60 (±0.43)	3.62 (±0.24)	0.07 (±0.08)	-0.21 (±1.10)

Tendances annuelles dans les contenus troposphériques des gaz cibles UFTIR dérivés des observations FTIR au cours de la période 1995-2005 dans 6 stations européennes.

Les comparaisons des données d'observation avec les résultats du modèle CTM de l'Université d'Oslo montrent généralement accord satisfaisant, mis à part une divergence pour le  $C_2H_6$ , pour lequel le modèle sous-estime largement les observations. Une cause possible de cette divergence pourrait être une sous-estimation des émissions asiatiques transportées vers l'Europe. Les activités et les collaborations établies à UFTIR seront reconduites et élargies dans le cadre du nouveau projet européen HYMN, (<http://www.knmi.nl/samenw/hymn>), qui débutera en 2006.

### ***Validation de gaz à effet de serre dans le cadre du projet Evergreen***

La contribution de l'IASB au projet européen Evergreen (<http://www.knmi.nl/evergreen>) a consisté en la validation des colonnes totales des quantités de gaz à effet de serre  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $N_2O$  et  $CO_2$  mesurées par l'instrument SCIAMACHY à bord d'Envisat pour l'année 2003, dans le proche infrarouge. A présent, les produits sont livrés par trois algorithmes scientifiques, précisément WFM-DOAS (Univ. Bremen), IMAP-DOAS (Univ. Heidelberg) et IMLM (SRON, Pays-Bas). Différentes versions successives de ces produits ont été validées. Nous avons, à cet effet, utilisé des données indépendantes d'un réseau de 11 instruments FTIR au sol, distribués autour du globe, qui fait partie du NDACC, le Réseau pour la Détection des Changements de la Composition Atmosphérique – voir image 2. Des comparaisons ont été effectuées pour des données individuelles, ainsi que pour des moyennes mensuelles. Les différents points de repères individuels SCIAMACHY ont été comparés à une interpolation du 3<sup>e</sup> ordre polynomial des données au sol dans le temps, afin de maximiser le nombre de coïncidences qui satisfont les critères de coïncidence temporelle et spatiale. Les données de pression ECMWF ont également été utilisées dans le cadre de cet exercice de validation. En outre, une correction du rapport de mélange utilisant des données du modèle TM4 a été apportée aux produits  $CO$  et  $CH_4$  dans le but de réduire les biais artificiels dans les stations de haute altitude. Une attention particulière a été accordée à la question de savoir si les produits reproduisent correctement les variabilités saisonnières et latitudinales des espèces ciblées. Globalement, on peut affirmer que SCIAMACHY procure une valeur ajoutée à la flotte d'instruments satellitaires actuellement déployés, particulièrement pour la chimie troposphérique et la recherche concernant le climat à l'échelle globale. Des améliorations considérables de la qualité des données ont pu être obtenues mais il existe encore des problèmes significatifs à résoudre.



*Distribution des stations contribuant à la base de données corrélatives FTIR utilisée pour la validation des mesures de gaz à effet de serre par l'instrument SCIAMACHY.*

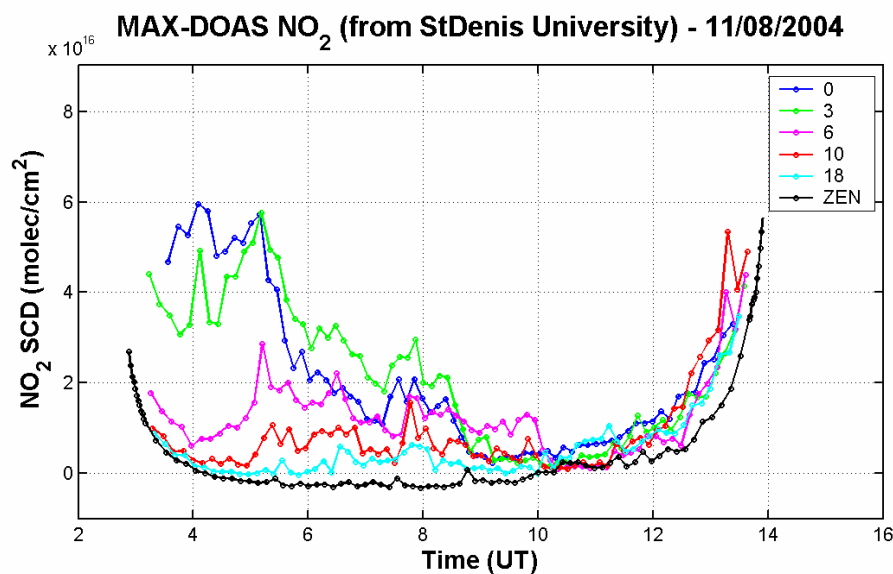
Les activités de validation seront poursuivies dans le cadre de la contribution de l'IASB au groupe de travail SCIAVALIG (<http://www.sciamachy.org/validation/>) en tant que coordinateur produit pour les colonnes totales de CO, CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O, et au groupe de travail pour la validation ACCENT-TROPOSAT 2(AT2)<http://troposat.iup.uniheidelberg.de/index.html>).

## Campagnes d'observation

### Ile de La Réunion

#### Mesures MAXDOAS

Un instrument MAXDOAS a été conçu et mis en oeuvre à l'île de la Réunion (21°S, 55°E) entre août 2004 et juillet 2005. L'instrument est constitué d'un spectromètre à réseau équipé d'un dispositif à couplage de charge refroidi à (-40°C) de la société Princeton Inc. La gamme de longueurs d'ondes couverte dans le plan focal du spectromètre s'étend de 269 à 450 nm, et permet ainsi la détection des bandes d'absorption d'un certain nombre de gaz en traces (NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, BrO, HCHO, SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, IO). Le spectromètre est connecté à un télescope monté à l'intérieur d'une tête optique qui permet de sonder de manière continue les angles d'inclinaison. L'image montre un exemple de mesures de colonne oblique de NO<sub>2</sub> (SCD) effectuées le 11 août 2004. Les valeurs élevées de la colonne oblique observées pour les angles d'inclinaison faibles le matin indiquent la présence de NO<sub>2</sub> de surface en quantités importantes. Dans sa configuration actuelle, l'instrument permet de mesurer des profils de NO<sub>2</sub> (depuis la surface jusque 40 Km d'altitude) des colonnes de BrO séparées dans leur contenu troposphérique et stratosphérique, ainsi que les colonnes troposphériques de HCHO et de SO<sub>2</sub>. Des informations complémentaires concernant le contenu des aérosols pourraient aussi provenir de l'analyse de l'absorption du O<sub>4</sub>.



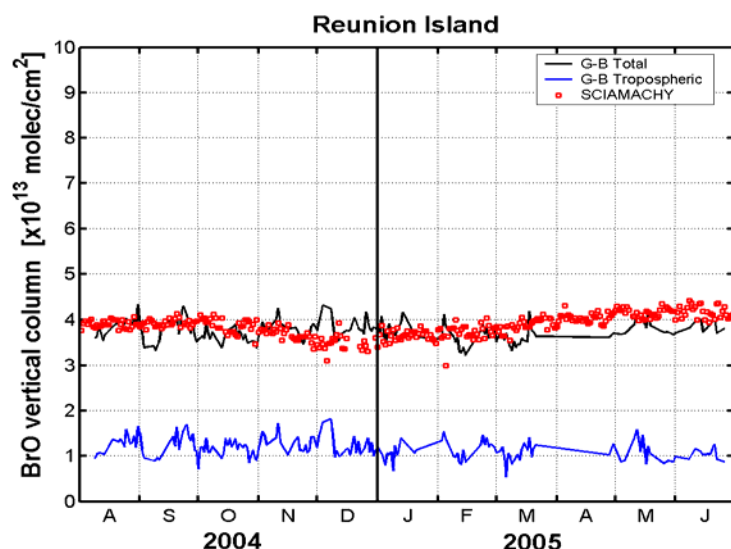
Exemple de mesure de colonne oblique de NO<sub>2</sub> (SCD) effectuée le 11 août 2004, à l'aide de l'instrument MAXDOAS, à l'île de la Réunion (21°S, 55°E).

*Inversion des colonnes verticales de BrO stratosphérique et troposphérique.*

Le BrO stratosphérique est un catalyseur efficace de la destruction de l'ozone et il est responsable de 50% de la perte saisonnière de l'ozone au-dessus de l'Arctique. Par ailleurs il a été démontré que le BrO joue également un rôle important dans la troposphère, où il est responsable de l'appauvrissement de la couche d'ozone dans la couche polaire limite. Par ailleurs, la présence de BrO dans la troposphère libre, avec des colonnes verticales d'à peu près  $1-3 \times 10^{13}$  molec/cm<sup>2</sup>, pourrait avoir des conséquences importantes pour notre compréhension du bilan d'ozone. En effet, des résultats de modélisation récents ont démontré que brome inorganique troposphérique représenterait un puit important pour l'O<sub>3</sub>, ignoré jusqu'à présent dans la plupart des études de chimie troposphérique.

Des mesures au sol (GB) du BrO ont été utilisées pour dériver des informations indépendantes concernant le contenu du BrO dans la stratosphère et dans la troposphère.. La technique d'inversion repose sur une approche à deux couches dans laquelle les colonnes obliques mesurées à différents points d'inclinaison (3°, 6°, 10°, 18° et au zénith), sont ajustées à des simulations de la colonne oblique de BrO. Le modèle de transfert radiatif utilisé à cet effet est le programme UVspec/DISORT, qui a été élargi à l'IASB pour traiter les inhomogénéités dans le champ de concentration de BrO, dues aux changements photochimiques rapides au crépuscule. L'inversion de BrO est en effet compliquée par le fait que les paramètres extraits (colonnes de BrO stratosphérique et troposphérique) varient en fonction de l'angle solaire zénithal (SZA). Pour cette raison, un modèle photochimique de boîte

(PSCBOX) est nécessaire pour reproduire l'effet de la variation rapide de concentration de BrO. La variation diurne des colonnes de BrO stratosphérique est contrainte par les mesures. Nous supposons, en raison de l'absence de mesures de la variation diurne du BrO dans la troposphère, que cette variation peut être approchée par celle de la couche stratosphérique la plus basse. Les colonnes obliques de BrO peuvent être reproduites de manière optimale par les simulations en postulant l'existence d'un profil troposphérique atteignant son maximum à environ 6 Km d'altitude, suggérant une contribution substantielle de la troposphère libre à la colonne verticale de BrO troposphérique. La technique d'extraction a été appliquée aux mesures de BrO pour la période totale d'observation. Les colonnes totales et troposphériques de BrO sont présentées sur le schéma xx, ainsi que les colonnes verticales de BrO de SCIAMACHY.



Colonnes verticales totales et troposphériques de BrO extraites d'observations au sol DOAS à l'île de la Réunion. Les colonnes verticales SCIAMACHY sont des moyennes journalières (10° bande latitudinale autour de la station).

Par ailleurs le profil vertical de BrO stratosphérique a été déterminé par application d'une technique d'inversion basée sur l'estimation optimale des observations au zénith. A partir d'un modèle photochimique fournissant le rapport BrO/Bry, il a également été possible de dériver un profil stratosphérique de Bry.

### Campagne FTIR

#### Développement de BARCOS

L'IASB a acquis un spectromètre à transformée de Fourier Bruker IFS120M (FTS) à la fin de 2000, avec un double objectif: (1) être capable de procéder à des mesures spectroscopiques haute résolution en laboratoire, complémentaires et en collaboration avec l'ULB, et (2), de procéder à des mesures atmosphériques de campagne. Pour ce dernier objectif, nous avons développé un système d'accès et d'opération à distance sur les instruments, appelé BARCOS (Bruker Automatic and Remote Control System). Le système a été conçu dans le but d'effectuer des mesures atmosphériques d'absorption, en utilisant le Soleil ou toute autre source de lumière dans le ciel (la Lune ou éventuellement les étoiles), sans assistance humaine sur place. BARCOS contient un spectromètre avec un système d'application (OPUS), un pointeur solaire a été développé en collaboration avec l'Université de Denver, ainsi qu'une petite station météorologique pour contrôler les conditions météorologiques pour l'utilisation des instruments. Un enregistreur de données conserve les données météorologiques et les autres de fonctionnement. Un système de remplissage automatique de nitrogène liquide a été ajouté pour le refroidissement des détecteurs infrarouges. BARCOS a également la possibilité d'effectuer des mesures d'étalonnage de cellules contrôlées automatiquement ou à distance. Le contrôle S/W est écrit en Labview. BARCOS est un système flexible, permettant des interventions manuelles à tout moment. La seule condition à l'utilisation de BARCOS est l'accès à une connexion Internet sur le lieu d'opération. BARCOS a été utilisé avec succès durant deux campagnes de mesures à l'île de la Réunion.

#### Campagnes de mesure FTIR

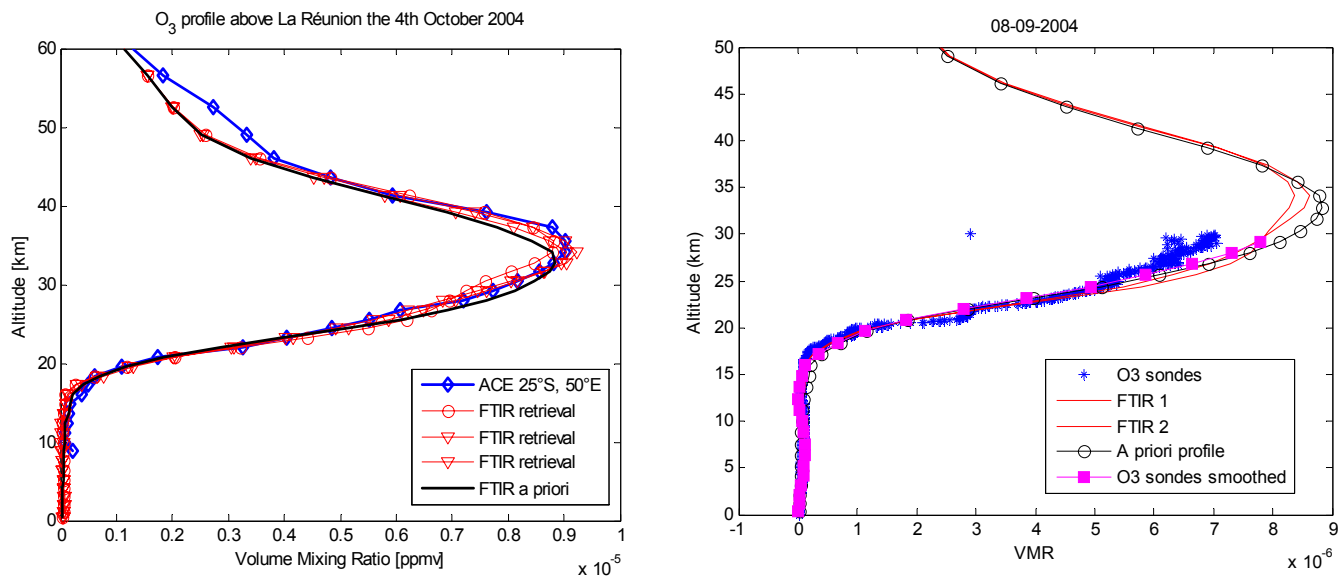
L'IASB a tenu sa seconde campagne de mesures FTIR, d'août à octobre 2004, à l'île de La Réunion (21°S, 55°E), en collaboration avec l'ULB et avec le Laboratoire de

l'Atmosphère et des Cyclones de l'Université de la Réunion. Les campagnes avaient deux objectifs majeurs : (1) implémenter et vérifier BARCOS et (2) préparer une surveillance à long terme à l'île de La Réunion, dans le cadre du NDACC (<http://www.ndacc.org>). L'île de La Réunion est d'ores et déjà un site complémentaire du NDACC avec sondages d'O<sub>3</sub>, et des mesures SAOZ et LIDAR ; des observations FTIR complémentaires sont fortement encouragées par le NDACC, afin de contribuer à combler le manque de mesures dans les Tropiques. Un objectif complémentaire particulier de cette seconde campagne était de contribuer à la validation de l'expérience ACE, lancée en 2003 sur le satellite canadien Scisat (<http://www.ace.uwaterloo.ca/>), pour laquelle l'IASB s'est fortement impliqué.



La campagne a été effectuée, au moyen de BARCOS, à Saint-Denis, dans une phase de développement quasi-aboutie. Elle a procuré des données pendant environ 63 jours. Des mesures de cellules de HBr ont été régulièrement effectuées pour vérifier l'alignement de l'instrument – tel que prévu par le protocole de qualité de données du NDACC Infrared Working Group. Des extractions de profils préliminaires ont été effectuées pour quelques espèces, pour les deux campagnes, y compris pour le HCl, le HF, le HNO<sub>3</sub>, le O<sub>3</sub>, et le CO. Un exemple d'extraction de profils d'ozone avec des données corrélatives d'une sonde d'ozone locale et de l'expérience satellite ACE-FTS est donné dans le schéma suivant.





Comparaisons entre les profils FTIR d'O<sub>3</sub> au-dessus de l'île de la Réunion, un profil correspondant mesuré par ACE-FTS le 4 octobre 2004 (côté gauche) et un profil de sonde d'O<sub>3</sub>, le 8 septembre 2004 (côté droit). Les profils ACE et sonde ont été dégradés à la résolution verticale de la mesure FTIR.

### Perspectives

Les campagnes d'analyse de données FTIR (extraction de profils et interprétations géophysiques) seront poursuivies. Les données seront utilisées dans le cadre de du projet SCOUT-O3 et pour la validation satellitaire. Après la campagne de 2004, il a été décidé de réaménager le pointeur solaire pour les mesures FTIR, en améliorant, en autres, l'alignement de l'instrument et sa stabilité. Ce travail a été achevé en 2005. Les actualisations de l'instrument MAXDOAS ont aussi été implémentées et la nouvelle version de l'instrument sera réinstallée à la fin de 2006.

La perspective pour 2007 est d'avoir au moins une campagne FTIR de plus avec un système BARCOS complètement opérationnel, et de réinstaller l'instrument MAXDOAS, sur le site de Saint Denis. A plus long terme, les instruments FTIR et MAXDOAS seront installés de manière permanente en haute altitude (2200 m asl) sur le site Maido à l'île de La Réunion, dans l'infrastructure NDACC qui sera normalement disponible en 2010.

### Campagne Dandelion

Au cours de la période 2004-2005, l'IASB a participé à la campagne DANDELIONS (Dutch Aerosol and Nitrogen Dioxide Experiments for validation of OMI and SCIAMACHY), sur le Cabauw Experimental Site for Atmospheric Research (CESAR, 51.971 N, 4.927 E, The Netherlands), avec un instrument MAX-DOAS utilisé du 3 mai au 19 juillet. La contribution de l'IASB à la campagne concernait la validation de des instrument OMI (Ozone Monitoring Instrument) et SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric CHartography).

### Description de l'instrument et des données extraites

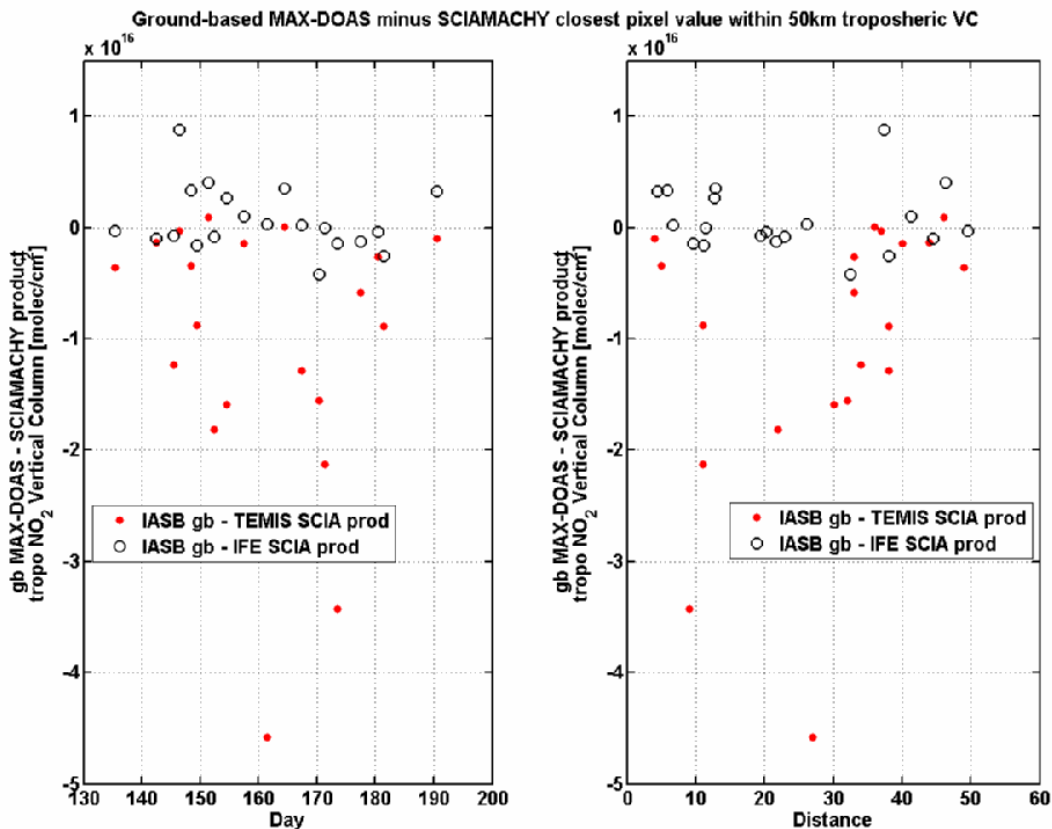
L'instrument MAX-DOAS de l'IASB est constitué des deux parties principales: (1) un spectromètre réseau monté à l'intérieur d'une boîte régulée en température, et (2) un



télescope scanneur connecté au spectromètre par une fibre optique, récoltant la lumière du Soleil diffusée à différents angles d'élévation dans une direction azimutale fixe (à peu près Sud). La gamme de longueurs d'ondes couverte par le spectromètre était de 315 à 455 nm avec une résolution d'à peu près 0.55 nm (FWHM). Le détecteur utilisé était un CCD (1340x100) de Roper Scientific, refroidi à -38°C. Les spectres enregistrés ont été analysés pour le NO<sub>2</sub> par spectroscopie d'absorption différentielle (DOAS) dans une fenêtre de longueurs d'ondes s'étendant de 425 à 450 nm.

### *Résultats*

Les colonnes de NO<sub>2</sub> troposphérique obtenues ont été comparées à d'autres instruments MAX-DOAS présents lors de la campagne ainsi qu'à des mesures *in situ*, démontrant un excellent accord. Ces données ont été ensuite comparées aux colonnes verticales troposphériques déterminées par le satellite OMI. L'analyse s'est focalisée sur l'impact de différents paramètres susceptibles d'affecter les comparaisons, en particulier les critères de co-localisation, d'échantillonnage spatial (en relation avec la taille des pixels au sol tels qu'observés par les satellites), ainsi que l'impact des nuages et de leur correction dans les algorithmes satellitaires. La comparaison avec les données OMI a montré un impact crucial de la sélection des nuages. Des résultats MAX-DOAS au sol ont été utilisés pour mettre en évidence des incohérences entre les produits TEMIS-SCIAMACHY (IASB/KNMI) et les produits scientifiques SCIAMACHY d'IFE (Université de Brème), comme le démontre le schéma xx. Les deux produits diffèrent essentiellement au niveau des schémas de correction d'aérosols et de nuages appliqués lors de la conversion en colonnes verticales troposphériques ; les différences en AMF entre les deux produits peuvent s'élever jusqu'à 50%.



Différences entre la colonne verticale au sol MAX-DOAS et respectivement les colonnes troposphériques de NO<sub>2</sub> déterminées à partir de SCIAMACHY dans le cadre du projet TEMIS (points rouges) et par IFE Brème (cercles noirs). Le graphique de gauche montre une série de données temporelles alors que le graphique de droite se concentre sur la distance à Cabauw. Les données satellitaires ont été sélectionnées pour des conditions sans nuages (fraction nuageuse < 33%).

#### Conclusion et travaux futurs

L'IASB continuera à travailler sur les résultats de la campagne DANDELIONS, en mettant à jour la comparaison avec la nouvelle version du produit OMI NO<sub>2</sub> et en se concentrant sur le problème de la taille des pixels. Pour SCIAMACHY, les résultats DLR seront ajoutés à cet exercice de comparaisons, et des études de sensibilité des produits troposphériques NO<sub>2</sub> aux nouvelles versions de l'algorithme d'extraction des nuages (algorithme FRESCO) seront poursuivies. La participation de l'IASB à une seconde campagne DANDELIONS est planifiée pour septembre 2006.

### Synergies entre les différentes méthodes d'observation : réseau au sol, ballons et satellites.

La teneur atmosphérique, de différents constituants et paramètres est mesurée à l'aide de techniques obtenues depuis différentes plateformes. Dans le cadre du réseau mondial : Network for Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC), des observations régulières au sol de la colonne verticale et la distribution de espèces clés sont effectuées depuis une série de stations, d'un pôle à l'autre, par des spectromètres d'absorption optique différentielle (DOAS) ultraviolet-visible et par des spectromètres infrarouges à transformée de Fourier (FTIR) (y compris ceux mis

en oeuvre par L'IASB). Ce réseau global procure, également d'un pôle à l'autre, des mesures régulières de la colonne d'ozone effectuées par des spectrophotomètres UV de type Dobson et Brewer, ainsi que des mesures du profil vertical d'ozone effectuées par des radiomètres à ondes millimétriques (de 25 km jusqu'à la basse mésosphère), par lidar (de 8 km jusqu'à 50 km), et par ozonosondes électrochimiques emportées par ballon (du sol jusqu'à 30 Km). Les mêmes substances sont surveillées depuis l'espace par une série d'instruments en orbite, qui reposent souvent sur des principes spectroscopiques similaires, mais caractérisés par une géométrie de vision et une stratégie d'échantillonnage distinctes. Sporadiquement, des instruments semblables sont également embarqués à bord de ballons stratosphériques, donnant accès aux régions de la troposphère supérieure et de la stratosphère inférieure (UT/LS), régions difficilement accessibles aux satellites et spectromètres au sol. Presque toutes les techniques d'observation sont de télédétection. Elles présentent, de manière inhérente, seulement une perception à basse résolution de la distribution tridimensionnelle des espèces atmosphériques, dans une gamme d'altitude particulière, étant donné que toutes les propriétés dépendent de divers paramètres tels la géométrie de visée, la gamme spectrale, la stratégie d'échantillonnage, l'inclinaison orbitale, ainsi que des paramètres atmosphériques (température, présence de nuages, etc.). C'est pour cette raison que les réseaux au sol, les ballons et les satellites offrent une vue différente de l'atmosphère. Ces distinctions peuvent rendre difficile l'interprétation intégrée des données acquises, mais peuvent également s'avérer complémentaires dans certains cas, ce qui lorsqu'elles sont correctement caractérisées et exploitées, peut étendre le domaine d'utilisation des observations. Des ballons et des satellites ont été mis en oeuvre durant la période de compte rendu, en vue de rencontrer les objectifs de la stratégie GEOSS (Global Earth Observation System of Systems) et son thème atmosphérique IGACO, à savoir l'usage synergétique de données atmosphériques acquises par le NDACC, de IGOS (Integrated Global Observing System), dans le cadre des investigations suivantes :

- Caractérisation complète du contenu de l'information géophysique effectivement récupérable d'une mesure par télédétection (à l'inverse de l'*a priori* climatologique et des contraintes associées à l'algorithme d'inversion lui-même), y compris sa résolution, son domaine de sensibilité, et le lissage tridimensionnel du champ atmosphérique structuré et variable.
- Maturation des algorithmes d'extraction L2 : diagnostique, consistance géophysique, évaluation des erreurs spécifiques, proposition et vérification de solutions.
- Validation géophysique de données satellitaires et des réseaux, combinant des études de contenu d'information et des comparaisons avec des observations indépendantes. De telles études de validation incluent le développement d'une méthode de comparaison appropriée tenant compte de la nature de télédétection des mesures et la nature géophysique des teneurs mesurées, la vérification du contenu effectif de l'information procuré par la mesure, la critique des erreurs théoriques, et la caractérisation de l'exploitabilité aéronomique.
- D'autres applications synergétiques : le développement d'une multi-plateforme climatologique pour le dioxyde d'azote ; de nouvelles méthodes pour l'ingestion de données pas des outils d'assimilation.

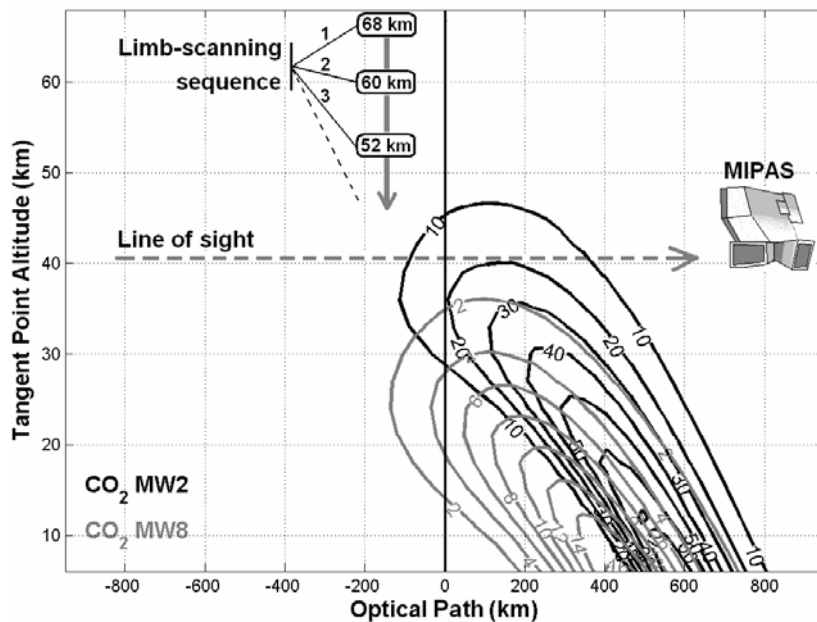
- Le développement de méthodes et de protocoles internationaux pour l'usage intégré de données télédéteectées dans le cadre de GEOSS/IGACO.

Pour illustrer différents aspects des activités entreprises, nous ferons principalement état de la caractérisation des mesures satellites des émissions du limbe infrarouge, de la maturation des algorithmes opérationnels de ERS-2 GOME pour l'extraction de colonnes de  $O_3$  et  $NO_2$ , et de la validation au sol de données de profile Envisat MIPAS de  $HNO_3$ ,  $NO_2$  et  $N_2O$ .

### ***Contenu d'information des mesures des émissions infrarouges du limbe***

Les spectres d'émission infrarouge mesurés au limbe atmosphérique depuis un satellite (tels MIPAS/Envisat, TES/Aura, CLAES/UARS, ISAMS/UARS, LIMS/Nimbus-7) contiennent de l'information à haute résolution sur la température atmosphérique et des quantités en espèces en trace. En dépit de nombreux avantages de la géométrie de sondage du limbe, les longs chemins optiques – au sein desquels les phénomènes d'émission et d'extinction se concurrencent pour produire la radiance mesurée – interfèrent avec les gradients atmosphériques. Les interférences avec les gradients atmosphériques dépendent du choix de la stratégie de visée du limbe, de la méthode d'extraction et de la progression du satellite le long de l'orbite. Cependant, les profils unidimensionnels de constituants atmosphériques sont souvent récupérés de mesures de radiance de satellite, présumant une atmosphère sphérique faite de couches homogènes et concentriques. Les noyaux de lissage associés à l'inversion permettent la caractérisation unidimensionnelle de l'information récupérée en fonction de l'altitude ou de la pression, mais les inhomogénéités atmosphériques, non prises en compte, peuvent avoir de graves conséquences. C'est pour cette raison que nous avons développé un modèle de transfert radiatif capable de calculer les spectres d'émission au limbe dans une atmosphère bidimensionnelle. Les bases du transfert radiatif ressemblent à celles du traitement opérationnel de l'interféromètre MIPAS. Nous avons effectué un diagnostic de l'information disponible de séquences inverses de balayage du limbe terrestre, acquise par MIPAS.

L'image X montre la distribution de l'information sondée le long de la ligne de visée, en fonction de l'altitude et cela pour le  $CO_2$ , c'est-à-dire l'information récupérable concernant la température atmosphérique, enregistrée au cours d'une séquence. Grâce à ce modèle, nous avons déterminé la distribution angulaire de l'information récupérable par le biais d'une analyse générale unidimensionnelle ; la consistance spatiale entre les différents constituants ( $O_3$ ,  $H_2O$ ,  $NO_2$ ,  $HNO_3$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$  et température) mesurée au sein de la même séquence de balayage du limbe terrestre ; l'erreur de lissage angulaire lorsque MIPAS capture des gradients atmosphériques ; et l'impact sur des applications basées sur des comparaisons, telles la validation satellitaire et l'assimilation chimique des données observationnelles.



Gauche: Contribution l'information sondée le long de la ligne de visée, en fonction de l'altitude et cela pour le  $\text{CO}_2$  (en  $\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{km}$ ) au cours d'une séquence de balayage du limbe terrestre MIPAS, calculées en microfenêtres spectrales MW2 et MW8, et affichées en fonction de l'altitude du chemin optique. Des études de contenu d'information ont été menées également pour les algorithmes de profilage au sol de  $\text{NO}_2$  et  $\text{BrO}$  développés à l'IASB ainsi que pour les enregistrements de données de profils d'ozone ERS-2 GOME, soit par l'algorithme d'estimation optimale OPERA développé au KNMI (principe similaire à celui développé pour l'établissement de profils au sol FTIR et DOAS), soit par le réseau neural NNORSY développé à ZSW-Stuttgart.

### **Maturation des algorithmes d'extraction opérationnels GOME**

Le Global Ozone Monitoring Experiment (GOME) à bord de ERS-2 (lancé en avril 1995) est le prédécesseur couronné de succès d'une série de capteurs nouvelle génération (SCIAMACHY, OMI, GOME-2) visant à mesurer de manière globale les espèces clés liées à la problématique de l'ozone stratopshérique et à celle de la qualité de l'air. Fournissant une image globale de l'ozone atmosphérique, GOME est également le premier instrument en orbite ayant la capacité de mesurer la colonne verticale de  $\text{NO}_2$ . Depuis août 1996, les données d' $\text{O}_3$  et  $\text{NO}_2$  de GOME sont traitées régulièrement au German Processing and Archiving Facility (D-PAF) établi au Centre Aérospatial Allemand (DLR) pour le compte de l'ESA avec le Processeur de Données GOME (GDP). Depuis la publication, en été 1995, de sa première version, GDP a été mis à jour à maintes reprises et la qualité des données d'ozone et de  $\text{NO}_2$  a été améliorée de manière significative. L'IASB a, depuis le début, continuellement été impliqué dans la maturation. GOME produit depuis dix ans les distributions de l'ozone total. La longueur de cet enregistrement de données présente un intérêt pour la surveillance à long terme de l'ozone, pour laquelle un pré requis essentiel est la possibilité de mesurer globalement et sur une période de 10 ans, les changements de 1-%. Un tel degré de précision n'avait pas encore été atteint. L'ESA a publié en juin 2002 un appel d'offre afin de développer des algorithmes à la précision requise capables de produire des données de qualité. L'algorithme GDOAS (développé conjointement par l'IASB et le Smithsonian Astrophysical Observatory, SAO) a été sélectionné pour l'implémentation opérationnelle. Depuis novembre 2004, après des vérifications vigilantes de l'acquisition d'une stabilité à long terme au niveau 1-%, le

GDP 4.0 remplace maintenant la version 3.0, et le retraitement de l'enregistrement de données GOME, y compris les données historiques, est maintenant accessible au public via le Help and Order Desk ERS.

### ***Validation géophysique de données satellites***

En 2004-2005, l'IASB a mené la validation géophysique de produits de données atmosphériques opérationnels et de processeurs de données associés pour différents satellites ESA et NASA:

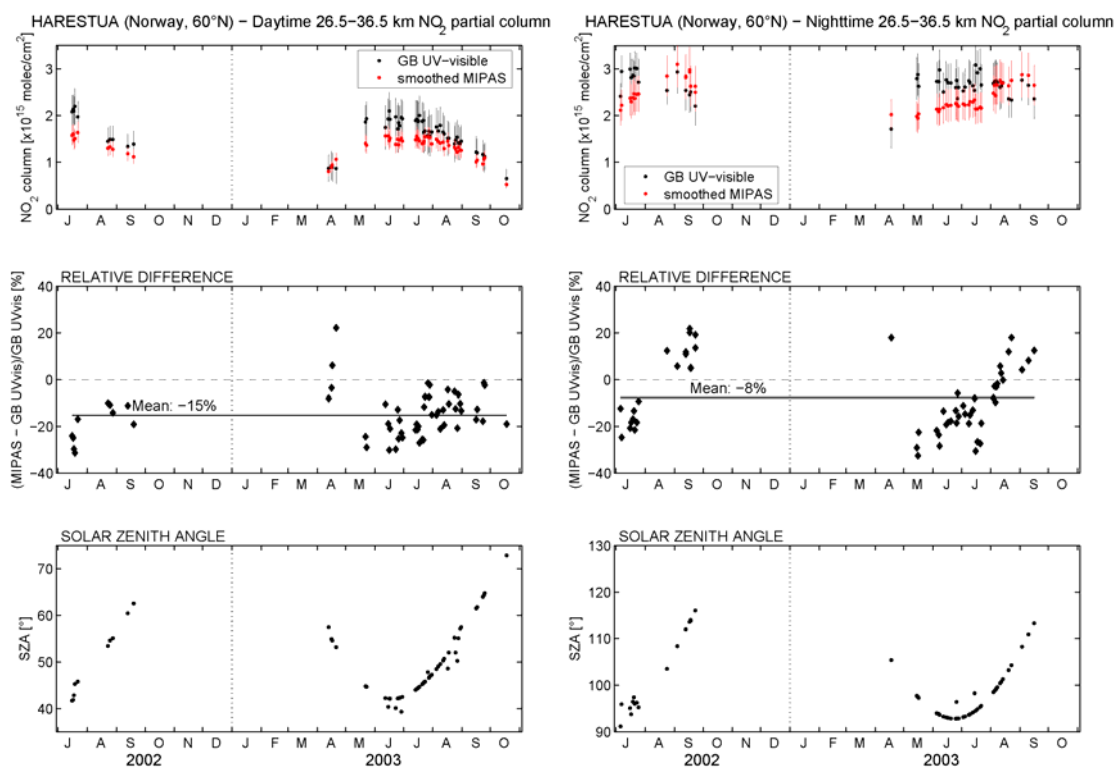
- Processeur de données ERS-2 GOME (GDP) version 4.0 pour des colonnes GOME de O<sub>3</sub> et de NO<sub>2</sub>;
- Des colonnes d'ozone Earth Probe TOMS version 8;
- Des processeurs OPERA et NNORSY pour l'établissement de profils d'ozone GOME;
- Un Instrument Processing Facility (IPF) hors ligne version 5.04 pour les colonnes d'O<sub>3</sub> et de NO<sub>2</sub> Envisat SCIAMACHY;
- La version 4.61 hors ligne de IPF pour les profils de température, le O<sub>3</sub>, le NO<sub>2</sub>, le HNO<sub>3</sub>, le N<sub>2</sub>O et le CH<sub>4</sub> de Envisat MIPAS.

La validation MIPAS a des recherches spécifiques liées aux produits de profils de données hors ligne HNO<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O et NO<sub>2</sub> de ESA (v4.61). Pour le HNO<sub>3</sub> et le N<sub>2</sub>O, des données indépendantes ont été utilisées depuis des instruments au sol FTIR sur 5 sites NDACC dans les deux hémisphères, à savoir, Jungfraujoch (46.5°N) et Kiruna (68°N) l'hémisphère Nord, et Wollongong (34°S), Lauder (45°S) et Arrival Heights (78°S) pour l'hémisphère Sud. Ces données au sol ont été comparées avec les profils MIPAS acquis durant l'année 2003, colloqués 1000 Km autour des stations, dans la basse et la moyenne stratosphère. Pour contourner le problème de collocation spatiale, des comparaisons ont également été effectuées entre les mêmes données au sol FTIR et les profils correspondants issus du système d'assimilation de données BASCOE stratosphérique 4D-VAR (voir section X). C'est pour cette raison que l'étude de validation a nécessité une investigation quant à la pertinence de l'utilisation des profils BASCOE comme variables de remplacement pour les données MIPAS. Il a également été démontré qu'il existe une correspondance entre les colonnes partielles de N<sub>2</sub>O de MIPAS et de FTIR : les polarisations sont inférieures à 5% pour toutes les stations et les déviations standards sont inférieures à 7% pour les trois stations d'altitude moyenne, et en dessous de 10% pour celles en haute altitude. Les comparaisons avec les colonnes partielles BASCOE révèlent des polarisations en dessous de 3% et déviations standard en dessous de 15% pour toutes les stations, sauf Arrival Heights (polarisations de 6%, déviation standard de 21%, après avoir effectué des corrections pour tenir compte d'une polarisation existant dû à l'utilisation de différents paramètres spectroscopiques. Les résultats pour ces espèces, ont une variabilité spatiale plus large, ont mis en évidence la nécessité de définir les critères de collocation appropriés et de tenir compte de l'éparpillement des masses d'air observées. BASCOE est apparu comme ayant plus de défauts dans la production de variables de remplacement de profils de HNO<sub>3</sub> MIPAS comparés au N<sub>2</sub>O, mais la déviation standard obtenue de moins de 10% entre BASCOE et FTIR est raisonnable. Des efforts complémentaires de validation utilisant des données FTIR

au sol de NDACC ont été signalés dans la section concernant les gaz à effet de serre.

Les données de profils  $\text{NO}_2$  MIPAS ont été validés par la comparaison avec des séries chronologiques de profils récupérés à Harustua, et des séries chronologiques de colonnes de données de  $\text{NO}_2$  procurées par un réseau pôle à pôle de 20 spectromètres NDACC DOAS. Un algorithme d'extraction fiable basé sur la méthode d'estimation optimale (OEM) a été développé à l'IASB afin de fournir des distributions verticales de  $\text{NO}_2$  dans la stratosphère depuis des observations au sol (GB) UV-visible au zénith. L'algorithme a bénéficié du travail pionnier de Preston et al. (J. Geophys. Res., 102 (D15), 19089-19097, 1997), et de l'expérience acquise à l'IASB en développement de techniques d'inversion similaires pour les observations de la région infrarouge de la GB. Le modèle suivant consiste en un modèle photochimique PSCBOX de boîte empilé de L'IASB-BIRA, initialisé avec des champs de 3D-CTM SLIMCAT et couplé au paquet de transfert (RT) radiatif UVspec/DISORT. Un modèle photochimique est exigé pour reproduire l'effet de la variation journalière de la concentration  $\text{NO}_2$  sur les mesures de la colonne oblique (SCD) et il fournit également les profils  $\text{NO}_2$  *a priori* pour l'inversion. Le modèle de transfert radiatif est utilisé pour calculer des valeurs de SCD des concentrations  $\text{NO}_2$  anticipées par le modèle photochimique. De la comparaison de la moyenne des grains de GB du UV-visible et du MIPAS, il résulte que 26.5-36.5 kilomètres est la gamme d'altitude appropriée pour la comparaison de profil.

Cette image montre qu'une basse polarisation dans les observations de MIPAS apparaît en conditions de jour (-15%) et de nuit (-8%).





*Comparaison entre la GB UV-visible et les colonnes partielles de NO<sub>2</sub> MIPAS dans la gamme d'altitude de 26.5-36.5 kilomètres pour la journée (gauche) et en condition de nuit (droite).*

Ces résultats montrent que la technique de profilage offre de nouvelles perspectives dans l'utilisation des réseaux GB UV-visibles tels que le NDACC pour la validation des expériences de satellite et de ballon et des données de modélisation. L'algorithme de récupération de L'IASB-BIRA est en cours d'adaptation pour la récupération des profils de BrO et, dans un proche avenir, il sera employé pour la validation des produits du niveau 2 du SCIAMACHY (espèces trace : NO<sub>2</sub> et BrO) et des instruments GOMOS (espèces trace : NO<sub>2</sub>) à bord du satellite ENVISAT. Il sera également étendu à l'interprétation des observations en géométrie MAX (y compris au zénith) effectuée par l'IASB à l'observatoire de Haute Provence (44°N, France) et à l'île de La Réunion (22°S, France) afin d'extraire de informations sur la distribution verticale de BrO, de NO<sub>2</sub>, et de HCHO dans la stratosphère et dans la troposphère.

## **Rayonnement solaire et UV spectrale sur Terre**

### ***Les stations de surveillance UV-B au sol***

Depuis la fin des années 80, l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) a développé une station automatique pour mesurer, sans interruption, l'ultraviolet (UV-B et UV-A) et le rayonnement solaire visible (280-600 nm), sur la surface de la Terre. La station de surveillance de l'IASB consiste en une combinaison d'instruments comprenant un spectro-radiomètre, des filtre-radiomètres et des radiomètres à bande large fournissant des valeurs absolues des composants totaux, directes et diffus du rayonnement solaire. L'ensemble des données de l'IASB est complété par des mesures auxiliaires, notamment la colonne totale de l'ozone et du SO<sub>2</sub>, les profils de concentration en ozone, les conditions météorologiques... principalement fournis par l'Institut Royal de Météorologie de Belgique (IRM). De l'ensemble des mesures continues effectuées sur une période de 14 ans, il est possible de définir les caractéristiques principales de la climatologie UV en Belgique et par extension dans le 50° - secteur de latitude. La pénétration du rayonnement UV solaire par l'atmosphère dépend de l'angle solaire zénithal (SZA), de la colonne aérienne de l'ozone et d'autres substances absorbantes et diffusantes atmosphériques telles que les nuages et les aérosols. En particulier, les nuages sont responsables de la majeure partie de la variabilité du rayonnement observé. L'interprétation des séries chronologiques du rayonnement UV-B et, par exemple, la détection des tendances possibles dues à l'activité humaine, exige une compréhension correcte des effets de ces différents 'facteurs d'influence' et une étude détaillée de leur évolution dans le temps.

### ***Expérimental***

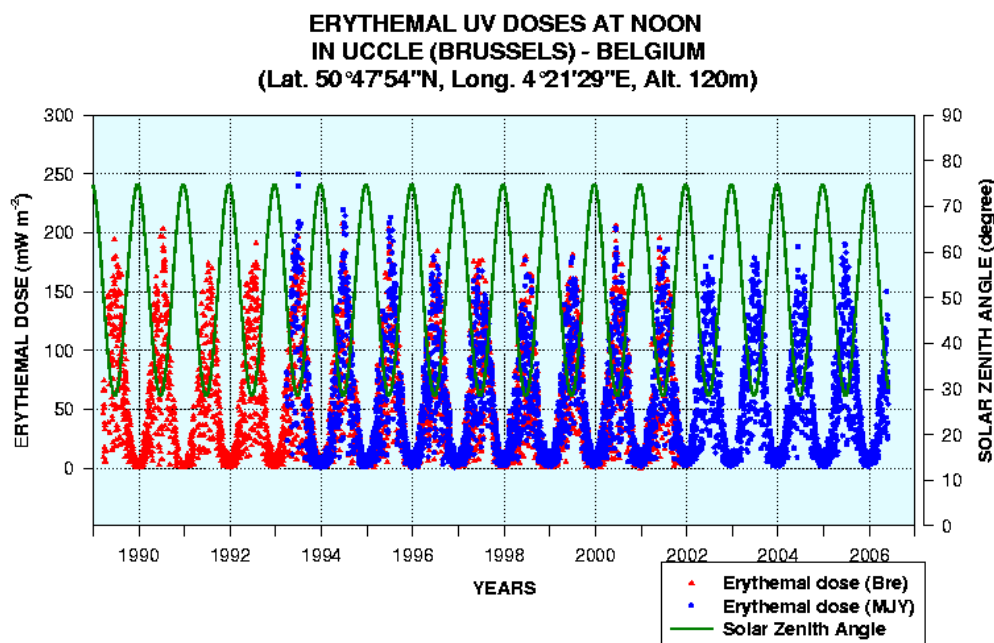
#### ***1. Les stations de surveillance basées au sol***

La station automatisée de l'IASB est située à Uccle, un quartier résidentiel dans la banlieue de Bruxelles (lat. : 50°47'54"N, long : 4°21'29"E, alt : asl de 105m). Elle est opérationnelle depuis la mi-Mars 1993. Les 2 instruments centraux de la station principale sont un double monochromateur calibré (HD10 modifiés, Jobin Yvon et

Bentham). Il inclut également 5 radiomètres de filtre (SPUV-10, UVMFR-7, MFR-7 de système environnemental de Yankee, YES et GUV 511C et GUV 2511 des instruments biosphériques) et quatre pyranomètres (YES), deux dans la gamme d'UV-B (UVB 1), un dans l'UV-A (UVA-1) et le dernier couvrant la gamme de longueurs d'onde de UV-A jusqu'à l'IR proche (TSP 700). Le spectro-radiomètre, avec son axe optique pointant en direction du zénith, est équipé d'un diffuseur Teflon de Lambertian avec des  $2\pi$  sr champ visuel, mesure la totalité de l'irradiation solaire (diffuse + directe), et une réponse presque parfaite de cosinus. Un balayage est exécuté toutes les 15 minutes pour les SZA plus petits que  $100^\circ$ . En outre, 2 stations complémentaires ont été déployées respectivement à Transinne (Euro Space Center) en 2004 et à Ostend (Earth Explorer) en 2006. Elles consistent en un ensemble de 3 pyranomètres (UVB, UVA et TSP), un radiomètre de filtre (GUV 2511) et une station météorologique.

## 2. Séries chronologiques de mesures

Les doses érythémales à midi à Uccle sont évaluées à partir de deux ensembles de mesures spectrales UV-visibles, en pesant chaque spectre par le spectre d'action de CIE. L'ensemble de données de IRM est corrigé pour tenir compte du manque de mesures spectrales entre 325 et 400 nm. La comparaison des deux ensembles de données offre, en général, une bonne concordance (à moins de 5%) au cours de la période de chevauchement (1993-1999). Néanmoins, dans quelques cas, l'anomalie peut atteindre 20-25%. C'est probablement dû 1) au synchronisme imparfait entre les mesures et 2) à la correction des mesures de Brewer qui ne tient pas compte de la modification de la couverture nuageuse pendant la durée du balayage.



31-05-2008

## *Principaux résultats pour 2005-2004*

### Etude des facteurs d'influence

Les deux facteurs les plus importants limitant la pénétration et expliquant les variations journalières des rayonnements UV-B à la surface de la Terre sont l'ozone et la couverture nuageuse. D'autres facteurs, tels que les aérosols, relativement constants à Bruxelles, sont négligés pour la présente étude.

### **1. L'Ozone**

L'anti-corrélation entre la colonne totale de l'ozone et l'UV-B intégrant le rayonnement et corrigée en tenant compte du rôle de la couverture de nuage est bien établie. 99% des mesures sont dans l'intervalle de 10% en comparaison avec l'anti-corrélation calculée au moyen d'un modèle radiatif d'ordonnées discontinues [ Stamnes et al., 1988 ]. La correction appliquée pour la couverture nuageuse étant simplement le ratio UV-B/UV-A, elle tient compte, comme première approximation, de l'effet des nuages comme filtre neutre. Cette variation de 10% peut aisément être expliquée en tenant compte de l'erreur dans les mesures de l'ozone (5%) ainsi que la correction peu sophistiquée du rôle de la couche nuageuse.

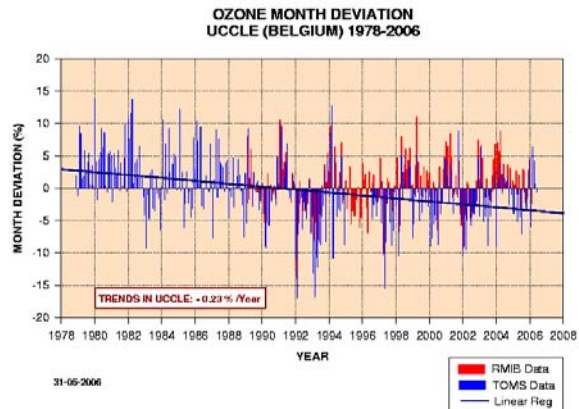
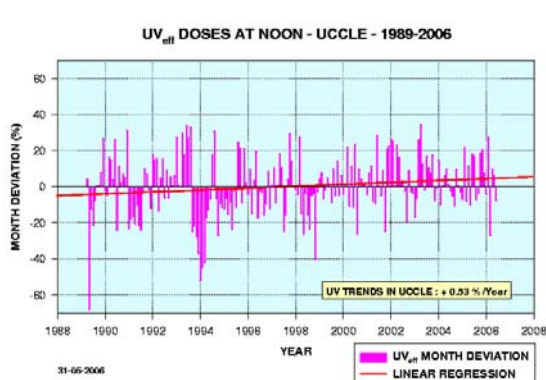
### **2. Les Nuages**

Deux instruments ont été déployés à Uccle afin d'étudier le rôle des nuages. Basés sur des mesures optiques dans la gamme visible et dans la gamme de longueurs d'onde infrarouge thermique, ils fournissent la mesure précise de la couverture de nuage et une bonne évaluation du plafond de nuage (altitude de base de nuage).

Pour étudier l'impact de la couverture nuageuse sur la pénétration UV, en fonction des longueurs d'ondes, le spectre moyen pour des conditions bien définies (couverture totale, angles au zénith similaires,...) a été tiré de ces observations, et comparé à un spectre à ciel dégagé correspondant. La plupart du temps, un nuage bas de 1 km avec une profondeur optique de 50 est parfaitement représentatif de la situation observée par temps couvert. Un modèle paramétré a également été développé pour représenter la situation des nuages « broker clouds ». Enfin, l'atténuation moyenne de la lumière du Soleil par différents types de nuages peut également directement être estimée grâce aux données pyranométrées. Comme escompté, l'atténuation par les nuages de cirrus (haute altitude) s'avère très restreinte. En revanche, les nuages bas (principalement stratocumulus) réduisent le rayonnement solaire d'un facteur de moyenne de 5.

### **3. Tendances**

La mise à jour de tendances potentielles de radiations UV-B à la surface de la Terre, dues à l'activité humaine présente un intérêt primordial pour la communauté médicale de santé publique ainsi que pour tous les scientifiques intéressés dans les effets des UV-B sur la biologie et sur les sciences de la matière. L'objectif de cette étude était d'illustrer ce qui peut être déduit à partir de la surveillance des UV-B sur une période de 18 ans. Les tendances négatives d'ozone et positives d'UV-B ont été clairement établies.



#### 4. Plan pour le futur

Ces résultats montrent l'uniformité de nos données résultant de modèles et de nos données expérimentales. Ils fournissent une première approche de la climatologie d'UV-B en Belgique qui pourrait être extrapolée au secteur 50°-latitude. Une période de prise de mesures prolongée est nécessaire pour améliorer les tendances préliminaires indiquées ci-dessus. Cependant, l'augmentation de la radiation d'UV-B paraît être réelle et doit être étudiée plus en détail. Cette étude est planifiée pour les années à venir et sera effectuée en collaboration rapprochée avec les autres laboratoires européens, dans le cadre de programmes européens à venir.

#### ***L'instrument SOLPEC sur la station spatiale internationale (ISS)***

Ce programme, initié en 1998, est soutenu par PRODEX

SOLSPEC (spectre solaire) est un spectro-radiomètre qualifié pour l'espace, dédié à la mesure de l'irradiation spectrale solaire extraterrestre en unités radiométriques absolues de 180 à 3000 nm. Il a été conçu dans les années 70, suite à la collaboration entre l'IASB, le CNRS/SA (France, PI G. Thuillier) et l'observatoire d'Heidelberg (Allemagne, D. Labs). Les objectifs scientifiques principaux sont :

1. La climatologie des UV solaire, VIS et du rayonnement Infra rouge pendant un cycle solaire. Le rayonnement intégrée UV est sujette à des changements d'environ 10% au cours d'un cycle solaire et une surveillance est exigée.
2. Contribution à la chimie atmosphérique. Les processus photochimiques induits par les rayonnements UV solaires dans la stratosphère dépendent des longueurs d'ondes. Dès lors, des mesures absolues de l'irradiation spectrale UV solaire à grande précision (2%) sont d'une importance critique. Tout changement de radiation UV est susceptible de modifier l'équilibre chimique actuel en raison de réactions catalytiques.

#### ***Sommaire de l'état actuel de l'instrument (mi-2006)***

Appareils généraux: Le vol de prototype de SOLSPEC a été accompli et les tests de vibration se sont déroulés avec succès. Le modèle thermique a été complété et réactualisé pour n'importe quelle modification majeure. La salle nette pour les

différents essais optiques de SOLSPEC est prête et l'interface pour le calibrage devant le corps noir (Heidelberg, Allemagne) est prêt.

#### *Optiques:*

Les lampes creuses cathodiques (modèles de vol) ont été construites au Service d'Aéronomie du CNRS en France). Pour les lampes de deutérium, les modèles de vol ont été construits par Cathodeon Grande-Bretagne. Les lampes à filament Tungsten (modèle de vol) ont été construites par Jelosil, Suisse.

Les réseaux prismatiques et les miroirs des spectro-radiomètres ont été livrés par Jobin Yvon, les tests PSD sur les modèles de vol ont été effectués. Trois nouvelles lampes de 1000W NIST certifiées standard et livrées par le NIST (Mai 2002), sont disponibles pour des objectifs de calibrages. De plus, deux lampes deutérium Nist calibrées ont été commandées.

#### *Electronique et materiel logiciel:*

La nouvelle électronique du canal infrarouge a été réalisée à l'IASB et testée avec succès. Le logiciel de vol a été développé et complété à l'IASB, la partie au sol est développée par le CNRS (France). Un prototype de la boîte de stimulations a été redessiné dans sa forme finale et délivré à ALENIA.

#### *Mécaniques:*

La plupart des appareils mécaniques de l'expérimentation SOLSPEC ont été dessinés à l'IASB. La production du modèle de vol a été dirigée par PEDEO, et testée et assemblée à l'Institut.

## **Atmosphères planétaires**

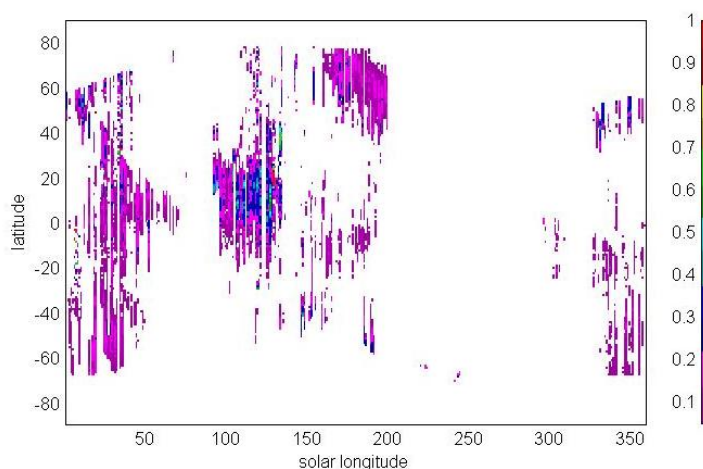
### ***Etude de l'atmosphère Martienne: la mission SPICAM***

*Le système climatique de Mars, qui inclut la surface, l'atmosphère et les calottes polaires, a subi un changement significatif au cours de l'histoire de la planète. Les investigations sur l'atmosphère de Mars sont importantes pour comprendre davantage les variations de climat de Mars. Les propriétés de topographie et de surface telles que l'albédo et l'inertie thermique entraînent des gradients de la température et de la pression qui dirigent la circulation atmosphérique locale et régionale. Bien que la vapeur d'eau soit un constituant mineur dans l'atmosphère de Mars, elle joue toujours un rôle important. Avec les cycles annuels du CO<sub>2</sub> et de la poussière, le cycle annuel de l'eau est l'un des trois cycles principaux qui définissent le climat actuel de Mars. En hiver, le dépôts d'eau dans les calottes polaires de l'atmosphère forment un système de nuage de glace entourant les calottes, lesdits "bonnets polaires". En été, la vapeur d'eau est libérée par le réchauffement des calottes et orientée sur l'équateur où elle est prise par la branche ascendante de la cellule de circulation de Hadley ; elle atteint l'hydropause et gèle en nuages de glace, formant la ceinture tropicale de nuage. L'asymétrie saisonnière entre les hémisphères Nord et Sud explique pourquoi la ceinture apparaît seulement pendant l'été nordique. La poussière joue également un rôle important dans la circulation atmosphérique. La poussière peut absorber la lumière visible et rayonner les ondes infrarouges qui peuvent être absorbées par le CO<sub>2</sub> atmosphérique, menant au*

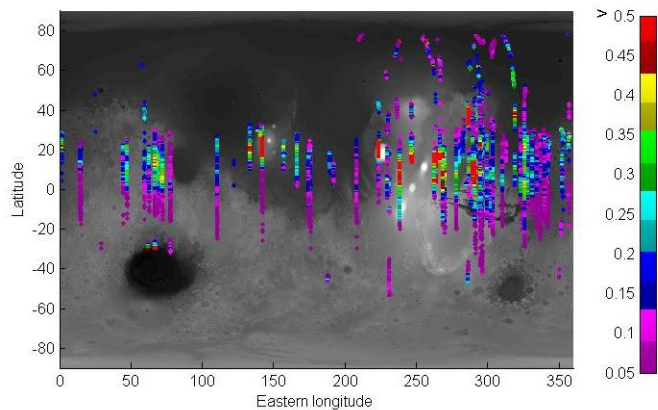
*réchauffement de l'air avoisinant. Les gradients rehaussés de la température augmentent les vents extérieurs qui soulèvent plus de poussière dans l'atmosphère.*

*Ce mécanisme positif de rétroaction peut entraîner des tempêtes de poussière au niveau local et global. L'ozone est un autre constituant mineur important de l'atmosphère de Mars. L'ozone est concentré près des régions polaires dans l'horaire d'hiver et sa teneur est sans corrélation avec la teneur en vapeur d'eau. Cette absence de corrélation résulte du rôle destructif des radicaux de HO<sub>x</sub> produits par photodissociation de vapeur d'eau.*

La mission Mars Express de l'ESA a été lancée avec succès le 2 juin 2003, de Baïkonour, au Kazakhstan, à bord d'une fusée russe Soyuz Fregat. L'instrument SPICAM à bord de Mars Express (voyez également la section X) est équipé de deux canaux, un pour l'ultraviolet (118-320 nm ; résolution 0.8 nm) et un autre pour les longueurs d'onde (1.0-1.7 μm; résolution 0.5-1.2 nm). SPICAM fonctionne en mode nadir, limbe, stellaire (seulement le canal UV) et en mode d'occultation solaire. Les objectifs principaux du canal UV sont de tracer une carte de l'ozone et de déterminer des profils verticaux, de la densité atmosphérique et de récupérer les températures dans l'atmosphère supérieure ainsi que la recherche sur les émissions aéronomiques. Le canal IR est dédié au traçage de cartes de la vapeur d'eau et à l'établissement de profils des aérosols et de la vapeur d'eau. Jusqu'à présent, SPICAM a accompli avec succès l'acquisition de données pour la première année martienne et a commencé à collecter des données pour la deuxième année martienne, 883 orbites en mode nadir, 236 en mode limbe, 403 occultations solaires et 792 occultations stellaires ont été collectées. Les premiers résultats obtenus dans le cadre du projet en cours intitulé « Etude de l'atmosphère martienne : la mission SPICAM » ont démontré la qualité des données et justifié les objectifs scientifiques. Les premiers résultats d'analyse ont montré que les mesures nadir d'UV SPICAM sont très efficaces pour la détection de nuages martiens et ont permis de dessiner une carte de la distribution des nuages martiens qui couvrent la période d'une année martienne. La possibilité de détecter un nuage de poussière dense grâce aux mesures a été démontrée.



*Épaisseur optique d'un nuage par longitude versus longitude solaire L<sub>s</sub>. La ceinture de nuages tropicaux est clairement visible autour de la latitude 15°N. Les autres structures prononcées de nuages sont les bonnets polaires Sud et Nord et les nuages polaires nordiques.*

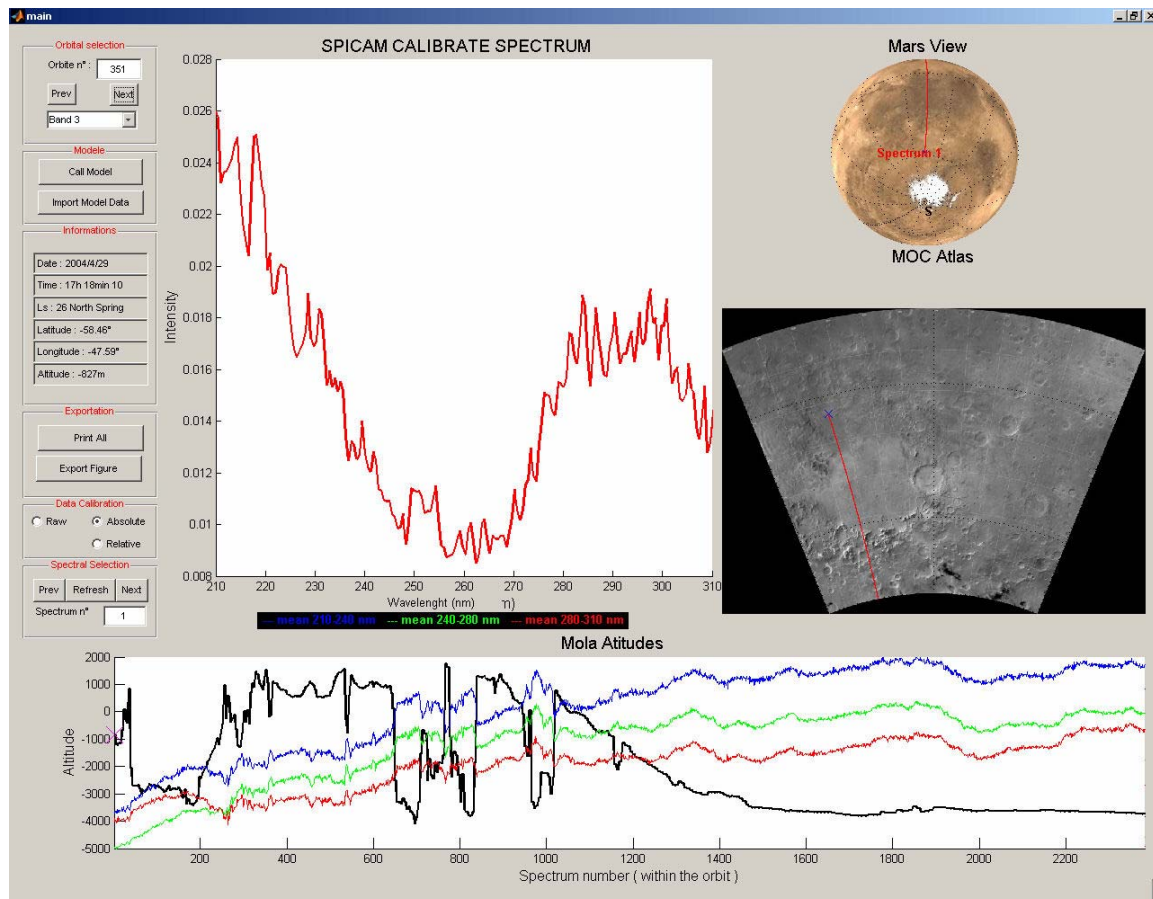


*La ceinture de nuages tropicaux (épaisseur optique) sur une période de longitude solaire  $L_s=90-140^\circ$ . L'épaisseur optique maximale enregistrée est de 1.1. Les orbites sont superposées sur une carte altimètre laser de l'orbite de Mars. L'altitude minimale est noire et la maximale est blanche.*

***SPIDEX : exploitation de données SPICAM pour l'étude UV de la surface martienne.***

Depuis octobre 2005, un nouveau logiciel a été développé pour la visualisation des activités SPICAM et des spectres calibrés ont été obtenus à partir d'un ensemble existant de données SPICAM couvrant la première année martienne (deux années terriennes). Un modèle bidimensionnel de l'atmosphère martienne est actuellement utilisé pour interpréter les données en terme de surface UV et d'ozone atmosphérique. Un résultat préliminaire montre qu'au cours de la première année martienne, ni l'ozone de Mars, ni sa poussière, ont été présents en quantités suffisantes pour former un bouclier UV sur la surface, et confirme ainsi qu'une hypothétique vie martienne devrait être soit souterraine, soit résistante aux UV.





### **Modélisation de la chimie et de l'atmosphère de Mars**

*Le Modèle Multi échelle Global de Mars, qui a récemment été développé au Centre for Research in Earth and Space Science de l'Université de York à Toronto au Canada sera installé et utilisé à l'IASB pour interpréter et exploiter les observations chimiques faites par l'instrument SPICAM Light à bord de Mars Express. Il s'agit d'un Modèle de Circulation Général (GCM) pour l'atmosphère de Mars qui inclut également une description des principaux constituants chimiques et formations de nuages. Il permettra également d'établir des comparaisons entre le modèle de calcul et les nuages de glace d'eau qui ont été détectés depuis les spectres SPICAM Light.*

### **Perspectives**

*Les études concernant l'atmosphère martienne seront poursuivies, y compris les études de la pénétration de lumière UV sur la surface de Mars.*

*En outre, l'institut a initié des études sur l'atmosphère de Venus, grâce au succès de développement de l'instrument SPICAV sur la mission Venus Express de l'ESA, qui hérite de nombreuses caractéristiques de SPICAM. Le satellite a été lancé avec succès en novembre 2005 et a atteint son orbite finale autour de Vénus en mai 2006, après quoi les opérations et l'analyse des données associées seront entamées (voir section X par D. Nevejans).*

## Contribution aux expérimentations de spectroscopie optique en laboratoire

L'objectif principal de ce travail est de récolter des données spectroscopiques de qualité, notamment les paramètres de raie (positions, intensité, coefficients d'élargissement par pression, les changements par compression, les tâches (assignments)) et les sections efficaces d'absorptions. Afin de procurer des données atmosphériques utilisables, il est important d'effectuer ces mesures dans des conditions de températures et de pressions similaires à celles de l'atmosphère de la Terre, et de comprendre la dépendance entre la pression et la température des paramètres de ligne ou des sections efficaces d'absorptions. Les molécules étudiées sont : le H<sub>2</sub>O et un de ses isotopologue HDO, le SO<sub>2</sub> ainsi que le O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> complexe. Ces molécules gazeuses ont été mesurées dans différentes conditions de pression de gaz pure, de mélanges d'air et de mélanges de nitrates dans les gammes IR, NIR, VIS et UV en utilisant des Spectromètres de Transformation de Fourier.

### 1) Paramètres de bande H<sub>2</sub>O IR

Notre étude précédente de la molécule H<sub>2</sub>O a été reconduite pour la région infrarouge.

### 2) Les paramètres de raie de HDO du proche infrarouge/visible

La présence et la détection de raies d'HDO d'absorption a été d'abord étudiée dans la région visible (22800-16300 cm<sup>-1</sup>). Plus de 1300 lignes ont pu être identifiées sur une région spectrale large de 6000 cm<sup>-1</sup>, et 410 lignes ont été assignées aux bandes OH harmoniques supérieures s'étendant 5<sup>th</sup>, 6<sup>th</sup> and 7<sup>th</sup> plus combination bands. Il est très compliqué, en raison de la présence simultanée des 3 isotopologues dans la cellule de mesures, au travers de l'équilibre chimique H<sub>2</sub>O + D<sub>2</sub>O ↔ HDO dans la phase gazeuse, d'identifier et d'analyser les lignes HDO ainsi que de calculer correctement les pressions partielles. Une nouvelle procédure a été développée et les différentes étapes pour extraire les lignes de HDO ont été décrites en détail. La phase principale consiste en l'élimination des lignes de H<sub>2</sub>O en soustrayant un spectre synthétique d'un spectre absorbant expérimental, à la même pression et à la même résolution. Une liste de lignes de paramètres expérimentaux dans le NIR-visible (23000-11500 cm<sup>-1</sup>) a été récemment construite par le groupe BR. La liste contient des positions et des sections efficaces d'absorptions de plus de 3000 lignes, et pour un grand nombre, les coefficients d'élargissement de N<sub>2</sub> ainsi que les fréquences induites de N<sub>2</sub> sont fournis. Ces données sont disponibles dans les archives complémentaires du Journal of Molecular Spectroscopy ([http://msa.lib.ohio-state.edu/jmsa\\_hp.htm](http://msa.lib.ohio-state.edu/jmsa_hp.htm)). Les travaux sont menés grâce à une collaboration avec des théoriciens russes et britanniques. La nécessité de telles données est largement reconnue par la communauté scientifique, et les données concernant cette région manquent dans la banque de données HITRAN 2004.

### 3) Les mesures de section SO<sub>2</sub> dans la gamme spectrale UV/visible.

Cette molécule est une substance importante non seulement pour la compréhension du phénomène de pollution sur Terre mais également pour l'étude de processus physiques et chimiques qui se produisent dans l'atmosphère des autres planètes et

d'autres satellites. Nous avons à cet effet adapté une cellule existante dans notre laboratoire afin d'effectuer de nouvelles mesures. Cette cellule a un chemin d'une longueur de 2 m et peut supporter des pressions échantillonnées de  $10^{-5}$  to 1013 mbar. La température peut être stabilisée entre 25 et 90°C. Afin de couvrir une gamme spectrale large de 240 à 500 nm, nous avons dû effectuer différentes séries de mesures, en fonction des détecteurs et des sources. Nous avons également dû effectuer des mesures à différentes pressions et températures, dans le but d'étudier les effets de ces paramètres aux intersections. Les mesures ont été achevées en janvier 2006 et l'analyse est actuellement encore en cours.

- 4) L'intersection d'absorption  $O_2-O_2$  et les gammes de  $O_2-N_2$  induit par un choc, dans les gammes spectrales UV proche, visible et infrarouge proche.

Les données disponibles dans la littérature concernant ce complexe, important pour la connaissance de la chimie et de la physique de l'atmosphère de la Terre, sont rares et imprécises. Nous avons dès lors décidé de construire une cellule adaptée aux mesures d'absorption optique de ce complexe. L'absorption du complexe  $O_2-O_2$ , qui dépend du carré de la pression d'oxygène, est très faible et nécessite par conséquent, soit une cellule avec un chemin de longueur importante (d'à peu près 1 Km), soit une cellule dans laquelle la pression peut être élevée de manière importante. On a opté pour la seconde solution, la construction d'une longueur de chemin de cellule de 2m50 dans laquelle des pressions de 1 à 17 atmosphères peuvent être atteintes. Les tests de pression ont été effectués avec succès et les premières mesures des intersections de  $O_2-O_2$  et  $O_2-N_2$  cross seront probablement initiées en 2006.

## **B. Milieu interplanétaire**

Les activités menées à l'IASB dans le domaine du milieu interplanétaire sont indispensables au développement de la météorologie spatiale, discipline nouvelle qui n'en est encore qu'à ses balbutiements, comme l'était la météorologie de l'atmosphère terrestre à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Force est en effet de reconnaître, qu'actuellement, la fiabilité des prévisions en météorologie spatiale reste très limitée, car cette discipline repose essentiellement sur des modèles *empiriques* au fondement scientifique incertain. Par ses activités de recherches fondamentales en physique des plasmas spatiaux, l'IASB met au point des modèles *physiques* du milieu interplanétaire qui sont appelés à pallier à l'empirisme dominant la météorologie de l'espace dans son état actuel. L'IASB contribue donc, par ses recherches basées sur une approche strictement cartésienne, à sortir la « météo de l'espace » de son empirisme initial afin d'améliorer la fiabilité de ses prévisions. C'est la voie qu'a choisie l'IASB pour valoriser cette discipline auprès du grand public, des agences spatiales et des décideurs politiques.

### ***La météorologie spatiale***

Dans le but de protéger les systèmes et les hommes des risques liés aux effets de la météorologie spatiale, nous devons en comprendre les causes.

La météorologie de l'espace vise l'étude et la prévision de l'impact que peut avoir l'activité solaire sur notre environnement terrestre. A l'IASB, nous nous intéressons à la physique des relations Soleil-Terre, en étudiant les plasmas qui baignent l'espace interplanétaire et l'environnement immédiat de la planète Terre. La météorologie de l'espace a pour but de prédire *l'arrivée des éjections de masse coronale* et l'impact de ces structures au niveau de la magnétosphère. Les particules du vent solaire peuvent provoquer des perturbations magnétiques importantes qui sont appelées orages magnétiques. Ces orages magnétiques induisent des courants électriques dans l'ionosphère et au sol, qui peuvent être à l'origine de pannes de courant, comme ce fut le cas en 1989 dans une grande partie du Canada et des Etats Unis. Les variations du vent solaire provoquent également la corrosion de kilomètres de pipelines (de gaz et de pétrole) en Alaska. Les orages perturbent les liaisons radio. On relève aussi des conséquences dommageables dans le domaine de l'aéronautique (décharge électrique des satellites, dommages aux panneaux solaires produits par les radiations, modification de la position des satellites de basse altitude après un orage...). Les particules chargées du vent solaire peuvent être comparées à un rayonnement radioactif. A plusieurs reprises, des satellites ont eu des pannes à la suite d'un rayonnement intense pendant un orage magnétique. Les astronautes peuvent aussi être exposés à des doses importantes de rayonnements ionisants, surtout durant un long séjour dans l'espace. L'IASB collabore à la recherche dans ce domaine avec l'Agence Spatiale Européenne, la KULeuven, et l'Observatoire Royal de Belgique. Le but est de mieux comprendre comment le vent solaire interagit avec la magnétosphère en vue de prévoir les conséquences des orages magnétiques.

### ***Le plasma : le quatrième état de la matière***

La matière existe sous forme liquide, solide, gazeuse mais aussi sous forme de *plasma*. Or, cet état est le plus répandu à l'échelle de l'Univers. Nous ne nous en

rendons pas compte car nous vivons essentiellement dans la petite partie de l'Univers non plasmique (environ 1%), sur un corps froid, protégé par son champ magnétique des flux de plasma venant de l'espace. Un plasma est un milieu globalement neutre du point de vue électrique, dont les composants de base sont des ions positifs et des électrons. On sait que la température se traduit par une agitation désordonnée des particules qui correspond à une énergie cinétique moyenne des particules. Ainsi, un plasma en équilibre thermique à la température de 11000 degrés Kelvin, possède une énergie d'agitation thermique équivalente à celle acquise par un électron lorsqu'il est accéléré par un champ électrique sur une distance correspondant à une différence de potentiel de 1 Volt. Il est commode d'utiliser l'électronvolt (eV) comme unité pour cette énergie. L'environnement terrestre est un véritable laboratoire de physique des plasmas qui permet l'étude de plasmas extrêmement diversifiés depuis le plasma froid (1 eV) de l'ionosphère jusqu'aux plasmas très chauds et raréfiés, comme celui des ceintures de radiation de Van Allen dont l'énergie atteint plusieurs centaines de mégaélectronvolts. Ce sont les propriétés spécifiques tout à fait remarquables des plasmas de l'espace que l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique cherche à comprendre depuis que la conquête spatiale lui a ouvert un vaste champ d'observations.

### ***Le Soleil et le vent solaire***

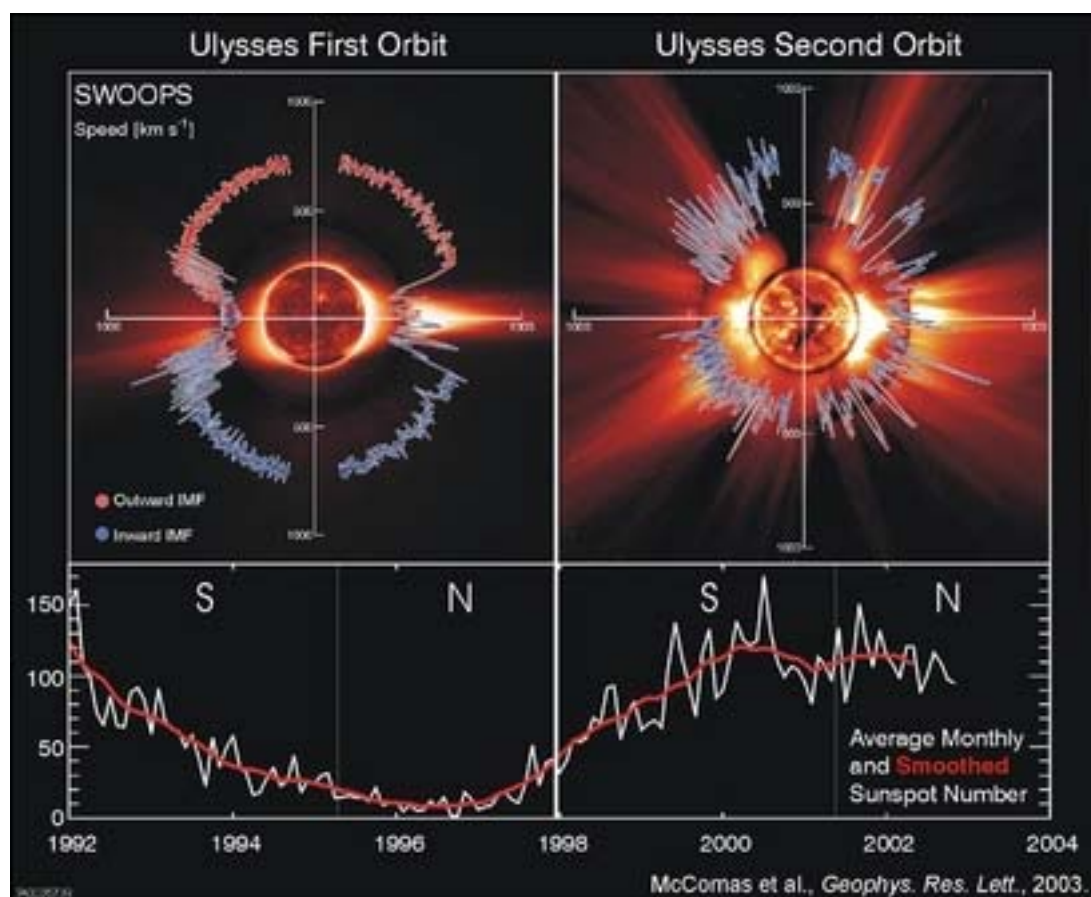
Le Soleil peut agir de diverses façons sur notre environnement terrestre, via plusieurs types de mécanismes. Les effets sont eux aussi très divers. Dégradation voire destruction de satellites, transmissions radio atténuées ou interrompues, navigation par GPS interrompue, pannes informatiques à bord d'avions de ligne, irradiation du personnel navigant (aviation civile) ou des astronautes, pannes de transformateurs dans des réseaux de distribution d'électricité, prospection pétrolière rendue impossible à cause des variations du champ magnétique

### ***Le vent solaire***

Le Soleil prodigue lumière et chaleur indispensables à la vie sur Terre. Outre ce rayonnement, le Soleil émet en permanence un flot de particules chargées que l'on appelle le vent solaire. Il s'agit en fait de l'expansion radiale dans le milieu interplanétaire de la couronne solaire dont la température atteint un million de degrés Kelvin. Bien que le vent solaire emporte environ un million de tonnes d'hydrogène à chaque seconde, cette masse représente une infime fraction de la masse solaire. Néanmoins, le vent solaire est d'une importance considérable car il interagit avec les environnements planétaires et cométaires. En particulier, le vent solaire façonne l'environnement magnétique (la magnétosphère) autour de la Terre en comprimant les lignes de champ dans la direction solaire et en les étirant vers l'arrière sur plus de 100 rayons terrestres dans la direction opposée au Soleil.

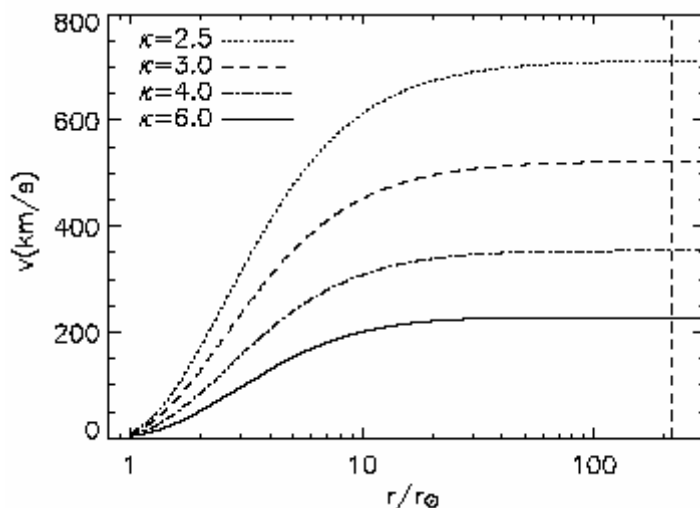
Le vent solaire est un plasma essentiellement constitué d'électrons et de protons. A 1 Unité Astronomique (UA), c'est-à-dire au voisinage de la Terre, la densité du vent solaire est typiquement de quelques particules par centimètre cube et sa température est de l'ordre de 100 000 K. Selon sa vitesse, on distingue deux types de vent solaire: le vent solaire lent, dont la vitesse typique à 1 UA est de 300 à 400 kilomètres par seconde, et le vent solaire rapide dont les vitesses atteignent régulièrement 700 à 800 kilomètres par seconde.

Des modèles de vent solaire ont été développés à l'IASB et les résultats ont été comparés aux observations de différentes sondes spatiales telles que Ulysses. Au cours de son voyage autour du Soleil, la sonde Ulysses a révélé que, durant une phase de minimum d'activité solaire, le vent solaire rapide trouve son origine dans les trous coronaux, des régions plus froides et moins denses de la couronne solaire. Lors d'une phase de minimum solaire, les trous coronaux sont confinés dans les régions polaires du Soleil. Le vent solaire lent provient quant à lui de régions plus chaudes qui forment approximativement une bande autour de l'équateur solaire. La situation est beaucoup plus complexe en phase de maximum d'activité solaire pendant laquelle une partie des trous coronaux peut migrer vers les zones équatoriales. Comment le plasma du vent solaire rapide peut-il être accéléré jusqu'à des vitesses de l'ordre de 800 kilomètres par seconde bien qu'émergeant de régions coronales plus froides ? C'est une des questions à laquelle l'IASB a récemment apporté un élément de réponse.



Comparaison des observations de la vitesse du vent solaire obtenues par la sonde Ulysses au cours de ses 2 orbites polaires autour du Soleil. Les données ont été obtenues à environ 6 ans d'intervalle et correspondent respectivement à un minimum d'activité solaire (en haut à gauche) et à un maximum d'activité solaire (en haut à droite). L'activité solaire, notamment mesurée par le nombre de taches solaires présentes à sa surface, est représentée sur le graphique du bas. Lors du minimum d'activité solaire, le vent solaire est très structuré, le vent solaire lent trouvant son origine dans les régions équatoriales et le vent solaire rapide provenant des régions de plus haute latitude. Dans une phase de maximum d'activité solaire, le vent solaire est beaucoup plus chaotique.

Malgré des décennies de recherches, les mécanismes d'accélération du vent solaire ne sont pas encore bien compris. Le vent solaire peut être décrit au moyen de modèles de type fluide (hydrodynamique) ou cinétique. Bien que très populaire, l'approche fluide est conceptuellement inappropriée aux plasmas spatiaux peu denses car elle suppose implicitement l'existence d'un grand nombre de collisions entre les particules du milieu assurant que leurs fonctions de distribution des vitesses sont Maxwelliennes. Mais les observations in situ du vent solaire au moyen de sondes spatiales telles que Ulysses et WIND ont démontré que ces fonctions de distribution des vitesses ne sont pas Maxwelliennes mais possèdent un excès de particules de haute énergie (également appelées particules suprathermiques). L'existence de ces particules est étroitement liée au fait que le vent solaire est un milieu très faiblement collisionnel. Afin de tenir compte des effets liés à ces distributions non-Maxwelliennes, une théorie cinétique du vent solaire doit être utilisée. L'IASB a développé des modèles cinétiques du vent solaire et a ainsi acquis une grande expertise dans ce domaine. Les modèles les plus simples sont basés sur l'approche cinétique dite exosphérique dans laquelle les collisions entre les particules sont complètement négligées. Ces modèles présentent l'avantage d'être analytiques et de mettre en évidence les mécanismes principaux à l'origine de l'accélération du vent solaire. Récemment, ils ont été généralisés pour expliquer l'accélération du vent solaire rapide en supposant l'existence d'un excès d'électrons de haute énergie dans la couronne solaire. Plus ces électrons sont nombreux, plus rapide est le vent solaire à grande distance. De plus, ces modèles ont mis en évidence que la région d'accélération est située à plus basse altitude dans les trous coronaux que dans les autres régions de la couronne solaire, permettant ainsi d'obtenir des vitesses plus élevées pour le vent solaire provenant de ces régions. Ce modèle est fort simple car il s'agit d'un modèle à une dimension, stationnaire et sans collisions. Néanmoins, il possède les ingrédients de base permettant d'accélérer le vent solaire et suggère une alternative à l'accélération au moyen d'ondes de plasma, nécessaire dans les modèles fluides.



*Profils de vitesse du vent solaire en fonction de la distance radiale au Soleil (exprimée en unités de rayons solaires) obtenus avec le modèle exosphérique de vent solaire développé à l'IASB. Le paramètre  $\kappa$  est une mesure de la quantité d'électrons suprathermiques dans la couronne solaire. Plus  $\kappa$  est petit, plus les électrons de haute énergie sont nombreux dans*



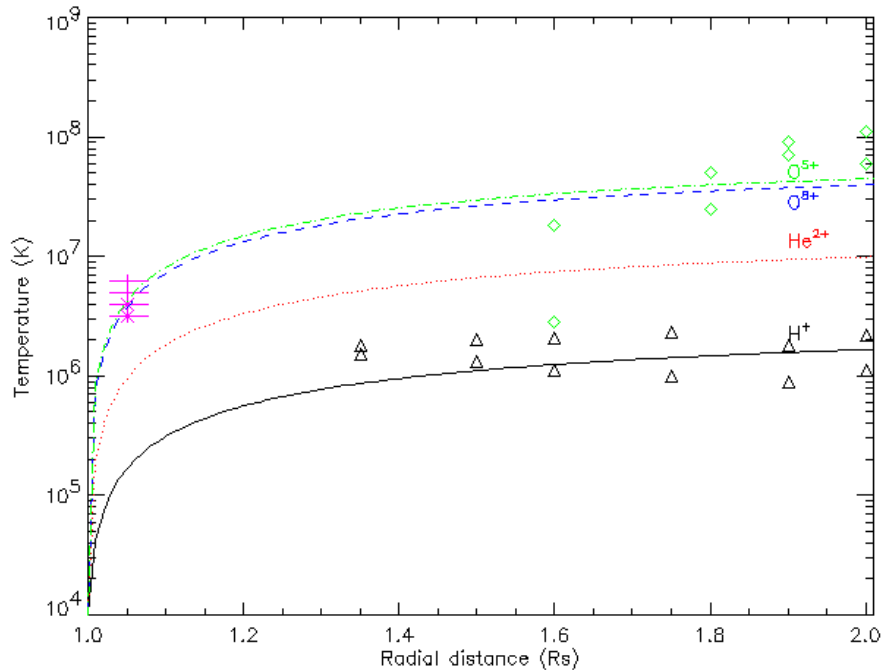
*la couronne solaire, et plus le vent solaire est accéléré à grande distance. La ligne verticale en pointillé représente l'orbite terrestre à 1 UA ou 215 rayons solaires.*

Le modèle cinétique développé à l'IASB a été mis en ligne sur un site de la NASA (<http://ccmc.gsfc.nasa.gov/>), « The Community Coordinated Modeling Center », dédié à l'étude des plasmas spatiaux et aux modèles de météo spatiale.

### **Les ions lourds du vent solaire**

Environ 95% des ions dans le vent solaire sont des protons mais des ions plus lourds sont également présents en faible quantité. L'hélium est l'ion lourd le plus abondant avec une moyenne d'environ 4% dans le vent solaire rapide. Des ions d'oxygène, de carbone, d'azote, de silicium, de magnésium, de fer, de soufre et d'autres ions mineurs ont également été détectés en quantité infimes (environ 1% des ions du vent solaire en tout). L'étude de ces ions lourds dans le vent solaire rapide au moyen d'analyseurs de particules à bord de la sonde Ulysses a révélé quelques propriétés surprenantes: leurs températures sont plus que proportionnelles à leurs masses et, à 1UA, leurs vitesses sont égales ou supérieures à celle des protons. D'autre part, les mesures spectroscopiques dans la couronne solaire avec le spectromètre UVCS à bord du satellite SOHO révèlent des températures extrêmement élevées pour les ions mineurs ainsi que des vitesses beaucoup plus élevées que celle des protons dans la zone d'accélération du vent solaire. A l'IASB, nous avons développé un modèle barométrique (en équilibre hydrostatique) de la zone de transition, entre la chromosphère et la couronne, basé sur le phénomène de filtrage des vitesses. Appliqué aux ions mineurs, ce modèle prédit des températures élevées et plus que proportionnelles à leurs masses en accord avec les observations. A nouveau, il s'agit d'une alternative au chauffage des ions mineurs dans la couronne par des phénomènes de résonance entre des ondes de haute fréquence et la fréquence de giration des ions autour des lignes de champ magnétiques.

Nous avons également inclus les ions mineurs dans le modèle exosphérique du vent solaire rapide décrit auparavant afin d'investiguer l'influence de ces températures élevées sur leur accélération. Les vitesses asymptotiques obtenues pour les ions mineurs dépendent essentiellement du rapport entre leur masse et leur charge. Pour les ions avec un rapport élevé, la vitesse terminale (à 1 UA) est inférieure à celle des protons. Mais ceux qui ont un rapport « masse sur charge » de l'ordre de 2 (comme par exemple les particules alpha  $\text{He}^{2+}$ ) peuvent être accélérés à des vitesses supérieures du fait de leur haute température. La température élevée des ions mineurs dans la couronne solaire est donc le facteur décisif jouant sur leur accélération.

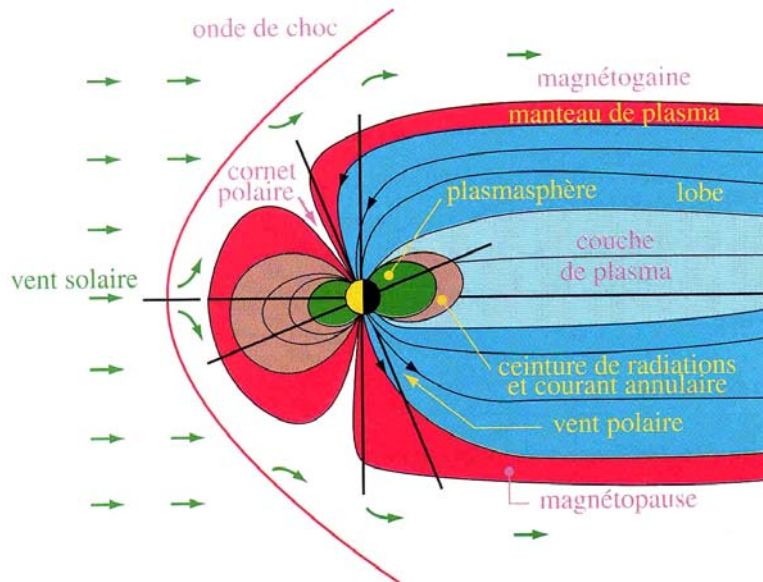


*Pseudo-chauffage des ions de la couronne solaire obtenu avec le modèle cinétique par filtrage des vitesses. Les courbes correspondent aux résultats du modèle pour les électrons et les protons (noir), les ions d'hélium (rouge), les ions d'oxygène  $O^{8+}$  (bleu) et  $O^{5+}$  (vert). Les mesures de UVCS sur SOHO sont représentées par les triangles noirs pour les protons et les losanges verts pour les ions  $O^{5+}$ . Les mesures de SUMER sur SOHO sont représentées par les croix roses pour  $Ne^{7+}$  et par des étoiles roses pour  $Fe^{9+}$ .*

### **La magnétosphère terrestre**

Le champ magnétique terrestre nous protège des particules du vent solaire. La région de l'espace contrôlée par le champ magnétique de la Terre est appelée la *magnétosphère terrestre*. Le champ géomagnétique constitue un bouclier efficace empêchant l'entrée directe dans la haute atmosphère terrestre du plasma solaire. Le vent solaire s'écarte en effet de l'obstacle magnétique en subissant un écoulement forcé, provoquant la formation d'une *onde de choc* située à environ 100 000 km de la Terre dans la direction du Soleil. Un changement brutal des propriétés du vent solaire (pression dynamique, densité, température, vitesse) se produit au passage de l'onde de choc. En aval de cette onde, le plasma solaire forme une région de transition, la *magnétogaine*, où il est comprimé et turbulent. Du côté terrestre, la magnétogaine est bordée par une nappe de courants électriques qui s'est formée lorsque, sous l'influence du champ géomagnétique, les électrons et les ions du vent solaire ont été déviés en sens opposés. Cette nappe de courants électriques délimite autour de la Terre une zone frontière appelée *magnétopause*. La forme de la magnétopause et sa distance par rapport à la Terre sont déterminées par l'équilibre entre les forces engendrées par les courants électriques qui y circulent et la variation de la pression dynamique du vent solaire. La magnétosphère – cavité magnétique à l'intérieur de la magnétopause - est comprimée du côté du Soleil, où elle se situe en moyenne à 10 rayons terrestres ( $R_E = 6371$  km) du centre de la planète. Dans l'autre direction, du côté nuit, elle est étirée sur plusieurs millions de kilomètres, sous la

forme d'une longue queue magnétique à l'allure de comète. Dans la magnétosphère terrestre, on distingue différentes régions de plasmas, parmi lesquelles la plasmasphère, les ceintures de Van Allen, le feuillet de plasma et les régions aurorales.



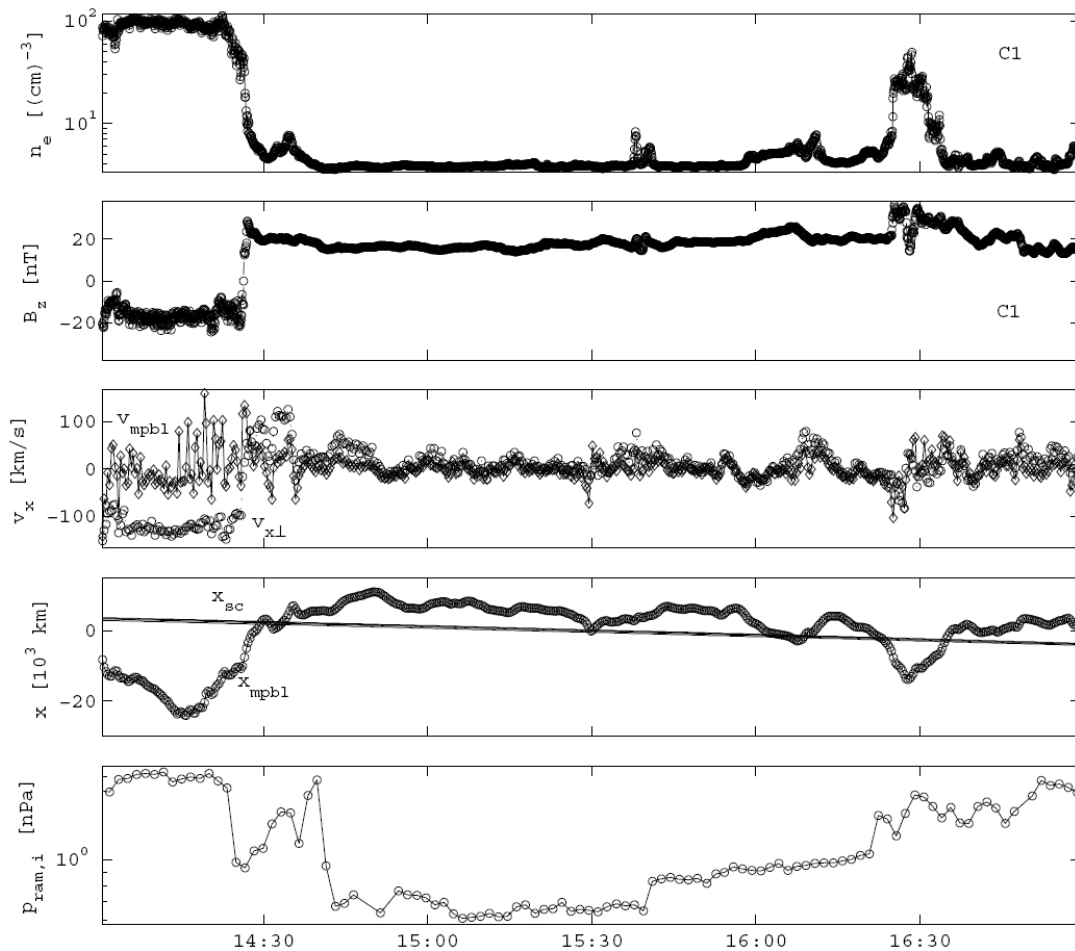
Vue de la magnétosphère et de ses différentes régions de plasma.

### **Les satellites CLUSTER**

L'IASB est notamment impliqué dans deux expériences de la mission CLUSTER. L'objectif de cette mission constituée de quatre satellites lancés en 2000 est d'établir une cartographie tridimensionnelle et non stationnaire des régions clés où l'interaction de la magnétosphère avec le vent solaire est la plus manifeste.

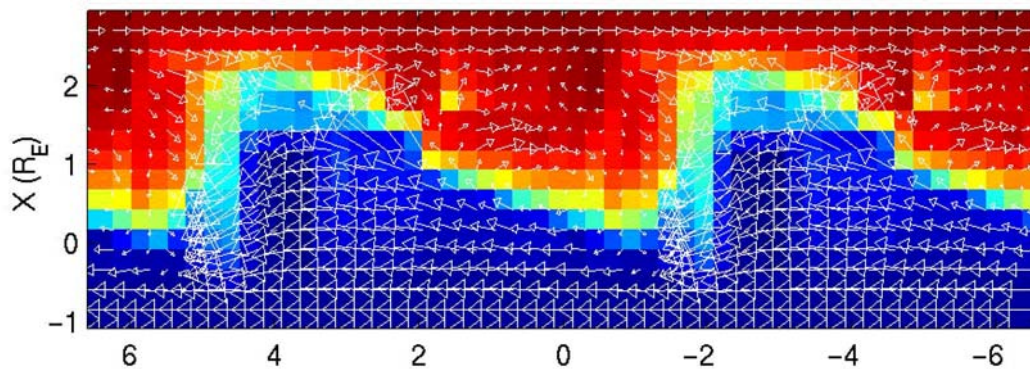
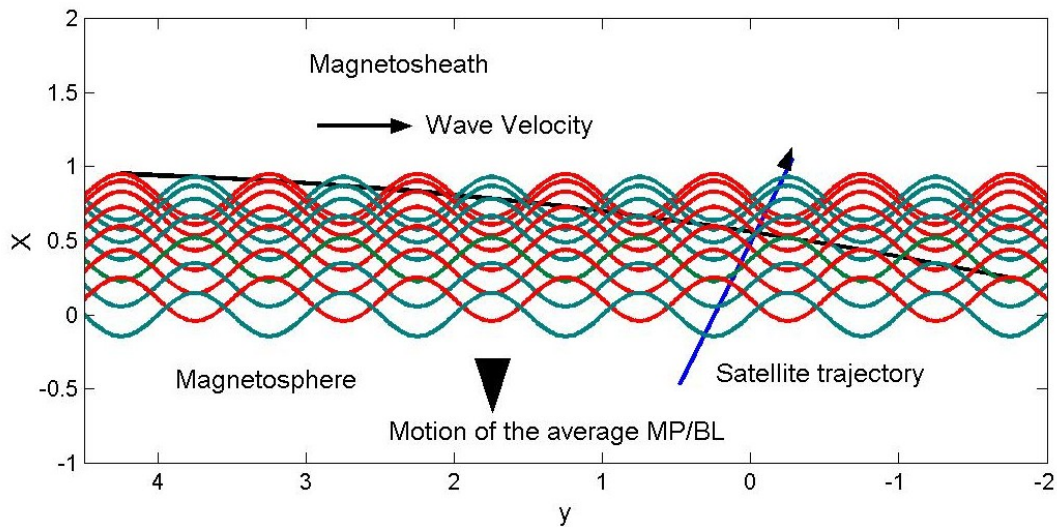
### **Etude de l'interaction du vent solaire avec la magnétosphère terrestre**

Lorsque la matière d'une éruption de la couronne solaire (une *éjection de masse coronale*) se propage à travers l'espace interplanétaire et atteint la Terre, la pression dynamique du vent solaire est fortement augmentée, de sorte que la magnétopause est poussée vers l'intérieur, produisant un *orage magnétosphérique*. Un des effets des fluctuations mineures continues de la pression dynamique du vent solaire est le mouvement d'oscillation de la magnétopause, comme illustrée à la figure 5.



Observations effectuées par un des quatre satellites CLUSTER, durant une traversée de la magnétopause terrestre le 24 avril 2001. Cette figure illustre (en allant du haut vers le bas) : 1) la densité du plasma d'électrons,  $n_e$ . Cette densité est élevée à gauche de la figure, car le satellite se trouve encore dans la magnétogaine, cette région de compression du vent solaire qui entoure la magnétosphère ; 2) la composante Nord-Sud du champ magnétique ( $B_z$ ). Le changement d'orientation de  $B_z$  indique la traversée de la magnétopause et l'entrée du satellite dans la magnétosphère où le champ magnétique est orienté vers le Nord ( $B_z > 0$ ) ; 3) Le mouvement de va-et-vient de la magnétopause que reflètent les changements de signe de la vitesse de cette frontière ( $v_{mpbl}$ ) ; 4) la position de la magnétopause ( $x_{mpbl}$ ) et du satellite ( $x_{sc}$ ) ; 5) ainsi que la pression dynamique du vent solaire ( $p_{ram}$ ) mesurée par le satellite ACE situé en amont de la magnétosphère (au point de Lagrange  $L_1$  du système Terre-Soleil caractérisé par l'équilibre des forces gravitationnelles dues au Soleil et à la Terre). Notez que l'échelle de temps a été décalée pour tenir compte de la propagation du vent solaire depuis le point  $L_1$  jusqu'à la position du satellite CLUSTER. Cette figure montre clairement l'anti-corrélation entre  $x_{mpbl}$  et  $p_{ram}$ . Lorsque la pression du vent solaire s'accroît, la magnétopause se rapproche de la Terre, et vice et versa.

Grâce aux données de CLUSTER, l'IASB a notamment mis au point une méthode de reconstruction qui permet de cartographier les mouvements d'oscillations de la magnétopause.

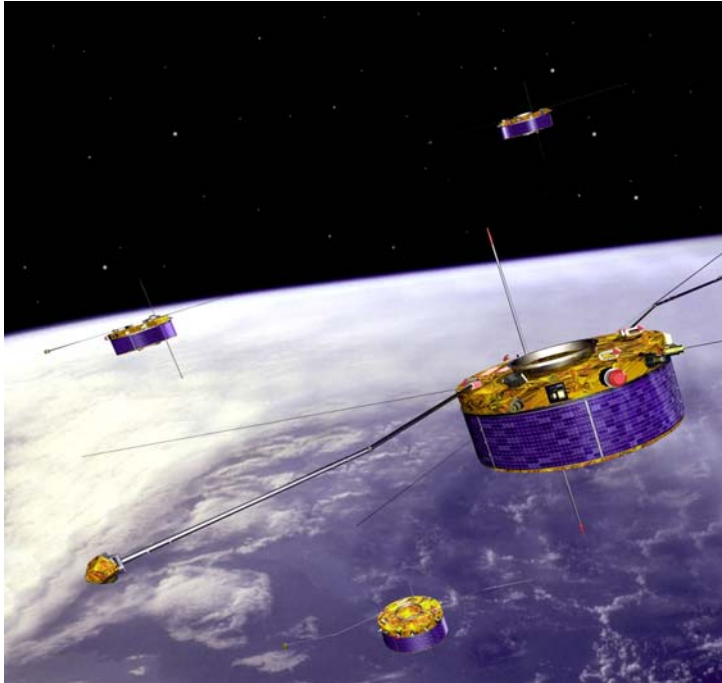


La figure du haut représente schématiquement la structure à deux dimensions de la magnétopause lorsque cette frontière est animée d'un mouvement d'ensemble dans la direction de sa normale et est, en même temps, parcourue par des ondes de surface. La figure du bas est une reconstruction de la densité des ions (représentée par un code couleur : le rouge indique une densité élevée propre à celle rencontrée dans la magnétogaine ; le bleu, une densité plus faible propre à celle rencontrée dans la magnétosphère). Cette reconstruction est établie dans un système de référence qui glisse le long de la magnétopause avec la vitesse des ondes de surface. La magnétogaine est en haut, la magnétosphère en bas, le Soleil à gauche, la queue magnétosphérique à droite. L'échelle de l'axe des  $x$  (la composante normale à la magnétopause) est agrandie. Les flèches représentent les champs de vitesse du plasma dans le plan  $x$ - $y$ . On constate que la longueur des ondes de surface est de l'ordre de 7 rayons terrestres et leur amplitude de l'ordre de deux rayons terrestres. La reconstruction montre clairement une forme d'ondes non sinusoïdale, plus escarpée dans la direction de propagation.

L'IASB s'est également illustré en proposant un modèle de la structure interne de la magnétopause et un modèle de pénétration impulsive des éléments de plasma du vent solaire à travers la magnétopause.

Les quatre satellites de la mission CLUSTER de L'ESA qui évoluent en formation rapprochée ont également permis d'étudier en détail la région de la plasmasphère.





*Les quatre satellites CLUSTER évoluant en formation rapprochée pour donner une vue tridimensionnelle de l'environnement spatial de la Terre.*

### **La plasmasphère**

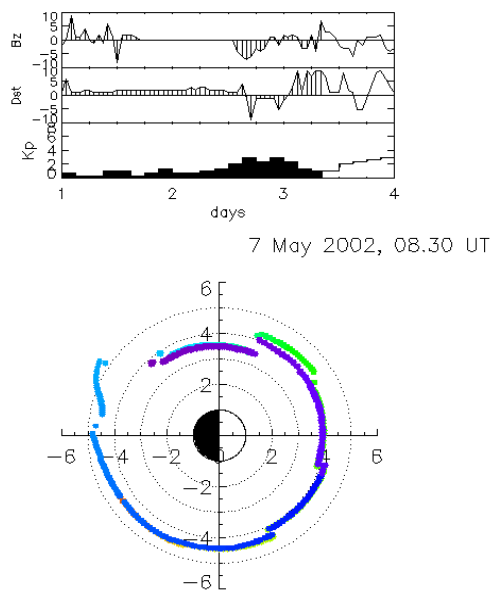
La *plasmasphère* constitue le prolongement de l'ionosphère aux basses et moyennes latitudes. Elle contient de très faibles quantités d'électrons libres et d'ions positifs (> 90 % de  $H^+$ , < 10 % de  $He^+$ , ainsi que des ions  $O^+$ ,  $D^+$ ,  $He^{++}$ ,  $O^{++}$ ,  $N^+$ , et  $N^{++}$  en beaucoup plus faibles concentrations) provenant de l'ionosphère et piégés dans le champ magnétique terrestre. À une certaine distance de la Terre, appelée *plasmopause*, la densité des particules décroît de façon abrupte. Cette discontinuité dans la densité de plasma, qui constitue la limite de la plasmasphère, se situe entre 2 et 8 rayons terrestres selon l'intensité de l'activité géomagnétique. Un modèle dynamique de la formation de la plasmopause a été développé à l'IASB. Il permet de prédire la position de la plasmopause dans le plan équatorial en fonction du niveau de l'activité géomagnétique. Cette activité géomagnétique est caractérisée par un indice Kp s'échelonnant de 0 à 9.

En 2004-2005, des simulations dynamiques de formation de la plasmopause ont été produites et les prédictions du modèle ont été comparées aux observations de l'expérience EUV (Extreme Ultra Violet) embarquée à bord du satellite IMAGE de la NASA, lancé le 25 Mars 2000. Une collaboration avec l'Université d'Arizona a permis à l'IASB d'avoir accès à ces observations. L'instrument EUV détecte les photons de 30,4 nm de longueur d'onde diffusés par les ions d'hélium de la plasmasphère. Les images prises au-dessus des pôles, près de l'apogée du satellite, permettent pour la première fois d'avoir une vue globale de la plasmasphère et révèlent les détails d'une région hautement dynamique. De nouvelles structures telles que les « plumes », les « épaules » et les « canaux » ont ainsi été découvertes et modélisées.

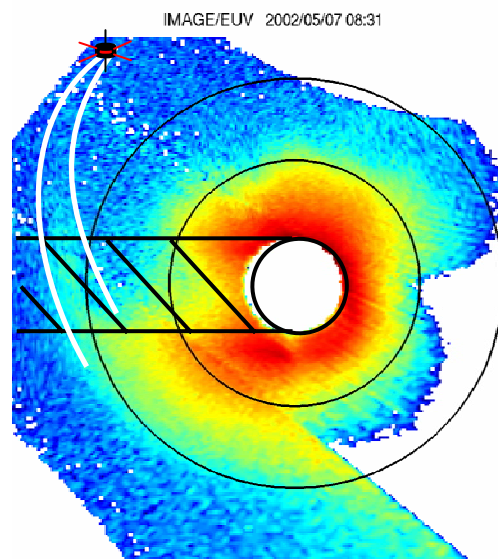
Les satellites CLUSTER traversent régulièrement la plasmasphère lorsque celle-ci s'étend au-delà de quatre rayons terrestres dans le plan équatorial. Les données de densité transmises par l'expérience WHISPER (Waves of High frequency and Sounder for Probing of Electron density by Relaxation) à bord de la mission CLUSTER, ont également été analysées à l'IASB. Elles ont permis la découverte d'irrégularités de plasma de petites dimensions mais de grande amplitude dans la région de la plasmopause, corroborant ainsi le modèle de formation de la plasmopause développé à l'IASB. Les comparaisons avec les mesures simultanées d'IMAGE et de CLUSTER ont également permis de mieux comprendre la formation des plumes lors de l'augmentation de l'activité géomagnétique.

En 2006, les mesures les plus récentes de CLUSTER et d'IMAGE seront analysées et comparées avec les simulations. Le modèle de plasmopause sera amélioré et mis en ligne sur le site de l'Institut. Il sera également complété pour donner non seulement la position de la plasmopause mais aussi la densité à l'intérieur de la plasmasphère. L'influence du champ électrique, de la vitesse du vent solaire et le couplage avec l'ionosphère sera également étudiée en détail.

a.

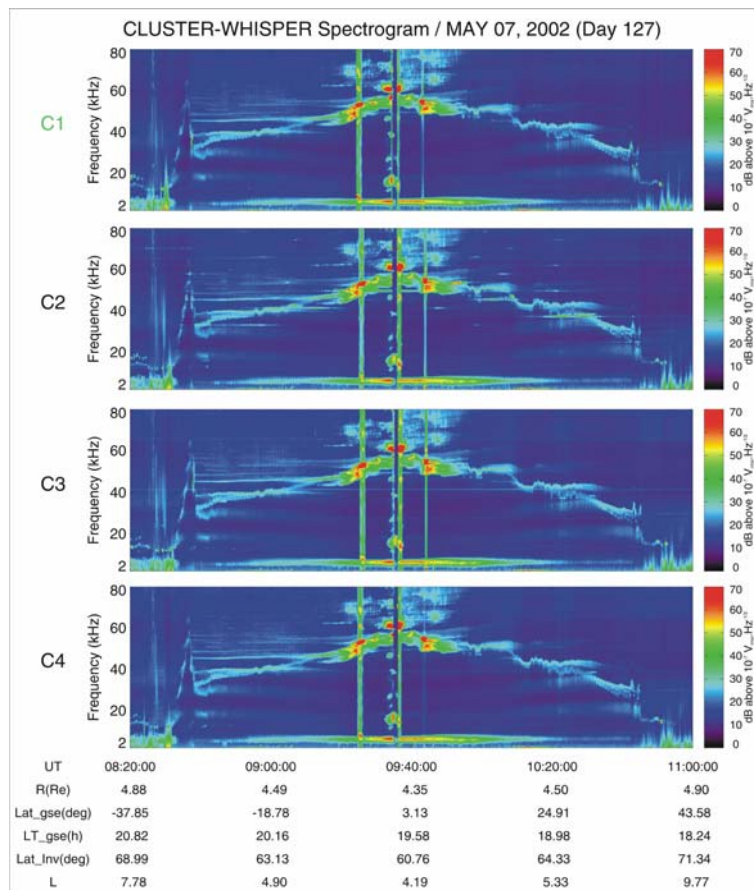


b.



c.





- a. *Vue équatoriale de la plasmopause prédite pour le 7 mai 2002 à 8h30 par le modèle développé à l'IASB. L'indice Kp est monté jusqu'à 3+ durant cet événement. Le modèle prédit l'apparition d'une plume du côté nuit.*
- b. *Une plume est également bien visible sur l'observation de la plasmasphère obtenue par le satellite IMAGE projetée dans le plan de l'équateur magnétique. La plasmopause correspond à la région où la densité diminue de façon abrupte.*
- c. *Spectrogramme mesuré par l'instrument WHISPER à bord de chacun des quatre satellites de CLUSTER. La ligne bleu clair est proportionnelle à la densité des électrons le long de l'orbite des satellites. La brusque augmentation de densité observée vers 8h30 correspond à un moment où les satellites CLUSTER se trouvaient dans le prolongement de la plume (voir panneau b).*

## Les aurores

Les aurores sont une des manifestations les plus spectaculaires du couplage entre l'ionosphère et la magnétosphère. Les arcs auroraux discrets sont une des formes aurorales les plus intenses, toujours situés le long du bord interne de l'ovale auroral. Ils sont la conséquence de la précipitation dans l'ionosphère d'électrons énergétiques provenant du feuillet de plasma. Ces électrons sont accélérés vers la Terre par une différence de potentiel électrique, alignée le long des lignes de champ magnétique. En dépit de nombreuses études réalisées depuis 25 ans, la compréhension des mécanismes de formation des arcs auroraux reste un problème encore peu connu. Les travaux entamés récemment à l'IASB visent à présenter une image unifiée du couplage électrodynamique entre les processus ionosphériques de haute latitude se produisant à petite échelle spatiale, comme les arcs auroraux

discrets, et des processus magnétosphériques se produisant à plus grande échelle spatiale (cisaillements d'écoulement au travers de couches frontières magnétosphériques, sous-orages magnétiques). A cette fin, des études ont abordé l'origine de la chute de potentiel électrique, concentrée dans une zone d'altitude aurorale assez restreinte et responsable de l'accélération des électrons auroraux au-dessus des arcs discrets. Dans ce but, un modèle de dynamo génératrice a été développé.

Le couplage entre la magnétosphère chaude et raréfiée et l'ionosphère froide et dense constitue un thème de recherche important en raison des répercussions engendrées sur l'environnement ionisé de la Terre. D'immenses régions de l'espace terrestre proche sont reliées par les lignes de champ géomagnétique. Des régions clés de la magnétosphère, telles que la magnétopause et la couche frontière de basse latitude sont des sites où l'énergie, la quantité de mouvement et la masse, d'origine solaire, transportées par le vent solaire, sont transférées vers la magnétosphère terrestre. L'ionosphère et la magnétosphère réagissent dynamiquement aux variations imposées par le vent solaire. Des courants circulent le long des lignes de champ magnétique et transportent l'énergie des points « chauds » de la magnétosphère, comme le feuillet de plasma et sa couche frontière. En raison de la configuration particulière du champ géomagnétique, qui est de type dipolaire, ces points « chauds » magnétosphériques se projettent dans les régions (aurorales) de haute latitude de l'ionosphère, en suivant les lignes du champ. Par conséquent, ces régions aurorales, bien que confinées dans une fourchette d'environ 10 degrés de latitude, sont couplées à de vastes régions de la magnétosphère lointaine.

Au sol, l'activité intense dans le système magnétosphère - ionosphère est détectée par des caméras ciel entier, des radars, des ionosondes et des magnétomètres. L'activation des formes aurorales, les phases des sous-orages magnétiques, les fluctuations du champ électrique et de la conductance ionosphérique figurent parmi les manifestations les plus spectaculaires du couplage magnétosphère - ionosphère.

Des flux importants de particules ionosphériques s'échappent, soit dans la magnétosphère externe, soit dans l'espace interplanétaire. Des variations de la conductance ionosphérique dues au flux d'énergie précipitant modifient l'équilibre général du système global du courant électrique associé à l'arc auroral discret. Par conséquent, il est fondamentalement important d'arriver à comprendre les lois et processus physiques qui régissent la dynamique du couplage complexe entre l'ionosphère aurorale et la magnétosphère externe.

A l'IASB, nous visons à donner une description à deux dimensions du couplage ionosphère - magnétosphère, en partant des principes de base régissant le mouvement des particules chargées, et en utilisant des conditions frontières pertinentes au niveau de l'ionosphère et de la magnétosphère. Le plasma sera décrit par des fonctions adéquates de distribution des vitesses pour les populations qui interagissent mutuellement dans un tube de flux magnétique de type auroral.

En 2006 vient de débuter un projet qui consiste à utiliser conjointement des observations d'arcs auroraux discrets obtenues à partir du sol et par satellite afin de mieux comprendre les interactions complexes entre l'ionosphère et la magnétosphère. La tomographie optique à partir de stations au sol et les mesures in

situ réalisées à bord de satellites sont deux sources d'information complémentaires qui peuvent être utilisées pour mieux comprendre la physique des plasmas auroraux. La tomographie est une technique d'inversion empruntée à l'imagerie médicale qui permet de déterminer la structure spatiale de l'émission aurorale en 3 dimensions à partir d'images bidimensionnelles obtenues simultanément depuis différentes directions. Le spectre d'énergie des électrons qui précipitent le long des lignes de champ magnétique peut être déduit de cette distribution en 3 dimensions de l'émission aurorale si des observations multi-spectrales sont disponibles. Pour cela, il faut en outre disposer d'un modèle qui décrit la physique de l'ionosphère et prédit la distribution de l'émission aurorale en connaissant le spectre d'énergie des électrons incidents. Il s'agit donc également d'un problème inverse. Le problème purement géométrique (la tomographie) et celui lié à la physique de l'émission peuvent être résolus séparément ou ils peuvent être combinés afin de résoudre les deux inversions en une seule étape. D'autre part, les populations d'électrons et d'ions magnétosphériques peuvent être étudiées au moyen de mesures in situ de satellites. Avec leur orbite polaire très excentrique, les quatre satellites Cluster passent fréquemment au-dessus de l'ovale auroral et croisent des lignes de champ magnétique qui s'étendent de la zone aurorale à haute latitude jusqu'au feuillet neutre dans la queue magnétosphérique.

Avec plusieurs stations au sol situées dans le Nord de la Scandinavie, un des objectifs du projet ALIS (Auroral Large Imaging System) est justement la tomographie des émissions aurorales. Les caméras de ces stations sont équipées de filtres permettant l'imagerie des aurores à plusieurs longueurs d'onde spécifiques. L'IASB va développer une collaboration avec l'équipe du projet ALIS, localisée à Kiruna en Suède, afin de développer des méthodes d'inversion pour étudier des



événements dits conjugués, pendant lesquels la projection magnétique de l'orbite des quatre satellites Cluster traverse le champ de vision de ALIS. En confrontant les modèles et les données, nous tenterons de mieux comprendre l'origine de la formation des arcs auroraux.

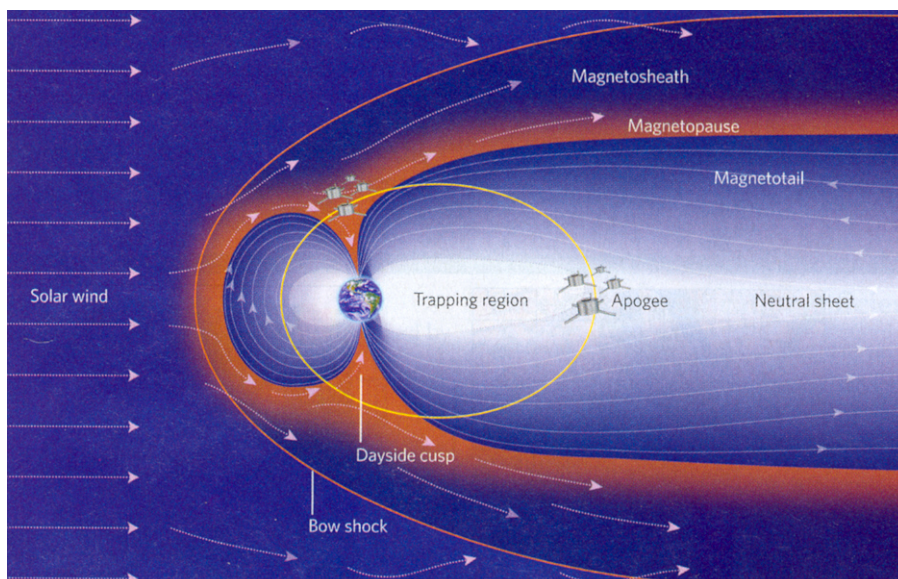
*Arcs auroraux discrets observés en 2000 en Alaska, près du maximum d'activité solaire. (Photo: Jan Curtis)*

## ***La turbulence dans les cornets polaires***

La turbulence est omniprésente dans les fluides et les plasmas. Elle peut être générée par une grande variété de phénomènes tels que des cisaillements d'écoulement, des gradients de densité ou de température, etc. La turbulence est caractérisée par des fluctuations des propriétés physiques à des échelles de longueur très différentes qui interagissent de manière non linéaire et produisent des structures organisées sous la forme de vortex. Ces vortex sont fréquemment observés dans des domaines d'étude très différents tels que l'océanographie, la climatologie ou l'aérodynamique des ailes d'avions. Ils sont également fréquemment observés dans les plasmas magnétisés tels que le vent solaire ou les magnétosphères planétaires. La turbulence est souvent décrite comme un processus dans lequel l'énergie est transférée de vortex à grande échelle à des vortex de plus en plus petits jusqu'à une échelle spatiale à laquelle l'énergie est finalement dissipée. C'est le schéma classique de la cascade de Kolmogorov, bien connu dans la turbulence fluide.

La transposition de cette cascade aux plasmas spatiaux n'est pas évidente. Dans le cadre général de la magnétosphère terrestre, la compréhension de ces processus de turbulence permettra de comprendre comment l'énergie injectée à grande échelle par le vent solaire est progressivement transmise à des structures de dimensions spatiales plus petites pour finalement être dissipée et chauffer le plasma ambiant.

Les cornets polaires forment la frontière à haute latitude entre les lignes de champ magnétiques fermées du côté jour (le côté de la Terre exposé au Soleil) et les lignes de champ magnétiques qui sont ouvertes et étirées vers l'arrière pour former les lobes magnétosphériques dans la partie nuit. La localisation et la forme des cornets polaires dépendent essentiellement de la direction du champ magnétique interplanétaire et des paramètres du vent solaire. Dans les cornets polaires, on a un couplage direct entre les plasmas du vent solaire et de l'ionosphère, qui se caractérise entre autres par des fluctuations importantes du champ magnétique. L'étude de la topologie du champ magnétique dans ces régions est importante pour comprendre comment la masse et l'énergie sont transférées entre les différentes régions de la magnétosphère.



*Coupe transverse de la magnétosphère Terrestre. Le Soleil est à gauche. Le plasma du vent solaire est chauffé et ralenti lors de sa rencontre avec le champ magnétique terrestre via une onde de choc. Une partie du plasma de la magnétogaine s'écoule à travers les cornets polaires vers les hémisphères nord et sud. L'orbite des satellites Cluster illustrée sur ce diagramme croise la région des cornets polaires.*

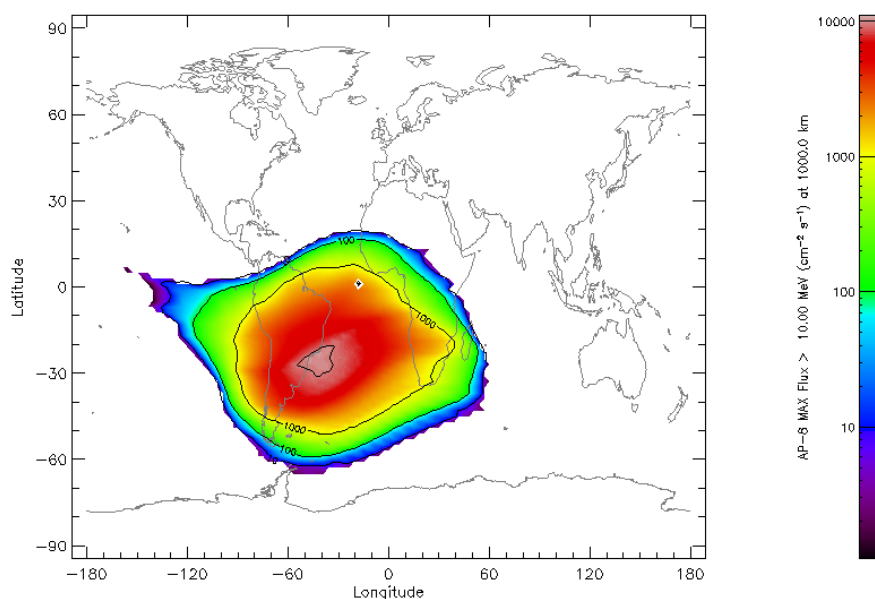
Nous avons utilisé les données à haute résolution de champ magnétique mesurées par le magnétomètre FGM à bord des quatre satellites Cluster pour investiguer la turbulence du plasma dans les cornets polaires. Différentes analyses complémentaires ont été réalisées pour caractériser la turbulence magnétique dans ces régions et comprendre comment l'énergie est transférée.

### **Les ceintures de radiation de Van Allen**

Les ceintures de radiation, découvertes en 1958 par James Van Allen, furent immédiatement reconnues comme étant d'une importance considérable pour les missions spatiales. Il s'agit de régions toroïdales formées par des particules chargées électriquement, très énergétiques, qui sont piégées dans le champ magnétique terrestre. Les particules des ceintures de Van Allen, principalement des électrons, des protons et quelques ions plus lourds, possèdent des énergies cinétiques supérieures à 30 keV. Bien que ces particules de haute énergie ne participent pas significativement à la densité magnétosphérique (due principalement à des particules de plus faible énergie), elles constituent une population importante car elles peuvent endommager les composants électroniques et les cellules photoélectriques des satellites. De plus, ces particules énergétiques peuvent affecter les mesures effectuées dans l'espace, charger électriquement la surface du satellite, abîmer les composants optiques, sans compter qu'elles constituent un danger pour les équipages spatiaux. Pour les protéger, des écrans doivent être placés, mais ceux-ci ne doivent pas être trop lourds pour que le poids du satellite ne soit pas trop élevé.

C'est pourquoi, l'IASB a développé pour l'Agence Spatiale Européenne (ESA) un système qui permet de modéliser les flux de particules de l'environnement spatial ainsi que leurs effets sur les systèmes et les satellites. Ce système appelé « Space ENVironment Information System » (SPENVIS) permet d'analyser et de cartographier les flux de particules mesurés par de nombreux satellites dans les ceintures. Il est également possible d'évaluer les flux qui seront rencontrés par un satellite en introduisant les paramètres de son orbite. Des calculs de dose de radiation sont fournis. L'influence de l'activité solaire et le mouvement séculaire du centre du dipôle terrestre ont également été modélisés. Ce système permet d'améliorer la prédiction des spectres d'énergie et des doses de radiation accumulées sur un véhicule spatial se déplaçant dans la magnétosphère. Cette prédiction est utile afin de calculer le temps de vie et de détérioration des cellules photoélectriques, des panneaux solaires et d'autres équipements électroniques, ainsi que les protections à envisager pour les missions habitées. Ce système est amélioré chaque année par l'introduction de nouvelles mesures satellitaires dans la base de données.





*Carte des flux de protons qui ont une énergie supérieure à 10 MeV à 1000 km d'altitude prédite par le modèle AP8 sur SPENVIS. A basse altitude, les flux sont particulièrement élevés au-dessus de l'Atlantique Sud.*

### C. Valorisation and Exploitation

L'unité rassemble plusieurs groupes et subdivisions dont le travail a pour but la valorisation et l'exploitation des résultats scientifiques obtenus à l'institut et la mise en place d'activités de dispense/de fourniture de services pour des utilisateurs issus des communautés scientifiques et industrielles.

Quatre groupes font actuellement partie de l'unité :

SPENVIS (système d'information pour l'environnement spatial) est une interface web permettant de modéliser l'environnement spatial et ses effets, dans le but d'aider les ingénieurs de engins spatiaux à effectuer une évaluation rapide des dangers environnementaux.

<http://www.spenvis.oma.be>

BASCOE (système belge d'assimilation des observations chimiques d'Envisat) est un service opérationnel fournissant des analyses chimiques et des prévisions pour la stratosphère grâce à l'assimilation des observations chimiques faites par les instruments embarqués à bord du satellite Envisat

<http://bascoe.oma.be>

B.USOC est un centre de support et de conduite d'expériences (USOC) mis en place par l'ESA et la Belgique. Le rôle principal du centre est de promouvoir les programmes de recherche spatiale et les occasions de vol auprès de la communauté scientifique belge dans les universités et dans les instituts fédéraux. Ensuite, il fournit l'appui aux scientifiques quant à la définition, au développement et à la conduite de leurs expériences dans les différents domaines de la

recherche spatiale : Microgravité, Observations de la Terre, Sciences Spatiale et Technologie Spatiale.

<http://www.busoc.be>

TEMIS et PROMOTE : Extraction du dioxyde d'azote troposphérique depuis les instruments GOME et SCHIAMACHY

<http://www.temis.nl/>

<http://www.gse-promote.org/>

### ***Le ESA SPace ENVironment Information System (SPENVIS)***

La planification des missions spatiales nécessite une analyse de l'environnement spatial et de son impact sur les systèmes spatiaux. L'environnement spatial comprend les environnements aléatoires suivants :

- Environnement de radiation dû aux ceintures de radiation, aux particules solaires et aux rayons cosmiques ;
- Les environnements de plasma de l'ionosphère et des sous-orages géomagnétiques ;
- Les environnements gazeux neutres, y compris l'oxygène atmosphérique atomique ;
- Les débris de micro-météorites et spatiaux ;
- Les champs magnétiques ;
- Les émissions solaires

Des modèles empiriques ou quasi-empiriques de ces environnements aléatoires ont été développés par différentes organisations, souvent indépendantes les unes des autres. En conséquence, la disponibilité des modèles existants n'est pas toujours connue des utilisateurs potentiels. De plus, le problème de la mise à jour des modèles et de l'acquisition de versions à jour n'est pas facile.

Le SPace ENVironment Information System (SPENVIS) développé pour l'ESA/ESTEC procure un accès aisé aux plus récents modèles de l'environnement spatial, en combinaison avec un générateur d'orbite, via une interface intégrée World-Wide Web (WWW) conviviale. L'interface comprend un paramètre d'entrée avec des paramètres par défaut étendus, la définition des environnements des utilisateurs, la production structurée de résultats (tant dans la forme graphique que textuelle), des informations et une aide en ligne. Les outils correspondent aux standards européens pour l'environnement spatial, actuellement développés parallèlement.

#### Fonctionnalité générale SPENVIS

Le système SPENVIS utilise les facilités WWW au travers des caractéristiques suivantes :

- accès via les réseaux informatiques au système centralisé;

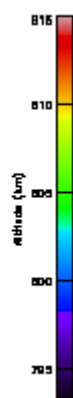
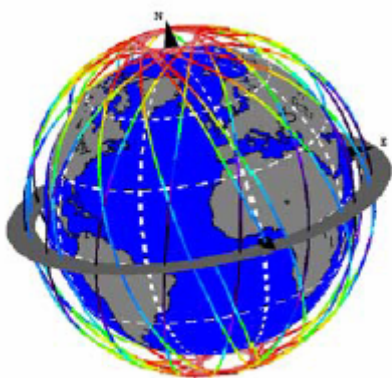


- des fonctionnalités faciles d'emploi recourant à l'utilisation des valeurs par défaut pour les différents paramètres d'entrée, pour la structuration hiérarchique des données et la validation des données ;
- identification des utilisateurs permettant la création d'environnements personnels, dans lesquels les résultats précédents et les entrées sont retenus, même en sortant du système.
- Génération automatique ou/et spécifiée par l'utilisateur des données sortantes, dans des graphiques ou des tables, comme les images alignées ou les formats de graphiques téléchargeables.
- Aide en ligne étendue et liens vers de la documentation élaborée.
- Interface vers des applications à distance, y compris les paramètres d'entrée, le téléchargement de fichiers, et le téléchargement de résultats.

L' URL pour SPENVIS est <http://www.spennis.oma.be/>.

SPENVIS est basé sur des modèles standards reconnus au niveau international dans de nombreux domaines. Il utilise un générateur d'orbite développé à l'ESA pour produire des fichiers de points orbitaux nécessaires dans différents aspects de l'analyse de mission, et peut également générer des cartes et des profils pour étudier la distribution géographique de paramètres des modèles. Les résultats d'un modèle SPENVIS sont présentés sous forme de rapports et de fichiers de données qui peuvent être téléchargés par l'utilisateur, et sous une variété de types de graphes (linéaires, cartes, et graphiques 3-D) dans différents formats (GIF, PS, JPG, VRML, ...). Des outils d'aide élaborés sont fournis dans SPENVIS : des pages d'aide relatives au contexte procurent des informations sur les paramètres et les usages du modèle, des pages de base contiennent du matériel approfondi sur l'environnement spatial et les modèles, un guide de l'utilisateur et des liens vers d'autres sites sont également disponibles. Les pages d'aide sont référencées pour la navigation rapide, qui est améliorée par un moteur de recherche.

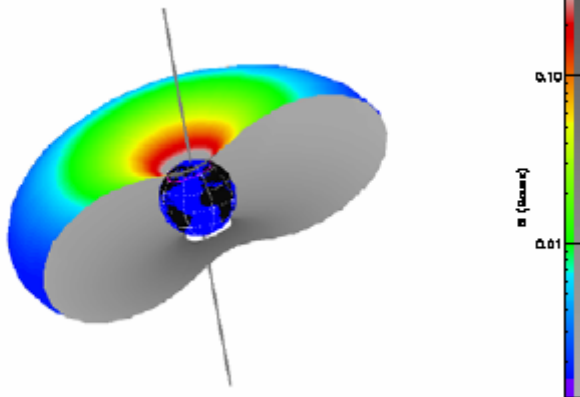
### Modèles implémentés dans SPENVIS



La plupart des modèles implémentés dans SPENVIS nécessitent en entrée un ensemble de points sur la trajectoire du vaisseau ou un ensemble de points géographiques définis par l'utilisateur. Ces ensembles de points sont produits par deux outils : le générateur d'orbite et la grille coordonnée. Quand on lance le générateur d'orbite ou de grille, toutes les données précédentes obtenues avec des modèles qui utilisent l'outil de coordonnée respectif sont effacées.

Cela permet d'assurer la correspondance entre les résultats et d'éviter les erreurs dans les routines qui produisent les données graphiques. Les paramètres d'entrée pour les modèles ne sont pas effacés, afin qu'ils puissent être lancés une nouvelle fois de la même manière.

## Analyse de radiations



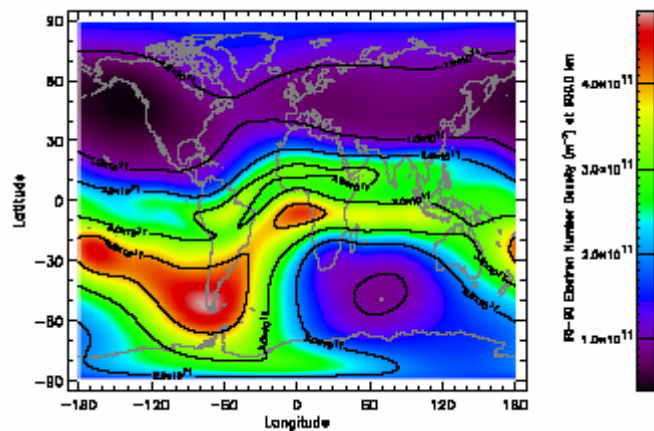
Le module d'analyse de radiations dans SPENVIS fournit un accès aux modèles de ceintures de radiation, aux modèles de protons solaires, et à la suite de modèles CREME pour les rayons cosmiques. La conversion de coordonnées géographiques à des coordonnées magnétiques se fait en interne sans interférence de l'utilisateur, assurant la correspondance dans l'application de modèles de champs magnétiques, souvent sources de

confusion et d'erreur. Les modèles de champs magnétiques internes et externes peuvent également être lancés séparément pour l'étude de la distribution du champ magnétique et des paramètres liés sur une orbite ou une grille de coordonnées géographiques, ou pour générer et visualiser les coquilles magnétiques. Les modèles de champ magnétique interne et externe les plus utilisés ont été implémentés dans SPENVIS.

SPENVIS contient des codes SHIELDDOSE pour l'évaluation des doses totales et le code EQFLUX pour les fluences de dommages équivalents (électron 1 Mev équivalent). Ces outils ont été améliorés à l'aide d'un code pour le calcul de la perte d'énergie non-ionisante (NIEL) ou de la dose non-ionisante. Ce paramètre gagne de l'importance puisqu'il représente le meilleur moyen de quantifier l'environnement pour l'évaluation des effets dommageables des déplacements tels que la dégradation de l'efficacité de transfert de charge des CDD, et est proposé maintenant comme un meilleur paramètre pour l'évaluation des dommages des cellules solaires. Conjointement avec CREME et les modèles de protons piégés et de protons solaires, l'utilisateur peut calculer le taux de bouleversement d'un événement isolé des ions cosmiques et solaires et de protons piégés et solaires. Les protections des cellules solaires et des vaisseaux sont prises en compte dans le calcul de ces paramètres. De plus, un outil géométrique pour le calcul des distributions d'écrans de protection pour des géométries de vaisseaux simples est disponible, ainsi qu'un outil pour adapter la distribution des protections aux courbes de dose ionisante et non-ionisante.

MULASSIS est un outil basé sur une simulation Monte-Carlo pour l'analyse des fluences de doses et de particules associées à l'usage de boucliers de radiations. Les utilisateurs peuvent définir les géométries des écrans protecteurs et des détecteurs comme des couches planes ou sphériques, avec le matériel dans chaque couche défini par sa densité et sa composition d'éléments ou d'isotopes. Les particules incidentes peuvent être n'importe quelles particules du code Geant4, y compris des protons, des électrons, des gammas, des alphas et des ions légers. Il y a un large choix pour leur énergie initiale et la distribution angulaire. De plus, le spectre de radiation produit par SPENVIS peut être introduit quand l'outil est utilisé dans ce système.

## Atmosphère et ionosphère



Les modèles d'atmosphère neutre et d'ionosphère les plus souvent utilisés ont été implémentés dans SPENVIS. Ces modèles peuvent être évalués, d'une part, sur une grille de points pour produire des cartes du monde des températures ou des densités, d'autre part sur une gamme de coordonnées pour produire des profils de densité, ou encore sur une gamme d'un des paramètres de modèle pour un point géographique. De plus, les densités numériques peuvent être calculées

le long de la trajectoire d'un vaisseau spatial, et les flux et les fluences de particules sur une surface orientée peuvent être déterminés.

## Chargement de vaisseaux

On a longtemps manqué d'un outil pour l'évaluation au niveau d'ingénierie du problème de chargement interne. Cette lacune a récemment été comblée par le développement d'un outil DICTAT par DERA pour l'ESA. Non seulement il y a un manque d'outils d'analyse mais aussi de méthode pour spécifier les risques, qui est palliée par DICTAT. DICTAT calcule le courant d'électron qui passe dans le bouclier conducteur et est déposé dans un diélectrique. Il a un modèle d'environnement d'électron intégré. Le champ électrique maximal dans le diélectrique est trouvé à partir de la charge déposée. Le champ est comparé avec le champ de rupture pour le diélectrique pour évaluer si le matériel risque une décharge électrostatique. Le champ de rupture peut être un champ déduit de faisceaux d'irradiations, également à l'aide de l'outil. Tandis que l'outil standard pour l'évaluation du chargement de faisceaux est le code 3-D NASCAP, SPENVIS a implémenté l'outil non-géométrique DERA EQUIPOT pour évaluer la sensibilité du matériel au chargement dans des environnements orbitaux typiques, y compris des environnements polaires et GEO. Tandis qu'il ne traite pas explicitement la géométrie, il modélise le comportement de chargement d'un modèle de matériaux qui est utile pour étudier les charges différentielles. SPENVIS inclut également SOLARC, pour l'évaluation du courant de collection et du potentiel de flottement des grilles solaires dans LEO.

Le système comprend également un accès aux données des événements de chargement de surface sur les satellites CRRES et Gorizont, sous forme de spectrogrammes et de paramètres d'ajustement de double Maxwelliennes.

## Météorites et débris

Le modèle de météorite Grün et le modèle de débris NASA90 ont été ajoutés au système. L'implémentation du modèle de débris NASA96 ainsi que les modèles de pénétration de particule/mur pour l'analyse des risques de dommages sont en progression.

### Accès à l'environnement des bases de données.

SPENVIS est capable de produire des graphes globaux des bases de données satellitaires. Les données de Meteosat, GOES, SAMPEX, UARS, AZUR, CRRES, et ISEE ont été implémentées, ainsi que les données d'environnement de radiation de l'instrument REM sur STRV.

### Intégration avec un standard dans l'environnement spatial

La coopération européenne sur les standards de l'espace (ECSS) est un système de standards harmonisés pour la gestion et l'ingénierie des projets spatiaux. Un des standards concerne l'environnement spatial. SPENVIS a permis « d'activer » ce standard afin qu'il soit lié aux utilitaires SPENVIS quand un ingénieur souhaite utiliser un modèle ou une méthode à laquelle il est fait référence dans le standard. Il est placé à côté des modèles de telle manière que l'ingénieur peut consulter le standard de manière efficace. Les standards développés par l'ECSS dans le futur dans le domaine des effets de radiation et de chargement de vaisseaux seront intégrés de manière similaire.

### Remerciements

Le projet SPENVIS est financé par le General Support Technology Programme Contract No. 11711.

## **BASCOE**

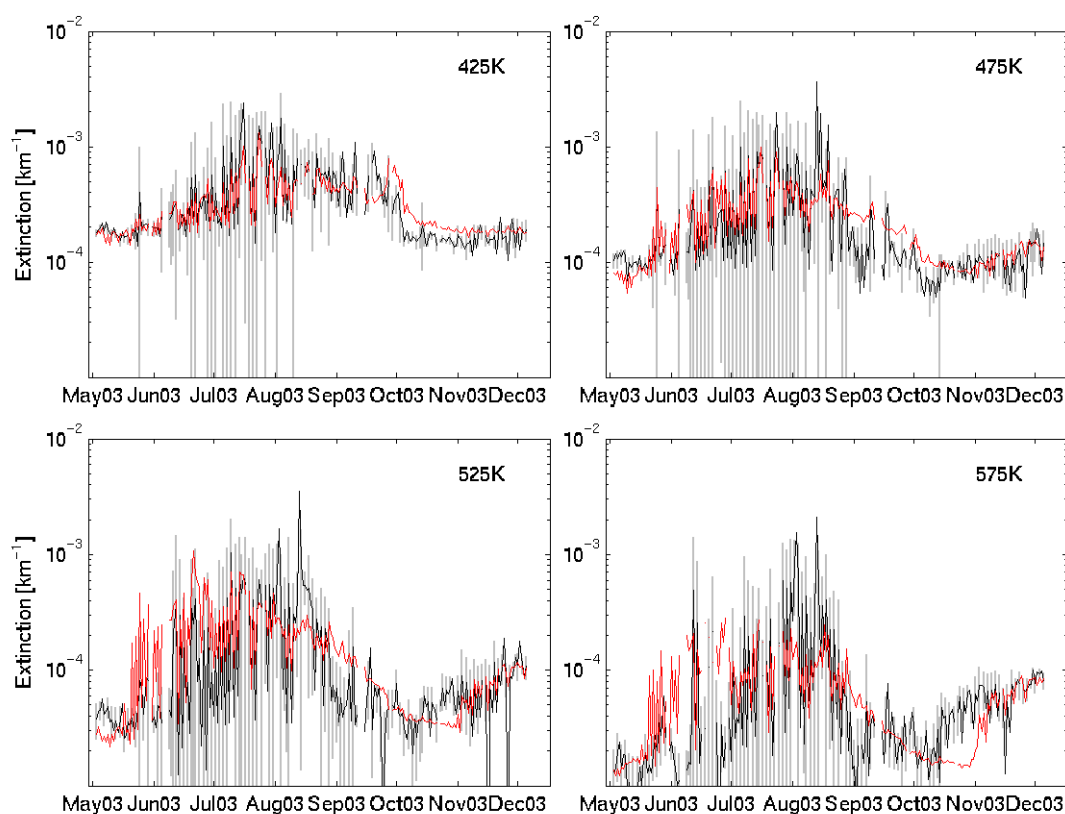
BASCOE ("Belgian Assimilation System of Chemical Observations from Envisat") est un système d'assimilation de données chimiques qui permet d'étudier et de surveiller en détails la stratosphère terrestre. Un tel système optimise l'état d'un modèle synthétisant les lois physico-chimiques de la stratosphère afin que ce dernier reproduise un ensemble d'observations données dans une période de temps. Le modèle est à trois dimensions: il calcule l'évolution de 57 espèces chimiques ainsi que 4 types de nuages stratosphériques polaires (PSC) en tenant compte du transport par les vents, les intégrations chimiques ainsi que la microphysique des PSC. BASCOE utilise la méthode d'assimilation variationnelle à quatre dimensions (4D-VAR, voir Errera and Fonteyn, 2001) qui est la méthode la plus avancée par les centres météorologiques. En 2002, BASCOE fut utilisé de façon opérationnelle pour l'assimilation des observations MIPAS, instrument à bord du satellite Envisat. Ainsi, BASCOE a calculé chaque jour l'analyse ainsi qu'une prévision à dix jours de la composition de la stratosphère. En tenant compte de la complexité d'un tel système, ce fut une première mondiale. Ci-dessous, nous présentons plusieurs parties du projet BASCOE ainsi que les travaux majeurs couvrant la période 2004-2005.

### 1. Modélisation chimique et microphysique

Les 57 espèces chimiques calculés dans BASCOE interagissent au travers de 200 réactions (143 réactions en phase gazeuses, 48 réactions de photodissociations et 9 réactions hétérogènes) et sont transportées par les vents pré calculés par le Centre Européen de Prévision à Moyen Terme (ECMWF). A cela s'ajoute le module PSCBox qui calcule de la microphysique des PSC, développé par N. Larsen à l'Institut de Météorologie Danois (DMI). Ce module décrit la formation et l'évolution des PSC, élément clé dans la destruction d'ozone au printemps et du trou d'ozone dans l'Antarctique.

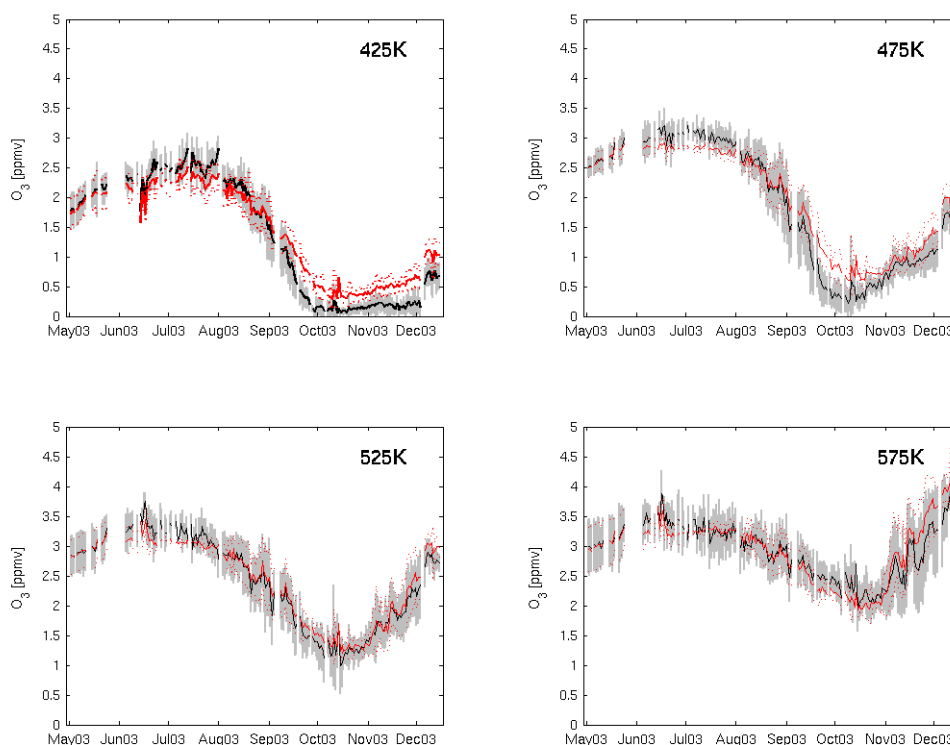
Au cours de l'année 2005, une validation détaillée du calcul des PSC et leur effet sur la chimie polaire durant l'hiver a été accompli. De cette façon, le couplage entre PSCBox et le 3D-CTM a été optimisé. Ainsi, BASCOE est le premier modèle tridimensionnel (Eulérien) incluant un calcul détaillé de la microphysique des PSC de tel sorte que des quantités microphysiques (par ex. l'extinction optiques) et les champs de concentrations chimiques peuvent être comparé à des observations. Cela a permis de valider des processus de microphysiques tel que la formation de PSC, l'activation des chlores, la dénitrification, la déshydratation ainsi que la destruction d'ozone à l'aide de comparaison direct avec des observations. Cela a été fait pour les hivers (Arctique et Antarctique) de 2002 à 2005 en utilisant les observations MIPAS/Envisat, POAMIII et GOME (Daerden et al, Chabrilat et al).

Voici quelques résultats qui sont obtenus pour l'hiver Antarctique de 2003. La figure montre l'évolution de la moyenne journalière dans le vortex polaire de l'extinction à  $1\mu\text{m}$  pour les observations POAMIII et le BASCOE à quatre niveaux isentropiques. L'extinction, qui dépend de l'aérosol et des PSC, permet de tester les performances du modèle. La concordance générale entre modèle et observations est très bonne. Cela montre que le couplage entre PSCBox et les autres parties de BASCOE a été fait correctement.



*Evolution, de mai à décembre 2003, de la moyenne journalière dans le vortex de l'extinction à  $1\mu\text{m}$  mesuré par POAM III (noir) et calculé par BASCOE (rouge) à quatre niveaux isentropiques: 425K, 475K, 525K et 575K (respectivement about 17.5, 19, 21 et 23 km altitude).*

La figure présente l'évolution de la concentration d'ozone mesurée par MIPAS et calculée par BASCOE, pour la même période et les mêmes niveaux. A nouveau, modèle et observations sont proches l'un de l'autre. A partir de Septembre, la destruction d'ozone par les chlores actifs qui produit le "trou d'ozone" est correctement calculée par BASCOE. L'activation des chlores étant le résultat de la microphysique des PSC, cette figure montre que ces processus sont correctement modélisés dans BASCOE.



*Evolution, de Mai à Décembre 2003, de la moyenne journalière dans le vortex du rapport de mélange d'ozone mesuré par MIPAS (noir) et calculé par BASCOE (rouge) à quatre niveaux isentropiques: 425K, 475K, 525K et 575K (respectivement about 17.5, 19, 21 et 23 km altitude).*

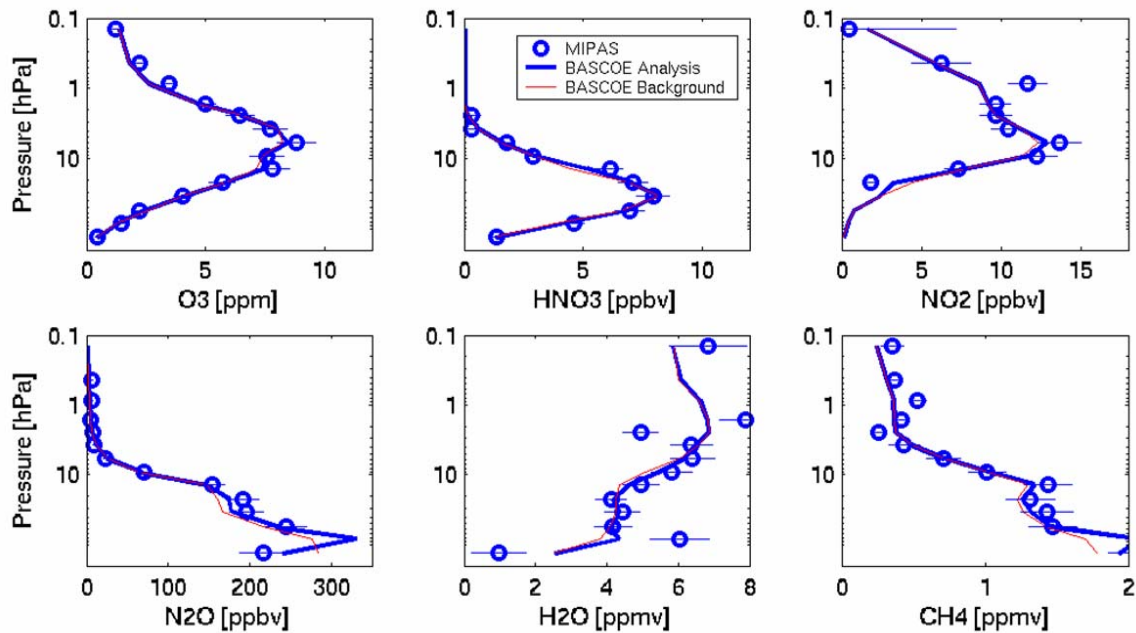
## 2. Assimilation de données chimiques

L'assimilation opérationnelle des données MIPAS par BASCOE fut active tant que l'instrument était en bon état de fonctionnement (Juillet 2002-Mars 2004). Durant cette période, à partir des données MIPAS du jour (ESA near real time) et des champs météorologiques ECMWF correspondants, BASCOE a produit une analyse de la composition stratosphérique mise en ligne dans les 36 heures (<http://bascoe.oma.be> Fonteyn et al, 2002, Fonteyn et al, 2004). Ce service produisait également une prévision à 10 jours ce qui contribuait au développement du concept de prévision chimique.

Suite à des problèmes instrumentaux, l'ESA ne fut plus capable de distribuer en temps réel les données MIPAS. Néanmoins, des données MIPAS recalculées par



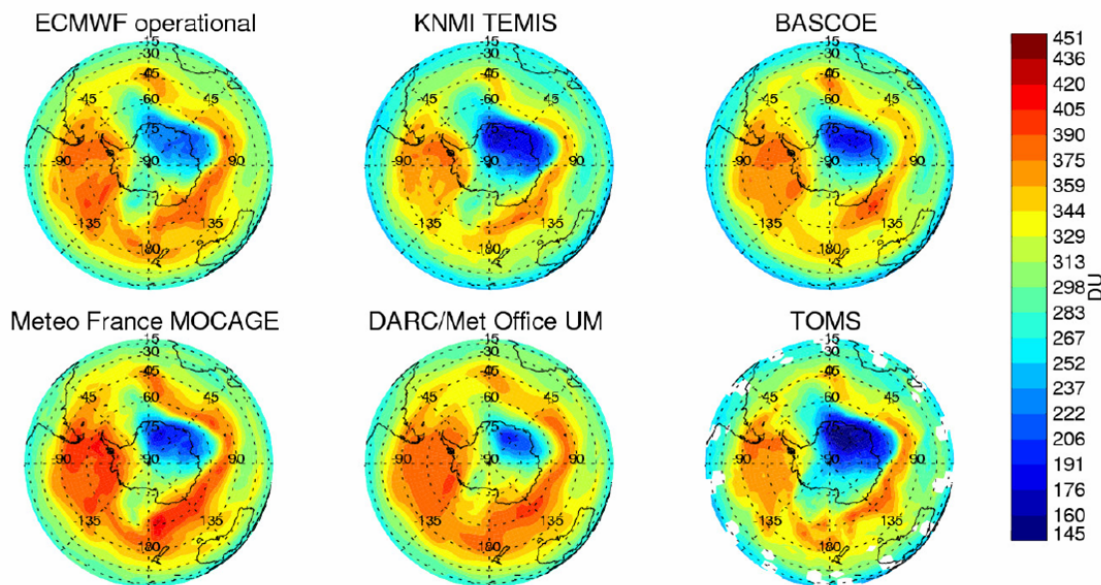
l'ESA (off-line data) ont été assimilées pour fournir une réanalyse complète utilisant les dernières évolutions du modèle. La Figure 3 montre un profil des 6 espèces observées par MIPAS ( $O_3$ ,  $HNO_3$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O$ ,  $H_2O$  et  $CH_4$ ), l'ébauche BASCOE (c.-à-d. BASCOE avant assimilation) et l'analyse BASCOE (c.-à-d. BASCOE après assimilation) correspondante. Notez que l'ébauche est calculée à partir de l'assimilation du jour précédent et qu'elle bénéficie donc de l'information d'observation du passé.



Profils MIPAS (cercles), l'analyse (trait bleu) et l'ébauche (trait rouge) BASCOE correspondante pour les 6 espèces chimiques observées par MIPAS. Ces profils ont été mesurés le 27 Sep. 2003 vers  $-52.7^{\circ}S$ .

Dans le cadre du projet Européen ASSET (Assimilation of Envisat Data), une inter-comparaison d'analyses d'ozone produites par plusieurs systèmes d'assimilations Européen a été effectuée (Geert et al, 2006). Les analyses BASCOE de MIPAS y ont participé. La Figure 4 présente la colonne totale d'ozone déterminé par certains des systèmes participants et la colonne totale mesurée par l'instrument TOMS. A la vue de cette figure, nous constatons que l'analyse BASCOE concorde bien avec TOMS et, dans tous les cas, aussi bien que les analyses des autres systèmes.





Colonne total d'ozone du 8 Nov. 2003 déterminée par 5 systèmes d'assimilations, dont BASCOE, et les mesures TOMS correspondante (Geer et al., 2006)

### 3. Modèle global du climat et de la chimie

Depuis mi 2005, l'équipe BASCOE collabore avec le service météorologique du Canada au travers du projet financé par l'ESA afin de développer un modèle global du climat et de la chimie (GCCM), à savoir la fusion d'un CTM et d'un modèle du climat (GCM). Ce type de modèle calcule donc, interactivement, l'évolution de la composition et de la dynamique atmosphérique. Le but final de ce projet étant de réaliser un système d'assimilation 4D-VAR dans le contexte d'un GCCM qui serait une première mondiale. La participation de BASCOE dans ce projet est justifiée grâce à son expérience de modélisation chimique et d'assimilation.

### 4. L'atmosphère de Mars

Suivant la mise en orbite de la plateforme Mars Express autour de la planète Mars et les mesures SPICAM Light avenir, un nouveau projet d'étude de l'atmosphère Martienne a démarré, basée sur l'expérience BASCOE. Pour cela, le Global Mars Multiscale Model, développé au « Centre For Research in Earth and Space Science » (University of York in Toronto, Canada) sera utilisé par l'équipe BASCOE pour une comparaison des observations SPICAM des constituants chimiques et des nuages de l'atmosphère Martienne.

### **Le B.USOC**

Le B.USOC est un Centre d'aide aux utilisateurs et d'opérations mis sur pied par l'ESA et la Belgique (<http://www.busoc.be>). Le rôle principal de ce centre est de promouvoir les programmes de recherche sur l'espace et les opportunités de vols pour les communautés scientifiques au sein des universités et dans les instituts fédéraux. Il procure par conséquent un support au scientifiques en ce qui concerne la définition, le développement et l'opération de leurs expériences conduites dans

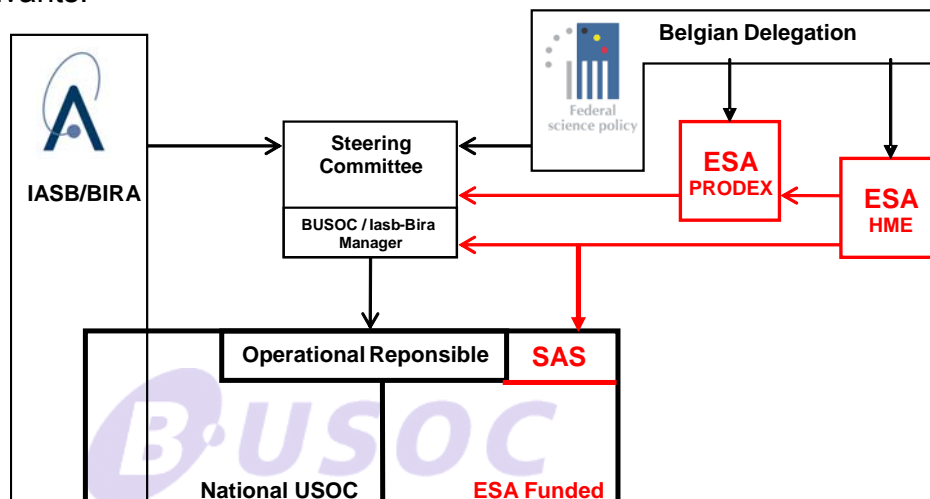
différents domaines de la recherche spatiale : microgravité, observations de la Terre, sciences de l'espace, technologies de l'espace.

Les activités B.USOC sont intégrées dans l'Institut d'Aéronomie de Belgique (IASB) au sein de la division "Valorisation et exploitation". Depuis cette position, le B.USOC a une double fonction de mandataire :

- le B.USOC fera partie intégrante de activités de service de l'IASB.
- Il a une fonction de mandataire envers la Politique Scientifique (BELSPO) pour toutes les activités ESA et bilatérales.

Dans le cadre général de Columbus, le B.USOC prend en charge (1) la gestion du Facility Responsible Centre (FRC) pour l'observatoire externe de surveillance solaire (SMO) et (2) la gestion du Facility Support Centre (FSC) pour le European Drawer Rack (EDR) / Protein Crystallization Diagnostics Facility (PCDF) en collaboration avec le centre FRC ERASMUS (USOC localisé au ESTEC et financé à 50% par la Belgique et à 50% par les Pays-Bas).

La gestion du centre B.USOC est basée sur les aspects fonctionnels et contractuels suivants:



Le B.USOC est administré par un comité directeur composé de membres représentatifs de la Politique Scientifique Fédérale (BELSPO), de l'IASB, et d'un contractant belge (Space Applications Services).

### **B.USOC structure de gestion :**

En raison du retard pour le lancement du laboratoire européen Columbus et afin de maximiser le fonctionnement du "réseau d'ESA USOC d'excellence", l'agence européenne s'est concentrée sur des activités "temporaires" depuis le dernier trimestre de 2003. Cette direction temporaire a été renforcée au cours de la réunion d'UPOWG (groupe de travail d'utilisation et d'opération de charge utile) qui a été tenue à Madrid en mai 2004. Grâce à l'exécution des programmes temporaires par l'ESA, le B.USOC pourrait assumer la mission de PROMISS 3 (Février-Mars 2004) et soutenir le CADMOS (USOC français) pour les expériences physiologiques (CARDIOCOG : 4 sessions opérationnelles/année ; et NEUROCOG : 4 sessions

opérationnelles/année) en 2004 et 2005. Dans ce contexte, il est important de souligner que le B.USOC a été choisi par l'agence pour cette première mission "temporaire" parce qu'il avait déjà agi en tant que pionnier USOC pour les missions de vol OdiSSea et de Cervantes Taxi. Dans ce contexte "des missions temporaires", le B.USOC agit directement comme un élément opérationnel du segment au sol de l'ISS d'ESA.

Les résultats de la réunion à Madrid on conclu que le B.USOC continuera à assumer des missions temporaires d'ESA dans les trois années de venir. Il est important de rappeler que la participation aux missions temporaires ne change pas du tout le rôle programmé du B.USOC (FRC SOLAIRE et FSC EDR/PCDF) dans le cadre du programme initial de Columbus. Les deux activités sont en réalité conduites en parallèle.

Le souhait d'optimiser les structures opérationnelles existantes a résulté au niveau national en un complément d'activités opérationnelles potentielles du B.USOC. Dans ce cadre, le B.USOC doit fournir des services équivalents à ceux fournis à l'agence européenne pour les missions spatiales soutenues par des accords bilatéraux de la Belgique (c.-à-d. PICARD et PROBA2).

En conclusion, dans le cadre de la mission de soutien, le B.USOC a coordonné plusieurs demandes de la communauté scientifique pour la participation au développement réel (NASA-ESA) dont le but est d'élargir des missions d'espace aux sciences de la vie.

Le résultat est un rapport complet montrant la faisabilité d'un réseau d'exobiologie de Belgique (COEX : Centre fédéral pour la complexité et l'Exobiologie ; <http://www.exobiologie.be>) qui s'intègre parfaitement dans les structures naissantes de l'ESA.

### **La mission ESA PromISS 3**

PromISS est un microscope interférométrique développé pour surveiller la croissance en cristal de protéine à l'aide de la technique de contre-diffusion. Cet équipement a été développé en réponse à la demande croissante d'exécuter des techniques pour la cristallisation de protéine. Il se compose (1) d'un microscope olographe numérique capable mesurer les zones d'épuisement autour du cristal et refocaliser les images de cristal, (2) les équipements liés à PromISS : Câble d'alimentation, harnais de données et une bride séparée pour attacher PromISS à la Microgravity Science Glovebox (MSG), (3) 14 bandes vidéo et 2 PCMCIA Microdrives qui sont stockés dans le kit 2 de PromISS qui est téléchargé par Progress.



### ***PromISS 3 segment au sol***

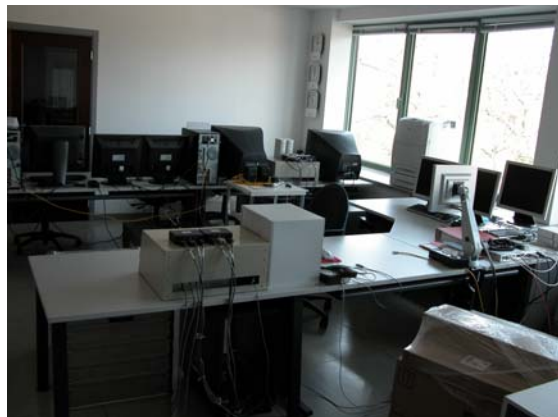
Les opérations de Promiss-3/MSG (Microgravity Science Glovebox) ont été conduites sans interruption pendant 30 jours ; c'était une première pour les agences ESA et NASA. Pendant cette mission, le B-USOC était le centre européen responsable des opérations avec l'appui de gestion de mission d'ESTEC. Le B-USOC était responsable de tout le suivi scientifique (réception et commande de télémétrie scientifique de l'expérience de PromISS ; avec l'appui du Pls et du coordonnateur de la Science d'ESA) et de la résolution en matière de routine résultant des opérations. Le même segment au sol que pendant les missions d'OdISSea et de Cervantes a été employé.

### ***ESA – activités de la station spatiale internationale***

Pendant la phase de préparation des incréments du programme de Columbus, le B.USOC est responsable des activités telles que l'implémentation du segment sol, les opérations des différents modèles au sol, le développement des procédures opérationnelles des expériences, l'optimisation et le calibrage des opérations des charges utiles et expériences, et le support aux activités de formation des équipes scientifiques et opérationnelles. Pendant les opérations des charges utiles en orbite, le B.USOC réceptionnera les données des expériences et apportera son support au « Colombus Control center » (COL-CC) en assurant les opérations des charges utiles pour lesquelles le B-USOC est responsable. La préparation et l'exécution globales des activités d'utilisation est une responsabilité partagée entre l'Agence, le B.USOC et l'industrie (cette dernière comprenant les opérateurs industriels ayant développé les charges utiles).

### ***B.USOC Operations Room***

En outre, pour des opérations spécifiques d'expériences, les User Home Bases (UHB) seront installées si nécessaires. Les UHB, qui sont les localisations de l'investigateur aux instituts « mères », sont des établissements en général nationaux (par exemple les universités), qui doivent obtenir l'infrastructure adéquate de communication et de traitement des données permettant le contrôle en temps réel de



l'expérience en question (par exemple pour des opérations à distance). Comme le FRC, le B.USOC coordonnera et soutiendra cette installation, et sera le point focal pour les activités de préparation d'opérations pour l'UHB, plus particulièrement pour la définition des conditions d'opérations d'expérience, les spécifications du matériel et du logiciel, et les conditions de connectivité de l'UHB au segment au sol d'ISS.



## **ISS / FRC / SOLAR**

Pour le SOLAR, trois instruments complémentaires de la science de l'espace mesureront le rayonnement spectral solaire avec une exactitude sans précédent à travers presque le spectre entier : 17-3000 nm. Cette gamme porte 99% de l'émission de l'énergie du Soleil. Indépendamment des contributions à la physique solaire et stellaire, la connaissance du flux d'énergie solaire (et de ses variations) entrant dans l'atmosphère de la terre est de grande importance pour modéliser l'atmosphère, la chimie atmosphérique et la climatologie. Les trois instruments sont (1) **SOVIM** (variable solaire et moniteur de rayonnement, conjointement développé par l'observatoire de DAVOS, en Suisse et par l'Institut Royal de Météorologie, Belgique), **SOLSPEC** (mesures solaires de rayonnements de spectres, développées par le CNRS, la France) et **SOL-ACES** (spectrophotomètres ultra-violet et ultra-violet extrême auto-calibrant, développés par l'institut de Fraunhofer, Deutschland)



## **ISS / FSC / EDR/PCDF**

Le service de diagnostic de cristallisation de protéine (PCDF) est un instrument à usages multiples pour l'étude fondamentale des processus de la nucléation et la cristallisation des macromolécules biologiques, et spécifiquement, de l'influence de ces processus par la gravitation. Cet



instrument peut être utilisé pour effectuer des mesures détaillées des phénomènes physiques dans différents réacteurs, et pour commander ces phénomènes par des changements de la température et la concentration de la solution.

Le BUSOC adaptera plusieurs outils liés au PCDF :

- Un modèle de laboratoire du PCDF
- Une unité au sol de recherches ?
- Un EXGSE (matériel de soutien au sol de l'expérience)

Le BUSOC conseillera les scientifiques impliqués pendant la préparation de leurs expériences en collaboration avec le centre d'ERASMUS, qui est le centre responsable de service (FRC) pour l'EDR.

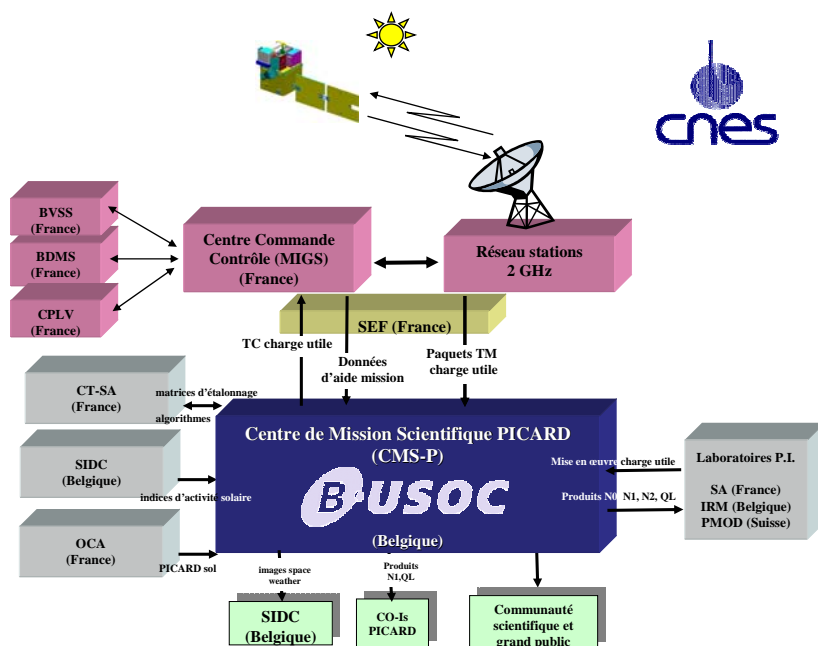
Le B.USOC sera ainsi, en collaboration étroite avec le centre d'ERASMUS, impliqué dans les diverses phases de la préparation des projets liés au PCDF :

## **Activités bilatérales : définition centre de mission PICARD**

Proposé en 2000, le projet de PICARD a été gelé en raison des contraintes budgétaires de 2002 à 2004. La phase B du projet a été réactivée en janvier 2005 et les activités liées au centre de mission en mai 2005. Troisième mission du programme du microsatellite CNES, avec un lancement prévu pour 2009, PICARD est

une mission scientifique consacrée à l'étude des effets de la variabilité solaire sur le climat de la Terre aussi bien que la caractérisation de la structure interne du Soleil.

La mission de microsatellite de PICARD fournira 3 à 4 ans de mesures simultanées du diamètre solaire, de la rotation différentielle et de la constante solaire pour étudier la nature de leurs relations et variabilités. Le système de PICARD's emploie la plupart des composants de base du produit de microsatellite de CNES. Excepté le système de contrôleur d'altitude, la plateforme de microsatellite pour PICARD est très semblable à celle de DEMETER. Le centre de mission de PICARD (CSM-P) sera actionné, le plus probablement, par le B-USOC et les antennes (bande de S) à Toulouse et Kiruna seront employées pour les besoins de télémétrie (environ 1.5 Gbits par jour). Selon le schéma de compression de données choisi, un taux plus élevé de télémétrie (1.9 Gbits par jour) pourrait exiger une troisième antenne.



- Les responsabilités principales du B.USOC en tant que CMS-P sont :
1. Programmation de charge utile (SODISM, SOVAP, PREMOS)
  2. Surveillance de la charge utile
  3. Traitement des données de charge utile
  4. Production des produits de N0, de N1 et de N2a

Arrangement du contexte général de CMS-P à l'intérieur du segment au sol de PICARD

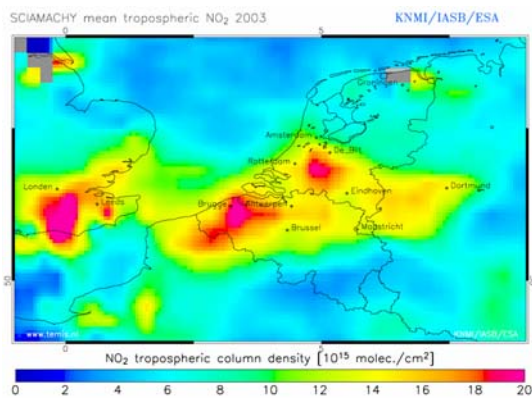
## TEMIS et PROMOTE:

### Produits troposphériques dérivés à partir de GOME et SCIAMACHY

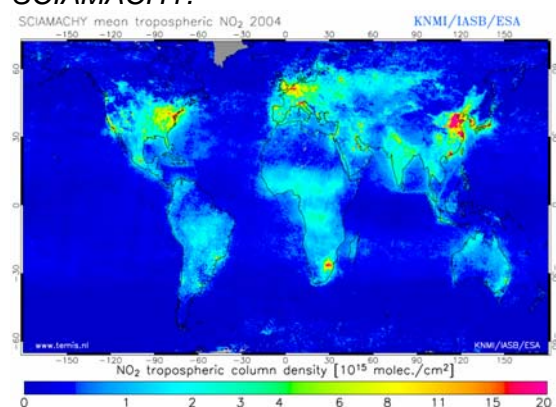
Les colonnes de NO<sub>2</sub> et de HCHO troposphériques font partie des services opérationnels de TEMIS (<http://www.temis.nl>) et PROMOTE (<http://www.gse-promote.org>). Ces produits sont le résultat d'une collaboration étroite entre l'IASB et l'Institut néerlandais de Météorologie KNMI. L'extraction se base sur une approche à deux facettes. Tout d'abord, les quantités de colonnes obliques de NO<sub>2</sub> (HCHO) sont dérivées des mesures satellitaires sur base de la technique d'extraction DOAS. La méthode consiste en l'ajustement du spectre mesuré de la radiance solaire rétrodiffusée au nadir, à un ensemble approprié de sections efficaces d'absorption moléculaire mesurées en laboratoire. Cet ajustement est obtenu à l'aide de programmes de moindres carrés non-linéaires. L'analyse spectrale est effectuée en

utilisant WinDOAS, un logiciel d'analyse multifonction développé dans les années quatre-vingt-dix à l'IASB. Ce logiciel, développé au départ pour des applications au sol constitue aujourd'hui un standard dans la communauté scientifique internationale et est utilisé par de nombreux groupes de recherche dans le monde entier.. La seconde étape consiste en le calcul des facteurs de masse d'air afin d'extraire les colonnes verticales. Le calcul est basé sur l'approche combinée modélisation/extraction/assimilation du KNMI. Le modèle de transport TM4, activé par des champs météorologiques réalistes, procure des profils de NO<sub>2</sub> (HCHO), vraisemblables, basés sur les derniers inventaires d'émission, le transport atmosphérique, la photochimie, et les processus d'ablation humides/secs. Ces modèles prédisent des champs qui sont co-localisés avec les observations satellitaires. Dans le cas du NO<sub>2</sub>, la contribution stratosphérique a été évaluée et ôtée de la colonne totale pour obtenir le NO<sub>2</sub> troposphérique. Cette distribution stratosphérique de NO<sub>2</sub> est obtenue de l'assimilation des observations NO<sub>2</sub> avec TM4. Cette opération n'est pas nécessaire pour le formaldéhyde, qui est uniquement troposphérique. L'extraction est couplée à la détermination de la fraction nuageuse et de sa hauteur, informations elles aussi déterminées à partir des données GOME ou SCIAMACHY.

Les colonnes troposphériques sont accessibles par le Web pour l'ensemble des données GOME et pour les mesures SCIAMACHY presque en temps réel. Les colonnes de formaldéhyde sont fournies pour les mesures GOME et seront extraites des données SCIAMACHY prochainement.



*NO<sub>2</sub> troposphérique moyen dans le Benelux pour l'année 2003 tel que perçu par SCIAMACHY.*



*Carte mondiale de NO<sub>2</sub> troposphérique pour l'année 2004 tel que perçu par SCIAMACHY.*



## **Surveillance de des émissions de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>)**

*Le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) pénètre dans l'atmosphère suite à des phénomènes naturels ainsi que sous l'action d'activités anthropogéniques, telles que la combustion de combustible fossile, l'oxydation de matériaux organiques sur la terre, les éruptions volcaniques et la combustion de la biomasse. Les changements de la teneur en SO<sub>2</sub> ont un impact sur la chimie atmosphérique et dès lors, sur la qualité du climat. Les conséquences des éruptions volcaniques peuvent avoir un effet sur la circulation de l'air, et sont des sources importantes de cendre (aérosols) et de SO<sub>2</sub>. En conséquence, les observations globales de SO<sub>2</sub> sont importantes pour la recherche atmosphérique et climatologique ainsi que pour l'organisation du trafic aérien. La surveillance globale des concentrations de SO<sub>2</sub> est obtenue sur base de mesures UV-visible effectuées par des instruments satellitaires, tels que GOME, SCIAMACHY et OMI.*

Des programmes ont été mis sur pied et testés pour l'extraction des concentrations de SO<sub>2</sub> à partir de mesures SCIAMACHY et pour l'analyse des résultats d'extraction. Fin 2005, plus d'une année de données était accessible sur le site Web : <http://www.oma.be/BIRA-IASB/Molecules/SO2archive>.

Au vu des nombreuses sources de SO<sub>2</sub>, il est divisé en deux services:

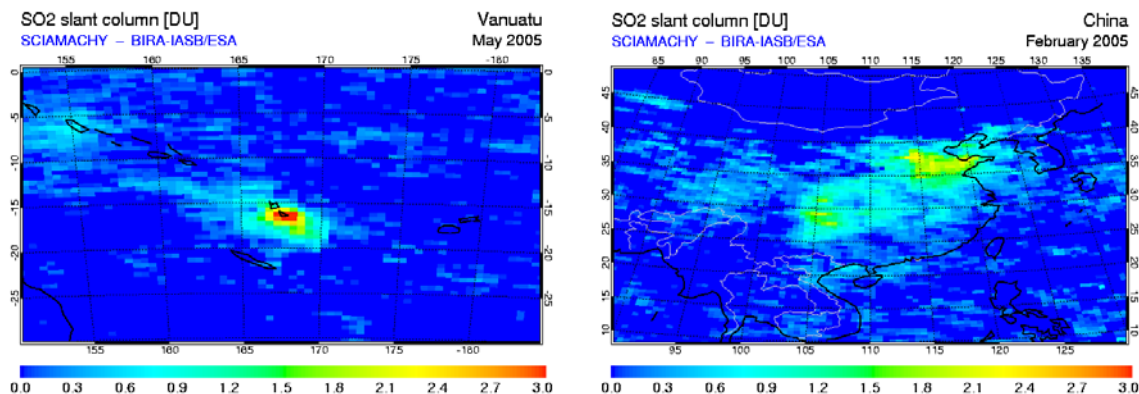
- Le service de SO<sub>2</sub> volcanique, qui se concentre sur les régions connues pour avoir été le siège d'une ou plusieurs éruptions volcaniques depuis 1800.
- Le service de qualité de l'air, qui se concentre sur les zones industrialisées.

Pour chaque service, des graphiques montrant la distribution spatiales des colonnes de SO<sub>2</sub> dérivées de SCIAMACHY sont présentés, sous la forme de cartes globales et régionales journalières et composites à 3 jours, ainsi que sous la forme de moyennes mensuelles. Le site Web contient également différents produits d'information, notamment une description des méthodes utilisées et des données présentées.

Les services de volcanique et de qualité de l'air sont mis sur pied et maintenu à l'IASB dans le cadre des projets TEMIS et PROMOTE, en collaboration avec la DLR (Oberpfaffenhofen, Allemagne) et le KNMI (De Bilt, Pays-Bas). Les deux projets sont soutenus par l'Agence Spatiale Européenne.

*Au cours de la seconde étape de PROMOTE – débutant mi-2006 et s'étalant sur trois années – un service en temps quasi-réel sera mis sur pied, procurant des données de SO<sub>2</sub> basées sur les observations de SCIAMACHY, OMI et GOME-2, en vue de surveiller l'occurrences et l'extension spatiale et temporelle des éruptions volcaniques, ainsi que celles des émissions anthropogéniques de SO<sub>2</sub>. En cas d'émissions exceptionnelles, le service enverra des avertissements par email aux parties concernées, avec une référence aux pages spécifiques sur le site Web. En combinant les observations de SO<sub>2</sub> et des aérosols avec les données de prévisions météorologiques, les trajectoires des panaches volcaniques pourront être retracées jusqu'à l'origine de l'émission et utilisées pour prévoir l'animation jusqu'à trois jours à l'avance. De plus, les données de SO<sub>2</sub> seront archivées au service des Enregistrement de la Qualité de l'Air de PROMOTE. Cette archive sera étendue aux*

données antérieures grâce à l'utilisation de données de SCIAMACHY et GOME-1 permettant de couvrir toute la période depuis le lancement de GOME-1 en 1995.



Gauche: La moyenne mensuelle du champ de  $SO_2$  au-dessus de Vanuatu pour mai 2005. Les fortes concentrations de  $SO_2$  sont associées à des éruptions volcaniques dans cette zone. Droite: la moyenne mensuelle de champ de  $SO_2$  au-dessus de la Chine en février 2005. Dans ce cas, les concentrations peuvent être imputées aux activités anthropogéniques asiatiques.

### Instruments 2004-2005:

Le département d'ingénierie de l'IASB a participé à la conception et la fabrication de deux instruments embarqués et installés sur des vaisseaux spatiaux de l'Agence Spatiale Européenne. Globalement, l'IASB s'est occupé de la conception des modules électroniques, des structures mécaniques et/ou des logiciels à bord et de la fabrication des prototypes de ces modèles. À la fin de la phase de prototypage, la fabrication finale a été réalisée au sein de l'industrie spatiale belge.

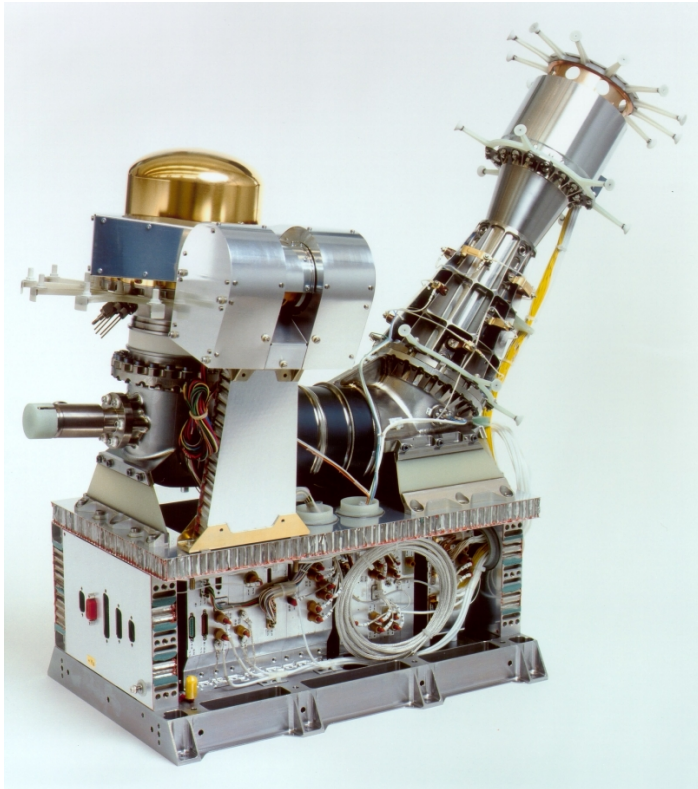
Le département a également participé à la conception d'un prototype pour l'électronique numérique du radar pénétrant le sol de NETLANDER.

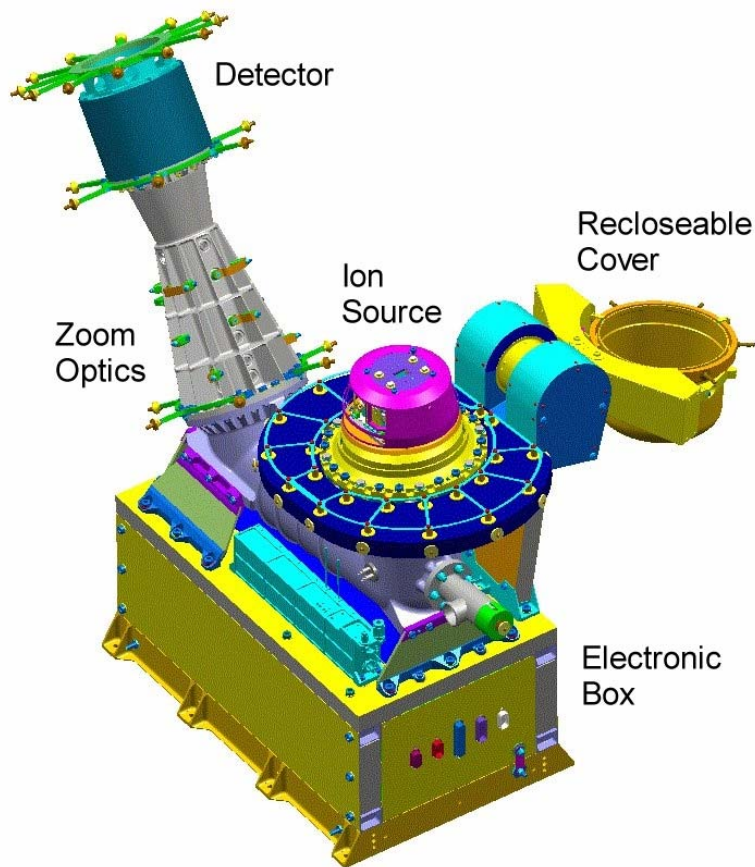
### ROSINA on ROSETTA:

L'IASB participe au programme ROSETTA de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), une des missions clés de son programme scientifique. Dans le cadre de ce programme, l'ESA a lancé, le 2 Mars 2004, la sonde spatiale ROSETTA vers la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko. Elle étudiera en détail le noyau de cette comète et son environnement pendant une période de presque deux ans, et larguera un atterrisseur à sa surface. En 2014, quand ROSETTA sera à quelques unités astronomiques (AU) du Soleil, le vaisseau spatial sera manœuvré sur une orbite autour de la comète et accompagnera la comète lors de son voyage vers le Soleil jusqu'à une distance de 1 AU de celui-ci.

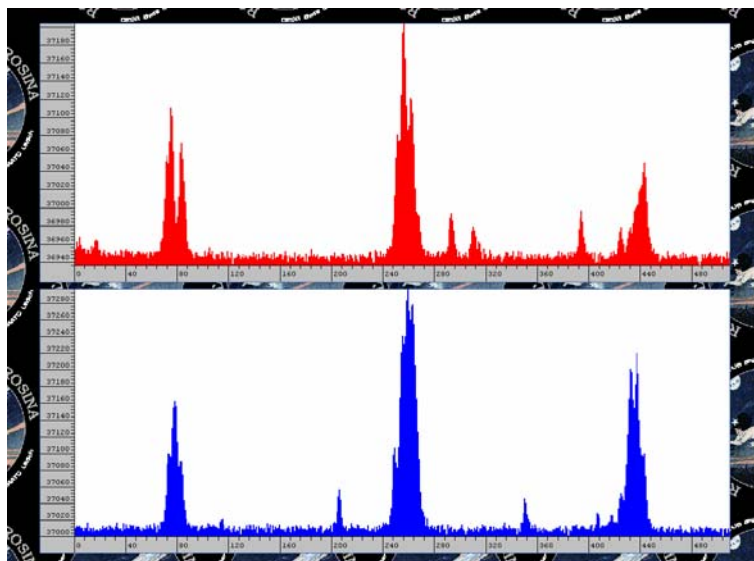
L'expérience ROSINA, à laquelle participe l'IASB en tant que Co-Investigateur, est à bord de la sonde spatiale ROSETTA. Le développement et la construction de cette expérience ont été effectués par un consortium scientifique international contrôlé par l'Université de Berne, Suisse. La contribution de l'IASB à ROSINA a consisté en la conception et la construction du détecteur et de l'électronique associée pour la sous-unité DFMS (Double Focusing Mass Spectrometer) (cf. la photographie et le dessin).

Le système de détection comportait un générateur multi-anode construit par IMEC, Leuven, Belgique.





Au cours de la période 2004-2005, les activités principales liées à l'expérience ROSINA ont concerné le commissionnement de la sonde spatiale et des différents instruments à bord, et plus particulièrement le contrôle du système de détection DFMS. Tous les contrôles à distance ont été effectués depuis le centre de l'ESA/ESOC à Darmstadt. Ils ont indiqué que le système de détection DFMS s'est comporté comme prévu, ce qui s'est confirmé lors des enregistrements des tout premiers spectres par le DFMS fin mai 2004 pendant la phase de croisière de ROSETTA.



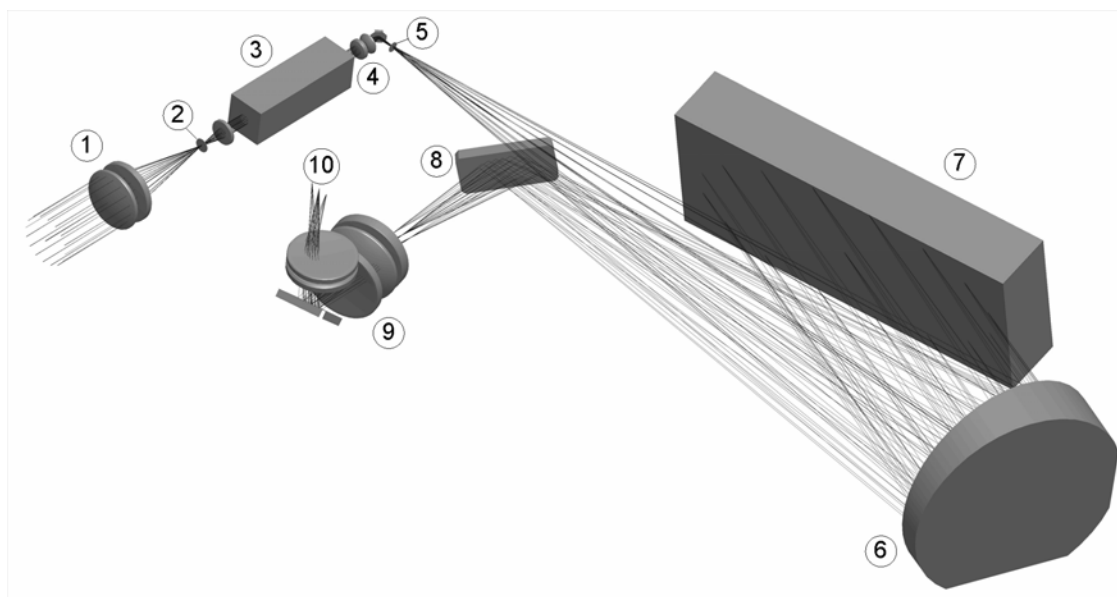
Remerciements :

La conception et la fabrication du système de détection du DFMS de ROSINA ont été financées par le projet PRODEX, arrangement 90020 ROSINA, accordé par la Politique Scientifique Fédérale.

### ***SPICAV/SOIR on Venus Express:***

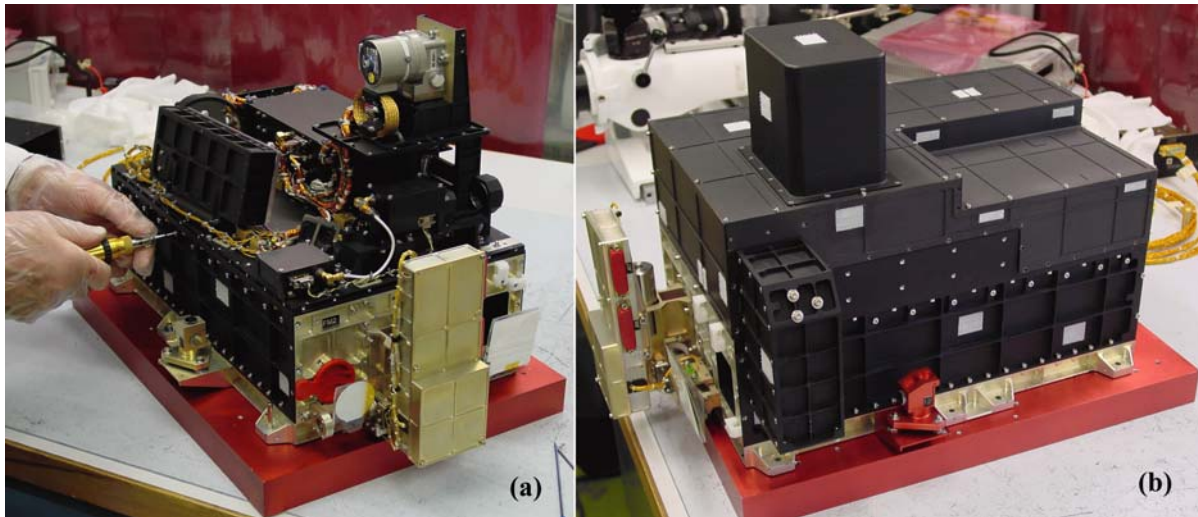
Venus Express (VEX) est la deuxième mission de l'ESA à destination d'une planète du système solaire réalisée dans un temps de développement rapide et rationalisé. C'est le résultat/un dérivé de la mission Mars Express de l'ESA dans le sens où plusieurs des instruments sur VEX sont des versions améliorées des instruments embarqué sur Mars Express. Le vaisseau spatial de VEX a été lancé du Cosmodrome de Baïkonour dans le Kazakhstan le 9 novembre 2005 par une fusée Soyuz-Fregat et a été placé sur une orbite de transfert vers Venus. La sonde Venus Express est entrée dans l'orbite vénusienne le 11 avril 2006 après une croisière interplanétaire de 153 jours. Le périégée et l'apogée de l'orbite sont respectivement de 250 et 66000 kilomètres.

Au cours de la période 2004-2005 l'IASB a été fortement impliqué dans la conception, la construction et les tests pour l'expérience de SPICAV/SOIR sur VEX. Sur Mars Express, il existait déjà un spectromètre, appelé SPICAM-L, qui contenait un spectromètre UV et un canal IR de résolution moyenne. Cet instrument a été étendu pour Venus Express avec un spectromètre IR à haute résolution d'une nouvelle conception, appelé SOIR (Solar Occultation in the IR) et qui fonctionne dans la gamme de longueurs d'onde de 2.2 à 4.3 micromètres. L'instrument complet composé d'une version améliorée de SPICAM-L et de SOIR est appelé SPICAV (Spectroscopy for Investigation of Characteristics of the Atmosphere of Venus). Le principe de fonctionnement de SOIR consiste en la combinaison d'un réseau de diffraction avec un filtre réglable acousto-optique (AOTF), qui fonctionne comme un filtre de classement des ordres de diffraction réglable électroniquement et un groupage d'éléments pour plan focal à 2 dimensions. Son application dans l'espace sera une première.





Le département d'ingénierie de l'IASB s'est chargé de la conception de la structure mécanique de tout l'instrument SPICAV et de ses montages partiels (UV, IR et SOIR), et a contrôlé le processus de fabrication des modèles mécaniques de vol dans l'industrie (PEDEO, Oudenaarde, Belgique). Pour SOIR, l'IASB a pris l'entière responsabilité de la conception, de la fabrication et de l'essai. Notre équipe a assuré la gestion générale du développement de l'instrument, qui a consisté en la prospection et le choix des parties principales du spectromètre, telles que l'AOTF, du réseau de diffraction d'échelle et du système IR du détecteur, et dans les spécifications des caractéristiques optiques du spectromètre. En outre, l'équipe d'ingénierie de l'IASB a conçu et prototypé l'électronique complète de SOIR, le logiciel à bord et le code VHDL pour la lecture programmable des détecteurs qui est le coeur du système complet. En outre, le système de support électronique a été développé en interne et logiciel pour le contrôle de SOIR et l'analyse de données. La conception et l'essai optiques détaillés de SOIR ont été réalisés par un associé industriel belge (OIP, Oudenaarde, Belgique), qui a également produit les panneaux et le câblage électronique de vol.



### **NETLANDER GPR:**

La mission NETLANDER est un projet du CNES visant à déployer un réseau de 4 atterrisseurs géophysiques et météorologiques sur la surface de Mars. GPR est un des instruments à bord de chaque atterrisseur de NETLANDER et se compose d'un radar pénétrant le sol permettant de localiser les réservoirs d'eau (glace et eau liquide) dans le sol martien. Il devrait également permettre l'étude de l'ionosphère de Mars. Le GPR a été développé sous la responsabilité du CETP (Centre d'étude des Environnements Terrestre et Planétaires, France) avec une contribution importante du département d'ingénierie de l'IASB pour le développement de l'électronique d'échantillonnage des échos radar digitaux. Bien que le projet ait été abandonné par le CNES en 2003, le développement de l'électronique a continué avec nos propres ressources limitées, afin de garder le savoir-faire pour des applications futures, comme par exemple EXOMARS. En attendant le principe de fonctionnement du GPR et de son électronique a été prouvé dans le domaine.



### ***Programme de recherche ESA pour ISS***

Depuis 1983, SOLSPEC a participé à 5 missions spatiales de la NASA et de l'ESA (SPACELAB 1, ATLAS 1, 2 et 3, et EURECA). Il est maintenant un des instruments de référence choisis par la communauté scientifique internationale pour la définition d'un spectre solaire extraterrestre standard. Différentes charges utiles externes pour la recherche spatiale seront lancées et transférées à la station spatiale internationale (ISS) au cours des années à venir. L'une d'entre elles (la charge utile SOLAR) a été consacrée à la physique solaire. SOLAR regroupe trois instruments spectraux et photométriques solaires qui seront installés sur un dispositif de pointage (CPD) sur le module COLOMBUS pour une durée de 18 mois : SOLSPEC, SOVIM et SOL-ACES. Ce choix donne l'occasion de moderniser profondément l'instrument de SOLSPEC. L'électronique a été améliorée, l'interface mécanique a été adaptée aux conditions de charges utiles d'ISS et la conception optique interne a été modifiée.

## Chapitre 2 : Gestion (personnel, communication, budget, IT)

### A. Effectif du personnel et aspects organisationnels:

#### *Etat 2005*

Une vue d'ensemble de la situation des effectifs 2005 est reprise dans le tableau suivant:

		Statutaires	Contractuels
	<u>Niveau</u>		
- Directeur Général	A	1	
<b>Personnel scientifique</b>			
- Chef de département	1	3	
- Chef de section	1	3	
- Chef de travaux à Chef de travaux agrégé	1	14	
- Attaché à Assistant	1	1	45
<b>Personnel non scientifique</b>			
- Conseiller	A	2	
- Informaticien	A	1	
- Attaché	1 / A	4	9
- Expert ICT	B	2	1
- Expert technique	B	14	2
- Assistant administratif	C	2	2
- Assistant technique	C	1	
- Collaborateur administratif	C	1	
- Collaborateur technique	C	2	
- Nettoyeuse	D		3
<b>Total</b>		51	62
		113	

#### ***Les besoins quantitatifs et qualitatifs***

L'approche des besoins en effectifs implique trois aspects:

Quels sont les besoins actuels en personnel en fonction de l'évolution naturelle de l'actuelle enveloppe du personnel +/- constante.

- Les besoins de projets planifiés en fonction des prévisions budgétaires pour les prochaines années.
- Les nécessités structurelles en fonction des disciplines intrinsèques pour la réalisation des objectifs opérationnels.

Conditions préalables:

Quatre conditions préalables incontournables apparaissent au niveau des effectifs pour la réalisation correcte des tâches futures de l'Institut. Celles-ci ont été étudiées plus particulièrement au cours de l'année 2005 pour permettre leur accomplissement en 2006 et ultérieurement.

### **Profils**

L'évolution du contenu des projets de recherche, qui visent à procurer de plus grands services scientifiques et impliquent de plus grandes responsabilités (Principal Project Investigator, co-Chercheur, Premier contracteur/c-contracteur) au sein de l'Institut demandent une réorientation de profils nette:

- Recherche appropriée
- Profil de valorisation et d'exploitation
- Profil de gestionnaire de projet

### **Partage statutaire/personnel contractuel**

Comme il a été constaté, l'allocation actuelle de l'enveloppe du personnel pour l'Institut résulte d'une approche historique et ne procède pas à l'allocation en fonction de critères objectifs qui correspondent aux besoins actuels. D'autre part, il est mauvais de procéder à une croissance avec exclusivement des contractuels qui mènerait à un déséquilibre entre les deux profils. Il faudra également attribuer à du personnel statutaire des emplois structurels tels l'exploitation, l'investigation, la gestion, etc, afin de garantir la continuité grâce à leur caractère permanent.

Un rapport de: 60% de statutaire et 40% de contractuel est l'objectif fixé.

### **Révision du statut du personnel scientifique**

Nous supposons qu'elle sera effective à partir de 2006/7.

L'impact financier sur l'enveloppe du personnel doit consister en une augmentation, dont les budgets sont réservés au niveau de la politique scientifique.

### **Réévaluation du personnel contractuel.**

Des mesures doivent être prises afin de garantir la stabilité et la continuité du personnel contractuel:

- perspectives
- promotion
- compensations financières

La situation actuelle est inacceptable et entrave une stabilité future, en raison de l'augmentation du nombre de contractuels. L'absence de perspectives possibles et la rémunération fonction de barèmes statutaires ne sont, dans ces conditions, pas acceptables. On doit laisser à l'Institut la possibilité d'offrir des perspectives et de rémunérer ces personnes.

## Aspects organisationnels

L'organisation actuelle est le reflet des évolutions historiquement survenues, et des fonctions intrinsèques, qui ne sont plus représentatives des objectifs finaux de l'Institut. Elle ne comporte, par ailleurs, pas de structure visant à la responsabilisation et à la pyramide des pouvoirs de décision au sein de l'Institut.

Ensuite, il n'y a pas de conventions clairement établies concernant les différents responsables (scientifique technique, budgétaire, programmeur, ...) pour atteindre les objectifs des différents projets.

Une organisation fonctionnelle est opérationnelle depuis suivant les lignes conductrices. Les activités verticales qui représentent les axes stratégiques de l'Institut :

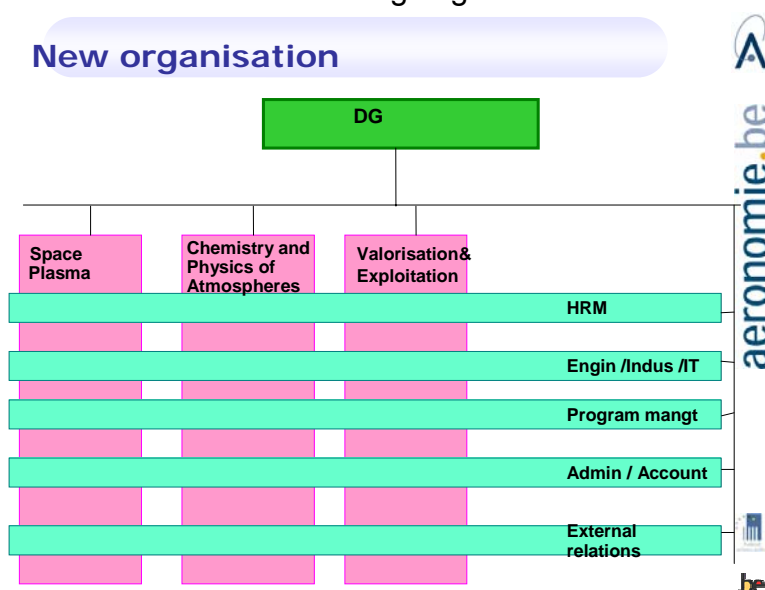
- La chimie et la physique atmosphériques
- Le plasma spatial
- Valorisation/Exploitation

Ces groupes ont l'entière responsabilité de la conduite des différents projets en termes de leur contenu scientifique et technique, du budget et du financement, des délais, des prestations à fournir en vertu du contrat et surtout des relations avec le client ou l'utilisateur.

Services prestés horizontalement, il s'agit surtout de:

- Gestion des ressources humaines
- Soutien de la gestion de projets au niveau du projet même et de la planification budgétaire.
- Industrialisation et ingénierie.
- ICT
- Relations externes au niveau national et international.

L'institut travaille dès lors en fonction de l'organigramme suivant:



## **B. Communication**

### ***Rôles***

L'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) a pour mission d'acquérir une expertise scientifique et technologique dans le domaine de l'aéronomie spatiale et de communiquer l'information dans ce domaine. Pour réaliser cette communication il est important de définir certaines choses :

- Pourquoi communiquer (les buts)
- Qui voulons nous atteindre (les groupes cibles)
- Que voulons-nous dire (les messages)
- Comment voulons-nous le dire (les moyens)

La fonction s'adresse à différents groupes cibles :

- Les partenaires : Industriels : belges et étrangers  
Scientifiques : belges et étrangers
- Les décideurs politiques : belges et étrangers (dont la commission européenne)
- Les journalistes spécialisés et non spécialisés
- Les étudiants via leur professeur : primaire, secondaire inférieur, secondaire supérieur
- Le grand public
- Les scientifiques de l'IASB (Communication interne, en support à la communication externe)

Cette fonction implique l'information vers ces différents groupes cibles via des communiqués de presse, des conférences de presse, des mailings, un site Internet, des folders/ leaflets, des brochures, des posters, des bornes interactives, l'organisation et la participation à diverses expositions en Belgique et à l'étranger.

### ***Méthode de travail et moyens utilisés***

Collaboration directe avec les responsables de staff de l'IASB. La cellule réunit et/ou crée le matériel nécessaire aux activités de relations publiques.

L'IASB dépend de la Politique scientifique avec laquelle nous travaillons en étroite collaboration et qui nous donne une certaine visibilité lors des expositions qu'ils organisent et via le Science connection (et son encart, le Space connection).

La vitrine officielle de l'Institut et du Pole Espace est le planétarium de Bruxelles où l'on peut voir une exposition permanente sur les trois instituts du plateau d'Uccle. Un espace d'expositions temporaires est aussi utilisé pour coller à l'actualité. Les réalisations sont faites en français et en néerlandais, parfois en anglais.

De nombreux partenariats ont aussi été établis avec des lieux d'expositions permanents en Belgique où nous exposons du matériel

- Euro Space Center, Redu-Transinne
- Earth Explorer, Ostende
- Centre de Culture scientifique, Charleroi
- Planétarium, Bruxelles

## **Aperçu des différentes réalisations de la cellule Communication 2004-2005**

### **1. Matériel didactique**

#### **1.1. Sites web :**



Un nouveau site internet a été créé pour l'Institut : <http://www.aeronomie.be>

Ce site existe en français et en néerlandais. Il sera aussi disponible en anglais (prévu pour fin 2006).

Il est divisé en quatre grandes parties : Contacts, Activités, Sites web et Actualités.



Un site internet commun aux trois instituts du Plateau d'Uccle a aussi été créé:

le Site du Pole Espace : <http://www.poleespace.be>

Celui-ci est un site à part entière sur les activités menées au plateau d'Uccle, suivant le cd-rom réalisé pour l'évènement « Space for You » de 2000. Axé sur des voyages (le Soleil, Autour de la Terre, la Terre et l'atmosphère), sur l'histoire, les métiers, etc. Mis en ligne en **juin 2004**

Il sert de site-portail pour les 3 instituts du plateau + planétarium.

Un site web pour le projet COEX (Complexity and Exobiology) du B.USOC a été créé : <http://www.exobiologie.be>

Le site web du B.USOC : <http://www.busoc.be>, a été remanié.

La cellule communication de l'Institut d'Aéronomie a participé aux réunions pour la mise sur pied de l'Extranet de la politique scientifique fédérale : <http://extranet.belspo.be>



## 1.2. Bornes PC interactives



Utilisation des bornes lors de la Wetenschapsfeest, Hasselt, novembre 2004

Des bornes interactives dont l'objectif est de faire découvrir la conquête spatiale et en particulier les thèmes étudiés à l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique ont été développées.

Le moyen choisi est l'interrogation. Quatre grands thèmes sont abordés, à savoir : le milieu planétaire, l'atmosphère terrestre, les atmosphères planétaires, la conquête de l'espace et les méthodes de travail. Le projet vise le grand public

Il existe actuellement 12 bornes. Celles-ci sont mises à dispositions des différents lieux d'exposition permanente sur la science en Belgique :

- Centre de Culture Scientifique de Parentville, Charleroi
- Euro Space Center, Redu-Transinne
- Earth Explorer, Ostende
- Planétarium, Bruxelles

De plus nous utilisons ces bornes lors des expositions temporaires. Les questions sont constamment mises à jour.

## 1.3. Brochures de vulgarisation

Création d'une brochure sur les différents domaines d'étude de l'Institut d'Aéronomie, divisée en quatre grandes parties :

1. L'Aéronomie
2. L'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique
3. Les thèmes de recherche
4. Les méthodes de travail

Il existe une brochure en néerlandais et une brochure en français.

## 1.4. Posters pour les expositions

Divers posters ont été créés sur les différents thèmes de l'Institut. Il existe des posters généraux et des posters sur les missions auxquelles participe l'IASB. L'accent est toujours mis sur la participation belge et plus particulièrement sur la participation de l'IASB à ces missions.

Ces posters sont utilisés pour les événements et les expositions auxquelles participe l'IASB.

## 2. Evènements et expositions

Pour ces événements et expositions, nous mettons tout notre matériel didactique à dispositions, principalement les posters et les bornes multimédia interactives. Nous mettons aussi des PC à dispositions avec des connections à nos pages web ou avec des présentations power point (ou autres).

Des membres de la cellule communication sont très souvent sur place lors de ces événements, pour promouvoir l'institut, donner des brèves explications sur le thème abordé, distribuer les brochures, etc.

### 2.1. Exemple d'évènements :

#### 2.1.1. Le 175e anniversaire de la Belgique

Dans le cadre du 175<sup>e</sup> anniversaire de la Belgique, un grand événement a été mis sur pied au Planétarium de l'Observatoire Royal de Belgique.

Le Planétarium, qui est la vitrine des 3 instituts du plateau d'Uccle, y a accueilli cette exposition du 15 mai au 31 décembre 2005.

Cette exposition, intitulée : « *Entre Ciel et Terre : 175 ans d'histoire de la recherche spatiale en Belgique* », mettait en scène les 3 instituts du Pôle Espace à travers un parcours historique et 4 zones distinctes. Une zone par institut et une zone commune dédiée au « futur ».

Cette exposition dont une partie est permanente, restera dorénavant au Planétarium comme vitrine du Pôle Espace.



Vue du stand « Aéronomie » au Planétarium

Dans le cadre du projet « 175<sup>e</sup> anniversaire de la Belgique », la cellule communication de l'IASB a participé à la rédaction du livre : « Les dix établissements de la politique scientifique fédérale »

L'IASB a aussi participé au projet de la politique scientifique fédérale organisé le 14 mai 2005 au Mont des Arts « la fête des arts et des sciences ». L'IASB y a participé en compagnie des autres établissements scientifiques fédéraux.



Vue de la tente de l'IASB au Mont des Arts

Toujours dans le cadre de cet événement, les 3 instituts du pôle espace et plus particulièrement l'Institut d'Aéronomie, ont organisés des portes ouvertes sur le plateau d'Uccle les 17 et 18 septembre 2005.

#### 2.1.2. Autres expositions temporaires :

**La mission Rosetta :** Mise en évidence de la mission Rosetta et de la participation de l'IASB à l'instrument Rosina.

- *Février 2004* : Support à l'exposition de la Politique Scientifique à Ostende lors des Ruimtevaardagen.
- *Mars 2004* : Exposition au Planétarium, Bruxelles. Création de Posters.
- *Mars 2004 à Février 2005* : Exposition à l'Euro Space Center, Redu-Transinne.

#### **La mission Mars Express**

- *Février 2004* : Support à l'exposition de la Politique Scientifique à Ostende lors des Ruimtevaardagen.
- *Mars 2004* : Exposition au Planétarium, Bruxelles. Création de Posters.
- *Mars 2004 à Février 2005* : Exposition à l'Euro Space Center, Redu-Transinne.

#### **Exposition à l'école polytechnique de Herstal**

- *Semaine du 19 avril 2004* : Présentation générale de l'IASB

#### **Wetenschapsfeest à Hasselt**

- *21 au 24 octobre 2004* : Mise sur pied d'une exposition (stand) + animation du stand

#### **Dimanche des sciences au Centre de Culture Scientifique, CCS de Parentville, Charleroi.**

- *2 mai 2004* : Participation en collaboration avec les deux autres instituts du plateau d'Uccle. Thème de l'année 2004 : L'histoire des sciences en Belgique. Création de panneaux d'exposition sur l'historique des 3 instituts du plateau et animation d'une tente + animation du stand.

### **Forum des entreprises, Université du travail de Charleroi**

- 18 et 19 Mars 2005: Présentation générale de l'IASB par posters, mise à disposition de deux bornes et animation du stand. + organisation de la conférence donnée par Christian Muller.

### **Salon du Bourget, France : Participation au stand Bruspace**

- 15 au 19 juin 2005 :

#### **Château de Seneffe**

- 5 septembre 2005: Evènement avec la Politique Scientifique. Présence de l'Institut via le quiz des bornes interactives.

### **Autoworld, exposition « Space Week » de l'ESA, Bruxelles**

- Semaine du 15 février 2005: Visibilité de l'IASB et des deux autres instituts du plateau via les bâches à nos couleurs.

### **3. Relations avec la presse et retours presse**

Lancement d'un communiqué de presse, préparation d'un dossier pour les journalistes, organisation d'une journée de presse et/ou création des pages web sur les missions Promiss, Bascoe, Rosetta, Venus Express et sur l'année Mondial de la physique.

Retours presse : L'IASB dans la presse belge :

A l'occasion des différentes missions on a eu des retours dans la

- Presse écrite et sur internet : Articles dans/sur VRT news.net, De Standaard, Le Soir, Het laatste nieuws, Knack, Metro,...
- Presse audiovisuelle : Interview de Eddy Neefs : Matin première, RTBF radio, Pascale Bollekens, JT RTBF, etc.

### **4. Divers**

- Image de l'IASB : Création de bâches aux couleurs de l'Institut. Ces mêmes bâches existent pour l'Observatoire et pour la Météorologie ainsi que pour le Pole Espace.

Nouveau look pour le logo de l'Institut



aeronomie.be

aeronomie.be

- Participation au « Wetenschappelijke scheurkalender 2006 ». Rédaction de la semaine du 31 juillet au 6 août 2006 : Stratosferische-ozonweek, par Martine De Mazière (IASB) et Hugo De Backer (IRM)
- Coordination de la visite du groupe de travail Espace du Sénat (février 2005)
- Soutien didactique pour conférence OTAN : workshop on sprites à la scientifique pour Norma Crosby et SPENVIS & GEANT4 workshop pour Daniel Heynderickx

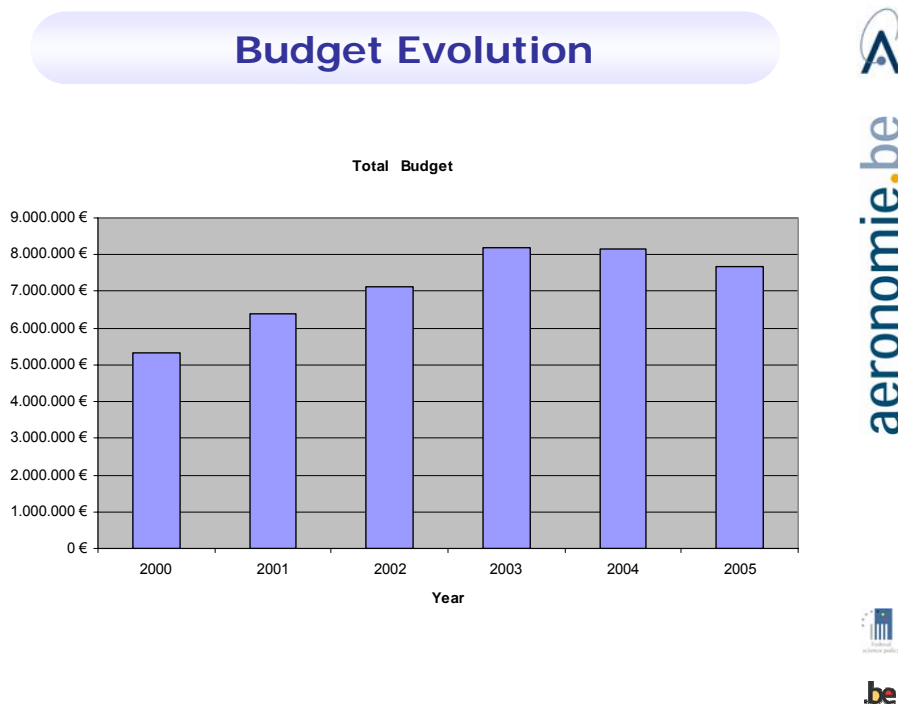
- Mise en page du leaflet NDSC en Novembre 2004
- Participation au dossier du mois de mai 2005 du Space/Science Connection sur Mars, via une interview de Dominique Fonteyn.

## C. Aspects budgétaires

Les moyens budgétaires de l'Institut peuvent être subdivisés de la manière suivante:

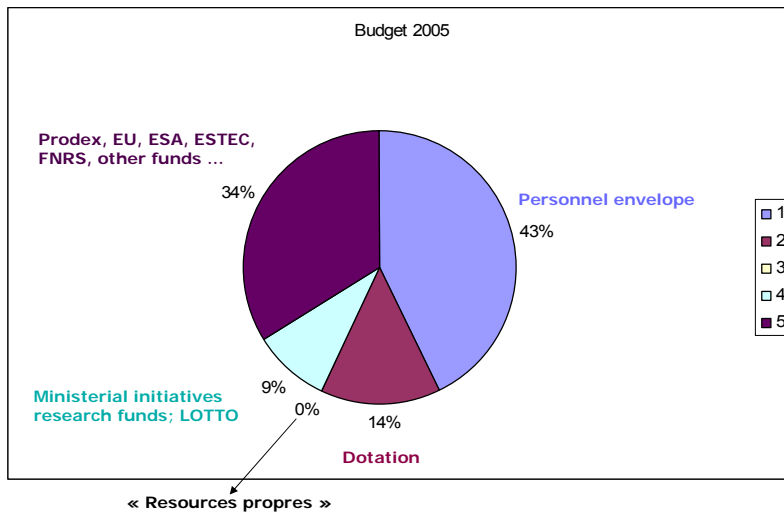
- Enveloppe du personnel : les coûts salariaux du personnel statutaire.
- Dotation de l'administration fédérale (section 0)
- Revenus personnels (section 1)
- Lotto, programmes d'investigation ministérielle (section 2)
- Revenus des tiers, contrats d'investigation (section 3)

L'évolution totale de ces revenus sur la période 2000-2005 est reprise dans le graphique suivant:



Les années 2003 et 2004 ont atteint un pic grâce au développement d'instruments de différents satellites scientifiques, dont Mars Express, Venus Express, Rosetta et Solspec. Le partage des moyens budgétaires pour 2005 entre les différentes sources de revenus est repris dans le graphique suivant.

## Budget 2005 by financial resource



Remarques : L'enveloppe du personnel correspond à la masse salariale du personnel statutaire. La dotation englobe principalement les effectifs de fonctionnement de l'Institution. A peu près 50% des effectifs doivent être engagés par le biais de contrats externes.

### Information détaillée :

#### Pour la section 0 - dotation de l'administration fédérale:

Recettes : la dotation s'élevait à 1.073.000 euros

Dépenses

Personnel : 179.700 euros

Fonctionnement de subsistance : 153.900 euros

Fonctionnement spécifique lié aux projets : 391.300 euros

Équipement de subsistance : 14.320 euros

Équipement spécifique : 129.950 euros

#### Pour la section 1 - recettes propres :

Recettes : 9.918 euros

avec les réserves accumulées : on a pu dépenser :

Personnel : 79.560 euros

Fonctionnement 4.600 euros

#### Pour la section 2 - budgets Lotto, programmes de recherches d'initiative ministérielle :

Recettes (subventions) : 585.879 euros, dont 200.000 euros pour le Lotto

Dépenses :

personnel : 359.575 euros



fonctionnement : 29.765 euros  
équipement : 94.755 euros

**Pour la section 3 - fonds de tiers (ESA, CE, ESTEC, PRODEX ...) :**

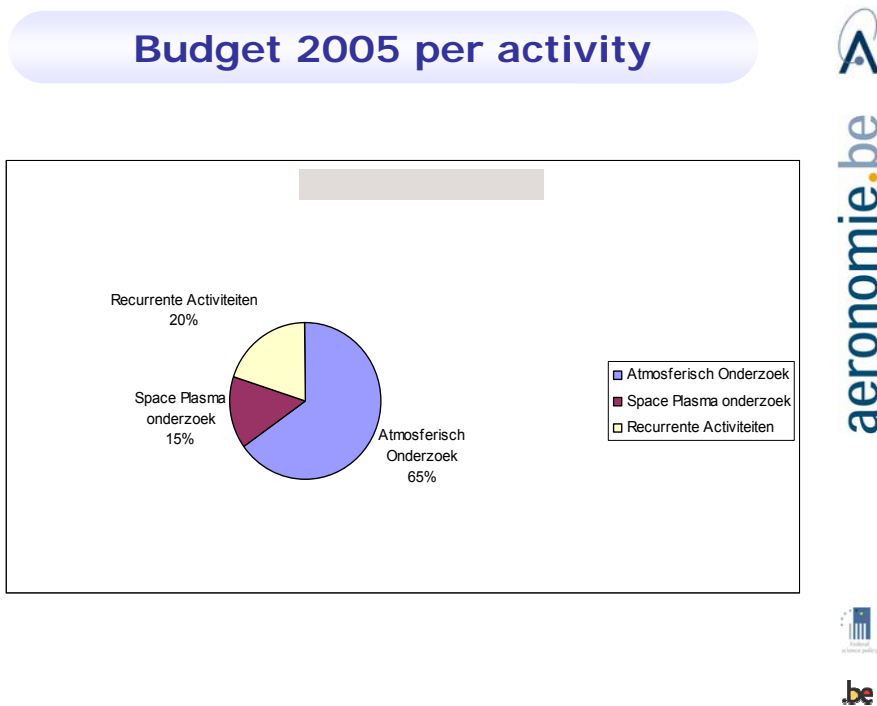
Recettes : 2.871.725 euros  
Dépenses :  
Personnel : 2.019.000 euros  
Fonctionnement : 637.000 euros  
Equipement : 94.330 euros

**Pour la section 4 - fonds de réserve :**

Le solde du fonds de réserve s'élève actuellement à 80.608 euros

Le partage des activités autour de 3 axes thématiques, tels que décrits:  
La chimie et la physique atmosphériques  
Le plasma spatial  
Valorisation/Exploitation

Est repris dans le graphique suivant:



Les activités récurrentes comprennent la valorisation et l'exploitation des résultats scientifiques pour les utilisateurs.

Elles comprennent principalement:

- La climatologie spatiale, au moyen de SPENVIS, SWENET, ...
- La chimie atmosphérique, avec BASCOE, UV index, des mesures d'ozone.
- Les activités B.USOC.



## D. ICT

Les objectifs principaux de l'équipe ICT de l'IASB est de créer un environnement de travail idéal pour les chercheurs de l'Institut et des prévoir l'infrastructure nécessaire pour l'accomplissement optimal de la recherche scientifique et des tâches opérationnelles annexes.

En ce qui concerne l'environnement de travail direct des scientifiques, on tend vers une standardisation possible des postes de travail et des logiciels, en maintenant la flexibilité nécessaire. Ceci nous permet d'augmenter la qualité de l'assistance et de réduire le temps que les personnes consacrent eux-mêmes à la gestion.

Les postes de travail actuellement utilisées sont des machines Windows XP, couplées à des terminaux X, ce qui donne l'accès tant aux logiciels classiques Windows, qu'aux programmes et aux codes scientifiques spécifiques sur les serveurs Unix et Linux. On consacre également de l'attention à l'ergonomie des postes de travail en passant progressivement aux grands écrans plats et en accordant de l'attention à la qualité des claviers et des souris.

En ce qui concerne l'infrastructure sous-jacente du réseau, des investissements importants ont été faits et des améliorations on été apportées.

Au cours des années 2004 et 2005, un effort important a été fait pour renforcer et compléter la gestion centrale de l'infrastructure ICT. Ceci a permis à une diminution importante du nombre d'interventions nécessaires à l'installation des mises à jour de logiciels et nous donne, à chaque instant, une meilleure approche de l'état actuel des systèmes.

Un autre grand changement est l'installation d'un système d'authentification centrale des utilisateurs de Windows. Grâce à ces réglementations, les utilisateurs ont maintenant beaucoup plus facilement accès à tous les services réseau offerts et le niveau de sécurité est accru.

Des investissements important ont été faits en ce qui concerne le stockage des données et les capacités de traitement, afin de répondre à la croissance explosive des besoins dans ces deux domaines.

- Les serveurs de données du projet ENvisat a dans un premier temps été complété et a finalement été rénové complètement en 2005. Nous disposant dès lors actuellement d'une très grande capacité de stockage, qui sera encore extensible dans le futur. Fin 2005, plus de 12TB de données étaient déjà disponibles en ligne pour les scientifiques.
- Pour le traitement des quantités énormes de données dont nous disposons, des investissements de grande envergure ont été faits pour augmenter la capacité de calcul existante.
  - au niveau de l'Institut, de nouveaux serveurs interactifs de calcul ont été installés pour le traitement des codes propres à nos utilisateurs.
  - au niveau de Pôle Espace, 3 Instituts ont rédigé un cahier des charges pour l'achat d'un nouveau serveur de calcul pour le traitement des plus grands modèles mathématiques des trois instituts et pour les prévisions

météorologiques. Ce nouveau serveur a été acquis fin 2005.

- En outre, un groupe de serveurs interactifs a encore été installé pour les trois instituts.

## **NETWORK**

L'équipe ICT de l'IASB a joué un rôle important dans tous ces projets d'infrastructure centrale de l'Espace Pôle, tant lors de la conception que lors de l'exécution des projets.

En 2004, un investissement considérable a été réalisé au réseau commun du Pôle Espace avec pour objectif de renforcer le réseau et de garantir notre accès à internet en toutes circonstances. En outre, des investissements ont été réalisés pour sécuriser notre propre réseau contre des attaques de l'extérieur par l'installation d'un firewall unique (ontdubbelde) ? et l'installation de cinq DMZ (zones démilitarisées).

Le routeur central existant switch omar2 (un Catalyst 4006) a été remplacé par le nouveau Catalyst 4507 équipé d'un seul (ontdubbelde) Supervisor Module. Ceci permet d'éliminer les pannes localisées qui sont susceptibles avoir des conséquences dramatiques sur l'ensemble du réseau.

Bien que nous disposions déjà d'une liaison de remplacement à l'internet (2 Mbps par fibre optique) à côté de notre relais hertzien de 34 Mbps, le chemin d'accès se faisait sur le même matériel d'une façon non redondante. Il a été remédié à ce problème par l'acquisition d'un routeur supplémentaire et des switchs réseau nécessaires.

Immédiatement, un firewall Pix 515 unique (ontdubbelde) a été installé entre notre réseau local et l'internet d'une part et les 5 nouvelles "zones démilitarisées" (DMZ) d'autre part. Chaque institut dispose maintenant, dans ses propres locaux, d'un DMZ à côté du DMZ commun et du "VisitorLAN". L'objectif est de faire migrer toutes les machines qui procurent des services via Internet (serveurs mail, serveurs web, serveurs ftp,...) vers ces DMZ.

En 2004, un investissement important a été consenti pour le réseau commun du Pole Espace. Le but était de rendre le réseau plus solide et de garantir notre accès à l'intenet en toutes circonstances. En outre, nous avons aussi investi au niveau de la sécurité contre les agressions extérieures en doublant notre pare feu et en mettant en œuvre 5 DMZ.

### Chapitre 3 : Coopération internationale

Il est de plus en plus manifeste que l'influence de l'homme sur son cadre de vie ne se limite plus à des perturbations à caractère local ou régional, mais que l'être humain transforme bel et bien la planète entière. Le terme anglais "global change" (changement global) englobe tous les changements de notre milieu de vie à l'échelle mondiale, changements qui peuvent d'ailleurs avoir une origine naturelle. Parmi les changements influençant le monde entier, l'on retrouve notamment les changements au niveau de la composition de l'atmosphère, du climat, des ressources en eau, de l'utilisation de la terre, de la couverture de la terre, des écosystèmes, etc. Il faut donc non seulement s'organiser politiquement et collaborer à l'échelle planétaire, mais également adopter une approche internationale et multidisciplinaire en matière de recherche.

L'ensemble des activités scientifiques de l'IASB s'inscrit dans un contexte international, dont le niveau est reconnu par cette communauté scientifique internationale. Les scientifiques de l'Institut sont en outre, grâce aux compétences qu'ils ont acquises, souvent invités à participer, en qualité d'experts, à des réunions d'évaluation organisées notamment par la CE (Commission européenne), la ESA/ASE (Agence Spatiale Européenne), le CNES (Centre National des études Spatiales), la NASA (National Aeronautics and Space Administration), le WCRP (World Climate Research Programme) et le WMO (World Meteorological Organisation). Le personnel scientifique contribue également à la définition de nouveaux projets d'observation, par exemple dans le cadre de l'ESA, et à l'élaboration de programmes scientifiques, notamment pour les réunions de l'IGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy), de l'IAMAS (International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences), de la SCOSTEP (Scientific Committee for Solar Terrestrial Physics), de l'EGS (European Geophysical Society) et de COSPAR (Committee on Space Research). Par ailleurs, des programmes d'observation sont également développés en collaboration avec d'autres pays européens. Une telle collaboration ne pourrait pas être réalisée sans le concours de l'Institut.

La collaboration scientifique entre les universités wallonnes et flamandes se développe aussi autour d'objectifs communs. L'IASB offre sa collaboration à l'enseignement et à la direction de travaux de fin d'étude. En outre, l'Institut reçoit régulièrement des visiteurs de l'étranger.

L'objectif de l'IASB, avec ses systèmes BASCOE et SPENVIS, comme avec le B.USOC (centre belge d'opérations spatiales qui y est implanté), est de renforcer son positionnement européen. Plus que jamais, l'Institut doit prendre en compte, dans un contexte de coopération internationale, les autres instituts scientifiques et centres de recherche. Car le climat est un monde complexe d'envergure globale, qui implique beaucoup d'aspects scientifiques, avec des synergies entre plusieurs disciplines. L'Institut a à son actif un long passé de coopération avec des équipes en France, Irlande, Allemagne et Finlande. Il est très moderne dans sa façon de travailler, sachant faire preuve d'une grande flexibilité devant une problématique pour développer une approche commune, pluridisciplinaire et internationale.

Cette collaboration se concrétise de différentes manières, par exemple:

## **Réseaux**

- l'IASB est un des participants de l'**intercomparaison IPCC-ACCENT**:

Les objectifs d'ACCENT sont de promouvoir une stratégie européenne commune pour la recherche sur le changement de la composition atmosphérique, pour développer et maintenir des moyens de communication et de collaboration au sein de la communauté scientifique européenne, de faciliter cette recherche et d'optimiser les interactions bilatérales avec les décideurs politiques et le public général.

Finalement, nous avons participé à un effort coordonné par le réseau d'excellence ACCENT visant à procurer une évaluation la plus complète possible des différences existant entre les modèles de chimie troposphérique globale. Il vise également à procurer les meilleures estimations des changements de composition prévus par le modèle, résultant d'émissions variables et de conditions climatiques évolutives. L'Intercomparaison est ciblée sur la distribution et le budget de O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, CO ainsi que les dépôts de composés de nitrate et de soufre. A peu près 20 modèles ont participé à cet exercice.

### **- NDACC**

Le NDACC de " Network for the Detection of Atmospheric Composition Change " (réseau pour la détection des modifications dans la stratosphère) est un réseau d'une soixantaine de partenaires dans le monde, dont la Belgique, et en particulier l'IASB.



Instrument sur le toit de la station (Ile) Jungfraujoch. Credits BIRA-IASB, J.-C. Lambert.

L'Institut effectue, dans ce cadre, des mesures spectroscopiques depuis les stations de Jungfraujoch (Alpes suisses) avec l'Université de Liège, depuis Harestua (Norvège) et depuis l'observatoire de Haute-Provence (France). Des campagnes d'observation ont par ailleurs été menées dans des domaines tropicaux, à la Réunion

Les partenaires du réseau observent la couche d'ozone à long terme. Ils cartographient des tendances et recherchent les liens avec le climat global. Le réseau est un complément tout à fait indispensable pour les observations satellitaires, qui seraient inutilisables sans mesures au sol.

- **Réseau européen pour la mesure de rayonnements UV visibles au sol – Rayonnement solaire**



Depuis 1993, l'IASB possède une station qui mesure automatiquement le rayonnement UV. Plusieurs techniques expérimentales sont combinées:

- Mesures spectrales,
- Mesures dans un domaine de longueurs d'ondes restreint.
- Mesures intégrées.

La combinaison de ces différentes techniques, illustrée par les photos, permet de déterminer l'UV-climatologie du lieu d'étude et d'étudier les influences du Soleil, des aérosols, et de la couverture nuageuse sur la percée des rayons UV sur la surface de la Terre.

### **Projets**

#### **- GSE PROMOTE (programme ESA)**

PROMOTE est la composante atmosphérique du programme GSE (GMES Service Element) de l'ESA, ayant pour mission de mettre en oeuvre des services opérationnels en support d'une politique d'action informée en matières de qualité de l'air, changement climatique, radiation UV de surface et protection de la couche d'ozone. Reposant sur un large consortium de plus de 35 instituts dont l'IASB - incluant des prestataires de services, des chercheurs et des utilisateurs, les services PROMOTE assistent les organisations d'utilisateurs dans le secteur public dans leurs obligations de surveillance et dans leur mission d'avertissement du public par exemple en cas de pics de pollution de l'air ou de degrés élevés de radiation UV. Les organisations internationales comme le WMO reçoivent des données satellitaires concernant l'état de la couche d'ozone stratosphérique ou encore de l'information en temps réel, comprenant des prévisions météorologiques, sur le trou d'ozone en Antarctique.

Un des défis majeurs de PROMOTE est d'intégrer les réseaux de mesure de la qualité de l'air au sol à des modèles et à des mesures satellitaires nouvellement disponibles afin de générer des informations journalières sur le niveaux de pollution de l'air à l'échelle de l'Europe entière.

PROMOTE couvre les échelles spatiales globale, régionale et locale à travers des services variés allant de la prévision de la qualité de l'air dans les rues de Londres à la détermination des tendances d'ozone sur plusieurs décennies en passant par la mise à disposition d'informations horaires concernant les niveaux de radiation UV sur les plages méditerranéennes.

#### **- Action COST 724**

Les objectifs de l'action COST 724 (coopération européenne dans le domaine de la recherche scientifique et technique) se dessine dans le cadre européen des logiciels de développement de météorologie spatiale, ainsi que dans le cadre des méthodes d'exploration visant à procurer une gamme de services de météorologie spatiale à un

nombre variable d'utilisateurs, basée sur la modélisation et la surveillance du système Soleil-Terre.

**Vingt-trois pays et quatre institutions ont participé à cette action, qui se déroule de novembre 2003 à novembre 2007.**

### **- DRAGON**

L'ESA, en collaboration avec le National Remote Sensing Centre of China (NRSCC), une entité sous l'autorité du Ministère de la Science et des Technologies de la République Populaire de Chine, ont travaillé dans le domaine du développement d'applications d'observation de la Terre au cours des dix dernières années.

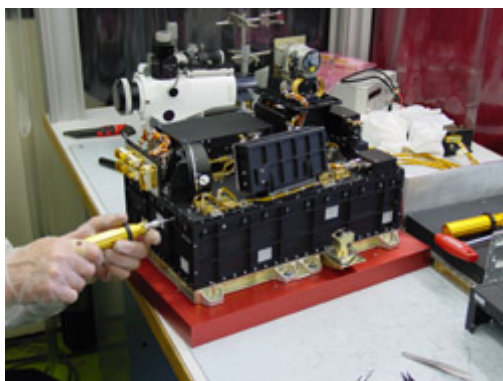
Le programme Dragon est axé sur la terre, l'océan et les investigations qui sont définies par le NRSCC :

- Pour promouvoir l'usage de données EO de l'ESA provenant des satellites ERS et Envisat
- Pour stimuler les échanges scientifiques en sciences EO et en technologie par la formation conjointe d'équipes sino-européennes.
- De publier des résultats de co-auteurs de la recherche et du développement d'applications.
- De donner accès à des formations en traitement, en développement d'algorithmes et de produits de données EO de l'ESA dans les applications pour la terre, l'océan et dans les applications atmosphériques.

### ***Programmes satellites***

#### **- VENUS EXPRESS**

L'envoi de la sonde Venus-Express, fut lancé le 9 novembre 2005 à destination de Vénus, la planète la plus proche de la Terre. Le SPICAV (Spectroscopie pour l'Etude des caractéristiques de l'Atmosphère de Vénus) est un spectromètre pour la mesure des rayons ultraviolets et infrarouges et a été réalisé en collaboration entre la France, la Belgique (via l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique), la Russie et les Etats-Unis.



## **Volonté de positionnement européen**

L'IASB se trouve bien positionné au niveau européen, notamment dans le cadre du programme GMES Atmosphere (Global Monitoring for Environment & Security). Tant avec une expertise scientifique qu'avec une offre de produits et services qui lui permette de s'intégrer au mieux dans un réseau en Europe.

L'exemple de l'observatoire spatial Envisat de l'ESA est très révélateur de la stratégie adoptée par l'IASB. En Europe, tout le monde n'était pas prêt à exploiter à fond les données des instruments d'Envisat. C'est la première fois qu'on a des données pratiquement en direct (real-time). C'est ce qui incité l'IASB à mettre au point le système BASCOE de modélisation et de prévision de la composition chimique de l'atmosphère. L'ESA avait pris l'initiative d'exploiter Envisat, qui était conçu comme un outil de recherche.

Avec Envisat, l'IASB a pu montrer qu'une exploitation adéquate des observations est faisable en quelques heures, qu'il est possible de mettre rapidement les informations à la disposition de besoins socio-économiques. C'est dans cette direction que l'Institut entend accentuer sa politique à long terme.

Envisat n'est pas seulement une belle expérience scientifique. C'est une référence pour l'Institut dans le domaine des applications spatiales mises au service de la société. C'est une excellente préparation pour la suite en assurant la continuité des informations, et ce, indépendamment des instruments à bord de satellites. Ces instruments s'améliorent. Après Envisat, il y a le satellite MetOp d'observation météorologique qui est mis en oeuvre par l'organisation européenne Eumetsat avec le support de l'ESA. Cette mise en oeuvre des moyens satellitaires place l'IASB en bonne position pour le programme GMES d'applications. Le concept GMES est en train de mûrir dans le contexte européen. Et l'IASB est prêt à relever les défis de GMES, qui correspond bien au 3ème pilier de ses activités, à savoir la valorisation et l'exploitation de la recherche. L'Institut, grâce à son potentiel de recherche, s'affirme face aux problèmes d'environnement et de changement globaux. Il veut élargir la coopération avec de nouveaux partenaires, comme les scientifiques du Canada et en Chine, et afin de répondre aux problèmes de l'Afrique en matière d'environnement.