

# Traquer les étoiles pour

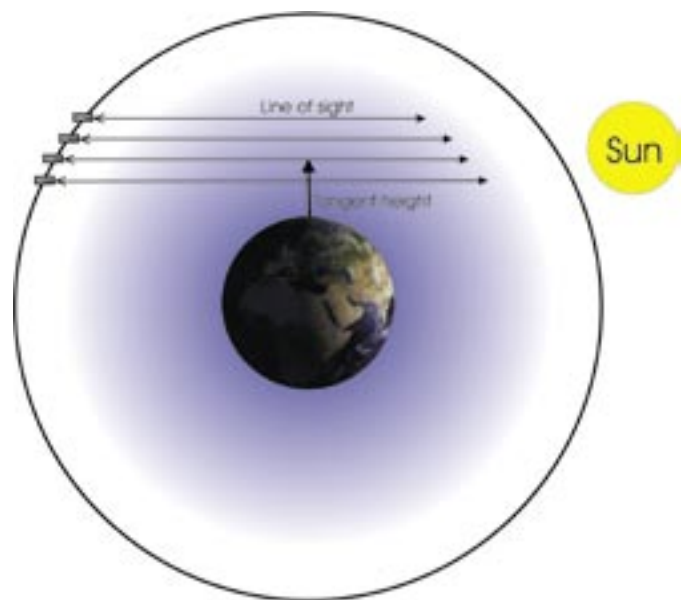
**N**ous avons tous une idée intuitive de ce qu'est notre atmosphère. Une mince pellicule gazeuse et ténue, dont la densité décroît avec l'altitude d'un facteur 5 tous les 10 Km. Ce fluide que nous respirons est très largement constitué d'azote et d'oxygène. S'y ajoute une famille de gaz en trace qui, bien que présents en quantités infinitésimales, peuvent interagir fortement avec le rayonnement solaire. L'ozone stratosphérique (15-45 Km d'altitude) en est le représentant le plus célèbre et son action de filtrage dans l'ultraviolet est indispensable pour la préservation de l'intégrité du patrimoine génétique des êtres vivants. Une question bien naturelle vient à l'esprit : comment mesurer ces gaz en trace ? Si on souhaite obtenir assez rapidement une telle mesure sur une échelle mondiale, il faudra la réaliser depuis l'espace. Parmi différentes techniques d'observation disponibles, celle du télé-sondage par occultation d'un astre est sans doute la plus élégante.

Il ne faut pas s'effrayer de ce concept car il est vraiment simple ! Et tout un chacun peut en saisir le principe rapidement. A midi, impossible de regarder le soleil à l'œil nu. Or, quelques heures plus tard, nous pouvons admirer un coucher de soleil rougeoyant... Ceci nous mène à deux conclusions directes :

- L'intensité apparente est plus faible en soirée et on peut le comprendre en imaginant que la lumière est plus atténuée qu'à midi puisqu'elle a parcouru un plus long chemin en oblique au travers des couches de l'atmosphère. Donc, la mesure de la variation de l'intensité lorsque le soleil se couche nous fournit déjà une information sur la colonne de gaz absorbateur et son augmentation apparente quand l'astre s'approche de l'horizon.
- Une deuxième observation s'impose : le soleil couchant est rouge et non plus jaune comme lors de son passage au méridien ! Cela est dû au fait que la diffusion de la lumière par de petites particules (ici en l'occurrence, les molécules d'air) est plus efficace dans la partie bleue que dans la partie rouge du spectre solaire. Résultat : la colonne de gaz supprime progressivement les composantes bleue, verte, jaune du rayonnement incident et seule la composante rougeâtre du spectre solaire parvient à notre œil. Ainsi la simple observation du déclin de l'astre nous renseigne déjà sur la nature et l'épaisseur de l'atmosphère !

Par ailleurs, l'efficacité de la suppression de la lumière selon la variation de la longueur d'onde (couleur) du rayon-

nement n'est pas toujours progressive. Certaines molécules absorbent le rayonnement dans une région étroite autour d'une longueur d'onde : on parle alors d'une raie d'absorption et son importance caractérisera la quantité de gaz présente entre notre œil et les confins de l'atmosphère. Le produit de cette quantité de gaz par son efficacité à absorber la lumière (mesurée en laboratoire) constitue l'épaisseur optique à la longueur d'onde considérée.



*Durant l'occultation, plusieurs mesures sont prises à différentes hauteurs tangentielles et permettent de retrouver la composition atmosphérique selon la verticale.*

Nous voici prêts pour appliquer la méthode depuis l'espace. Il suffit d'observer le Soleil en orbite à l'aide d'un spectromètre, instrument capable de mesurer l'intensité lumineuse à différentes longueurs d'onde utiles. Au fur et à mesure que l'instrument s'approche de l'éclipse, partie du globe où il fait nuit, sa ligne de visée qui définit la hauteur tangente rase de plus en plus près la surface terrestre : on observe en quelque sorte un coucher de soleil orbital également appelé occultation. D'un point de vue technique la méthode possède un avantage inestimable. En effet les instruments sont soumis à rude épreuve dans l'environnement spatial : les détecteurs vieillissent, l'optique s'opacifie, le bruit de fond devient capricieux... Et il est très difficile de réaliser une comparaison par rapport à une source lumineuse d'intensité connue. Heureusement, la méthode en occultation est auto-calibrante. Il suffit d'observer le Soleil hors atmosphère et d'y référer les mesures suivantes lorsque la hauteur tangente décroît : le rapport de ces intensités constitue la transmittance atmosphérique et donne un

# en créer de nouvelles !

accès direct à l'épaisseur optique recherchée. Evidemment, si on n'effectue qu'une seule mesure à une altitude tangente particulière, seule l'épaisseur optique obtenue le long de ce trajet optique est connue. Il suffit de répéter la mesure à maintes reprises lors de l'occultation pour obtenir les épaisseurs optiques à d'autres hauteurs tangentes. Celles-ci correspondent à des trajets optiques différents mais qui coupent les mêmes couches atmosphériques sous des angles variables. Un peu de traitement numérique des mesures permet de retrouver, par un processus mathématique appelé inversion, la quantité de gaz associée à chaque couche.

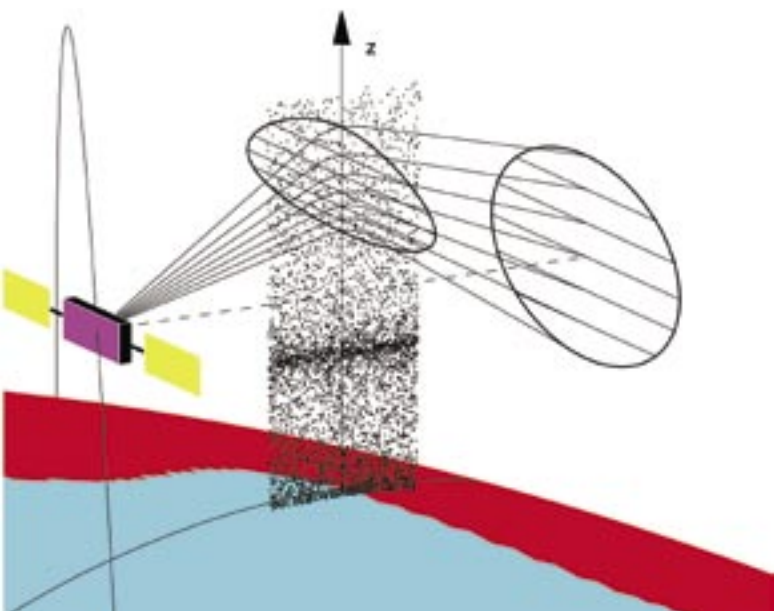
En 1992, l'Institut d'aéronomie spatiale de Belgique (IASB) a embarqué sur le satellite européen EURECA le spectromètre ORA qui a mesuré plus de 6.000 occultations solaires pendant neuf mois. Quoique le processus

tels que l'ozone, le dioxyde d'azote, la vapeur d'eau ... L'IASB est reconnu pour son expertise en ce domaine et à ce titre, il est membre du *Solar Occultation Science Team* de la NASA.

Cependant la technique de l'occultation solaire a aussi ses limites ! En effet, à 800 Km d'altitude, la période de l'orbite est d'environ 100 minutes et ne permet donc qu'une trentaine d'occultations (levers et couchers) journalières. Et comme d'une révolution à l'autre, le Soleil a peu bougé, la latitude du point tangent reste presque constante tandis que sa longitude s'est déplacée d'environ 25 degrés. Selon l'inclinaison du plan orbital, il faut au moins deux mois pour assurer une couverture plus ou moins globale de la Terre, une fenêtre de temps peu compatible avec la résolution temporelle des modèles de transport chimique.

Que faire pour améliorer la fréquence d'échantillonnage de l'atmosphère terrestre ? On pourrait espérer un gain mineur en observant la Lune et les planètes. Mais à l'évidence, les étoiles et leur ubiquité céleste se révèlent les meilleures candidates. A tout moment de l'orbite, il y a des dizaines d'étoiles brillantes à observer : c'est la technique de l'occultation stellaire !

En 1988, l'Agence spatiale européenne (ESA) lança un appel à propositions pour développer un spectromètre à placer sur le satellite géant ENVISAT, la plus lourde plate-forme scientifique jamais lancée par elle. En compagnie de ses partenaires français du Service d'aéronomie du CNRS (Centre national de la recherche scientifique) et finlandais du *Finnish Meteorological Institute*, l'IASB se lança dans le projet ambitieux d'un spectromètre stellaire susceptible de mesurer l'évolution temporelle de la couche d'ozone à l'échelle mondiale. En anglais, le projet fut baptisé « *Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars* » : GOMOS était né !



*L'expérience ORA observait la totalité du disque solaire, déplacé et comprimé par la réfraction atmosphérique.*

d'inversion fût compliqué par le mélange de différentes hauteurs tangentes dans l'observation de tout le disque solaire, ORA s'avéra un réel succès couronné par de nombreuses publications scientifiques : il rendit possible la mesure unique des aérosols volcaniques dus à l'éruption du Pinatubo ainsi que la première climatologie du second maximum d'ozone dans la mésosphère à environ 90 Km d'altitude.

Au niveau international, une dizaine d'instruments fonctionnant en occultation solaire ont permis semblablement de suivre l'évolution d'importants gaz en trace



*L'instrument GOMOS et son miroir principal d'entrée.*

*Le doublet du sodium mésosphérique mesuré pour la première fois en occultation. Notez la petitesse de l'épaisseur optique (0.003).*

Suivirent de très longues années de préparation et de réflexion sur les meilleures algorithmes d'inversion capables d'extraire l'information géophysique de l'occultation d'étoiles omniprésentes, à la parfaite résolution verticale le long de la ligne de visée mais aussi bien moins brillantes et difficiles à détecter.

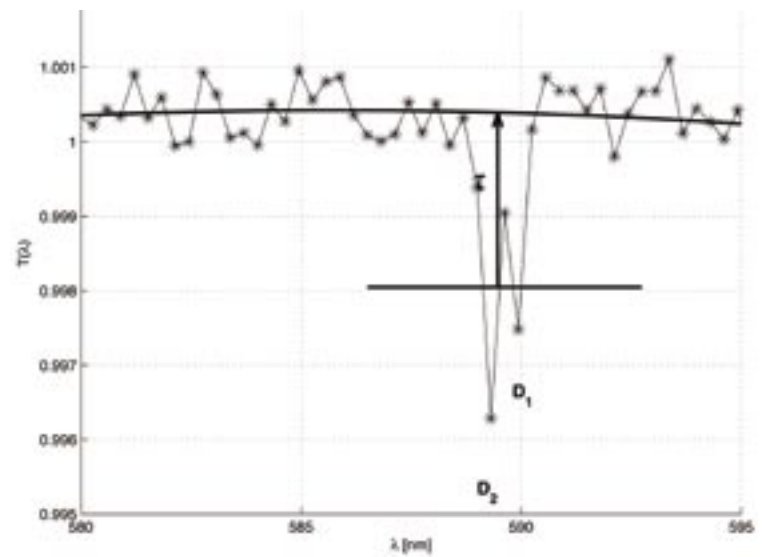
Il fallut aussi s'armer de patience devant le retard encouru par le lancement d'ENVISAT et de son lanceur ARIANE 5. Enfin, le 1<sup>er</sup> mars 2002, 14 ans après le démarrage du projet, GOMOS se retrouva prêt à fonctionner tandis qu'une tâche colossale l'attendait : environ un million d'occultations stellaires à mesurer durant les quatre années prévues de son espérance de vie.

Il y eut les avatars fréquents des expériences spatiales : des détecteurs moins sensibles qu'escomptés, l'usure prématurée du mécanisme de pointage nécessitant la commutation périlleuse vers le dispositif de secours... et d'autres incidents. Récemment encore, on crut GOMOS défunt au mois de janvier 2005, incapable de se tourner vers les étoiles choisies. L'acharnement des ingénieurs eut le dessus : au mois d'août, une correction logicielle ressuscita l'instrument !

Depuis quatre ans, notre équipe est engagée dans un travail considérable : analyser, valider, améliorer et interpréter toutes ces mesures en collaboration avec nos partenaires de Paris et d'Helsinki. Déjà de nombreuses publications dans les meilleures revues internationales ont vu le jour : elles concernent l'ozone bien sûr mais aussi les di- et tri- oxydes d'azote, les aérosols stratosphériques, les nuages polaires responsable du trou d'ozone et d'autres encore que nous ne pouvons énumérer ici.

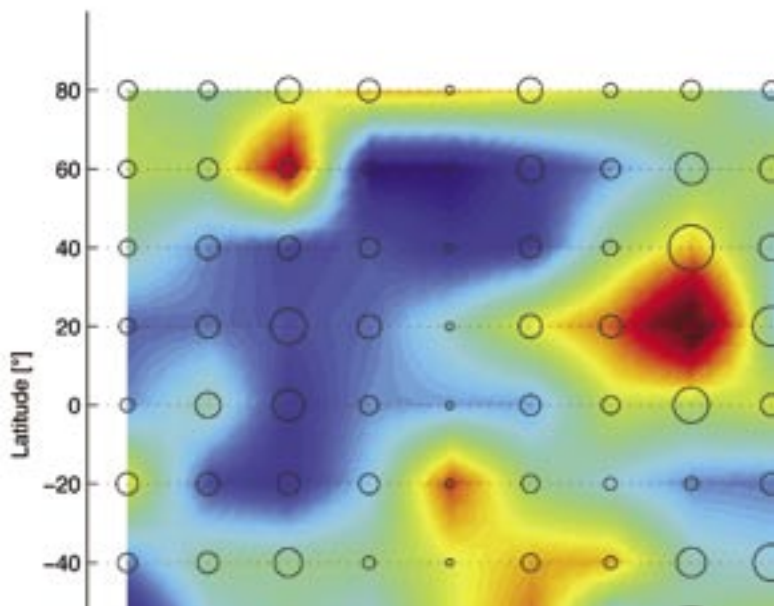
Si une expérience de l'envergure de GOMOS (200.000.000 d'euros !) ne s'improvise pas, il faut savoir qu'une partie de la recherche scientifique est par essence imprévue. En voici un bel exemple avec notre instrument ...

Il est du sens commun que les étoiles scintillent lorsque nous les observons depuis le sol. Cette scintillation est en fait un micro-déplacement rapide des rayons stellaires, aléatoirement distribué autour d'une position moyenne. C'est la turbulence atmosphérique qui est responsable de ce phénomène à l'instar de l'image trouble que l'on observe au-dessus d'une flamme. GOMOS possède un photomètre rapide pour suivre ces variations apparentes de l'intensité de l'étoile afin d'en corriger l'effet sur la transmittance mesurée. Cette correction est, dans certaines géométries d'observation, imparfaite. Notre groupe eut l'idée simple d'ajouter un grand nombre de spectres mesurés à l'intérieur de fenêtres de temps et de latitude : le bénéfice recherché était l'augmentation du signal par rapport au bruit et la disparition de la scintillation résiduelle, phénomène stochasti-



que de moyenne nulle. Surprise: deux infimes raies d'absorption étaient tout à fait visibles vers 590 nanomètres dans une couche atmosphérique de la mésosphère (environ 85 Km d'altitude). L'identification fut cependant aisée : il s'agissait d'une absorption par des atomes de sodium, à une longueur d'onde parfaitement identique à celle qui caractérise le rayonnement orange issu des lampes au sodium le long de nos autoroutes...

Qu'est-ce que cette couche de sodium mésosphérique ? La preuve éclatante que notre Terre est bombardée quotidiennement par des dizaines de tonnes de météorites, riches en ce métal, et qui finissent vaporisées en étoiles filantes. Cette strate atmosphérique assez lointaine semblerait n'être qu'une curiosité réservée à un cercle restreint de chercheurs en géochimie du système solaire. Ce sont nos collègues astronomes qui ont donné une valeur inattendue à la couche de sodium, au départ de leur difficulté à résoudre la séparation angulaire entre de très lointains et pâles objets de l'univers. La turbulence atmosphérique est un problème majeur pour les grands télescopes terrestres : l'augmentation du diamètre du télescope n'y fait rien, le front d'onde du rayonnement incident arrive tout bosselé alors qu'il devrait être plan. Cependant, on peut analyser à grande vitesse ce front d'onde dans le télescope et corriger efficacement l'effet de scintillation par l'entremise d'une informatique puissante et du pilotage de déformations instantanées d'un miroir : c'est l'optique adaptative. Mais évidemment, les objets lointains ne nous envoient pas assez de photons pour réaliser cette correction. Il faut donc une étoile brillante de référence à côté de l'objet à observer. On analysera la scintillation de celle-là et on appliquera la même correction à l'objet lointain. Malheureusement le ciel est vaste et il y a finalement peu d'étoiles assez brillantes pour servir de référence. Une élégante idée pour contourner le problème est de créer... une étoile artificielle ! Pour ce faire, un faisceau laser accordé sur la longueur d'onde de la transition du sodium envoie une impulsion puissante vers le zénith. À 85 Km d'altitude, les photons sont absorbés par les atomes et réémis vers le bas, comme issus d'une tache ponctuelle. L'analyse du front d'onde perturbé par la turbulence est donc possible en tout point de ciel et la correction d'optique adaptative applicable. Quelques laboratoires dispersés seulement avaient été capables de



La première carte mondiale jamais réalisée de la colonne de sodium mésosphérique (exprimée en atomes par  $\text{cm}^2$  vers le zénith).

mesurer la densité de la couche de sodium. Grâce aux résultats de GOMOS, notre équipe a récemment publié la première carte mondiale de la couche de sodium mésosphérique, sympathique mariage de la recherche pure sur la composition de la mésosphère et de la recherche appliquée qui se sert des étoiles pour en créer d'autres...

Didier Fussen



La mission GOMOS

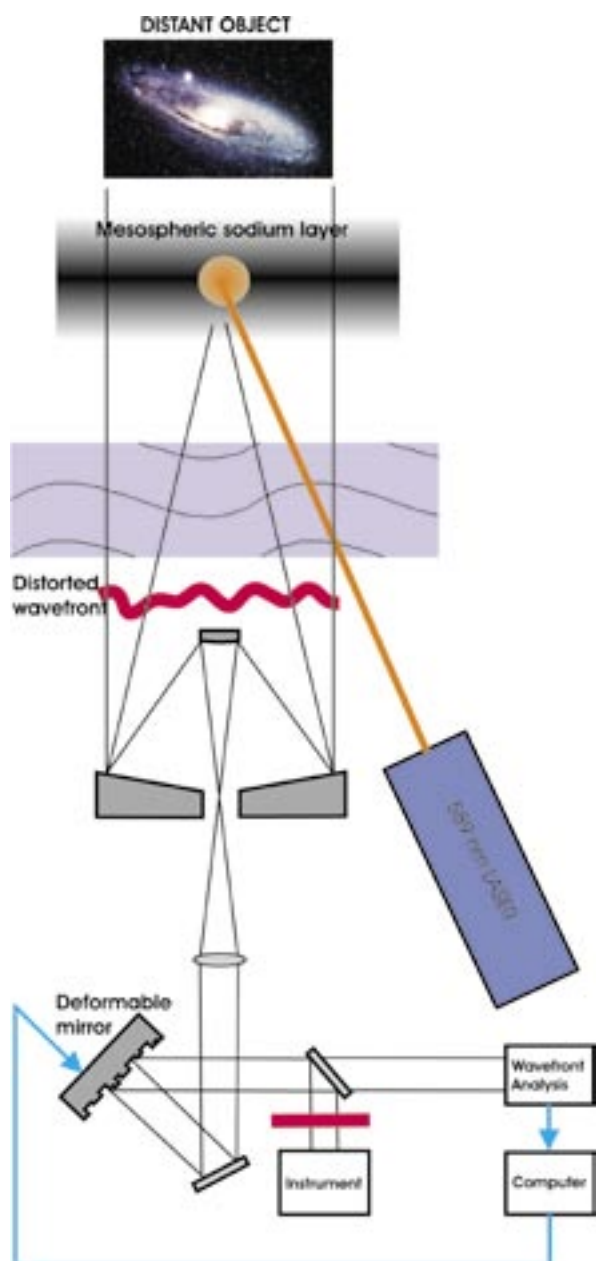
[envisat.esa.int/instruments/tour-index/gomos/](http://envisat.esa.int/instruments/tour-index/gomos/)

D.Fussen et al., *Global measurement of the mesospheric sodium layer by the star occultation instrument GOMOS*, *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L24110, doi:10.1029/2004GL021618, 2004



1983 doctorat en physique des collisions atomiques (Université catholique de Louvain)

1988 Institut d'aéronomie spatiale de Belgique. Chef de travaux agrégé depuis 1998 et chargé de cours invité à l'UCL



En créant une source ponctuelle de lumière dans la mésosphère, on peut l'utiliser comme étoile virtuelle afin de corriger la turbulence atmosphérique qui perturbe l'observation fine d'objets lointains.



L'équipe GOMOS (de g. à dr.) : Filip Vanhellemont, Nina Mateshvili, Jan Dodion, Christine Bingen et Didier Fussen