50e ANNIVERSAIRE DE L'INSTITUT D'AÉRONOMIE SPATIALE DE BELGIQUE: LA TÉLÉDÉTECTION SPATIALE DES PROFILS DE CONCENTRATION DES GAZ EN TRACES: CINQUANTE ANNÉES D'EXCELLENCE DE L'INSTITUT D'AÉRONOMIE SPATIALE DE BELGIQUE

Didier Fussen, Filip Vanhellemont, Emmanuel Dekemper, Didier Pieroux, Nina Mateshvili, Cédric Tétard, Ghislain Franssens, Christine Bingen, Charles Robert, Philippe Demoulin, E. Arijs+ and D. Nevejans

Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique
contact: Didier.Fussen@oma.be

Il est évident que la compréhension du système climatique et de la physico-chimie atmosphérique demande des mesures globales et de grande densité temporelle. Cet objectif ne peut être atteint par des réseaux au sol, des ballons, des sondages par fusée ou encore des avions volant à haute altitude. Seule, l'utilisation des satellites d'observation en orbite basse (400-1000 km) permet des couvertures globales des champs de concentration des constituants minoritaires qui déterminent, après interaction avec le rayonnement solaire, la composition chimique de l'atmosphère supérieure ainsi que son bilan radiatif. Depuis sa fondation, l'IASB a été très fortement impliqué dans de nombreuses missions internationales, que ce soit dans le développement et la réalisation d'instrument, dans la participation aux groupes d'experts chargés de conseiller l'ESA dans la gestion d'instruments européens et bien entendu aussi dans le traitement et la validation des données obtenues. Dans cet article, nous mettrons en exergue quelques contributions majeures de l'Institut, passées ou présentes, ainsi que les projets futurs qui nous tiennent à cœur.

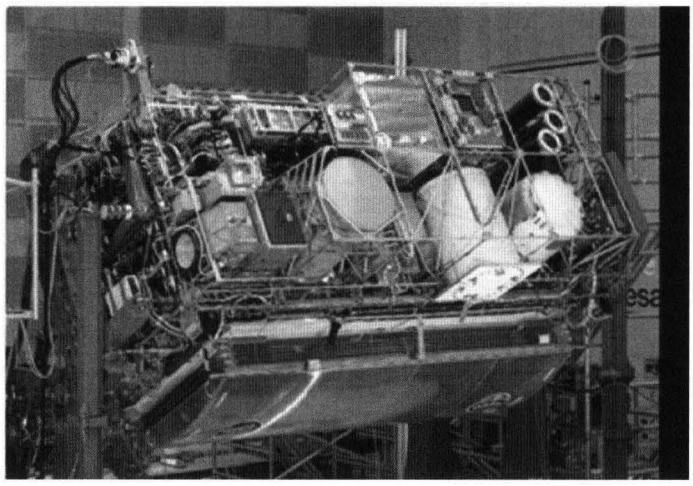


Figure 1 La plateforme EURECA développée par l'ESA sur laquelle est hébergé ORA (situé sous le couvercle rouge à l'avant-plan).

ORA

Le radiomètre en occultation ORA fut développé par l'IASB comme un simple instrument dans l'UV-Visible qui fut lancé en juillert 1992 à bord du satellite européen EURECA pour une mission d'un an. Il était destiné à la mesure des profils verticaux de l'ozone, du dioxyde d'azote, de la vapeur d'eau et du coefficient d'extinction des aérosols stratosphériques.

En utilisant la méthode bien connue de l'occultation solaire au travers de l'atmosphère terrestre, l'expérience ORA a enregistré 7000 levers et couchers de Soleil depuis une orbite circulaire à une altitude de 508 km. Bien que l'inclinaison du plan orbital de 28° ait restreint la couverture en latitude dans une bande entre 40° S et 40° N, l'époque de la mesure s'est avérée particulière-

Table 1: Définition des 8 canaux de ORA

7	259	O_3, air
6	340	Air, aérosols, O_3
8	385	Aérosols, NO_2
2	435	Aérosols, NO_2
1	442	Aérosols, NO_2
5	600	O_3, aérosols
4	943	H_2O, aérosols
3	1013	Aérosols

ment intéressante car elle offrit l'occasion unique d'observer la relaxation des perturbations dues à l'éruption du Pinatubo.

La conception de l'instrument reposait sur 8 canaux à large bande dont les longueurs d'onde nominale sont listées dans la Table 1 vis-à-vis des constituants atmosphériques associés.

Une caractéristique d'ORA était la simplicité de l'optique, avec un champ de vue de 2°, solidaire du pointage solaire du satellite. Sans image du disque Soleil, ceci correspond à une étendue de celui-ci au point tangent de l'ordre de 25 km. Toutefois, le rapport sur bruit très élevé a permis une inversion angulaire du signal et une résolution verticale de 2-3 km.

Entre 1992 et 1993, ORA fut l'un des premiers sondeurs atmosphériques à produire une climatologie des profils de concentration de l'ozone dans la mésosphère. Il fut aussi capable, grâce à l'intensité du signal mesuré, d'observer la couche d'aérosols du Pinatubo à des altitudes beaucoup plus basses que les instruments moins sensibles.

GOMOS à bord d'ENVISAT : 10 ans d'occultations stellaires

GOMOS est un spectromètre à bord du satellite ENVISAT de l'Agence spatiale européenne (voir https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/envisat/instruments/gomos). GOMOS utilise le principe de mesure d'occultation stellaire pour surveiller l'ozone et d'autres gaz en traces dans la stratosphère de la Terre. La couverture spectrale est l'ultraviolet et le visible, de 250 à 675 nm ; il possède aussi deux canaux infrarouges à 756-773 nm et à 926-952 nm. Les deux photomètres travaillent dans les longueurs d'onde bleues (473-527 nm) et rouges (646-698 nm), à une fréquence de 1 kHz. Les molécules mesurées par GOMOS sont O_3, NO_2, NO_3, H_2O, O_2. Les mesures couvrent le domaine d'altitudes de 5 à 150 km. Des données atmosphériques valides sont obtenues de 15 à 100 km pour l'ozone. Les autres constituants ont une couverture verticale plus restreinte.

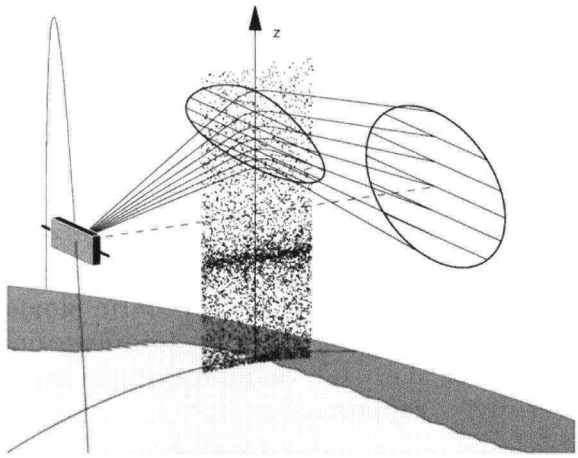


Figure 2 Vue artistique de la géométrie d'occultation solaire en presence de la couche d'aérosols stratosphériques. Noter deux effets réfractifs : le déplacement vertical du point tangent et l'aplatissement asymétrique du disque solaire.

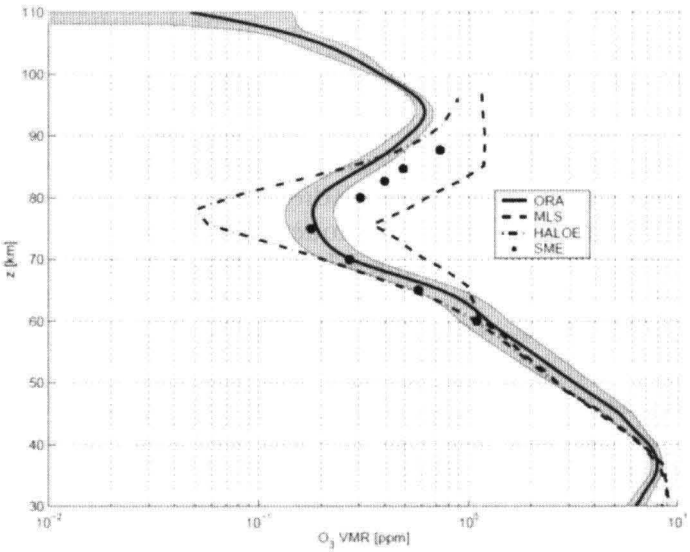


Figure 3 La couche d'ozone mésosphérique telle que mesurée par ORA et son intercomparaison avec des résultats d'autres instruments.

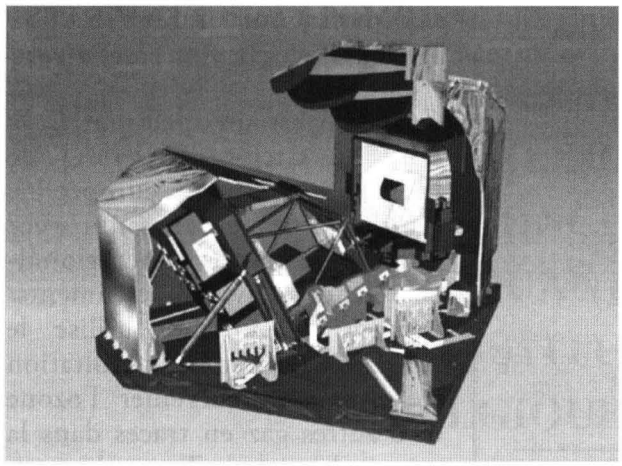


Figure 4 Vue artistique du spectromètre GOMOS

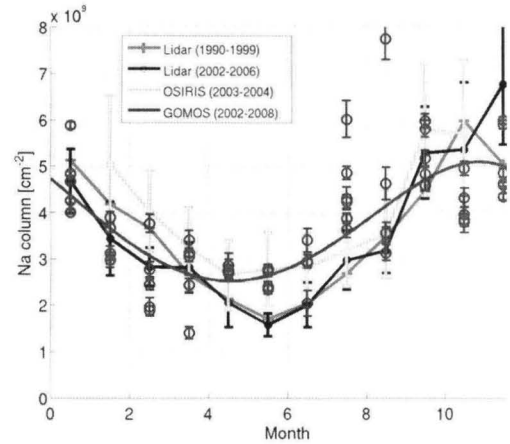


Figure 5 Intercomparaison des mesures du sodium mésosphérique de GOMOS avec des stations sol et avec l'instrument OSIRIS

Selon la période de l'année, il y a entre 150 et 300 étoiles qui sont assez lumineuses pour être suivies par GOMOS et qui sont dans le champ de vision de l'instrument à des moments précis au cours d'une orbite. Puisque les fenêtres réelles des moments d'occultation se chevauchent souvent mutuellement, elles ne peuvent pas toutes être observées. Par conséquent, un certain nombre de séquences d'occultation alternatives peuvent être planifiées. Chaque séquence présente des caractéristiques différentes, par exemple, en ce qui concerne la mesure de l'ozone.

L'IASB a été sélectionné par l'ESA comme l'un des trois laboratoires d'experts de soutien pour la mission GOMOS, en collaboration avec le LATMOS (France) et le FMI (Finlande). Cela implique une connaissance approfondie de l'instrument, de la méthode d'observation et du complexe algorithme d'inversion. La proposition GOMOS a débuté en 1988 et ENVISAT a été lancé en 2002. Bien que le satellite ait cessé de fonctionner au printemps 2012, le traitement des données s'améliore encore et il faudra plusieurs années pour une analyse complète. En particulier, l'IASB a obtenu des résultats spectaculaires avec les mesures des aérosols stratosphériques, de la couche de sodium mésosphérique et de la climatologie d'OClO dans la haute stratosphère.

Le produit opérationnel actuel de GOMOS pour les aérosols et les nuages se compose de profils d'extinction optique à 500 nm et également de coefficients spectraux supplémentaires pour évaluer l'extinction à d'autres longueurs d'onde. La qualité du produit n'est pas encore optimale, en raison d'une mise en œuvre inadéquate de la loi spectrale, combinée avec un lissage en altitude trop important. En outre, les profils dérivés de mesures de diffusion au limbe ne sont actuellement pas utilisables. Néanmoins, si nous nous limitons aux profils d'extinction à 500 nm dérivés à partir des mesures du limbe nocturne, alors la qualité peut être considérée comme bonne, bien que la structure fine ait été lissée. Une comparaison avec SAGE II, SAGE III et POAMIII a montré un bon accord, endéans 20% dans la haute troposphère / basse stratosphère, entre 10 km et environ 25 km.

Grâce à des techniques statistiques particulières, notre équipe a été capable de détecter et de mesurer les profils de concentration de la couche de sodium mésosphérique, dont la première climatologie globale a été publiée en 2012. Le principal résultat de cette climatologie est la découverte d'une double structure dans la distribution temporelle et latitudinale du sodium mésosphérique, soit une oscillation équatoriale semi-annuelle qui se fond en une oscillation polaire annuelle.

Ceci n'avait jamais été relaté jusqu'à présent dans la littérature, et cette structure se révèle être assez similaire à la distribution de l'ozone mesurée par GOMOS. Nous avons également montré la subsidence importante observée au cours de l'hiver polaire, ce qui démontre la thèse généralement admise d'une circulation mésosphérique générale gouvernée par la rupture saisonnière des ondes de gravité.

Grâce à l'utilisation de la même technique de virtualisation du signal, nous avons également été en mesure de découvrir la présence d'une couche équatoriale d'OClO, ce qui n'avait jamais été rapporté

Jusqu'à présent, notre équipe a été impliquée dans 31 publications sur GOMOS dans des revues internationales à comité de lecture, récompensant ainsi plus de 15 ans d'efforts.

Il est dommage que la fin d'ENVISAT ait provoqué une rupture dans la continuité des mesures de profils atmosphériques à résolution verticale élevée. Cela fut l'une des motivations qui nous a poussés à proposer la mission ALTIUS pour compenser ce manque...

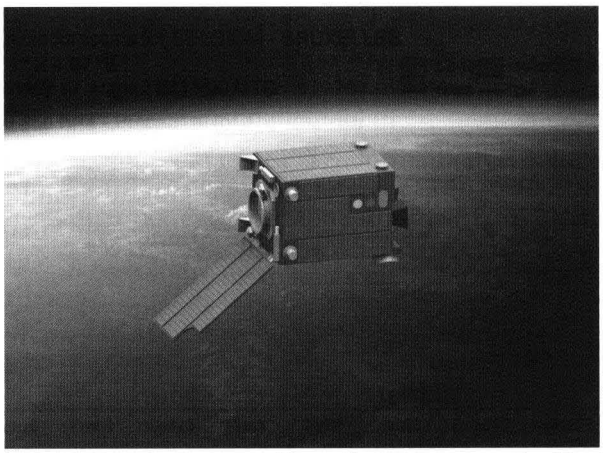


Figure 7 ALTIUS, un micro-satellite d'observation du limbe

La mission ALTIUS : le premier satellite belge sondeur de l'atmosphère terrestre

Il est maintenant admis que la diminution, globale et polaire, de la couche d'ozone peut être attribuée à la présence de composés halogénés libérés par les émissions anthropiques. Grâce au Protocole de Montréal, une diminution du contenu stratosphérique en composés halogénés est observée, de même qu'un ralentissement du taux de décroissance de l'ozone, ce qui devrait être le précurseur naturel d'un rétablissement complet de l'ozone vers la moitié de ce siècle. Actuellement, des preuves expérimentales montrent que la moyenne globale de la colonne totale d'ozone ne baisse plus par rapport à la période 1998-2001. En outre, la distribution d'ozone stratosphérique a été relativement constante au cours de la dernière décennie, bien qu'à la fois des processus dynamiques et chimiques peuvent contribuer à des changements décennaux dans la basse stratosphère. D'autre part, la diminution de la colonne d'ozone pendant l'hiver arctique 2010-2011 a été parmi les plus importantes jamais observées, alors que l'appauvrissement de l'ozone en Antarctique s'est probablement stabilisé au cours de la dernière décennie.

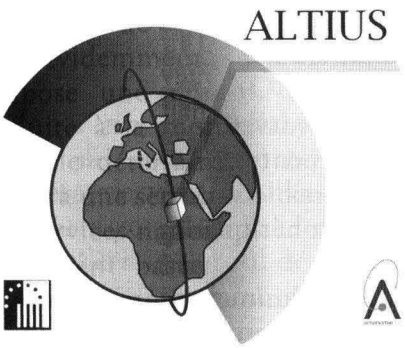


Figure 6 : Le logo d'ALTIUS

De toute évidence, la surveillance de l'ozone stratosphérique est d'une importance cruciale pour évaluer les étapes d'un processus démontré de rétablissement.

Parmi les gaz en traces, le méthane est très important à cause de son impact sur le climat, à travers son grand effet de forçage radiatif et sa production de vapeur d'eau stratosphérique. Sa hausse globale, depuis environ 0,7 ppm en 1800 jusque 1,8 ppm aujourd'hui, est difficile à interpréter en raison de la diversité de ses sources : les zones humides, la fermentation entérique, les incendies et la culture du riz.

De même, la famille NO_x est connue pour jouer un rôle essentiel de catalyseur dans la destruction de l'ozone, avec un cycle diurne marqué, qui nécessite des mesures diurnes et nocturnes pour le caractériser complètement. D'autre part, les espèces de cette famille peuvent être converties en formes inactives ou réservoirs. En particulier, le NO_2 réagit avec ClO pour former $ClONO_2$ et la mesure de OClO (qui dépendant de la présence de ClO et de BrO) et de BrO (pendant le jour) dans l'UV est très importante si on peut la mettre en anti-corrélation avec des observations simultanées de NO_2.

Il est hautement souhaitable de combiner les avantages des techniques des observations au nadir et au limbe. L'idéal serait un instrument avec un échantillonnage vertical similaire à celui d'un instrument en occultation, mais avec une couverture similaire à celle d'un instrument mesurant par rétrodiffusion. C'est le cadre de la mission ALTIUS tel que proposé par l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) : un instrument spatial belge pour la télédétection de l'ozone et d'autres gaz en traces importants. ALTIUS fera usage de la technique de diffusion au limbe, mais sa capacité d'imagerie permettra de résoudre les problèmes de détermination de l'altitude de mesure, de l'identification des nuages et des gradients horizontaux des espèces mesurées.

L'acronyme ALTIUS signifie «*Atmospheric Limb Tracker for the Investigation of the Upcoming Stratosphere*» c'est-à-dire « traqueur atmosphérique au limbe pour l'étude de la stratosphère future ». La mission ALTIUS sera consacrée à la mesure de la

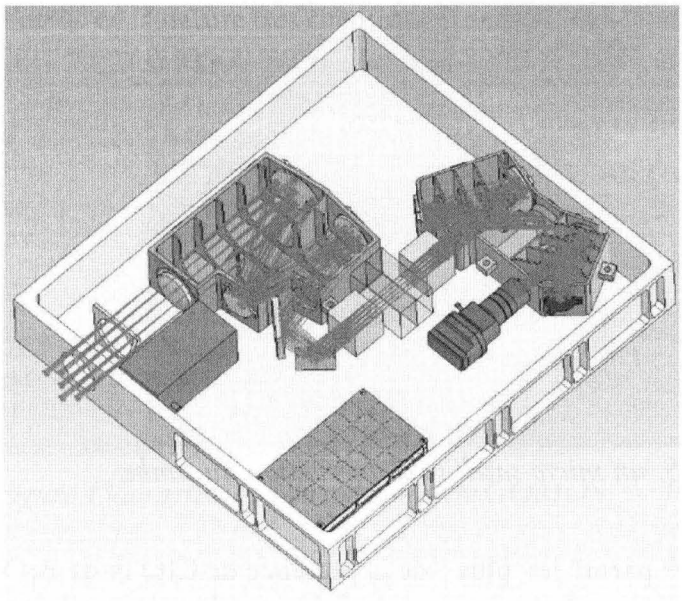


Figure 8 : Concept optique du canal visible

distribution verticale dans l'atmosphère de gaz en traces clefs. L'objectif principal est l'ozone, mais les objectifs secondaires sont le NO_2, le méthane, la vapeur d'eau, les aérosols, BrO, etc... La gamme d'altitudes étudiées sera principalement depuis le haut des nuages jusque 100 km d'altitude, c'est-à-dire depuis la troposphère jusqu'à la basse mésosphère. Le satellite sera placé sur une orbite polaire héliosynchrone à 650 km au-dessus du sol, assurant un angle constant Soleil-Terre-satellite, correspondant à 10h30 heure locale. Une orbite durera 100 minutes et une couverture globale de la Terre sera atteinte au bout de trois jours. La durée de vie de la mission sera d'au moins trois ans, avec pour cible cinq ans.

Le concept le plus novateur d'ALTIUS est sa capacité à effectuer des observations multi-modes : diffusion au limbe, occultations solaires et stellaires, etc...

ALTIUS sera embarqué sur une plate-forme PROBA (Project for On Board Autonomy), une classe de micro-satellites développés pour l'ESA par QinetiQ Space à Anvers (Belgique), qui a démontré ses capacités avec déjà deux missions réussies (PROBA-1 en 2001 et PROBA-2 en 2009). Ce micro-satellite (environ 1 m^3 et 150 kg) présente d'excellentes performances en termes de stabilité de pointage (10 secondes d'arc pendant 10 sec. grâce à ses roues de réaction miniatures), de connaissance d'attitude (1 seconde d'arc à l'aide de deux traqueurs stellaires), d'agilité (rotation de 1 ° / sec. / axe) et de puissance de calcul.

Le concept instrumental d'ALTIUS a été motivé par les besoins de la mission et les contraintes d'hébergement de la plate-forme. L'instrument se compose de trois canaux indépendants, chacun d'entre eux fonctionnant dans un intervalle spectral spécifique : 250 à 450 nm (UV), 450 à 900 nm (visible) et 900 à 1800 nm (proche infrarouge). Chaque canal comporte un ensemble de miroirs chargés de diriger la lumière entrant dans un AOTF (*Acousto optic Tunable Filter*) et d'ensuite relayer le contenu spectral sélectionné vers le détecteur (voir figure). Les trois canaux sont presque identiques, avec seulement des différences mineures. Dans le domaine UV, la brillance des étoiles est si faible qu'un télescope avec une ouverture dédiée a dû être prévu près du trou d'entrée en mode diffusion au limbe, tandis que dans les deux autres canaux, les trois géométries d'observation utilisent le même trou d'entrée. Dans le proche infrarouge, le détecteur sera refroidi par un refroidisseur Stirling rotatif, pour réduire le bruit thermique. La conception optique et la plupart des études techniques ont été réalisées par la firme OIP à Audenarde.

En résumé, ALTIUS est un spectromètre sondeur au limbe, doté d'une résolution verticale de 1 km. Il se compose d'une ou plusieurs caméras spectrales (optique + AOTF + imageur 2-D), dans le domaine spectral UV – visible – IR proche. L'instrument, à bord d'un micro-satellite héliosynchrone, peut être utilisé dans différents modes d'observation (limbe, occultation solaire, occultation stellaire) et/ou dans des scénarios imaginés par l'utilisateur scientifique. Il est optimisé pour le traitement du signal à bord du satellite (y compris la compression d'image). Les principales cibles géophysiques sont des profils stratosphériques / mésosphériques de l'ozone et de quelques gaz en traces mineurs (NO_2, H_2O, BrO, aérosols...). L'extraction de ces données nécessite un algorithme d'inversion considérable et une puissance de calcul associée.

Pourquoi ALTIUS ?

ALTIUS sera la première mission atmosphérique belge pour le sondage de la haute atmosphère. Étant une mission entièrement intégrée, elle représente un défi passionnant pour l'IASB. Ci-après, nous résumons les principaux objectifs de la mission.

1. La surveillance des changements globaux est impossible sans mesures stratosphériques.

2. La diminution dramatique des instruments disponibles (et, en particulier,

européens) capables de sonder l'atmosphère verticalement à distance.

3. De nouvelles et prometteuses technologies apparaissent.

4. Il existe de nombreuses communautés potentiellement intéressées à utiliser ces données et à promouvoir les concepts d'ALTIUS d'un niveau scientifique à une capacité opérationnelle.

La mission PICASSO : vers des mesures géophysiques à partir de capteurs spatiaux miniaturisés

QB50 : une occasion unique

L'objectif du projet QB50 est de déployer 50 CubeSat, construits par des équipes universitaires et des instituts de recherche en provenance du monde entier, destinés à explorer la basse thermosphère et à étudier les processus de rentrée atmosphérique. Un lancement précurseur est prévu en 2015, à partir d'un lanceur brésilien.

Le projet QB50 est conduit par un consortium international sous la direction de l'Institut von Karman. Il a obtenu le soutien financier du programme FP7 de la Commission européenne.

PICASSO est un projet conjoint mené par l'Institut Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) en collaboration avec l'Observatoire Royal de Belgique (ORB). Un CubeSat triple, sera élaboré pour lancer deux expériences scientifiques, consacrées à l'étude de la répartition de l'ozone dans la stratosphère, du profil de température jusqu'à la mésosphère, de la densité électronique et de la température dans l'ionosphère.

PICASSO utilisera un instrument avec sonde de Langmuir à balayage (SLP, *Sweeping Langmuir Probe*) pour mesurer la densité électronique et la température dans la haute atmosphère, avec un intérêt particulier pour les régions polaires. En ce qui concerne les intérêts scientifiques, l'IASB prévoit d'effectuer des observations au sol coordonnées avec l'expérience européenne de radar à diffusion incohérente (EISCAT, *European Incoherent Scatter*), située à Tromsø (Norvège), car cela pourrait fortement améliorer la production scientifique de la mission.

PICASSO

Dans un but d'illustration, les dessins présentés ici montrent une des configurations possibles pour PICASSO. Il se compose d'une unité triple équipée de quatre panneaux solaires déployables, toujours tournés vers le Soleil.

Des panneaux solaires supplémentaires, montés sur le corps du CubeSat, assurent l'alimentation du satellite, en cas d'orientation non nominale. La charge utile est située dans le cube faisant face au Soleil.

L'ouverture d'entrée d'un imageur spectral baptisé VISION est clairement visible sur la face éclairée par le Soleil. Une sonde de Langmuir se trouve à l'extrémité de chaque panneau solaire (ils sont à peine visibles sur la figure).

En résumé, pour atteindre son objectif, c'est-à-dire être un démonstrateur de l'utilisation de pico-satellites pour des applications scientifiques, PICASSO embarquera deux expériences :

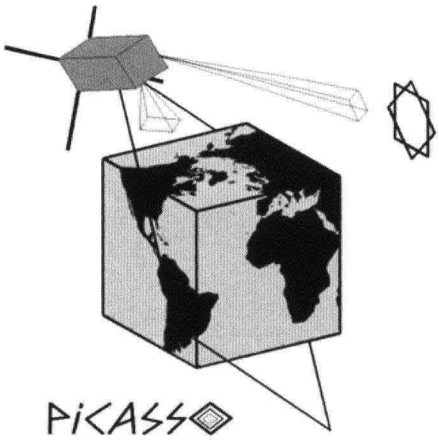


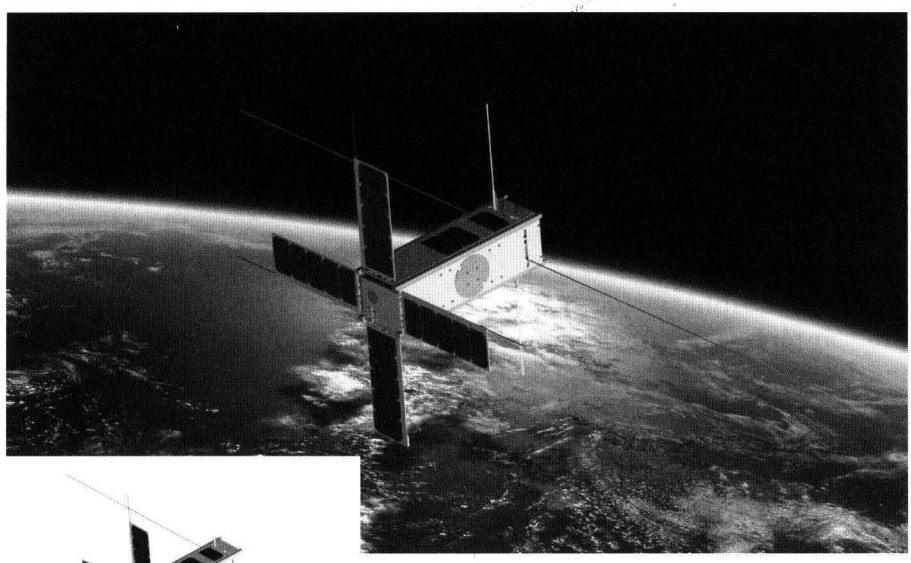
Figure 9 : PICASSO, un pico-satellite au standard CubeSat

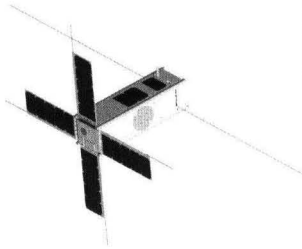
1. **VISION**, un imageur hyper-spectral pour le visible et le proche infrarouge;

2. **SLP**, une sonde de Langmuir à balayage.

L'imageur spectral en lumière visible pour occultation et émission du ciel nocturne (**VISION**, *Visible Spectral Imager for Occultation and Nightglow*) est un imageur spectral ajustable, étudiant le visible et le proche infrarouge. Il vise principalement l'observation du limbe atmosphérique de la Terre pendant l'occultation du Soleil suite au mouvement du satellite sur son orbite. En évaluant l'absorption du rayonnement dans la bande spectrale de Chappuis pour différentes altitudes tangentes, le profil vertical de la concentration d'ozone peut être calculé.

Un objectif secondaire est de mesurer la déformation du disque solaire, de sorte que les profils de température dans la stratosphère et la mésosphère puissent être déduits par inversion du problème des trajets optiques réfractés. Dans l'atmosphère, la lumière solaire est réfractée et s'infléchit





PICASSO, le premier pico-satellite belge d'observation de la haute atmosphère

vers la Terre. Du point de vue de l'imageur, la réfraction conduit à deux phénomènes. Tout d'abord la position apparente du Soleil s'écarte de la Terre, comme si la Terre le repoussait. D'autre part, comme illustré sur la figure, la forme apparente du disque solaire se contracte le long de la dimension verticale (par rapport à l'horizon). Cette déformation provient du fait que les rayons émanant de la partie inférieure de l'image du Soleil se propagent dans les couches atmosphériques plus denses que celles émanant d'en haut. En résolvant le problème inverse des trajets optiques de la propagation des photons dans l'atmosphère, les profils de température de la mésosphère et la stratosphère peuvent être déduits.

Enfin, des observations spectrales complètes occasionnelles d'aurores polaires sont également prévues.

Remerciements :
Les recherches pour le traitement des données GOMOS ont été financées par l'Office belge de la Politique scientifique (BELSPO) grâce aux programmes SECPEA et RADIAL de financement PRODEX.

ALTIUS a été proposé par l'IASB en 2006 à, et est soutenu par, l'Office belge de la Politique scientifique (BELSPO) en vertu des programmes de financement de l'ESA PRODEX et GSTP.

PICASSO est partiellement financé par un subside de la Loterie Nationale.

Selected bibliography

ORA

"The ORA occultation radiometer on EURECA. Instrument description and preliminary results", E. Arijs, D. Nevejans, D. Fussen, P. Frederick, E. Van Ransbeek, F.Taylor, S.Calcutt, S. Werret, F. Heppelwhite, T. Pritchard, I. Burchell and C. Rodgers, *Adv. Space Res., 16,n° 8,pp 833-836, [1995]*

"Ozone profiles from 30 to 110 km measured by the Occultation Radiometer instrument during the period Aug 1992-Apr 1993", D. Fussen, F. Vanhellemont, C. Bingen and S. Chabrillat, *Geophysical Research Letters, 27, pp 3449-3452, [2000]*

"Remote sensing of the Earth's atmosphere by the spaceborne occultation radiometer ORA: final inversion algorithm", D. Fussen, F. Vanhellemont and C. Bingen, *Applied Optics, 40, pp 941-948, [2001]*

"Evolution of stratospheric aerosols in the post-Pinatubo period measured by solar occultation", D. Fussen, F. Vanhellemont and C. Bingen, *Atmospheric Environment, 35, pp 5067- 5078, [2001]*

GOMOS

" A global climatology of the mesospheric sodium layer from GOMOS data during the 2002–2008 period" D. Fussen et al., *Atmos. Chem. Phys., 10, 9225-9236, [2010], doi:10.5194/acp-10-9225-2010*

"A global OClO stratospheric layer discovered in GOMOS stellar occultation measurements", D. Fussen et al., *Geophys. Res. Lett., 33, L13815, doi:10.1029/2006GL026406, [2006]*

"Optical extinction by upper tropospheric/stratospheric aerosols and clouds: GOMOS observations for the period 2002–2008" F. Vanhellemont et al., *Atmos. Chem. Phys. Discuss., 10, 11109-11138, 2010*