



# 50<sup>e</sup> ANNIVERSAIRE DE L'INSTITUT D'AÉRONOMIE SPATIALE DE BELGIQUE: AÉRONOMIE ET PHYSIQUE SPATIALE

**Viviane Pierrard**

**Responsable de la division vent solaire à l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique**

## Introduction

Ainsi que l'a rappelé Paul Simon dans son article du précédent numéro de *Ciel et Terre*, l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) a été fondé le 25 novembre 1964, sous l'impulsion du Baron Marcel Nicolet. Il s'est constitué en détachement du Service d'Aéronomie de l'Institut Royal Météorologique (IRM), suite aux nombreuses découvertes faites dans ce domaine avec l'avènement des premiers satellites. Le premier satellite Spoutnik, lancé le 4 octobre 1957, inaugurerait la conquête spatiale, avec des visées

stratégiques et politiques, mais offrant également une nouvelle dimension à la science de l'espace.

L'aéronomie, officiellement introduite dans les instances scientifiques en 1954, étudie les régions supérieures de l'atmosphère terrestre et plus généralement l'environnement spatial de la Terre, l'espace interplanétaire et les atmosphères planétaires. Vaste sujet qui méritait bien un Institut spécialisé dans ces domaines.

L'IASB, situé sur le Plateau

d'Uccle, inclut actuellement 4 départements : Physique Spatiale, Composition atmosphérique, Radiation solaire dans les atmosphères et Services scientifiques et opérations. L'IASB a bien grandi depuis sa création, puisqu'il compte actuellement plus de 150 salariés, pour la plupart des chercheurs scientifiques.

Dans le présent article, nous nous intéressons plus spécifiquement aux progrès historiques réalisés dans le département de Physique Spatiale, actuellement dirigé par Johan De Keyser et divisé en trois sections : Vent solaire (sous la responsabilité de Viviane Pierrard), Couplage Magnétosphère-Ionosphère (sous la responsabilité de Hervé Lamy) et Magnétosphère (sous la responsabilité de Johan De Keyser). Le département a également une relation privilégiée avec le département des services scientifiques qui met les modèles de météorologie spatiale développés à l'IASB à disposition des scientifiques du monde entier. Le département bénéficie également du soutien logistique de l'équipe des ingénieurs de l'IASB, qui contribuent au développement d'instruments de mesures, ainsi que de celui du B.USOC (*Belgian User Support and Operations Centre*) qui assure notamment les opérations et la transmission des données de satellites en vol.



Figure 1. Le plateau d'Uccle qui abrite l'Observatoire Royal, l'Institut Royal Météorologique et l'Aéronomie Spatiale (les deux bâtiments au fond à droite).



*Figure 2. Quelques membres du département de Physique Spatiale dans les jardins de l'Observatoire en 2002: De gauche à droite : Michel Roth, Joseph Lemaire, Samuel Batteux, Viviane Pierrard, Nicole Meyer-Vernet (Observatoire de Paris Meudon OPM), Norma Crosby, Johan De Keyser, Fabien Darrouzet, Milan Maksimovic (OPM), Hervé Lamy, Yannis Zouganelis (OPM) et Frank Verheest (Université de Gand).*

## Le vent solaire

C'est avec les 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.

Le vent solaire est constitué de particules électriquement chargées qui s'échappent en permanence du Soleil et peuplent l'espace interplanétaire. Ce flux est formé de particules ayant des vitesses 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.

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. Sa découverte fut confirmée au début de l'ère spatiale avec les premières mesures dans l'espace interplanétaire.

Les scientifiques de l'Institut ont contribué au développement de modèles cinétiques basés sur les processus physiques pour expliquer le chauffage de la couronne solaire et l'accélération des parti-

cules du vent solaire. Les vitesses du vent solaire mesurées par la sonde MARINER-II en 1960 atteignaient environ 500 km/s, ce qui était en bon accord avec les prévisions du premier modèle hydrodynamique développé par Eugene Parker en 1958. Joseph Lemaire montra que l'approche cinétique était néanmoins plus appropriée pour un plasma (gaz ionisé) aussi peu dense que le vent solaire et permettait également d'atteindre des vitesses supersoniques du vent solaire. Ce modèle permet également de se départir de certaines hypothèses qui ne sont pas d'application dans les plasmas spatiaux, comme de supposer que les particules ont des distributions maxwelliennes.

La composition du vent solaire est semblable à celle de la couronne, principalement des protons (noyaux d'hydrogène), 10% de particules alpha (noyaux d'hélium) et des traces d'ions lourds (isotopes du carbone, de l'azote, de l'oxygène, du silicium, du fer, du magnésium, etc.). Le vent solaire est ainsi porteur d'un champ magnétique en provenance du Soleil.

En 1990, la sonde ULYSSES fut lancée pour explorer l'espace in-



*Figure 3. Joseph Lemaire, Paul Simon (directeur de l'IASB en 2003) et le roi Albert II lors de sa visite sur le plateau d'Uccle le 15 mai 2003.*



Figure 4. Ludwig Biermann (1907-1986) : Physicien allemand qui fut le directeur fondateur de l'Institut Max Planck pour l'astrophysique et qui postula l'existence du vent solaire.

terplanétaire en dehors de l'écliptique. Pour la première fois, la sonde survola les régions polaires du Soleil, mettant en évidence un vent solaire encore beaucoup plus rapide (800 km/s en moyenne contre 400 km/s dans l'écliptique) issu de régions appelées trous coronaux en période de minimum d'activité solaire. L'équipe vent solaire de l'IASB,

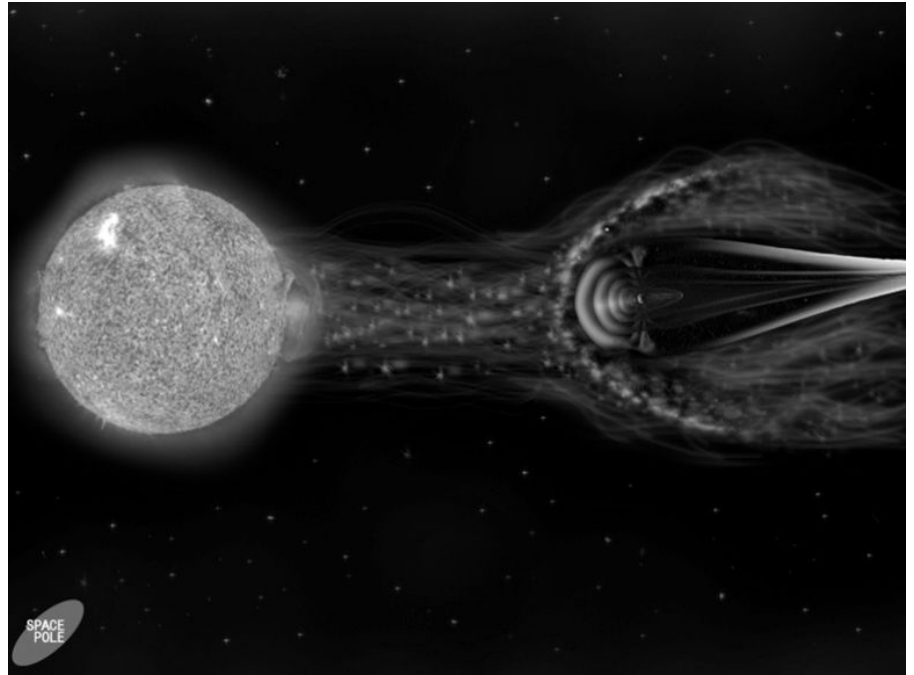


Figure 5. Le vent solaire et le champ magnétique terrestre qui nous protège de ce flux de particules chargées.

en collaboration avec l'Observatoire de Paris-Meudon, a alors mis en évidence la présence inattendue de particules de haute énergie en étudiant les fonctions de distributions des vitesses des électrons du vent solaire. Ils ont montré leur influence sur la température et l'accélération du vent solaire.

A l'IASB, nous avons construit des modèles détaillés pour décrire ce vent solaire. Ces modèles permettent de comprendre pourquoi le vent solaire (qui constitue la partie extérieure de l'atmosphère solaire) est tellement chaud, et pourquoi ce vent possède une vitesse de parfois plus de 800 km/s. Nous étudions également les effets des ondes sur les particules



Figure 6. Eugene N. Parker (né en 1927) : physicien solaire américain qui établit le premier modèle hydrodynamique de vent solaire en 1958.

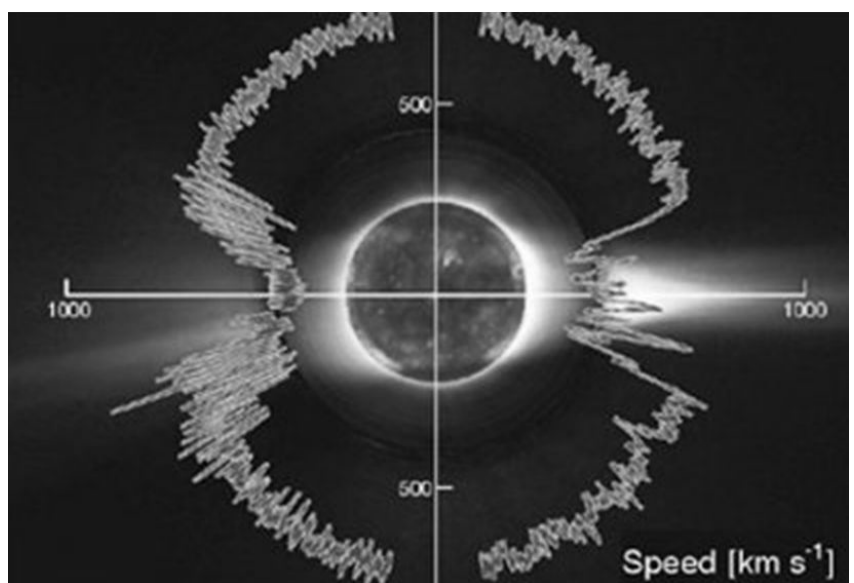


Figure 7. Vitesse du vent solaire mesurée par Ulysses dans l'écliptique et dans les régions de hautes latitudes.



Figure 8. Hannes Olof Gösta Alfvén (1908-1995), physicien suédois des plasmas qui reçut le prix Nobel en 1970 pour ses travaux en magnétohydrodynamique. Il décrivit également les ondes qui portent son nom, les ondes d'Alfvén.

des plasmas spatiaux, en particulier les effets des ondes d'Alfvén, qui portent le nom du physicien des plasmas qui les a découvertes.

### 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 appelé la magnétosphère et cette région est particulièrement étudiée à l'IASB. 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 donne lieu à des phénomènes tels que les aurores polaires et les orages géomagnétiques, qui modifient la dynamique des régions contenues dans la magnétosphère et qui ont aussi une influence sur la haute atmosphère.

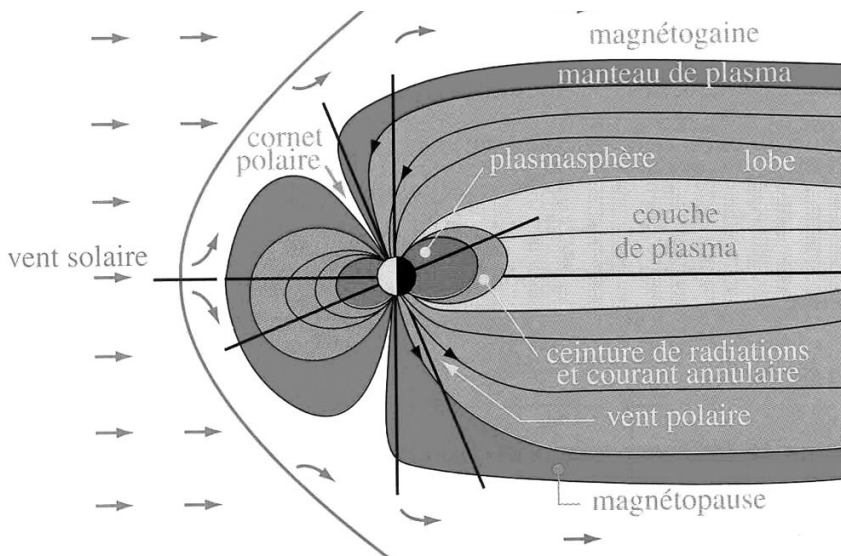


Figure 9. La magnétosphère de la Terre et ses différentes régions.

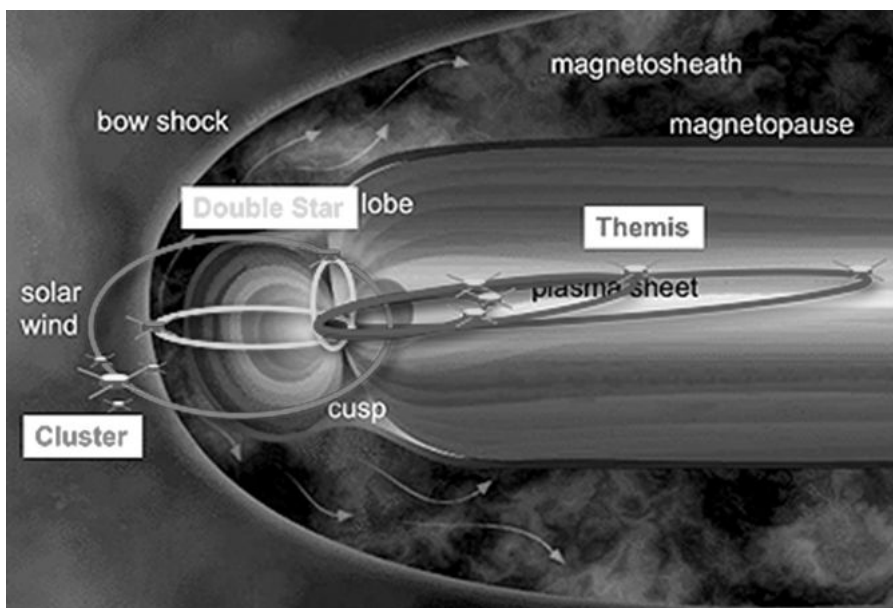


Figure 10. Les satellites CLUSTER, Themis et Double Star pour l'exploration de la magnétosphère de la Terre.

Pour bien comprendre les perturbations de la magnétosphère par le vent solaire, il est essentiel de bien connaître le vent solaire, qui a aussi des effets sur les autres planètes de notre système solaire. La zone d'interaction forme la frontière extérieure de la magnétosphère. L'IASB utilise des observations spatiales, obtenues notamment par les quatre satellites *Cluster* de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), pour étudier le comportement de cette couche frontière. 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 changements abrupts mais temporaires de la structure de la magnétosphère.



Figure 11. James A. Van Allen (1914-2006), physicien et astronome de l'Université d'Iowa (USA) qui découvrit les ceintures de radiations.

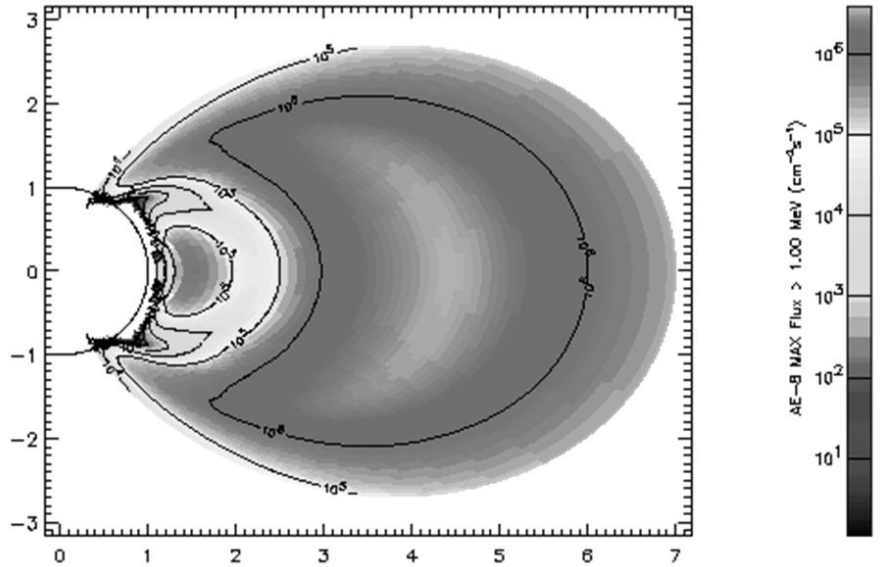


Figure 12. Flux des électrons de plus de 1 MeV dans la ceinture interne et la ceinture externe de Van Allen (obtenu avec le modèle empirique AE8 sur SPENVIS). Voir également page 2 de couverture pour une version en couleurs de la Figure.

### Les ceintures de radiations

Les ceintures de radiations sont des régions annulaires qui encerclent la Terre et qui sont peuplées de particules de haute énergie piégées dans le champ magnétique terrestre. Elles furent découvertes en 1958 par James Van Allen de l'Université d'Iowa qui avait installé un compteur Geiger à bord du premier satellite américain Explorer 1. 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.

On peut considérer ces particules comme une forme de radiation ionisante. Elles représentent un danger réel pour les astronautes et les satellites autour de la Terre. L'IASB a entrepris l'étude des sources et des pertes de ces particules et développe des modèles pour déterminer les variations de flux durant les

orages géomagnétiques.

En collaboration avec le CSR (Center for Space Radiations) de l'UCL (Université Catholique de Louvain), l'IASB a développé un nouveau détecteur tout à fait révolutionnaire pour mesurer cette radiation ionisante, le «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

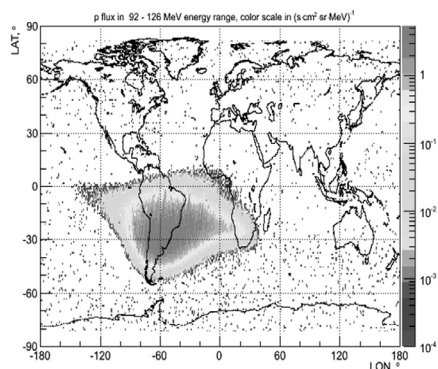


Figure 13. Flux des protons observés par l'instrument EPT à 820 km d'altitude : l'Anomalie Sud Atlantique. Voir également page 2 de couverture pour une version en couleurs de la Figure.

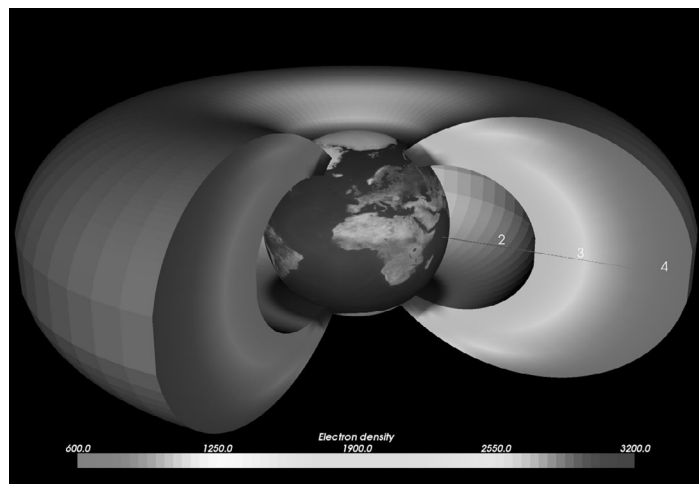


Figure 14. Densité des électrons dans la plasmasphère selon le modèle développé à l'IASB. Voir également page 2 de couverture pour une version en couleurs de la Figure.



Figure 15. Edward Victor Appleton (1892-1965), physicien anglais qui reçut le prix Nobel en 1947 pour ses contributions à la connaissance de l'ionosphère.

d'électrons, de protons et des ions d'hélium à une altitude de 820 km.

### La plasmasphère

La plasmasphère constitue l'extension de l'ionosphère 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 de plasmasphère a été développé à l'IASB pour déterminer le nombre de particules dans la plasmasphère ainsi que sa limite extérieure, la plasmapause, qui dépendent de l'interaction entre le vent solaire et la magnétosphère. La plasmasphère est moins étendue lors des orages géomagnétiques que pendant les périodes calmes. Les résultats du modèle sont ensuite comparés aux observations satellitaires, comme celles de CLUSTER et IMAGE.

### Couplage magnétosphère-ionosphère

L'ionosphère est la couche supérieure de l'atmosphère terrestre ionisée par les rayons ultraviolets solaires. Elle s'étend depuis environ 80 km d'altitude jusqu'au-delà de 1000 km. 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. Le physicien anglais Appleton confirma expérimentalement l'existence de l'ionosphère en 1925.

Cette couche constitue la transition entre l'atmosphère et l'espace. L'ionosphère est composée de gaz partiellement ionisé, c'est pourquoi elle conduit l'électricité.

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 cou-

rants 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.

### Aurores polaires

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 devenir visibles en Belgique.

Kristian Birkeland établit en 1896 que les aurores sont créées par l'arrivée de particules du vent solaire interagissant avec les molécules de l'atmosphère terrestre.

Nous savons que les aurores sont

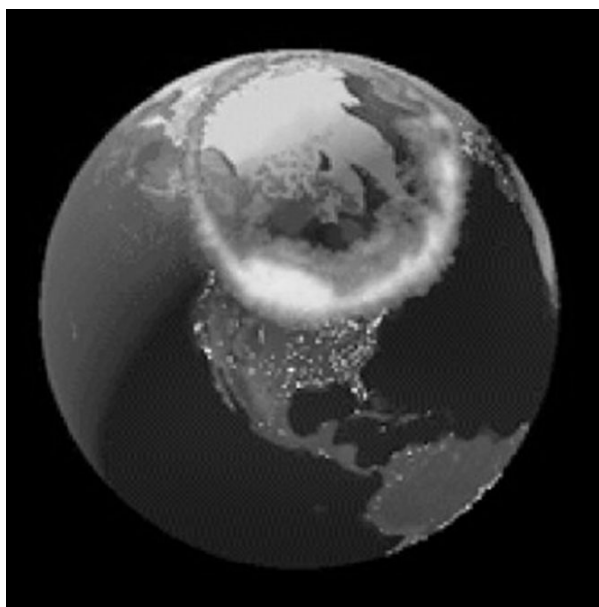


Figure 16. Ovale auroral boréal observé depuis l'espace.



Figure 17. Aurore observée en Alaska en avril 2000. Voir également page 2 de couverture pour une version en couleurs de la Figure.

créées par des électrons accélérés le long des lignes de champ magnétiques avec des énergies pouvant atteindre quelques milliers de Volts, mais le mécanisme d'accélération reste encore un mystère. En plongeant dans les couches supérieures de l'atmosphère, les électrons énergétiques entrent en collision avec les atomes neutres présents vers 90-120 km d'altitude et génèrent ces spectaculaires émissions lumineuses : les aurores. A cause de la géométrie du champ magnétique terrestre, les aurores sont observées principalement dans les régions polaires. En fonction de l'énergie des électrons précipitant et de l'origine des atomes cibles, les aurores peuvent prendre diverses couleurs qui vont du vert pour les aurores créées à basse altitude au rouge pour celles à plus haute altitude. Les émissions aurorales sont très dynamiques : leur forme et leurs couleurs varient sur des échelles de temps d'à peine quelques minutes. Etudier la dynamique des aurores permet aux scientifiques de mieux comprendre le couplage complexe entre l'ionosphère et la magnétosphère ainsi que les processus d'accélération des électrons.

A l'IASB, nous essayons d'identifier les processus à l'origine des

arcs auroraux. En particulier, nous cherchons à identifier les générateurs d'énergie qui accélèrent les électrons vers l'ionosphère ainsi que la région de la magnétosphère d'où ils sont originaires. Pour cela, nous développons des modèles théoriques et numériques de couplage entre la magnétosphère et l'ionosphère. A partir d'un modèle de générateur et de données magnétosphériques obtenues par 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 nous 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, nous utilisons des observations optiques et radar à partir du sol ainsi que des observations in situ obtenues par des satellites. Les observations radar sont réalisées avec le radar EISCAT (*European Incoherent Scatter Radar*) localisé à Tromsø, au nord de la Norvège, tandis que les observations optiques sont obtenues grâce aux stations du réseau

ALIS (*Auroral Large Imaging System*), situées dans les régions septentrionales de la Suède et de la Norvège.

Bien d'autres activités ont encore été développées à l'IASB en rapport avec la physique spatiale. Par exemple, le réseau de stations radio BRAMS (*Belgian Radio Meteor Stations*) pour détecter les météores. Pour en savoir plus sur les diverses activités de l'IASB en aéronomie spatiale, rendez-vous sur [www.aeronomie.be](http://www.aeronomie.be).

## Conclusions et perspectives

Les scientifiques de l'IASB ont apporté des contributions importantes au domaine de la physique spatiale depuis la création de l'IASB en 1964. Pour célébrer dignement le 50<sup>e</sup> anniversaire de l'Institut, diverses activités sont prévues en 2014 dont certaines peuvent intéresser le grand public.

Citons en particulier :

- 25-04-2014: Mise en service d'un **site web** dédié aux 50 ans de l'IASB <http://www.aeronomie.be/fr/nouvelles-presse/2014-50ans-iasb-planning.htm>
- 26-09-2014: **Publication d'une édition anniversaire pour les 50 ans de l'aéronomie** (livre)
- 01-10-2014: **Exposition** « 50 ans » au Planétarium et à l'Euro Space Center Redu
- 11-10-2014 et 12-10-2014: Journées **Portes Ouvertes** Pôle Espace (centrées sur le 50<sup>e</sup> anniversaire de l'IASB)
- 24-10-2014: Edition spéciale du **Science Connection**
- 25-11-2014: **Séance académique** célébrant le jour de l'anniversaire de l'IASB.