



Belgian Institute for Space Aeronomy BIRA-IASB - Mozilla Firefox

File Edit View History Bookmarks Tools Help

Belgian Institute for Space Aeronomy BIRA-I...

www.aeronomie.be/en2011/index.htm

Google

nl fr Search | **Home** | Contact | Research | Services | Belgian Institute for Space Aeronomy

## BIRA-IASB

Follow us on  
f t

What is BIRA-IASB?  
What is aeronomy?  
Organisation  
Projects  
Jobs  
News - Press

The Belgian Institute for Space Aeronomy (BIRA-IASB) is a Belgian federal **scientific research institute**.

Its main tasks are research and public service in space aeronomy, which is the physics and chemistry of the **atmosphere** of the Earth and other planets, and of outer space.

We focus on:

Climate Ozone UV Air Quality Space Physics Planetary Aeronomy Scientific Services

### Scientific divisions

- [Space Physics](#)
- [Atmospheric Composition](#)
- [Solar Radiation in Atmospheres](#)
- [Scientific Services](#)

### Our research topics

- [Solar System](#)
- [Earth System](#)
- [Global Change](#)
- [Natural hazards](#)
- [Space missions](#)

belspo .be

Last update on 11/25/2011

# Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB)

## Rapport annuel 2010



## Table des matières:

<b><u>Avant-propos</u></b>	3
<b><u>Chapitre 1: Activités de recherche en aéronomie</u></b>	4
<b>1.1. Physique de l'espace</b>	4
<b><u>1.1.1. Étude de la magnétosphère :</u></b>	4
- Distribution des ions oxygène dans la magnétosphère	6
- Antenne VLF pour mesurer les ondes sifflements	
<b><u>1.1.3. Étude du couplage entre la magnétosphère et l'ionosphère</u></b>	8
- Projet BRAMS (Belgian RAdio Meteor Stations)	8
<b><u>1.1.4. Etude du vent solaire :</u></b>	10
- Que se passe-t-il au-dessus d'un arc auroral ?	10
<b>1.2. Composition des atmosphères</b>	12
<b><u>1.2.1. Observations dans l'infrarouge :</u></b>	12
- Comparaison entre les mesures NDIR et FTIR de CO effectuées entre 1997 et 2007 à Jungfraujoch dans les Alpes suisses	12
<b><u>1.2.2. Observations par spectroscopie de masse (en laboratoire et sur le terrain) :</u></b>	13
- Mesures de composés organiques volatils biogéniques au-dessus d'une forêt mixte des Ardennes belges	13
- Mesures en laboratoire en vue de la détection on-line sélective de composés organiques volatils biogéniques (COVB)	14
<b><u>1.2.3. Modélisation de la chimie troposphérique :</u></b>	16
- Mécanisme d'oxydation d'isoprène : défi majeur de la chimie troposphérique	16
<b><u>1.2.4. Observations dans l'UV-visible :</u></b>	18
- Support au service de contrôle de l'aviation	18
- Le programme initiatique de l'ESA sur le changement climatique et le projet « Ozone-cci »	18
<b><u>1.2.5. Recherche pour l'exploitation intégrée de données sur la composition atmosphérique:</u></b>	21
- Métrologie de la télédétection atmosphérique	21
- Ozone stratosphérique et climat	23
- Normes et protocoles	15
<b><u>1.2.6. Modélisation stratosphérique et assimilation d'observations :</u></b>	25
- Le réchauffement stratosphérique majeur 2009 décrit à partir des observations satellitaires MLS de vapeur d'eau et des analyses BASCOE	25
<b>1.3. Etude du rayonnement solaire dans les atmosphères</b>	27
<b><u>1.3.1. Mesures de sondages au limbe (Limb Remote Soundings) :</u></b>	27
- Projet Altius	27

<b><u>1.3.2. Etude du rayonnement solaire :</u></b>	29
- Réseau de mesures au sol dans l'« UV-Visible »	29
- Expérience spatiale SOLAR SOLSPEC	31
<b><u>1.3.3. L'aéronomie planétaire:</u></b>	33
- L'instrument SOIR participe à la compréhension de l'atmosphère de Vénus	33
- L'instrument NOMAD de l'IASB-BIRA sélectionné pour ExoMars	36
<b><u>Chapitre 2: Services et opérations scientifiques</u></b>	39
<b>2.1. Météorologie chimique (Chemical weather)</b>	39
<b><u>2.1.1. L'IASB assure le « service de l'ozone stratosphérique » dans le cadre du programme européen GMES</u></b>	39
<b><u>2.1.2. Démarrage du projet BACCHUS par l'IASB, l'IRM et Environnement Canada</u></b>	40
<b><u>2.1.3. Acquisition d'une capacité de prévision pour la dispersion des panaches volcaniques ou accidentels</u></b>	41
<b>2.2. La « météo spatiale » (Space weather)</b>	41
<b><u>2.2.1. Le portail ESWeP et le système SPENVIS</u></b>	41
<b>2.3. Le B.USOC et les missions spatiales</b>	44
<b><u>Chapitre 3: Structures de support</u></b>	45
<b>3.1. Service d'ingénierie</b>	45
<b><u>3.1.1. Contribution au projet NOMAD/ExoMars</u></b>	45
<b>3.2. ICT (supports informatiques et technologiques)</b>	46
<b>3.3. Administration: budget, personnel</b>	48
<b><u>3.3.1. Budget</u></b>	48
<b><u>3.3.2. Personnel</u></b>	49
<b>3.4. Communication</b>	52

## **Avant-Propos**

Le rapport annuel de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique de 2010 ci-joint confirme à nouveau la grande diversité des activités scientifiques et le grand dynamisme de celui-ci. Les observations essentielles de l'atmosphère depuis le sol et depuis l'espace ont été poursuivies. Elles nous donnent une bonne vision du comportement de l'atmosphère, de sa variabilité et de son évolution à long terme. Des modèles mathématiques sont développés afin de mieux comprendre et expliquer ces observations, en fonction de l'influence du soleil, de l'activité humaine et des procédés photochimiques et physiques dans l'atmosphère. Les activités de l'IASB contribuent à des programmes de recherche internationaux tels que SPARC, Stratospheric Processes and their Role in Climate, des projets européens financés par l'ESA ou la Commission Européenne et des programmes nationaux tels que le programme 'Science pour un Développement Durable'. L'IASB joue également un rôle important dans les initiatives qui offrent des services scientifiques à la communauté. Ainsi l'IASB est co-responsable du Stratospheric Ozone Service dans le projet précurseur du 'GMES (Global Monitoring for Environment and Security) Atmospheric Service'. L'IASB contribue aussi grandement aux réalisations scientifiques du 'Solar-Terrestrial Center of Excellence', reposant sur les trois instituts scientifiques fédéraux du plateau d'Uccle.

Nous pouvons dire avec fierté qu'en 2010 l'IASB a obtenu un rôle important dans le programme 'Climate Change Initiative' (CCI) de l'ESA, en tant que coordinateur du projet Ozone CCI et en participant aux projets sur les gaz à effet de serre et les aérosols dans cette même initiative. En 2010, l'instrument NOMAD a été sélectionné pour participer à la mission NASA-ESA d'envoi du satellite 'ExoMars Trace Gas Orbiter' vers la planète Mars, prévu en 2016. L'IASB est 'Principal Investigator' pour NOMAD. En collaboration avec l'Observatoire Royal de Belgique, l'IASB a pris une place importante dans le programme 'Space Situational Awareness' de l'ESA.

Afin de réaliser tout cela, l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique peut compter sur près de 80 collaborateurs scientifiques et l'excellent soutien fourni par son personnel technique et administratif. Malheureusement, nous devons également constater que les conditions dans lesquelles le personnel doit travailler ne sont pas optimales. Le personnel scientifique statutaire est toujours en attente de la pleine application de son statut qui a été révisé en 2008, le personnel scientifique contractuel ne peut être rétribué à sa juste valeur, les promotions du personnel administratif / technique ne sont pas confirmées, et l'expansion promise de l'infrastructure de l'atelier de mécanique se fait attendre.

Cher lecteur,

Les activités mentionnées ci-dessus ne sont qu'un aperçu de notre grand assortiment de projets de recherche. Je vous invite donc à lire ce rapport dans l'espoir qu'il vous donnera une meilleure idée de la totalité des activités scientifiques et des réalisations du personnel de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique. J'espère également que vous apprécierez le dynamisme de notre personnel, que contribue à la réputation nationale et internationale de l'Institut et au rôle important de l'Institut dans les programmes de recherche internationale et de services scientifiques dans le domaine de l'aéronomie. En 2011, année de publication de ce rapport, vous aurez également la possibilité de consulter notre site web entièrement repensé ([www.aeronomie.be](http://www.aeronomie.be)) afin d'obtenir des informations supplémentaires et mises à jour sur l'ensemble de nos activités.

M. De Mazière  
Directeur Général ad interim

# Chapitre 1: Activités de recherche en aéronomie

## 1.1. Physique de l'espace

### 1.1.1. Étude de la magnétosphère :

#### Distribution des ions oxygène dans la magnétosphère

Le soleil émet continûment un flot de particules chargées appelé vent solaire. Celui-ci est dévié par le champ magnétique terrestre qui forme ainsi une cavité autour de la Terre nommée la magnétosphère (Figure 1). La magnétosphère possède deux interfaces : une avec l'atmosphère et une avec le vent solaire. A travers de ces interfaces s'effectuent des échanges de matière et d'énergie. Deux sources contribuent donc à peupler la magnétosphère : le soleil et l'atmosphère terrestre. Le vent solaire doit se frayer un chemin à travers la frontière externe de la magnétosphère alors que le plasma provenant de la haute atmosphère (l'ionosphère) doit acquérir assez d'énergie pour s'affranchir de la gravité terrestre et venir peupler la magnétosphère.

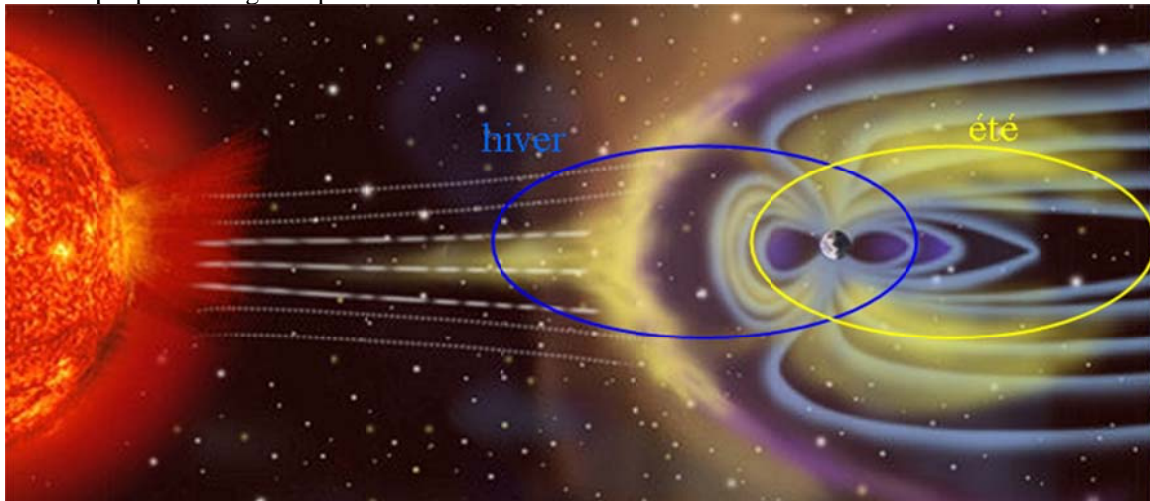


Figure 1: Représentation schématique de la magnétosphère terrestre et de son interaction avec le vent solaire. L'orbite des satellites Cluster pendant les périodes hivernales et estivales est indiquée respectivement en bleu et en jaune.

Un des problèmes à résoudre pour la compréhension de la dynamique de la magnétosphère est la contribution relative de ces deux sources. La source ionosphérique a longtemps été sous-estimée. Ce n'est qu'à partir des années 1970, avec le développement d'instruments mesurant la composition du plasma, que son importance a commencé à être prise en compte. En effet, alors que le vent solaire est majoritairement composé de protons, le plasma d'origine ionosphérique comporte une forte proportion d'ions lourds, en particulier d'ions oxygène. Cette différence de composition permet de distinguer l'origine du plasma. Elle a aussi d'importantes conséquences sur la dynamique de la magnétosphère. Les ions  $O^+$  étant 16 fois plus lourds que les ions  $H^+$ , la présence de plasma d'origine ionosphérique modifie drastiquement la densité massique du plasma magnétosphérique. Or les propriétés fondamentales du plasma, et par conséquent les processus physiques qui s'y déroulent, dépendent de cette densité massique.

La connaissance de la composition du plasma magnétosphérique est donc une question clé de la physique magnétosphérique. Des mesures satellitaires sur place sont le seul moyen de mesurer cette composition. Cependant, celles-ci ne concernent que des régions limitées de la magnétosphère et ne permettent pas d'obtenir une vision globale de la composition du plasma magnétosphérique.

Afin de pallier ce manque, nous avons développé une méthode permettant de projeter les mesures sur place au niveau du plan équatorial de la magnétosphère afin d'obtenir des cartes qui représentent la

composition du principal réservoir de plasma magnétosphérique : la couche de plasma qui se forme du coté nuit de la Terre. Pour cela nous utilisons les mesures des satellites Cluster de l'Agence Spatiale Européenne. Cette constellation de 4 satellites fournit des mesures de la composition du plasma magnétosphérique depuis 2001. Ces données réparties sur une décennie permettent de couvrir un cycle solaire entier. De plus, grâce à leur orbite elliptique et grâce à la précession de cette orbite au cours de l'année (Figure 1), les satellites Cluster traversent les principales régions de la magnétosphère.

Notre méthode consiste à projeter chaque mesure de composition du plasma le long du champ magnétique jusqu'au plan équatorial de la magnétosphère. En effet, la composition du plasma bien au-dessus de l'ionosphère est constante le long des lignes de champ magnétique. L'établissement de telles cartes demande un travail approfondi sur les données fournies par les détecteurs d'ions des satellites Cluster. Ceci est fait en collaboration avec L. Kistler de l'Université du New Hampshire, co-responsable du détecteur d'ions des satellites Cluster et qui a participé à leur étalonnage.

Deux facteurs sont susceptibles de faire varier la teneur du plasma magnétosphérique en ions  $O^+$ . Le premier est le rayonnement UV solaire qui est responsable de la production d'ions dans l'ionosphère. Il varie au cours du temps en suivant le cycle d'activité solaire de 11 ans. On peut donc utiliser l'indice d'activité solaire « F10.7 », donnant le flux radio à une longueur d'onde de 10.7 cm, pour caractériser les émissions du soleil dans l'UV. L'autre facteur est l'activité géomagnétique, qui est la conséquence du couplage entre le vent solaire et la magnétosphère. Ce couplage variable permet un transfert d'énergie du vent solaire vers la magnétosphère. Une partie de cette énergie se dépose dans l'ionosphère fournissant ainsi aux ions ionosphériques l'énergie nécessaire pour s'affranchir de la gravité terrestre et aller peupler la magnétosphère, comme dans les aurores. L'activité géomagnétique est quantifiée avec l'indice « Kp » qui est obtenu par la mesure des variations du champ magnétique.

La figure 2 représente les cartes ainsi obtenues. Ces cartes donnent le pourcentage d'oxygène dans le plan équatorial de la magnétosphère en fonction de l'activité solaire (indice F10.7) et de l'activité géomagnétique (Kp). Ces cartes ont été validées en les comparant à d'autres mesures sur place (Maggiolo et al., 2011).

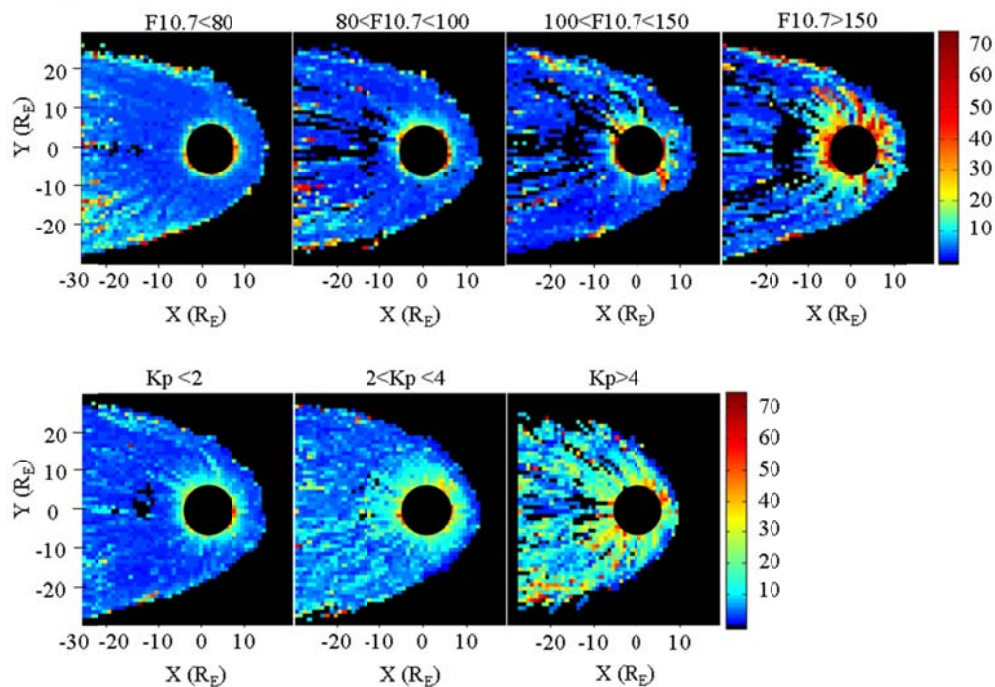


Figure 2 : Cartes statistiques de la distribution d'oxygène dans la magnétosphère terrestre obtenues à partir des mesures du satellite Cluster 4. Le soleil est situé à droite des images et le rond central noir correspond aux régions situées à moins de 8 rayons terrestres, où les mesures sont inutilisables car contaminées par les particules énergétiques des ceintures de radiation. L'échelle de couleurs indique

*le pourcentage d'ions oxygène :  $100 \times n_{O^+} / (n_{O^+} + n_{H^+})$ . Les cartes du haut correspondent à différents niveaux d'activité solaire et les cartes du bas à différents niveaux d'activité géomagnétique.*

On s'aperçoit que, lorsque l'irradiation solaire augmente, la proportion d'oxygène augmente, principalement à proximité de la Terre. Cela s'explique par une augmentation de la densité ionosphérique causée par un accroissement du taux d'ionisation dû aux UV solaires. De même, la proportion d'oxygène augmente lorsque l'activité géomagnétique croît. C'est la conséquence d'une augmentation de l'apport d'énergie de la magnétosphère vers l'ionosphère ce qui accélère les particules ionosphériques et leur permet de s'extraire du champ de gravité terrestre. Cet effet est plus marqué et concerne toutes les régions de la couche de plasma, même les régions distantes de la queue magnétosphérique. Ainsi les plus fortes concentrations d'oxygène sont observées lors de périodes de forte activité géomagnétique.

La proportion d'oxygène varie de quelques pourcents à près de 50 %. Quand on sait que la densité massique d'un plasma composé de 93% d' $H^+$  et 7% d' $O^+$  est deux fois plus grande que la densité d'un plasma composé de 100% d' $H^+$ , on se rend compte du rôle important que joue la source ionosphérique sur la dynamique de la magnétosphère terrestre.

Ces cartes donnent pour la première fois une vision globale de la composition du plasma magnétosphérique en fonction de l'activité solaire et géomagnétique. Elles pourront servir de référence pour contraindre la densité massique du plasma magnétosphérique. Cette information est de la première importance pour analyser les mécanismes physiques qui se déroulent dans la magnétosphère. Elle pourra aussi être utilisée pour affiner les modèles magnétosphériques globaux. Enfin, cette nouvelle façon de présenter les données permettra de faire des études plus approfondies sur la répartition spatiale et la dynamique des ions d'origine ionosphérique au sein de la magnétosphère.

#### **Référence :**

Maggiolo, R.; Kistler, L. : Mapping of the  $O^+/H^+$  density ratio in the magnetospheric equatorial plane using Cluster data, American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, abstract #SM33B-1899.

### **Antenne VLF pour mesurer les ondes sifflements**

#### ***Les ondes sifflements***

L'existence des ondes sifflements (« whistlers » en Anglais) a été montrée pour la première fois par le Dr. Barkhausen en 1918. Son origine a été expliquée pour la première fois en 1953 par le Dr. O. Storey, montrant que les sifflements avaient comme origine des éclairs. Ainsi, lors d'un orage, un éclair crée une impulsion électromagnétique, qui est ensuite guidée le long des lignes de champ magnétique de la Terre dans l'ionosphère puis la magnétosphère jusqu'à l'hémisphère opposé, où elle peut être observée par des antennes (Figure3). Le nom sifflement provient du fait que la transposition du signal dans la gamme audio donne l'impression d'un sifflement descendant, très caractéristique. Les sifflements ont des caractéristiques particulières de fréquence et de temps qu'elles acquièrent au cours de leur propagation le long des lignes du champ magnétique. Notamment, le délai de propagation dépend de la densité du plasma le long de leur trajet; cela permet d'en déduire la densité du plasma dans les régions que les ondes traversent, notamment dans la plasmasphère.



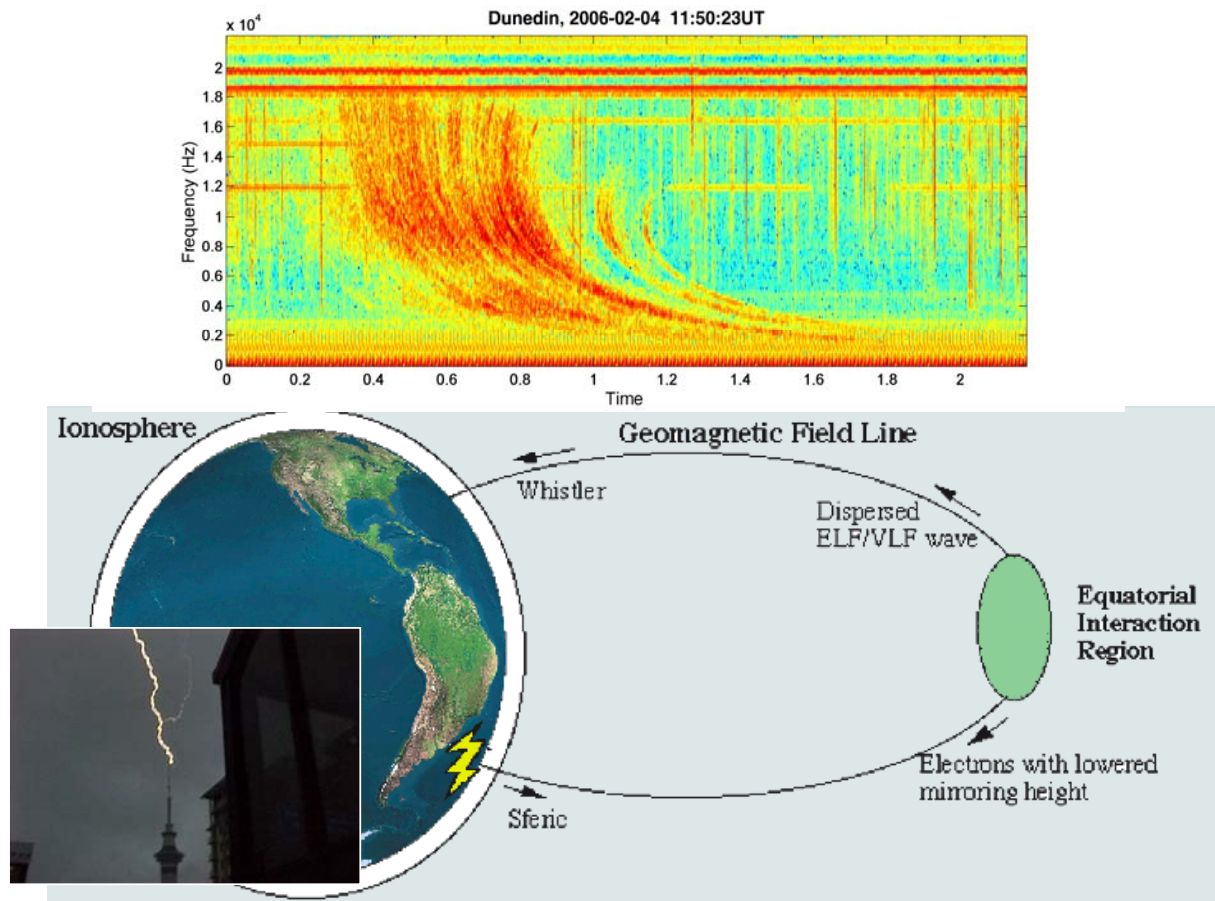


Figure 3: Schéma descriptif des ondes sifflements.

### **Projet à l'IASB**

Suite à un premier contact avec le Dr. J. Lichtenberger (Space Research Group, Eötvös University, Hongrie) au cours d'une conférence en Novembre 2009, l'IASB a entamé une étude de faisabilité d'installation en Belgique d'une antenne de réception des ondes sifflements dans le domaine des TBF (Très Basse Fréquence, 3-30 kHz), ou en Anglais VLF (« Very Low Frequency »).

Le site de Humain (latitude ~ 50.11°N, longitude ~ 5.15°E), qui appartient à l'Observatoire Royal de Belgique (ORB), a été sélectionné assez rapidement pour des raisons logistiques. Dr. J. Lichtenberger et Dr. C. Ferencz sont venus effectuer des tests de mesure en Mai 2010, afin de vérifier la qualité des ondes radios qui pouvaient être mesurées en ce lieu. Les tests étant très positifs, le site d'Humain a été définitivement choisi, grâce également à l'accord de l'ORB.

Ce projet fait partie du réseau AWDAnet (Automatic Whistler Detector and Analyzer system's network), qui a été initié par le Dr. J. Lichtenberger. Il comprend 6 antennes en Europe (et 5 autres en développement) et 9 dans le reste du monde (et 9 autres en développement).

Ces mesures de sifflements pourront donc nous permettre d'en déduire la densité du plasma dans la plasmasphère, et ainsi effectuer des comparaisons avec des données mesurées par d'autres antennes du réseau AWDAnet, mais également avec des données mesurées à bord de satellites (Cluster par exemple), ou obtenues à l'aide de modèles numériques.

### **Installation de l'antenne à Humain.**

L'antenne initialement choisie devait être montée sur un mât de 18 mètres de haut. Cependant, pour des problèmes de licence (hauteur maximale de 12 mètres pour ne pas devoir demander un permis spécial) et pour éviter de perturber les mesures de vent effectuées à proximité, nous avons décidé de réduire le mât à 12 mètres. Il a été installé en Novembre 2010, ainsi que l'instrument de mesure, qui

est composé de 2 boucles magnétiques perpendiculaires (directions Nord-Sud et Est-Ouest), chacune d'une surface d'environ 50 m<sup>2</sup> (Figure 4). Il nous reste maintenant à automatiser l'enregistrement des données, la transmission des données vers l'IASB, et l'archivage. On envisage l'utilisation des données pour l'amélioration de nos modèles des caractéristiques de la plasmasphère.



Figure 4: Photo de l'antenne VLF installée à Humain, Belgique.

### **1.1.3. Étude du couplage entre la magnétosphère et l'ionosphère :**

#### **Projet BRAMS (Belgian RAdio Meteor Stations)**

Des milliers de météoroïdes d'une taille allant de quelques dixièmes de millimètre à plusieurs mètres pénètrent dans l'atmosphère terrestre en permanence. Leur masse cumulée est de l'ordre de 40 à 100 tonnes par jour. Ces météoroïdes jouent un rôle crucial dans nombres d'études astronomiques et aéronomiques. Généralement, ils sont détectés de manière visuelle ou avec des radars lors de leur interaction avec l'atmosphère. Dans le cadre du Solar-Terrestrial Center of Excellence (STCE), l'IASB développe BRAMS (Belgian RAdio Meteor Stations), un réseau de stations radio implantées en Belgique afin de détecter et caractériser la population des météoroïdes. Ce réseau utilise la technique de diffusion en avant (forward-scattering en anglais) qui consiste à émettre un signal radio verticalement et mesurer ce signal, lorsqu'il est réfléchi sur un météore, avec plusieurs stations de réception relativement éloignées de l'émetteur (Figure 5).

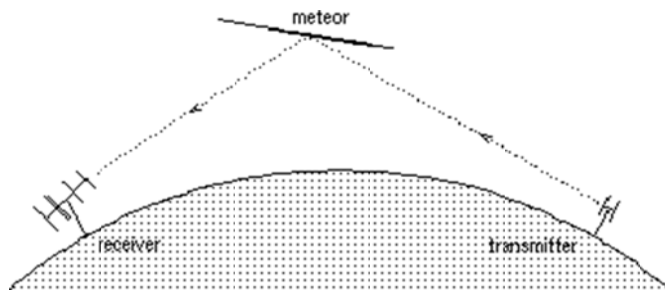


Figure 5 : Détection des météores par la technique de diffusion en avant.

L'originalité de BRAMS est qu'il s'appuie sur un réseau d'une vingtaine de stations de réceptions principalement opérées par des radioamateurs ou des groupes d'amateurs astronomes. Grâce à cette collaboration unique, une très bonne couverture de la Belgique, en terme de stations de réception, est possible (Figure 6).

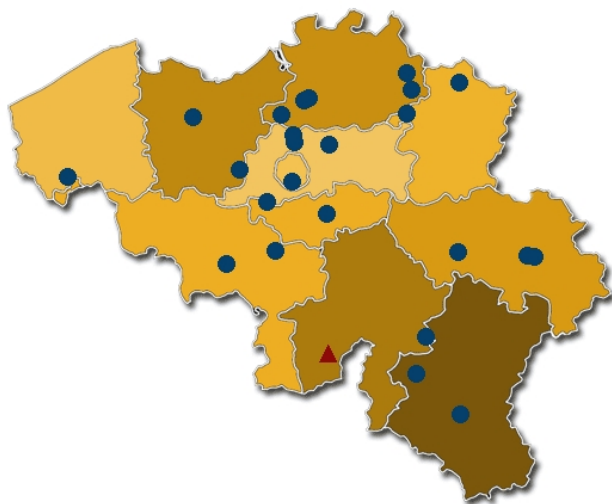


Figure 6 : Localisation de la balise émettrice (triangle rouge) et des stations de réception (cercles bleus).

L'émetteur radio a été installé sur le site du Centre de physique du Globe de Dourbes (Figure 6) de l'Institut Royal Météorologique (IRM). Ce site a été choisi pour son emplacement géographique, son infrastructure existante et la présence du personnel de l'IRM. Grâce à la collaboration avec l'IRM, la station émettrice est opérationnelle depuis septembre 2010. L'antenne émettrice est une

Yagi croisée deux éléments (Figure 7) qui émet une sinusoïde pure à 49.97 MHz avec une puissance de 150 watts et une polarisation circulaire en direction du zénith.



Figure 7 : Antenne émettrice

Les stations de réception du réseau seront équipées avec le même matériel afin d'avoir un réseau homogène et de pouvoir comparer les données. Chaque station de réception comprend une antenne Yagi 3 éléments simple polarisation (Figure 8) un récepteur radio et un récepteur GPS afin de synchroniser les données provenant de chaque station. Une première station de l'IASB a été installée dans le parc météorologique de l'IRM à Uccle. Figure 9 est un exemple de spectrogramme enregistré par une station de réception.

De plus, la conception et l'installation d'un interféromètre sur le site radio-astronomique de Humain, appartenant à l'Observatoire Royal de Belgique (ORB) ; ont été initiées. Le site de Humain a été choisi pour différentes raisons : faible bruit radio, grand espace, infrastructure existante, présence du personnel de l'ORB. Cet interféromètre comprend cinq antennes Yagis dont une double polarisation. Cet instrument permet de calculer la direction d'arrivée précise d'un point de réflexion le long de la trajectoire du météore.



Figure 8 : Antenne Yagi 3 éléments.

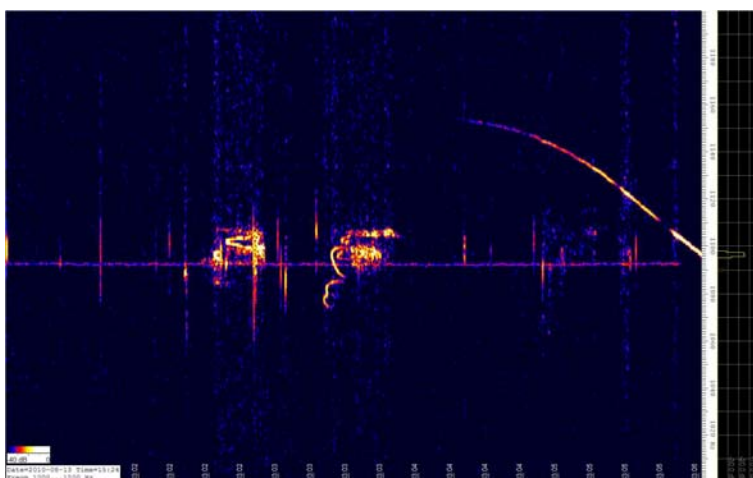


Figure 9: Données enregistrées par une station de réception.

L'avancement du projet BRAMS peut être suivi sur le site internet dédié (<http://brams.aeronomie.be>) qui est mis à jour régulièrement. Ce réseau, qui est un excellent exemple de partenariat amateurs-professionnels, a fait l'objet d'une présentation au JENAM 2010 (Joint European and National Astronomy Meeting) à Lisbonne dans la session « Amateur and professional astronomers in Europe: how pro-am cooperation is changing astronomy ».

#### **1.1.4. Etude du vent solaire :**

##### **Que se passe-t-il au-dessus d'un arc auroral ?**

Les aurores restent un phénomène mal compris. Comme complément aux études théoriques et observationnelles que nous avons complétées ces dernières années, nous avons construit un modèle numérique pour étudier la physique le long des lignes de champ géomagnétique au-dessus d'un arc auroral. Ce modèle implémente une simulation de l'équation de Vlasov. Pour rendre la solution d'un tel modèle possible, on a réduit le nombre de dimensions que l'on considère : il s'agit d'un modèle 1d2v, c'est-à-dire, nous considérons une dimension spatiale (l'altitude au-dessus de l'ionosphère) et deux dimensions dans l'espace des vitesses (vitesse parallèle et perpendiculaire), et on cherche une solution stationnaire.

Le développement d'un tel modèle n'est pas évident. La région aurorale à partir de l'ionosphère jusqu'aux régions au-dessus de la zone d'accélération aurorale couvre un intervalle de densité et de

champ magnétique très large. Ceci nécessite que la simulation résolve en même temps des échelles petites et des structures larges. Le but de la simulation est d'obtenir la variation du potentiel électrostatique en fonction de l'altitude, et la dépendance du plasma magnétosphérique au-dessus et du plasma ionosphérique en-dessous de la région considérée. En particulier, on voudrait obtenir la relation courant-voltage, qui exprime l'intensité des courants alignés en fonction du potentiel électrostatique entre la magnétosphère et l'ionosphère. Des expressions analytiques pour cette relation ont été établies dans le passé, basées sur certaines hypothèses qui ne sont pas toujours réalistes. La simulation pourrait nous donner une meilleure appréciation de ces hypothèses et leurs conséquences. Figure 10 montre un résultat typique de la variation de la densité et du potentiel électrostatique avec la hauteur. L'existence d'une couche avec un champ électrique parallèle bipolaire est mis en évidence. Un gradient de densité très fort se développe à cet endroit.

La difficulté principale des simulations, c'est la complexité des calculs. Nous avons continûment amélioré la vitesse des calculs. D'abord, nous avons introduit une constante diélectrique artificielle dans le modèle. Au début, cette constante a une valeur assez élevée, mais elle est progressivement réduite vers une valeur réaliste. Ceci permet d'établir une solution initiale plus rapidement avec un pas temporel élevé. La solution a été accélérée par l'usage d'un maillage non-uniforme, qui permet plus de détail dans l'ionosphère, où en effet des structures à petite échelle sont présentes. Le modèle bénéficie de techniques de calcul parallèle sur un ordinateur avec 36 processeurs.

Dans le futur proche, nous voudrions continuer et élargir ces simulations. Une série de simulations avec des conditions ionosphériques et magnétosphériques différentes nous permettra de créer une relation courant-voltage paramétrées que nous pourrions utiliser dans nos autres recherches sur la structure du système de courants électriques autour et au-dessus des aurores. Ce sera très intéressant de confronter les résultats des simulations avec des observations satellitaires comme celles de la mission Cluster.

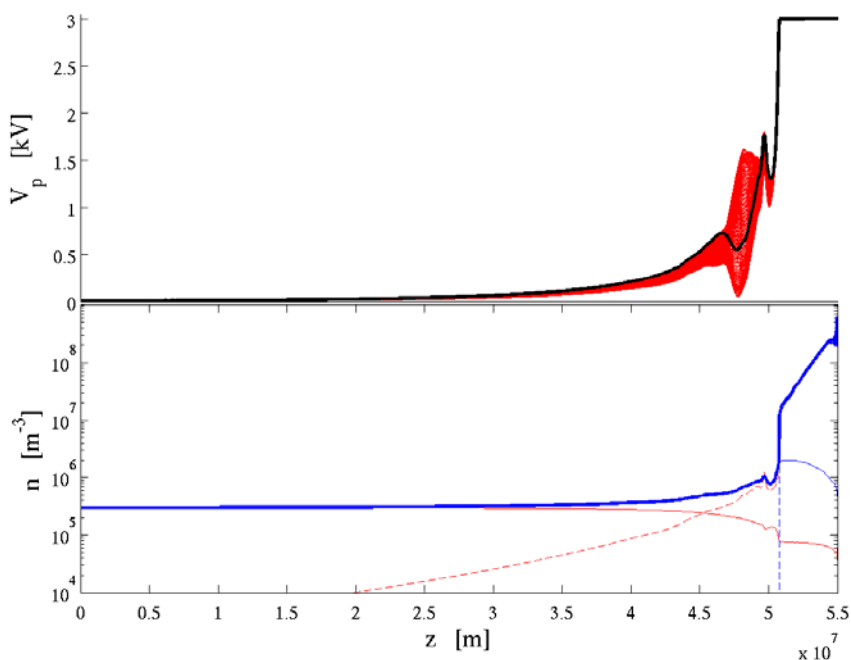


Figure 10: Structure du champ électrique et du plasma au-dessus d'un arc auroral;  $z$  représente l'altitude, avec l'équateur magnétosphérique à  $z = 0$  (à gauche) et l'ionosphère à  $z = 55000$  km (à droite). En haut : La courbe noire montre le potentiel électrostatique à un instant particulier ; la région rouge montre la variabilité du potentiel pendant 0.1 s. En bas : La courbe bleue montre la densité totale ; les autres courbes donnent les protons (rouge) et les électrons (bleu) d'origine magnétosphérique, et les courbes en pointillés donnent les protons (rouge) et les électrons (bleu) d'origine ionosphérique.

## 1.2. Composition des atmosphères

### 1.2.1. Observations dans l'infrarouge :

#### Comparaison entre les mesures NDIR et FTIR de CO effectuées entre 1997 et 2007 à Jungfraujoch dans les Alpes suisses

La demande croissante d'ensemble de données intégrées soulève la question de l'étude des différences fondamentales entre ces données. Tant les techniques de mesure NDIR (Non Dispersive Infrared) que FTIR (Fourier Transform Infrared) disposent d'un long état de service et d'une grande fiabilité. La différence majeure entre ces deux méthodes est que la technique NDIR s'utilise in situ, autrement dit l'instrument prélève des échantillons de l'environnement direct, tandis que la méthode FTIR mesure l'absorption de CO atmosphérique dans la partie infrarouge de la lumière du soleil observée sur Terre, ce qui implique donc une mesure de toute la colonne atmosphérique. Heureusement, il est également possible, jusqu'à un certain point, de déterminer un profil vertical de la concentration en CO à l'aide des spectres d'absorption. Cela nous permet de comparer les concentrations NDIR effectuées in situ avec celles dérivées des mesures FTIR réalisées dans la couche inférieure jusqu'à 7,18 km au-dessus du niveau de la mer (le site de Jungfraujoch se situe à 3,56 km d'altitude).

Cette différence de représentativité (3,56 km d'altitude pour NDIR et entre 3,56 et 7,18 km pour FTIR) a pour conséquence directe que les mesures NDIR s'avèrent plus sensibles à l'influence des concentrations en CO élevées de la région qui atteignent régulièrement la station de Jungfraujoch depuis la vallée. En particulier, l'air méridional provenant de la plaine du Pô, très polluée, peut fortement influencer les observations NDIR. Par conséquent, les données NDIR affichent davantage de pics de CO, qui atteignent en outre des valeurs bien plus élevées, que les données FTIR (voir figure 11). Une seconde observation est la nette différence de l'évolution à long terme ( $-3,21 \pm 0,03$  ppm CO/an pour NDIR, seulement  $-0,8 \pm 0,4$  ppm CO/an pour FTIR).

En vue d'éliminer de l'ensemble des données les intrusions de CO depuis la vallée, on a eu recours à une technique de filtrage statistique (Robust Extraction of Baseline Signal ou REBS, voir figure 12). Cette sélection de valeurs de fond influe significativement sur l'évolution NDIR (désormais  $-2,62 \pm 0,03$  ppm CO/an), mais l'écart par rapport à FTIR ( $-0,7$  ppm CO/an après un processus de filtrage similaire) reste considérable.

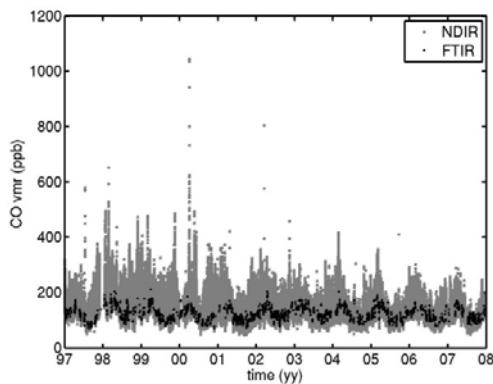


Figure 11 : concentrations en CO (en ppb) en fonction du temps (année). Toutes les mesures NDIR (gris) et FTIR (noir) individuelles

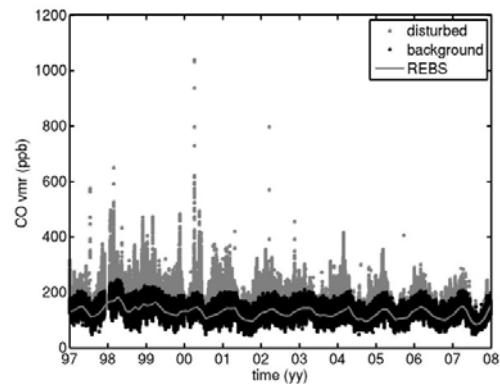


Figure 12 : concentrations en CO (en ppb) à partir de la méthode NDIR en fonction du temps (année). L'ensemble de données initial (gris) et les valeurs de fond obtenues après filtrage REBS-CNR (noir).

D'autres causes potentielles de cette différence, comme l'humidité de l'air et des conditions de mesure différentes (les mesures NDIR se déroulent en continu tandis que les observations FTIR requièrent un éclairage direct du soleil), ne se sont pas révélées concluantes. Des simulations sur la base du modèle LAGRANTO, alimenté par des données issues de bases de données d'émission telles que GFED (CO relâché par la combustion de biomasses) et EDGAR (émissions anthropogéniques), ont montré d'importantes divergences entre les différentes régions sources en fonction de l'altitude. Ainsi, à 650 hPa (environ l'altitude de la station de Jungfraujoch), les émissions nord-américaines représentent les principales contributions au bilan de CO total au-dessus de Jungfraujoch. Ensuite viennent les émissions européennes et asiatiques. Aux altitudes supérieures, l'influence européenne se réduit considérablement, à l'inverse de l'influence asiatique, qui augmente substantiellement. Les valeurs NDIR simulées par le modèle coïncident parfaitement avec les valeurs mesurées. En revanche, la concordance entre les valeurs FTIR simulées et les données mesurées n'est pas aussi bonne. Tandis que le modèle, à l'instar des mesures, ne révèle qu'une faible tendance négative après 2001, il indique une très forte tendance négative avant 2001, contrairement aux mesures. Afin de pouvoir expliquer l'évolution FTIR faiblement négative au cours de toute la période mesurée, il faudrait que l'augmentation asiatique en CO compense la baisse européenne et américaine. Or, selon les différentes bases de données d'émission, les émissions asiatiques ont enregistré une stagnation entre 1997 et 2001, la hausse de CO ne débutant qu'après 2001. Nos données FTIR contredisent toutefois cet état de fait.

Il est clair que, même pour des mesures effectuées sur le même site au moyen de deux instruments produisant des valeurs avec une très grande corrélation, d'importantes divergences peuvent malgré tout survenir lorsqu'on considère les données à plus long terme, car les différentes mesures sont effectivement sensibles à une autre masse d'air avec des origines diverses. Il s'avère dès lors crucial de tenir compte de ces effets lors de l'intégration d'ensembles de données.

### **1.2.2. Observations par spectroscopie de masse (en laboratoire et sur le terrain) :**

#### **Mesures de composés organiques volatils biogéniques au-dessus d'une forêt mixte des Ardennes belges**

Les composés organiques volatils (COV) forment un important groupe de gaz en traces présents dans la couche inférieure de l'atmosphère terrestre. Ces composés proviennent en partie d'activités humaines telles que le trafic, la combustion de carburants fossiles, l'utilisation de solvants organiques et le traitement des déchets. La végétation terrestre constitue toutefois la principale source de COV, puisqu'elle émet chaque année 1150 Tg de carbone. L'isoprène ( $C_5H_8$ ) et les monoterpènes ( $C_{10}H_{16}$ ) sont les composés organiques volatils biogéniques (COVB) les plus relâchés dans l'atmosphère. Il s'agit d'hydrocarbures insaturés hautement réactifs qui s'oxydent dans l'atmosphère en quelques heures et qui forment *in fine* de l'ozone et des aérosols organiques secondaires. Par conséquent, les émissions de COVB ont un impact significatif sur la qualité de l'air et le climat. De plus, étant donné que les émissions de COVB augmentent exponentiellement avec la température, l'on suppose que l'importance de cet impact se renforcera avec les conditions climatiques futures.

Des prévisions fiables de la qualité de l'air et des changements climatiques impliquent une bonne connaissance des taux d'émission et de la chimie des COVB à l'échelle locale et mondiale. À cet effet, il est plus qu'impératif de disposer d'algorithmes d'émission de COVB améliorés qui tiennent compte de différents paramètres environnementaux et écophysologiques clés, et de confronter ces algorithmes à des mesures à long terme de flux de COVB.

Afin de répondre au besoin de mesures à long terme d'émissions de COVB à l'échelle écosystémique, l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique et l'Unité de Physique des Biosystèmes de l'Université de Liège à Gembloux (Gembloux Agro-Bio Tech) ont commencé en juillet 2009 des mesures de flux de COVB au-dessus de la canopée d'une forêt mixte des Ardennes belges (Vielsalm) en recourant à la méthode appelée « disjunct eddy covariance ». Ces mesures s'inscrivent dans le cadre du projet SSD IMPECVOC (IMPact of Phenology and Environmental Conditions on the emission of Volatile

Organic Compounds by forest ecosystem) et sont financées par la Politique scientifique fédérale belge (BELSPO). Elles ont été interrompues à la fin de la saison de croissance (mi-novembre 2009) avant de reprendre de la fin mars à la mi-novembre 2010. Ces mesures ont déjà permis de constituer une importante base de données composée de concentrations en COVB, de flux de COVB ainsi que de paramètres environnementaux, ce qui offre la possibilité de réaliser une analyse statistique détaillée. Outre l'isoprène et les monoterpènes, deux composés émis en très grandes quantités dans des peuplements forestiers mixtes, des émissions de méthanol, d'acétone, d'acétaldéhyde, d'acides formique et acétique, ainsi que de composés résultant de l'oxydation de l'isoprène (MVK et MaCR) ont également fait l'objet de mesures. De plus, des échantillonnages de l'air ambiant par analyse GC-MS (groupe de recherche EnVOC, Université de Gand) et des mesures de l'indice foliaire par photographie hémisphérique (Laboratoire d'écologie végétale, Université de Gand) ont été régulièrement effectués. Quelques photos de la tour de mesure sont proposées en Figure 13. Par ailleurs, l'on peut trouver de plus amples informations sur la technique utilisée et sur les résultats d'une analyse préliminaire des données dans Laffineur *et al.*, 2011.

#### **Référence :**

Q. Laffineur, B. Heinesch, N. Schoon, C. Amelynck, J.-F. Müller, J. Dewulf, H. Van Langenhove, K. Steppe, M. Šimpraga and M. Aubinet, "Isoprene and monoterpene emissions from a mixed temperate forest", *Atmospheric Environment*, accepted, 2011.

#### **Mesures en laboratoire en vue de la détection on-line sélective de composés organiques volatils biogéniques (COVB)**

La chromatographie gazeuse (GC) et la spectrométrie de masse à ionisation chimique (CIMS) forment les techniques les plus fréquemment utilisées afin de mesurer des composés organiques volatils dans l'atmosphère. Les techniques reposant sur la chromatographie gazeuse (GC-MS, GC-FID) sont très sensibles et permettent de séparer distinctement de nombreux composés. En revanche, elles sont relativement lentes et chronophages. Dans les techniques CIMS, des ions réactifs spécifiques réagissent avec les molécules à analyser et le signal spectrométrique de masse des ions produits est proportionnel à la concentration de ces molécules. La spectrométrie de masse à ionisation chimique est une technique on-line très sensible, mais dont l'inconvénient majeur est la complexité de la détection sélective de composés isobares et isomères, particulièrement si l'on utilise des ions réactifs  $H_3O^+$ , comme c'est fréquemment le cas dans l'instrumentation disponible sur le marché.

En vue d'élaborer une technique on-line offrant une meilleure sélectivité, un réacteur Flowing Afterglow CIMS a été récemment couplé à un spectromètre de masse en tandem (FA-TMS), comme illustré en Figure 14. Dans le réacteur CIMS, une réaction chimique survient entre les ions réactifs et les molécules à analyser, ce qui résulte en l'apparition d'ions spécifiques produits par ionisation chimique (p.ex. la molécule protonée en cas d'utilisation d' $H_3O^+$  et l'ion moléculaire en cas d'utilisation de  $NO^+$ ). Les ions produits par ionisation chimique sont ensuite soumis à une dissociation induite par collision (CID) dans la cellule de collision du spectromètre de masse en tandem. Les molécules isomères résultent souvent en des ions produits par ionisation chimique possédant la même masse nominale. C'est pourquoi, elles ne peuvent être séparées par les méthodes CIMS traditionnelles. Les structures chimiques de ces ions produits par ionisation chimique peuvent toutefois se révéler différentes et sont susceptibles de donner une fragmentation caractéristique de l'isomère, permettant ainsi la détection sélective d'isomères par CI/MS/MS.

Deux classes importantes de composés organiques volatils biogéniques (COVB) pour lesquelles différents isomères ne peuvent être séparés par les techniques CIMS traditionnelles sont les monoterpènes ( $C_{10}H_{16}$ ) et les sesquiterpènes ( $C_{15}H_{24}$ ). La détection et la quantification de sesquiterpènes sont complexes et l'élaboration de méthodes de mesure appropriées pour ces composés intéresse grandement le domaine de la chimie de l'atmosphère. En vue d'examiner la faisabilité de la détection on-line sélective de monoterpènes et de sesquiterpènes, plusieurs isomères de ces classes de composés ont été introduits dans le FA-TMS. Tandis que la discrimination des isomères s'est avérée restreinte en cas d'utilisation d'ions réactifs  $H_3O^+$ , le recours à des ions réactifs  $NO^+$  a bel et bien



résulté en l'apparition d'ions spécifiques pour certains sesquiterpènes. Pour une description circonstanciée des expériences et des résultats, le lecteur est invité à se référer aux contributions de Rimetz-Planchon *et al.* (2010, 2011).

**Références :**

Juliette Rimetz-Planchon, Frederik Dhooghe, Niels Schoon, Frank Vanhaecke and Crist Amelynck, "MS/MS studies on the selective on-line detection of sesquiterpenes using a Flowing Afterglow-Tandem Mass Spectrometer", *Atmospheric Measurement Techniques Discussions* 3, 4285-4311, 2010.

Juliette Rimetz-Planchon, Frederik Dhooghe, Niels Schoon, Frank Vanhaecke and Crist Amelynck, "Chemical ionization by  $[\text{NO}]^+$  and subsequent Collision - Induced Dissociation for the selective on-line detection of monoterpenes and linalool", *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 25 (5), 647-654, 2011.

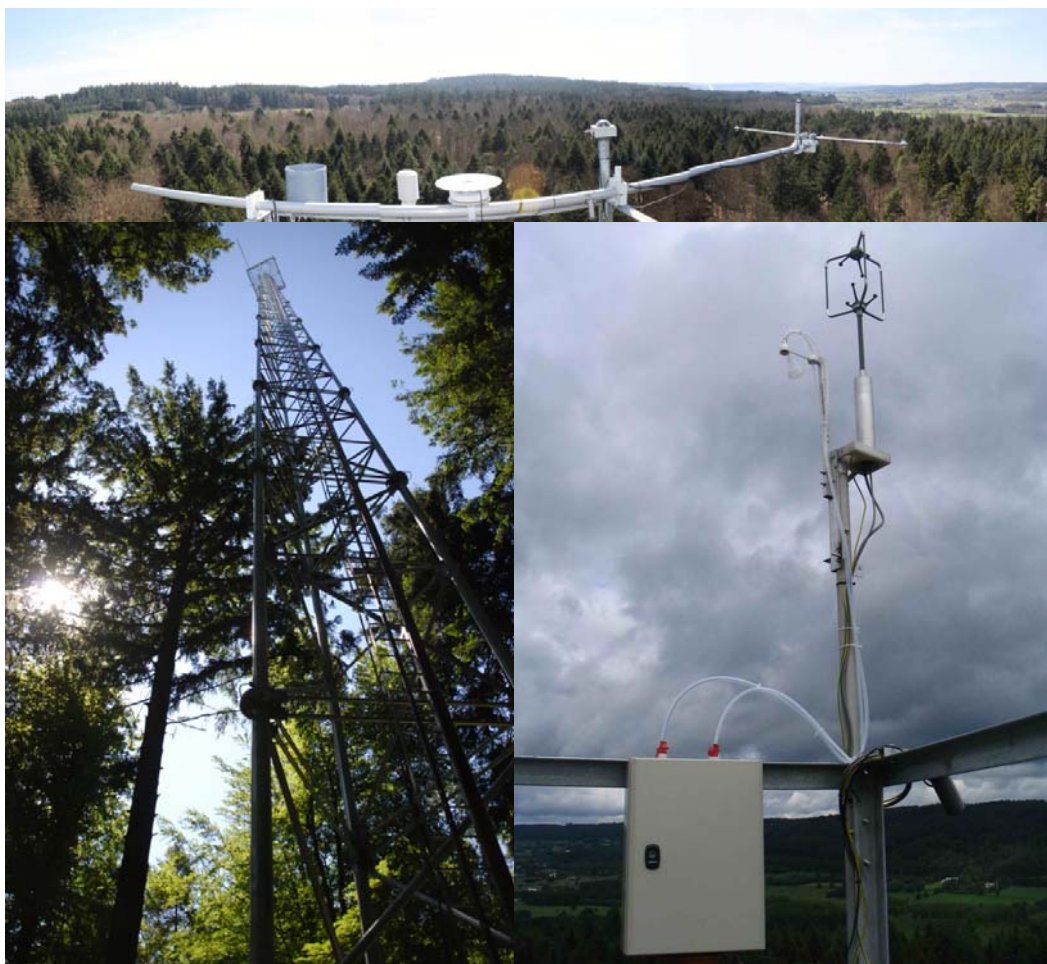


Figure 13 : (Haut) Vue de la forêt mixte de Vielsalm depuis le sommet de la tour de mesure (50m). (En bas à gauche) Vue de la tour de mesure. (En bas à droite) Vue de l'anémomètre sonore et du dispositif d'échantillonnage d'air situés au sommet de la tour.

## FA-TMS instrument

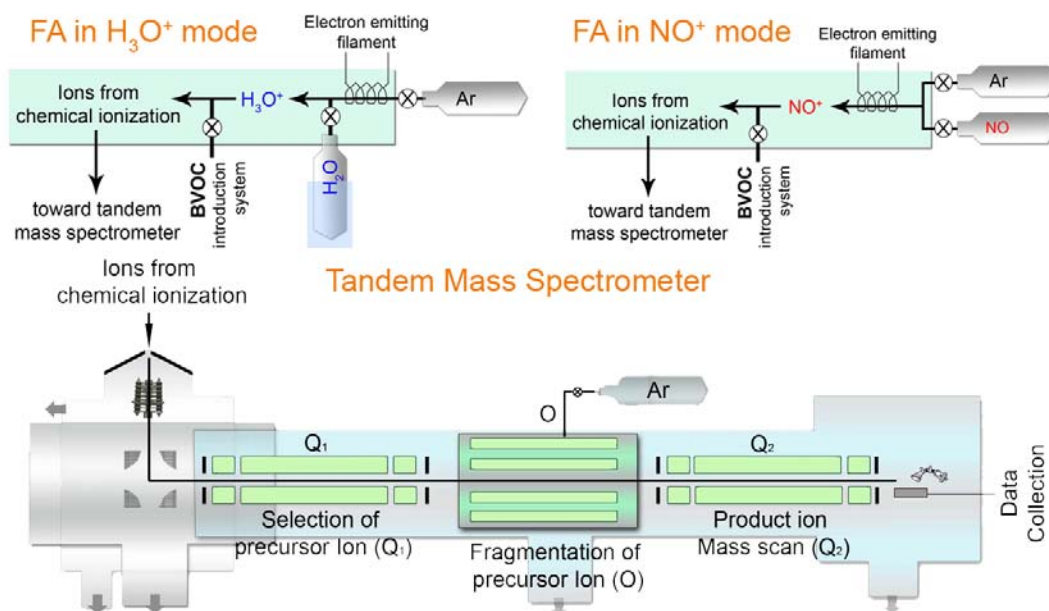


Figure 14 : Schéma du FA-TMS.

### 1.2.3. Modélisation de la chimie troposphérique :

#### Mécanisme d'oxydation d'isoprène : défi majeur de la chimie troposphérique

Le radical d'hydroxyle (OH), le principal oxydant de l'atmosphère, est souvent désigné sous le nom du «détergent» de la troposphère, parce qu'il réagit avec beaucoup de polluants, en formant des radicaux peroxy, espèces importantes dans le cycle de l'ozone troposphérique. On a longtemps supposé que dans l'air non-pollué des forêts tropicales, les grandes quantités d'isoprène ( $C_5H_8$ ) émises par les plantes (ca. 500 Tg par an globalement) entraînent une réduction significative des concentrations de OH. Cependant, des observations récentes obtenues dans les forêts d'Amazonie et de l'Indonésie contredisent cette hypothèse, puisque les concentrations de OH mesurées dans ces milieux sont entre deux et quatre fois plus élevées comparées à celles prédites par des modèles de chimie-transport atmosphérique. Dans le but d'expliquer ces observations, une régénération importante de OH due aux réactions de radicaux peroxy d'isoprène avec  $HO_2$  a été proposée, mais l'évidence expérimentale contredit cette hypothèse. Récemment, le groupe de chimie cinétique de l'Université de Leuven (K.U.Leuven, J. Peeters et ses collaborateurs) a proposé un mécanisme chimique qui, en partant des principes théoriques, fournit une explication prometteuse sur la façon dont l'oxydation d'isoprène recycle OH, au lieu de le consommer.

Selon Peeters *et al.* (2009) et Peeters et Müller (2010), les radicaux peroxy majeurs formés lors de la réaction de l'isoprène avec OH éliminent l'oxygène très rapidement (à un taux de  $1-10 s^{-1}$  à 303 K) permettant à des différents isomères/conformères de s'interconvertir par addition/élimination d'oxygène. Un type majeur des radicaux peroxy ainsi formés, les delta-radicaux peroxy, peuvent subir des déplacements rapides d'hydrogène (1,6-shift) qui conduisent, après réaction avec  $O_2$ , à la formation de  $HO_2$  et des hydroperoxy aldéhydes (HPALDs). Les HPALDs sont ensuite photodissociés à une grande vitesse en régénérant entre 1 et 3 OH supplémentaires.

Motivés par ces développements importants dans la chimie de l'oxydation d'isoprène, nous avons mené, en collaboration avec J. Peeters (K.U.Leuven), une étude globale afin d'évaluer et quantifier l'impact de ces progrès mécanistiques sur les concentrations de OH et  $HO_2$  dans la couche limite, à l'aide du modèle de chimie-transport IMAGESv2 (Stavrakou *et al.*, 2010). Nous avons montré par cette étude que le mécanisme, LIMv0 (Leuven Isoprene Mechanism version 0), a un grand impact sur

les concentrations de HOx (OH et HO<sub>2</sub>), en particulier au dessus des forêts tropicales et des latitudes moyennes. Plus précisément, des grandes augmentations sont estimées quand on utilise LIMv0 par rapport à des schémas traditionnels d'oxydation d'isoprène, pouvant aller jusqu'à un facteur 4 pour les concentrations modélisées de OH et jusqu'à un facteur 2.5-3 pour les concentrations de HO<sub>2</sub> (Figure 15). Les simulations numériques montrent que les HPALDs sont des produits majeurs dans le schéma d'oxydation, avec un rendement moyen global de l'ordre de 50-60%. Les résultats du modèle pour HOx, isoprène, NO et ozone, ont été évalués par comparaison avec des observations obtenues lors de missions aéroportées aux Guyanas (GABRIEL, *Lelieveld et al., 2008*) et aux Etats-Unis (INTEX-A, *Ren et al., 2008*). Il s'avère que l'utilisation de LIMv0 dans IMAGESv2 permet de réconcilier le modèle et les observations de manière satisfaisante, en comparaison avec d'autres mécanismes testés, avec des concentrations moyennes observées de OH et HO<sub>2</sub> dans la couche limite reproduites endéans les 30%. Malgré les incertitudes liées aux vitesses de certaines réactions de LIMv0, qui font l'objet des recherches actuelles, nos résultats doivent être considérés comme des arguments forts en faveur des développements proposés dans LIMv0. Des vérifications expérimentales seront néanmoins nécessaires afin d'établir solidement la formation des HPALDs et leur potentiel de formation de OH par photodissociation.

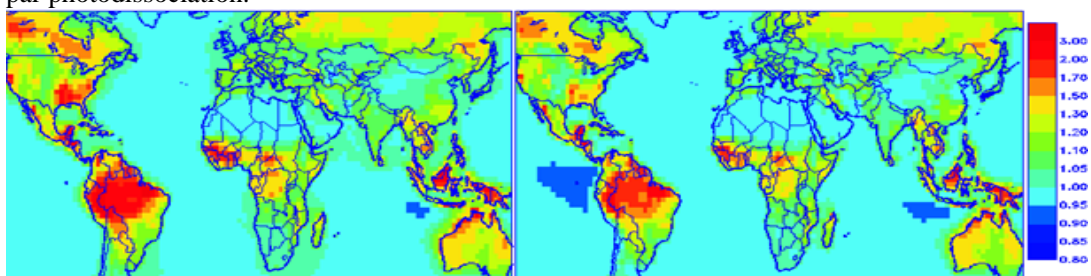


Figure 15 : Facteurs d'augmentation des concentrations de OH (à gauche) et de HO<sub>2</sub> (à droite) dans la couche limite induits par l'utilisation de la chimie LIMv0 dans le modèle global par rapport à l'utilisation des schémas d'oxydation d'isoprène traditionnels en juillet. On remarque une augmentation dans les concentrations de OH d'un facteur 2.5-3 au-dessus des forêts tropicales, d'un facteur de 1.3-2 au-dessus du sud-est des Etats-Unis.

#### **Références :**

- Lelieveld, J., T. M. Butler, J. N. Crowley, T. J. Dillon, H. Fischer, L. Ganzeveld, H. Harder, M. G. Lawrence, M. Martinez, D. Taraborrelli, and J. Williams : Atmospheric oxidation capacity sustained by a tropical forest, *Nature*, 452, 737-740, 2008.
- Peeters, J., T. L. Nguyen, and L. Vereecken : HOx radical regeneration in the oxidation of isoprene, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 11, 5935-5939, doi: 10.1039/b908511d, 2009.
- Peeters, J., and J.-F. Müller : HOx radical regeneration in isoprene oxidation via peroxy radical isomerisations, II: Experimental evidence and global impact, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 12(42), 14227-14235, doi:10.1039/C0CP00811G, 2010.
- Ren, X., J. R. Olson, J. H. Crawford, et al. : HOx chemistry during INTEX-A 2004 : Observation, model calculation, and comparison with previous studies, *J. Geophys. Res.*, 113, D05310, doi:10.1029/2007JD009166, 2008.
- Stavrakou, T., J. Peeters, and J.-F. Müller : Improved global modelling of Hox recycling in isoprene oxidation : evaluation against the GABRIEL and INTEX-A aircraft campaign measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 9863-9878, 2010.

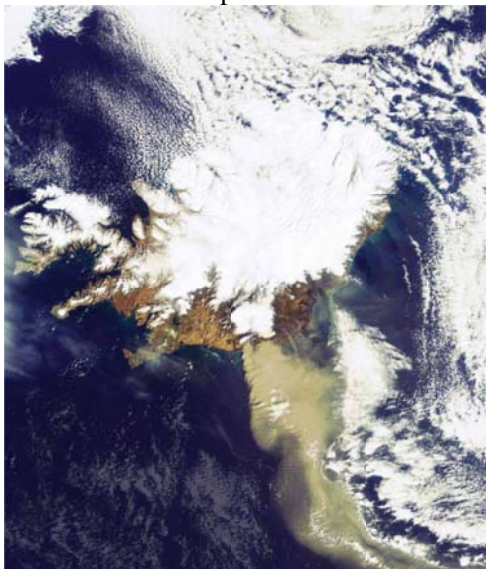
#### **1.2.4. Observations dans l'UV-visible :**

##### **Support au service de contrôle de l'aviation**

Les éruptions volcaniques peuvent émettre de grandes quantités de gaz et de particules fines (cendres) dans l'atmosphère. Les cendres et dans une moindre mesure les gaz émis constituent un danger pour l'aviation, pouvant fortement endommager les moteurs ou les instruments de vol. Une difficulté majeure provient du fait que le risque encouru peut être significatif même à grande distance du volcan : la dispersion des cendres volcaniques sous l'effet du vent peut s'étendre sur plusieurs milliers de km dans les hautes couches atmosphériques. En cas d'éruption volcanique significative, les VAACs (Volcanic Ash Advisory Center : Centre de Conseil en Cendre Volcanique), au nombre de neuf, fournissent un support à l'aviation civile internationale pour rediriger les avions, afin d'éviter les 'no fly zone'.

Sous la responsabilité de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB), le Support to Aviation Control Service (SACS) est un projet financé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et par la Commission Européenne (projet EVOSS). En collaboration avec l'Institut Royal Météorologique des Pays-Bas (KNMI), l'Université Libre de Bruxelles (ULB) et le Centre Aérospatial Allemand (DLR), BIRA développe un système de surveillance globale des émissions de gaz (le dioxyde de soufre, SO<sub>2</sub>) et de cendres lors de fortes éruptions volcaniques, à partir d'instruments (SCIAMACHY, OMI, GOME-2 et IASI) embarqués à bord de satellites en orbites polaires héliosynchrones. Le service propose des produits délivrés en temps quasi-réel – c.à.d. de 1 à 6 heures après la mesure - sur un site web comportant des outils de visualisation (<http://sacs.aeronomie.be>). De plus, lors d'une forte éruption volcanique, une notification par e-mail (alerte) est envoyée automatiquement aux utilisateurs du service.

Du 14 avril au 23 mai 2010, l'Europe a connu une crise sans précédent suite à l'éruption du volcan islandais Eyjafjallajökull. Pendant cette période, le volcan a émis une grande quantité de cendres - résultat de l'interaction entre le magma et la calotte glaciaire du volcan - qui a ensuite été transportée par les vents dominants en direction du sud-est (voir Figure 16). En raison de circonstances météorologiques particulières, les cendres se sont dispersées dans l'atmosphère à l'échelle de l'Europe entière, induisant un risque persistant pour l'aviation pendant plusieurs semaines. Cette situation a provoqué la fermeture d'une grande partie des aéroports européens et l'annulation de plusieurs dizaines de milliers de vols. Même si aucune perte humaine n'a été déplorée, le coût direct de cette crise a été estimé à plus de deux milliards d'euros.



*Figure 16 : Le panache de cendres du volcan Eyjafjallajökull en Islande vu par l'instrument MERIS à bord du satellite ESA-ENVISAT. Image prise le 19 avril 2010 (Crédit : ESA).*

Pendant toute la période d'éruption du volcan Eyjafjallajökull, le service SACS a surveillé de près les émissions volcaniques et a fourni un support aux VAACs à l'aide de cartes indicatives quant à la présence et à la concentration de cendres et de SO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Une illustration des résultats obtenus est présentée ci-dessous (Figure 17) pour le 7 mai 2010. Les cartes montrent la présence de fortes quantités de SO<sub>2</sub> (bon indicateur de la présence de cendres dans l'atmosphère) dans un panache volcanique s'étendant sur une partie de l'océan atlantique (pour cette date, de nombreux vols transatlantiques ont été annulés) et atteignant même la péninsule ibérique. Ces observations ont été obtenues à partir des instruments GOME-2 et IASI à bord du satellite MetOp-A.

L'ampleur de la crise liée à l'éruption du volcan Eyjafjallajökull a été exacerbée par le fait que l'Europe dans son ensemble était peu préparée à gérer ce type de difficulté. En réponse à cette situation inédite, les agences européennes ESA et EUMETSAT ont conjointement organisé un séminaire de crise dont le but était d'établir un état des lieux des techniques de mesure et de modélisation des cendres volcaniques, de tirer les leçons de la crise du volcan Eyjafjallajökull et de proposer un agenda d'actions pour le futur. Pour plus de détails, consulter : <http://earth.eo.esa.int/workshops/Volcano/>.

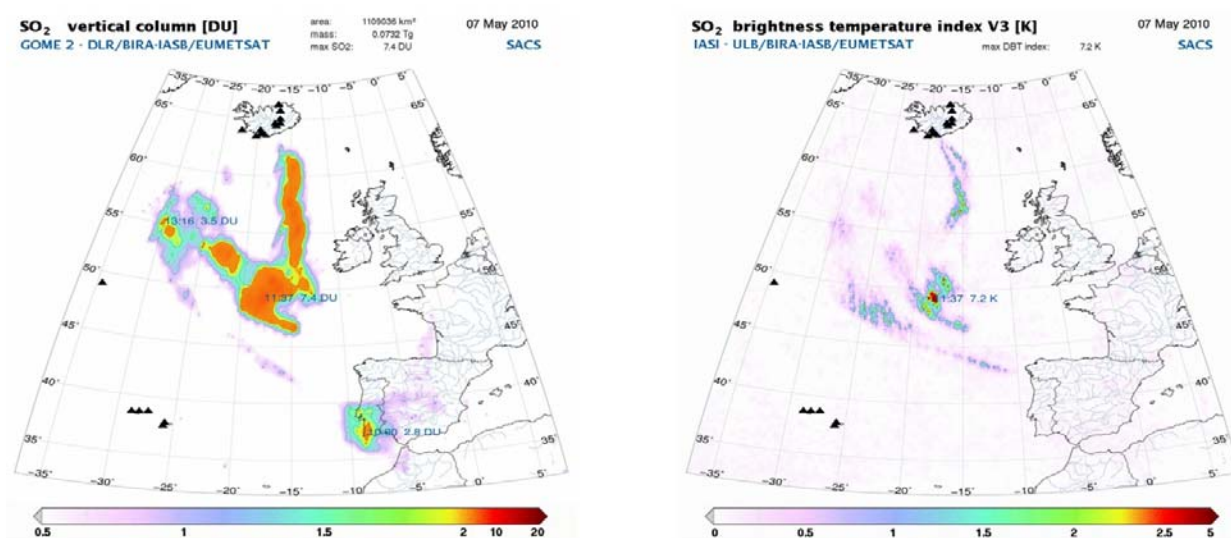


Figure 17 : Observations simultanées du panache volcanique pour le SO<sub>2</sub> à partir des instruments GOME-2 (colonnes verticales de SO<sub>2</sub>, gauche) et IASI (indicateur de SO<sub>2</sub>, droite) à bord du satellite MetOp-A. La structure caractéristique pour ce jour (7 mai 2010) est le résultat de l'éruption du volcan Eyjafjallajökull en Islande et de la dispersion atmosphérique du SO<sub>2</sub> émis.

### Le programme initiatique de l'ESA sur le changement climatique et le projet « Ozone-cci »

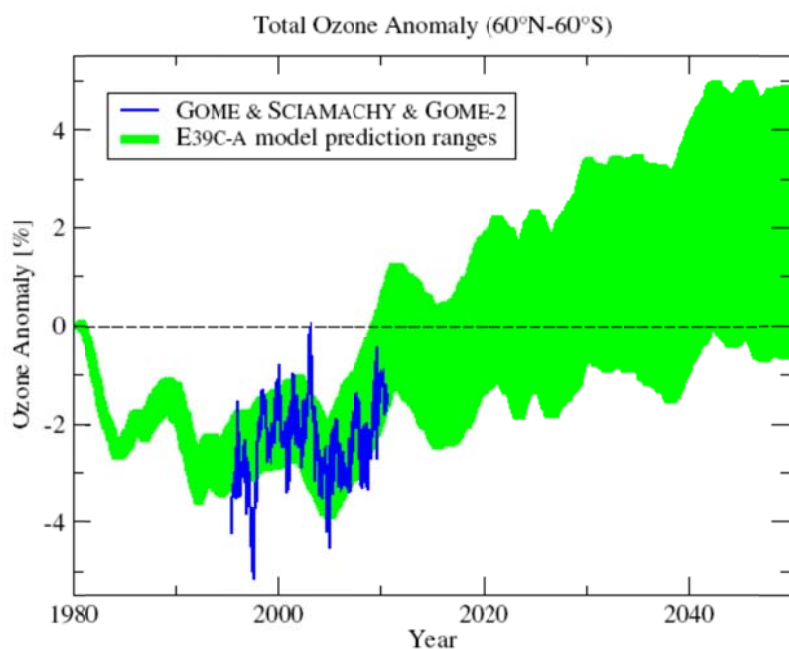
A l'aube de ce 21<sup>ème</sup> siècle, le changement climatique représente probablement l'un des plus grands défis de l'humanité. Les observations spatiales fournissent des informations essentielles pour mieux comprendre les changements de notre climat, en vue d'en atténuer les effets et/ou de proposer des stratégies d'adaptation. Considérant les négociations politiques importantes en cours dans l'ère post-Kyoto, l'Agence Spatiale Européenne (ESA) a lancé en 2010 un nouveau programme d'exploitation intitulé « Climate Change Initiative » plus communément appelé CCI.

L'objectif global du CCI, tel que défini dans la déclaration originale du Programme, est de « Réaliser le potentiel complet des données d'observation à long-terme archivées par l'ESA et ses Etats Membres depuis 30 ans, afin d'apporter une contribution significative à l'établissement de bases de données des variables climatiques essentielles requises par la Convention Cadre des Nations Unies sur le

Changement Climatique ». En particulier, le programme CCI ambitionne de délivrer des jeux de données satellitaires globaux rencontrant les besoins du « Global Climate Observing System » (GCOS). Le programme est implémenté via une série de 12 projets parallèles s’adressant chacun à une communauté d’utilisateurs spécifiques. Au cours d’une première phase de 3 années (2010-2013), il se focalisera sur un sous-groupe de 11 variables climatiques essentielles (ECVs) couvrant les domaines océanique, terrestre et atmosphérique. L’intégration entre ces différents projets est gérée par le “Climate Modelling User Group” (CMUG), qui apporte une perspective de modélisation climatique au programme. Concernant le domaine atmosphérique, 4 ECVs ont été sélectionnés : les propriétés des nuages, l’ozone, les aérosols et les gaz à effet de serre (GHG). L’IASB est impliqué dans trois des projets atmosphériques (ozone, aérosols et GHG) et il assure la coordination du projet Ozone\_cci.

### ***Le projet Ozone\_cci***

L’ozone affecte le bilan radiatif de l’atmosphère via son interaction avec les radiations de courtes et de grandes longueurs d’onde. En conséquence, le forçage radiatif dû à l’ozone dépend fortement de la distribution horizontale et verticale de ses changements. Il est essentiel de déterminer avec grande précision ces changements à l’échelle globale et sur de longues périodes temporelles. A cette fin, des observations satellitaires de grande qualité sont nécessaires. La tâche principale du projet Ozone\_cci est d’améliorer la qualité des mesures d’ozone actuellement disponibles en Europe, via la création de séries temporelles combinant des senseurs multiples avec une précision rencontrant les exigences formulées par le GCOS, et ainsi réduire les incertitudes concernant la détermination des tendances de l’ozone (voir Figure 18). Le projet rassemble 13 institutions apportant une expertise du plus haut niveau dans les domaines des techniques d’observation, de la validation géophysique, de l’ingénierie des systèmes informatiques ainsi que de la modélisation de la chimie et du climat. Il se focalise sur le développement et la caractérisation de produits de données d’ozone générés à partir des senseurs européens mesurant au nadir, au limbe et en occultation solaire. Outre la coordination générale du projet, l’IASB se concentre sur le développement des produits de colonne totale d’ozone ainsi que sur la coordination des activités de validation.



*Figure 18 : Représentation schématique des variations mesurées et des projections de l’évolution à long-terme de la colonne totale d’ozone en réponse à l’effet combiné des substances appauvrissant l’ozone et du changement climatique. Les incertitudes sur les prévisions à long-terme restent très grandes.*

### **1.2.5. Recherche pour l'exploitation intégrée de données sur la composition atmosphérique :**

Chaque système de mesure de la composition atmosphérique possède ses propres caractéristiques de résolution, d'échantillonnage, et de couverture géographique et verticale. Ces caractéristiques, ainsi que la liste des constituants atmosphériques qu'il permet de détecter, dépendent de la plateforme d'observation (depuis le sol, un ballon, un avion ou un satellite), de la source du rayonnement détecté, du domaine spectral analysé et du mode de visée. Le groupe *Synergies* a pour vocation de développer les méthodes et outils nécessaires à l'exploitation conjointe de données atmosphériques produites par des systèmes d'observation différents mais complémentaires, et de les mettre en application dans les divers domaines thématiques abordés par l'IASB. Les activités de recherche du groupe constituent une réponse directe et pratique aux problèmes scientifiques posés par la mise en place de systèmes d'information intégrée à l'échelle nationale, paneuropéenne et mondiale. Le *Système des systèmes d'observation globale de la Terre* – le GEOSS, pour *Global Earth Observation System of Systems* – est un projet mondial d'intégration des divers instruments et services de surveillance des composantes de notre environnement : les océans, la végétation, les glaciers... et bien entendu l'atmosphère. Point de jonction entre science, technologie et société, le GEOSS se bâtit au service de neuf domaines thématiques dits de bénéfice sociétal (SBA) : la santé, l'énergie, le climat, l'eau, le temps (météorologique), les écosystèmes, l'agriculture, la biodiversité et les catastrophes. Ce programme ne peut être mené à bien sans l'amélioration de l'interopérabilité et de l'interconnectivité des différents systèmes d'observation le constituant, de manière à faciliter l'échange et la mise en commun des données et informations selon des normes établies. Interconnectivité et normalisation sont les principes directeurs de nos activités. Au niveau européen, le GEOSS est implémenté via trois grands chantiers : le *Programme européen de surveillance de la Terre* (le GMES, pour *Global Monitoring for Environment and Security*), le système de positionnement GALILEO et la directive européenne INSPIRE établissant le cadre légal d'une infrastructure d'information géographique paneuropéenne.

Une des six composantes essentielles du GMES est dédiée à l'atmosphère et une autre au changement du climat. Mettant en équation les enjeux du GEOSS et les capacités des différents éléments constituant le système d'observation global, des comités d'experts ont défini les tâches essentielles à accomplir pour améliorer l'interconnectivité des systèmes constituants, dont : la stratégie IGACO pour un système intégré d'observation de la composition atmosphérique ; les actions à mener pour développer le système pour l'observation du climat global, le GCOS (*Global Climate Observing System*) ; et les principes-cadres QA4EO (*Quality Assurance for Earth Observation*) soutenant la stratégie d'assurance-qualité pour les données et services produits dans les neuf domaines de bénéfice sociétal du GEOSS. C'est en soutien à ces programmes internationaux ambitieux que, fort de son expertise propre et de l'expertise multiple de l'IASB dans les domaines de la télédétection aérospatiale, le groupe *Synergies* a poursuivi en 2010 ses travaux de recherche en métrologie de la télédétection atmosphérique, des tâches de normalisation et des activités d'harmonisation des jeux de données fournis par différents satellites et réseaux au sol dans une perspective d'analyse des changements globaux de la composition atmosphérique et de ses liens avec les changements climatiques.

#### **Métrologie de la télédétection atmosphérique**

Le groupe *Synergies* a entrepris l'analyse systématique des problèmes de lissage et d'échantillonnage de l'information atmosphérique qui se posent lors de l'interprétation, de la comparaison et de l'exploitation intégrée des mesures de gaz en traces. Des progrès considérables ont été réalisés en caractérisation pluridimensionnelle (verticale et horizontale) des données obtenues à partir des observations suivantes:

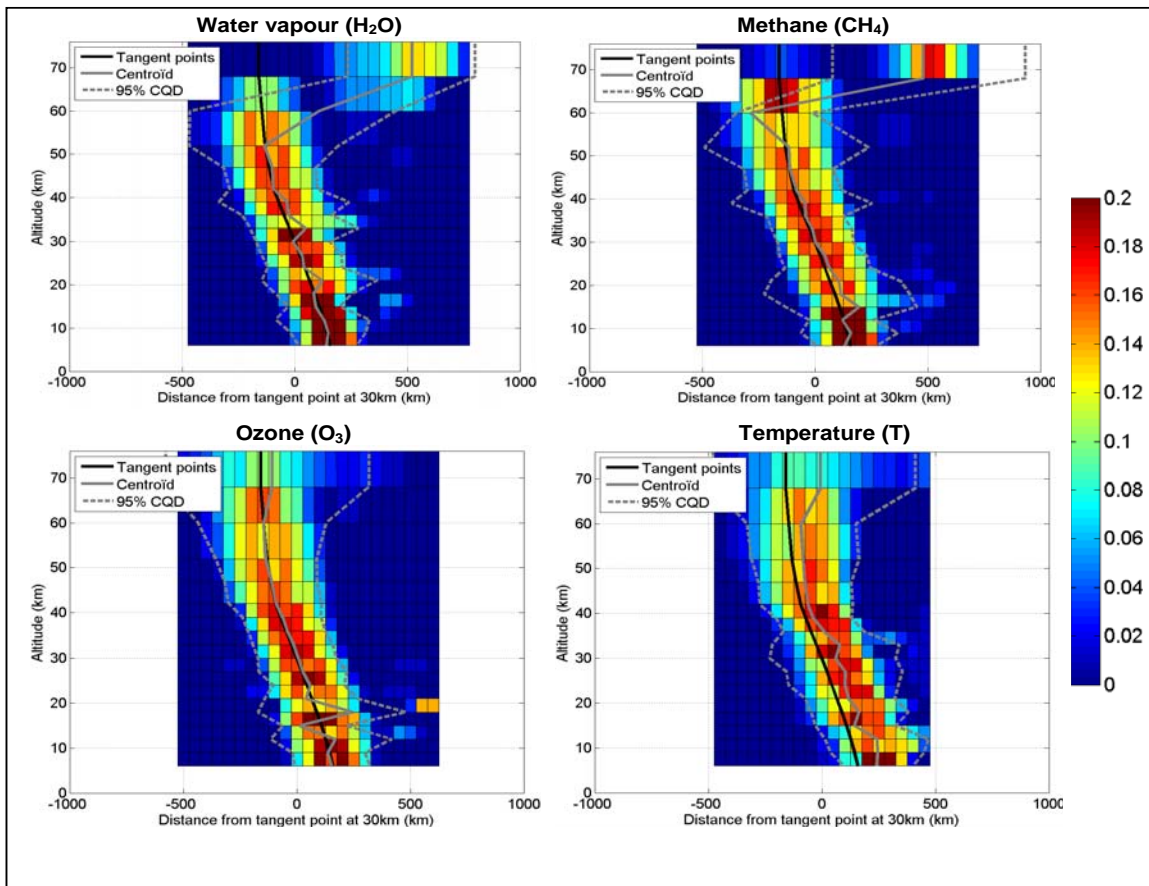
- l'émission infrarouge du limbe atmosphérique mesurée par MIPAS (à bord d'Envisat depuis avril 2002),
- la lumière solaire ultraviolette et visible rétrodiffusée au nadir de GOME (sur ERS-2 depuis 1995), SCIAMACHY (Envisat depuis 2002) et GOME-2 (MetOp-A depuis 2007),
- (la lumière solaire ultraviolette et visible diffusée au limbe mesurée par SCIAMACHY, et

- l'occultation par l'atmosphère de la lumière solaire visible mesurée par SAGE-II (ERBS de 1984 à 2005). Ces études ont fait l'objet de notes techniques et les résultats-clefs sont en cours de publication.

En application de ces développements théoriques, nous avons cherché à déterminer l'impact des problèmes de lissage et d'échantillonnage de l'information sur l'étude des changements globaux de la distribution de la vapeur d'eau dans l'atmosphère car ces changements sont symptomatiques des interactions entre changement du climat, de la dynamique et de la composition atmosphérique (Lambert *et al.*, 2011). L'abondance de la vapeur d'eau ( $H_2O$ ) dans la stratosphère dépend directement de l'oxydation du méthane ( $CH_4$ ) et donc de son transport, tandis que la somme des concentrations  $[H_2O] + 2[CH_4]$  est relativement indépendante de l'oxydation. La mesure du bilan  $[H_2O] + 2[CH_4]$  est par conséquent un bien meilleur indicateur de la quantité d'eau entrant dans la stratosphère, que la mesure de la vapeur d'eau seule. C'est aussi un bon indicateur des changements du transport vertical des espèces chimiques et des échanges entre la troposphère et la stratosphère, responsables de l'extrême sécheresse de la stratosphère. Des mesures simultanées de la température et de l'ozone permettent également de mieux étudier les échanges entre troposphère et stratosphère. La corrélation entre traceurs dynamiques mesurés simultanément informe elle aussi sur le transport stratosphérique en général, sur le transport vertical en particulier et sur les échanges entre troposphère et stratosphère. Ces corrélations sont de plus en plus exploitées par les modèles d'analyse et de prédiction de la chimie atmosphérique pour mieux estimer le transport des espèces chimiques. Une condition essentielle commune à toutes ces applications est que les mesures prétendument simultanées des différentes espèces ne diffèrent pas trop par leur résolution et leur échantillonnage réel de l'atmosphère.

La figure 19 montre que dans la stratosphère cette condition se vérifie pour le sondeur MIPAS, du moins pour ses mesures de la vapeur d'eau, du méthane et de l'ozone : la résolution horizontale pour ces trois molécules est comparable, de l'ordre de 250 km. Pour la température il est intéressant de noter que l'information réellement mesurée dans la stratosphère n'est pas centrée sur le point tangent du sondage au limbe, comme il est de coutume de le croire, mais se situe à environ 30 km en direction du satellite. Ce phénomène de déplacement de l'information mesurée s'amplifie dans la mésosphère, où il atteint 120 km pour la température. Il y apparaît aussi pour les trois molécules, quoique de manière très différente : à 60 km d'altitude, le déplacement est nul pour l'ozone mais de 125 km dans la direction opposée au satellite pour le méthane, et de 220 km dans la direction du satellite pour la vapeur d'eau. A 68 km d'altitude, l'information sur le méthane et la vapeur d'eau est centrée à 720 km en direction du satellite alors que pour l'ozone elle reste à 60 km du point tangent. Dans tous ces cas, bien que les trois molécules et la température aient été dérivées d'un seul et même spectre mesuré par MIPAS, la condition de coïncidence spatiale de l'information mesurée n'est évidemment pas remplie, et la présence d'un gradient horizontal dans la composition de l'atmosphère altérera certainement leur interprétation conjointe.

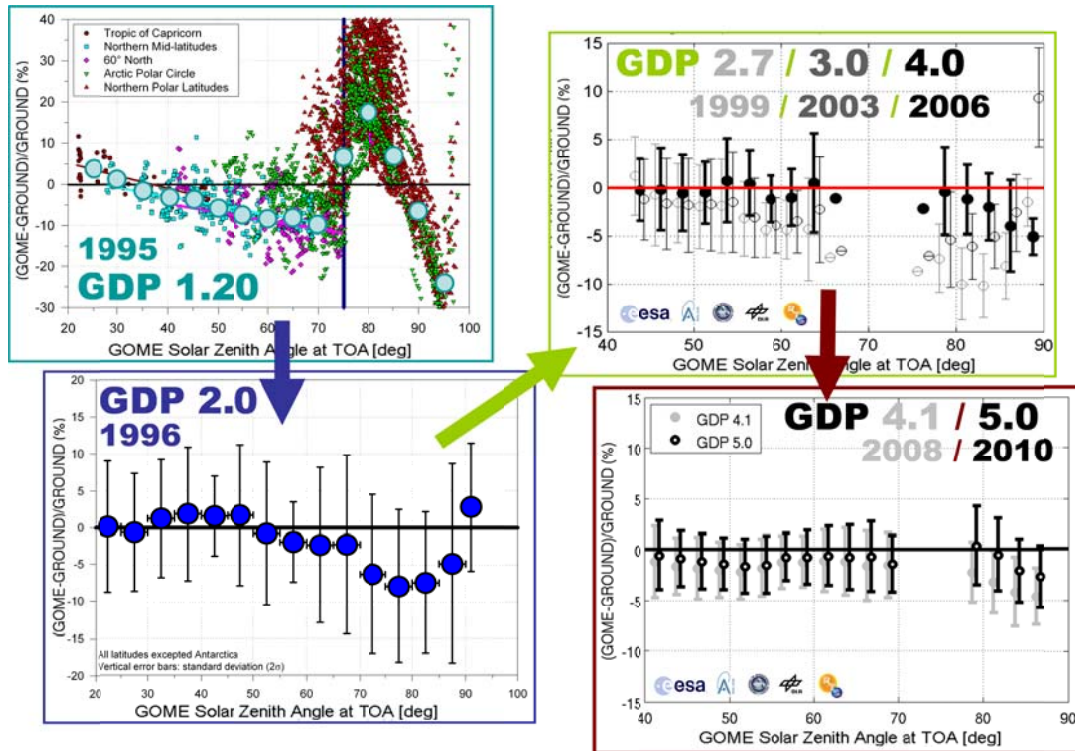




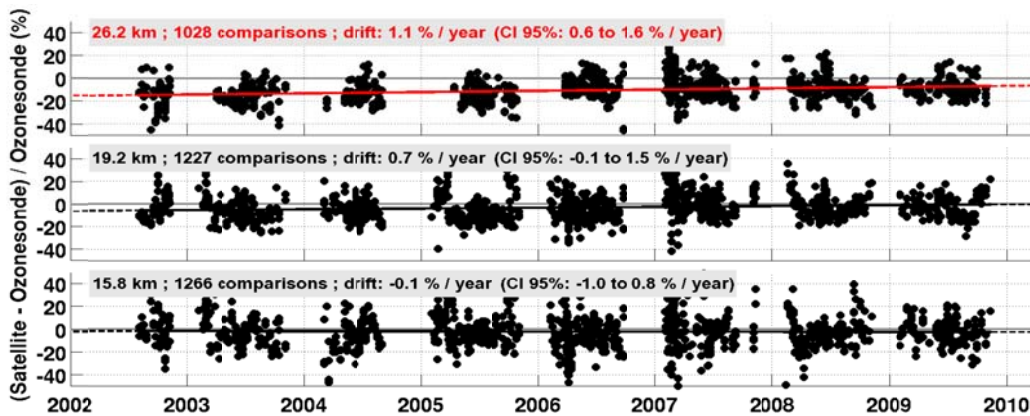
**Figure 19 :** Résolution horizontale de la mesure MIPAS (IPF 4.61) de la vapeur d'eau, du méthane, de l'ozone et de la température aux tropiques. Les fonctions de pondération de l'information contribuant à la mesure sont tracées en fonction de l'altitude et de la distance horizontale par rapport au point tangent à 30 km d'altitude. La ligne noire désigne la position du point tangent, qui suit le mouvement du satellite sur son orbite. Les lignes grises définissent la position médiane (ou centroïde) et la dispersion de l'information mesurée. (Figures adaptées de von Clarmann et al., 2009.)

### Ozone stratosphérique et climat

La recherche sur les interactions entre changements du climat et de la composition atmosphérique nécessite l'amélioration et l'harmonisation des données acquises sur le long terme par les satellites. Depuis le lancement en 1995 du premier sondeur atmosphérique européen GOME, le groupe *Synergies* participe au développement du processeur GDP traitant les données sur l'ozone et le dioxyde d'azote à partir des mesures des satellites GOME, SCIAMACHY et maintenant GOME-2 (Loyola et al., 2011 ; Valks et al., 2011). La figure 20 montre, version après version, l'erreur systématique du processeur GDP sur l'estimation de la colonne d'ozone. Grâce à l'implémentation dans la dernière version 5.0 de l'algorithme GODFIT développé par le groupe UVVIS de l'IASB (Lerot et al., 2010), les données produites remplissent de bien meilleure manière les critères exigeants requis par la recherche sur le climat, par exemple une stabilité décennale et une erreur systématique de l'ordre du pourcent jusqu'aux latitudes polaires. Des études similaires sont en cours pour l'harmonisation des jeux de données des satellites sur la distribution verticale de l'ozone et son évolution de 1979 à nos jours. La figure 21 illustre la détection de dérives dans l'un des douze jeux de données analysés (ici, les mesures par SCIAMACHY depuis 2002).



**Figure 20 :** Estimation de l'erreur systématique sur la colonne verticale de l'ozone mesurée par GOME, tracée en fonction de l'angle solaire zénithal. Les différents graphes montrent l'évolution de la différence relative entre la mesure GOME et les mesures de référence fournies par le réseau au sol NDACC après chaque amélioration du processeur de données GDP : de la seconde version exploratoire GDP 1.20 en 1995 à la version GDP 5.0 implémentée en 2010 (qui remplit le critère de maximum 1% d'erreur systématique, y compris en région polaire jusqu'à 80° d'angle zénithal).



**Figure 21 :** Dérive à long terme du satellite SCIAMACHY par rapport aux ozonsondes lâchées dans l'arctique à Sodankylä (Finlande). Les trois graphes montrent, à trois altitudes différentes, l'évolution de l'écart entre la concentration en ozone dérivée des mesures au limbe de SCIAMACHY (version SGP 3.01) et celle mesurée par des sondes électrochimiques à bord de ballons météorologiques. On constate qu'à 15 et 19 km d'altitude la dérive sur huit années consécutives reste négligeable tandis qu'à 26 km elle atteint la valeur statistiquement significative de +1,1% par an.

## Normes et protocoles

Le GEOSS et le GMES nécessitent l'élaboration, l'adoption et l'implémentation de normes communes aux différents systèmes d'observation, aux services qui en découlent et aux différents domaines thématiques. L'expertise spécifique du groupe *Synergies* en métrologie atmosphérique, en qualité des données et en intégration de systèmes lui a permis de jouer un rôle actif dans :

- L'élaboration des principes cadre de la stratégie QA4EO d'assurance-qualité pour les données d'observation de la Terre (<http://qa4eo.org>)
- L'implémentation progressive des principes QA4EO dans les projets construisant le service atmosphérique du GMES, par exemple par l'analyse des besoins d'utilisateurs génériques et, partant, l'élaboration, la rédaction et l'implémentation de protocoles de validation menant à la production d'indicateurs de qualité adéquats pour ces catégories d'utilisateurs (ESA PROMOTE, <http://www.gse-promote.org>; EC FP7 MACC, <http://www.gmes-atmosphere.eu>; EC FP7 PASODOBLE <http://www.myair-eu.org/> )
- La préparation des annexes de la directive européenne INSPIRE relatives à l'atmosphère.
- Le développement des normes ISO 19157 ("Information géographique – Qualité des données / Geographic information — Data quality") et ISO 19159 ("Information géographique – Calibration et validation de capteurs de télédétection – Partie 1: Capteurs optiques / Geographic information – Calibration and validation of remote sensing imagery sensors – Part 1: Optical sensors").
- La publication d'un ouvrage faisant le point sur les méthodes de télédétection spatiale de la composition troposphérique (Burrows *et al.*, 2011).

### Références :

Burrows, J. P., U. Platt, and P. Borrell (Editors), *The Remote Sensing of Tropospheric Composition from Space*, Book published by Springer-Verlag in Physics of Earth and Space Environments Series, 1st Edition, 2011, XV, 536 pp., ISBN 978-3-642-14790-6 (e-ISBN 978-3-642-14791-3, DOI 10.1007/978-3-642-14791-3), © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.

Lambert, J.-C., C. De Clercq, and T. von Clarmann, Comparing and merging water vapour observations: A multi-dimensional perspective on smoothing and sampling issues, Chapter 9 (p. 177-199) of ISSI Book "Ground-based remote sensing and in-situ methods for monitoring atmospheric water vapour", International Space Science Institute (Ed.), Bern, Switzerland (in press).

Lerot, C., M. Van Roozendaal, J.-C. Lambert, J. Granville, J. van Gent, D. Loyola, and R. J. D. Spurr, The GODFIT algorithm: a direct fitting approach to improve the accuracy of total ozone measurements from GOME, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 31: 2, 543-550, 2010 (DOI: 10.1080/01431160902893576).

Loyola, D. G., M. E. Koukoulis, P. Valks, D. S. Balis, N. Hao, M. Van Roozendaal, R. J. D. Spurr, W. Zimmer, S. Kiemle, C. Lerot, and J.-C. Lambert, The GOME-2 Total Column Ozone Product: Retrieval Algorithm and Ground-Based Validation, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, 2011 (DOI:10.1029/2010JD014675).

Valks, P., G. Pinardi, A. Richter, J.-C. Lambert, N. Hao, D. Loyola, M. Van Roozendaal, and S. Emmadi, Operational total and tropospheric NO<sub>2</sub> column retrieval for GOME-2, *Atmospheric Measurement Techniques*, submitted.

von Clarmann, T., C. De Clercq, M. Ridolfi, M. Höpfner, and J.-C. Lambert, The horizontal resolution of MIPAS, *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol. 2, 47-54, 2009.

### 1.2.6. Modélisation stratosphérique et assimilation d'observations :

#### **Le réchauffement stratosphérique majeur 2009 décrit à partir des observations satellitaires MLS de vapeur d'eau et des analyses BASCOE**

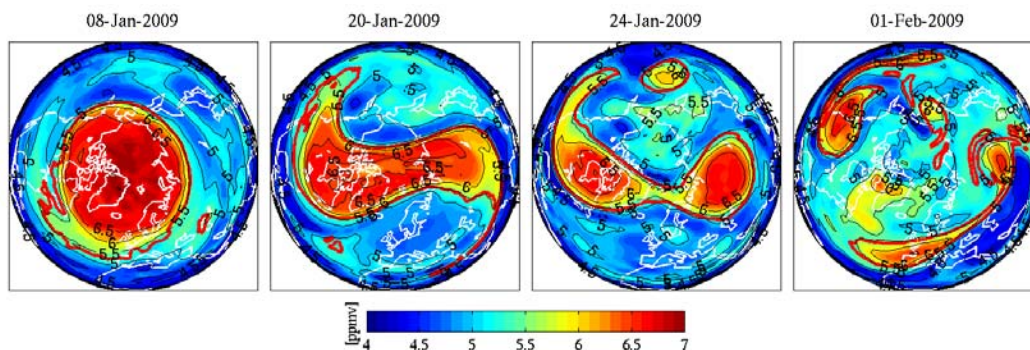
La stratosphère est une couche de l'atmosphère située entre 15 et 55 km d'altitude dans laquelle réside la couche d'ozone. En hiver, l'une de ses principales caractéristiques est la formation, au pôle nord comme au pôle sud, d'un vortex qui régit la dynamique stratosphérique. Ce vortex, produit de la

formation d'une haute pression et d'un anticyclone très stable, se traduit par une zone au-dessus du pôle dont les masses d'air sont relativement isolées des latitudes plus méridionales. Au printemps, lorsque la lumière revient réchauffer le pôle, le vortex perd de son intensité et fini par se disloquer.

Un événement dynamique particulièrement remarquable durant l'hiver Arctique est le réchauffement stratosphérique majeur (RSM) qui perturbe radicalement les conditions typiques de circulation de la stratosphère ainsi que de la troposphère. Durant un RSM, le vortex polaire est grandement perturbé malgré l'absence de lumière; la température au pôle augmente fortement et le vent d'habitude à l'ouest s'oriente à l'est. Alors que le changement climatique influe sur la fréquence et les caractéristiques des RSM, on peut s'attendre à ce que l'augmentation de ces dernières perturbe la circulation de la stratosphère. Ces changements auront des répercussions sur le trou d'ozone et, par conséquent sur le climat. Le réchauffement stratosphérique qui eut lieu entre janvier et février 2009 fut le plus important et le plus long jamais répertorié. Il fut accompagné d'une brisure du vortex et les critères de réalisation d'un réchauffement stratosphérique majeur furent atteints le 24 janvier.

Par le passé, l'étude des RSM fut réalisée à l'aide d'observations satellitaires ainsi que des analyses météorologiques. Dans le travail réalisé par la division 33 de l'IASB, nous avons analysé, pour la première fois, l'un de ces événements à l'aide d'analyses de vapeur d'eau obtenue à l'aide d'un système d'assimilation d'observations. Par assimilation d'observations, on entend une procédure qui ajuste l'état d'un modèle numérique à un ensemble d'observations. Dans le cas présent, nous avons utilisé le système BASCOE (Belgian Assimilation System for Chemical Observations) et les observations stratosphériques de vapeur d'eau de l'instrument de télédétection américain MLS. Grâce à cela, nous avons réalisé des cartes d'abondances de vapeur d'eau entre janvier et février 2009 au pôle nord, pour plusieurs altitudes qui nous ont permis de décrire ce réchauffement stratosphérique. La figure 22 en est un exemple: elle présente des cartes de distribution de vapeur d'eau aux environs de 25 km pour quatre dates et montre la manière dont le vortex s'est brisé. Début janvier (le 8), les conditions sont stables comme l'indiquent les hautes concentrations de vapeur d'eau situées bien au-dessus du pôle nord. Fin janvier, les conditions se dégradent, le vortex s'allonge (le 20) puis se brise (le 24). Début février (le 1<sup>er</sup>), le vortex est complètement disloqué.

A l'aide des analyses de vapeur d'eau de BASCOE, nous avons pu calculer la vitesse de descente de la vapeur d'eau dans le vortex. Les valeurs obtenues sont en bon accord avec celles obtenues par d'autres méthodes. Ce travail renforce donc les résultats des études précédentes. A l'avenir, il est prévu de continuer à tester cette approche pour d'autres événements dynamiques stratosphériques, notamment pour un réchauffement final stratosphérique – dû au réchauffement par le retour de la lumière - de l'hémisphère sud et nord.



**Figure 22:** Cartes de la distribution de vapeur d'eau autour de 25 km calculés à l'aide du système d'assimilation BASCOE au-dessus du pôle nord pour quatre dates ayant lieu avant (8 janvier 2009), pendant (20 et 24 janvier 2009) et après (1<sup>er</sup> février 2009) le réchauffement stratosphérique majeur. Le rouge (bleu) représente des valeurs élevées (faibles) de la distribution de vapeur d'eau. La ligne de contour rouge représente la limite du vortex.

### 1.3. Etude du rayonnement solaire dans les atmosphères

#### 1.3.1. Mesures de sondages au limbe (Limb Remote Soundings) :

##### Projet Altius

Durant cette année 2010, le projet ALTIUS a fortement progressé sur deux axes en parallèle : le développement et la clôture de sa phase B0 d'une part, et la réalisation ainsi que les tests fonctionnels d'un prototype de son canal visible d'autre part.

La Phase B0 :

Après avoir accompli les études de faisabilité du projet, ALTIUS est naturellement entré dans une phase de consolidation à la fois des attentes scientifiques et des solutions techniques envisagées pour y répondre.

Les exigences concernant l'instrument et sa plateforme ont été clairement définies sur des aspects aussi divers que ses caractéristiques spectrales, sa sensibilité radiométrique, ses tolérances en matière de pointage et d'imagerie, son positionnement, ses modes de fonctionnement nominaux et extraordinaires, et bien d'autres aspects encore.

Suite à ces précisions, une étroite collaboration a été engagée avec les partenaires industriels afin de répondre au mieux à chacun des critères. Différents documents techniques ont été produits contenant des estimations quantitatives précises au sujet des budgets de consommation électrique, de télémétrie, de dissipation thermique, de masse et de volume, etc... Plusieurs designs optiques ont été élaborés pour chacun des canaux spectraux, et une étude exhaustive de l'offre de détecteurs a permis d'identifier les meilleurs développeurs.

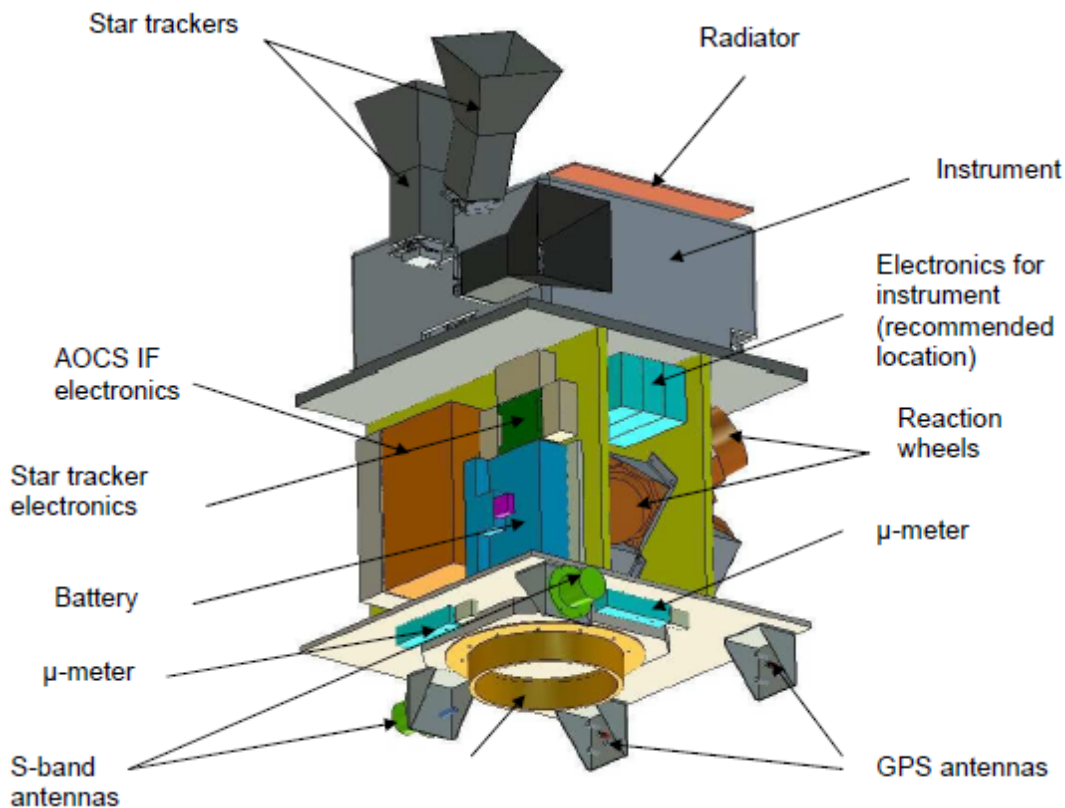


Figure 23: design du satellite proba embarquant ALTIUS

L'hébergement de l'instrument au sein du microsatellite de type PROBA a également été revu de manière à conserver des limites acceptables en termes de volume et de masse pour un lancement en piggyback. L'instrument est maintenant placé au-dessus de la plateforme, au plus près des pointeurs stellaires et du radiateur de dissipation thermique.

Le prototype du canal visible :

En parallèle aux études menées lors de la phase B0, la décision a été prise de réaliser un prototype du canal visible d'ALTIUS afin de développer une connaissance pratique de l'AOTF (le cristal chargé de sélectionner la longueur d'onde optique) et du concept d'imageur spectral.

Un détecteur visible, deux AOTF's commerciaux ainsi du matériel optique ont été achetés afin d'assembler, en partenariat avec OIP (la firme impliquée dans la conception de l'instrument), ce prototype. La plaque de base et l'assemblage ont été entièrement réalisés à l'atelier de l'IASB. Les caractéristiques d'ALTIUS ont été conservées autant que possible (champ de vue, nombre de pixels, etc...) et la seule différence notable provient du design optique : au lieu d'être compact et replié à l'aide de miroirs pour occuper un minimum de place, il est linéaire et constitué de lentilles. Cette différence n'induit aucune perte de généralité du concept.

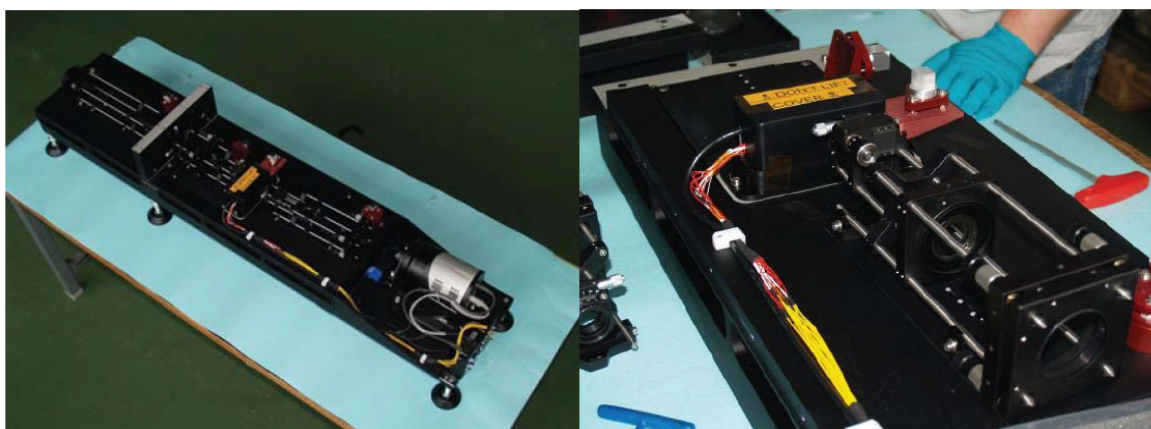


Figure 24: prototype du canal visible

Avant d'être assemblé, des tests spécifiques à l'AOTF ont été menés dans les laboratoires d'OIP et le laboratoire de physique atomique et moléculaire de l'UCL à Louvain-la-Neuve. Ils ont permis d'étudier l'efficacité de diffraction du cristal à l'aide d'une large gamme de sources laser allant du proche UV au proche IR.

Une fois le prototype assemblé, des tests plus spécifiques à l'imagerie ont été menés : champ de vue, homogénéité de la réponse optique (flatfield), distorsion et résolution optique (LSF, PSF), etc... Ces tests ont permis par exemple de mettre à jour et d'atténuer un phénomène de modulation d'intensité au sein de l'image, ou de vérifier les qualités spectroscopiques de l'instrument (ici un exemple de détection des raies d'émission d'une lampe au néon).

Autres progrès réalisés :

Une attention particulière a été portée au développement de l'AOTF UV, puisque des craintes existaient quant à sa survie en milieu spatial. Beaucoup d'efforts ont été fournis par Gooch & Housego afin d'identifier les seuils limites de température assurant la viabilité du cristal. Il en ressort qu'entre -30°C et +30°C, l'AOTF est préservé, ce qui ne devrait pas nécessiter de précautions particulières lors de son utilisation (pas de climatisation nécessaire en vol).

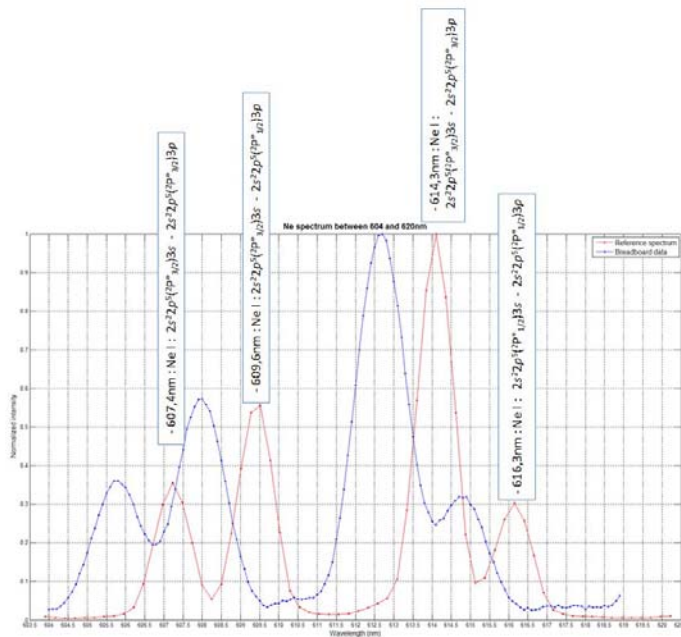


Figure 25: portion de spectre d'une lampe néon illustrant les capacités spectrales de l'instrument.

### Références :

- Communication scientifique : COSPAR 2010 : "Solar occultation images analysis using Zernike polynomials – an ALTIUS imaging spectrometer application"
- Payload and mission requirements : ALT-BI-PhB0WP1100-1-v5-i3-110128
- Payload conceptual design : ALTIUSPHASEB0-OIP-TN-015
- Visible breadboard test report : ALT-BI-TR-1-v1-i4-20110217

### 1.3.2. Etude du rayonnement solaire :

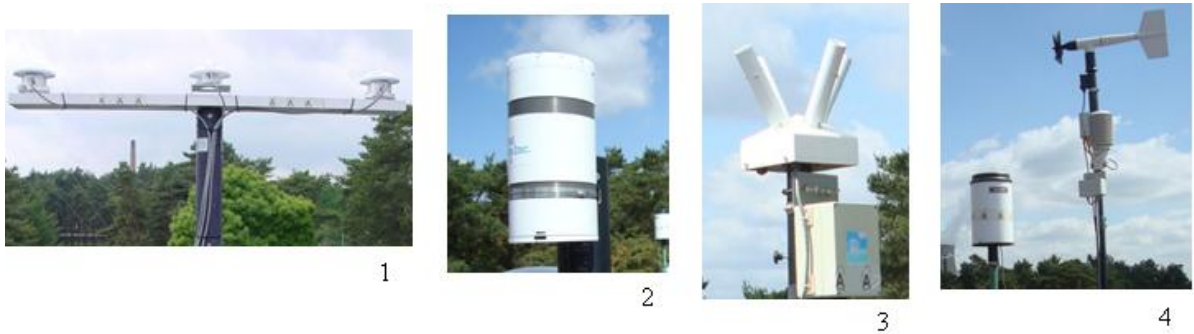
#### Réseau de mesures au sol dans l'« UV-Visible »

Après la finalisation du réseau de mesures UV-Visible au sol couvrant la quasi-totalité du territoire belge en 2009, nous avons, en 2010, procédé au remplacement de certains instruments en service depuis de nombreuses années. A titre d'exemple, de nouveaux UV-mètres 'EKO' ont progressivement remplacé leurs équivalents 'YES' en service depuis parfois plus de 10 ans, et les CIR-4 ont été remplacés par une version ventilée (CIR-4V). Ce réseau, qui compte cinq stations couvrant chacune une des 5 zones météorologiques belges, est actuellement équipé d'instruments de précision qui nous permettent une étude globale et fiable de la climatologie 'UV-Visible' en Belgique ainsi qu'au Grand Duché de Luxembourg grâce à la collaboration avec la station du Lycée classique de Diekirch. Comme le montre la carte (Figure 27) une dernière zone devrait encore être couverte par une dernière station de mesures, à savoir les Hautes Fagnes. Des contacts préliminaires sont pris actuellement en vue de trouver un site d'implantation.

Des tests préliminaires à la prédiction des UV index ont également été réalisés afin de pouvoir, dans les meilleurs délais, proposer une prédiction fiable à 24, 48 ou 72 heures.

Figure 26 : Vue générale de la station de Redu, située au sommet d'une tour de 18 m sur le site de l'Euro Space Center.





Pour rappel chaque station est équipée au minimum de :

(1) un set de 3 'broad-band radiometer' (UVB-UVA & Total Solar Pyranometer).

(2) un radiomètre à filtres (6 canaux de mesure étroit dans l'UV (305-395 nm)).

(3) un CIR-4V (mesurant la couverture nuageuse et l'altitude de base des nuages).

(4) une station météo (T, P, Humidité relative, Vitesse et direction de vent, Pluviométrie)

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

Le site WEB<sup>1</sup> du groupe « Radiation solaire » permet de suivre en temps réel l'évolution des mesures UV-Visible, et en particulier des Index UV dans les six stations précitées et localisées sur la carte ci-jointe. En outre, il donne également accès à une page reprenant les conditions atmosphériques générales de chaque station (Figure 28) et à toute une série d'informations à propos de l'historique des mesures réalisées, des principales caractéristiques des instruments utilisés, et du type de données disponibles. <sup>1</sup> <http://www.aeronomie.be/uv/index.php>

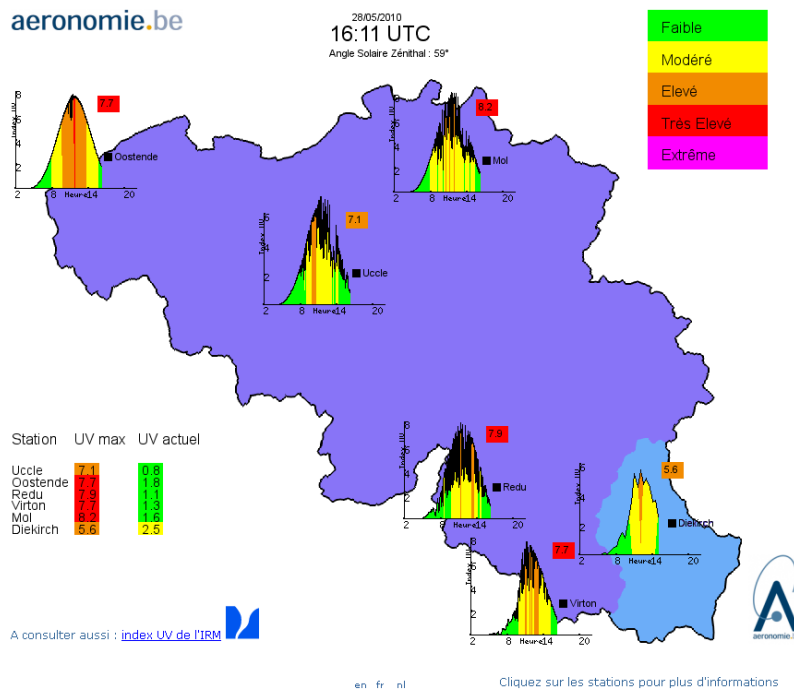


Figure 27 : Copie d'écran du site WEB de l'IASB permettant la consultation de l'indice UV en ligne.



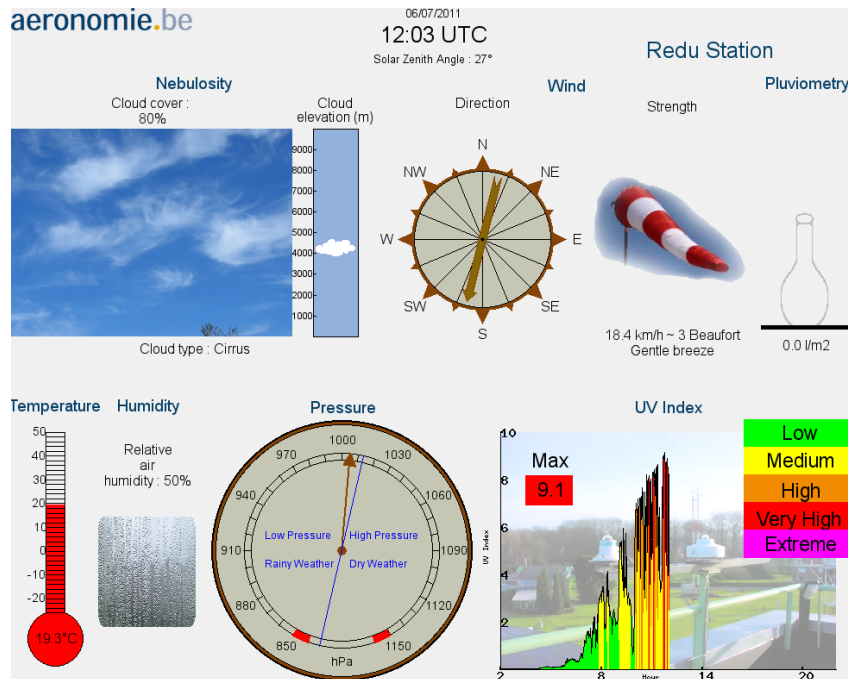


Figure 28 : Copie d'écran du site WEB de l'IASB montant les conditions atmosphériques générales à Redu.

### Expérience spatiale SOLAR SOLSPEC

L'expérience spatiale SOLAR SOLSPEC (en orbite depuis le 7 février 2008 sur ISS) est dédiée à la mesure de l'éclairement solaire hors atmosphère entre 166 et 3088 nm. SOLSPEC est un spectroradiomètre qualifié spatial équipé de 3 canaux de mesure indépendants (UV-VIS-IR). Il a été développé en collaboration avec le LATMOS (France) et l'Observatoire d'Heidelberg (ZAH, RFA). Une version précédente (SOLSPEC ATLAS) a participé à 5 missions à court terme durant les années 80 et 90. SOLAR SOLSPEC est une version optimisée de l'instrument pour une mission à long terme.

Durant l'année 2010 (3<sup>ème</sup> année en orbite), l'expérience est restée pleinement opérationnelle.

Les données correspondant au minimum d'activité solaire (mai-juin 2008) ont été analysées.

- Les performances du canal UV sont supérieures à celles de la version ATLAS sans modification de design optique, démontrant l'optimisation de l'instrument, tant pour l'alignement optique que pour la caractérisation radiométrique. L'étalonnage absolu sous vide a permis d'étendre la plage de fonctionnement jusqu'à 166 nm pour les courtes longueurs d'onde (contre 200 nm pour ATLAS).
- Un spectre composite a été construit en exploitant les données de l'expérience Sol-ACES (également intégrée dans la charge utile SOLAR sur ISS). La jonction entre la plage spectrale de Sol-ACES (17 – 133 nm) et le canal UV de SOLSPEC est réalisée en exploitant les données de l'expérience TimeD SEE. Le spectre résultant est en excellente correspondance avec les mesures réalisées par la plateforme SORCE durant la même période. Les résultats ont été présentés lors de la conférence COPAR (Brème, juillet 2010).

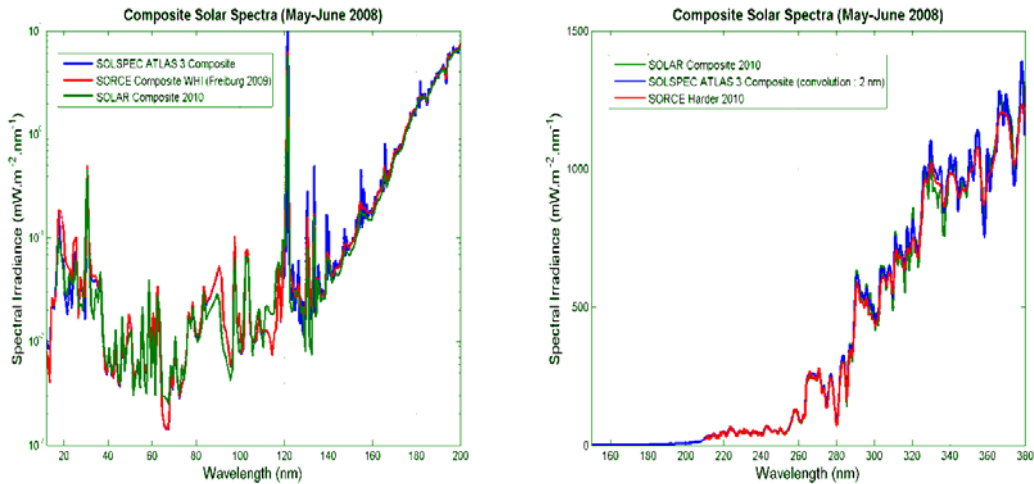


Figure 29 : Comparaison entre le spectre composite SOLAR (SOLSPEC, TimeD SEE and Sol-ACES) et SORCE lors du minimum solaire précédent (mai-juin 2008). Le spectre ATLAS 3 composite est également représenté. Les données correspondent à la plage spectrale du canal UV de SOLSPEC avec extension jusqu'à 17 nm (Sol-ACES).

Le canal infrarouge a bénéficié d'une révision complète par rapport à l'instrument ATLAS, tant pour l'électronique que pour les performances optiques. La plage spectrale est étendue jusqu'à 2.9  $\mu\text{m}$  et SOLSPEC est devenu l'unique expérience spatiale réalisant des mesures absolues de l'éclairement solaire hors atmosphère au-delà de 2.4  $\mu\text{m}$ . L'étalonnage absolu de haut niveau, réalisé face au corps noir étalon du PTB (Braunschweig, RFA) a permis de réduire l'incertitude standard composée associée aux mesures solaires en orbite. La figure suivante démontre la bonne correspondance entre les mesures obtenues simultanément avec SOLAR SOLSPEC et l'instrument SIM *non corrigé* sur SORCE (comparaison limitée à 2.4  $\mu\text{m}$ , courbes rouge et noir pointillée).

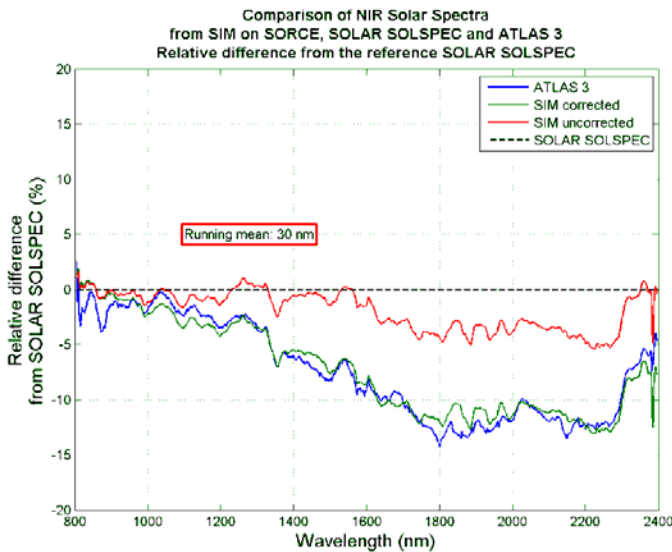


Figure 30 : Comparaison dans l'infrarouge entre les spectres obtenus avec SOLSPEC (ATLAS3), SIM sur SORCE et SOLAR SOLSPEC sur ISS. La résolution spectrale est respectivement de 7 nm et 30 nm pour SOLSPEC et SIM. Une moyenne mobile a été appliquée aux données ATLAS3 et SOLAR SOLSPEC pour se rapprocher de la résolution spectrale de SIM spectral. Une correction est appliquée aux données natives de SIM pour obtenir des données alignées sur le spectre ATLAS 3.

Les données de SIM sont actuellement corrigées pour s'aligner sur le spectre de référence SOLSPEC ATLAS 3 (courbes verte et bleue) afin d'obtenir une meilleure correspondance avec l'éclairement solaire IR délivré par les modèles semi-empiriques de physique solaire (travaux de Fontenla). Les recherches sont en cours pour résoudre la contradiction observées entre les mesures ATLAS 3 et SOLSPEC/SIM.

Pour les 3 canaux, le traitement de données est en cours afin de tenir compte de la dégradation de l'optique exposée à long terme à l'environnement spatial. SOLSPEC dispose d'une unité interne d'étalonnage équipée de lampes stables pour la mesure d'une possible dérive de la réponse des canaux et des échelles de longueurs d'onde. Une étude du comportement thermique de l'instrument est également menée.

### **1.3.3. L'aéronomie planétaire:**

#### **L'instrument SOIR participe à la compréhension de l'atmosphère de Vénus**

L'instrument SOIR – Solar Occultation in the InfraRed – à bord de la sonde Venus Express de l'Agence spatiale européenne est un spectromètre à échelle mesurant dans l'infrarouge. D'un poids et d'un volume particulièrement faibles, il utilise un filtre acousto-optique afin de sélectionner la bande spectrale désirée pour mesurer la concentration des espèces présentes dans l'atmosphère de Vénus. La résolution de l'instrument est la meilleure jamais atteinte pour un spectromètre embarqué à bord d'une sonde planétaire. En effet, elle varie de 0.11 à 0.21  $\text{cm}^{-1}$ .

Les observations de l'atmosphère de Vénus sont réalisées par occultations solaires, et permettent de couvrir toutes les latitudes au niveau du terminateur à 06:00 et 18:00 heures locales solaires. Une carte présentant l'ensemble des mesures de SOIR en fonction de la latitude et de l'heure locale solaire est donnée à la Figure 31.

La région spectrale mesurée par SOIR s'étend de 2.2 à 4.4  $\mu\text{m}$ , ou 4400 à 2200  $\text{cm}^{-1}$ . Celle-ci est divisée en 94 ordres de diffraction par le réseau à échelle utilisé comme élément diffractant au sein de l'instrument. Chaque ordre a une largeur spectrale équivalente à une vingtaine de  $\text{cm}^{-1}$ . Durant une mesure, l'instrument a la possibilité de scanner 4 ordres de diffractions différents, préalablement choisis par l'équipe scientifique de l'IASB. Ces choix sont réalisés afin de satisfaire des buts scientifiques préétablis.

De nombreuses espèces présentes dans l'atmosphère de Vénus présentent des raies d'absorption dans cette plage de nombres d'onde, dont le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), l'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ), le monoxyde de carbone ( $\text{CO}$ ), l'acide chlorhydrique ( $\text{HCl}$ ), l'acide fluorique ( $\text{HF}$ ) et le dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ). Certains dérivés isotopiques, ou isotopologues, présentent également des raies dans les spectres de SOIR, comme ceux de l'eau et du dioxyde de carbone. D'autres composés sont présents, mais à des densités trop faibles pour pouvoir être mesurées par SOIR – leurs raies d'absorption mesurées sont plus faibles que le niveau de bruit. Pour ces derniers, seule une limite supérieure de détection est déterminée. Pour certaines molécules, qui présentent des raies régulièrement espacées comme le  $\text{CO}_2$  ou le  $\text{CO}$ , la température rotationnelle – qui peut être assimilée à la température cinétique sous certaines conditions – est également déterminée directement à partir des spectres observés.

Le cas du dioxyde de carbone est particulièrement intéressant. En effet, il présente de nombreuses bandes d'absorption dans la région spectrale mesurée par SOIR, avec des niveaux d'intensité de raie variant d'un facteur  $10^9$ . De plus, ses 4 principaux isotopologues sont observables :  $^{16}\text{O}^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O}^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O}^{12}\text{C}^{18}\text{O}$  et  $^{16}\text{O}^{12}\text{C}^{17}\text{O}$ . Les rapports isotopiques de l'oxygène et du carbone sur Vénus peuvent donc être déterminés. Les mesures nous permettent de déduire des profils de densité et de température rotationnelle du  $\text{CO}_2$  sur une dizaine d'échelles de hauteur, allant de 85 km jusqu'à 165 km en altitude. Le dioxyde de carbone étant le composé principal de l'atmosphère de Vénus, et ce jusqu'à une altitude d'environ 140 km, il fournit des informations très intéressantes sur la densité totale de l'atmosphère. Il permet ainsi d'investiguer la dynamique des régions sondées, c'est-à-dire,

dans le cas de SOIR, du terminateur. La concentration molaire, ou rapport de mélange en volume, des espèces minoritaires mesurées par SOIR peut également être obtenue.

L'ensemble des profils de densité et de température rotationnelle inversés jusqu'à aujourd'hui est présenté à la Figure 32 et à la Figure 33 respectivement.

Comme cela peut être remarqué aisément, de larges variations de densité et de température sont observées en fonction du temps. Ces variations ont lieu sur le court et le long terme. Un exemple est présenté aux Figures 34 et 35 respectivement pour la densité et pour la température, observées à une altitude de 120 km. Elles sont en cours d'étude pour le moment.

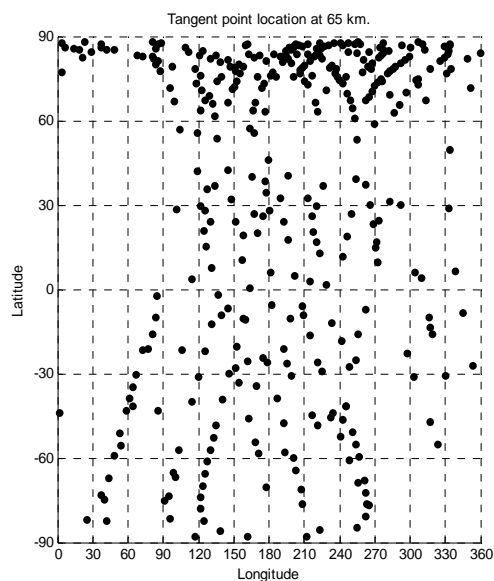


Figure 31 : Carte présentant la localisation de l'ensemble des mesures réalisées par SOIR, en fonction de la latitude et de l'heure solaire

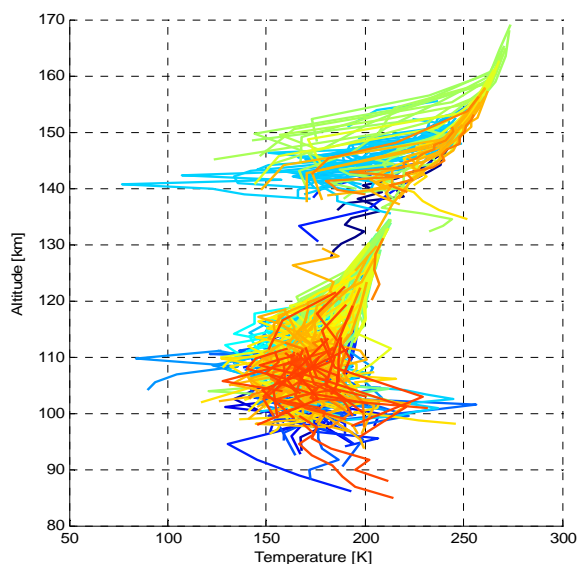


Figure 12 : Ensemble des profils verticaux de température rotationnelle de CO<sub>2</sub> inversés jusqu'à aujourd'hui en fonction de l'altitude. La couleur représente le temps, du bleu au rouge.

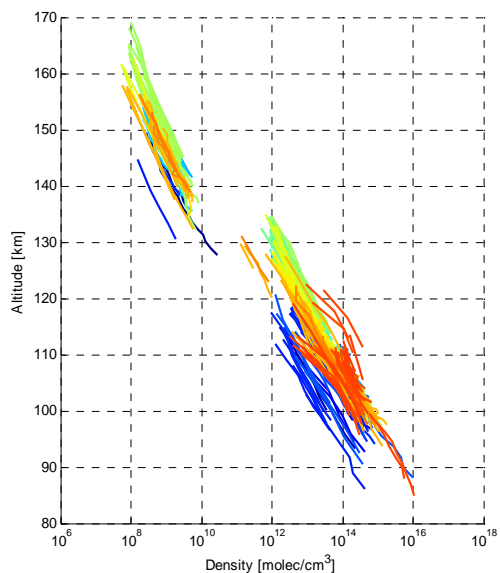


Figure 33 : Ensemble des profils verticaux de densité de  $CO_2$  inversés jusqu'à aujourd'hui en fonction de l'altitude. La couleur représente le temps, du bleu au rouge.

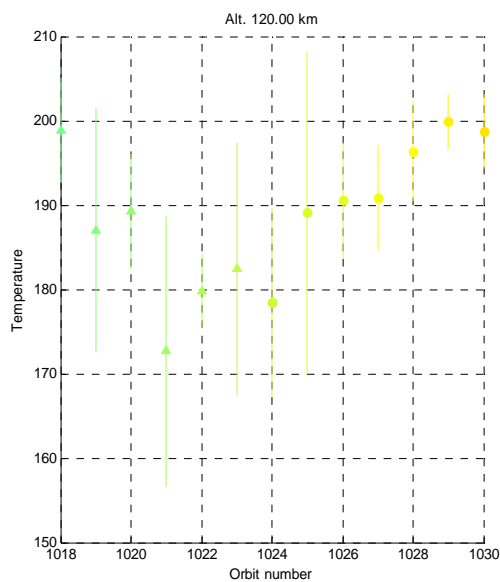


Figure 34 : Variations de la température rotationnelle de  $CO_2$  entre le 02/02/2009 et le 14/02/2009 à une altitude de 120 km et à des latitudes comprises entre  $70^\circ S$  et  $90^\circ S$ .

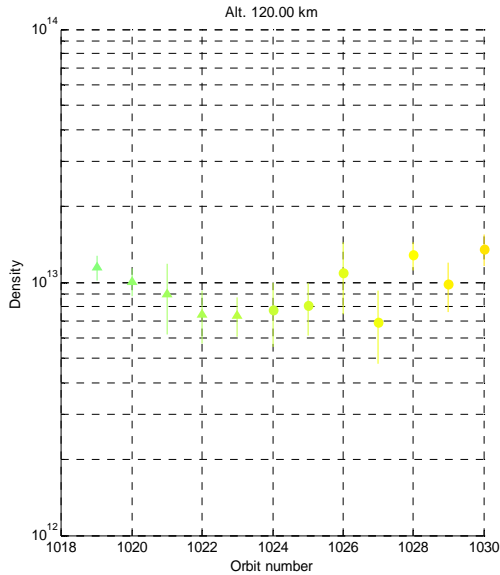


Figure 35 : Variations de la densité de  $CO_2$  entre le 02/02/2009 et le 14/02/2009 à une altitude de 120 km et à des latitudes comprises entre  $70^\circ S$  et  $90^\circ S$ .

### L'instrument NOMAD de l'IASB-BIRA sélectionné pour ExoMars

Un instrument développé par l'IASB-BIRA a été sélectionné pour participer à la mission ExoMars. Cette mission s'inscrit dans le Programme d'exploration de la planète rouge mis conjointement en place par l'ESA et la NASA. Le programme ExoMars comporte en fait deux missions. La première est la mission ExoMars Trace Gas Orbiter (EMTGO). Il s'agit d'une mission menée par l'ESA, composée d'un orbiteur et un atterrisseur démonstrateur (EDL), qui sera lancé en 2016 par un lanceur américain. La deuxième mission, sous la direction de la NASA, sera lancée en 2018 par un lanceur américain, et embarquera deux rovers (véhicules); l'un européen et l'autre américain. Le premier satellite sera lancé en janvier 2016 par la NASA grâce à un lanceur de type Atlas V 421. L'arrivée au niveau de Mars est prévue neuf mois plus tard, en octobre 2016. Le lâcher du démonstrateur EDL est prévu quelques jours avant la délicate manœuvre de mise en orbite du module orbiteur autour de Mars.

Des observations récentes de la planète Mars, réalisées à la fois à partir de satellites orbitant autour de Mars, mais aussi depuis la Terre, ont indiqué la présence de méthane. Les modèles photochimiques actuels ne peuvent pas expliquer la présence de ce gaz ainsi que les variations dans le temps et l'espace. Ces observations soulèvent donc des questions sur l'origine même du méthane, sur la présence éventuelle ainsi que la variation d'autres gaz en traces, et enfin sur les processus réactionnels eux-mêmes, ayant lieu soit en surface ou sous celle-ci ou dans l'atmosphère martienne.

Ces questions conduisent aux objectifs scientifiques suivants:

1. détecter une large gamme de gaz en traces dans l'atmosphère et leurs principaux isotopes
2. caractériser les variabilités spatiale et temporelle des émissions de méthane et d'autres espèces clés ;
3. localiser les sources de méthane et d'autres espèces clés et en déduire leur évolution respective ainsi que les diverses interactions possibles entre ces derniers ;
4. donner les caractéristiques de surface, éventuellement en lien avec les sources et puits des divers gaz en traces.

Les instruments embarqués sur EMTGO auront comme tâche de répondre à ces interrogations. L'IASB-BIRA en collaboration avec les scientifiques de l'Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA, Espagne, co-PI), de l'Open University (OU, UK) et de l'Istituto di Fisica dello Spazio Interplanetario

(IFSI, Italie), a proposé un nouvel instrument, NOMAD, qui a été accepté par les agences spatiales ESA et NASA. NOMAD est composé de trois canaux de mesure : deux canaux opèrent dans l'infrarouge et ont été construits sur le modèle de l'instrument SOIR (Solar Occultation in the InfraRed) présent à bord de la sonde de l'ESA Venus-Express (VEX), réalisé par l'IASB-BIRA. Le troisième canal opère dans le domaine ultraviolet-visible et se base sur l'instrument UVIS qui faisait partie de la charge utile du Lander d'ExoMars.

Le canal d'occultation solaire de NOMAD (SO) est une copie de SOIR/VEX. Il fonctionne en observant jusqu'à 6 portions du spectre complet chaque seconde. Ceci permet d'observer différentes molécules cibles qui absorbent à différentes longueurs d'onde, tout en maximisant le rapport signal sur bruit pour chacune de ces portions. Une occultation solaire dure environ 5 minutes ce qui permet d'enregistrer 300 spectres à chaque longueur d'onde et d'établir un profil vertical de la composition atmosphérique depuis le sommet de l'atmosphère jusque pratiquement la surface de la planète (en fonction de la quantité de poussière présente).

Le canal limbe, nadir et occultation (LNO) est une version améliorée de SOIR, mieux adaptée aux sources lumineuses de faible intensité. En effet, il ne mesurera plus seulement en mode d'occultation solaire, mais également en mode nadir, c'est-à-dire en observant directement la lumière du Soleil réfléchi par la surface et l'atmosphère de la planète.

Les modifications concernent un nouvel AOTF permettant à plus de lumière d'entrer dans l'instrument, une fente d'entrée plus grande, une nouvelle électronique pour augmenter la puissance de calcul et un système de refroidissement plus performant pour réduire le niveau de bruit. SOIR utilise un cryo-cooler pour refroidir son détecteur et accroître sa sensibilité. Ce système n'est utilisé que 20 minutes par jour sur Vénus, mais pour des observations de type Nadir sur Mars, il devra être utilisé sur de plus longues durées. Il faut donc trouver un système dont la durée de vie est accrue. De plus, toute une partie de l'instrument lui-même sera refroidi afin de réduire le bruit thermique. Le canal infrarouge en mode nadir peut aussi observer jusqu'à six régions spectrales par mesure mais le temps d'intégration nécessaire pour obtenir suffisamment de signal pour détecter les molécules sous forme de trace pourrait être supérieur à 1 seconde. Les mesures nadir permettent uniquement de déterminer la colonne totale d'un gaz entre l'instrument et la surface réfléchissante, mais permettent par contre de cartographier des variations sur toute la surface de la planète, le long de la trace au sol de l'orbite. De cette façon, il est possible d'observer des différences entre le pôle et l'équateur ou au cours de la mission, ainsi que des différences en fonction des saisons martiennes.

Le canal supplémentaire UVIS, fourni par nos partenaires britanniques, étendra la plage de longueurs d'onde de l'infrarouge à l'ultra-violet et au visible, permettant à NOMAD d'accéder en série à l'ozone, à l'acide sulfurique et à l'étude des aérosols. Cet instrument ultraléger et très performant avait été sélectionné pour l'atterrisseur démonstrateur mais avait été supprimé en même temps que ce dernier avait été annulé pour être remplacé par une mission à deux rovers en 2018.

UVIS sera adapté pour une mission en orbite et utilisera l'entièreté de sa plage de longueurs d'onde à chaque observation d'1 seconde, couvrant plusieurs molécules intéressantes et fournissant plus d'informations sur les aérosols dans l'atmosphère.

Les développements seront réalisés par des entreprises belges, en collaboration avec des partenaires espagnols et italiens qui fourniront leur expertise. L'électronique de SOIR sera par exemple mise à jour par des collègues espagnols, qui ont participé aux missions Rosetta, Mars Express et Venus Express. La coordination, tant au niveau technique que scientifique, des différentes équipes européennes sera réalisée par l'IASB-BIRA.

# SOIR-NOMAD

Nadir and Occultation for MARS Discovery

Dr. A.C. Vandaele, Principal Investigator  
Belgian Institute for Space Aeronomy (IASB-BIRA, Belgium)

Dr. J.J. López-Moreno, Co-Principal Investigator  
Institute of Astrophysics of Andalucía (IAA, Spain)

Dr. G. Bellucci, Lead Co-Investigator, Institute of Interplanetary Space Science (IFSI, Italy)

Dr. M. Patel, Lead Co-Investigator, Open University (OU, UK)

Dr. E. Neefs, Project Manager, IASB-BIRA  
Dr. F. Daerden, Project Scientist, IASB-BIRA

**Co-Investigators:**  
Dr. M. Allen (NASA/JPL), Dr. F. Altieri (IFSI), Dr. T. Clancy (SSI),  
Dr. C. Depleesse (IASB-BIRA), Dr. R. Drummond (IASB-BIRA),  
Dr. Y. Formisano (IFSI), Dr. B. Funke (IAA), Dr. D. Fusse (IASB-BIRA),  
Dr. J. C. Gérard (ULg), Dr. M. Guarnini (IFSI), Dr. J. Kárníek (YU),  
Dr. M. López-Puertas (IAA), Dr. M. López-Yávarde (IAA), Dr. J. McConnell (YU),  
Dr. M. Mumme (NASA), Dr. L. Neary (IASB-BIRA), Dr. M. Smith (NASA), Dr. G. Villanueva (CUA/NASA),  
Dr. J. Whiteway (YU), Dr. Y. Willquet (IASB-BIRA)

2016 ExoMars Trace Gas Orbiter Instruments Investigations  
Submitted 15 April 2010

Credits: ESA/NASA

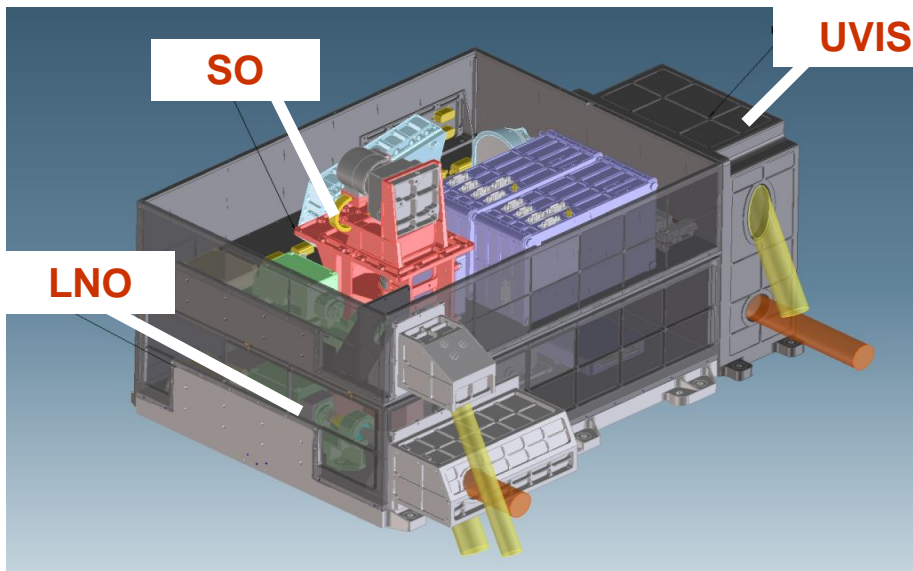


Figure 36: Schéma des 3 canaux, SO (occultation solaire), LNO (Limbe, Nadir et Occultation solaire) et UVIS (Ultraviolet –visible) de l'instrument NOMAD.



## Chapitre 2: Services et opérations scientifiques

### 2.1. Météorologie chimique (Chemical weather):

#### 2.1.1. L'IASB assure le « service de l'ozone stratosphérique » dans le cadre du programme européen GMES :

Ce service est diffusé via le site <http://www.gmes-stratosphere.eu>, réalisé et maintenu par l'IASB. Il permet de surveiller l'évolution en temps réel de la composition chimique de la stratosphère, et en particulier du « trou d'ozone » apparaissant au printemps dans les régions polaires. Il est également possible d'étudier l'évolution de ce trou d'ozone depuis 2003.

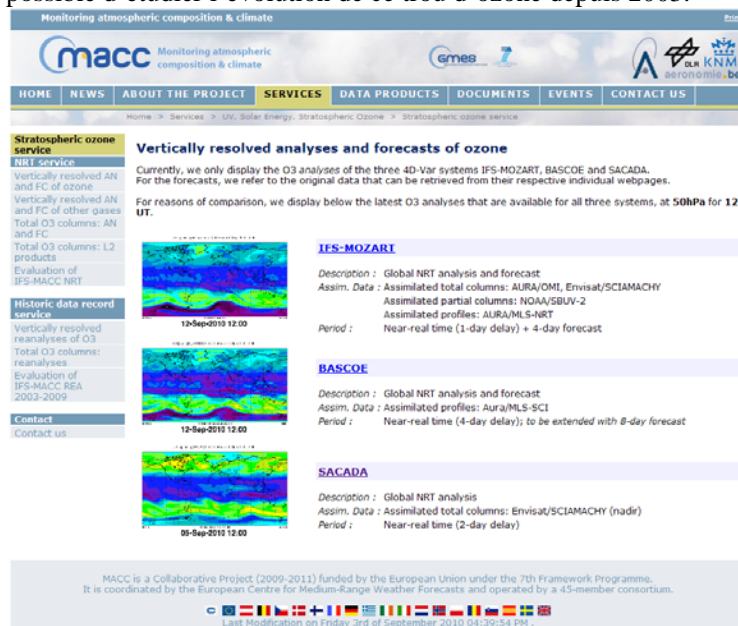


Figure 37: Site web réalisée l'IASB (<http://www.gmes-stratosphere.eu>) pour le monitoring en quasi-temps réel de la stratosphère dans le cadre du projet européen MACC (<http://www.gmes-atmosphere.eu>).

Pour ce faire, nous avons mis en place de nombreux flux de données, tous obtenus dans le cadre du programme européen de surveillance de l'environnement (GMES) :

- Le flux de données de référence est fourni par le système d'assimilation chimique BASCOE, développé à l'IASB et utilisé en quasi-temps réel depuis 2009 dans le cadre de ce projet.
- Le flux de données principales est fourni par le système IFS-MOZART, mis en œuvre par le centre européen de prévisions météorologiques (ECMWF). Ce système permet également la surveillance de la chimie troposphérique, avec des applications en qualité de l'air.
- Deux flux de données supplémentaires sont fournis par les systèmes SACADA (agence spatiale allemande, DLR) et TM3DAM (Institut de météorologie des Pays-Bas, KNMI) pour permettre une plus grande diversité de résultats.

Nous fournissons ainsi une vue d'ensemble des systèmes européens de surveillance de la stratosphère, ainsi qu'une évaluation de la qualité des résultats grâce à la comparaison des systèmes entre eux et avec des données satellites indépendantes. Ce service a été présenté à la conférence EUMETSAT des satellites météorologiques organisée en septembre 2010 à Cordoue (Espagne).

#### Référence :

Lefever, K., Chabrilat, S. and Errera, Q.

Evaluation of the integrated MACC stratospheric ozone service

EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Cordoba, Spain, 23 September 2010

### **2.1.2. Démarrage du projet BACCHUS par l'IASB, l'IRM et Environnement Canada :**

Ce projet vise à développer un nouveau modèle intégré de prévision du temps chimique, qui couvre à la fois la troposphère et la stratosphère et qui soit basé sur un système opérationnel de prévision du temps. Nous utilisons pour cela le modèle météorologique GEM, développé par Environnement Canada et dans lequel nous avons déjà réussi l'intégration du module de chimie stratosphérique développé pour BASCOE (modèle intégré GEM-BACH).

Ici le but est de développer une version adaptée à la prévision de la qualité de l'air, à l'échelle continentale. Nous avons exploré les capacités de GEM-MACH15, une version développée et utilisée opérationnellement par Environnement Canada au-dessus de l'Amérique du Nord.

Dans la troposphère, l'ozone est un polluant majeur pour l'évaluation de la qualité de l'air. Les modèles de qualité de l'air comme GEM-MACH15 sont optimisés pour fournir des prévisions précises au niveau du sol, mais leurs performances sont rarement vérifiées dans la troposphère libre (entre 2 et 12 km d'altitude). La figure 38 compare une prévision à court terme faite par GEM-MACH15 avec des mesures prises par le satellite européen Metop-A.

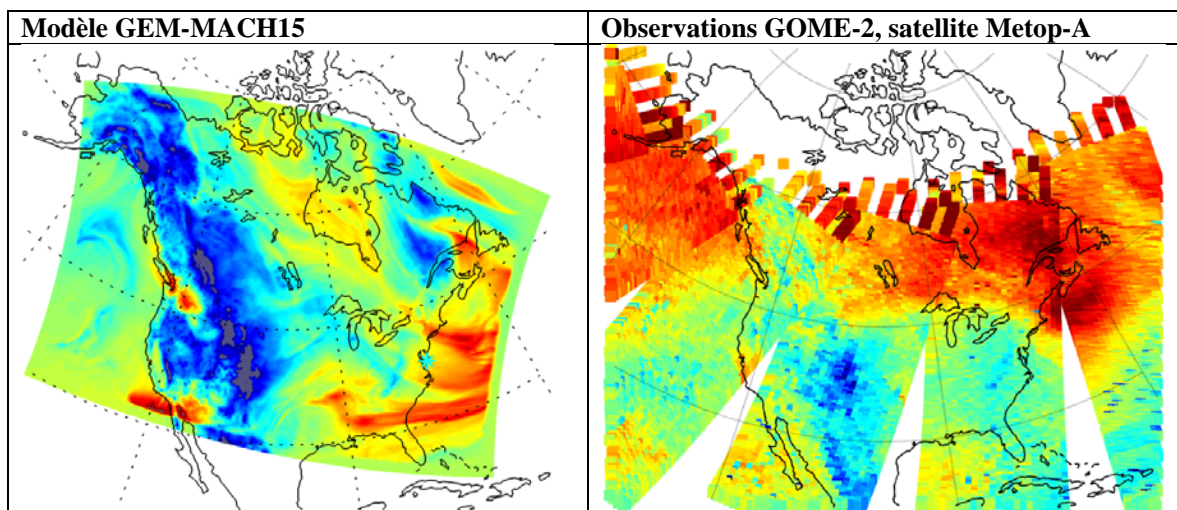


Figure 38 : Colonne partielle d'ozone entre la surface et 400 hPa, le 17 décembre 2009. A gauche : prévision par le modèle GEM-MACH15. A droite : observations du satellite Metop-A/GOME-2 (données fournies par Eumetsat/KNMI).

Nous constatons que les résultats du modèle ne correspondent pas du tout à la réalité, tant pour les quantités absolues que pour la distribution géographique observée au-dessus de l'Amérique du Nord. Cela est sans doute dû au fait que ce modèle, comme la plupart des modèles de prévision de qualité de l'air, ne tient pas compte de la production directe d'ozone par le rayonnement solaire UV.

Cette absence pourrait expliquer en partie les faibles performances des modèles de prévision de qualité de l'air aux échéances supérieures à 24 heures. Ceci renforce l'intérêt du projet BACCHUS, consistant à intégrer dans un modèle opérationnel de prévision du temps la chimie troposphérique *et* stratosphérique. Ces résultats ont été présentés à la rencontre internationale de recherche en qualité de l'air, organisée à Québec (Canada) en novembre 2010.

#### **Référence :**

Chabrilat, S., van Bever, J., Delcloo, A., de Backer, H., Ménard, R. and Moran, M.  
BACCHUS project: evaluation of GEM-MACH15 and adaptation to Europe  
International Workshop on Air Quality Forecasting Research, Quebec, Canada, November 2010

### **2.1.3. Acquisition d'une capacité de prévision pour la dispersion des panaches volcaniques ou accidentels :**

L'éruption du volcan islandais de l'Eyafjöll (aussi appelé Eyjafjallajökull), à partir du 13 avril 2010, a incité le service de météorologie chimique à se doter d'une première capacité à prévoir la dispersion des panaches volcaniques ou dus à d'autres événements catastrophiques (p.ex. accidents industriels). Nous avons installé le modèle de dispersion Flexpart développé par l'institut norvégien de recherche atmosphérique (NILU). Ce modèle avait déjà été testé à l'IASB pour l'interprétation de données mesurées depuis le sol. Il est basé sur des calculs de trajectoire de particules transportées par les champs de vents issus des prévisions météorologiques. Il ne suffit pas de calculer quelques trajectoires, car la turbulence atmosphérique fait rapidement diverger des trajectoires initialement éloignées de seulement quelques mètres. Flexpart simule donc la dispersion de plusieurs dizaines de milliers de particules relâchées au hasard pendant une durée et dans un volume arbitrairement choisis.

Nous avons préparé ce modèle de manière à pouvoir très rapidement le lancer pour tout panache survenant en un lieu quelconque du globe, et obtenir automatiquement une animation vidéo montrant une prévision de la dispersion du panache dans les jours suivants. La figure 39 montre les résultats obtenus pour le 17 avril 2010 suite à l'éruption de l'Eyafjöll.

Cet outil n'est pas utilisé à l'heure actuelle dans le cadre de nos recherches scientifiques, mais dans un but de communication auprès des médias et du grand public. Nous avons déjà pu le mettre à contribution plusieurs fois depuis cette mise en service initiale.

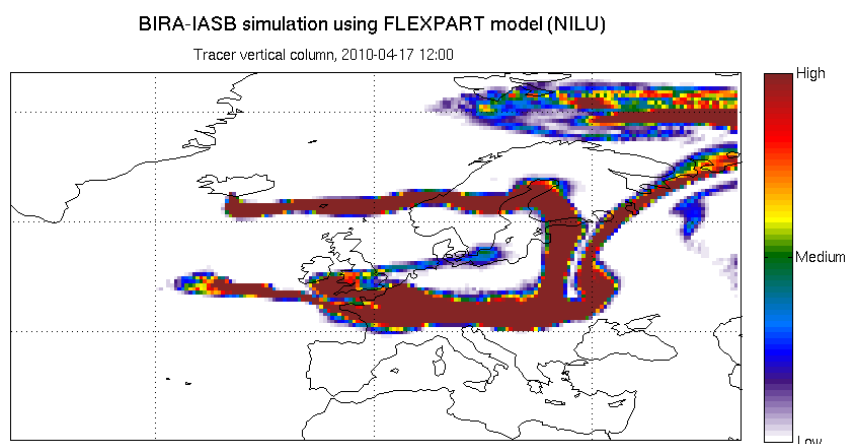


Figure 39. Prévision de la dispersion du panache dû à l'éruption du volcan islandais Eyafjöll, le 17 avril 2010. Résultats obtenus par l'IASB sur base du modèle Flexpart développé par le NILU.

## **2.2. La «météo spatiale» (Space weather)**

### **2.2.1. Le portail ESWeP et le système SPENVIS**

La Météo spatiale décrit les conditions qui prévalent à proximité de la Terre et qui sont donc susceptibles d'affecter significativement un bon nombre d'activités humaines. Ces conditions sont principalement liées à l'activité solaire et à des phénomènes tels que les tempêtes géomagnétiques, les ceintures de radiations de Van Allen, les perturbations ionosphériques, les aurores et autres courants induits géomagnétiquement à la surface de la Terre.

Plusieurs modèles et ensembles de données sont produits par la communauté des scientifiques et des ingénieurs pour comprendre, évaluer et prévoir les phénomènes et leurs effets sur les systèmes technologiques. L'accès à ce type d'informations n'est pas toujours immédiat, en particulier pour le grand public. Aussi, des services accessibles via le Web tels que ESWeP et SPENVISWeb contribuent à éduquer, informer et fournir des outils conviviaux aux différentes communautés d'utilisateurs (le grand public, les ingénieurs spatiaux, les décideurs politiques,...). Notre objectif à

long terme est de fournir un certain nombre de services humains et techniques qui permettent d'exposer l'expertise scientifique et technique acquise sur l'environnement spatial et ses effets.

### **ESWeP : Le portail européen de météo spatiale**

Le portail ESWeP (de l'anglais « *European Space Weather Portal* ») est un site web fournissant un point d'accès centralisé pour le partage des connaissances et des résultats de la communauté scientifique travaillant en météo spatiale et sur les relations Terre-Soleil. Initié dans le cadre de l'action COST 724 ((European Cooperation in Science and Technology, programme intergouvernemental pour la coordination au niveau européen de recherches financées au niveau national), le développement du portail ESWeP se poursuit dans le cadre de l'action COST ES0803 (« *Développement de produits et services de la météorologie spatiale en Europe* »). Le portail est hébergé à l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique avec pour objectif :

- de maintenir un système de gestion des contenus performant pour soutenir le portail ;
- de développer de nouvelles fonctionnalités ; et,
- d'interagir avec la communauté européenne de météo spatiale

En plus de la maintenance du système de gestion des contenus du portail, en 2010 l'accent a été mis sur la définition d'un nouveau protocole d'entente entre les différents partenaires européens sur le mode opératoire pour le développement futur du portail. Des fonctionnalités ont été également ajoutées comme un accès au modèle de prévision instantanée de la densité plasmasphérique développé par V. Pierrard et l'accès au résultat du modèle héliosphérique ENLIL tel qu'exécuté par le CCMC (Community Coordinated Modeling Center, un centre multi-agences américain géré par la NASA et situé à Washington DC).

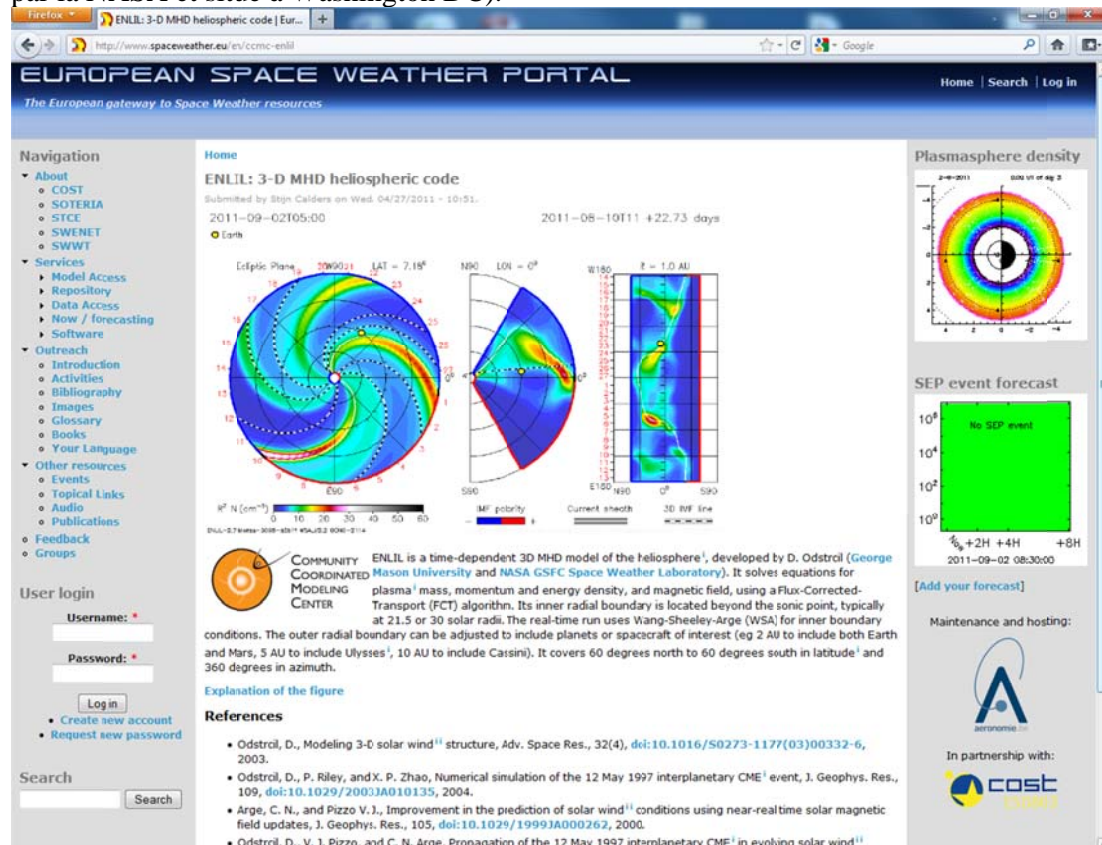


Figure 40: Capture d'écran du portail européen de météo spatiale sur la page consacrée au modèle ENLIL montrant la densité du vent solaire selon trois projections où le rond jaune représente la Terre. Dans le panneau de droite sont visibles les prévisions de la densité au sein de la plasmasphère et de l'émission vers la Terre de particules énergétiques solaires.

**SPENVIS : Interface conviviale pour les modèles de l'environnement spatial et de ses effets**  
 SPENVIS (en anglais « Space Environment Information System ») est un logiciel opérationnel de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) développé, maintenu et exploité par l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique. Au travers d'une interface Web, SPENVIS permet l'évaluation des différents paramètres de l'environnement spatial et de leurs effets sur les engins spatiaux, les instruments embarqués et leurs équipages. Le système est principalement destiné lors des premières phases de développement et de planification de missions ou instruments spatiaux. Utilisé à cette fin par une large communauté internationale d'ingénieurs, le système SPENVIS est aussi utilisé par la communauté éducative et la communauté scientifique.

Le développement et la maintenance du système SPENVIS se fait dans le cadre du programme GSTP (General Support Technology Programme) de l'Agence Spatiale Européenne. En 2010, le système a été activement utilisé par plus de trois milles personnes avec une moyenne de 450 utilisateurs actifs chaque mois. Au mois de novembre, une nouvelle version a été mise en ligne incluant des modèles supplémentaires comme GRAS et MAGNETOCOSMICS permettant par l'intermédiaire du progiciel GEANT4 de simuler la trace de particules ionisantes respectivement dans un montage instrumental et dans la proximité d'une planète tellurique.

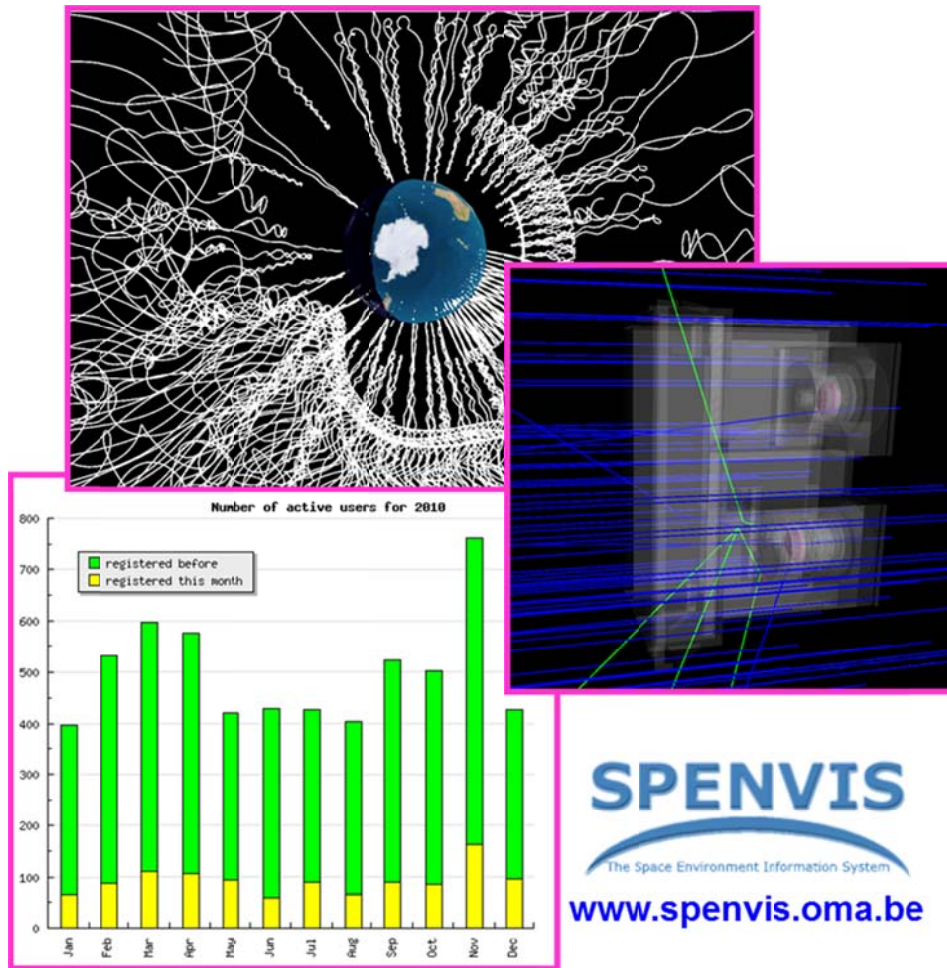


Figure 41: Image composite montrant la distribution des utilisateurs de SPENVIS en 2010 (en bas à gauche), une simulation de la propagation de rayons cosmiques à proximité de la Terre (en haut à gauche), et une simulation de l'interaction d'un instrument spatial avec l'environnement radiatif attendu (au milieu à droite)

### 2.3. Le B.USOC et les missions spatiales

Aujourd'hui, l'expertise des équipes BELSPO / IASB / B.USOC / Industrie qui sont liées au B.USOC a augmenté, notamment depuis la mission belge effectuée dans les modules américains et russes de la Station spatiale internationale (Odyssey, 2002), mais aussi lors de la mission NASA STS-107, les missions de l'ESA Promiss 3 et 4 et depuis 3 ½ ans maintenant avec le projet Columbus de l'ESA.

Ces missions sont celles pour lesquelles les équipes B.USOC / équipes industrielles ont géré toute la préparation, la production et les aspects de qualification des équipements de bord ainsi que la réalisation et le suivi des expériences scientifiques qui y sont liées.

Pour le moment, le B.USOC a une longue expérience éprouvée de la définition et de la mise en œuvre de ces nouveaux concepts d'opérations dans l'espace ainsi que des outils qui seront pour le programme d'exploration de l'ESA. Le B.USOC maîtrise le déploiement de ces deniers dans des environnements opérationnels pour le contrôle des charges utiles de l'ISS /Columbus ou d'autres plateformes.

Sous l'impulsion de BELSPO et de l'IASB, ces 10 dernières années, le B.USOC a développé une gamme de services à la communauté scientifique qui dépasse maintenant le cadre strict de la microgravité et de la physique solaire. Un rapport sur les travaux d'exploitation réalisés depuis 10 ans par le B. USOC est prévu pour publication en 2011. Grâce à l'expérience acquise, plusieurs charges utiles importantes de l'ESA / NASA ont été assignées au B.USOC. Ces affectations permettront au B. USOC d'être pleinement opérationnel jusqu'à la fin de la vie de la Station spatiale interne, prévue en 2020.

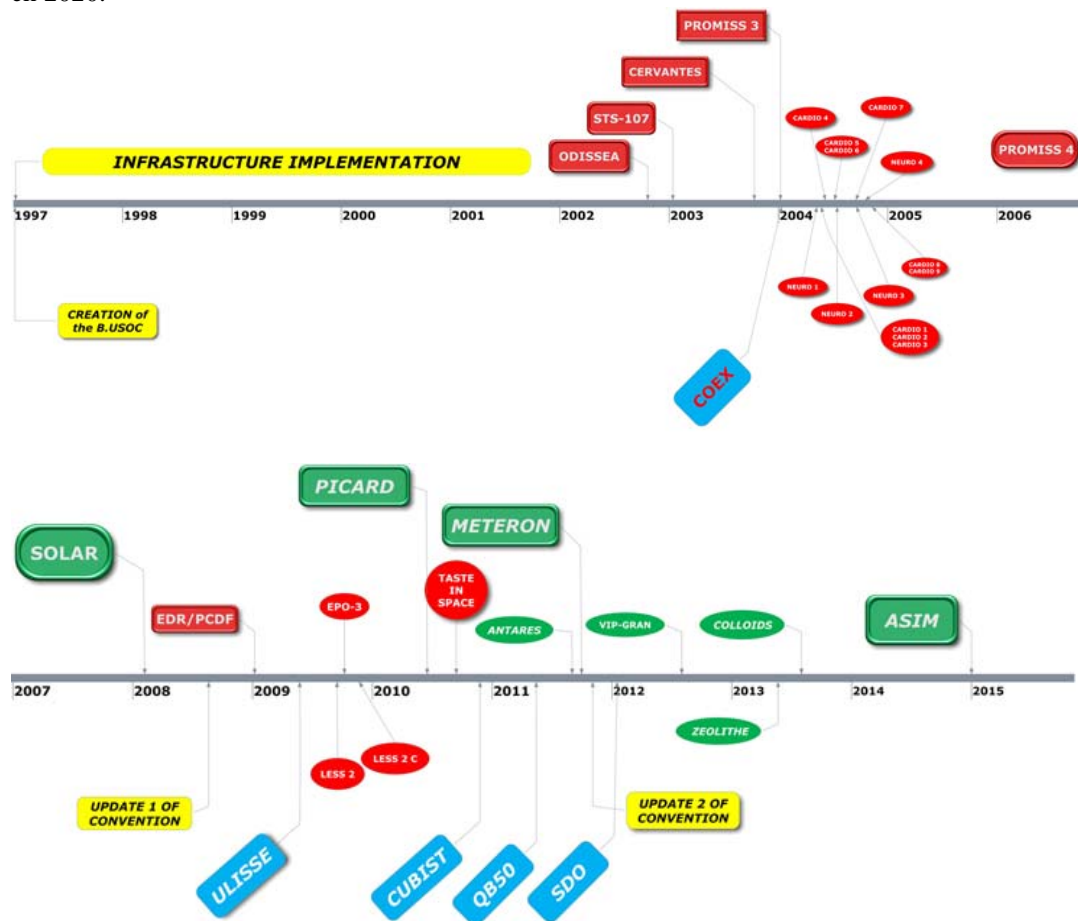


Figure 42: Timeline représentant les projets B.USOC

## **Chapitre 3: Structures de support**

### **3.1. Service d'ingénierie**

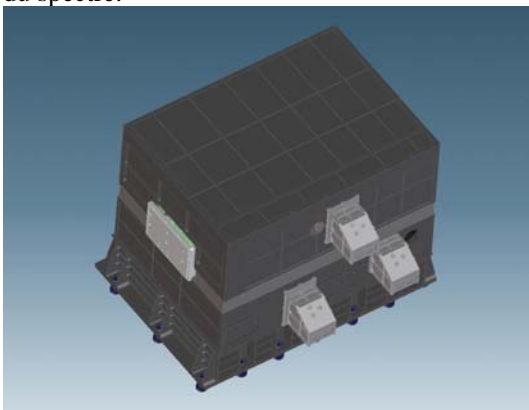
#### **3.1.1. Contribution au projet NOMAD/ExoMars :**

L'une des contributions les plus importantes du département ingénierie de l'IASB est celle apportée au sein du projet NOMAD. NOMAD est un instrument embarqué à bord de la mission ExoMars Trace Gas Orbiter dont l'objectif est de faire la démonstration d'un vol de première importance et de mesures in situ débouchant sur des technologies permettant de futures missions d'exploration. En outre, cette mission permettra d'accomplir des recherches scientifiques fondamentales pour l'exploration de Mars. Elle est le fruit d'une collaboration entre l'ESA et la NASA. NOMAD sera embarqué à bord du premier volet du projet ExoMars, à savoir le Trace Gas Orbiter qui sera lancé en 2016.

Au début de l'année, le département ingénierie, en collaboration avec une équipe scientifique, a travaillé à l'élaboration d'une proposition scientifique et technologique, qui a finalement été sélectionnée en juin 2010 pour cette mission. Depuis lors, on a entamé la conception de l'instrument, dont la construction part de SOIR, présent à bord de Venus Express.

SOIR est toujours actif et fonctionne nominalement. L'équipe d'ingénierie s'attèle également toujours aux opérations et à l'archivage des données de SOIR.

NOMAD est un spectromètre composé de trois canaux : deux canaux opèrent dans l'infrarouge et sont donc des clones, quoiqu'améliorés, de SOIR. Le troisième canal opère dans la partie ultraviolet-visible du spectre.



*Figure 43 : Vue extérieure de NOMAD*

Le canal d'occultation solaire de NOMAD est une copie de SOIR/VEX. Le canal limbe, nadir et occultation (LNO) est une version améliorée de SOIR, mieux adapté aux sources lumineuses de faible intensité. En effet, il ne mesurera plus seulement en mode d'occultation solaire, mais également en mode nadir, c'est-à-dire en observant directement la lumière du soleil réflétée par la surface et l'atmosphère de la planète rouge.

Le département ingénierie a analysé les lacunes de SOIR spécialement pour le canal LNO. Il a entamé diverses études afin d'examiner comment certaines parties essentielles de l'instrument (AOTF, réseau, détecteur) pourraient être optimisées.

Le projet de modification retenu pour la conception de SOIR inclut une fente d'entrée plus large afin d'augmenter la quantité de lumière parvenant jusqu'à l'optique de l'appareil, un nouveau filtre actif (AOTF, Acousto-Optical Tunable Filter) permettant de maximaliser la lumière entrante, ainsi qu'un refroidissement des systèmes optiques. Cette dernière amélioration augmente considérablement le rapport signal sur bruit, mais reste l'adaptation de SOIR la plus difficile à réaliser. Les développements seront réalisés en collaboration avec l'entreprise OIP, située à Oudenaarde, et avec des partenaires espagnols et italiens qui fourniront leur expertise.

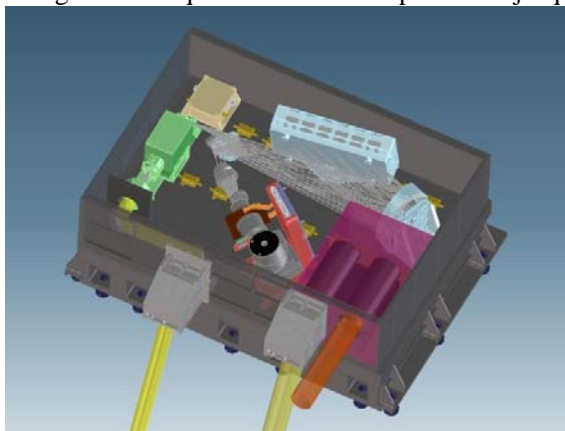


Figure 44 : Vue intérieure des canaux SO et UVIS de NOMAD

Le département ingénierie se charge de la conception et de la construction de toutes les parties mécaniques structurelles. Outre la plaque de base, les parois ou les radiateurs, l'IASB concevra et élaborera également les supports pour les détecteurs, entre autres.

En dehors de l'aspect mécanique, l'équipe de l'IASB concevra aussi l'aspect électronique des deux canaux infrarouges (SO et LNO). Ces canaux disposent d'un FPGA (Field Programmable Gate Array) qui contient le logiciel embarqué. Celui-ci veille à ce que toutes les tâches soient exécutées : refroidissement du détecteur, mise en marche de l'AOTF, lecture du détecteur, addition de pixels et/ou de spectres, mesure des données d'entretien, etc. Ces données sont transmises à un processeur central (sous la responsabilité de collègues espagnols). Une partie du logiciel implanté dans le processeur central sera également conçue par la division ingénierie.

Fort de son expérience en matière de développement d'EGSE (electrical ground support equipments), l'IASB se chargera en outre de la conception de l'équipement et des logiciels de soutien au sol. En ce qui concerne NOMAD, la construction de ces pièces se basera également sur l'EGSE existant de SOIR.

La division ingénierie de l'IASB contribue à la coordination des tâches exécutées dans toute l'Europe et gère la documentation requise par l'ESA et la NASA. Elle est aussi en charge d'une partie de l'ingénierie système et de la gestion de projet, en collaboration avec l'équipe du chercheur principal (Ann Carine Vandaele – IASB).

### 3.2. ICT (supports informatiques et technologiques)

Le service ICT gère et développe l'infrastructure IT de l'institut et fournit du support pour toutes les activités liées à l'informatique.

Une des tâches est l'extension et l'entretien de l'infrastructure de base (réseau, serveurs, stockage, services) aussi bien que l'achat, l'installation et l'entretien des postes de travail des utilisateurs (PC, Terminaux et logiciels associés).

Une autre priorité est le support direct aux utilisateurs pour l'emploi de cet environnement ICT, le traitement de données, le développement d'applications et la gestion des données.

Plusieurs projets ont été initiés en 2010 dans le but de renouveler ou de changer des parties de l'infrastructure de base ICT. La plupart de ces projets verront leur réalisation finalisées en 2011, mais quelques-uns ont abouti en 2010.

Le but final de l'ensemble de ces projets est d'améliorer la flexibilité et facilité d'utilisation des systèmes pour les utilisateurs et de garantir une offre de service permanente.



En exemple, vous trouverez ci-dessous une description plus détaillée d'un des projets les plus importants de 2010.

### **Remplacement partiel et renforcement de l'infrastructure e-mail.**

L'e-mail est considéré aujourd'hui comme un outil informatique essentiel et incontournable. L'e-mail est utilisé par les membres de l'institut comme un service de base pour effectuer une variété de tâches. Cela implique que l'infrastructure et la fonctionnalité du système d'e-mail est d'un intérêt crucial pour le bon fonctionnement de l'institut.

Ces dernières années, ce système a dû affronter différents défis.

- Des volumes d'e-mail toujours plus grands et un grand nombre d'e-mails historiques qui doivent tous rester consultables.
- La croissance ininterrompue de Spam, Phishing, Virus, etc. Toutes sortes de cyber-attaques qui tentent d'utiliser le système e-mail pour développer des activités criminelles.
- La disponibilité du système doit être quasi permanente. L'indisponibilité de l'e-mail est considérée comme inacceptable par les utilisateurs.

Afin de résorber les problèmes de lenteur du système existant et de retarder de futurs problèmes, une partie de l'infrastructure a été remplacée en 2010. Plus précisément, cela concerne des filtres anti-spam/anti-virus et des serveurs qui permettent aux utilisateurs de consulter et gérer leurs boîtes de mail. L'interface web a été actualisée.

Concernant les filtres anti-spam, nous avons choisi un produit commercial appelé Barracuda. L'infrastructure existante, développée chez nous, était très efficace mais son entretien était lourd et sa gestion peu flexible.

Les 2 nouveaux serveurs Barracuda qui sont en service aujourd'hui apportent une réponse aux principaux besoins. La disponibilité du service est garantie par le fait que chacun de ces serveurs peut reprendre automatiquement les tâches de l'autre. Le filtrage des Spam est très efficace et garanti un petit nombre de 'faux positifs', critère très important pour l'acceptation de cette solution. Enfin, les utilisateurs peuvent consulter eux-mêmes la liste des e-mails retenus par les filtres de spam et les délivrer s'il s'agit d'une erreur. Cela réduit drastiquement le nombre d'appels au service ICT concernant les problèmes d'e-mails.

Une deuxième importante amélioration est le remplacement de logiciel du serveur mail pour la gestion des répertoires de mail. Les anciens serveurs n'étaient plus capables d'assumer la taille croissante des répertoires de mail (plusieurs milliers d'e-mails par répertoire ne sont plus une exception) et l'emploi constamment accru de l'e-mail.

Le nouveau logiciel que nous avons choisi (Dovecot server) apporte quelques améliorations qui permettent de supporter une utilisation moderne de l'e-mail. Les boîtes mail (mailboxes) sont maintenant totalement indexées, rendant beaucoup plus efficace et rapide la recherche d'e-mail. La méthode de sauvegarde sur le serveur de fichier (file server) a été adaptée, ce qui réduit drastiquement la charge sur le système de stockage. Les différentes améliorations ont pour conséquence que les utilisateurs disposent actuellement d'un système très réactif et convivial.

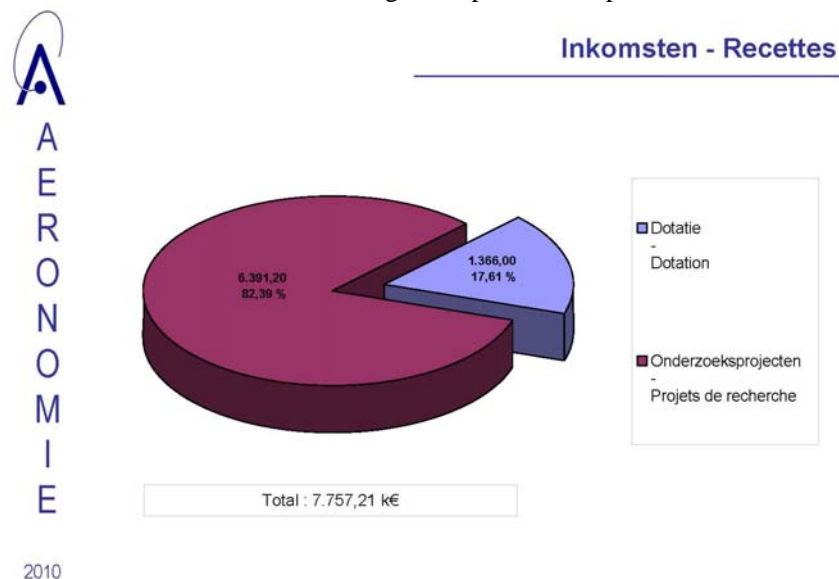
Cette adaptation particulière de l'architecture à l'évolution des besoins est représentative pour les différents projets en cours d'exécution pour améliorer l'infrastructure.

### 3.3. Administration: budget, personnel

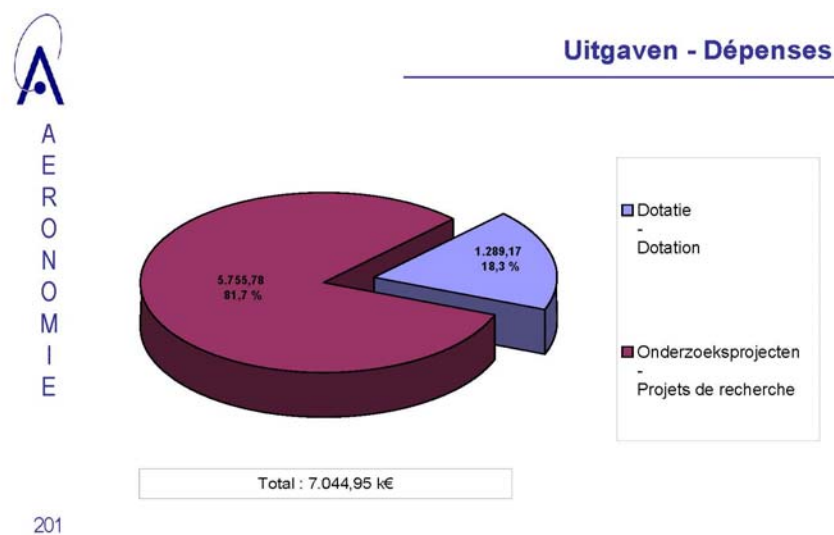
#### 3.3.1. Budget :

Pour l'année 2010, le budget total en recettes de l'établissement s'élevait à 7.757,21 keuros.

Ces recettes globales sont composés de 17,6 %, à savoir 1.366,00 keuros en provenance de la dotation fédérale et de 82,4 %, à savoir 6.391,20 keuros pour les projets de recherches en provenance d'initiative ministérielle fédérale, de l'Agence Spatiale Européenne, des contrats Prodex, ...



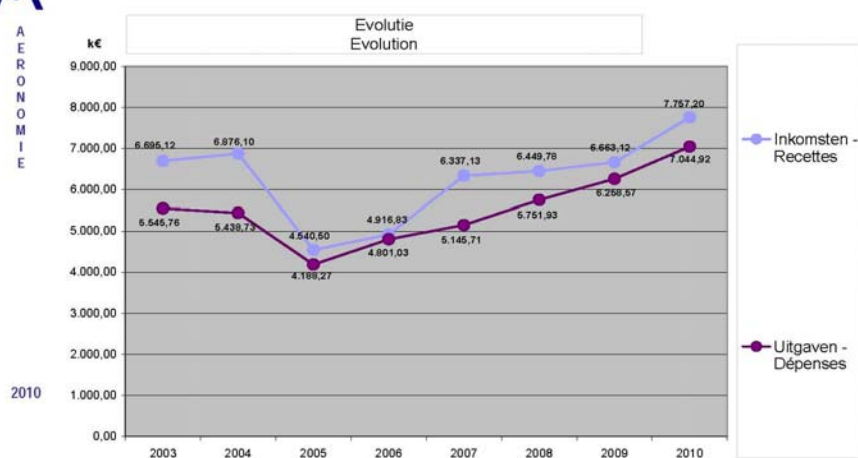
Les dépenses globales de 7.044,95 keuros de l'exercice 2010 se répartissent proportionnellement aux recettes : 18,3 %, à savoir 1.289,17 keuros sont réalisés sur les fonds de la dotation fédérale et 81,7 %, à savoir 5.755,78 keuros pour les projets de recherche.



61,15 % des dépenses servent à payer le personnel engagé par contrat de travail, les frais de fonctionnement s'élèvent à 27,53 % des dépenses et 11,32 % a été consacré aux frais d'investissements.

A  
E  
R  
O  
N  
O  
M  
I  
E

## Algemeen - Général

**3.3.2. Personnel :**

Sur le plan des ressources humaines, les initiatives majeures de 2010 étaient la poursuite de l'élargissement d'un cadre pour l'accompagnement et le suivi du personnel, la préparation d'un nouveau cadre linguistique et l'introduction d'un nouveau statut pécuniaire pour le personnel scientifique contractuel.

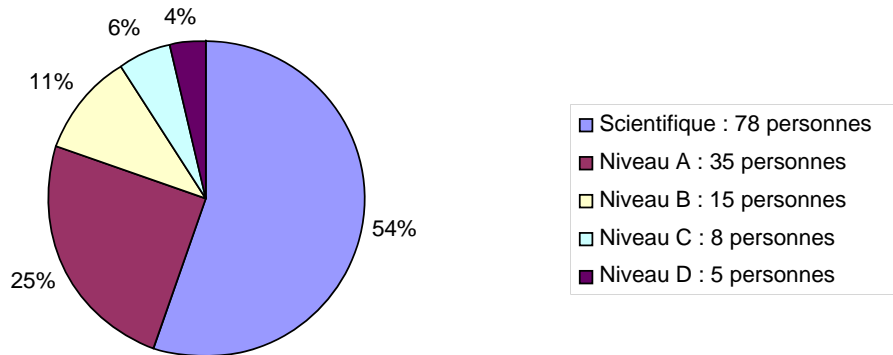
**Quelques indicateurs***Composition du personnel (référence 31/12/2010)*

	Statutaire	Contractuel	Total
<b>Scientifique</b>	23	55	78
<b>Non scientifique</b>	31	32	63
<b>Total</b>	54	87	141

Conformément à la tendance des années précédentes, le cadre du personnel a poursuivi sa légère hausse. À la fin 2010, le nombre d'employés se montait à 141, soit 137,4 ETP.

Cette comparaison entre les unités physiques et les équivalents temps plein met en avant la faible utilisation des possibilités de travail à temps partiel qu'offre l'Institut. L'explication peut résider dans l'âge relativement faible des employés, la qualification élevée des effectifs ainsi que la flexibilité du temps de travail proposée par l'Institut : horaire flottant et possibilités de télétravail structurel et occasionnel.

## Répartition du personnel selon le niveau

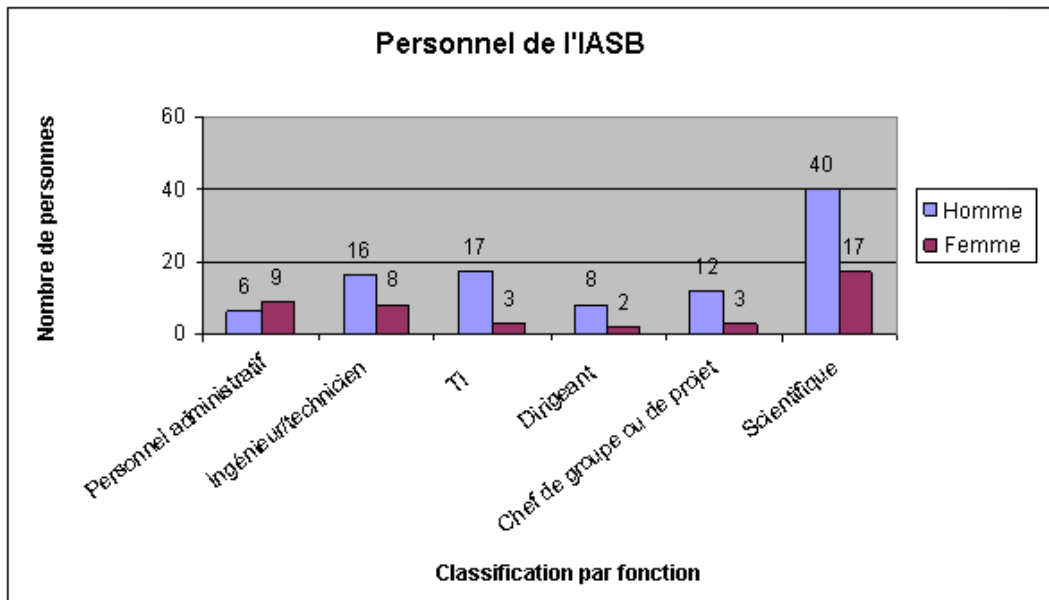


Les effectifs de l'Institut se composent à près de 80 % d'universitaires. Il s'agit du personnel scientifique ainsi que du personnel de niveau A au sein des carrières administrative et technique (voir tableau ci-dessus : répartition du personnel selon le niveau). En outre, 70 % du personnel scientifique est en possession d'un doctorat.

Dans le cadre du projet FED20, 20 indicateurs permettent d'évaluer l'efficacité de la politique P&O. De même, il est désormais possible de s'évaluer par rapport aux objectifs fixés et de se comparer avec les autres administrations de l'autorité fédérale. Sur la base des chiffres de 2010, l'on peut constater que l'Institut obtient des résultats plutôt convaincants en matière d'absentéisme pour cause de maladie (1,96 % du temps de travail total) et de télétravail (34 % des effectifs télétravaillent sur une base régulière).

En revanche, certains points peuvent faire l'objet d'améliorations, comme le taux de réalisation du plan du personnel (notamment concernant des actions statutaires sur l'enveloppe du personnel) et la représentation des femmes dans les cadres intermédiaires et supérieurs (18,5 %). Le retard dans la réalisation des points prévus dans le plan du personnel s'explique en grande partie par l'approbation tardive de ce même plan et par le manque de la base juridique nécessaire à la réalisation de certaines actions (p. ex. dans le cadre de la procédure de promotion du personnel scientifique, la matrice n'a pas encore été publiée ; des fonctions de directeur opérationnel ne seront donc ouvertes qu'après assentiment du nouveau cadre linguistique). Les initiatives nécessaires sont prises en collaboration avec le SPP Politique scientifique afin de pallier ces lacunes le plus rapidement possible.

En matière de diversité, et plus particulièrement de mise au travail de personnes souffrant d'un handicap, l'Institut atteint un taux de 2,48 % fin 2010. Les années précédentes, ce chiffre se situait même au-delà de l'objectif des 3 %.



### Accompagnement et suivi du personnel

À la suite du nouveau statut du personnel scientifique, un cycle d'évaluation a été initié en 2009 au sein de l'Institut. Chaque scientifique contractuel et statutaire a eu un entretien de fonction avec son dirigeant afin de fixer des objectifs de prestation. En 2010, ce premier cycle de un an s'est conclu sur un entretien d'évaluation pour environ 75 % du personnel scientifique. Un deuxième cycle a débuté en 2010. Il a été décidé d'allonger la durée du cycle, qui est maintenant de deux ans.

Parallèlement, on a assisté à l'introduction des cercles de développement pour le personnel administratif et technique. Des sessions d'informations ont expliqué au personnel l'objectif poursuivi en insistant fortement sur la plus-value apportée par ces cercles de développement tant pour l'employé que pour le chef de service : concertation et dialogue réguliers ; accords clairs quant aux attentes mutuelles ; évolution, développement et accompagnement de l'employé dans sa fonction et dans sa carrière,...

Les chefs de service ont suivi une formation afin de les préparer à leur rôle au sein de ce processus. En outre, un atelier a été organisé et une brochure rédigée pour les aider à définir les descriptions de fonction. Le cycle a commencé en 2010 pour environ 50 % du public cible. Ils ont eu un entretien de fonction et un entretien de planification pendant lesquels ils ont abordé les aspects importants de leur fonction et de leur évolution pour les deux années à venir.

### Nouveau cadre linguistique

Beaucoup d'efforts ont été consentis dans la constitution d'un nouveau dossier relatif au cadre linguistique. Tous les six ans, la Commission permanente de contrôle linguistique (C.P.C.L.) doit valider le cadre linguistique des administrations fédérales. À cet effet, l'Institut constitue un dossier qui décrit en détail ses activités et qui définit à la lumière de différents paramètres la part de chaque rôle linguistique (néerlandais et français) au sein des effectifs totaux. La C.P.C.L. évaluera le dossier en 2011.

### 3.4. Communication

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.

Le but visé par la communication est de mettre en avant les recherches et les percées relatives aux domaines d'activités étudiés à l'IASB, mais aussi de nouer ou renforcer les liens de partenariats avec les universités et le monde industriel, et développer de nouvelles thématiques de recherches. Les informations peuvent être proactives, c'est-à-dire données pour informer les publics ou réactives, en réponses à des questions ou à l'actualité.

Chaque action est étudiée au cas par cas mais on peut cependant lister les différents moyens d'actions.

- Présentations des différentes activités de l'IASB : brochures, sites web, expositions organisées par l'IASB, ex. Portes ouvertes ou participation de l'IASB à des expositions extérieures, temporaires ou non.
- Mise en avant d'un événement particulier, en rapport direct ou non avec l'actualité : leaflets, sites web, expositions, communiqués et/ou conférences de presse
- Implication forte dans la communication interne, notamment par le biais de l'intranet pour «faire vivre» l'IASB. La communication interne en tant que levier de la communication externe.
- Participations à divers groupes de communication, à la fois pour faire connaître la position de l'IASB et pour échanger des expériences avec les autres acteurs de la communication, au niveau belge et européen.

Les partenariats avec les lieux d'exposition en Belgique: Nous avons établi de nombreux partenariats avec des lieux d'expositions permanents en Belgique où nous exposons du matériel

En permanence:

Euro Space Center, Redu-Transinne

Earth Explorer, Ostende

Centre de Culture scientifique, Charleroi

L'IASB a aussi besoin d'un espace d'exposition pour se présenter au public. Contrairement aux musées, l'IASB ne dispose pas de lieu d'accueil pour le public, aussi le planétarium de l'Observatoire royal de Belgique en est la vitrine officielle. Accueillant plus de 30.000 visiteurs par an, le Planétarium est le lieu naturel pour promouvoir et valoriser les activités de recherche et les missions de service public menées par les trois Instituts du Pôle Espace.

La Politique Scientifique: Nous dépendons de la Politique scientifique qui nous donne une certaine visibilité lors des expositions qu'ils organisent et via le Science Connection. La cellule communication prend aussi activement part aux actions menées par le département spatial de la politique scientifique fédérale belge.

Les partenariats avec l'ESA: L'ESA a mis sur pied l'ESERO (European Space Education Ressource Office) qui aide les états membres dans les tâches de support à l'éducation.

#### **Un matériel didactique varié**

L'IASB dispose d'outils didactiques variés afin de promouvoir l'aéronomie auprès du grand public. Par exemple, un site web général (<http://www.aeronomie.be>) vise à présenter les activités de notre institution fédérale.

En 2010, l'équipe de communication s'est occupée de l'entretien du site général de l'Institut et d'autres sites spécifiques liés à des projets de recherche. Elle s'est aussi occupée du développement de certains sites particuliers de l'IASB dans le lay-out du site général, par exemple:



- <http://infrared.aeronomie.be>
- <http://planetary.aeronomie.be>
- <http://mars.aeronomie.be>
- <http://engineering.aeronomie.be>
- <http://columbus.busoc.be>
- <http://www.marsdiscovery.be>

Des bornes de **quiz interactifs** sont utilisées dans différents lieux d'exposition en Belgique. Des **posters**, des **brochures** et autres **folders** sont aussi créés sur demande pour mettre en avant des recherches et/ou activités spécifiques.

### Événements et expositions

En 2010, L'IASB a, entre autres, participé au:

- Salon auto-moto au Heysel pour présenter l'expérience Earth Challenge, ULM-DOAS
- Présentation de cette même expérience, ULM-DOAS à l'athénée de Bruxelles
- Exposition à la maison communale d'Evere, avec une présentation de l'IASB, Mars, Vénus et Frank De Winne
- Exposition au Château de Huizingen : l'IASB, Mars, Vénus, Frank De Winne
- Exposition SOLSPEC et renouvellement de l'exposition sur les index UV à l'Euro Space Center de Redu-Transinne
- Participation à l'exposition « portait de chercheurs » au palais royal de Bruxelles
- Participation à l'exposition sur Mars du musée des sciences naturelles (en étroite collaboration avec l'ORB)



## **D'étroites relations avec la presse**

En collaboration avec les scientifiques impliqués, la cellule communication diffuse régulièrement des **communiqués vers la presse belge**. Nos thèmes de recherche et nos activités ont trouvé un large écho auprès de divers médias tels que les chaînes de télévision, la presse écrite et les quotidiens, et enfin divers sites web de référence. Quelques exemples de communiqués de presse diffusés en 2010:

- Les deux ans de l'expérience SOLSPEC
- Eruption du volcan islandais et impact sur l'atmosphère terrestre
- Anniversaire du premier article consacré au trou d'ozone
- Les index UV
- Lancement du microsatellite PICARD
- Sélection de l'expérience SOIR-NOMAD par la NASA
- La journée mondiale de l'ozone

## **Autres publications :**

- Article dans le magazine « science connection » de la politique scientifique belge : Le rayonnement UV
- Publication du rapport annuel de l'IASB

## **La communication scientifique**

Ce sont avant tout les équipes de chercheurs de l'IASB qui réalisent la communication du savoir purement scientifique. Toutefois, pour que ce travail de diffusion et de promotion soit optimal, il faut qu'il résulte d'une excellente synergie avec la cellule de communication.

- Organisation d'un workshop scientifique de 3 jours au centre LAMOT à Malines pour le groupe SPENVIS

## **La communication interne**

La cellule de communication s'occupe également de la communication interne. Elle est sensible à l'équilibre du personnel et soutient activement toute idée d'activité, susceptible de promouvoir la convivialité et l'esprit d'équipe au sein de l'Institution. Le site web interne se développe progressivement, il est un instrument précieux, tant pour la communication d'informations scientifiques qu'administratives.

Les départs en pension sont fêtés dignement, par exemple en retraçant le parcours de la personne au sein de l'institut grâce à un support audiovisuel. De cette façon, les autres collègues ont une vue d'ensemble de la carrière de la personne qui part.