

Votre dossier de candidature doit développer les cinq rubriques ci-dessous sans excéder une douzaine de pages. Ce dernier est à adresser au service du personnel de la délégation régionale dont vous relevez et doit comporter impérativement l'avis du directeur de l'unité d'accueil. La date limite de dépôt des dossiers auprès de la délégation régionale est fixée au 03 février 2016.

Nom ► Bertaux

Prénom ► Jean-Loup

Institut ► IPSL/LATMOS

Section ► 19

Date de radiation des cadres ► 01/09/2007
(jj/mm/aaaa)

Grade actuel ► DRCE2 émérite

Date de naissance ► 08/01/1942

Affectation actuelle ► LATMOS

Adresse ► 11 Boulevard d'Alembert, 78280 Guyancourt

Affectation prévue pour l'éméritat ► LATMOS

Adresse ► 11 Boulevard d'Alembert, 78280 Guyancourt

1- PRINCIPALES ÉTAPES DE LA CARRIÈRE ET AFFECTATIONS SUCCESSIVES

2007 - 2016	Directeur de Recherches CNRS émérite au LATMOS
2005	Directeur de Recherches de classe exceptionnelle 2ème au CNRS (SA)
2001	Directeur de Recherches de classe exceptionnelle 1 ^{er} au CNRS
1987 - 2000	Directeur de Recherches de 1ère classe au CNRS
1980 - 1985	Directeur Adjoint du Service d'Aéronomie du CNRS
1975 -	Sous-directeur du Service d'Aéronomie du CNRS (Directeur J. BLAMONT)
1974 -	Maître de Recherches au CNRS
1972 - 1974	Chargé de Recherches au CNRS
1970 - 1972	Attaché de Recherches au CNRS
1964 - 1970	Boursier du CNES (Botte Recherche)
1963 - 1964	Service militaire (Détaché à la DRME)
1961 - 1963	Elève de l'Ecole Polytechnique

A 74 ans accomplis, cela fait cinquante deux ans que je consacre mon activité scientifique aux recherches concernant le Système Solaire; la Terre en fait bien entendu partie, elle qui en est d'ailleurs le fleuron, seule planète connue à abriter la vie. Depuis environ 20 ans je me suis également un peu impliqué dans la recherche d'autres systèmes planétaires par la méthode des vitesses radiales.

Recruté par Jacques Blamont en 1963 au Service d'Aéronomie, j'y ai fait toute ma carrière scientifique. Après 7 années de bourse CNES je suis entré au CNRS, où j'ai toujours fait partie de la

Section 14 (Système Solaire et Univers lointain). Mais en 2004, le contour des différentes sections du secteur SDU a été modifié. En particulier, l'étude des atmosphères planétaires a été incluse dans le contour de la nouvelle section 19. Le barycentre de mes activités, qui contenaient déjà ma forte implication depuis 1988 dans les études stratosphériques avec GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars, instrument dont j'ai été l'instigateur) sur ENVISAT a donc complètement basculé en Section 19, puisque j'étais responsable (PI) de deux expériences spatiales dédiées à l'étude de l'atmosphère de Mars (SPICAM sur Mars Express/ESA, en orbite autour de Mars, et de Vénus (SPICAV sur Venus Express/ESA, tombée dans l'atmosphère en orbite autour de Vénus en Novembre 2014).

Très logiquement, j'ai donc décidé de rejoindre cette nouvelle Section 19 en 2004. Elle a bien voulu m'accorder en 2006 et 2011 l'éméritat pour 5 ans, et je demande maintenant son renouvellement pour une nouvelle tranche de 5 ans, au vu des activités que je poursuis.

En 2010, le Service d'Aéronomie a cessé d'exister, pour se fondre dans un nouveau laboratoire : le LATMOS. J'ai quitté le fort de Verrières, où j'avais fait toute ma carrière, pour le nouveau bâtiment de l'OVSQ abritant le LATMOS à Guyancourt sur le campus de l'UVSQ.

Je fais actuellement partie des équipes IMPEC (Planètes, comètes) et HEPPI (héliosphère, soleil) du LATMOS. Je suis membre du Quality Working Group de l'ESA pour l'instrument GOMOS destiné à la surveillance de l'Ozone terrestre, après en avoir été l'instigateur. Je suis actuellement PI d'une expérience spatiale récemment défunte SPICAV sur Venus Express (mais sur laquelle il reste beaucoup de travail à faire), et co-I sur deux autres (après en avoir été PI) : SWAN sur SOHO, et SPICAM sur Mars Express. Je suis aussi co-Investigateur sur deux instruments de Rosetta : la caméra Osiris, et le spectromètre Ultraviolet Alice. Je suis co-I sur la suite d'instruments russes ACS, spectromètres infra-rouges placés à bord de la mission ESA Exomars pour un lancement en 2016.

2- PRINCIPALES CONTRIBUTIONS À LA RECHERCHE

Je ne mentionne ici que l'état récent de mes recherches actuellement en cours, en essayant toutefois de les replacer dans un contexte historique.

Mes recherches peuvent être regroupées selon cinq thèmes : l'atmosphère de la Terre avec sa couche d'ozone, les atmosphères planétaires, le gaz interplanétaire/interstellaire, les comètes, et la recherche concernant les exo-planètes. J'ai principalement inventé et/ou développé de nouveaux instruments de mesure embarqués à bord de missions spatiales (CNES, NASA, ESA, URSS), et tenté d'en tirer le plus possible de nouvelles informations scientifiques. J'ai encadré 26 thèses, dont celles d'au moins six chercheurs maintenant internationalement reconnus.

1. Atmosphère de la Terre :

1.1 Hydrogène et Deutérium.

Dans mon travail de Thèse (Directeur Jacques Blamont) consacré à l'exosphère terrestre (la géocouronne d'hydrogène), j'ai démontré que l'échappement non thermique de l'hydrogène terrestre est au moins aussi important que l'échappement thermique (dit "de Jeans"), un facteur dont il faut absolument tenir compte dans l'évolution des atmosphères planétaires, par exemple pour Mars, dont l'atmosphère est actuellement trop ténue pour permettre l'eau liquide à la surface, alors qu'elle y a certainement existé dans son premier milliard d'années.

En 1983 et en 1992, nous avons fait voler l'instrument ALAE sur les missions Spacelab-1 et ATLAS-1, ce qui nous a permis de mesurer pour la première fois le Deutérium dans la haute atmosphère de la terre.

Cette expertise sur les exosphères d'hydrogène et Deutérium a été transmise auprès de Eric Quémerais (DR CNRS au LATMOS, Directeur adjoint), et de Jean-Yves Chaufray (CR CNRS au LATMOS), pour une application à Mars et Vénus, où l'enjeu est de tenter de déterminer le flux d'échappement d'hydrogène neutre, thermique et non thermique.

1.2 GOMOS sur ENVISAT pour la surveillance de l'ozone.

En 1988 j'ai pris l'initiative de proposer l'instrument GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars) à l'ESA, qui a pris en charge sa réalisation sur la plateforme ENVISAT (lancée le 28 Février 2002, perdue le 8 Avril 2012). Cet instrument de 160 kg a permis d'obtenir plus de 800.000 profils verticaux d'ozone et d'autres constituants (H_2O , NO_2 , NO , température, aérosols) de la stratosphère en 10 ans, tout autour de la terre, en observant systématiquement une trentaine d'occultations d'étoiles par orbite. On doit pouvoir en tirer la tendance de changement de concentration de l'ozone en fonction de l'altitude, un élément essentiel pour valider notre compréhension des facteurs et des mécanismes impliqués dans la destruction de la couche d'ozone, et pour permettre de prévoir l'évolution future et d'en tirer d'éventuelles décisions politiques, à l'instar de la réduction mondiale de production des CFC (Protocole de Montréal en 1987).

La plateforme ENVISAT a embarqué GOMOS et 8 autres instruments pour un coût de 2.4 Gigaeuros. En réponse à l'Appel d'Offre d'utilisation des données ENVISAT, il y a eu 106 propositions d'utilisation des données de GOMOS. C'est donc une vaste communauté (scientifiques européens de la chimie atmosphérique) qui bénéficie en fin de compte de mon initiative. L'ESA reconnaît mon rôle dans GOMOS: j'ai été membre du Scientific Advisory Group de l'ESA pour GOMOS. J'ai été le "chairman" du Data Processing and Algorithm Development Group mis en place pour GOMOS par l'ESA (1996-2000). J'ai dirigé au SA un groupe de 9 chercheurs et ingénieurs pour développer les algorithmes d'inversion des données pour le compte de l'ESA, en relation avec un industriel (ACRI, Sophia Antipolis). Dans le cadre d'un contrat CEE, j'ai initié un projet d'assimilation séquentielle des mesures de GOMOS dans un modèle de circulation et chimie stratosphérique, une toute nouvelle thématique. Alain Hauchecorne est désormais le moteur principal des activités GOMOS. En particulier, il a mis au point une méthode d'analyse des mesures en vol qui montre que la précision de GOMOS atteint mieux que 1% dans la haute stratosphère, et environ mieux que 2 à 3 % dans l'ensemble de la stratosphère, malgré le phénomène des scintillations beaucoup plus difficiles à corriger que prévu. Ce que nous entendons par le mot « précision » est en fait la fidélité : la dispersion des mesures quand on mesure toujours la même chose.

Depuis le lancement en 2002, j'ai fait partie du Expert Support Laboratory (ESL) de GOMOS puis du Quality Working Group, un groupe d'experts constitué autour d'un industriel financé par l'ESA: ACRI. Le QWG est chargé de valider les algorithmes de traitement des mesures de GOMOS, d'en proposer de nouveaux, et de prendre les grandes décisions sur le programme d'observation de GOMOS. Malgré l'arrêt d'ENVISAT, nous avons dû repenser déjà deux fois les algorithmes de GOMOS : tâche ingrate, mais ô combien nécessaire pour toute la communauté, puisque sa qualité conditionne la qualité des mesures finales de niveau 2 (concentration en fonction de l'altitude de O_3 , NO_2 , H_2O , NO_3 , air (O_2), aérosol, et température). En particulier, les scintillations plus difficiles à corriger nous ont amené à réviser profondément les algorithmes d'inversion du niveau 2 (principalement Alain Hauchecorne et Francis Dalaudier).

Grâce à ces algorithmes rénovés, toutes les mesures ont pu être retraitées pour distribution : elles représentent l'ensemble de mesure d'ozone le plus précis, et le plus étendu en couverture spatiale (longitude, latitude, altitude : 12 à 100 km). Nous avons de même obtenu, pour NO_3 , la première couverture mondiale (Alain Hauchecorne), ce qui nous a permis d'établir une climatologie de l'ozone, NO_2 , et NO_3 d'une qualité sans précédent. C'est à ce prix que l'on pourra comprendre tous les détails des mécanismes qui gouvernent production et destruction de l'ozone, par confrontation avec des modèles, et leur nécessaire modification: étape nécessaire si l'on veut faire des prédictions crédibles sur l'évolution future de la couche d'ozone terrestre, indispensable à notre existence.

Au cours des années 2009-2010, l'équipe scientifique du QWG de GOMOS (principalement au LATMOS, à l'IASB de Bruxelles et au Finnish Meteorological Institute) a publié un ensemble de 15 articles scientifiques dans la revue Atmospheric Chemistry and Physics, dans un numéro spécial.

J'ai mené la rédaction de l'article de synthèse décrivant GOMOS et ses principaux résultats : 58 pages.

Enfin, nous avons compris les effets instrumentaux qui provoquent un biais sur la vapeur d'eau : couplage entre les scintillations, le tracking de l'étoile, et le manque d'homogénéité des pixels du détecteur CCD, à l'échelle sub-pixel : ceci grâce en particulier au travail remarquable de Francis Dalaudier. J'ai récemment participé (2015-2016) à une étude comparative des mesures de vapeur d'eau stratosphériques, le projet Wavas-II, mené par Gabriella Stiller à Karlsruhe. Il en ressort que les mesures de GOMOS de H₂O présentent encore un biais négatif au-dessus de 23 km, mais sont excellentes en dessous de 20 km ; et leur résolution en altitude permet de mieux cerner la zone critique UTLS (Upper Troposphere Lower Stratosphere) où s'opère la pénétration de la vapeur d'eau dans la stratosphère. Une augmentation climatique de la température à la tropopause augmenterait la concentration de H₂O dans la basse stratosphère, avec les effets néfastes d'une destruction de l'ozone et d'une augmentation de l'effet de serre.

En ce qui concerne les tendances de l'ozone, nous avons été un peu surpris de l'amplitude de ses variations interannuelles, qui gênent la détermination d'une tendance à long terme. D'autant plus que, avec le protocole de Montréal de 1987 et l'arrêt des CFC, on s'attend par modélisation à une remontée lente jusqu'en 2050 et la récupération des quelques 3% qui nous manquent à cause des CFC, dont la concentration ne diminue que lentement. En tout état de cause, GOMOS aura produit un « bench mark » de l'ozone sur 10 ans. La technique de l'occultation stellaire donnant une mesure absolue à partir d'une mesure relative (absorption), quand elle sera répétée dans le futur, elle sera directement comparable au « bench mark » de GOMOS.

L'atmosphère de Mars présente de grandes similitudes avec la stratosphère terrestre, et leur approche simultanée permet un exercice très instructif de planétologie comparée. En particulier, la quantité d'ozone sur Mars est entièrement dictée par la quantité de vapeur d'eau, dont la présence détruit l'ozone par des réactions de destruction catalytique connues. Ce cycle catalytique existe dans la stratosphère terrestre, mais ce n'est pas le plus important des cycles de destruction à l'heure actuelle. Cependant, avec le réchauffement global, on peut s'attendre à une augmentation d'eau dans la stratosphère terrestre (déjà perceptible selon certains, +50 % en 20 ans, mais controversés par d'autres), et une destruction accrue d'ozone; où l'on voit comme il a été important de valider notre compréhension du couplage chimique eau-ozone (analyse des mesures de SPICAM par Franck Lefèvre au LATMOS), qui est dominant sur Mars, et pourrait devenir inquiétant sur Terre à l'horizon de 50 ans. Ce genre de similitude entre atmosphère de la terre et celles des planètes (au moins les atmosphères des planètes telluriques) justifie pleinement le regroupement au sein d'une même section du CNRS.

2. Atmosphères planétaires :

J'ai participé, dès 1970-1971 à l'élaboration du programme franco-soviétique d'exploration de Vénus, puis de Mars.

2.1. Mars: Après des expériences Lyman alpha avec cellule à absorption d'hydrogène sur les sondes Mars 4, 5, 6, 7 (1973-1974), j'ai été depuis 1987 le responsable (P.I.) de l'expérience SPICAM sur la mission Mars 96, qui devait sonder l'atmosphère de Mars (CO₂, H₂O, O₃, poussières) par la méthode des occultations solaires et stellaires multi-spectrales. On sait le sort tragique de cette mission retombée sur terre: la frustration fut immense, non d'avoir perdu 10 années sur le développement de l'expérience, mais surtout parce qu'on fut privé des résultats scientifiques qu'on en attendait. Cependant, j'ai pu rebondir en plaçant à bord de Mars Express une version allégée de SPICAM (4.7 kg au lieu de 46 kg), en tant que PI d'une équipe de 37 co-Is. J'ai pu ajouter un canal IR dédié à la vapeur d'eau d'une nouvelle technologie: AOTF (Acousto Optic Tunable Filter),

développé par Oleg Korablev à l'IKI de Moscou. Ce dernier canal (ozone et H₂O) permet une résolution spectrale de 2000 pour une masse de 700 grammes.

Depuis le 25 Décembre 2003, Mars Express est en orbite autour de Mars, et fonctionne de façon remarquable (malgré une bévée industrielle sur les connexions électriques des panneaux solaires qui l'a privé de 30 % de sa puissance électrique).

En janvier 2016, le canal IR fonctionne encore parfaitement tandis que le canal UV ne fonctionne plus. Au bilan des 12 premières années, on constate que nous avons effectué un certain nombre de « premières » :

- les premières occultations d'étoile en orbite autour d'une autre planète, permettant la mesure du profil vertical d'ozone, de température et densité par l'absorption du CO₂. Environ 2 ou 3 profils par semaine ont été collectés, avec l'objectif de valider (ou invalider et améliorer) les modèles climatiques nécessaires pour les opérations d'aérocapture, aérofreinage, et EDL (Entry, Descent, Landing). François Forget (2008) a confronté nos résultats de densité et température (50-140 km) à son modèle, avec la découverte de l'influence très forte de la poussière, qui chauffe l'atmosphère et la dilate sur toute sa hauteur.
- Nous avons détecté l'ozone de nuit, mais avec une distribution saisonnière un peu différente de celle prévue par les modèles. Nous détectons également des couches nuageuses dans bien des occultations, qui semblent empêcher l'expansion verticale des poussières vers le haut.
- La première mesure simultanée de l'ozone et la vapeur d'eau, en observant au nadir l'absorption de ces gaz dans le spectre solaire diffusé par le sol et les poussières. Nous avons ainsi obtenu la première climatologie complète de l'ozone sur une année martienne (Thèse de Séverine Perrier). La comparaison avec le modèle SA-LMD du GCM chimique a permis à Franck Lefèvre d'améliorer son modèle, en incluant la réaction hétérogène des HOx (H, OH, HO₂) avec les cristaux de glace, au sol ou dans les nuages. Ces radicaux sont destructeurs de l'ozone, et leur disparition entraîne un surcroît d'ozone bien observé par SPICAM, par rapport à la modélisation sans cette nouvelle réaction (Lefèvre et al., Nature, 2008).
- La première détection des aurores martiennes, se produisant au-dessus des régions crustales porteuses d'un champ magnétique rémanent, vestige ancien d'un champ intrinsèque (Bertaux et al., 2005).
- La première détection des lueurs nocturnes (nightglow) sur Mars, avec l'émission de NO, produite par recombinaison de O et N, transportés par la circulation thermosphérique depuis le côté jour (où ils sont le résultat de la photodissociation de CO₂ et N₂). La cartographie de ces émissions procure de fortes contraintes sur les modèles de circulation générale (Bertaux et al., 2005).
- L'étude approfondie de l'ionosphère-haute atmosphère par les émissions aéronomiques de O, H, CO, CO⁺, et CO₂⁺. Ces émissions aéronomiques de la haute atmosphère étaient déjà connues, mais pratiquement plus étudiées depuis 1969 et Mariner 9.
- la découverte de la présence de glace d'eau au pôle sud de Mars (simultanément avec OMEGA), et la première mesure de l'albedo UV des glaces de H₂O et CO₂.
- la découverte de nuages de glace de CO₂ à très haute altitude (85-100km) (Montmessin et al., 2006, Icarus)
- les mesures de vapeur d'eau au nadir (colonne totale) de Mars Express (dont celles de SPICAM) étaient plus faibles que la climatologie américaine en vigueur depuis 10 ans. Le PI américain a depuis revu à la baisse ses mesures d'un bon tiers, à la suite d'un atelier de travail réuni à l'ISSI sur ce sujet. Par ailleurs, en occultation solaire, on a pu démontrer que l'eau était souvent en état de supersaturation (parfois d'un facteur 10) au-dessus de l'hygropause (Maltagliati et al., Science, 2011).
- La description de l'exosphère de H et de O, par ses émissions à H Lyman alpha et O 130.4 nm (J.Y. Chaufray). Le jeune chercheur US Mike Chaffin, qui n'appartenait pas à l'équipe SPICAM, a fait une découverte importante (qui nous avait échappé) en examinant les mesures H Lyman

de SPICAM : une variation temporelle sensible de la taille de l'exosphère de Mars. Un peu auparavant, John Clarke de Boston University avait également constaté (avec des images HST (Hubble Space Telescope) une variation importante de la couronne H de Mars en quelques semaines. Il semble se dessiner une variation saisonnière très importante de la couronne H de Mars, pas prévue par la théorie photo-chimique 1D en vigueur, mais reproduite par un modèle 3D (Chaufray et al., 2015). Cette anecdote illustre l'importance de mettre à la disposition du monde entier les résultats acquis par vos expériences spatiales. D'autres que vous y trouveront des choses qui vous avaient échappé : il ne faut rien y voir de déshonorant, au contraire.

J'ai organisé la publication de dix papiers couvrant presque tous les aspects de SPICAM dans un numéro Spécial SPICAM de Journal of Geophysical Research Planet (2006). Nous tenons chaque année une réunion scientifique SPICAM/SPICAV qui regroupe environ 35 participants, à La Londe des Maures, puis à Poros (Grèce). Par ailleurs, Franck Montmessin a bien voulu me remplacer en tant que PI de SPICAM en 2009.

2.2.Vénus:

Sur les orbiteurs russes Venera-9 et 10, j'avais placé des cellules à absorption de H et D pour étudier l'exosphère d'hydrogène de la planète Vénus sur l'instrument de Vladimir Kurt. Sur les sondes de flyby Venera 11 et 12, V. Kurt avait construit un spectromètre UV avec un réseau holographique français et des détecteurs fournis par le Service d'Aéronomie. Mais c'est la mission Venus Express de l'ESA qui nous a apporté à nouveau une occasion d'étudier la question de la présence de HDO dans la haute atmosphère, de l'échappement du Deutérium, et de l'histoire de l'eau sur Vénus. Actuellement, il y a de la vapeur d'eau, qui, si elle était liquide, ferait une épaisseur de 3 cm. Comme le rapport D/H est enrichi d'un facteur 150, cela veut dire que, s'il n'y a pas de HDO dans la haute atmosphère, alors l'échappement de D est nul, et il n'y a jamais eu plus de 4,5 mètres d'eau dans Vénus. Si HDO est présent, et son échappement significatif, alors il y a pu avoir bien davantage d'eau sur Venus.

La mission Venus Express a été lancée depuis Baikonour le 9 Novembre 2005. En continuation de Mars Express, l'expérience SPICAM fut reconduite sur Venus Express (devenue SPICAV) sous ma responsabilité, avec en addition un canal à occultation solaire à haute résolution spectrale, permettant de mesurer le rapport HDO/H₂O dans la haute atmosphère de Vénus. Ce spectromètre SOIR (Solar Occultation in the Infra-Red) est d'un nouveau concept (inventé par mon collègue russe Oleg Korablev et moi-même). Il combine un réseau échelle procurant une haute résolution spectrale avec un AOTF comme séparateur d'ordre. Il a des performances environ 5 fois meilleures que PFS sur Mars Express en résolution spectrale (expérience qui a fait la découverte controversée du méthane), et pèse 6 kg au lieu de 30 kg pour PFS. Le CNES ne pouvant financer SOIR, il a été fabriqué par nos collègues belges de l'IASB à Bruxelles (avec un sous-traitant, OIP). Depuis la mise en orbite le 11 Avril 2006 jusqu'à la perte de Venus Express en Novembre 2014 (à bout du carburant nécessaire pour remonter le périhélie) les trois spectromètres ont fonctionné parfaitement. Nous donnons un bref résumé des observations les plus intéressantes.

HDO : nous avons pu effectuer la première détection de HDO avec SOIR/ Venus Express en occultation de façon parfaitement nette: il y a donc de l'échappement de D sur Vénus, il y a eu plus d'eau que les 4,5 m cités plus haut, mais nous n'avons pu encore quantifier le phénomène. Le rapport HDO/H₂O est d'ailleurs 2 fois plus grand que dans la basse atmosphère, ce qui peut s'expliquer par le fait que la molécule HDO est moins sensible à la photo-dissociation par le rayonnement UV solaire (selon le Professeur Yuk Yung, Caltech).

SO₂ et le volcanisme de Vénus: j'avais obtenu l'unique profil vertical du SO₂ depuis les nuages

jusqu'au sol (avec le spectromètre ISAV en 1985 sur les sondes de descente de VEGA, Bertaux et al, 1996), une donnée fondamentale pour l'équilibre à court terme de l'atmosphère avec les roches du sol, qui ont tendance à y fixer le SO_2 en sulfate de calcium. L'existence actuelle du SO_2 dans l'atmosphère de Vénus est-elle liée à un volcanisme "récent" (à l'échelle de l'année ou 10^5 ans), comme le prétendent un certain nombre de scientifiques, ou résulte-t-elle de l'équilibre chimique entre les roches et l'atmosphère ? La question est encore ouverte, et la détection de volcanisme actuellement actif est un objectif important de Venus Express (notamment du spectromètre infrarouge VIRTIS, qui a publié une détection sporadique d'un sol un peu plus chaud qu'avant et après).

Grâce aux occultations solaires en UV de SPICAV, nous avons découvert une nouvelle couche de SO_2 , s'étendant de 85 à 100-110 km d'altitude, dont l'existence était jusqu'alors insoupçonnée (Belyaev et al, 2011). L'équipe de Yuk Yung en donne l'explication : on sait qu'une brume légère de gouttelettes de H_2SO_4 s'étend effectivement bien au-dessus des nuages ; quand sa température augmente légèrement, il y a évaporation et photo-dissociation, re-fabriquant du SO_2 au passage, phénomène qui n'était jusqu'alors pas inclus dans les modèles, et dont il faut tenir compte quand on s'intéresse au « geo-engineering »: opération proposée par Paul Crutzen pour atténuer sur Terre le réchauffement global, en injectant dans la basse stratosphère du SO_2 , pour amener à la formation de gouttelettes de H_2SO_4 qui renvoient vers l'espace une partie du flux solaire.

Enfin, les nombreuses observations au nadir de jour nous permettent de mesurer le SO_2 au sommet des nuages (70 km). Tandis qu'Esposito avec Pioneer Venus avait observé une descente de 1978 à 1988, nous observons avec SPICAV /Venus Express une lente augmentation, depuis la mise en orbite jusqu'à la fin 2007 puis une baisse continue depuis lors (Emmanuel Marcq et al., 2010). Serait-ce le signe de dégazage volcanique ? ou plus vraisemblablement d'un cycle lent de l'atmosphère de Vénus, dont le schéma de circulation générale pourrait connaître des épisodes quasi-périodiques, à l'instar de la QBO sur terre (Quasi Biennial Oscillation) ?

Une couche chaude dans la nuit froide. La haute atmosphère nocturne de Vénus se refroidit fortement par rayonnement IR du CO_2 . Elle est si froide qu'on l'a nommé « cryosphère ». Les occultations stellaires de SPICAV ont permis de découvrir une couche chaude dans la région 100-120 km (Bertaux et al., Nature 2007), que nous interprétons comme le résultat du chauffage adiabatique de l'air qui descend, dans le système de circulation Solaire-Anti-Solaire (SSAS) qui caractérise la haute atmosphère de Vénus.

L'émission nocturne de NO. Découverte par Pioneer Vénus, cette émission UV en bandes est due à la recombinaison des atomes O et N créés du côté jour par photo-dissociation solaire de CO_2 et N_2 , et transportés à plus de 100 km d'altitude dans la circulation pré-citée. Spécialiste reconnu de cette émission, Jean-Claude Gérard (Université de Liège) et son groupe ont analysé les mesures de SPICAV en UV, complétées par des observations en occultation stellaire (où elles sont en « parasites » du signal de l'étoile, Emilie Royer). On confirme avec SPICAV que cette puissante émission (maxi à 117 km) est souvent présente, très irrégulière, mais statistiquement centrée un peu au sud de l'équateur, et décentrée vers le matin. Ceci avait été expliqué lors de Pioneer Venus par l'influence de la super-rotation, qui entraîne l'atmosphère en 4 jours (100m/s) au sommet des nuages, sur le régime SSAS qui règne plus haut. Mais ceci est contredit par une observation majeure de VIRTIS/ Venus Express (Piccioni et Drossart) qui montre que l'émission de O_2 à $1.27 \mu\text{m}$, « cousine » de NO, car résultant de la recombinaison d'atomes O, est, elle, statistiquement centrée sur le point anti-solaire. Or, son maximum se trouve vers 95 km, plus bas que NO. On voit mal comment la super-rotation pourrait entraîner la couche à 117 km sans entraîner celle à 95 km ! Il est ainsi possible que la super-rotation qui règne dans la thermosphère ($z > 100$ km) ait une origine différente de celle de la basse atmosphère.

Découverte de l'ozone de Vénus. Certaines occultations stellaires de SPICAV montrent la trace indubitable de l'ozone dans l'absorption atmosphérique de nuit vers 90-100 km d'altitude (Montmessin et al., 2011). Cet ozone est le résultat de la recombinaison de O_2+O . Mais il y en a encore moins que sur Mars, et on ne peut compter dessus pour une protection contre les UV solaires!

Spectroscopie du CO_2 . Avec le spectromètre SOIR, nous avons détecté une bande non répertoriée d'un isotope du CO_2 (16-18). Son identification a été faite par Mike Mumma, qui la voyait également sur Mars. Quand il a su qu'on la voyait également sur Vénus, les soupçons sur le CO_2 se sont considérablement renforcés !

Caractérisation des aérosols par mesure de polarisation. Dans le cadre de sa thèse encadrée par Emmanuel Marcq (soutenue en 2015), Loïc Rossi a analysé la polarisation de la lumière solaire diffusée par les aérosols de Vénus. Cette polarisation est bien mesurée en fonction de la longueur d'onde avec le canal AOTF (0.8 kg), et sous des angles de phase variés. La comparaison avec la théorie de Mie sur des gouttelettes sphériques permet de remonter à la taille des sphères et à l'indice de réfraction du liquide. Il s'agit bien d'acide sulfurique concentré (indice 1.44) mais il semble que la composition change un peu au cours de la mission 2006-2014.

Les vents de Vénus. Avec l'équipement sol AAA/EMILIE de Pierre Connes, nous avons mesuré depuis l'Observatoire de Haute Provence les vents de Vénus au sommet de la couche nuageuse (déplacement Doppler du spectre solaire diffusé dû au mouvement des particules des nuages). Nous avons obtenu de bons résultats: précision inégalée, confirmant les mesures *in situ* ou VLBI (sur les ballons dérivants de Vega en 1985) de 90-100 m/s à l'équateur, ou super rotation en 4 jours (Gabsi et al., 2008), mais aussi confirmant les mesures obtenues à partir du déplacement des fameuses «marques UV », inhomogénéités de brillance provoquées par la présence d'un absorbant UV non encore identifié.

Sur Venus Express, la caméra VMC a permis de mesurer la vitesse du vent au niveau des nuages (67 km d'altitude), en comparant deux photos UV consécutives à 10 minutes d'intervalle. Une publication de l'équipe VMC montrait une analyse de Fourier de ces mesures, avec un pic à 117 jours, la période de rotation (le jour solaire, l'équivalent des 24 heures sur Terre) de Vénus. Les auteurs trouvaient cela normal, mais je trouvais cela pas normal du tout. J'ai alors soupçonné, puis vérifié, qu'effectivement le vent zonal dans une bande de latitude de 10° , au sud de l'équateur, varie en fonction de la longitude géographique, de 101 à 83 m/s, de façon corrélée avec le relief des montagnes qui se trouvent pourtant plus de 60 km en-dessous. Alain Hauchecorne, s'inspirant d'une découverte de Lindzen (1981) concernant la circulation de la mésosphère terrestre, a proposé que ce ralentissement est provoqué par des ondes de gravité stationnaires, générées au niveau du sol par le vent (faible, mais air très dense) soufflant sur les montagnes (notamment Aphrodite Terra, 4000 m d'altitude). Ces ondes se propagent vers le haut et déferlent vers 50-65 km. Elles freinent donc le vent zonal qui est de l'ordre de 100 m/s (Bertaux et al., JGR Planets, en cours de publication, 2016). A l'endroit en longitude où le vent ré-accélère, cela provoque une ascendance (équation de continuité) qui se manifeste par une augmentation de la vapeur d'eau au sommet des nuages, découverte par SPICAV dans le proche IR (Federova et al., Icarus 2016).

2.3 Pluton: Alan Stern, responsable de la mission NASA New Horizon lancée en 2006 vers Pluton, m'a invité en tant qu'investigateur associé de l'expérience spectromètre UV ALICE, reconduite de Rosetta sur Pluton. Nous avons en effet fourni l'optique (miroir parabolique off-axis et réseau) en trois exemplaires. La rencontre avec Pluton le 14 Juillet 2015 a permis de recueillir de magnifiques photos de ce nouveau monde glacé, que j'ai pu commenter en direct au cours d'un évènement

médiatique organisé à La Villette. Ainsi, avec ma participation passée à Voyager, et celle future sur Beppi-Colombo (où j'ai joué, comme sur Pluton, un rôle modeste d'aide à la conception du spectromètre UV), j'aurais au cours de ma vie participé à des expériences spatiales sur les neuf planètes du système solaire. Notons que Pluton a depuis perdu son statut de planète; New Horizon est donc la première mission vers une planète naine, Pluton.

3. Gaz interplanétaire/interstellaire, Voyager et SWAN sur SOHO:

Grâce à l'expérience Lyman-alpha sur OGO-5 de Jacques Blamont (instrument que j'ai développé dans le cadre de ma thèse d'Etat sous sa direction), j'ai eu la chance de découvrir le phénomène de "vent interstellaire" en 1970-1971, avec Jacques Blamont et l'américain Gary E. Thomas. Dans sa course galactique, le soleil traverse un nuage interstellaire, dont le gaz balaye en permanence le système solaire. On peut observer notamment l'émission Lyman alpha des atomes H, éclairés par résonance optique par les photons solaires. J'ai pu en mesurer la direction d'arrivée, la vitesse (20 km/s) et la température (8000 K). Depuis, notre équipe a pu identifier le nuage interstellaire actuellement traversé par ses absorptions sur les spectres des étoiles proches (Rosine Lallement), et exploiter les mesures Lyman alpha de Voyager à grande distance (> 50 Unités Astronomiques UA) pour mettre en évidence pour la première fois le phénomène de "mur d'hydrogène", créé à l'héliopause par l'interaction du vent solaire et du plasma interstellaire, couplé à H neutre par échange de charge (Rosine Lallement et Eric Quémerais).

De même que le vent solaire donne sa forme allongée à la magnétosphère terrestre, le vent interstellaire impose sa forme à l'héliosphère, "raccourcie" vers l'avant dans la direction d'arrivée du vent, et allongée vers l'arrière. Il se trouve que par hasard la trajectoire de Voyager 1 est dirigée vers l'avant. Une première frontière, celle du choc interne où le vent solaire devient subsonique, a été franchie en 2004 par Voyager 1 à 90 UA, tandis que l'héliopause a été franchie en 2012 à 127 UA, plus tôt que prévu par les modèles. En analysant les observations du spectromètre UVS de Voyager dont je suis co-I, Lallement et al. (2014) ont proposé un mécanisme où l'échange de charge entre H et H⁺ amène à un ralentissement auto-entretenu du vent solaire qui pourrait expliquer cela. Notre équipe (Rosine Lallement, Eric Quémerais) est régulièrement invitée à chaque session sur l'héliosphère, maintenant un domaine frontière entre les sciences du Système Solaire et l'Astrophysique.

Une communauté de plus en plus vaste s'intéresse à ce phénomène, en particulier depuis que les physiciens des plasmas ont pu identifier dans leurs données "in situ" du vent solaire les "pick-up ions", particules qui arrivent dans le système solaire sous forme d'atomes neutres, et sont ionisés par le Soleil et emportées dans le vent solaire. On pense d'ailleurs que ce sont ces "pick-up ions", qui sont accélérés fortement au niveau de l'héliopause et reviennent sous la forme d'ACR (Anomalous Cosmic Rays). La compréhension du phénomène de vent interstellaire que nous avons apporté est primordiale pour la modélisation de ces deux phénomènes, et la contribution exceptionnelle de Rosine Lallement dans ce domaine frontière lui a valu d'être élue à l'Académie des Sciences des Etats-Unis en 2003.

Cet écoulement de gaz interstellaire neutre est creusé, au voisinage du soleil, par la destruction des atomes H par le vent solaire (encore par échange de charge). Nos résultats de cartographie de l'émission Lyman alpha du ciel de 1976-77 obtenus avec deux satellites russes, Prognoz-5 et 6, nous ont montré que le creusement, donc aussi le flux de masse de vent solaire qui en est la cause, était plus faible à haute latitude héliographique que dans le plan de l'écliptique, ce qui a été confirmé brillamment dix ans plus tard par la sonde Ulysses. Cela nous a inspiré l'expérience SWAN (dont j'étais le PI, remplacé par Eric Quémerais en 2007), dont l'objectif principal sur SOHO est de mesurer systématiquement la distribution en latitude du vent solaire. L'expérience fonctionne

actuellement parfaitement depuis plus de 20 ans, montrant le phénomène du “ sillon Lyman alpha ” que nous avons découvert avec Prognos et publié en 1996. Il s'agit d'une dépression dans la carte d'intensité, allongée le long de l'équateur héliographique, qui résulte de l'ionisation plus intense par le vent solaire lent concentré au voisinage de la “ feuille neutre ”, à cause du flux de masse plus important, pendant la période du minimum d'activité solaire. Mais pendant la montée du cycle solaire, ce sillon Lyman alpha s'est comblé, montrant que la distribution de vent solaire tend vers l'isotropie en période de maximum d'activité solaire. Ainsi, nous démontrons que l'on peut voir directement sur le ciel la trace imprimée du vent solaire et sa distribution en latitude.

De plus, nous avons corrigé l'idée fautive, malheureusement très répandue, que la sonde Ulysses avait mesuré un flux de vent solaire constant avec la latitude au minimum solaire : il n'en est rien, comme le reconnaissent maintenant les responsables de l'expérience Swoops, à l'origine de l'erreur. Par ailleurs, l'utilisation de la cellule à hydrogène sur SWAN nous a permis de démontrer de façon définitive que le H interstellaire est fortement chauffé à son passage à l'héliopause, car on en voit la signature sur la largeur de raie L alpha, même à 1-2 UA du soleil (avec Rosine Lallement et Eric Quémerais).

Sous la direction de Rosine Lallement, notre équipe a fait une découverte importante, en analysant finement les mesures de cellule à hydrogène de notre expérience SWAN sur SOHO (Lallement et al., Science, 2005) : Le flot d'hydrogène neutre interstellaire est dévié par le champ magnétique interstellaire à sa rentrée dans l'héliosphère, car par échange de charge ces neutres deviennent ions, puis de nouveau neutres. C'est la première fois qu'on a une idée de la direction de ce champ magnétique, ce qui permet de dire que SWAN sert de boussole interstellaire.

L'Hélium, au contraire de l'Hydrogène, n'est pas dévié. Nous avons déterminé précisément sa direction d'arrivée avec notre expérience Prognos en 1976, confortés par d'autres mesures EUVE, SOHO/UVCS, Ulysses . Mais en 2012, nos collègues responsables du petit satellite américain IBEX dédié à la détection des neutres énergétiques produits sur le pourtour de l'héliosphère ont trouvé une direction d'arrivée de l'hélium différente d'environ 4°, et ils ont alors publié une série d'articles (changement de direction du "vent interstellaire" sur 35 ans, modification de la forme de l'héliosphère sur cette période, disparition du choc d'étrave en amont de l'héliosphère, etc...). Ayant tenté sans succès de convaincre nos collègues que leur résultat était totalement improbable du point de vue de la physique (libre parcours moyen des atomes) et certainement erroné, nous avons fini par publier une contre-analyse des données IBEX (Lallement et al., 2014, déjà cité 21 fois en janvier 2016) qui nous a valu les foudres d'une partie des auteurs (dont ceux de 2 articles dans Science, 3 dans ApJ...). Réactions limitées dans le temps car aujourd'hui ils ont corrigé leurs résultats : le flot d'hélium est trouvé au même endroit qu'avant. Ainsi faut-il aussi faire des efforts pour arrêter des idées fausses qui peuvent se propager vite, loin et longtemps, si personne ne prend la peine de les réfuter.

Enfin, j'ai découvert que l'on pouvait détecter l'apparition d'une nouvelle région active sur la face cachée du soleil, car émettant plus de Lyman alpha, elle fait apparaître une tache plus brillante sur la portion du ciel située de l'autre côté du soleil, éclairée par la face cachée, que l'on détecte facilement avec les cartes du ciel dressées tous les jours par SWAN (avec Quémerais et Lallement, GRL, 2000). Un programme dirigé par Eric Quémerais et soutenu par le CNES a permis de rendre opérationnelle cette méthode qui permet d'augmenter le délai de prévision de la Météorologie de l'Espace (Space Weather) d'environ une semaine.

Eric Quémerais joue un rôle moteur dans l'interprétation des données, dans les modélisations, et dans la direction du projet SWAN/SOHO. C'est donc en toute confiance que je lui ai cédé en 2007 ma responsabilité de PI.

4. Comètes :

4.1 OGO-5 et Vega-1 et 2.

L'arrivée imprévue de la belle comète Bennett en 1970 nous a permis (dans le cadre de ma thèse avec Jacques Blamont) de découvrir son énorme enveloppe d'hydrogène en cartographiant avec OGO-5 son émission $L\alpha$, et de mesurer le taux de production d'hydrogène. À l'époque, cela a été considéré comme une preuve que le gaz principal s'échappant du noyau était bien de l'eau, confortant le modèle de Whipple d'un noyau solide fait de "neige sale". Cette implication cométaire m'a permis de jouer un rôle, peut-être déterminant, dans l'élaboration et la défense du programme ESA Giotto de rencontre avec la comète de Halley (1986). En parallèle, je participais à trois expériences sur la mission Vega, ce qui m'a permis d'être le premier à mesurer la taille du noyau de la comète de Halley avec les caméras (avec un double décimètre sur un écran de contrôle où s'affichaient les clichés en temps réel). À cette occasion j'ai publié un livre de vulgarisation (*De l'autre côté du Soleil*, Albin Michel, 1986)

4.2 SWAN sur SOHO.

Les cartes du ciel en Lyman alpha recueillies par SWAN sont mises sur le web très rapidement (en moins de 2 jours), à la disposition du public. C'est ainsi que des amateurs australiens, en scrutant nos cartes quasi-quotidiennes, ont repéré une nouvelle comète, la comète SWAN : C/2006 M4 (SWAN). Ceci souligne l'importance de mettre rapidement à la disposition du public les données spatiales ! L'expérience SWAN nous permet également de mesurer en permanence la production de vapeur d'eau des comètes (avec Mike Combi, de l'Université du Michigan): gâtés par le passage de Hyakutake en 1996 et Hale-Bopp en 1997, nous avons aussi obtenu la meilleure mesure du dégazage de Wirtanen à son périhélie, qui devait faire référence pour la mission Rosetta. Plusieurs autres publications concernent les quelque 30 comètes observées avec SWAN depuis 1996. En particulier, nous avons détecté un phénomène curieux: l'ombre de la comète Hale-Bopp, portée sur le fond Lyman alpha interplanétaire: la source est le soleil, l'objet qui fait de l'ombre est le gigantesque nuage d'hydrogène atomique de la comète, et l'écran est constitué par les atomes H du milieu interplanétaire (d'origine interstellaire).

4.2 Le spectromètre UV ALICE et la caméra OSIRIS sur la mission Rosetta.

Ayant un passé scientifique cométaire, je m'étais fortement impliqué au moment de la définition d'instruments devant équiper la mission Rosetta de l'ESA (rendez-vous avec une comète). J'avais proposé un petit imageur Lyman alpha en tant que PI, et un spectromètre proche UV (200-400 nm) en tant que partie de la caméra OSIRIS. Propositions non retenues par le comité de sélection. J'étais finalement impliqué sur OSIRIS (PI Uwe Keller, puis Holger Sierks) et sur le Spectromètre UV ALICE (60-200 nm, PI Alan Stern), pour lequel nous fournissions les pièces optiques (réseau holographique et miroir parabolique).

Le lancement de Rosetta par un lanceur Ariane-5 de Kourou fut retardé d'un an, suite à un problème sur un lancement précédent. Une nouvelle comète cible était choisie : la comète Churyumov-Gerasimenko (67CG), que la sonde Rosetta atteignit en 2014 pour se mettre en orbite. Le 12 novembre 2014, j'assistais depuis l'ESOC à Darmstadt à la pose mouvementée de l'atterrisseur Philae sur le noyau de la comète. Un grand moment d'émotion, et la fierté d'être européen dans cette prouesse technologique que nous enviaient nos collègues américains conviés pour la circonstance.

Avec ALICE, nous eûmes la surprise de comprendre que les émissions UV des atomes H, O et C étaient bien présentes, mais pas dues à la résonance optique comme on s'y était préparé, mais plutôt à l'excitation par des photo-électrons produits par la photo-ionisation des molécules d'eau s'échappant de la comète. C'est qu'on observait à quelques km seulement du noyau, dans une région impossible à observer auparavant en étant de loin. L'émission Lyman beta est par exemple 100 fois plus intense que la résonance optique.

Quant à la caméra OSIRIS, elle a donné lieu à une avalanche de publications (plus de 30 en 2015) dont je suis co-auteur, où ma contribution a été marginale (effet consortium). Une retombée importante de Rosetta est que notre vision « boule de neige sale » du noyau cométaire a changé. Alors qu'on estimait auparavant que le rapport dans le noyau matière solide/glace était de l'ordre 1, on estime maintenant plutôt ce rapport à 4, avec une densité faible (0.5 tonnes/m^3) : un noyau poreux où la glace ne forme pas de blocs compacts. En 2015 j'ai repris toutes les données de SWAN de dégazage H_2O de la comète 67CG observée au cours des trois passages précédents, et j'en dérivais que la comète perd en moyenne une épaisseur de matière de environ 1 m à chaque passage. Je calculais en outre que l'éjection observée de la vapeur d'eau était suffisante pour expliquer la variation observée de la vitesse de rotation du noyau (Bertaux, 2015).

5. Planètes extra-solaires.

Pierre Connes, arrivé au Service d'Aéronomie en 1984, a le premier compris (et publié) que la méthode la plus prometteuse pour détecter des planètes extra-solaires était de mesurer les variations périodiques de la vitesse radiale de son étoile-hôte, en utilisant l'effet Doppler de son spectre obtenu avec un spectromètre à dispersion croisée, à grande résolution spectrale, et grande stabilité. A cette fin, Pierre Connes proposait un système assez complexe, l'AAA (Accéléromètre Astronomique Absolu). Le principe de cet AAA est que l'on replace toujours le spectre de l'étoile exactement sur les mêmes pixels du détecteur CCD, malgré l'effet Doppler et les déformations éventuelles du spectromètre : on mesure les variations de vitesse radiale en mesurant le signal d'asservissement. Typiquement, pour avoir une précision de 1 m/s, il faut mesurer la position du spectre à 1/1000 ème de pixel. Trouvant cette thématique fascinante, j'ai apporté mon concours à Pierre Connes en 1993 dans la réalisation de ce projet, dont j'ai plus tard pris la responsabilité, avec le concours de jeunes chercheurs, François Bouchy et Jérôme Schmitt. Cependant, alors que Pierre Connes visait une précision de 1 m/s sur dix ans, la première planète extra-solaire était découverte en 1995 à l'Observatoire de Haute Provence par Mayor et Queloz, provoquant un mouvement de son étoile de 56 m/s en 4 jours ! évidemment beaucoup plus facile à détecter que ce que visait Connes.

Nonobstant, un nouveau spectromètre à dispersion croisée, sous vide, EMILIE, était construit au Service d'Aéronomie (Pierre Connes et François Bouchy), puis installé au télescope 152 de l'OHP en Mars 1999. Il confirmait la présence d'une exo-planète autour de l'étoile Upsilon Andromedae en Novembre 1999, ce qui mettait notre équipe au plus haut niveau à cette époque en ce qui concerne la précision de mesure (3 m/s).

Jérôme Schmitt a été recruté en tant qu'Ingénieur de recherche CNRS à l'OHP, et a pris la responsabilité de l'instrumentation. Depuis 2000, nous avons apporté un bon nombre d'améliorations à la première version d'EMILIE.

Cependant, les performances obtenues sur étoile, parfois descendant à 1.6 m/s, étaient moins bonnes sur d'autres étoiles. Malgré une refonte complète de la cuve à vide et du banc du spectromètre EMILIE, en 2004, nous n'avons pas réussi à obtenir la stabilité requise sur des étoiles et une durée de six mois. Aujourd'hui (2016) je pense (sans en être certain) que les raies d'absorption de l'atmosphère terrestre (telluriques), même faibles, qui s'impriment inévitablement sur le spectre de l'étoile, et qui n'étaient pas corrigées en temps réel, polluaient le signal d'asservissement de l'AAA. Dans le même temps, l'équipe de Mayor réalisait le spectromètre HARPS, sous vide, mais sans l'AAA, et avec un système plus classique de calibration en longueur d'onde à base des raies du thorium. Je participais, avec le Service d'Aéronomie et l'OHP, à ce nouveau projet. Ayant emprunté un certain nombre de caractéristiques de AAA/EMILIE (spectromètre sous vide, stabilisé en température), HARPS possède actuellement les meilleures performances mondiales en précision de vitesse radiale, atteignant souvent 1 m/s. En tant que membre du consortium HARPS dirigé par Michel Mayor, j'ai effectué une mission de 12 nuits d'observation à l'Observatoire de La Silla, fin Août 2005. Ce travail d'équipe permet de découvrir de nouvelles exo-planètes à un rythme soutenu. En particulier, nous avons détecté autour de l'étoile GJ 581, une étoile de type M (froide), une

planète d'à peine 2 masses terrestres (M_E), et une autre de 7 M_E , qui a le bon goût d'être dans la zone habitable : sa distance à l'étoile est telle que l'eau doit y être liquide. C'est une première !

HARPS ayant fait la démonstration qu'un système « classique » permettait d'atteindre une excellente précision, nous avons arrêté nos efforts sur EMILIE. Il a été utilisé dans le cadre de campagnes de mesure de la vitesse des vents organisées à l'OHP par diverses méthodes: celle de l'AAA consistant à observer l'effet Doppler des raies solaires sur les nuages, de jour, dans le cadre du projet VIVA, ainsi que les vents de Vénus. Selon Jérôme Schmitt, l'avantage original de l'AAA perd de son intérêt, quand le CCD est plus grand, et que chaque raie du spectre est mieux échantillonnée.

J'ai développé l'idée, et présentée dans des congrès, qu'il conviendrait de déployer un ensemble de télescopes au sol de 2 m de diamètre, chacun muni d'un spectromètre type HARPS : ceci afin de se concentrer sur les étoiles les plus proches du soleil.

Il s'agirait de faire, pour les étoiles proches du soleil (environ 100 à moins de 10 parsec du soleil), un inventaire aussi complet que possible de toutes les exo-planètes se situant dans la zone habitable de leur étoile. Pour fixer les idées, la Terre à une Unité Astronomique produit un mouvement réflexe de 10 cm/s de période un an. En effet, en observant longuement, sur une dizaine d'années ces étoiles, on doit pouvoir extraire des signaux périodiques bien plus faibles que l'erreur instantanée sur une mesure (environ 0.5 à 1 m/s), ou que les fluctuations dues par exemple à la turbulence de la surface stellaire.

Ceci me paraît indispensable pour préparer les projets spatiaux (type Terrestrial Planet Finder ou Darwin) qui devront consacrer leur temps à faire un spectre d'atmosphère planétaire de type terrestre, plutôt que de regarder au hasard toutes les étoiles de type solaire. Il est clair que l'observation par ces projets est d'autant plus facile que l'étoile porteuse sera plus proche de nous. C'est donc le voisinage astronomique du soleil qui doit être inventorié en priorité.

Notons que, quand il s'agira d'interpréter le spectre atmosphérique obtenu pour y rechercher des bio-signatures, c'est bien la communauté de la section 19 qui pourra interpréter la signification de la présence simultanée de vapeur d'eau, CO_2 , méthane, ozone et oxygène, si tel est le cas. C'est pourquoi la Section 19 ne peut pas totalement se désintéresser de ces projets futurs : c'est elle qui aura la responsabilité d'interpréter les données.

5. Astérosismologie.

Une incursion notable en dehors de mon domaine habituel (espace et Système solaire) concerne mes travaux en astérosismologie, depuis des observations au sol: j'ai dirigé l'équipe qui a découvert, pour la première fois sans contestation possible, les oscillations dans une étoile de type solaire: Procyon (Martic et al., 1999). Cependant, ayant ouvert cette voie, je n'ai pas l'intention de la poursuivre moi-même.

6. Modélisation. Dans plusieurs cas, l'interprétation des mesures m'a poussé à élaborer des modèles: transfert de rayonnement Lyman alpha dans la géocouronne, distribution du gaz interstellaire dans le système solaire, effet de la pression de radiation solaire sur les atomes H exosphériques par exemple. Je programme maintenant sous IGOR, langage puissant, permettant de faire de magnifiques figures de façon conviviale.

7. Le projet TAPAS.

Rosine Lallement est une astronome qui scrute les spectres des étoiles pour y détecter des absorptions interstellaires du Sodium, Calcium, Potassium et les fameuses DIB (Diffuse Interstellar bands). Le but est de reconstituer la distribution 3D de matière interstellaire en inversant les densités intégrées vers les étoiles visées, dont on connaît de mieux en mieux les distances avec le satellite Gaia de l'ESA. Les spectres sont toujours pollués par les raies telluriques (H_2O , O_2 , etc..), et il faut d'abord les corriger avant de trouver les raies interstellaires. Avec Rosine Lallement et Stéphane Ferron de la société ACRI, nous avons développé en 2012-2013 un service en ligne

permettant de calculer l'absorption prévue par le champ météorologique du jour: TAPAS (Transmission Atmosphérique Personnalisée pour l'ASTronomie). On utilise la base de données spectrales HITRAN. Ce service est hébergé par le site ETHER de l'IPSL, sous la responsabilité de Cathy Boonne : <http://ether.ipsl.jussieu.fr/tapas/>.

8. Autres activités liées au métier de chercheur.

8.1. Enseignement et diffusion de l'information scientifique et technique.

Dans le cadre du lancement de la mission ENVISAT, j'ai apporté mon concours à l'ESA pour deux opérations de Public Outreach: l'une en Guyane (5 jours), l'autre à l'ESOC Darmstadt), et dans les deux cas j'ai participé à une conférence et des interviews de télévision. J'ai récemment présenté SPICAM à l'Ecole des Houches sur l'exploration de Mars (Mai 2003, 2005, 2009) ; j'ai participé aux opérations médiatiques de l'ESA concernant la mission Mars Express, la mission Rosetta, et plus récemment Venus Express et la sonde New Horizon.

8.2 *Innovation Instrumentale* : En support des activités thématiques citées plus haut, j'ai été conduit à imaginer de nouveaux systèmes instrumentaux, ou à les mettre en place très tôt dans la recherche spatiale:

- instrument de mesure de la vapeur d'eau par photo-dissociation émissive, que j'ai fait voler en ballon stratosphérique, et breveté.

- Cellule à absorption d'hydrogène, pour l'analyse spectroscopique fine des profils de raie Lyman alpha (résolution = 10^5) dans la géocouronne, les atmosphères de Venus et Mars, et le gaz de H interplanétaire/interstellaire.

- Spectromètre multi-pixel (Vega-1 et 2 : sonde de descente avec ISAV sur Vénus en 1985, GOMOS)

- Spectro-imageur à CCD intensifié (SPICAM sur Mars 96 et sur Mars Express, SPICAV sur Venus Express).

- Méthodologie du sondage atmosphérique par occultation stellaire multi-spectrale (on mesure l'absorption de l'atmosphère sur le spectre de l'étoile simultanément à toutes les longueurs d'onde de l'UV au proche IR). Il y a eu ainsi une période de plusieurs années (2006-2012) où trois instruments sondaient simultanément les trois planètes par occultation d'étoile.

- Spectromètre Infra-rouge à cristal AOTF : sur une suggestion de mon collègue russe Oleg Koroblev, j'ai aidé au développement en Russie d'un nouveau type de spectromètre IR de faible masse (800 g), procurant une résolution de 1500, destiné à la cartographie de la vapeur d'eau sur Mars, et qui a volé pour la première fois sur Mars Express. Il s'agit d'un nouveau type de spectromètre IR, à base de cristal AOTF (Acousto Optic Tunable Filter).

- Spectromètre SOIR: Dans ce dispositif, on couple un spectromètre échelle à haute résolution avec un cristal AOTF permettant de séparer les ordres. Il y a des applications pour l'atmosphère des planètes telluriques, soit en occultation solaire, soit en observant la réflexion spéculaire du soleil sur la surface de la mer (dans ce cas, le trajet optique est très bien défini, mieux que dans la diffusion par la surface, moins brillante, et plus facile à confondre avec la réflexion sur les aérosols). Un tel spectromètre, SOIR, a été construit pour Venus Express, principalement par nos collègues de l'IASB à Bruxelles (Dennis Nevejans et Eddy Neefs), et a parfaitement fonctionné jusqu'à la chute de Venus Express en Novembre 2014.

9. Encadrement, animation et administration de la recherche: Après avoir assuré la Direction Adjointe du Service d'Aéronomie auprès de Jacques Blamont (120 personnes), et animé les activités "Système Solaire" du laboratoire (18 chercheurs) avec Pierre Bauer comme Directeur, je me suis consacré à l'animation des équipes scientifiques autour des projets que je dirigeais: SPICAM/MEX, AAA/EMILIE, SWAN, SPICAV/SOIR/Venus Express, et d'autres opérations.

10. Conclusion:

Au-delà de l'aspect quelque peu disparate de mes centres d'intérêt scientifique et des découvertes qui en ont résulté, il y a le souci de trouver l'existence de la vie dans le système solaire (Mars), et autour d'autres étoiles, ainsi que de sa préservation, là où elle existe: la Terre. Ce sont là des questions qu'un honnête homme ne peut se contenter d'ignorer.

3- AUDIENCE INTERNATIONALE

J'ai participé à de nombreuses missions spatiales internationales (USA, URSS, ESA) en tant que PI ou Co-I.

D'après les ADS, mes travaux ont fait l'objet de 955 publications ou présentations avec un abstract répertorié, dont 421 dans des revues à Comité de Lecture (à la date du 23 Janvier 2016 et après en avoir retiré 6 de Jacques Bertaux qui fait de la géologie). Ces travaux ont été cités 12691 fois, ce qui amène mon indice de Hirsch à 57 (auteur ou co-auteur de 57 publications citées au moins 57 fois). J'ai encadré ou co-encadré 26 thèses.

J'ai été élu Membre de l'Académie Internationale d'Astronautique (1993). L'ensemble de mes travaux m'a valu d'être honoré de la médaille Christiaan Huygens, délivrée par l'EGU (European Geophysical Union) en 2010. J'ai été élu en 2014 membre correspondant de l'Académie de l'Air et de l'Espace.

4- PUBLICATIONS LES PLUS SIGNIFICATIVES

Je retiens les quelques suivantes :

- 1) J.L. Bertaux, J.E. Blamont - Observation de l'émission de l'hydrogène atomique de la comète Bennett. C.R. A.S., 270, 1581-1584 (1970)
- 2) J.L. Bertaux, J.E. Blamont - Evidence for a Possible Source of Extra-terrestrial Lyman-alpha : the Interstellar Wind. Astron. Astrophys., 11, 200-217 (1971)
- 3) Bertaux, J.L. E. Quemerais et R. Lallement, Observations of a groove in the interplanetary Lyman alpha sky pattern as the signature of enhanced ionisation and solar wind mass flux in the neutral sheet, Geophys. Res. Letters. , 23, pp. 3675-3678 (1996)
- 4) Bertaux, J.L., E. Quemerais, R. Lallement, E. Lamassoure, W., Schmidt, E. Kyrola, Monitoring Solar Activity on the Far Side of the Sun from Sky reflected Lyman alpha radiation, Geophys. Res. Lett., 27, pp. 1331-1334 (2000)
- 5) Bertaux, Jean-Loup; Widemann, Thomas; Hauchecorne, Alain; Moroz, V. I.; Ekonomov, A.P., VEGA 1 and VEGA 2 entry probes: An investigation of local UV absorption (220-400 nm) in the atmosphere of Venus (SO₂, aerosols, cloud structure) Journal of Geophysical Research, Volume 101, Issue E5, p. 12709-12746 (1996)
- 6) Bertaux, J-L., Leblanc F., Perrier S., Quemerais E., Korablev O., Dimarellis E., Reberac A., Forget F., Simon P-C., Stern S-A., Sandel B. and the SPICAM team , 2005, Nightglow in the Upper Atmosphere of Mars and Implications for Atmospheric Transport, Science, 307, 566-569 (2005)
- 7) Bertaux, Jean-Loup; Leblanc, François; Witasse, Olivier; Quemerais, Eric; Lilensten, Jean; Stern, S. A.; Sandel, B.; Korablev, Oleg, Discovery of an aurora on Mars, 2005 Nature.435..790B (2005)
- 8) Lallement R., Quémerais E., Bertaux J.L., Ferron S., Koutroumpa D. and Pellinen R., 2005, Deflection of the Interstellar neutral Hydrogen Flow across the Heliospheric Interface, Science, 307, 1447-1449 (2005)
- 9) Bertaux J.L., O. Korablev , S. Perrier , E. Quémerais , F. Montmessin, F. Leblanc, S. Lebonnois, F. Lefèvre , F. Forget, A. Fedorova, E. Dimarellis , A. Reberac , D. Fonteyn, J.Y. Chaufray, S. Guibert and the SPICAM Team, SPICAM on Mars Express: Instrument, Observing modes, Overview of Scientific Results , *J Geophys. Rev.*, 111, E10S90 (2006)
- 10) Bertaux, Jean-Loup; Vandaele, Ann-Carine; Korablev, Oleg; Villard, E. et al., A warm layer in Venus' cryosphere and high-altitude measurements of HF, HCl, H₂O and HDO, Nature, Volume 450, Issue 7170, pp. 646-649 (2007).
- 11) Bertaux, J.-L., E. Kyrölä, D. Fussen, A. Hauchecorne, F. Dalaudier, V. Sofieva, J. Tamminen, F.

Vanhellemont, O. Fanton d'Andon, G. Barrot, A. Mangin, L. Blanot, J.-C. Lebrun, K. Pérot, T. Fehr, L. Saavedra, G. W. Leppelmeier, and R. Fraisse, Global ozone monitoring by occultation of stars: an overview of GOMOS measurements on ENVISAT, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 12091-12148, (2010), doi: 10.5194/acp-10-12091-2010

12) Bertaux, J. L.; Lallement, R.; Ferron, S.; Boonne, C.; Bodichon, R., TAPAS, a web-based service of atmospheric transmission computation for astronomy, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 564, id.A46, 12 pp. (2014)

13) Bertaux, J.L., Estimate of the erosion rate from H₂O mass-loss measurements from SWAN/SOHO in previous perihelions of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko and connection with observed rotation rate variations, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 583, id.A38, 10 pp. (2015)

14) Bertaux, Jean-Loup, Khatunstsev, I.V. , Hauchecorne, Alain, Markiewicz W.J., Marcq E., Lebonnois, S., Patsaeva, M., Turin, A., Fedorova, A., Observed Influence of Venus topography on the zonal wind and albedo at cloud top level: the role of stationary gravity waves, soumis Octobre 2015, *J Geophys.Rev.*, en cours de révision (2016).

Ouvrage de vulgarisation : *De l'autre côté du Soleil*, Albin Michel, 1986.

Nombre de publications dans des revues à Comité de Lecture dans les années récentes: 35 en 2010, 16 en 2011, 10 en 2013, 13 en 2013, 16 en 2014, 48 en 2015 (l'effet de la rencontre de Rosetta avec la comète), et 3 en 2016 au 24 Janvier 2016. Soit au total 145 au 20^{ème} siècle et 276 au 21^{ème} siècle, et une prévision de 0 pour le 22^{ème} siècle.

5- PROJETS DANS LE CADRE DE L'ÉMÉRITAT

Dans le cadre de la prolongation de mon éméritat, je souhaite principalement aider les chercheurs du LATMOS qui travaillent sur les projets que j'avais initié, et aussi mettre à disposition de la communauté « at large » des produits de ces missions exploitables directement par les chercheurs du monde entier. Les principaux axes en sont :

- terminer l'analyse de la vapeur d'eau de GOMOS.
- assurer la promotion et la maintenance scientifique du projet TAPAS.
- archiver proprement les résultats de niveau 2 des instruments SPICAM et SPICAV.
- continuer à travailler sur les résultats de Venus Express, Mars Express et Rosetta.
- m'impliquer sur des études lancées par le CNES concernant des projets en Observation de la Terre.

Nous donnons quelques détails ci-dessous :

- GOMOS: Au cours de l'année 2015, nous avons mis au point une nouvelle version des algorithmes d'inversion pour un meilleur rendu de H₂O. Dans un futur immédiat, et au cours de mon prolongement d'éméritat, je compte m'investir personnellement plus particulièrement sur l'exploitation des mesures de vapeur d'eau avec ce nouvel algorithme qui permet entre autre de descendre parfois jusqu'à 5 km d'altitude. L'évolution autour de l'UTLS et dans la stratosphère (au cours du changement climatique) est un enjeu important pour la stabilité de la couche d'ozone. Les mesures précédentes d'évolution de H₂O donnent des résultats contradictoires. Travail avec Alain Hauchecorne, Francis Dalaudier et Laurent Blanot, ingénieur en informatique.

- Archiver proprement les résultats de Mars Express et Venus Express, pour une mise à disposition de la communauté scientifique (avec l'aide de mes collègues des équipes SPICAM et SPICAV). Les mesures de SPICAM de niveau 0 sont archivées régulièrement au Centre de Données Atmosphériques Planétaires de l'IPSL, et dans la data base de Mars Express (MEX) de l'ESA au format PDS (Planetary Data System), accessible à la communauté scientifique. Mais une bonne exploitation des données exige que les mesures soient corrigées des effets instrumentaux, tels que la lumière parasite interne et externe, et le Dark Current, les cosmiques, le bruit électronique...).

Dans le cadre d'un contrat avec l'ESA, je dirige un nouvel effort pour mettre à disposition les données de niveau 1 et 2; pour cela, il faut finaliser les algorithmes des "pipelines" qui permettent de produire de telles données, et j'ai une bonne connaissance des idiosyncrasies de l'instrument, ce qui est nécessaire pour la mise au point des ces algorithmes. Les Niveau 1 sont les données corrigées des effets

instrumentaux; les Niveau 2 sont des données en unités physiques. Nous nous proposons de mettre à la disposition publique au PDS principalement les produits suivants : transmissions atmosphériques spectrales, profils verticaux des constituants atmosphériques CO₂, ozone, SO₂, température, obtenus lors d'occultations stellaires et solaires ; albedo spectral UV de la planète, quantité verticale d'ozone (Mars) et de SO₂ (Vénus). Ce travail sera accompli avec le concours de Franck Montmessin (DR), Franck Lefèvre (DR), Emmanuel Marcq (MC). Je considère que c'est un devoir de faire cet exercice, car il est clair que la quantité et la qualité est telle que nous ne pouvons prétendre l'exploiter à nous seuls. J'ai cité plus haut l'exemple de Mike Chaffin qui a découvert dans nos données la variation de la couronne d'hydrogène de Mars. D'autres pépites existent sans doute dans ces données.

A plus court terme, et à la demande expresse de Franck Montmessin, je finaliserai l'étude du spectre de réflectance UV de Phobos et Deimos, satellites de Mars. Nous y avons détecté une absorption non identifiée dont il importe de dresser une carte complète sur Phobos. Et avec Jean-Yves Chaufray, Franck Montmessin et Emmanuel Marcq, je continuerai des études ponctuelles sur Mars, Vénus, et les émissions UV de la coma gazeuse à partir des données de Alice/Rosetta. Nous avons entamé une comparaison des mesures de H et O de Alice avec les mesures de colonnes de H₂O mesurées par Virtis (avec Dominique Bockelée-Morvan du Lesia).

-Observations de la Terre. Avec Alain Hauchecorne et la société ACRI je participe à des études pour le CNES concernant de nouveaux concepts de mesure des constituants de l'atmosphère terrestre depuis l'espace par tomographie multi-lignes de visée; et également à un concept de mesure des vents par effet Doppler, avec des spectres à haute résolution de la lumière diffusée solaire (projet VIVA). J'ai secondé Franck Montmessin pour notre participation à un projet américain de mesure du méthane, proposé à la NASA par le SouthWest Research Institute. Si ce projet CH4MP était retenu par la NASA, je continuerai mon soutien à Franck Montmessin. D'autre part, je suis avec attention les progrès du programme Microcarb du CNES (porteur F.M. Bréon du LSCE), qui me paraît très prometteur. Avec une technique similaire à celle de OCO-2 pour le CO₂ (spectroscopie haute résolution de la lumière solaire diffusée au nadir), ce projet pourrait mesurer non seulement le CO₂, mais aussi le méthane. En cette fin de carrière, je me sens en effet très concerné par le devenir de notre planète, menacé gravement par l'augmentation des gaz à effet de serre et le changement climatique qui en découle.

Avis circonstancié du directeur de l'unité d'accueil ▶

Jean-Loup Bertaux continue de mener une activité de recherche de très haut niveau et contribue ainsi au rayonnement du LATMOS et plus généralement du CNRS.

Ces dernières années, tout en s'investissant dans l'exploitation scientifique des missions spatiales auxquelles il a contribué de façon majeure au moment de la conception et réalisation, il a pris soin de pousser les plus jeunes chercheurs à prendre des responsabilités sur les missions futures et thématiques associées (notamment EXOMARS, BEPI-COLOMBO, EJSM). Cependant, la communauté française a pu compter sur sa contribution sur Rosetta qui doit se poursuivre. Cet équilibre entre la poursuite de travaux personnels, le soutien aux plus jeunes chercheurs, et son rôle dans l'élaboration de nouvelles idées ou méthodes, est très enrichissant pour la communauté scientifique et le LATMOS. Je donne donc un avis favorable au renouvellement de l'éméritat de JL Bertaux.

Nom, prénom ▶ Keckhut Philippe

Fait à ▶ Paris

Le ▶ 29/01/2016
(jj/mm/aaaa)

Signature du candidat



Signature du directeur de l'unité d'accueil

