

L'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique souffle ses 50 bougies

Le 25 novembre 1964, l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) voyait le jour. Grâce à la passion et à l'enthousiasme de ses nombreux collaborateurs, l'IASB a pu, au fil des ans, inscrire de nombreuses percées scientifiques internationales à son nom. A l'occasion de son 50e anniversaire, faisons un petit retour en arrière.

Qu'est-ce que l'aéronomie ?

Les conditions de vie sur la Terre et dans l'espace proche sont déterminées par l'environnement atmosphérique au sens le plus large du terme. Le Soleil, notre étoile, est la première source d'énergie pour la Terre : il est indispensable à la vie. De plus, il est à l'origine de l'ionisation et de la dissociation des composants chimiques atmosphériques. L'aéronomie est la science qui étudie les phénomènes qui se produisent dans les atmosphères des planètes, des comètes et des satellites naturels.

La composition de l'atmosphère de la Terre est directement influencée par le Soleil mais aussi par toutes sortes de processus naturels et/ou induits par les activités humaines.

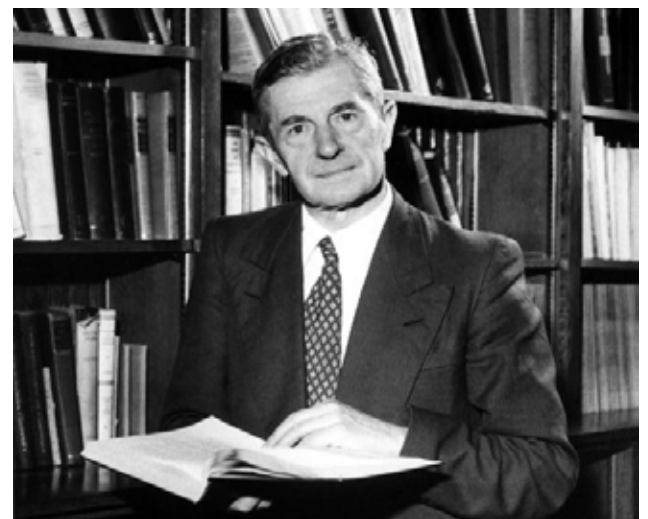
L'aéronomie étudie donc l'environnement atmosphérique de la Terre depuis sa surface jusqu'à l'espace interplanétaire, où il n'y a presque plus d'atmosphère, mais où le champ magnétique de la Terre est encore bien présent. Son étude inclut aussi les relations Soleil-Terre et les interactions entre la biosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, l'atmosphère et le climat. Elle est de ce fait une science multi- et interdisciplinaire.



La Lune et le limbe de l'atmosphère terrestre, photographiés depuis l'ISS. © NASA

Origine du mot aéronomie

L'aéronomie est une science assez récente. Le terme a été introduit dans les milieux scientifiques il y a 60 ans seulement, en 1954, par Sydney Chapman (1888-1970) au cours de l'Assemblée Générale de l'Union Internationale de Géodésie et de Géophysique à Rome. Grâce, entre autres, à l'avènement des satellites artificiels au cours de l'Année Géophysique Internationale, trois ans plus tard, et au développement de nouvelles techniques d'observation de l'espace, l'aéronomie a connu une croissance très rapide. Que cette science n'ait pas été officiellement reconnue avant 1954 ne signifie pas qu'il n'existait aucune recherche en aéronomie avant cette date. L'histoire de l'aéronomie remonte bien plus loin dans le temps.



Sydney Chapman (1888-1970) introduit pour la première fois le terme 'aéronomie' dans les milieux scientifiques (photo du 6 novembre 1950). © NOAA

L'aéronomie dans une perspective historique internationale

Dès le XIX^{ème} siècle, l'étude des atmosphères planétaires fut basée exclusivement sur les résultats d'observations effectuées à partir du sol, et sur l'interprétation expérimentale relevant de la spectrographie ou de la radioélectricité. Auparavant, on ne disposait que de méthodes indirectes (les déductions découlaient d'une interprétation des variations du magnétisme terrestre) ou élémentaires comme les observations visuelles d'abord, photographiques ensuite, de phénomènes apparaissant à haute altitude (à partir de 80 km et au-delà) tels que les nuages lumineux nocturnes au crépuscule, les étoiles filantes, certaines nuits et les aurores polaires.

Après la Première Guerre Mondiale, plusieurs découvertes significatives allaient promouvoir l'aéronomie au rang de science de base de l'environnement atmosphérique. Cette science a entre autres réussi à identifier, sur base de leur spectre, l'émission des deux éléments les plus importants dans l'atmosphère: l'azote et l'oxygène.

Les premières mesures d'ozone stratosphérique débutèrent en 1920 avec l'étude de l'absorption du rayonnement ultraviolet. En 1924, G. M. Dobson développa le spectromètre portant son nom, un instrument qui est, aujourd'hui encore, une référence en matière de mesure du contenu total en ozone dans l'atmosphère. C'est avec un tel instrument que le trou d'ozone au-dessus du pôle Sud a été découvert à partir de la station britannique Halley Bay dans l'Antarctique, en 1984. C'est aussi de cette manière que fut introduite la théorie photochimique sur la couche d'ozone par Sydney Chapman en 1929.

Le 27 mai 1931, Auguste Piccard et Paul Kipfer sont les premiers à monter à travers la stratosphère (à près de 16 kilomètres d'altitude), à bord d'une capsule d'un diamètre de 2,10 m, suspendue à un ballon de 30 mètres de diamètre, dans le but de mesurer le rayonnement cosmique et l'ionisation de l'air et du champ électrostatique.

Après la Seconde Guerre Mondiale, l'aéronomie devint de facto une science expérimentale. En effet, les premières fusées V2 inutilisées par l'Allemagne nazie furent utilisées à des fins scientifiques et nous apportèrent des données sur les paramètres physiques mesurés in situ au-delà de 100 km dans le ciel du Nouveau Mexique. Ainsi débuta une ère nouvelle qui conduisit au lancement du premier satellite artificiel (Sputnik-1) le 4 octobre 1957, au cours de l'Année Géophysique Internationale (1957-1958). Ce soir-là, lors d'un cocktail réunissant à l'ambassade soviétique de Washington les membres du Comité spécial de ce forum scientifique, un événement surprenant fut annoncé : un satellite soviétique tournait autour de la Terre à 900 km d'altitude. À bord d'un missile intercontinental R-7 reconverti - à l'origine conçu pour transporter des armes nucléaires - une boule en aluminium de plus de 80 kilogrammes se baladait dans l'espace. Un succès remarquable! Le monde en resta sans voix. Le lancement de Sputnik apporta une nouvelle dimension à la guerre froide : la conquête spatiale allait commencer.



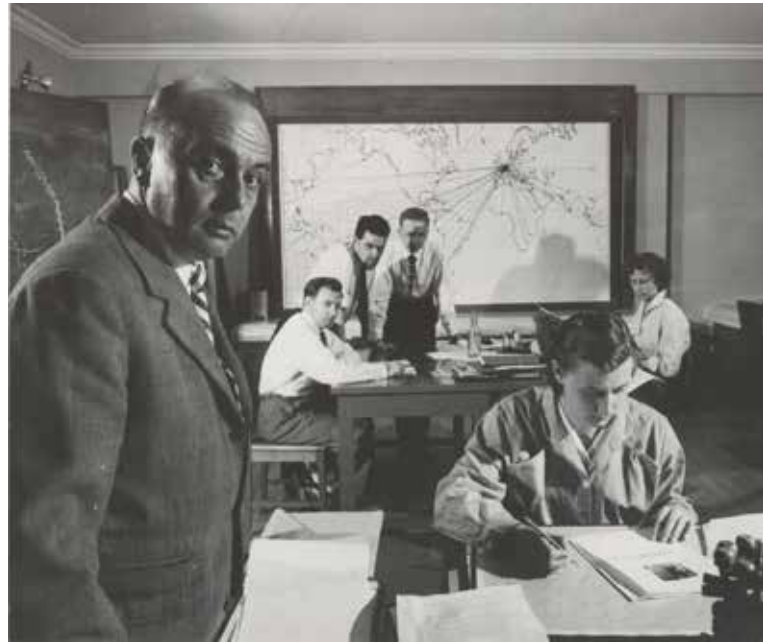
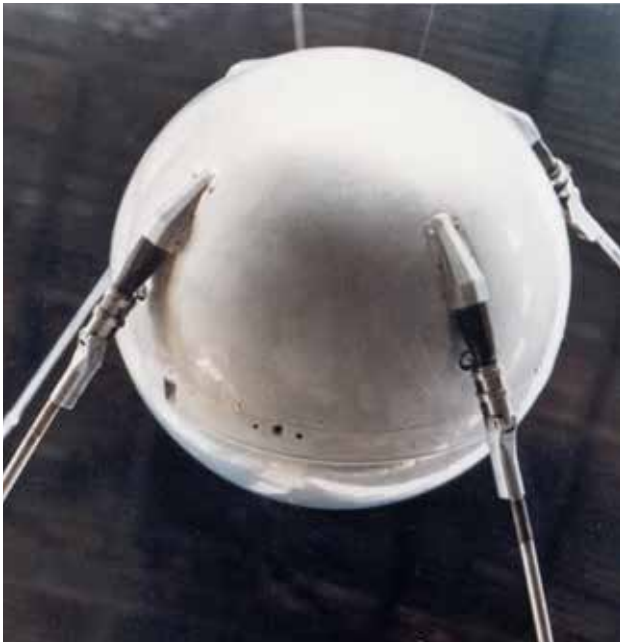
Le trou d'ozone en Antarctique a été découvert en 1985, par trois scientifiques de la British Antarctic Survey, de gauche à droite : Joe Farman, Brian Gardiner et Jon Shanklin, derrière un spectromètre Dobson utilisé pour mesurer les concentrations de l'ozone stratosphérique.
© British Antarctic Survey



Auguste Piccard (à droite) et Paul Kipfer (à gauche) dans la nacelle du ballon avec lequel ils pénétrèrent dans la stratosphère pour la première fois en mai 1931. © Archives fédérales allemandes Aktuelle Bilder-Zentrale Georg Pahl (Bild 102)



Expérience américaine avec une fusée V2, la première fusée lancée depuis le Centre spatial de Cap Canaveral le 24 Juillet 1950. © NASA



Sputnik-1. La création de la NASA est une conséquence immédiate du lancement de cette boule de 83 kilogrammes par les Russes. La guerre froide avait pris une nouvelle dimension. © NASA

Le Baron Marcel Nicolet, premier directeur de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique, pendant l'Année Géophysique Internationale (1957-1958).

L'Année Géophysique Internationale fut un grand succès. Pour la première fois, tous les géophysiciens de la Terre mirent en commun leurs efforts pour explorer notre planète sous toutes les latitudes et longitudes, jusqu'aux plus hautes altitudes. A côté de cela, l'instrument développé par Dobson fut déployé au sol en réseau mondial afin d'observer le contenu total d'ozone dans l'atmosphère et plus de 10.000 fusées-sondes météorologiques furent lancées, marquant les débuts de la recherche fondamentale.

Depuis la fin de l'Année Géophysique Internationale, rien n'a pu arrêter les conquêtes de l'aéronomie. Les atmosphères de la Terre et des autres planètes, de même que l'espace interplanétaire, ont en effet toujours fait l'objet, depuis lors, de missions spatiales.

L'aéronomie à Uccle

Le 1er mai 1940, au début de la Seconde Guerre Mondiale, l'Institut Royal Météorologique (IRM) à Uccle a été mobilisé sous le nom de Service Météorologique de l'Armée. Afin de ne pas devoir collaborer avec les nazis, le 'Bureau du temps' a dû disparaître. Pour protéger les employés du Bureau du temps, ceux-ci ont été répartis dans les nouveaux services créés par quelques membres de l'IRM : les Services de Climatologie (Lucien Poncelet,...), d'Aérodologie (Jacques Van Mieghem,...), du Magnétisme et de l'Electricité terrestres (Edmond Lahaye,...) et du Rayonnement (Marcel Nicolet,...). Ces Services, créés suite à des circonstances exceptionnelles et imprévues, contribueront finalement à des recherches fondamentales dans divers domaines pendant une période relativement longue. Ils contribueront également à l'importance prise après la guerre par la Belgique dans l'étude de l'espace et de l'environnement atmosphérique.

Ces circonstances dramatiques aboutirent donc à la création d'un service d'aéronomie (appelé alors 'Service du Rayonnement') au sein de l'IRM. Vingt ans après la Seconde Guerre Mondiale, l'aéronomie spatiale acquit une place définitive dans le cadre international, après le lancement des premiers satellites artificiels. En Belgique, ce développement apparut dès les premiers préparatifs (1953) de l'Année Géophysique Internationale (1957-58).

Le 30 juillet 1959 paraissaient aux Annexes du Moniteur belge, les statuts du Centre National de Recherches Spatiales (CNRS). Les fondateurs de ce centre étaient tous issus des universités nationales et des institutions scientifiques. Ce centre avait pour objet la promotion des études liées aux recherches spatiales, le développement de la formation de chercheurs spécialisés et la réalisation de travaux de recherche en vue de tirer parti des découvertes s'effectuant dans un cadre international. De plus, il devait centraliser et conserver les données et documentations relatives à ces recherches.

Le 28 mai 1962, le Conseil National de la Politique Scientifique transmet des recommandations concernant la promotion de la recherche spatiale au Gouvernement, parmi lesquelles il a été demandé "que le Gouvernement prenne toutes mesures utiles en vue d'assurer la permanence et la continuité des activités scientifiques et de service public accomplies par le Groupe d'Aéronomie dans le cadre des Etablissements scientifiques de l'Etat".

L'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique était né. Son statut organique fut publié au Moniteur belge le 25 novembre 1964. Son premier directeur était le Baron Marcel Nicolet.

Missions de l'IASB

L'Arrêté Royal du 25 novembre 1964 souligne que les tâches essentielles de l'Institut sont le service public et l'acquisition d'une expertise scientifique et technologique dans le domaine de l'aéronomie spatiale.

La compréhension et la capacité d'interpréter des données acquises à l'aide de fusées, de satellites, de sondes spatiales, de ballons stratosphériques, d'avions et d'instruments au sol est donc indispensable. Cela exige la connaissance de la physique et de la chimie des atmosphères planétaires, cométaires et de l'espace interplanétaire, ainsi que la connaissance de l'influence du Soleil sur l'atmosphère de la Terre, en particulier dans le contexte des changements climatiques globaux.

L'Institut cherche à apporter les réponses adéquates aux questions qui interpellent la société civile et l'être humain en lien avec la chimie atmosphérique de la Terre et son évolution à court et à long terme. Ces missions font que les activités de l'Institut s'intègrent dans un vaste réseau mondial de compétences.

Bon nombre des activités scientifiques et des thèmes de recherches abordés plus bas sont réalisés en collaboration étroite avec les Unions scientifiques internationales, l'Agence Spatiale Européenne (ESA), les agences spatiales nationales (NASA, CNES, etc...) et des centres de recherches prestigieux, de par le monde. L'expertise et l'information ainsi obtenues ont des applications multiples :

- purement scientifiques, pour les évaluations réalisées par les organisations internationales qui rendent compte de l'état de l'atmosphère ;
- stratégiques, pour le monde politique et les différents niveaux de décision, tant nationaux qu'européens ;
- éducatives, pour les jeunes et le grand public ;
- opérationnelles, pour les utilisateurs publics ou privés des différents produits et résultats ;
- technologiques, pour les développements de nouvelles expériences.

Activités scientifiques

L'explosion démographique, le développement des activités industrielles et des pratiques agricoles ainsi que la multiplication des modes de transport ont entraîné, depuis près de deux siècles, un changement profond et à un rythme sans précédent, de notre environnement avec pour conséquence une modification de la composition chimique de l'atmosphère à l'échelle planétaire.

Les concentrations de composants tels que le dioxyde de carbone (CO₂) augmentent de plus en plus rapidement suite à l'usage des combustibles fossiles. D'autres composants comme le méthane, les oxydes d'azote, les composés soufrés, chlorés et bromés, d'origine naturelle et humaine, contribuent aux changements globaux qui se déroulent à l'échelle de notre Terre désormais sous haute surveillance. Il en résulte une modification des composantes fondamentales de notre environnement : la biosphère, les terres émergées, l'hydrosphère, la cryosphère et l'atmosphère. L'homme risque ainsi de changer le climat de la planète et, par là même, d'altérer les conditions d'existence de toute forme de vie.

Au sein du système solaire, la Terre est sous l'influence continue des émissions électromagnétiques et corpusculaires du Soleil et dans une moindre mesure de celles provenant de sources galactiques. Les phénomènes qui en résultent se produisent depuis la surface jusqu'à plusieurs centaines de milliers de kilomètres d'altitude. Plusieurs molécules atmosphériques se disloquent par absorption du rayonnement ultraviolet solaire et produisent des atomes et de nouvelles molécules. D'autres composants perdent des électrons et se transforment en particules chargées formant ainsi l'ionosphère qui joue un rôle important dans le domaine de la propagation des ondes radio.

Un grand nombre de composants atmosphériques peuvent se combiner entre eux, qu'ils soient neutres ou ionisés. Par exemple, la couche d'ozone dans la stratosphère, sans laquelle la vie sur Terre ne serait pas possible, résulte d'un ensemble complexe de réactions où interviennent de nombreux composants minoritaires d'origine naturelle et/ou humaine.

De même, la production d'ozone dans la troposphère due aux émissions de polluants d'origine humaine résulte initialement de l'action du rayonnement ultraviolet solaire. Près de la surface, l'ozone a un effet toxique sur l'homme et la végétation.

La connaissance des phénomènes atmosphériques et des changements globaux dus aux activités humaines est donc fondamentale pour étudier leur impact sur notre qualité de vie.

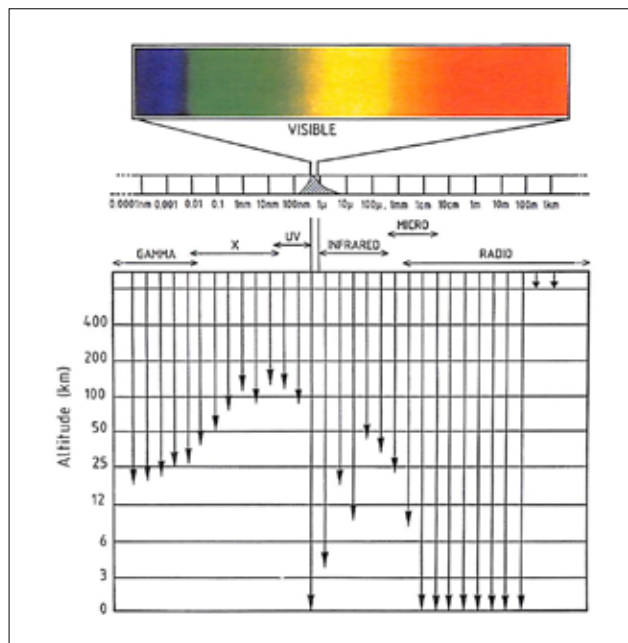
Les thèmes de recherche

Les activités de recherche peuvent être regroupées en quatre thèmes majeurs :

1. Le rayonnement électromagnétique solaire
2. L'atmosphère et les changements globaux
3. La physique spatiale : du Soleil à la Terre
4. L'exploration du système solaire

1. Le rayonnement électromagnétique solaire

Malgré la distance qui sépare le Soleil de notre planète (en moyenne 150 millions de kilomètres), il dégage suffisamment de lumière et de chaleur pour permettre la vie sur Terre. Cette énergie nous parvient sous forme de rayonnement électromagnétique et est constituée d'ondes, chacune d'une longueur caractéristique. L'intensité du rayonnement à chaque longueur d'onde dépend de la composition et de la température de l'émetteur, dans ce cas précis, le Soleil.



Spectre électromagnétique du Soleil, qui indique la hauteur à laquelle le rayonnement solaire pénètre dans l'atmosphère de la Terre.

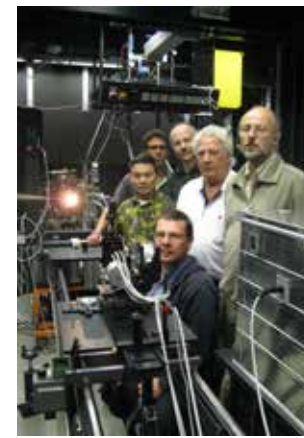
Le domaine observé du spectre électromagnétique du Soleil s'étend de longueurs d'onde aussi petites que 10^{-11} mm aux ondes kilométriques. Près de la moitié de l'énergie totale émise par le Soleil se situe dans le visible (400 à 700 nm), l'autre moitié dans le proche infrarouge (700 à 4000 nm). L'énergie totale intégrée dans l'ultraviolet de longueurs d'onde inférieures à 300 nm représente seulement 1 % de l'énergie totale. Cependant, son rôle est déterminant pour la composition de l'atmosphère. Les variations temporelles du rayonnement solaire les plus importantes se produisent dans l'ultraviolet. La pénétration du rayonnement solaire dans l'atmosphère terrestre est principalement contrôlée par l'absorption de plusieurs composants atmosphériques.



Lancement de l'instrument MACSIMS (dont le but était de mesurer les constituants atmosphériques) en octobre 1998 à partir du site de lancement pour ballons stratosphériques du CNES à Aire-sur-l'Adour.

Seule une petite partie du rayonnement ultraviolet de longueur d'onde supérieure à 300 nm peut atteindre la surface de la Terre. Le réseau d'observation UV, mis en place par l'IASB, est composé de six stations au sol en Belgique, une au Luxembourg et une en Antarctique. Il joue un rôle important dans la surveillance du rayonnement UV absolu qui atteint la Terre. Grâce au site <http://uvindex.aeronomie.be> vous pouvez suivre, en temps réel, l'évolution des mesures de l'indice UV dans ces huit stations.

L'éclairement énergétique du rayonnement ultraviolet du Soleil autour de 200 nm a été déterminé avec une grande précision à partir d'observations effectuées en ballon stratosphérique au début des années 1970. Cette région spectrale est particulièrement importante pour la production d'ozone dans la stratosphère.



Une partie de l'équipe SOLSPEC : à gauche, avec le vicomte Dirk Frimout pendant le vol de Spacelab-1 en 1983 dans la salle de contrôle à Houston ; à droite, de nos jours, en 2014.

En 1983, l'expérience SOLSPEC (SOLAR SPECTrum) à bord de la mission Spacelab a réussi à capturer les valeurs les plus précises jamais enregistrées du flux solaire au-dessus de 200 nm. Elles ont été confirmées en 1992, 1993 et 1994 lors des missions ATLAS. Depuis février 2008, une version améliorée de cet instrument se trouve à bord du module Columbus de la station spatiale internationale. L'instrument mesure la distribution spectrale de l'énergie solaire et ses variations au cours du cycle solaire de 11 ans. L'objectif est de mieux identifier et déterminer la relation qui existe entre les variations solaires et les changements atmosphériques.

C'est le B.USOC (Belgian User Support and Operation Center) qui est responsable de la plate-forme solaire, SOLAR, sur laquelle se trouve SOLSPEC. Hébergé à l'IASB, le B.USOC soutient, depuis 1997, les équipes scientifiques belges qui veulent réaliser des expériences spatiales développées prioritairement dans le cadre du programme PRODEX (Programme de développement d'EXpériences scientifiques) de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et financé par la Politique scientifique fédérale (Belspo). Le B.USOC assure la coordination des opérations (contrôle à distance) en étroite collaboration avec l'ESA, les scientifiques et l'industrie.

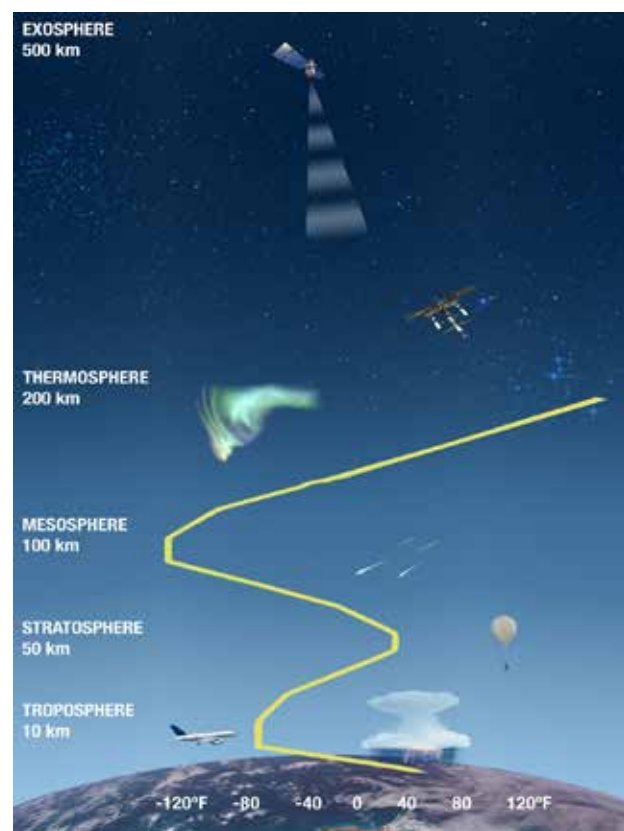
Notons que c'est au B.USOC qu'en 2002 le volet scientifique de la mission du second astronaute belge, le vicomte Frank De Winne, a été préparé et géré en temps réel lors de son déroulement à bord de la Station Spatiale Internationale (ISS).

2. L'atmosphère et les changements globaux

Les différentes régions atmosphériques peuvent être définies par le comportement de la température en fonction de l'altitude. La troposphère, où la température est fonction de l'altitude, est le siège des phénomènes de pollution. L'augmentation de la température dans la stratosphère est due essentiellement à l'absorption d'une grande partie du rayonnement ultraviolet solaire par l'ozone. Après une diminution dans la mésosphère, la température augmente à nouveau



Au centre de l'image (avec les quatre orifices) : l'expérience SOLAR/SOLSPEC fixée au module européen Columbus de la Station Spatiale Internationale. © NASA



Les différentes régions de l'atmosphère sur base de la variation de température, dans lesquelles les principaux phénomènes et les altitudes de vol sont représentés. © American Museum of Natural History

dans la thermosphère jusqu'à des valeurs comprises entre 300°C et 1700°C. L'augmentation de la température est due à des molécules d'oxygène qui absorbent, à une altitude d'environ 100 km, une partie du rayonnement solaire ultraviolet. Aux altitudes supérieures, le phénomène de diffusion des composants les plus légers a pour effet de créer des ceintures où les molécules d'azote, les atomes d'oxygène, l'hydrogène et l'hélium deviennent successivement les composants prédominants lorsqu'on s'élève en altitude. L'existence d'une ceinture d'hélium vers 600 km d'altitude a été démontrée pour la première fois par l'IASB.

Initialement, l'étude scientifique des processus physiques et chimiques dans l'atmosphère était axée sur les processus ayant lieu à très haute altitude. Aujourd'hui, l'aéronomie s'intéresse de plus en plus à la basse atmosphère, en particulier à la troposphère (de 0 à 15 km d'altitude) où l'accent est mis sur la qualité de l'air et sur l'impact de l'Homme sur l'environnement.

2.1. L'ozone stratosphérique et les composants minoritaires dans l'atmosphère

Des observations précises et répétées de toutes les régions atmosphériques sont nécessaires pour vérifier les modifications prédites par les modèles et pour contrôler l'influence de l'Homme sur son environnement. Mesurer les composants en traces dans l'atmosphère s'avère donc capital. Une des méthodes utilisées est celle de la spectrométrie d'absorption lors des phases d'occultation du Soleil à l'horizon (occultation solaire).

Des spectromètres infrarouges à grille ont été emportés par des ballons stratosphériques dans les années 1970 ou em-

barqués à bord de la navette lors des missions Spacelab-1 en 1983 et ATLAS-1 en 1992. Ainsi les scientifiques ont obtenu les concentrations d'une série de gaz en traces, dont certains étaient encore totalement inconnus.

Dans les années 1970, les possibilités offertes par les avions supersoniques, tels que le Concorde, ont orienté les recherches vers la stratosphère, l'ozone et l'impact des émissions d'oxydes d'azote par ces avions supersoniques.

En 1974, les chlorofluorocarbures (CFC) ont été identifiés comme étant la source de chlore dans la stratosphère qui entraîne une destruction importante de l'ozone stratosphérique. Cette découverte a permis de donner une importance prioritaire à l'étude de l'ozone stratosphérique. Au vu du caractère planétaire de la diminution de la couche d'ozone, de la pollution de la troposphère et des changements climatiques, on prenait alors conscience des 'changements globaux' dans le domaine des sciences de la Terre.

En 1995, l'IASB a participé à la première expérience de surveillance de l'ozone par satellite, appelée Global Ozone Monitoring Experiment (GOME), conduite en Europe par l'Agence Spatiale Européenne (ESA). En 2002, le satellite environnemental, ENVISAT, a été lancé avec, entre autres, trois instruments fournissant des mesures relatives à la chimie de l'atmosphère. L'IASB a contribué de manière significative au développement de deux des trois instruments (SCIAMACHY, SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartography et GOMOS, Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars), ainsi qu'à leur exploitation et à leur validation, essentiellement à l'aide de réseaux d'observation au sol, comme le 'Network for the Detection of Stratospheric Change' (NDSC). En février 2006, le NDSC a changé son nom en 'Network for Detection of Atmospheric Composition Change' (NDACC), pour souligner que ses priorités ont été considérablement étendues à la surveillance des changements dans la stratosphère avec un accent sur l'évolution à long terme de la couche d'ozone, la détection des tendances de la composition de l'atmosphère, la compréhension de l'importance de ces tendances à la fois sur la stratosphère et la troposphère, et l'étude des relations entre la composition atmosphérique et les changements climatiques. L'interprétation de ces observations a permis de produire les premières cartes mondiales montrant le niveau de pollution par le dioxyde d'azote et les concentrations en oxyde de brome.

Le suivi à long terme des gaz atmosphériques minoritaires, commencé en 1995 avec GOME et poursuivi en 2002 avec SCIAMACHY, a pu être continué avec GOME-2 sur la plate-forme MetOp-A, lancée en 2006. Trois exemplaires de cet instrument ont été construits, de sorte que la série temporelle pourra continuer jusqu'en 2020. Sur cette même plate-forme se trouve également l'instrument IASI, qui est conçu à la fois à des fins météorologiques et pour la surveillance des gaz en traces comme l'ozone et le monoxyde de carbone. D'autres substances dont on n'avait jamais pensé qu'elles puissent être mesurées depuis l'espace, comme l'ammoniac, ont aussi été découvertes dans les spectres IASI, ce qui a permis d'utiliser les données pour détecter, par exemple, les panaches de fumées dégagées par la combustion de biomasse. Un instrument



La nacelle Astrolabe, prête pour le lancement, attachée à un ballon stratosphérique, avec à son bord un spectromètre infrarouge conçu et construit par l'IASB.



Le satellite environnemental ENVISAT avec à son bord dix instruments dont deux auxquels l'IASB a beaucoup contribué : SCIAMACHY et GOMOS. © ESA

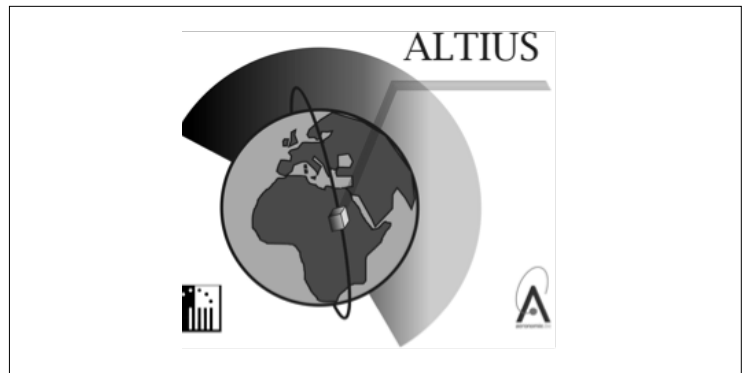
IASI se trouve aussi sur la plate-forme MetOp-B, lancée en septembre 2012. Enfin, comme pour l'instrument GOME-2, un troisième exemplaire est également prévu pour succéder à l'instrument actuellement en vol.

Les progrès techniques importants de ces dernières années ont permis l'exploitation de mini-satellites capables de mener de nombreuses missions scientifiques. L'IASB est, entre autres, fortement impliqué dans le développement des mini-satellites ALTIUS et PICASSO. Le projet ALTIUS (Atmospheric Limb Tracker for the Investigation of the Upcoming Stratosphere), initié en 2005 et basé sur un micro-satellite belge de la classe PROBA est une mission dédiée à l'étude de l'atmosphère terrestre par la méthode d'observation de la lumière diffusée au limbe. La mission sera consacrée à la mesure de la distribution verticale des principaux gaz en traces dans la stratosphère.

L'objectif principal est l'ozone et son rétablissement, avec comme objectifs secondaires : le NO₂, le méthane, la vapeur d'eau et les aérosols. La gamme d'altitude de sondage sera comprise entre la troposphère et la mésosphère à partir d'une orbite polaire héliosynchrone de période 100 minutes à 650 km d'altitude. Le temps de revisite permettra d'atteindre une couverture globale de la Terre en trois jours. ALTIUS sera la première mission atmosphérique belge de sondage de la haute atmosphère, pour tenter de répondre au manque dramatique de satellites de télédétection atmosphérique à haute résolution verticale. Le projet PICASSO (PICosatellite for Atmospheric and Space Science Observations) est un pico-satellite au standard CubeSat qui démontrera le potentiel de la technologie miniaturisée en télédétection atmosphérique et pour des observations spatiales in situ. Projet mené en collaboration avec le Royaume-Uni, la Finlande et le Centre Spatial de Liège, ce CubeSat embarquera deux expériences scientifiques VISION et SLP, dédiées à l'étude de la répartition de l'ozone dans la stratosphère et du profil de température jusqu'à la mésosphère, ainsi qu'à la mesure de la densité électronique et la température dans l'ionosphère. PICASSO vient d'être approuvé et financé par l'ESA comme une mission « In Orbit Demonstration » et l'IASB en est le maître d'œuvre. Son lancement est prévu en 2016.



Le satellite du projet PICASSO.



Les aérosols (particules en suspension) jouent un rôle important dans la composition chimique de la troposphère et de la stratosphère et pour le climat. Ils ont fait l'objet d'une analyse détaillée, après l'éruption du volcan Pinatubo en 1991, sur base des observations de l'expérience ORA développée à l'IASB et embarquée à bord de la mission Eureka de l'ESA (1992-1993) et de l'expérience américaine SAGE-II. Depuis deux décennies, l'IASB travaille à l'analyse des données satellites afin de déterminer les propriétés des aérosols tant dans la stratosphère que dans la troposphère. Ensuite ces analyses sont utilisées comme entrées dans les modèles atmosphériques.

ont portés en grande partie sur le rôle complexe et encore mal compris joué par les hydrocarbures émis par la végétation. Une meilleure compréhension de ces processus pourrait aider à en apprendre davantage sur l'impact des activités humaines sur les concentrations d'ozone, importante pour la définition et l'application d'éventuelles mesures de régulation des émissions de polluants. De plus, ces hydrocarbures sont aussi une source mal connue d'aérosols qui, comme l'ozone, influencent le climat et la qualité de l'air.

2.3. Modèles de prédiction des concentrations d'ozone et des composants minoritaires

Afin d'analyser et de comprendre les phénomènes atmosphériques, l'IASB développe des modèles 'chimie-transport' couplés à des modèles météorologiques depuis la surface de la Terre et jusqu'à 120 km d'altitude. Ces modèles sont également utilisés pour la prédiction de l'évolution des changements globaux en relation avec les activités humaines.

Ils permettent d'évaluer l'impact des changements passés ou futurs dans l'émission de polluants sur les concentrations naturelles d'ozone ainsi que l'impact du changement climatique et des transformations des écosystèmes (forêts transformées en prés) sur les émissions et donc sur la composition chimique de la troposphère. Ainsi, par exemple, les modèles développés à l'IASB ont contribué à plusieurs rapports de l'IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change).

En outre, grâce à la combinaison d'observations par satellites aux techniques d'assimilation, il est déjà possible de faire des prédictions à court terme des concentrations d'ozone et de plusieurs composants stratosphériques. L'IASB a réalisé le premier modèle opérationnel mondial dans cette matière : le modèle BASCOE (Belgian Assimilation System of Chemical Observations) a été utilisé comme référence tant dans le cadre du service Atmosphère de Copernicus (anciennement GMES) que dans le bulletin annuel de l'ozone Antarctique publié par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).

3. La physique spatiale : du Soleil à la Terre

3.1. Le vent solaire

Il est peu connu que le Soleil émet un flux de particules chargées dans toutes les directions, sous la forme d'un vent solaire continu. Le vent solaire est constitué de particules ayant des



Le limbe de la Terre au coucher du Soleil avant et après l'éruption du Mont Pinatubo. A gauche : l'image d'une atmosphère relativement claire, prise le 30 août 1984. A droite: le même type de photo, prise le 8 août 1991, moins de deux mois après l'éruption du Pinatubo. On peut y voir deux couches sombres formées par les aérosols dans l'atmosphère. © NASA

2.2. L'ozone dans la troposphère

Dix pourcents de l'ozone se trouvent dans une couche proche de la surface de la Terre : la troposphère. Ce 'mauvais ozone' est un polluant et est nocif pour nos voies respiratoires, mais aussi pour la faune et la flore et toutes sortes de substances. Cela est dû à des activités humaines comme la combustion de combustibles fossiles (transports, industries, entreprises de production d'énergie, ...). Ces activités anthropiques génèrent des émissions de substances nocives qui, sous l'effet du rayonnement solaire et de la chaleur provoquent des réactions chimiques menant à la production de l'ozone. L'ozone troposphérique est un élément-clé du smog. L'IASB mène depuis près d'un quart de siècle des recherches visant à mieux comprendre les processus liés à la formation et au bilan de l'ozone troposphérique. Ces recherches sont principalement des études de modélisation, mais elles comprennent également des études en laboratoire. Ces travaux

vitesse suffisantes pour s'extraire de la couronne solaire, la haute atmosphère du Soleil, et rayonner ensuite dans toute l'héliosphère, la partie de l'espace sous l'influence du Soleil. Il a une grande influence sur les couches les plus externes des atmosphères planétaires, et donc aussi sur celle de la Terre. C'est en 1950 qu'un scientifique allemand appelé Ludwig Biermann postula l'existence d'un tel flux de particules provenant du Soleil. Il avait remarqué que la queue des comètes pointait toujours dans la direction opposée au Soleil, quelle que soit la direction de propagation de la comète.

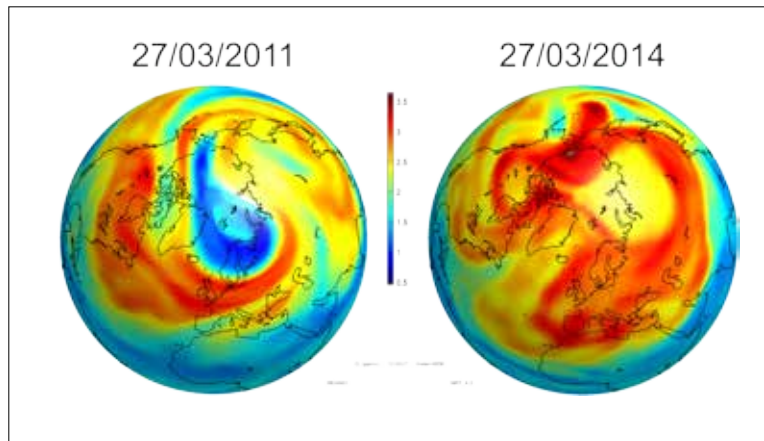
L'IASB étudie les courants électriques du vent solaire. Ces courants signalent les changements dans le vent solaire et nous permettent de tirer des conclusions sur la stabilité de différentes structures de ce vent et sur le transport d'énergie. Une bonne compréhension en cette matière nous aide aussi à comprendre ce qui se passe plus près de la Terre, dans la magnétosphère. C'est principalement grâce aux travaux pionniers de Joseph Lemaire et Marc Scherer sur le vent solaire que la physique spatiale à l'IASB a acquis, dès 1969, une forte reconnaissance internationale. En 1990, l'IASB a pris part à la mission de la sonde Ulysse, dont l'objet est essentiellement de mesurer les caractéristiques du vent solaire au-dessus des pôles du Soleil. L'IASB a également apporté d'importantes contributions au développement de modèles détaillés du vent solaire pour décrire et donc comprendre pourquoi le vent solaire est si chaud et possède une vitesse qui dépasse souvent 800 km/s.

Le vent solaire est caractérisé par de fortes fluctuations dans le temps, allant de quelques secondes à plusieurs années. Par exemple, lorsque le matériau d'une émission de masse coronale (éruption de masse de la couronne) se propage dans l'espace interplanétaire et atteint la Terre, cela cause une forte augmentation de la pression dynamique du vent solaire et provoque des vibrations dans la magnétopause.

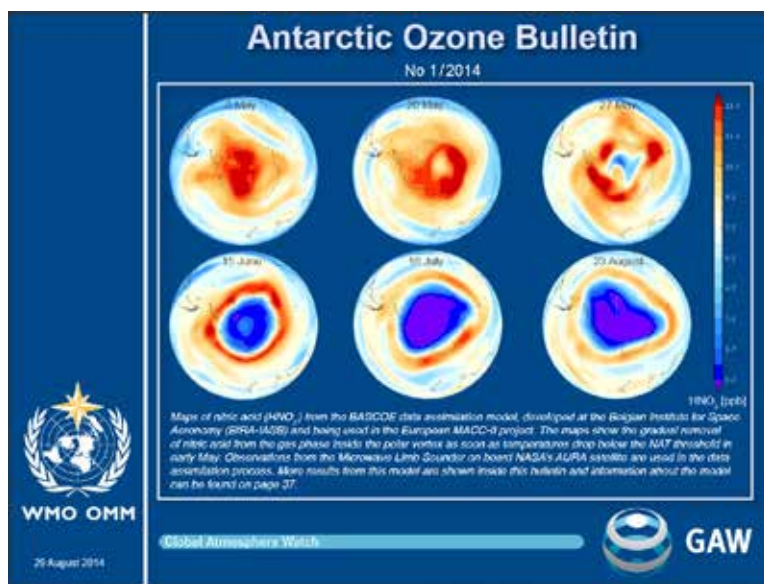
3.2. La magnétosphère

La Terre est protégée du flux de particules du vent solaire par son champ magnétique. La région de l'espace où le champ magnétique terrestre est dominant est appelée la magnétosphère. Cette région constitue une enveloppe protectrice autour de la planète, parce qu'elle est capable de dévier le vent solaire. L'interaction entre le vent solaire et la magnétosphère dépend des variations de l'activité solaire et donne lieu à des phénomènes tels que les aurores polaires et les orages géomagnétiques, qui modifient brusquement mais temporairement la dynamique et la structure de la magnétosphère. Une bonne connaissance du vent solaire est donc indispensable.

A cette fin, l'IASB utilise des observations spatiales obtenues notamment par les quatre satellites CLUSTER de l'ESA, pour étudier le comportement de cette région d'interaction (limite extérieure de la magnétosphère). Ceci est important pour évaluer la quantité de matière et d'énergie qui peut pénétrer dans la magnétosphère. Lors de perturbations majeures du vent solaire (dans des périodes d'activité solaire intense) un tel transport de matière et d'énergie peut déclencher des orages magnétiques, des



Grâce au modèle BASCOE, l'IASB pouvait suivre le premier trou d'ozone au-dessus du pôle Nord en temps quasi réel. La figure de droite montre, à titre de comparaison, la quantité d'ozone lors d'une année normale, quand il n'y a pas de trou d'ozone.



Page d'accueil du premier bulletin de l'ozone en Antarctique de 2014, publié par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) dans le cadre du projet Global Atmosphere Watch (GAW). Celle-ci montre les résultats du modèle opérationnel BASCOE au-dessus de l'Antarctique pour l'une des substances qui joue un rôle important dans la chimie de l'ozone stratosphérique.

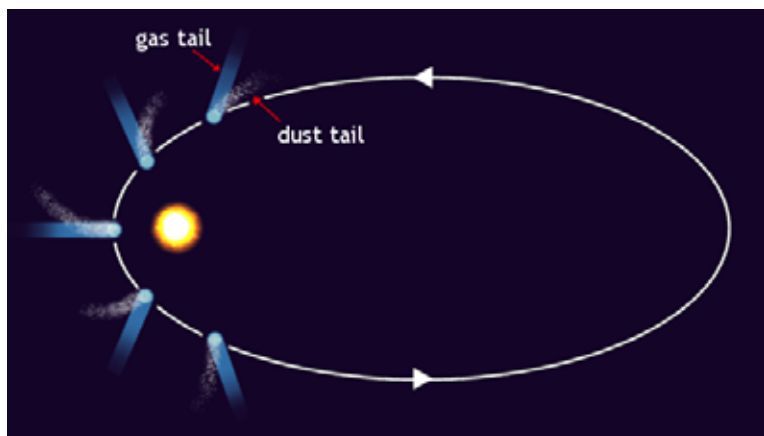
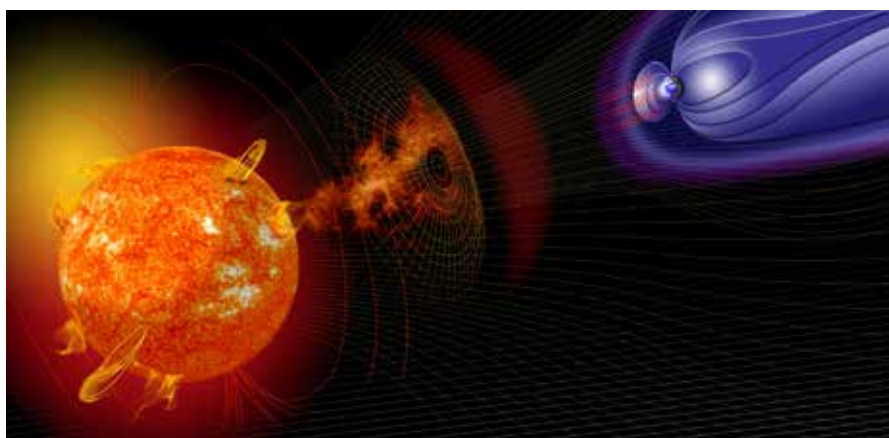


Schéma montrant le mouvement d'une comète autour du Soleil. La queue de plasma (ou queue d'ions) en bleu est toujours dirigée à l'opposé du Soleil. C'est sur base de cette constatation que Ludwig Biermann a démontré l'existence du vent solaire en 1950.

changements abrupts mais temporaires de la structure de la magnétosphère entraînant des conséquences négatives qu'ils pourront avoir sur la technologie (les systèmes électriques des satellites, les dommages causés par le rayonnement, les courants induits dans le sol, ...).

Grâce aux données des satellites CLUSTER, l'IASB a mis au point une méthode de reconstruction qui permet de cartographier ces mouvements d'oscillations. L'IASB s'est également illustré en proposant d'une part un modèle permettant de décrire la structure interne de la magnétopause, et d'autre part un modèle de pénétration des irrégularités du vent solaire à travers la magnétopause.



Vue d'artiste de la relation entre le Soleil et la Terre. © NASA



Représentation de la mission CLUSTER, composée de quatre satellites identiques dédiés à l'étude de la magnétosphère de la Terre. © ESA

3.3. Les ceintures de radiations de Van Allen

Le début de l'ère spatiale a immédiatement conduit à un premier succès. En 1958, James Van Allen installa un compteur Geiger à bord d'Explorer 1, le premier satellite américain lancé avec succès en orbite autour de la Terre. Son but était d'étudier les rayons cosmiques, mais les flux de particules énergétiques étaient si élevés le long de son orbite que l'instrument saturait rapidement. C'est ainsi que les ceintures de radiation ont été découvertes : des régions annulaires qui encerclent la Terre et qui sont peuplées de particules de haute énergie



James Van Allen (1914-2006) avec à l'avant-plan une représentation de sa découverte : les ceintures de radiations qui portent son nom. © NASA

piégées dans le champ magnétique terrestre. Ces particules peuvent transmettre une charge électrique à la surface des satellites et en endommager les composants optiques et électroniques. Elles constituent également un danger pour les équipages dans l'espace qui sont contraints de placer des écrans spéciaux pour s'en protéger. En collaboration avec le CSR (Center for Space Radiations) de l'Université Catholique de Louvain, l'IASB a développé un nouveau détecteur tout à fait révolutionnaire pour mesurer cette radiation ionisante, l'Energetic Particle Telescope (EPT). Cet instrument a été lancé le 7 mai 2013 à bord du satellite PROBA-V de l'ESA et fournit des mesures des flux d'électrons, de protons et des ions d'hélium à une altitude de 820 km.

3.4. Météo spatiale

En raison de l'importance des ceintures de radiation de Van Allen pour les expéditions spatiales, l'IASB a entrepris l'étude des sources et des pertes de ses particules et de l'impact de l'activité solaire sur notre environnement (la météo spatiale). La météo spatiale est une science appliquée qui se concentre principalement sur les besoins de la société. En coopération avec d'autres instituts, l'IASB a développé pour l'ESA un système pour optimiser les modèles dont le but est de prévoir l'impact des éjections de masse coronale sur la magnétosphère : le SPace ENVironment Information System (SPENVIS). Ce système permet d'améliorer la prédiction des spectres d'énergie et des doses de radiation accumulées sur un véhicule spatial se déplaçant dans la magnétosphère. Cette prédiction est utile pour calculer le temps de vie et de détérioration des cellules photoélectriques, des panneaux solaires et d'autres équipements électroniques, ainsi que pour protéger les astronautes lors des missions spatiales.

3.5. La plasmasphère

La magnétosphère contient différentes régions de plasmas peu denses d'origine terrestre et solaire, avec des concentrations et des températures différentes. Le plasma le plus froid est contenu dans la plasmasphère. La plasmasphère constitue l'extension de l'ionosphère (la couche supérieure de l'atmosphère terrestre, ionisée par le rayonnement UV du Soleil) vers des altitudes plus élevées, aux basses et moyennes latitudes où les particules ionisées restent piégées dans le champ magnétique terrestre le long des lignes de champ fermées. Un modèle tridimensionnel a été développé à l'IASB pour déterminer le nombre de particules dans la plasmasphère ainsi que dans sa limite extérieure, la plasmopause. Les résultats du modèle, tels que la densité, sont ensuite comparés aux observations satellitaires, comme celles de CLUSTER et IMAGE.

3.6. L'ionosphère

L'ionosphère constitue la transition entre l'atmosphère de la Terre et l'espace. Elle est composée de gaz partiellement ionisé par le rayonnement du Soleil. L'ionosphère s'étend d'une altitude d'environ 80 km à plus de 1000 km. L'ionisation donne à l'atmosphère un comportement de conducteur parfait. Cette couche réfléchit les ondes radio et c'est ainsi que son existence a été postulée dès 1902 par Kennelly et Heaviside pour expliquer la liaison transatlantique longue distance établie par Marconi en 1901 malgré la rotondité de la Terre.

L'ionosphère et la magnétosphère sont connectées par le biais des lignes de force magnétiques. Celles-ci sont des conducteurs électriques presque parfaits. Par conséquent, l'énergie électromagnétique disponible dans la magnétosphère est transportée dans l'ionosphère via des courants électriques qui suivent les lignes de champ géomagnétique, appelés courants de Birkeland. Les aurores polaires sont la manifestation la plus spectaculaire de ce transfert d'énergie, dont les mécanismes physiques restent un sujet de recherche intense.

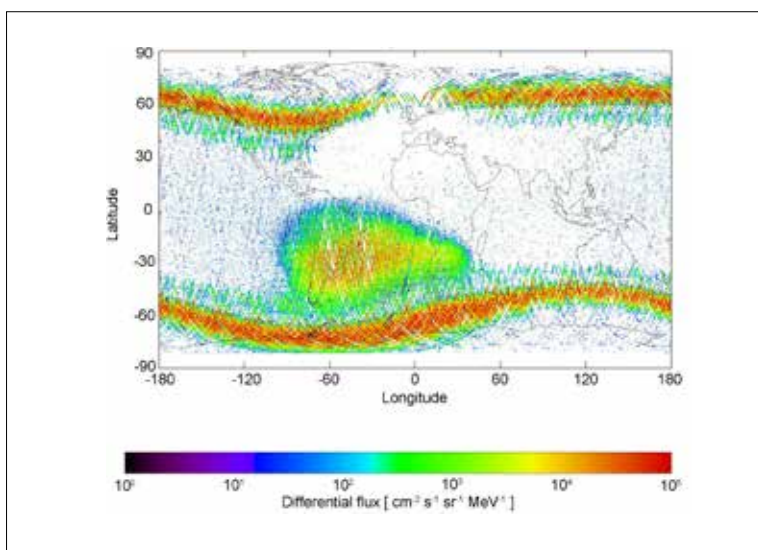
3.7. L'aurore polaire

Une aurore polaire (qualifiée de boréale dans l'hémisphère Nord et d'australe dans l'hémisphère Sud) est un phénomène lumineux qui résulte du bombardement de la haute atmosphère terrestre par des particules chargées provenant de la magnétosphère. Les aurores se produisent habituellement à proximité des pôles, dans une zone annulaire comprise entre 65 et 75° de latitude, et appelée 'ovale auroral'. En cas de forte activité solaire, les aurores peuvent s'étendre plus bas en latitude, et même être visibles en Belgique. La couleur de l'aurore dépend de l'énergie des électrons qui atteignent la Terre, allant du vert pour les aurores boréales à basse altitude jusqu'au rouge pour les aurores à des altitudes plus élevées. Des émissions aurorales sont très dynamiques : leur forme et leur couleur varient sur des échelles de temps d'à peine quelques minutes.

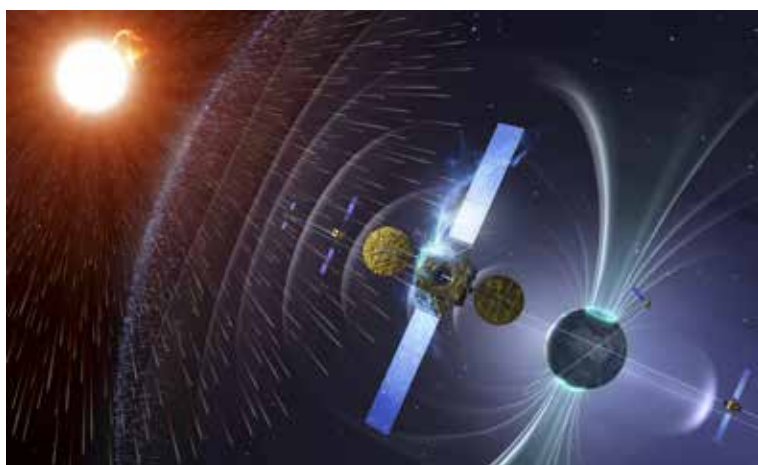
Les scientifiques de l'IASB essaient d'identifier les processus à l'origine des arcs auroraux. Ils cherchent en particulier à identifier les générateurs d'énergie qui accélèrent les électrons vers l'ionosphère ainsi que vers la région de la magnétosphère dont ils sont originaires. Pour cela, ils développent



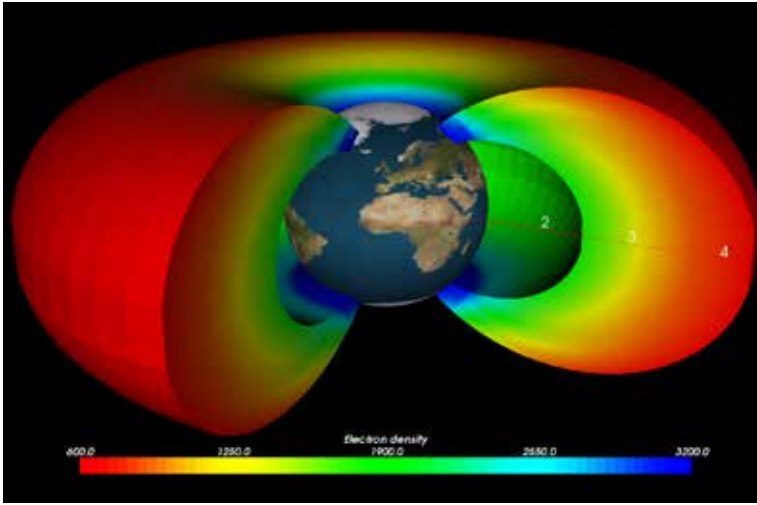
L'instrument Energetic Particle Telescope (EPT), développé par un consortium dont l'IASB et intégré au satellite de l'ESA, PROBA-V. © ESA



L'instrument EPT, lancé le 7 mai 2013, fournit, depuis septembre 2013, les premières mesures de l'environnement de rayonnement spatial de la Terre à basse altitude.



Space Situational Awareness : Météo spatiale © ESA



La densité d'électrons calculée grâce au modèle dynamique en 3D de la plasmasphère mis au point par l'IASB.



Un show lumineux spectaculaire d'aurores australes, photographié par Alexander Gerst à bord de la Station Spatiale Internationale en 2014. © NASA

des modèles théoriques et numériques de couplage entre la magnétosphère et l'ionosphère. A partir d'un modèle de générateur et des données magnétosphériques obtenues à l'aide des satellites, ces modèles permettent de prédire la position, la largeur et l'intensité lumineuse des aurores. Ils prédisent également l'intensité des courants électriques le long des lignes de champ, ce qui permet d'évaluer la quantité d'énergie transférée de la magnétosphère vers l'ionosphère et la haute atmosphère.

Les prédictions théoriques doivent être confrontées aux observations afin d'être validées. A l'IASB, les scientifiques utilisent des observations optiques et radar à partir du sol ainsi que des observations in situ obtenues par des satellites.

4. L'exploration du système solaire

L'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique est impliqué dans l'étude des planètes et en particulier de leur atmosphère depuis de nombreuses années. Principalement tourné vers les planètes telluriques Mars et Vénus, l'Institut porte cependant un intérêt aux atmosphères d'autres planètes ou corps célestes, comme celles de Titan, de Jupiter et de ses satellites, ou encore des comètes. Elles peuvent nous fournir de précieux renseignements sur notre propre atmosphère, son évolution historique et son avenir, et même sur les origines de la vie sur Terre !

Mars et Vénus sont très similaires à la Terre sous de nombreux aspects. Cependant ce sont leurs différences qui nous en apprennent le plus. Mars a perdu sa magnétosphère il y a environ 4 milliards d'années, si bien que le vent solaire interagit directement avec l'ionosphère martienne, arrachant de la matière aux couches extérieures de l'atmosphère de Mars, la rendant ainsi très ténue. L'atmosphère de Mars contient beaucoup de poussières en suspension, ce qui donne à la planète cette couleur rougeâtre.

L'intérêt de IASB pour les missions spatiales a débuté à sa

création. L'Institut a activement pris part à de nombreuses missions vers Mars (Phobos, Mars Express) et Vénus (Venus Express) et a soutenu l'analyse des résultats recueillis par l'atterrisseur Phoenix de la NASA.

Actuellement, l'IASB est encore à bord de Venus Express. Mais après huit ans passés en orbite autour de Vénus, le carburant est presque épuisé. Plus tôt cette année, des opérations audacieuses d'aérofreinage de la sonde Venus Express ont été menées pour explorer la planète d'encre plus près. La fin de la mission est prévue pour décembre 2014.

Aujourd'hui l'IASB prépare un nouvel instrument, NOMAD, qui sera à bord du satellite de la future mission de l'ESA vers Mars, ExoMars. Cette mission se compose de deux parties. La première, composée d'un orbiteur et d'un atterrisseur, sera lancée en 2016. La deuxième partie étant constituée d'un rover et d'une station au sol, sera lancée deux ans plus tard. NOMAD est actuellement en phase de construction et sera livré à l'ESA début 2015.

Grâce aux modèles numériques élaborés par l'IASB, on parvient à traiter, intégrer et interpréter d'énormes quantités de données des missions spatiales actuelles et futures, et donc d'obtenir une vue d'ensemble des atmosphères planétaires.

Les comètes, constituées de gros blocs de glace impure se subliment au fur et à mesure qu'elles se rapprochent du Soleil et développent petit à petit une atmosphère. Les particules de poussière et de gaz piégées dans la glace, s'échappent du noyau et forment la chevelure de la comète qui s'étend dans la direction opposée au Soleil pour former une queue parfois gigantesque.

Il y a plus de 10 ans, la sonde Rosetta de l'Agence Spatiale Européenne a été lancée vers la comète 67P / Churyumov-Gerasimenko. A son bord, on trouve l'instrument ROSINA qui a été co-construit par l'IASB, dont le but est d'analyser la composition des gaz et des ions dans l'atmosphère de la comète et de déterminer en quelle quantité ces substances

sont présentes. Cela peut nous en apprendre beaucoup sur la façon dont la comète a été formée. Parce que les impacts de comète étaient monnaie courante dans le système solaire primitif, il peut aussi nous enseigner sur la façon dont les comètes ont contribué à l'origine de l'atmosphère, des océans et de la vie sur Terre.

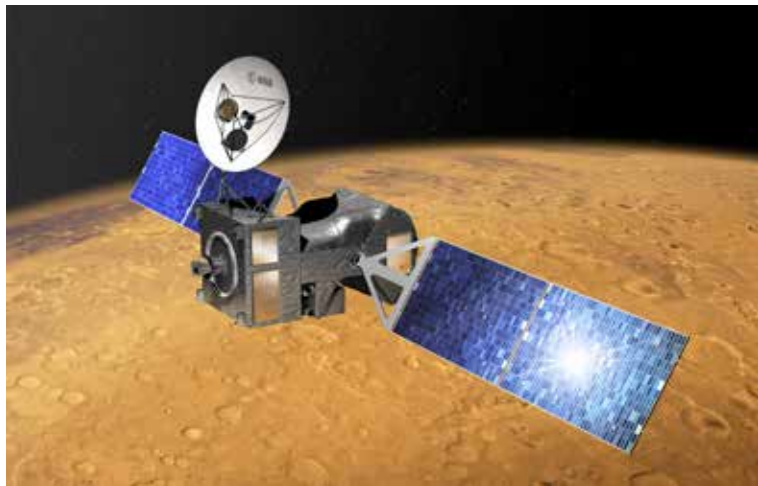
Le 6 août 2014, Rosetta est finalement arrivée près de la comète. Rosetta cartographiera la surface de la comète, afin de trouver un lieu d'atterrissage propice pour son atterrisseur qui a atterri sur la comète le 12 novembre. Rosetta restera près de la comète, y compris lors de son passage au plus près du Soleil en août 2015.

Depuis sa création en 1964, l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique n'a cessé d'être à l'avant-garde dans son domaine. L'IASB a toujours su répondre adéquatement aux besoins changeants de la société, pour l'aider à faire face aux problématiques environnementales et climatiques. Ses domaines de recherche ne cessent de s'étendre.

Depuis plusieurs années, l'Institut a clairement mis l'accent sur la recherche liée au climat. Ainsi, depuis 2010, l'IASB est un partenaire important du programme Climate Change Initiative (CCI) de l'ESA, en particulier en ce qui concerne l'ozone (pour lequel l'IASB coordonne le projet), l'effet de serre et les aérosols. Il joue également un rôle important dans le projet EU FP7 'Quality Assurance for Essential Climate Variables', précurseur du Service climat de Copernicus. L'Institut a su s'adapter et aller de l'avant dans un environnement en pleine mutation et relever les nouveaux défis avec confiance et détermination.



Le satellite VENUS EXPRESS (© ESA)



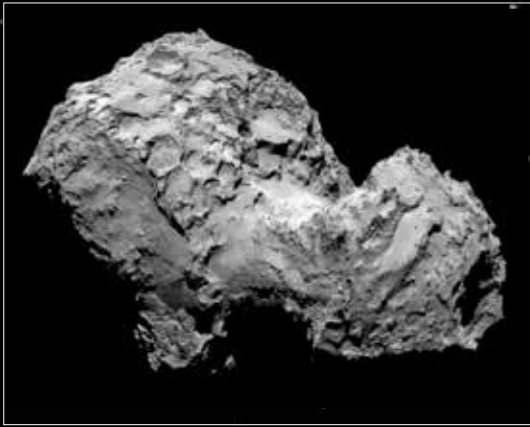
Vue d'artiste de la mission ExoMars qui sera lancée en mars 2016 et à bord de laquelle se trouvera l'instrument NOMAD. © ESA



La comète McNaught au-dessus de l'océan Pacifique. © NASA

Rosetta, le chasseur de comètes, avec à son bord l'instrument ROSINA, construit en partie par l'IASB. © ESA





La caméra de ROSETTA a réussi à capturer les premières images de la comète 67P. Cette photo, prise le 3 août 2014, a montré sa forme de cacahuète. (© ESA)



Plus :
<http://50.aeronomie.be>