



**HAL**  
open science

# Modélisation et mesure des exosphères de quelques objets du système solaire

François Leblanc

► **To cite this version:**

François Leblanc. Modélisation et mesure des exosphères de quelques objets du système solaire. Astrophysique [astro-ph]. Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, 2009. tel-00446915

**HAL Id: tel-00446915**

**<https://theses.hal.science/tel-00446915>**

Submitted on 13 Jan 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Mémoire d'Habilitation  
à Diriger des Recherches**

**Session 2009**

**Université Versailles Saint Quentin  
Ecole Doctorale  
Matière, milieux réactifs et méthodes de la  
modélisation  
Section 34**

**Modélisation et mesure des exosphères  
de quelques objets du système solaire**

**François Leblanc**

**LATMOS/IPSL, CNRS  
UMR 8190**





## TABLE DES MATIERES

I PREFACE.....	5
II CURRICULUM VITAE .....	7
PRINCIPALES DATES.....	7
RESPONSABILITES SCIENTIFIQUES.....	8
ANIMATION SCIENTIFIQUE .....	8
TRAVAIL EDITORIAL .....	9
ACTIVITE D’ENSEIGNEMENT .....	9
PUBLICATIONS DANS LES REVUES AVEC COMITE DE LECTURE.....	9
CHAPITRES .....	13
AUTRES PUBLICATIONS.....	13
CONTRIBUTIONS ORALES INVITEES A DES CONFERENCES INTERNATIONALES .....	14
CONTRIBUTIONS ORALES A DES CONFERENCES INTERNATIONALES.....	14
III SYNTHESE DES TRAVAUX SCIENTIFIQUES.....	16
III.1 LA MODELISATION DES VENTS ASTROPHYSIQUES.....	16
III.2 LES EXOSPHERES DES CORPS PLANETAIRES AVEC ATMOSPHERE : MARS .....	19
III.2.1 L’EXOSPHERE ET L’ECHAPPEMENT ATMOSPHERIQUE MARTIENS.....	19
III.2.1.1 Que sait on de l’exosphère martienne ? .....	19
III.2.1.2 Vers une caractérisation des processus d’échappement atmosphérique .....	23
III.2.2 OBSERVATION AVEC SPICAM/MARS EXPRESS DE LA HAUTE ATMOSPHERE .....	28
III.2.2.1 L’airglow martien.....	28
III.2.2.2 Les aurores martiennes.....	29
III.3 LES EXOSPHERES DES CORPS PLANETAIRES SANS ATMOSPHERE : MERCURE .....	31
III.3.1 L’EXOSPHERE DE MERCURE .....	31
III.3.1.1 Les processus de formation de l’exosphère .....	31
III.3.1.2 Relations exosphère/surface/magnétosphère .....	34
III.3.2 REALISATION ET ANALYSE D’OBSERVATIONS DEPUIS LA TERRE DE MERCURE.....	36
III.3.3 PREPARATION DE LA LA MISSION BEPI COLOMBO .....	38
III.3.3.1 PHEBUS (PROBING THE HERMEAN EXOSPHERE BY UV SPECTROSCOPY).....	38
III.3.3.2 PICAM/SERENA (PLANETARY ION CAMERA).....	39
IV PROJET SCIENTIFIQUE .....	40
IV.1 OBSERVATION DES EXOSPHERES PLANETAIRES .....	40
IV.1.1 LE SODIUM DE MERCURE.....	40
IV.1.2 LE SODIUM/POTASSIUM DE MERCURE.....	41
IV.1.3 RECHERCHE DE NOUVELLES ESPECES EXOSPHERIQUES DE MERCURE.....	42
IV.1.4 LE SODIUM EXOSPHERIQUE D’EUROPE .....	42
IV.2 MODÉLISATION: MERCURY EXOSPHERIC GLOBAL CIRCULATION MODEL .....	43
IV.2.1 COUPLAGE SURFACE/MAGNETOSPHERE/EXOSPHERE.....	43
IV.2.2 MODELISATION DES RAIES DE SODIUM .....	44
IV.2.3 MEGCM POUR L’HYDROGENE ET LE CALCIUM .....	45
IV.3 MODELISATION ET OBSERVATION DE L’ENVIRONNEMENT DE MARS.....	46
IV.3.1 LE PROJET HELIOSARES .....	46
IV.3.2 ANALYSE DES DONNEES SUR LES AURORES MARTIENNES .....	48

IV.4 L'ORIGINE DES ATMOSPHERES DES PLANETES TELLURIQUES .....	48
IV.5 INSTRUMENTATION : NIMEIS, UN SPECTROMETRE DEDIE .....	49
V CONCLUSION .....	52
REFERENCES .....	53
ANNEXE .....	61
ANNEXE 1: ASTROPHYSICAL JOURNAL, 483, 464-474, 1997 .....	61
ANNEXE 2: PLANETARY SPACE SCIENCE, 49, 645-656, 2001 .....	72
ANNEXE 3: ICARUS, 164, 261-281, 2003 .....	86
ANNEXE 4: JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 113, A08311, 2008. ....	109
ANNEXE 5: GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 36, L07201, 2009. ....	123

## **I PREFACE**

L'exosphère d'un objet planétaire ou stellaire s'étend théoriquement à l'infini. Sa limite inférieure s'appelle l'exobase et correspond par définition à l'enveloppe de l'objet où les collisions entre particules deviennent négligeables. En pratique, une exosphère est surtout la région de transition entre l'environnement dominé par cet objet (son atmosphère ou sa surface) et celui dominé par tout autre objet, que ce soit une planète ou une étoile.

Sa description pose de très sérieuses difficultés théoriques. Dans le cas des objets ayant une atmosphère, elle nécessite de trouver la continuité théorique entre modèle hydrodynamique classiquement utilisé pour décrire les enveloppes gazeuses denses et modèle cinétique adapté aux milieux très faiblement denses. Dans le cas des objets sans atmosphère, où l'exobase est confondue avec la surface de l'objet, la description d'une exosphère nécessite de modéliser tous les processus de formation de l'exosphère et d'interaction entre la surface et l'exosphère.

Au cours de mes dix dernières années de recherche, je me suis consacré à la modélisation et à la mesure de cette région. Lors de ma thèse, j'ai développé, testé et appliqué une approche théorique ayant comme principal objectif l'extension des modélisations basées sur les équations magnétohydrodynamiques à des milieux fortement ionisés et éloignés de l'équilibre thermodynamique locale. Ce travail avait pour cadre d'application les vents astrophysiques (vents solaire et polaire terrestre) et se basait sur le choix d'une fonction de distribution des vitesses pour les particules éloignée d'une fonction de distribution maxwellienne, sur la construction des équations de transport des principales quantités macroscopiques définissant le milieu et de la résolution des dites équations. Ce formalisme a le grand avantage de pouvoir décrire, avec une seule série d'équations de transport, la transition d'un milieu fortement collisionnel à un milieu faiblement collisionnel hors équilibre thermodynamique locale. Ses principales limites sont une modélisation ad hoc de la distribution des vitesses et une résolution numérique de ces équations qui pose de grosses difficultés, en particulier liées à la définition des conditions aux limites.

A la suite de cette thèse, j'ai changé d'une part d'objet d'étude en me consacrant aux exosphères neutres planétaires, et d'autre part d'approche pour les décrire, en utilisant une approche complètement numérique basée sur une modélisation de type Monte Carlo. La limite de toute approche purement numérique étant liée aux ressources informatiques disponibles, son principal intérêt est de pouvoir décrire en détails et avec un nombre minimum d'hypothèses, les processus d'interaction donnant lieu à la formation des exosphères planétaires. Cette approche est aujourd'hui, par sa souplesse, une des plus simples à mettre en place pour décrire des milieux particulièrement délicats à appréhender. Elle permet aussi un couplage optimum avec d'autres modèles, magnétosphériques et atmosphériques par exemple. C'est donc le type d'approche que je privilégie aujourd'hui, pour modéliser l'exosphère de Mercure et son interaction avec magnétosphère et surface, tout comme pour les exosphères des satellites galiléens, mais également pour modéliser la formation de l'exosphère de Mars en interaction avec le vent solaire et son couplage avec les hautes et basses atmosphères. Ces deux projets sont actuellement les deux principales directions de mes développements théoriques et se placent dans le cadre :

- de la préparation de la mission d'exploration spatiale Bepi-Colombo et notamment des futures mesures des instruments développés au LATMOS, le spectromètre UV PHEBUS et le spectromètre de masse et d'énergie PICAM, sélectionnés sur l'orbiteur planétaire de cette mission (Mercury Planetary Orbiter, MPO), et tous deux dédiés à la mesure de l'exosphère de Mercure,

- du programme d'exploration spatiale de Mars (mission américaine scout MAVEN et le projet de mission européenne MarsNext), à travers le projet HELIOSARES, sélectionné par l'ANR en 2009 et dont j'ai la responsabilité. HELIOSARES a pour objectif le couplage entre modèles magnétosphérique, exosphérique et atmosphérique/ionosphérique de l'environnement martien.

La suite logique de tout travail théorique étant la confrontation avec la mesure, j'ai profité de nombreuses opportunités de travailler sur des observations originales des environnements planétaires ayant été intégré dans un laboratoire, le défunt Service d'Aéronomie, aujourd'hui Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales, LATMOS, consacrant une très grande part de son activité à l'exploration spatiale. Ainsi, j'ai pu travaillé sur les données de Spectroscopy for Investigation of Characteristics of the Atmosphere of Mars (SPICAM), spectromètre UV à bord de la sonde Mars Express, et de Cassini Plasma Spectrometer (CAPS), spectromètre pour les ions à bord de la sonde CASSINI. Dans le cadre de la préparation de la mission EJSM vers Jupiter, je travaille également sur des données d'observation depuis la terre du satellite galiléen Europa. Enfin depuis quelques années, et notamment les trois dernières années que j'ai passées en Italie lors de ma mise à disposition à l'Osservatorio Astronomico de Trieste, j'ai travaillé sur la caractérisation de l'exosphère de Mercure, en analysant, réalisant et programmant des observations de l'exosphère de Mercure en collaboration avec des partenaires français, italiens, japonais et américains. Ce séjour en Italie m'a également permis de débiter des collaborations sur l'étude des environnements cométaires.

Le dernier axe de mon travail de recherche complète les deux volets précédents de modélisation théorique et d'observation des exosphères planétaires. Il consiste en ma participation au développement d'un instrument dédié à l'analyse des exosphères planétaires et à leur caractérisation. Ce projet instrumental, Hot Neutral Analyzer (ou plus récemment Neutral and Ion Mass Energy Imaging Spectrometer) a obtenu un financement CNES pour une étude en recherche et développement qui commencera à l'automne 2009, dont j'ai la responsabilité.

Tous ces travaux n'auraient pas pu voir le jour sans l'aide essentielle et la confiance que m'a accordé mon directeur de thèse Daniel Hubert à l'Observatoire de Paris, qui a eu la lourde tâche de guider mes premiers pas dans le domaine de la recherche, ce dont je le remercie très chaudement. Par la suite, c'est R.E. Johnson de l'Université de Virginia qui m'a initié au monde de la planétologie, ce qu'il a fait avec la passion et la patience qui le caractérisent. Depuis lors, j'ai le privilège de travailler avec Eric Chassefière et Jean-Jacques Berthelier du LATMOS, grâce auxquels j'ai pu poursuivre mes travaux précédents, mais qui m'ont surtout offert de nombreuses opportunités de découvrir de nouveaux domaines d'activité, notamment en m'impliquant dans des projets instrumentaux.

## II CURRICULUM VITAE

### PRINCIPALES DATES

---

François LEBLANC Né le 27 août 1969  
LATMOS CNRS Marié  
Verrières-Le-Buisson, 91371 2 enfants  
FRANCE Nationalité française  
Tel : (33) 1 64 47 43 03  
Email: [francois.leblanc@latmos.ipsl.fr](mailto:francois.leblanc@latmos.ipsl.fr)  
CR1 et astronome associé INAF (Italie)

### ETUDES

---

- 1998 **Doctorat** de physique des plasmas de l'Université de Paris XI : mention très honorable avec félicitations.
- 1992 **D.E.A.** de Dynamique des fluides et des transferts, option modélisation numérique, de l'Ecole Centrales de Nantes, mention bien (major de la promotion).
- 1989-1992 **Diplôme d'ingénieur** de l'ENSM (Ecole Nationale Supérieure de Mécaniques de Nantes).
- 1987 **Baccalauréat série C.**

### EXPERIENCES PROFESSIONNELLES

---

- 2006 - 2009 **Osservatorio Astronomico di Trieste (Italie)**  
Mise à disposition: observations de Mercure (TNG, THEMIS, NTT, CFHT)
- 2001 **Service d'Aéronomie (Verrières-Le-Buisson)** Poste de chercheur CNRS, grade CR2.
- 2000-2001 **Service d'Aéronomie (Verrières-Le-Buisson)**  
Echappement atmosphérique (E. Chassefière ; J.J. Berthelier), post-doctorat CNES.
- 1999-2000 **University of Virginia (Charlottesville, USA)**  
Etude de l'effet du criblage par des ions incidents, de l'atmosphère martienne sur l'échappement des particules neutres de cette atmosphère (R.E. Johnson et J. Luhmann)
- 1995-1998 **Département de recherche spatiale, Observatoire de Paris/Meudon**  
Thèse de physique des plasmas - Modèle multimoments multi-espèces généralisé pour l'expansion des vents astrophysiques (D. Hubert).
- 1994-1996 **Département de recherche spatiale, Observatoire de Paris/Meudon**  
Service National en tant qu'objecteur de conscience (20 mois) - Etude de la faisabilité d'un nouveau système d'équations de transport pour le vent solaire et développement de logiciels d'interprétations de mesures d'états non-maxwelliens par les radars EISCAT.
- 1991-1992 **Ecole Centrale de Nantes (Nantes)**  
D.E.A. stage de recherche (11 mois) - Etude de l'interpolation spline pour la résolution des équations de Navier-Stokes.

### LANGUES

---

<b>Anglais</b>	Lu, écrit, parlé
<b>Italien</b>	Lu, écrit, Parlé
<b>Allemand</b>	Notions

## RESPONSABILITES SCIENTIFIQUES

---

### En tant que coordinateur principal

- Responsable de la proposition ANR blanc acceptée (Avril 2009), HELIOARES : « Relation Soleil – Mars: description et analyse des échanges présents et passés entre magnétosphère et atmosphère », Budget 426 k€.
- Responsable d'une action de recherche et développement financé par le CNES (RS09/SU-0003-040) en 2009-2011 : Spectromètre de masse neutre (HNA) Budget 135 k€.
- Responsable de deux campagne de mesure sur le télescope THEMIS en 2008 (35 jours) et 2009 (44 jours) : « Investigation of the exosphere of Mercury ».
- Responsable de proposition instrumentale en réponse à l'appel à déclaration d'intérêt pour EJSM/Laplace (Mai 2009) : "Neutral and Ion Mass and Energy Imaging Spectrometer (NIMEIS), An instrument dedicated to the in situ characterization of the atmosphere/exosphere of the Galilean satellites".
- Responsable de la proposition de mission martienne MEMO (Mars Escape and Magnetic Orbiter) pour Cosmic Vision 2015 (Juin 2007) et Réponse à l'appel à idée Aurora/NEXT (Avril 2007).
- Responsable groupe de travail PNP de 2001 à 2006 : «Interaction d'un objet faiblement magnétisé avec son environnement : Mars-Titan-Venus dans le cadre de Mars Express-CASSINI-Venus Express et MEMO », Budget obtenu en 6 ans : 51.55 k€.

### En tant que participant

- Sur la mission Bepi Colombo/ESA (lancement 2013):
  - o Responsable de la modélisation scientifique des mesures PHEBUS et deputy-PI depuis Septembre 2008 (PI : E. Quemerais, LATMOS, France)
  - o Co-I PICAM/SERENA: co-PI de la contribution française (PI: K. Torkar, IWF, Autriche)
  - o Theory co-I MPPE/MMO (PI: Y. Saito, JAXA, Japon)
  - o Co-I SYMBIO-SYS (PI: E. Flamini, ASI, Italie)
  - o Membre du Science Operation Working Group of MMO and MPO/Bepi Colombo
- Co-I sur SPICAM/MEX (Responsable de la haute atmosphère)
- Co-I sur SPICAV/VEX
- Co-I sur MAVEN mission Scout 2013 pour l'exploration de Mars (PI : B. Jakosky, USA)
- Team member of CAPS/CASSINI (PI: D. Young, USA)

## ANIMATION SCIENTIFIQUE

---

- Organisation d'une session "Planets, Comets, and Satellites: Surface, Atmosphere, Ionosphere System and coupling with Magnetosphere" à l'AOGS 2005.
- Organisation d'une session "Comparative Planetary Atmospheres, Ionospheres, and Magnetospheres" à l'AOGS 2005.
- Organisation d'une session "Relation between Exosphere-Magnetosphere-Surface on Mercury and the Moon" à l'EGU 2006.
- Organisation d'une session "Interaction of the Solar Wind with Surfaces and with Atmospheres" à l'EPSC 2006.
- Principal organisateur du workshop ISSI en 2007 sur "Planetary Atmospheric Electricity » First Europlanet-ISSI workshop.
- Organisation d'un atelier de travail franco-japonais sur Bepi Colombo, Paris Octobre 2007.
- Co-Organisation d'une session "Ionized environments of magnetized planets compared" à l'AOGS 2009.
- Membre de l'instance scientifique et administrative de l'IPSL en tant que membre du directoire du Pôle de Planétologie depuis 2009.
- Referee d'une quarantaine de papiers pour une dizaine de revues internationales
- Expert chargé de l'évaluation de projets proposés à la NASA (USA), NSF (USA), STFC (UK) et ASF (Autriche)

## TRAVAIL EDITORIAL

---

- Rédacteur des Notes du Pôle de Planétologie de l'IPSL
- Editeur scientifique d'un numéro spécial sur l'astrobiologie (AGU 2004) parue en 2006
- Editeur scientifique d'un volume AOGS 2005 parue en 2006
- Editeur scientifique d'un volume AOGS 2006 parue en 2007
- Editeur scientifique d'un numéro spécial sur Mercure (Planetary Space Science, Volume 55, Issue 11, Pages 1493-1634, September 2007)
- Editeur: Leblanc F., K. Aplin, Y. Yair, G. Harrison, J.P. Lebreton, M. Blanc (Eds.), Space Science Serie of ISSI, Volume 30: Planetary Atmospheric Electricity, ISBN: 978-0-387-87663-4, October 2008, Reprinted from Space Science Reviews Volume 137, No. 1-4, 2008

## ACTIVITE D'ENSEIGNEMENT

---

- Membre CSE-INPG en 2009 : campagne de recrutement d'un Maître de conférence en section 34.
- Membre CSE-UVSQ en 2008: campagne de recrutement d'un Maître de conférence en section 34.
- Co-Encadrant Stage de DEA de N. Yan (2004)
- Encadrant Stage de DEA de J.Y. Chaufray (2005)
- Co-Encadrant N. Yan au SA (Thèse soutenue le 15 Novembre 2006)
- Co-Encadrant J.Y. Chaufray au SA (Thèse soutenue fin 2007)
- Co-Encadrant F. Cipriani au CETP (Thèse soutenue le 6 octobre 2006)
- Aide à l'encadrement de la Thèse de doctorat de V. Mangano (Universita di Padova, « Study of the exosphere of Mercury, 2006), responsable : C. Barbieri et G. Cremonese.
- Aide à l'encadrement de la thèse di Laurea de C. Grava (Universita di Padova, 2008) et de la thèse de doctorat (Universita di Padova, « Study of the exospheres of the solar system bodies », 2008-2010), responsable : C. Barbieri
- Co-Encadrant de A. Gicquel (Stage de M2 astronomie et astrophysique), 2008
- Co-Encadrant M. Wedlund au LATMOS (Thèse débutée en 2008)
- Aide à l'encadrement du stage post-doctoral de P. Borin (Universita di Padova, « Observation of Mercury's exosphere with THEMIS solar telescope, 2009), responsable : G. Cremonese.
- Co-Encadrant de J. Becker (Stage de M2 astronomie et astrophysique), 2009.
- Enseignant en M2 Parcours de Planétologie : entre 3 et 5 heures de cours en 2005, 2006

## PUBLICATIONS DANS LES REVUES AVEC COMITE DE LECTURE

---

1. Hubert D., Leblanc F. and Gaimard P., Current state-of-the-art for the measurement of non-Maxwellian plasma parameters with the EISCAT UHF facility, *Ann. Geophysicae*, 14, 1506-1512, 1996.
2. Hubert D. and Leblanc F., The 1-D O<sup>+</sup> ion non-Maxwellian velocity distribution function revisited, *Ann. Geophysicae*, 15, 249-254, 1997.
3. Leblanc F. and Hubert D., A generalized model for the proton expansion in astrophysical winds. I. The velocity distribution function representation, *Astrophysical Journal*, 483, 464-474, 1997.
4. Leblanc F. and Hubert D., A generalized model for the proton expansion in astrophysical winds. II. The associated set of transport equations, *Astrophysical Journal*, 501, 375-385, 1998, et Erratum : *Astrophysical Journal*, 511, 515, 1999.
5. Leblanc F., Hubert D. and P.-L. Blelly, A generalized model for the proton expansion in astrophysical winds. III. The collisional transfers and their properties, *Astrophysical Journal*, 530, 478, 2000.
6. Leblanc F., Hubert D. and P.-L. Blelly, Comparison of the generalized and bi-Maxwellian multimoment multispecies approaches of the terrestrial polar wind, *Journal of Geophysical Research*, 105, 2551, 2000.
7. Johnson R.E. and F. Leblanc, The physics and chemistry of sputtering by energetic plasma Ions, Proceedings de la conférence "Physics of Space: Growth points and problems", *Astrophys. Space Sci.*, 277, 259-270, 2001.
8. Leblanc F. and Hubert D., A Fokker Planck approach for the expansion of Astrophysical winds: why and how, Proceedings de la conférence "Physics of Space: Growth points and problems", *Astrophys. Space Sci.*, 277, 201-

- 204, 2001.
9. Leblanc, F. and R.E Johnson, Sputtering of the martian atmosphere by solar wind pick-up ions, *Planet. Space Sci.*, 49, 645-656, 2001.
  10. Leblanc F., R.E. Johnson, and M.E. Brown, Europa's sodium atmosphere: An ocean source? *Icarus*, 159, 132-144, 2002.
  11. Leblanc F. and R.E. Johnson, Role of molecules in Pick-up Ion Sputtering of the Martian atmosphere, *Journal of Geophysical Research-Planets*, 10209/2000JE001473, 2002.
  12. Johnson R.E., Leblanc F., Madey T.E., and B. Yakshinskiy, Velocity Distributions for Electronically Stimulated Desorption: the sodium to potassium ratio at Europa. *Icarus*, 156, 136-142, 2002.
  13. Leblanc F., J.G. Luhmann, Johnson R.E., and E. Chassefière, Some expected impacts of a Solar Energetic Particle event at Mars, *Journal of Geophysical Research*, 10.1029/2001JA90178, 2002.
  14. Leblanc F., J.G. Luhmann, Johnson R.E., and Liu M., Solar Energetic Particles event at Mercury, *Planet. Space Sci.*, 51, 339-352, 2003.
  15. Delcourt, D.C., Grimald, S., Leblanc, F., Berthelier J.-J., Millilo, A., and A. Mura, A quantitative model of planetary Na<sup>+</sup> contribution to Mercury's magnetosphere, *Ann. Geophysicae*, 21, 1723-1736, 2003.
  16. Leblanc F., and Johnson R.E., Mercury's sodium exosphere, *Icarus*, 164, 261-281, 2003.
  17. Leblanc F., Delcourt D. and R.E. Johnson, Mercury's sodium exosphere: Magnetospheric ion recycling, *Icarus*, JGR-Planets, 108, E12, 5136, doi: 10.1029/2003JE002151, 2003.
  18. Chassefière E. and F. Leblanc, Atmospheric escape and evolution ; interaction with the solar wind, *Planetary Space Science*, Papier Invité, 52, 11, 1039-1058, 2004.
  19. Leblanc F., Potter A., Killen R. and Johnson R.E., Origins of Europa Na cloud and Torus, *Icarus*, 178, 365-387, 2005.
  20. Chassefière E., A. Nagy, M. Manda, F. Primdahl, H. Reme, J.-A. Sauvaud, R. Lin, S. Barabash, D. Mitchell, T. Zurbuchen, F. Leblanc, J.-J. Berthelier, H. Waite, D. T. Young, J. Clarke, M. Parrot, J.-G. Trotignon, J.-L. Bertaux, E. Quémérais, F. Barlier, K. Szegö, S. Szalá, S. Bougher, F. Forget, J. Lilensten, J.-P. Barriot, G. Chanteur, J. Luhmann, G. Hulot, M. Purucker, D. Breuer, S. Smrekar, B. Jakosky, M. Menvielle, S. Sasaki, M. Acuna, G. Keating, P. Touboul, J.-C. Gérard, P. Rochus, G. Cerutti-Maori, J. Porteneuve, M. Meftah, Ch. Malique, DYNAMO : A Mars upper atmosphere package for investigating solar wind interaction and escape processes, and mapping martian fields, COSPAR Conference proceeding, *Advanced Space Research*, 33, 12, 2228-2235, 2004.
  21. Chassefière E., J.-L. Bertaux, J.-J. Berthelier, M. Cabane, V. Ciarletti, G. Durré, F. Forget, M. Hamelin, F. Leblanc, M. Menvielle, M. Gerasimov, O. Korablev, S. Linkin, G. Managadze, A. Jambon, G. Manhès, Ph. Lognonné, P. Agrinier, P. Cartigny, D. Giardini, T. Pike, W. Kofman, A. Herique, P. Coll, A. Person, F. Costard, Ph. Sarda, Ph. Paillou, M. Chaussidon, B. Marty, F. Robert, S. Maurice, M. Blanc, C. d'Uston, J.-Ch. Sabroux, J.-F. Pineau, P. Rochette, MEP (Mars Environment package) : Towards a package for studying environmental conditions at the surface of Mars from future lander/rover missions, *Advanced Space Research*, 34, 1702-1709, 2004
  22. Michael, M., Johnson R.E, Leblanc F., Liu M., Luhmann J.G., and V. Shematovich, Ejection of Nitrogen from Titan's atmosphere by magnetospheric ions and pick-up ions, *Icarus*, 175, 263-267, 2005.
  23. Bertaux, J.-L., F. Leblanc, S. Perrier, E. Quémérais, O. Korablev, E. Dimarellis, A. Reberac, F. Forget, P.C. Simon, A.S. Stern, and B. Sandel, First observation of nightglow in the upper atmosphere of Mars: the NO bands in UV and implications for atmospheric transport, *Science*, 307, 566-569, 2005.
  24. Bertaux, J.-L., F. Leblanc, O. Witasse, E. Quémérais, J. Lilensten, A.S. Stern, B. Sandel, and O. Korablev, Discovery of aurora on Mars, *Nature*, 435, 790-794, 2005.
  25. Hubert D. and Leblanc F., Basic properties of anisotropic stellar wind expansion in the fluid approach, *J. Geophys. Res.*, 110, A12104, doi:10.1029/2005JA011190, 2005.
  26. Yan, N., E. Chassefière, F. Leblanc and A. Sarkissian, Thermal model of Mercury's surface and subsurface: Impact of subsurface physical heterogeneities on the surface temperature, *Advances in Space Research*, 38, 583-588, doi:10.1016/j.asr.2005.11.010, 2006.
  27. Yan, N., Leblanc F. and E. Chassefière, Role of Caloris basin in producing short time variation of Na Mercury's exosphere, *Icarus*, 181, 348-362, 2006.
  28. Leblanc F., Mercury Exosphere – Magnetosphere – Surface relations, *Advances in Geosciences*, World Scientific Publication, Editor A. Bhardwaj, Vol. 3, 2006.
  29. Leblanc F., Chassefière E., Johnson R.E., Hunten D.M., Kallio E., Delcourt D.C, Killen, R.M., Luhmann J.G., Potter A.E., Jambon A., Cremonese G., Mendillo M., Yan N. and A.L. Sprague, Mercury's exosphere : origins and relations to its magnetosphere and surface, *Planetary Space Science*, 55 1069–1092, 2007.
  30. Chassefière E., Leblanc F. and B. Langlais, The combined effects of escape and magnetic field histories at Mars, *Planetary and Space Science*, 55(3), 343-357, 2007.
  31. Leblanc F., Chaufray J.Y., O. Witasse, J. Lilensten and Bertaux J.-L., The Martian dayglow as seen by SPICAM UV spectrometer on Mars Express, *Journal of Geophysical Research*, 111, No. E9, E09S11, 10.1029/2005JE002664, 2006.
  32. Leblanc F., Barbieri, C., G. Cremonese, S. Verani, R. Cosentino, M. Mendillo, A. Sprague, and D. Hunten,

- Observations of Mercury's Na-D emission spectrum with the TNG in August 2003, *Icarus*, 185 (2), 395-402, 2006.
33. Leblanc, F., O. Witasse, J. Winningham, D. Brain, J. Liliensten, P.-L. Blelly, R. A. Frahm, J. S. Halekas, and J. L. Bertaux, Origins of the Martian aurora observed by Spectroscopy for Investigation of Characteristics of the Atmosphere of Mars (SPICAM) on board Mars Express, *J. Geophys. Res.*, 111, A09313, doi:10.1029/2006JA011763, 2006.
  34. Cooper, J.F.; Johnson, R.E.; Richardson J.D. and Leblanc F., Space Physics, Mars, and Life, *Astrobiology*, Volume 6, Issue 3, pp. 437-438, 2006
  35. Cipriani, F., F. Leblanc, and J. J. Berthelier, Martian corona: Nonthermal sources of hot heavy species, *J. Geophys. Res.*, 112, E07001, doi:10.1029/2006JE002818, 2007
  36. Delcourt, D. C., Leblanc F., Seki K., Terada N., Moore T. E., and M.-C. Fok Ion Energization During Substorms at Mercury, *Planet. Space Science*, 55, 1502-1508, 2007.
  37. De La Haye, V.; Waite, J. H., Jr.; Johnson, R. E.; Yelle, R. V.; Cravens, T. E.; Luhmann, J. G.; Kasprzak, W. T.; Gell, D. A.; Magee, B.; Leblanc, F.; Michael, M.; Jurac, S.; Robertson, I. P., Cassini Ion and Neutral Mass Spectrometer data in Titan's upper atmosphere and exosphere: Observation of a suprathermal corona, *J. Geophys. Res.*, 112, A7, A07309, 10.1029/2006JA012222, 2007.
  38. Leblanc, F., J. Y. Chaufray, and J. L. Bertaux, On Martian nitrogen dayglow emission observed by SPICAM UV spectrograph/Mars Express, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02206, doi:10.1029/2006GL028437, 2007.
  39. Bertaux J.L., Korablev O., Perrier S., Quémerais E., Montmessin F., F. Leblanc, S. Lebonnois, P. Rannou, F. Lefèvre, F. Forget, A. Fedorova, E. Dimarelli, A. Reberac, D. Fonteyn, J.Y. Chaufray and S. Guibert, SPICAM on Mars Express: Observing modes and overview of UV Spectrometer data and scientific Results, *Journal of Geophysical Research*, 111, No. E9, E09S11, doi: 10.1029/2006JE002690, 2006.
  40. Chaufray, J.Y., Modolo R., Leblanc F., G. Chanteur, R.E. Johnson and J.G. Luhmann, Mars Solar Wind interaction: formation of the Martian corona and atmospheric loss to space, *Journal of Geophysical Research*, Volume 112, Issue E9, CiteID E09009, doi: [10.1029/2007JE002915](https://doi.org/10.1029/2007JE002915), 2007.
  41. Cremonese G. and Leblanc F., Special Issue on "Relation between Exosphere-Magnetosphere-Surface on Mercury and the Moon", *Planetary and Space Science*, Volume 55, Issue 11, p. 1493-1493 2007.
  42. Chaufray J.Y Bertaux J.L., Leblanc F., and E. Quémerais, Observation of the hydrogen corona with SPICAM on Mars Express, *Icarus*, 195, 2, 598-613 2008.
  43. Fulle M., Leblanc F., Harrison R.A., Davis C.J., Eyles, C.J., Halain, J.P., Howard, R.A., Bockelée-Morvan D., Cremonese G., and T. Scarmato, Discovery of the atomic iron tail of comet McNaught by the Heliospheric Imager on STEREO, *Astrophysical Journal*, 661: L93-L96, 2007.
  44. Bertaux J.L., D. Nevejans, O. Korablev, E. Villard, E. Quémerais, E. Neefs, F. Montmessina, F. Leblanc, J.P. Dubois, E. Dimarellis, A. Hauchecorne, F. Lefèvre, P. Rannou, J.Y. Chaufray, M. Cabane, G. Cernogora, G. Souchon, F. Semelin, A. Reberac, E. Van Ransbeek, S. Berkenbosch, R. Clairquin, C. Muller, F. Forget, F. Hourdin, O. Talagrand, A. Rodin, A. Fedorova, A. Stepanov, I. Vinogradov, A. Kiselev, Yu. Kalinnikov, Georges Durry, B. Sandel, A. Stern, J.C. Gérard, SPICAV on Venus Express: Three spectrometers to study the global structure and composition of the Venus atmosphere, *Planetary and Space Science*, 55, 12, 1673-1700, 2007.
  45. G. Gronoff, J. Liliensten, C. Simon, M. Barthélemy, and F. Leblanc, Modelling the Venusian airglow, *Astronomy & Astrophysics*, 482,3, 1015-1029, doi: 10.1051/0004-6361:20077503 2008.
  46. Shematovich V.I., D.V. Bisikalo, J.-C. Gérard, C. Cox, S.W. Bougher, F. Leblanc, Monte Carlo model of electron transport for the calculation of Mars dayglow emissions, *Journal of Geophysical Research*, 113, E02011, doi:10.1029/2007JE002938, 2008.
  47. Cassidy T.A, R. E. Johnson, Geissler P.E. and F. Leblanc, Simulation of Na D emission near Europa during eclipse, *Journal of Geophysical Research*, 113, E2, E02005, doi: [10.1029/2007JE002955](https://doi.org/10.1029/2007JE002955) 2008.
  48. Leblanc, F., Langlais B., Fouchet T., Barabash S., Breuer D., Chassefière E., Coates A., Dehant V., Forget F., Lammer H., Lewis S., Lopez-Valverde M., Manda M., Menvielle M., A. Pais, Paetzold M., Read P., Sotin C., Tarits P., and Vennerstrom S., Mars Environment and Magnetic Orbiter: Science and measurements objectives, *Astrobiology Journal*, 9, 71-89, doi:10.1089/ast.2007.0222, 2009.
  49. Leblanc F., Fulle M., López Ariste A., Cremonese G., A. Doressoundiram, A. Sainz Dalda and B. Gelly, Comet McNaught 2006P1: Observation of the Sodium emission by Themis, *A&A*, 482 1293-298, Doi : 10.1051/0004-6361:20078795, 2008.
  50. Cox C., A. Saglam, J.-C. Gérard, J.-L. Bertaux, F. G. Galindo, F. Leblanc, and A. Reberac, The distribution of the Ultraviolet Nitric Oxide Martian Night Airglow: observations from Mars Express and comparisons with a one-dimensional model, *Journal of Geophysical Research*, 113, E08012, doi:10.1029/2007JE003037, 2008.
  51. Langlais B., Leblanc, F., Fouchet T., Barabash S., Breuer D., Chassefière E., Coates A., Dehant V., Forget F., Lammer H., Lewis S., Lopez-Valverde M., Manda M., Menvielle M., A. Pais, Paetzold M., Read P., Sotin C., Tarits P., Vennerstrom S., Cremonese G., Wallhund J.E., Rème H., Merayo J.G.M., Trotignon J.G. and Branduardi-Raymont G., Mars Environment and Magnetic Orbiter: model payload, *Experimental Astronomy*, 23, 761-783, doi: 10.1007/s10686-008-9101-1, 2009.

52. Leblanc F., Witasse O., Lilensten J., R. Frahm, Ali Safaenili, D. Brain, J. Mouginot, H. Nilsson, Y. Futaana, J. Halekas, M. Holmstrom, J.L. Bertaux, D. Winningham, W. Kofmann and R. Lundin, , Observations of aurorae by SPICAM UVS on board Mars Express: simultaneous ASPERA-3 and MARSIS measurements, *Journal of Geophysical Research*, 113, A08311, doi:10.1029/2008JA013033, 2008.
53. Dubinin E. M. Fraenz, j. Woch, E. Roussos, D. Winningham, R. Frahm, A. Coates, F. Leblanc, R. Lundin and S. Barabash, Access of solar wind electrons into the Martian magnetosphere, *Ann. Geophys.*, 26, 3511–3524, 2008.
54. Chaufray, J.Y., F. Leblanc, E. Quémerais, and J.-L. Bertaux, Martian oxygen density at the exobase deduced from OI 130.4-nm observations by Spectroscopy for the Investigation of the Characteristics of the Atmosphere of Mars on Mars Express, *Journal of Geophysical Research*, 114, E02006, doi:10.1029/2008JE003130, 2009.
55. Simon C., Witasse O., Leblanc F., Gronoff G. and J.L. Bertaux, Characterising Mars' dayglow using Mars Express' SPICAM ultraviolet data in combination with a kinetic model, *Plan. Space Science*, *Accepté*, 2008.
56. Leblanc F., A. Doressoundiram, N. Schneider, V. Mangano, A. Lopez-Ariste, C. Lemen, B. Gelly, C. Barbieri, and G. Cremonese, High latitude peaks in Mercury's sodium exosphere: Spectral signature using THEMIS Solar Telescope, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L18204, doi:10.1029/2008GL035322, 2008.
57. Johnson, R.E., M. R. Combi, J. L. Fox, W.-H. Ip, F. Leblanc, M. A. McGrath, V. I. Shematovich, D. F. Strobel and J. H. Waite, Exospheres and Atmospheric Escape, *Space Science Reviews*, 139, 355-397, doi:10.1007/s11214-008-9415-3, 2008.
58. Cipriani, F., F. Leblanc, O. Witasse, and R. E. Johnson, Sodium recycling at Europa: what do we learn from the sodium cloud variability?, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L19201, doi:10.1029/2008GL035061, 2008.
59. Chassefière E., J.-L. Maria, J.-P. Goutail, E. Quémerais, F. Leblanc, S. Okano, I. Yoshikawa, O. Korablev, V. Gnedykh, G. Naletto, P. Nicolosi, M.-G. Pelizzo, J.-J. Correia, S. Gallet, C. Hourtoule, P.-O. Mine, C. Montaron, N. Rouanet, J.-B. Rigal, G. Muramaki, K. Yoshioka, O. Kozlov, V. Kottsov, P. Moisseev, N. Semena, J.-L. Bertaux, M.-Th. Capria, J. Clarke, G. Cremonese, D. Delcourt, A. Doressoundiram, S. Erard, R. Gladstone, M. Grande, D. Hunten, W. Ip, V. Izmodenov, A. Jambon, R. Johnson, E. Kallio, R. Killen, R. Lallement, J. Luhmann, M. Mendillo, A. Milillo, H. Palme, A. Potter, S. Sasaki, D. Slater, A. Sprague, A. Stern, N. Yan, PHEBUS : A double ultraviolet spectrometer to observe Mercury's exosphere, *Planet. Space Sci.*, *Sous presse*, 2008.
60. Milillo, A., M. Fujimoto, E. Kallio, S. Kameda, F. Leblanc, Y. Narita, G. Cremonese, H. Laakso, M. Laurenza, S. Massetti, S. McKenna-Lawlor, A. Mura, R. Nakamura, Y. Omura; D. Rothery, K. Seki, M. Storini; P. Wurz, W. Baumjohann, E. Bunce, Y. Kasaba, J. Helbert, and A. Sprague, The BepiColombo mission: an outstanding tool for investigating the Hermean environment, *Planet. Space Sci.*, *Accepté*, 2008.
61. Cremonese G., Warell J., Harmon J.K., Leblanc F., Mendillo M., Sprague A., Techniques and methods in ground-based observation of Mercury, *Planet. Space Sci.*, *Accepté*, 2008.
62. Doressoundiram A., F. Leblanc, C. Foellmi and S. Erard, Metallic Species in Mercury's exosphere: EMMI/NTT Observations, *The Astronomical Journal*, 137, 3859-3863, 2009.
63. Mangano V., F. Leblanc, C. Barbieri, S. Massetti, A. Milillo, G. Cremonese, C. Grava, Observation of a Southern peak in intensity during three continuous Earth days in Mercury's sodium exosphere, *Icarus*, 201, 2, 424-431, doi: 10.1016/j.icarus.2009.01.016, 2009.
64. Helmut Lammer, Frank Selsis, Eric Chassefière, Doris Breuer, Jean-Mathias Grießmeier, Yuri N. Kulikov, Nikolai V. Erkaev, Maxim L. Khodachenko, Helfried K. Biernat, Francois Leblanc, Esa Kallio, Richard Lundin, Frances Westall, Siegfried J. Bauer, Charles Beichman, William Danchi, Carlos Eiroa, Malcolm Fridlund, Hannes Gröller, Arnold Hanslmeier, Walter Hausleitner, Thomas Henning, Tom Herbst, Lisa Kaltenegger, Alain Léger, Martin Leitzinger, Herbert I. M. Lichtenegger, René Liseau, Jonathan Lunine, Uwe Motschmann, Petra Odert, Francesco Paresce, John Parnell, Alan Penny, Andreas Quirrenbach, Heike Rauer, Huub Röttgering, Jean Schneider, Tilman Spohn, Anja Stadelmann, Daphne Stam, Giovanna Tinetti, Glenn J. White, Geophysical and atmospheric evolution of habitable planets, *Astrobiology Journal*, *In press*, 2009.
65. Doressoundiram A., F. Leblanc, C. Foellmi, G. Cremonese, F. Donati, and C. Veillet, Sodium/Potassium ratio at Mercury with CFHT/Espadons and NTT/EMMI observations: Spatial distribution, *Icarus*, *Accepted*, 2009.
66. Cipriani, F., F. Leblanc, O. Witasse, and R.E. Johnson, Exospheric signatures of alkali abundances in Europa's regolith, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L12202, doi:10.1029/2009GL038636, 2009.
67. Leblanc F., A. Doressoundiram, N. Schneider, S. Massetti, M. Wedlund, A. López Ariste, C. Barbieri, V. Mangano, and G. Cremonese, Short term variations of Mercury's Na exosphere observed with very high spectral resolution, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L07201, doi:10.1029/2009GL038089, 2009.
68. Leblanc F. and R. E. Johnson, Mercury exospheric global circulation model: I The sodium component, *Icarus*, *Submitted*, 2009.
69. Leblanc F., Doressoundiram A. and R.E. Johnson, Mercury Exospheric Global Circulation Model: II The sodium/potassium ratio, *Icarus*, *Submitted*, 2009.
70. Mangano V. Leblanc F. et al., 2006 International Watch Group campaign, *Icarus*, *in preparation*, 2009.

## CHAPITRES

---

1. R. E. Johnson, M. H. Burger, T. A. Cassidy, F. Leblanc, M. Marconi and W. H. Smyth, Composition and Detection of Europa's Sputter-Induced Atmosphere, in "Europa", Editors: R. Pappalardo, McKinnon, K. Khurana, University of Arizona Press, 2008.
2. R.E. Johnson, M. Combi, J. Fox, W-H. Ip, F. Leblanc, M. McGrath, V. Shematovich, D. Strobel, J.H. Waite, Exospheres and Atmospheric Escape, in "Comparative Aeronomy", Nagy A. and Blanc M. (Eds), Space Science Series of ISSI n°29, In press, 2008.
3. Harrison R. G., K. L. Aplin, F. Leblanc and Y. Yair, Planetary Atmospheric Electricity, in "Planetary Atmospheric Electricity", Leblanc F., Aplin, K., Yair, Y., Harrison G., Lebreton J.P. and M. Blanc (Eds), Space Science Series of ISSI n°30, 2008.

## AUTRES PUBLICATIONS

---

1. Leblanc F., Modèle multimoments multi-espèces généralisé pour l'expansion des vents astrophysiques, *Thèse de doctorat de l'Université de Paris XI*, 1998.
2. Leblanc F. and Hubert D., A generalized multispecies model for the solar wind expansion, *Proceedings of the Solar Wind 9 conference*, AIP, 1999.
3. Leblanc F., Berthelier J.-J., Waite J.-H., Godefroy M., Bolton S.J., Bougher S.W., Cerisier J.-C., Chanteur G., Chassefière E., Dominique D., Di Lellis A.M., Hamelin M., Hodges R. R., Illiano J.M., Johnson R.E., Lebreton J.P., Luhmann J.G., Menvielle M., Milillo A., Nagy A.F., Nevejans D., Orsini S., Smets R., Szegö K., Trotignon J.G., Vaisberg O., Witasse O., and Young D., A Neutral and Ion Mass Spectrometer to Study the Dynamics and Escape of the Martian Atmosphere and Ionosphere, Answer to the Call of Opportunity for Mars PREMIER, 2002.
4. Leblanc F., Lammer, H., Torkar, K., Berthelier, J.-J., Vaisberg, O. and J. Woch, Ion of planetary origins at Mercury: Some estimates, Notes du Pôle de Planétologie de l'IPSL, 5, 2004.
5. Delcourt D. and Leblanc F., Solar wind proton circulation inside Mercury's magnetosphere, Notes du Pôle de Planétologie de l'IPSL, 12, 2005.
6. Chassefière E., F. Leblanc, B. Langlais, J.-J. Berthelier, G. Chanteur, M. Menvielle, G. Hulot, C. Sotin, J. Lilensten, H. Rème, J.-A. Sauvaud, P. Touboul, M. Parrot, J.-G. Trotignon, J.-C. Gérard, P. Rochus, F. Primdahl, D. Breuer, T. Spohn, M. Manda, S. Szalai, K. Szego and O. Korabiev, Was water liquid at the surface of Mars at late noachian ? A low periapsis orbiter to decipher past martian climate, ESLAB proceeding, 2005.
7. Chassefière E., F. Leblanc, J.-P. Torre, J.-J. Berthelier, L. Duvet, A. Jambon, V. Bourdin Were the primordial atmospheres of the three terrestrial planets similar and how differently did they evolve? Expected information from Venus noble gases and their isotopes: A Venus atmospheric sample return, ESLAB proceeding 2005.
8. Chassefière E., J.-J. Berthelier, F. Leblanc, A. Jambon, J.-C. Sabroux, Venus atmosphere build-up and evolution: where did the oxygen go? May abiotic oxygen-rich atmospheres exist on extrasolar planets? Rationale for a Venus entry probe, IPPW proceeding, 2005.
9. Vaisberg, O.L.; Leibov, A.V.; Smirnov, V.N.; Avakov, L.A.; Berthelier, J.-J.; Torkar, K.; Leblanc, F.; Babkin, V.F.; Grishin, V.A.; Baumjohann, V.; Escoubet, F., Imaging mass-spectrometer of ions for studying near-planetary plasma, *Cosmic Research*, 44, 3, 202-208, 2006.
10. Leblanc, F.; Langlais, B.; Chassefière, E.; Sotin, C.; Barabash, S.; Dehant, V.; Dougherty, M.; Lammer, H.; Manda, M.; Vennerstrom, S., MEMO: Mars Escape and Magnetic Orbiter, 38th Lunar and Planetary Science Conference, League City, Texas, 1338, 1581, 2007.
11. Leblanc, F., Langlais B., Fouchet T., Barabash S., Breuer D., Chassefière E., Coates A., Dehant V., Forget F., Lammer H., Lewis S., Lopez-Valverde M., Manda M., Menvielle M., A. Pais, Paetzold M., Read P., Sotin C., Tarits P., and Vennerstrom S., Mars Environment and Magnetic Orbiter, Answer to the first planning cycle of Cosmic Vision 2015-2025, 2007.
12. Mangano V., C. Barbieri, G. Cremonese and F. Leblanc, Observation and Modeling of Mercury's exosphere, *Mem. S.A.It. Suppl.*, 11, 95, 2007.
13. Harrison R. G., K. L. Aplin, F. Leblanc and Y. Yair, Planetary Atmospheric Electricity, *Space Science Reviews*, 137, 5-10, doi: 10.1007/s11214-008-9419-z, 2008.
14. Chaufray, J.-Y.; Modolo, R.; Leblanc, F.; Chanteur, G.; Bertaux, J.-L.; Quemerais, E.; Retherford, K. D., Atmospheric Escape at Mars, Third International Workshop on The Mars Atmosphere: Modeling and Observations, Williamsburg, Virginia, 1447, 9014, 2008.
15. González-Galindo, F.; Gilli, G.; López-Valverde, M. A.; Forget, F.; Leblanc, F., Nitrogen and Ionospheric Chemistry in the Thermospheric LMD-MGCM, Third International Workshop on The Mars Atmosphere: Modeling and Observations, Williamsburg, Virginia, 1447, 9007, 2008.
16. Leblanc F., Orsini S., Vohrer U. and M. Fraenz, Answer to the Call FP7 – Space – 2009 – 1: Applications of Nanotechnology to space instrumentations, 2008.

## **CONTRIBUTIONS ORALES INVITEES A DES CONFERENCES INTERNATIONALES**

---

1. Avril 2003, Mars Aeronomy Workshop, F. Leblanc, Sputtering models, San Antonio (USA).
2. Janvier 2004, Titan Workshop, Sputtering of Titan's atmosphere, F. Leblanc, R.E. Johnson, V.I. Shematovich, M. Michael, H.T. Smith, J.G. Luhmann, S.A. Ledvina, and S.H. Brecht, Paris (France).
3. Mai 2004, AGU, State of the art of our understanding of Mercury's exosphere, F. Leblanc, Montreal (Canada).
4. Mai 2004, AGU, New Observations of UV Airglow in the Upper Atmosphere of Mars with SPICAM on Mars Express, Leblanc F., J.L. Bertaux, O.Korablev, E. Quemerais, O. Witasse, P.C. Simon, and J.Lilensten, Montreal, Canada.
5. Juillet 2004, COSPAR, Current understanding of the Mercury sodium exosphere, F. Leblanc, Paris (France).
6. Juillet 2004, COSPAR, New Observations of UV Airglow in the Upper Atmosphere of Mars with SPICAM on Mars Express, Leblanc F., J.L. Bertaux, O.Korablev, E. Quemerais, O. Witasse, P.C. Simon, and J.Lilensten, Paris, France.
7. Juin 2005, AOGS, Mercury's exosphere-magnetosphere-surface relations, Leblanc F, Singapour.
8. Juin 2005, AOGS, Thermal and energetic components of Mercury's Exosphere, Leblanc F, Singapour.
9. Juillet 2005, IAGA, Mars Express SPICAM UV: First results on the upper Martian atmosphere Leblanc F., Bertaux J.L., Witasse O., Lilensten J., Quemerais E., S.A. Stern, B. Sandel, and Korablev O, Toulouse, France.
10. Juin 2006, Rencontres de Blois, Atmospheric escapes, F. Leblanc, Blois, France.
11. Juin 2007, International Heliospheric Year, Mars Environment and Magnetic Orbiter, F. Leblanc et al., Torino, Italy.
12. Janvier 2008, Chapman Conference, Solar Wind interaction with Mars, Observations of aurora by SPICAM UVS on board Mars Express : simultaneous ASPERA-3 and MARSIS measurements, Leblanc F. et al., San Diego USA.
13. Novembre 2008, France-US Frontiers of Science, Evolution of Planetary Atmospheres: Atmospheric Loss Into Space, Leblanc F., Roscoff, France.
14. Janvier 2009, ESTEC/ESA, Mercury's atmosphere, a surface bounded exosphere, F. Leblanc, Noordwijk, The Netherlands.
15. Juillet 2009, SF2A, Planètes et Exoplanètes dans leur environnement spatial : processus, évolution et habitabilité, Leblanc F., Besançon, France

## **CONTRIBUTIONS ORALES A DES CONFERENCES INTERNATIONALES**

---

1. Avril 1997, EGS, Leblanc F. and Hubert D., A generalized model for the proton expansion in the solar wind, Viennes (AUSTRIA).
2. Décembre 1997, AGU fall meeting, Leblanc F. and Hubert D., A generalized model for the proton expansion in the terrestrial polar wind, San Francisco (USA).
3. Juillet 1998, International Symposium of Rarefied Gas Dynamics, Leblanc F. and Hubert D., Multimoment and multispecies model for the expansion of the solar wind, Marseille (FRANCE).
4. Octobre 1999, DPS, Leblanc F., Johnson R.E., Luhmann J. G., Brecht, S. H. et W. Mau, Sputtering of Mars atmosphere by  $O^+$  pick-up ions: new insights, Padova (ITALY).
5. Janvier 2000, Meudon (FRANCE), Physics of Space: Growth points and problems, A Fokker-Planck approach for the expansion of Astrophysical winds: why and how? Leblanc F. and D. Hubert.
6. Octobre 2000, DPS, Europa and its sodium cloud, Leblanc F., M.E., Brown, and R.E. Johnson, Los Alamos (USA).
7. Mars 2001, EGS, The solar energetic particle effects on Mars' atmosphere, Leblanc F., Luhmann J.G., Johnson, R.E., and Chassefière E.
8. Avril 2002, EGS, Space Weather at Mercury: effects of an encounter of a SEP event with Mercury,, F. Leblanc, Luhmann J.G., Johnson, R.E., and Liu M., Nice (FRANCE).
9. Octobre 2002, DPS, Mercury sodium exosphere: new insights, F. Leblanc and R.E. Johnson, Birmingham (USA)
10. Avril 2003, EGU, Mercury sodium exosphere, F. Leblanc and R.E. Johnson, Nice (FRANCE).
11. Septembre 2003, DPS, Mercury sodium exosphere: magnetospheric ion recycling, F. Leblanc, D. Delcourt, R.E. Johnson and M. Liu, Monterey (USA).
12. Juillet 2004, COSPAR, Jovian satellite surfaces Composition and Atmospheres R.E. Johnson, F. Leblanc, R. DeYoung, C. Paranicas, V.I. Shematovich, J.F. Cooper and M. Burger.
13. Mars 2005, MEX conference, New observations of UV airglow in the upper atmosphere of Mars with SPICAM on Mars Express, Leblanc F., Bertaux J.L., J.Y. Chaufray, Witasse O., Lilensten J., and Quémerais E.
14. Avril 2005, EGU, Discovery of aurora on Mars, Leblanc F., Bertaux J.L., Witasse, O., Quémerais E., Lilensten J., Stern S.A., Sandel B., Korablev O., and the SPICAM team.

15. Juillet 2005, JENAM, Mars ancient climate and evolution: where did water and carbon dioxide go? F. Leblanc, E. Chassefière, J.-C. Gérard, P. Rochus, F. Primdahl, J.-J. Berthelier, G. Chanteur, G. Hulot, B. Langlais, C. Sotin, J. Lilensten, H. Rème, J.-A. Sauvaud, P. Touboul, D. Breuer, T. Spohn, M. Manda, S. Szalai, K. Szego, O. Korablev.
16. November 2005, MEMO: Mars Escape and Magnetic Orbiter, Was water liquid on Mars at late Noachian ? A low periapsis orbiter to measure escape., F. Leblanc and E. Chassefière, First MEMO meeting, Paris.
17. February 2006, Mars Workshop, Origins of the Martian aurorae observed by SPICAM on board Mars Express, Leblanc F., Witasse O., Winningham J., Brain D., Lilensten J. and Bertaux J.L.
18. Avril 2006, EGU, Vienne, The Martian dayglow as seen by SPICAM UV spectrometer on Mars Express, Leblanc F., Chaufray J.Y., Lilensten J., Witasse O., and Bertaux J.-L.
19. Juillet 2006, AOGS, Singapore, Origins of the Martian aurorae observed by SPICAM on board Mars Express, Leblanc F., Witasse O., Lilensten J. and Bertaux J.L.
20. Juillet 2006, AOGS, Singapore, Phebus: Probing of Hermean Exosphere by Ultraviolet Spectroscopy: a FUV-EUV spectrometer for the MPO Bepi-Colombo, F. Leblanc, E. Chassefière, Korablev O., S. Okano, Quémerais E., Goutail J.P. and Maria J.L.
21. Juillet 2006, AOGS Singapore, Origins of Europa Na cloud and Torus, Leblanc F., Potter A.E., Killen R.M., and R.E. Johnson.
22. Septembre 2006, Europlanet Conference, Berlin, MEMO: Mars Escape and Magnetic Orbiter, Chassefière E., B. Langlais, F. Leblanc, C. Sotin, Barabash S., Dehant V., Dougherty M., Lammer H., Manda M., and S. Vennerstrom.
23. Septembre 2006, Europlanet Conference, Berlin, IDIS Science Case: Titan Ion-Neutral chemistry: understanding observations and constraining models, Leblanc F.
24. Septembre 2006, Europlanet Conference, Berlin, Observation by SPICAM UV Spectrograph of the Nitrogen in the Martian upper atmosphere, F. Leblanc, J.Y. Chaufray and Bertaux J.L.
25. Octobre 2007, European Mars Science and Exploration Conference, Noordwijk, The Netherlands, Multi-Instrument observations of Aurora-type events by Mars Express, Leblanc et al.
26. Octobre 2007, European Mars Science and Exploration Conference, Noordwijk, The Netherlands, Mars Environment and Magnetic Orbiter, Leblanc et al.
27. September 2008, Science Working Team of Bepi-Colombo 5, Sendai, Japan, High latitude peaks in Mercury's sodium exosphere: Spectral signature using THEMIS Solar Telescope, Leblanc et al.

### III SYNTHÈSE DES TRAVAUX SCIENTIFIQUES

La synthèse des travaux présentés dans ce chapitre couvre les principaux sujets que j'ai abordés depuis le début de ma thèse, c'est-à-dire :

- L'étude de la transition entre milieux fortement collisionnel et faiblement collisionnel : modèle multimoments multi-espèces pour la modélisation des vents astrophysiques (section III.1).
- L'étude de la formation de l'exosphère martienne avec comme corollaire l'échappement atmosphérique martien. Deux études théoriques ont été réalisées par Jean-Yves Chaufray et Fabrice Cipriani au cours de leur thèse (section III.2.1). Ce travail a été réalisé également dans le cadre du programme d'exploration spatiale de Mars et plus spécifiquement en soutien à la mission Mars Express et à l'analyse des données du spectromètre UV SPICAM (section III.2.2).
- L'étude de la formation des exosphères en contact direct avec la surface de leur objet, notamment l'étude de l'exosphère de Mercure (section III.3) :
  - avec comme principal objectif la compréhension des mécanismes donnant lieu à sa formation et au couplage entre surface/magnétosphère et exosphère (section III.3.1).
  - Depuis Janvier 2004, je collabore activement avec des chercheurs italiens, japonais, américains et français sur des programmes d'observation de l'exosphère de Mercure (section III.3.2). Je me consacre plus particulièrement depuis 2007 à un programme d'observations systématiques de Mercure à l'aide du télescope solaire THEMIS.
  - Je travaille aussi activement à la préparation de la mission Bepi Colombo qui est une mission ESA dont le lancement est prévu en 2013. Le LATMOS a notamment la charge de PHEBUS, UV Spectromètre sur Mercury Planetary Orbiter (MPO) sur la mission Bepi Colombo (section III.3.3.1). Je suis également responsable de la participation française à PICAM/SERENA un spectromètre de masse sous responsabilité autrichienne (K. Torkar) également sélectionné sur MPO (section III.3.3.2).

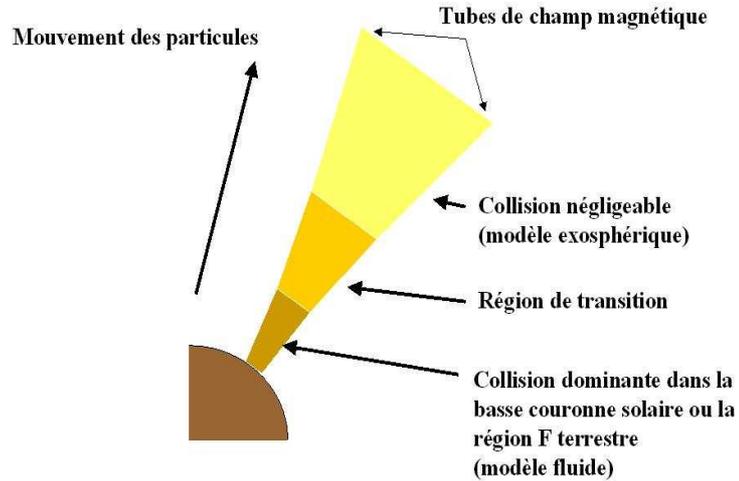
#### III.1 LA MODELISATION DES VENTS ASTROPHYSIQUES

Les vents astrophysiques sont constitués essentiellement de particules ionisées s'échappant d'une atmosphère planétaire ou stellaire. Le vent solaire est ainsi un plasma fortement ionisé issu de la couronne solaire, tandis que le vent polaire terrestre est originaire de la région F de l'ionosphère terrestre. Ces deux plasmas spatiaux sont tous deux originaires de régions fortement collisionnelles à hautes densités et températures et se détendent ensuite jusqu'à des vitesses supersoniques. Les descriptions classiques de l'évolution spatiale et temporelle de ces vents sont basées sur une approche soit fluide soit cinétique/exosphérique. Les approches fluides sont fondées sur l'hypothèse que les interactions entre particules sont suffisantes pour que l'on puisse considérer qu'elles se comportent dans l'ensemble comme un fluide et que donc les équations magnéto-hydrodynamiques sont une bonne approximation de la physique de ces milieux (Parker 1963). Par contre, l'approche exosphérique est basée sur l'hypothèse que les particules évoluent pratiquement indépendamment les unes des autres et que les distributions de vitesse des espèces évoluant dans ce milieu sont gouvernées par l'équation de Liouville (Lemaire et Scherer 1971).

Aucune de ces deux approches ne parvient à expliquer l'ensemble des observations du vent solaire, en particulier celles effectuées par SOHO et EISCAT dans la couronne solaire, (région d'accélération du vent rapide d'une quinzaine de rayons solaires seulement, température électronique

plus faible que la température protonique, températures anisotropes dès 2 rayons solaires...) ou celles au-delà de 0.3 UA par ULYSSES et HELIOS I et II (vitesse moyenne de plus de  $800 \text{ km s}^{-1}$  dans le vent rapide et situations hors équilibre thermodynamique local caractérisées par de fortes valeurs de l'anisotropie de températures et du flux de chaleur des protons). Une de leur faiblesse est entre autre leur difficulté à bien appréhender les transferts d'énergie et de moment dans les régions d'accélération de ces vents.

La principale limite théorique de ces deux approches est qu'elles sont valables pour des régions distinctes. On peut en effet distinguer trois régions où l'effet des collisions diffère (voir figure 1). Toute la difficulté étant de bien décrire les conditions aux limites pour ces deux approches, développer un modèle capable de fournir la nécessaire transition entre les régions fortement collisionnelles et les régions non-collisionnelles reste un des enjeux majeur de la physique des plasmas.



**Figure 1 :** Régions d'application des modèles théoriques actuelles pour les vents astrophysiques.

Les conditions d'origine des vents astrophysiques étant de type fortement collisionnel, il semble plus judicieux de généraliser le domaine d'application des approches fluides pour décrire leur formation. Le modèle généralisé est ainsi un modèle multimoments multi-espèces, généralisation des modèles fluides car utilisant l'anisotropie de température et le flux de chaleur comme paramètres indépendants supplémentaires.

L'idée de l'approche généralisée est d'adapter la méthode de Grad (1958) aux conditions dans les vents solaire et polaire terrestre. Dans une telle approche, la fonction de distribution des vitesses est décrite comme une fonction d'ordre zéro multipliée par un polynôme, fonction des moments  $\langle c^q \rangle$  de la distribution (équation (1)) où  $c$  est la vitesse des protons dans un repère liée à la vitesse moyenne des protons. Les moments de la distribution représentent les grandeurs macroscopiques du milieu, c'est-à-dire la densité (ordre 0,  $q=0$ ), vitesse moyenne (ordre 1), température (ordre 2), flux de chaleur (ordre 3)... Le polynôme décrit ainsi l'écart de la solution à la fonction d'ordre zéro.

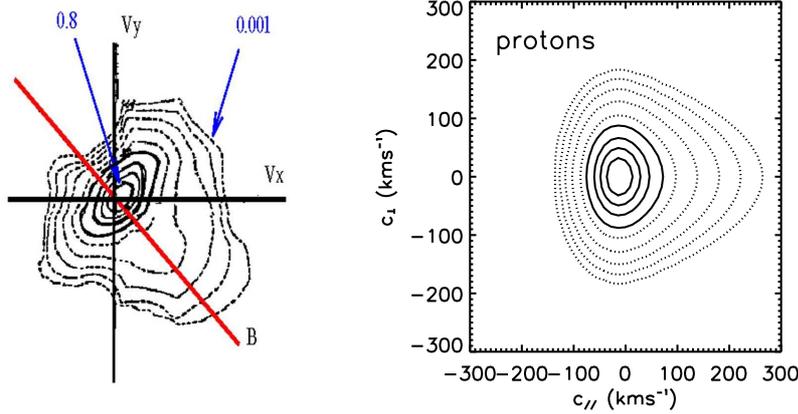
$$f = f^G(u, T_{//}, T_{\perp}, q'') \times \left\{ 1 + \sum_{q=0}^p a_q (\langle c^q \rangle) M_q \right\} \quad (1)$$

où  $u$  est la vitesse moyenne,  $T_{//}$  est la température le long du champ magnétique,  $T_{\perp}$  perpendiculairement, et  $q''$  est le flux de chaleur parallèlement au champ magnétique.  $a_q$  sont les coefficients du polynôme et  $M_q$  une série de polynômes orthogonaux de Legendre.  $p$  est égal à 3.

Mon premier travail a donc été de chercher une nouvelle fonction de distribution d'ordre zéro, qui ne soit pas la fonction maxwellienne du modèle de Grad bien adaptée aux milieux proches de l'équilibre thermodynamique locale (ETL). Cette fonction devait être en particulier capable de décrire les forts écarts à l'ETL qui sont observés dans le vent solaire. Mon choix s'est porté sur la

solution analytique de l'équation de relaxation sans gradient spatial (équation BGK, Whealton et Woo 1971). Cette solution  $f^G$  décrit une population ionique s'échappant d'un champ gravitationnel sous l'effet d'un champ électrostatique et soumis à des effets collisionnels ion/neutre ou ion/ion la ramenant à l'ETL. Nous avons considéré que c'est une bonne représentation d'ordre zéro de l'expansion des vents astrophysiques. Elle a été utilisée pour décrire les fonctions de vitesse dans la région F de l'ionosphère terrestre observée par les radars EISCAT (Hubert et al. 1996 ; 1997).

Nous avons montré que  $f$  est une bonne approximation d'ordre zéro des vents solaire et polaire terrestre. Ce modèle analytique reproduit correctement les profils typiques de la fonction de distribution des protons observés dans le vent solaire (figure 2).



**Figure 2 :** Figure de gauche : Fonction de distribution des vitesses pour les protons du vent solaire mesurée par Helios II (Marsch et al. 1982). Figure de droite : profil de distribution des vitesses simulé à l'aide de la fonction décrite équation (1).  $c_{//}$  est la vitesse des protons parallèlement au champ magnétique et  $c_{\perp}$  perpendiculairement.

Dans un premier papier (Leblanc and Hubert 1997), j'ai montré que cette solution reproduit correctement les profils typiques de fonctions de distribution observées dans le vent solaire et y vérifie les critères de convergence et de positivité, contrairement à la solution de Grad (figure 2).

Dans un deuxième article (Leblanc et al. 1999), j'ai présenté les équations de transport du modèle généralisé pour les grandeurs macroscopiques allant jusqu'au flux de chaleur et calculées par intégration de l'équation de Fokker-Planck. Afin de vérifier qu'à ce niveau macroscopique de description, cette solution est bien adaptée aux vents astrophysiques, j'ai repris certaines études des modèles multimoments (dont celles des propriétés d'hyperbolicité et de réalisabilité) et ai constaté que notre traitement de la coupure du système d'équations est correct pour des valeurs importantes de l'anisotropie de température et du flux de chaleur contrairement à d'autres approches basées sur une distribution de vitesse bi-maxwellienne (Demars et Schunk 1979).

Dans une troisième partie, nous présentons les transferts collisionnels issus de l'intégration de l'équation de Fokker-Planck (Leblanc et al. 2000a). De nouveaux mécanismes dus à une meilleure description des effets collisionnels apparaissent pouvoir contribuer sensiblement à l'accélération des électrons par interaction avec les ions dans le vent solaire. Il y est également montré que les échanges d'énergie entre espèces sont beaucoup plus intenses et anisotropes dans la région d'accélération par rapport aux prédictions des modèles multimoments précédents (Blelly et al. 1993).

Une première application (Leblanc et al. 2000b) a été réalisée dans le cadre du vent polaire terrestre. Ce modèle a été validé par comparaison avec d'autres approches et a permis de préciser l'évolution des fonctions de distribution et des transferts d'énergie associés à une nouvelle conductivité thermique mieux adapté à la transition du régime collisionnel à un régime non-collisionnel.

Cette approche théorique présente cependant de nombreuses difficultés liées à la complexité des termes de collision à calculer et aussi à la sensibilité de la résolution du système d'équations aux conditions aux limites.

## **III.2 LES EXOSPHERES DES CORPS PLANETAIRES AVEC ATMOSPHERE : MARS**

### **III.2.1 L'EXOSPHERE ET L'ÉCHAPPEMENT ATMOSPHERIQUE MARTIENS**

#### **III.2.1.1 Que sait on de l'exosphère martienne ?**

Il existe très peu d'observations directes de l'exosphère neutre de Mars. Jusqu'à maintenant, seule sa composante neutre hydrogène a été observée par spectrométrie UV au-delà de quelques rayons martiens (Barth et al. 1971 ; Chaufray et al. 2009), tout comme sa composante neutre d'oxygène jusqu'à 700 km en altitude (Barth et al. 1971 ; Chaufray et al. 2008). Une des questions qui se pose à propos de l'exosphère de Mars est l'existence ou non d'une composante supra-thermique, indice direct de l'importance des processus énergétiques dans la thermosphère martienne pouvant donner lieu à de l'échappement atmosphérique (section II.2.1.2). En fait, la difficulté d'interpréter des émissions UV optiquement épaisses jusqu'à un rayon martien de la surface fait que la structure énergétique de l'exosphère reste irrésolue de manière univoque (Chaufray et al. 2008 ; 2009). Les mesures in situ des ions d'origine planétaire fournissent quelques indices sur la composition et densité de cette exosphère (Nilsson et al. 2009) mais restent difficiles à relier à leur origine exosphérique neutre. En fait, l'essentiel des informations sur la structure énergétique probable de l'exosphère de Mars vient des nombreuses missions d'exploration de Vénus qui ont révélé la présence en plus d'une composante thermique (c'est-à-dire directement extension de l'atmosphère) d'une composante supra-thermique (Barth et al. 1968 ; Bertaux et al. 1978 ; Nagy et al. 1988). Vénus ayant une haute atmosphère composée d'une manière similaire à celle de Mars, on peut raisonnablement supposer que les processus produisant la composante supra-thermique de l'exosphère de Vénus devraient être également actifs dans la haute atmosphère martienne.

Le second élément suggérant la présence d'une composante chaude dans l'exosphère martienne dérive des développements théoriques décrivant les différents processus dans l'ionosphère et thermosphère martiennes susceptibles de générer une composante supra-thermique exosphérique. On peut ainsi évaluer l'importance de ces processus, en comparant leurs contributions à l'exosphère et à l'échappement atmosphérique à celles des processus thermiques.

La description la plus simple de la composante thermique d'une exosphère a été établie par J.W. Chamberlain (Chamberlain 1963). Elle est basée sur la résolution de l'équation de Liouville pour quatre populations de l'exosphère (présentes au dessus de l'exobase) :

- la population de particules s'échappant du champ gravitationnel et originaires d'en dessous de l'exobase,
- la population de particules balistiques provenant d'en dessous de l'exobase et dont l'énergie est inférieure à l'énergie d'échappement,
- la population de particules dite satellites qui ne passent jamais l'exobase mais dont l'énergie est inférieure à l'énergie d'échappement,
- la population de particules incidentes qui proviennent de l'infini et peuvent ou non impacter l'atmosphère.

Il est possible de résoudre l'équation de Liouville pour chacune de ces quatre populations, moyennant l'hypothèse que la distribution des vitesses de la somme de ces quatre populations est maxwellienne à l'exobase. On peut alors déterminer pour chacune de ces populations le profil de

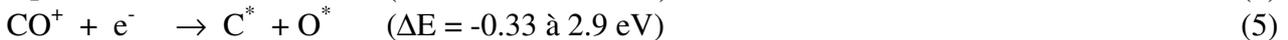
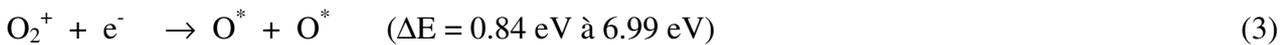
densité en fonction de la distance à la planète, tout comme le flux s'échappant de l'atmosphère essentiellement fonction de la densité et la température à l'exobase (le flux de Jeans). Cette formulation étant correcte lorsque la population de particules à l'exobase est maxwellienne, elle ne permet pas de décrire une population loin de l'équilibre thermodynamique locale.

Une telle population peut être produite par un certain nombre de processus dit supra-thermiques car produisant des particules hors équilibre thermodynamique locale. Ces processus peuvent être divisés en deux grandes catégories suivant l'origine principale de leur source d'énergie, les photons solaires ou le vent solaire.

Les photons solaires, notamment ceux ayant une longueur d'onde inférieure à 100 nm, c'est-à-dire des énergies supérieures à 12.4 eV, ont une énergie suffisante pour ioniser la plupart des constituants de la thermosphère martienne. Une fois ionisés, les molécules et atomes de la haute atmosphère martienne interagissent avec d'autres atomes, d'autres ions (par échange de charge ou réaction ion – neutre) ou des électrons. Dans ce dernier cas, 4 types de réactions peuvent avoir lieu : la recombinaison dissociative, la recombinaison radiative, l'excitation dissociative ou la formation d'une paire d'ions. La recombinaison dissociative des ions ionosphériques est un des principaux processus potentiellement à l'origine de la composante supra-thermique de l'exosphère martienne car exothermique. Cette réaction peut se résumer par:



La recombinaison entre  $AB^+$  et un électron produit un intermédiaire réactionnel doublement excité :  $AB^{**}$ , dont le potentiel ne possède pas de minimum et qui donc se dissocie ensuite en deux atomes A et B. Cette réaction est exothermique et produit des éléments excités avec une énergie  $\Delta E$  et suivant différents branchements dépendant avant tout de l'état vibrationnel de l'ion moléculaire  $AB^+$  et de la température électronique. Les principales réactions de recombinaison dissociative des ions moléculaires de l'ionosphère martienne sont résumées ci dessous:



Sachant qu'à l'exobase, l'énergie d'échappement d'un atome d'oxygène, d'azote ou de carbone est 1.9 eV, 1.72 eV et 1.48 eV, il est évident que suivant les différentes probabilités des différents branchements de ces réactions, une partie non négligeable des atomes ainsi produits peut avoir une énergie suffisante pour peupler l'exosphère martienne, voire s'échapper. Ce processus et sa contribution à l'exosphère martienne ont été décrits dans de nombreux travaux (McElroy 1972 ; Nagy and Cravens 1988 ; Kim et al. 1998) et plus récemment au cours des thèses de J.Y. Chaufray (2007) et de F. Cipriani (2006).

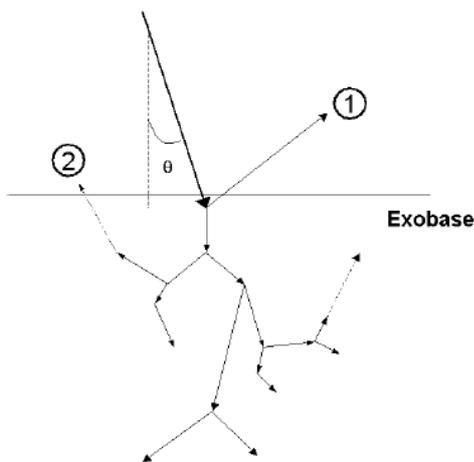
Le but de ces deux thèses était notamment de décrire de manière consistante les deux principaux processus non-thermiques pouvant donner lieu au peuplement neutre de l'exosphère et à de l'échappement. Aussi, ces travaux ont-ils aussi intégrés l'effet du criblage de la haute atmosphère martienne par les particules piégées dans le vent solaire et potentiellement reimpactant l'exobase martienne. Ce mécanisme est donc lié à l'apport énergétique du vent solaire dans la haute atmosphère. Les collisions entre particules incidentes et atmosphériques à l'origine de la population exosphérique ont lieu dans la haute atmosphère, sous l'exobase, dans une région faiblement

collisionnelle qui correspond à la zone de transition de la figure 1. Il est donc très difficile d'utiliser une approche autre que purement cinétique.

L'approche classiquement utilisée pour décrire le bombardement d'une atmosphère (ou d'une surface, section III.3.1.1) par des particules énergétiques a été formalisée par R.E Johnson (Johnson 1990) et largement utilisée par la suite (Luhmann et al. 1992 ; Kass et al. 1995 ; 1996 ; Johnson et Luhmann 1998 ; Johnson et al. 2000 ; Leblanc et Johnson 2001 ; Leblanc et al. 2002). Le paramètre classiquement utilisé pour décrire l'efficacité du criblage à produire une population exosphérique est le rendement:

$$Y = \frac{N_{\text{éjectées}}}{N_{\text{incidentes}}} \quad (6)$$

où  $N_{\text{éjectés}}$  représente le nombre de particules éjectées depuis l'exobase, et  $N_{\text{incidentes}}$  le nombre de particules incidentes. Johnson (1990) a proposé une approche pour calculer  $Y$  à partir d'une description simplifiée de ce mécanisme, résumée par la figure 3.



**Figure 3 :** Description de l'effet d'une particule incidente impactant l'exobase d'un objet planétaire suivant un angle  $\theta$ . Deux types d'effet sont décrits. Le cas 1 correspond à une éjection directe depuis l'exobase (où plus précisément depuis une couche pas plus épaisse que le libre parcours moyen de la particule incidente) d'une particule de l'objet planétaire ou simplement à la rétro-diffusion de la particule incidente. Ce cas correspond à une particule incidente dont l'énergie est de l'ordre du keV et dont la masse atomique est petite par rapport à la masse atomique moyenne sous l'exobase (typiquement un proton solaire impactant l'atmosphère de Mars par exemple). Le cas 2 correspond à des particules incidentes dont la masse atomique est proche de celle des particules sous l'exobase et l'énergie de l'ordre du keV/amu (ions  $O^+$  impactant l'atmosphère martienne par exemple). Ces particules pénètrent plus profondément sous l'exobase et génèrent une cascade de collisions qui peut donner lieu à l'éjection de plusieurs particules de l'objet planétaire. Extrait de la thèse de F. Cipriani (2006).

$Y$  (équation (6)) a été mesuré en laboratoire (Fama et al. 2008 et références dans ce papier), calculé en utilisant des approches analytiques (Johnson 1990) et numériques (Johnson et al. 2000 ; Leblanc and Johnson 2001 ; Leblanc et al. 2002). Il dépend de l'énergie de la particule incidente, de sa masse atomique, de son angle d'incidence  $\theta$  par rapport à l'exobase et de la composition et structure de l'atmosphère ou surface impactées. Typiquement,  $Y$  est plus grand d'un ordre ou deux de grandeurs dans le cas 2 d'une cascade de collision que dans le cas 1.  $Y$  est maximum lorsque l'énergie des particules incidentes d' $O^+$  est autour du keV/amu dans le cas de l'atmosphère martienne (Johnson et al. 2002). Il y a en général un ou deux ordres de grandeur plus de particules neutres éjectées que d'ions. Dans le cas 1, les particules ainsi éjectées au dessus de l'exobase ont des énergies qui peuvent atteindre une proportion importante de l'énergie de la particule incidente (figure 11). Dans le cas d'une cascade de collisions, la distribution en énergie a un maximum à l'énergie de liaison des particules impactées (de l'ordre de l'eV) et est caractérisée par une queue suprathermique du type :

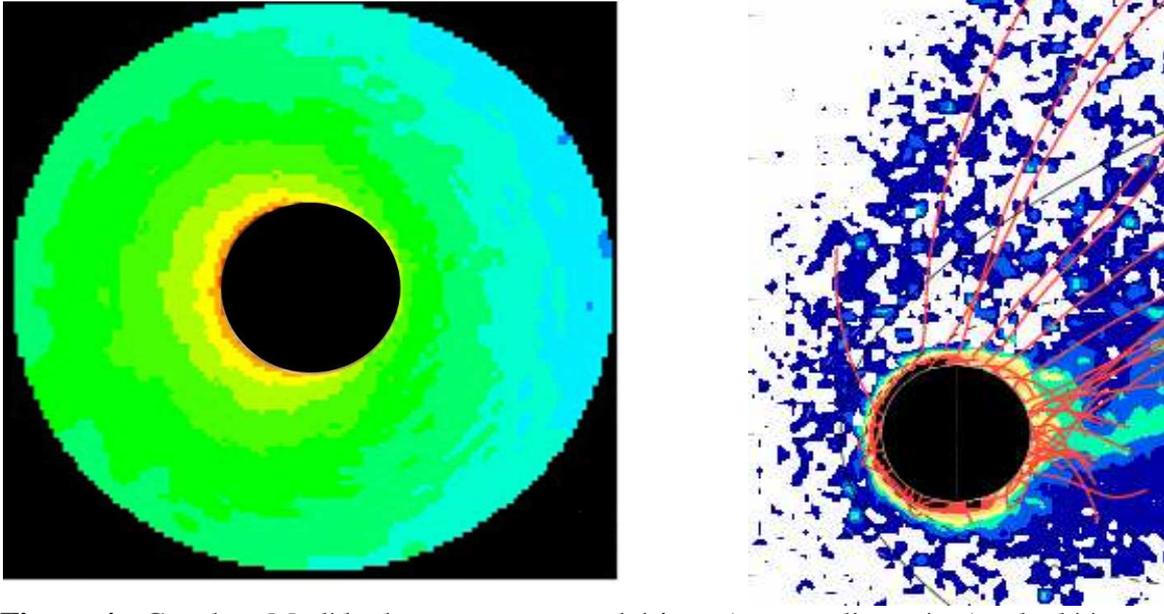
$$f(E) \propto 1/E^2 \quad (7)$$

qui donne le nombre de particules mises en mouvement avec des énergies comprises entre  $E$  et  $E+dE$ . Cette distribution en énergie a été calculée numériquement par Cipriani et al. (2007).

En fait, les plus récentes approches décrivant le criblage et ses conséquences sont basées sur des approches de type Monte Carlo où un ensemble de particules test (représentatives de la distribution des particules incidentes) est suivi à travers l'atmosphère impactée, elle-même représentée par un ensemble de particules test, où les collisions entre particules sont décrites individuellement (en utilisant des potentiels d'interaction simplifiés mais dépendant de la vitesse relative des particules) et où les particules produites par ces collisions sont également suivies si elles acquièrent une énergie supérieure à un seuil arbitrairement fixé. Cette approche permet de suivre au mieux la non-linéarité de ce processus et sa forte dépendance en fonction de la structure de l'atmosphère. Deux approches ont été développées, une approche 3D basée sur une simplification de l'atmosphère qui est décrite uniquement avec des particules atomiques d'oxygène (Leblanc et Johnson 2001 ; Chaufray et al. 2007) et une approche 1D utilisant un modèle d'atmosphère multi-espèces représentatif de l'atmosphère martienne (Leblanc et al. 2002 ; Cipriani et al. 2007).

L'approche 3D a permis de décrire plus précisément le couplage avec un modèle magnétosphérique de Mars (Modolo et al. 2005). En effet, les particules susceptibles de reimpacter l'atmosphère martienne sont en fait pour la plupart des particules exosphériques ionisées et accélérées par le vent solaire. Il y a donc potentiellement un effet rétroactif entre formation de l'exosphère, production d'ion piégés reimpactant et particules éjectées dans l'exosphère par criblage (Johnson et Luhmann 1998). Le couplage avec le modèle magnétosphérique a permis d'appréhender pour la première fois cet effet. Un modèle 3D de l'exosphère produite thermiquement et non-thermiquement par criblage et recombinaison dissociative a été calculé et injecté dans le modèle magnétosphérique (figure 4, gauche). Le modèle magnétosphérique a alors calculé cartes de champ magnétique et électrique, ce qui nous a permis de calculer les productions 3D de particules ionisées dans l'environnement martien (par photo-ionisation, ionisation par impact électronique ou par échange de charge) et de suivre les ions ionosphériques (figure 4, droite). Les flux de particules reimpactant l'atmosphère martienne ont alors été déterminés et une nouvelle distribution des densités exosphérique calculée. Les principaux enseignements de ce travail sont que :

- en conditions d'activités solaires minimale et maximale, la contribution de la dissociation recombinative au peuplement de l'exosphère en atomes chauds d'oxygène domine largement celle due au criblage, tout comme le taux d'échappement atmosphérique,
- la composante thermique de l'exosphère d'oxygène atomique domine l'interaction avec le vent solaire, ce qui implique la nécessité de prendre en compte la structure 3D de la thermosphère martienne,
- la résolution spatiale du modèle magnétosphérique est actuellement insuffisante pour décrire proprement les phénomènes d'ionisation et d'accélération des ions près de l'ionopause,
- la description du flux ionosphérique étant ad-hoc dans ce premier modèle, il est nécessaire d'intégrer de manière consistante ce flux en couplant les modèles magnétosphériques et exosphériques aux modèles thermosphériques/ionosphériques de Mars (MGCM, Forget et al. 1999).



**Figure 4 :** Gauche : Modèle de couronne exosphérique (atomes d'oxygène) calculé à partir d'un modèle de Chamberlain pour la composante thermique et en utilisant deux modèles Monte Carlo pour décrire la contribution à l'exosphère due au criblage et à la recombinaison dissociative (Chaufray et al. 2007). Droite : Densité en ions  $O^+$  produit par ionisation de l'exosphère martienne et par échappement ionosphérique. Un certain nombre de trajectoires de particules ionisées dans l'exosphère martienne et accélérées par le champ électrique de convection du vent solaire sont également dessinées en rouge (Modolo R. Thèse 2004). Dans les deux figures, le soleil est placé à gauche de la figure, le champ magnétique interplanétaire est perpendiculaire à la figure (dirigé vers le lecteur) et la vitesse moyenne du vent solaire en amont est dirigée horizontalement vers la droite de la figure.

Les travaux de F. Cipriani ont eu pour objectif la caractérisation des signatures en composition et en énergie des deux principaux mécanismes non-thermiques susceptibles de générer un échappement atmosphérique. Les principales conclusions sont que :

- il est possible de discriminer les particules produites par dissociation recombinaive des particules produites par criblage grâce à une mesure de la distribution en énergie des particules exosphériques,
- il y a des espèces atmosphériques comme  $CO_2$  ou  $CO$  qui sont produites essentiellement par criblage de la haute atmosphère et dont la présence possible dans l'exosphère martienne à haute altitude serait donc directement associable avec l'efficacité du criblage.

La conclusion principale des travaux de Chaufray et al. (2007) et de Cipriani et al. (2007) que l'on peut tirer est la nécessité de décrire désormais l'ensemble du système atmosphérique martien, c'est-à-dire, en partant de la surface jusqu'à l'interaction avec le vent solaire. Aussi avons-nous proposé un projet à l'ANR en 2009 qui commencera en septembre 2009 (section IV.3).

### III.2.1.2 Vers une caractérisation des processus d'échappement atmosphérique

L'échappement atmosphérique actuel et passé de Vénus, la Terre ou Mars reste encore très mal connu bien qu'il soit soupçonné d'avoir eu un rôle majeur dans l'évolution de leurs atmosphères au cours de l'histoire du système solaire.

La formation des planètes telluriques a commencé dès la formation du proto disque de gaz et de poussière à l'origine du système solaire. La première phase de formation a consisté en

l'agglomération des poussières du proto-disque donnant lieu à la formation des planétésimaux qui sont des roches de taille kilométrique (en  $\sim 10,000$  ans). La seconde phase a donné lieu à la formation des embryons de planètes (taille de 1000 km) et a duré probablement  $\sim 100,000$  ans. Cette phase d'accrétion s'est déroulée de manière exponentielle (« runaway growth ») c'est-à-dire avec une efficacité d'accrétion d'autant plus grande que l'objet est grand. La dernière phase d'accrétion a consisté en une phase par impacts géants entre embryons planétaires et a pu durer  $\sim 100$  millions d'années (Kortenkamp et al. 2001). Bien entendu ces trois phases se sont déroulées lors de périodes concomitantes dont l'enchaînement reste difficile à appréhender (Wetherill et Inaba 2000). L'intérêt de rappeler très brièvement l'histoire probable des premiers instants de la formation du système solaire vient des nombreux éléments, surtout basés sur la composition chimique et isotopique des météorites martiennes, qui suggèrent que Mars, contrairement à Vénus et la Terre, n'aurait pas été significativement influencé par la dernière phase de formation. Autrement dit, Mars serait plus de la famille des embryons planétaires que de celle de Vénus et de la Terre (Halliday et al. 2001). Mars aurait donc atteint sa structure actuelle,  $\sim 20$  millions d'années après le début du système solaire.

Cette datation de la formation de Mars est en accord avec les scénarios de différenciation de Mars basés sur l'analyse isotopique des météorites martiennes. Ainsi, la formation du cœur de Mars aurait eu lieu dès 30 millions d'années après le début du système solaire (Kleine et al. 2002 ; Yin et al. 2002) et la croûte martienne se serait formée entre 30 à 50 millions d'années après le début du système solaire (Elkins-Tanton et al. 2005 ; Breuer and Spohn 2006). Enfin, la dichotomie de la croûte martienne, entre hémisphère Nord dont la croûte a une épaisseur de  $\sim 35$  km et hémisphère Sud dont la croûte est de  $\sim 60$  km (Solomon et al. 2005) pourrait être due à un impact géant ayant eu lieu quelques centaines de millions d'années après le début du système solaire (Andrews-Hanna et al. 2008 ; Marinova et al. 2008 ; Nimmo et al. 2008).

Mars aurait accrété les éléments volatiles, notamment l'eau, par impacts d'astéroïdes venant d'au-delà de la limite de condensation de l'eau, c'est-à-dire 2.5 unité astronomique (UA). Contrairement aux premiers scénarios d'accrétion des atmosphères planétaires, au mieux seulement 10% de l'eau a pu être apporté par les comètes, comme le suggère la comparaison des mesures de rapports isotopiques du deutérium (D) sur l'hydrogène (H) sur Terre et dans les comètes (Lunine et al. 2003). Le bombardement météoritique aurait donné lieu à la formation d'une atmosphère épaisse, au réchauffement de la surface de Mars et à la formation d'un océan de magma durant une période d'au moins  $\sim 100$  millions d'années après la formation du cœur de Mars (Debaille et al. 2007). Un océan de magma peut se former si la surface est maintenue à de hautes températures par la présence d'une atmosphère suffisamment épaisse pour induire un effet de serre (Abe et al. 1997). Quel élément chimique ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ...) a pu donner lieu à cet effet de serre est une question encore débattue notamment suite à la découverte d'argile et de sulfate à la surface de Mars (Chevrier et al. 2007). Quoi qu'il en soit, le scénario le plus probable est que le refroidissement de l'atmosphère suite à la décroissance du bombardement météoritique a induit la cristallisation de l'océan de magma et la condensation progressive de l'eau atmosphérique. Un océan d'eau a donc très bien pu se former à ce moment là (Elkins-Tanton 2008). En fait, il est aussi possible qu'un seul impact massif à la surface de Mars (par exemple pendant le bombardement intense tardif, Gomes et al. 2005) puisse aussi avoir induit une atmosphère transitoire suffisamment épaisse pour favoriser la formation d'eau liquide à la surface pendant quelques centaines d'années (Segura et al. 2002). Le dernier grand événement géologique à la surface de Mars étant la formation de Tharsis il y a 3.8 milliards d'années, celui ci a notamment très certainement induit la formation d'une atmosphère épaisse (Solomon et al. 2005). Le dégazage associé avec cet événement aurait ainsi pu créer une atmosphère contenant l'équivalent d'un océan d'une profondeur de 120 m d'eau recouvrant l'entière surface de Mars et contenant 1.5 bar de  $\text{CO}_2$  (Philips et al. 2001). La présence d'eau

liquide à la surface de Mars est aussi corroborée par de nombreuses traces géologiques datant de la fin du Noachien, il y a environ 3.7 milliards d'années (Carr et Head 2003).

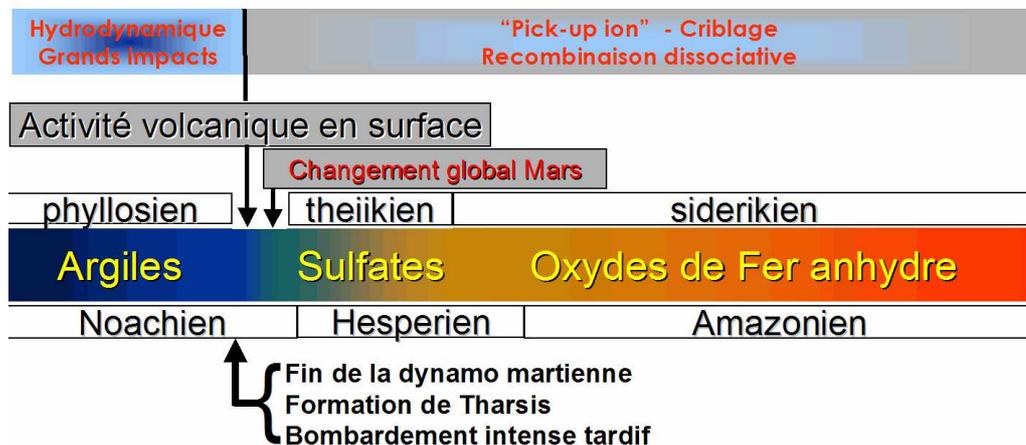
Il y a donc de nombreux indices géologiques et minéralogiques qui suggèrent la présence d'une atmosphère dense de quelques centaines de millibars à quelques bars durant le Noachien, qui sont à comparer avec les 6 à 7 millibars de l'atmosphère martienne actuelle (4 milliards d'années plus tard). La première explication pour la disparition de cette atmosphère est son érosion par le bombardement météoritique (Melosh et al. 1989), lors du bombardement intense tardif (Gomes et al. 2005) même si la réalité de ce dernier n'est pas prouvée de manière définitive (Hartman et al. 2007 ; Chapman et al. 2007), tout comme démontrée l'efficacité du bombardement météoritique à éroder une atmosphère (Pham et al. 2009). Clairement, parce que Mars est beaucoup plus petit que Vénus et la Terre, l'érosion induite par le bombardement météoritique doit y être plus efficace (Brain and Jakosky 1998). Il pourrait expliquer l'abondance en volatile 1000 fois plus petite sur Mars que sur Vénus et la Terre (Chassefière et al. 2007). Cependant, le bombardement météoritique n'est pas efficace à fractionner isotopiquement une atmosphère. Par conséquent, il ne peut pas expliquer l'observation du fractionnement isotopique de l'argon, carbone et azote atmosphériques martiens par rapport à la Terre (Jakosky and Jones 1997).

En fait, le flux radiatif solaire du début du système solaire était très probablement plus intense dans l'UV et l'EUV (Ribas et al. 2005). De la même manière, le soleil pourrait avoir eu un taux de perte de masse beaucoup plus important pendant les premières centaines de millions d'années (Wood et al. 2005). Les flux EUV et UV sont essentiellement arrêtés par la haute atmosphère des planètes telluriques et dissipent leur énergie en ionisation et chauffage. Il a été calculé que ce chauffage aurait pu être suffisant pour provoquer un échappement intense de l'atmosphère et notamment de sa composante la plus légère, l'hydrogène (Chassefière et Leblanc 2004). Une des conséquences d'un échappement intense d'hydrogène est l'entraînement des espèces plus lourdes présentes dans la haute atmosphère, l'oxygène et le carbone atomiques (Hunten 1973). Ce mécanisme, connu sous le nom d'échappement hydrodynamique, pourrait expliquer l'état actuel de l'atmosphère de Mars, son appauvrissement en volatile, ainsi que l'absence d'eau sur Vénus (Hunten 1993 ; Chassefière et al. 2007 ; Gilmann et al. 2009). Il ne peut cependant pas expliquer les rapports isotopiques du D/H dans l'atmosphère martienne car ne fractionne pas efficacement des espèces aussi légères (Hunten 1993). De la même manière, l'échappement hydrodynamique ne peut pas expliquer les rapports isotopiques de l'Argon ( $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ) car l'argon 40 est dégazé tardivement, bien après que l'échappement hydrodynamique ait cessé suite à la baisse du flux EUV/UV solaire (Chassefière et al. 2007). Enfin, comme il a été dit précédemment, il est très probable qu'une atmosphère importante existait encore à la surface de Mars 800 millions d'années après la formation du système solaire. A cet âge du soleil, le flux EUV/UV n'était que 5 à 6 fois plus grands que le flux d'aujourd'hui (Ribas et al. 2005) ce qui n'est probablement pas suffisant pour induire un échappement hydrodynamique conséquent.

Il y a, en fait, un autre élément de l'histoire martienne qui suggère que l'échappement atmosphérique ait pu changer de nature à la fin du Noachien. Mars Global Surveyor a en effet clairement démontré l'absence aujourd'hui d'un champ magnétique intrinsèque à Mars suffisamment intense pour protéger son atmosphère d'une interaction directe avec le vent solaire (Acuña et al. 2001; Lundin et al. 2004). Mais Mars Global Surveyor a aussi découvert l'existence d'un champ magnétique rémanent dans certaines régions de Mars démontrant l'existence passé d'une dynamo martienne intense (Connerney et al. 2004). La fin de cette dynamo peut être datée grâce à la présence de nombreux cratères (> 1000 km de diamètre) magnétisés ou non-magnétisés à la surface de Mars (Acuña et al. 2001). Les grands impacts induisent une démagnétisation de la croûte par choc et chauffage des minéraux contenant du Fe. Ces minéraux ne pouvant avoir acquis

une signature magnétisée structurée qu'en présence d'une dynamo, leur démagnétisation indique que l'impact les ayant démagnétisés a eu lieu après la fin de la dynamo. L'hémisphère nord est nettement moins magnétisé que le sud car l'épaisseur de la croûte y étant environ deux fois plus petite, elle contient donc moins de minéraux susceptibles d'acquérir une magnétisation. En datant la formation de ces cratères (Frey et al. 2008), il est alors possible d'assez précisément évaluer la fin de cette dynamo à, il y a 4.13 à 4.115 milliards d'années (Lillis et al. 2008). Plusieurs scénarios existent pour expliquer la fin de la dynamo martienne. Citons notamment, l'un des plus récents qui suggèrent la fin de la dynamo suite aux derniers grands impacts à la surface de Mars (vers la fin du Noachien). Ce scénario est basé sur l'idée qu'il est plus facile d'arrêter une dynamo que de la reprendre à cause du rôle de la force de Lorentz dans l'entretien de la convection du cœur d'une planète. Les grands impacts auraient pu ainsi modifier temporairement les échanges de chaleur entre le manteau et le cœur de manière à réduire suffisamment la convection du cœur pour arrêter la dynamo martienne définitivement (Roberts et al. 2009).

On peut donc résumer la chronologie martienne au schéma, figure 4, inspiré de Bibring et al. (2006). Ces auteurs ont défini trois périodes de l'histoire martienne basées sur la minéralogie de surface et en particulier sur la présence de différents types de minéraux hydrogénés sur des surfaces d'âge variable. Les argiles sont présentes sur les terrains les plus anciens, du Noachien, et n'ont pu se former qu'en présence d'un environnement aquifère non acide. Par contre, la deuxième catégorie de minéraux constituée de sulfates est présente surtout sur des terrains datés de l'Hespérien et n'a pu se former qu'en présence de conditions aquifères acides. La troisième catégorie, la plus répandue à la surface de Mars, est constituée d'oxydes de fer anhydre qui sont représentatifs des conditions actuelles sèches à la surface de Mars. Il y a donc eu, selon Bibring et al. (2006), un changement majeur de climat entre la fin de la formation des argiles et celles des sulfates suivi d'un assèchement progressif de l'atmosphère martienne. Ce changement majeur aurait pu avoir eu lieu en même temps que la fin de la dynamo (Roberts et al. 2009), la formation de Tharsis et le bombardement intense tardif (Gomes et al. 2005).



**Figure 4:** Evolution de la minéralogie de surface en parallèle avec les principaux événements de l'histoire martienne (après la différenciation de Mars). L'axe horizontal est pour le temps (à partir de 4.5 milliards d'années). La fin de la dynamo martienne a dû se produire il y a ~4.1 milliards d'années (Lillis et al. 2008). Le cadre du haut de cette figure rappelle les différents processus non-thermiques (section 2.1.1) ayant potentiellement donné lieu à une perte massive d'atmosphère (adapté de Bibring et al. 2006)

Par contre, ce qui a induit la disparition progressive de l'atmosphère martienne au cours des derniers 4.1 milliards d'années reste très mal connu. Deux solutions seulement semblent possibles pour expliquer cette disparition : l'existence de réservoirs en dessous de la surface ou une perte

massive de l'atmosphère martienne au cours des derniers 4.1 milliards d'années. Pour la seconde solution, plusieurs mécanismes sont évoqués (figure 5): le criblage de l'atmosphère par des particules énergétiques (section 2.1.1), l'ionisation de l'exosphère par le rayonnement solaire suivi de l'accélération de ces nouveaux ions par le vent solaire (« pick-up ion », figure 4), l'échappement ionosphérique et des mécanismes photochimiques (section 2.1.1). Les modèles les plus récents montrent que ces mécanismes pourraient expliquer une perte massive d'éléments lourds comme l'oxygène et le carbone, entre il y a 4.1 milliards d'années (la fin de la dynamo) et aujourd'hui (Chassefière and Leblanc 2004 ; Chassefière et al. 2007).

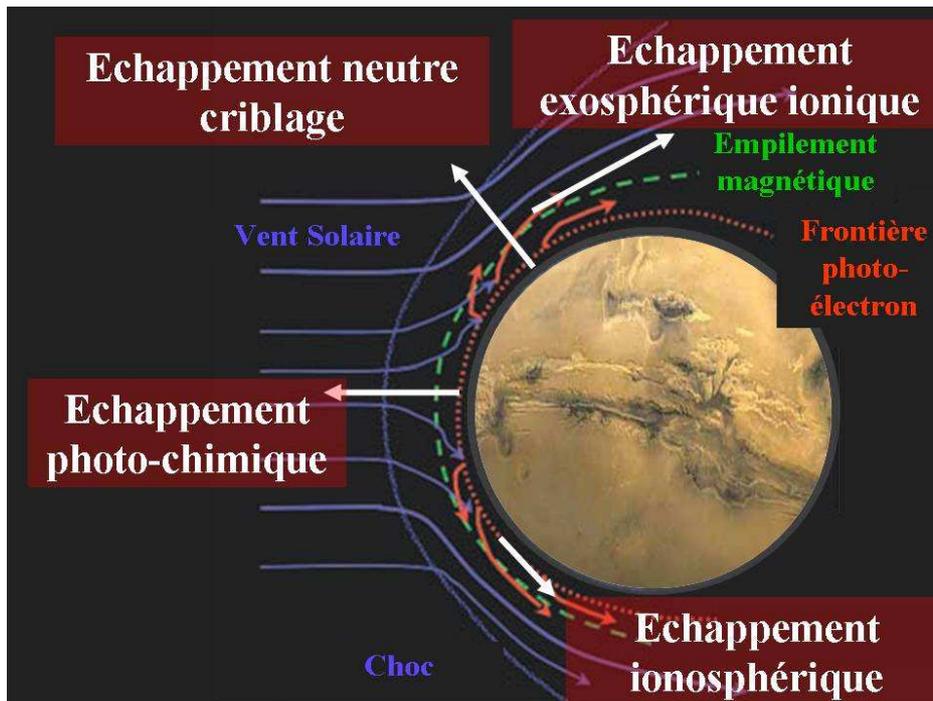


Figure 5 : Schéma de l'interaction entre le vent solaire et Mars (Lundin et al. 2004). Les quatre grands types d'échappement associés avec cette interaction sont indiqués.

Mon premier travail sur les mécanismes d'échappement a donné lieu au développement du premier modèle 3D de l'interaction entre l'atmosphère martienne et les ions accélérés par le vent solaire et susceptibles de reimpacter l'atmosphère martienne (Luhmann et al. 1991 ; 1992 ; Leblanc and Johnson 2001). Ce travail a permis de mettre au point les premières descriptions de la composante exosphérique martienne produite par ce criblage. Je me suis ensuite intéressé à la description de la composition de l'échappement induit par criblage grâce au premier couplage entre modèles Monte Carlo pour le criblage et modèle de dynamique moléculaire pour la description de l'interaction entre particules énergétiques et atmosphériques (Leblanc et al. 2002). Ce travail a permis de calculer de manière consistante l'influence d'une atmosphère moléculaire sur l'échappement. J'ai également estimé l'effet d'un événement énergétique solaire sur la structure atmosphérique de Mars, notamment en introduisant le rôle potentiel du champ magnétique rémanent (Leblanc et al. 2002c). La principale limite de ces travaux consistait en l'absence de couplage entre la description des flux d'ions piégés reimpactant l'atmosphère martienne et celle du criblage. Plus généralement, la grande difficulté d'une description consistante des mécanismes d'échappement de l'atmosphère martienne est liée au besoin d'appréhender les relations entre les différentes couches de l'environnement martien, notamment la magnétosphère, l'exosphère, la thermosphère/ionosphère et la basse atmosphère.

Le premier couplage entre un modèle de l'interaction du vent solaire avec la magnétosphère de Mars, un modèle de circulation des ions issus de la couronne martienne et un modèle de formation de l'exosphère a été réalisé grâce à une collaboration entre le Service d'Aéronomie et le CETP (Chaufray et al. 2007 ; Chaufray, thèse soutenue en 2007, directeur : E. Quemerais, co-directeur : F.

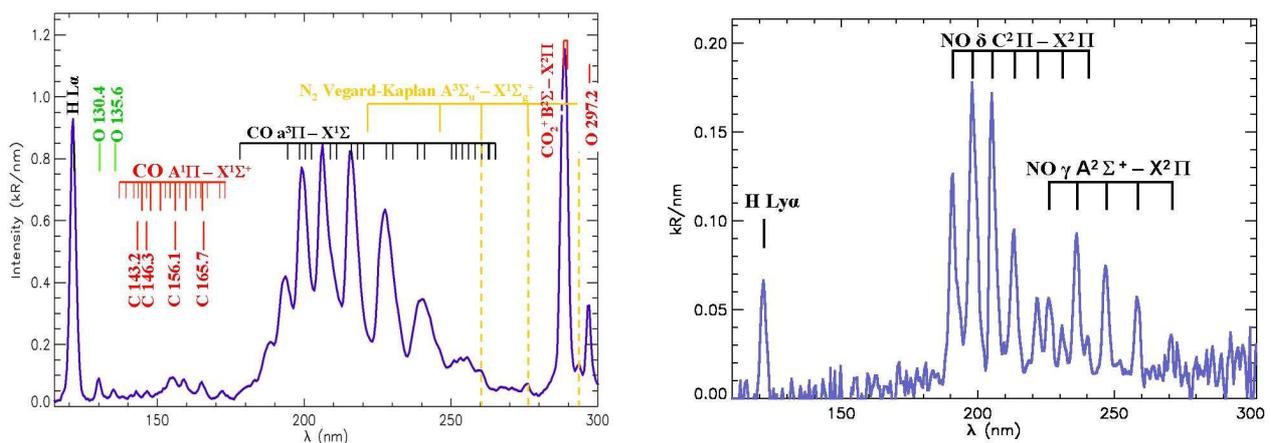
Leblanc). Parallèlement à ce travail, les modèles 1D multi-espèces ont été améliorés au cours de la thèse de F. Cipriani (Thèse 2006, directeur : J.J. Berthelier et co-directeur : F. Leblanc; Cipriani et al. 2006). Ce travail a notamment permis de caractériser les signatures de l'échappement neutre martien (composition et énergie) et a permis de préparer le développement de l'instrument NIMEIS en cours de conception et dont le principal objectif est la mesure de cet échappement (paragraphe IV.5). En 2006 et 2007, j'ai organisé une réponse à l'appel à idée de mission spatiale Cosmic Vision, du nom de Mars Environment and Magnetic Orbiter (MEMO), mission dédiée à la mesure de l'environnement martien et des couplages entre les différentes couches de celui-ci (Leblanc et al. 2009a; Langlais et al. 2008). Ce projet de mission n'a pas été sélectionné.

### III.2.2 OBSERVATION AVEC SPICAM/MARS EXPRESS DE LA HAUTE ATMOSPHERE

#### III.2.2.1 L'airglow martien

Mars Express est une mission européenne d'exploration de Mars qui a été lancée en juin 2003 et dont les premières mesures ont été obtenues dès janvier 2004. Parmi les différents instruments à bord de Mars Express, **S**Pectroscopy for the **I**nvestigation of the **C**haracteristics of the **A**tmosphere of **M**ars (SPICAM) est un spectromètre UV et IR par occultation dédié spécifiquement à la mesure de l'atmosphère de Mars (Bertaux et al. 2000). Cet instrument est sous responsabilité du LATMOS (PI J.L. Bertaux/F. Montmessin), j'en suis co-investigateur et responsable de l'étude des mesures de la haute atmosphère.

Une première analyse des données de l'airglow martien a été réalisée (Leblanc et al. 2006a). Ce travail a consisté à mettre au point une méthode systématique d'analyse des spectres, consistant en l'identification des raies d'émission de l'airglow martien, leur intégration et la détermination de la variation de ces émissions en fonction de la géométrie de l'observation (altitude, angle solaire zénithale, pointage...). Ce travail a été fourni en particulier comme base d'analyse des données SPICAM à quelques équipes afin de les aider à l'exploitation de ces données (Cox et al. 2008; Shematovich et al. 2008, Simon et al. 2009). Cette première analyse a permis de montrer la grande qualité des mesures de l'airglow par SPICAM (figure 6, gauche), par rapport aux premières et dernières observations de l'airglow martien réalisées depuis un orbiteur, 30 ans auparavant.



**Figure 6 :** Gauche : spectre du « dayglow » martien observé par le spectromètre UV SPICAM. Les principales émissions de l'atmosphère martienne du côté jour sont indiquées tout comme la présence de la bande de Vegard Kaplan du N<sub>2</sub> moléculaire (Leblanc et al. 2006a; Leblanc et al. 2007a). Droite : spectre du « nightglow » découvert par SPICAM du côté nuit, les principales émissions sont indiquées (Bertaux et al. 2005a).

L'observation du dayglow martien a permis de déterminer la température de la thermosphère à partir de ces données pour des conditions d'activité solaire minimum, d'identifier pour la première fois l'émission associée avec le N<sub>2</sub> martien, de suggérer la possibilité d'une corrélation entre la forme des profils d'émission et la présence des champs magnétiques rémanents et de confirmer certaines propriétés de la haute atmosphère martienne en fonction des variations saisonnières et de l'éclairement solaire.

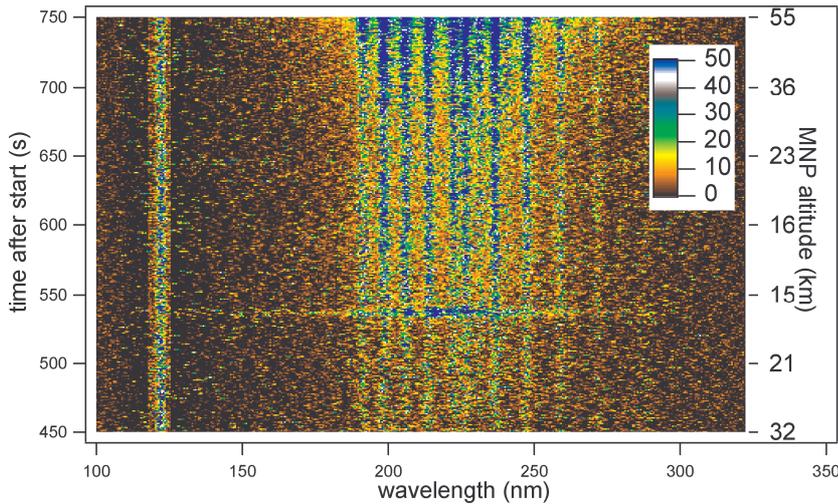
Enfin, les premières observations des émissions de la haute atmosphère du côté nuit par SPICAM ont révélé l'existence de signaux spectraux parfaitement identifiables (figure 6, droite). Ces émissions sont associées avec des atomes d'azote et d'oxygène transportés dans la haute atmosphère martienne du jour vers la nuit où ils se précipitent et se recombinaient en une molécule de NO qui se désexcite en émettant des photons dans la bande spectrale de SPICAM (Bertaux et al. 2005a).

La thèse de J.Y. Chaufray a été consacrée d'une part à la modélisation de l'exosphère de Mars (section III.2.1.1) mais aussi à l'analyse des observations de l'exosphère par SPICAM, notamment des émissions de l'oxygène et hydrogène atomiques. La principale difficulté d'une telle analyse tient à l'épaisseur optique des principales raies d'émission de ces deux espèces, qui implique le développement de modèles de l'exosphère et leur couplage avec des codes de transfert radiatif pour toutes interprétations de ces observations. L'analyse de quelques profils de l'émission résonnante Lyman- $\alpha$  de l'hydrogène n'a pas permis de conclure sur la présence ou non d'une population supra-thermique mais d'en suggérer l'existence et de définir la meilleure approche pour confirmer ou infirmer ce résultat (Chaufray et al. 2008 ; Chaufray J.Y., thèse 2007). De la même manière, l'analyse de plusieurs profils de l'émission résonnante de l'oxygène à 130.4 nm suggère là aussi la possible présence d'une population supra-thermique mais ne permet pas de conclure à cause de la sensibilité limitée de SPICAM (Chaufray et al. 2009).

### III.2.2.2 Les aurores martiennes

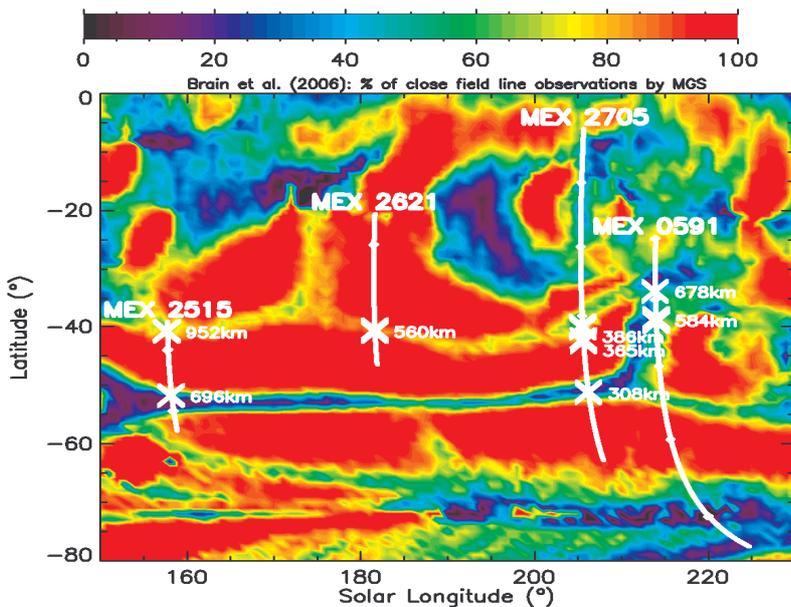
La deuxième découverte faite par SPICAM sur l'émission UV provenant de la haute atmosphère martienne est celle de l'existence de signatures spectrales produites par des phénomènes auroraux. Très rapidement à la suite de la découverte du « nightglow » de Mars (figure 6, droite), la première émission aurorale martienne a été identifiée (Bertaux et al. 2005b) grâce à la claire identification de sa structure spectrale (figure 7) et à sa localisation au dessus des champs rémanents martiens (section III.2.1.2). L'intégration des principales émissions associées avec cette aurore et l'utilisation de TransMars, un code de simulation des émissions de la haute atmosphère martienne développé par O. Witasse avec J. Liliensten (O. Witasse, Thèse 2000) a permis de donner une première estimation de la nature et de l'intensité des flux de particules nécessaires pour les produire (Bertaux et al. 2005b).

Nous avons ensuite conduit une deuxième analyse de ces données pour déterminer plus précisément l'origine des particules produisant ces émissions. L'idée était d'utiliser les rapports d'intensité entre deux des émissions clairement identifiables sur les spectres auroraux et d'utiliser le code de simulation TransMars afin d'en déduire la distribution en énergie des électrons très probablement à l'origine de ces intensités. La conclusion de ce travail était que soit ces particules étaient des photoélectrons transportés du côté jour vers la nuit le long des lignes de champ magnétique ou des particules magnétosphériques peu énergétiques (Leblanc et al. 2006b). Ce travail a notamment mis en évidence les nombreuses sources possibles de ces aurores et la complexité des structures magnétiques du côté nuit induites par la recombinaison entre les champs rémanents et le champ magnétique interplanétaire transporté par le vent solaire.



**Figure 7:** Emission de la haute atmosphère mesurée par SPICAM (orbite 716 de Mars Express). Les structures spectrales observées sont clairement celles associées avec le « nightglow » martien (voir section III.2.2.1 et figure 6, droite) tandis que les émissions additionnelles observées juste entre 540 et 548 secondes après le début de cette observation ont une structure spectrale similaire au « dayglow » martien (section III.2.2.1 et figure 6 gauche).

La troisième étude des aurores martiennes s’est concentrée sur l’analyse d’autres émissions aurorales identifiées dans les données de SPICAM (Leblanc et al. 2008a). Ce travail a grandement bénéficié de la possibilité de simultanément accéder aux mesures de deux autres instruments de Mars Express, le spectromètre de masse pour les ions et électrons ASPERA-3 et le radar de sondage de la sous-surface MARSIS. Il a été possible d’identifier grâce à la mesure du contenu total en électrons libres de l’atmosphère martienne fourni par MARSIS, la structure électronique typique des régions aurorales (MARSIS a une très bonne couverture spatiale de la nuit martienne), et d’associer des mesures in situ de distribution en énergie des électrons (mesure de ASPERA-3/ELS) avec la structure spectrale de l’émission aurorale. Ce travail est le fruit d’une collaboration entre de nombreuses équipes instrumentales (LATMOS, Laboratoire de Planétologie de Grenoble, ESTEC/ESA, SISP/Suède, JPL/USA et SSL/USA). Nous avons également utilisé les données de Mars Global Surveyor (MGS) quand celles-ci étaient disponibles pour donner quelques indications sur les conditions de déclenchement de phénomènes auroraux.



**Figure 7 :** Carte de la probabilité qu’une ligne de champ rémanent soit ouverte ou non calculée par Brain et al. (2007) en utilisant la forme de la distribution angulaire des électrons mesurée par MGS. Sur cette carte, sont aussi représentées les trajectoires de Mars Express pour les orbites au cours desquels une émission aurorale a été identifiée (trait continu blanc). La position de ces émissions aurorales est indiquée par une croix blanche tout comme l’altitude du satellite à ce moment (Leblanc et al. 2008a).

Enfin, ce travail a permis de positionner précisément les émissions aurorales sur une carte de ligne de champ magnétique rémanent et notamment sur une carte donnant la probabilité de ces lignes

d'être ouvertes ou non vers la magnéto-gaine (Brain et al. 2007, figure 7). La très bonne corrélation entre ligne de champ magnétique ouverte et émission aurorale a mis en évidence le rôle essentiel des champs rémanents pour la production des aurores et l'association qui peut être faite entre l'existence d'aurores sur Mars et la formation de structures magnétiques similaires à celles des régions polaires terrestres.

### III.3 LES EXOSPHERES DES CORPS PLANETAIRES SANS ATMOSPHERE : MERCURE

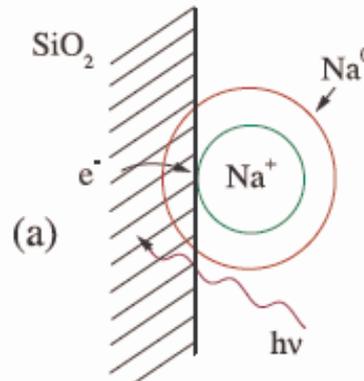
#### III.3.1 L'EXOSPHERE DE MERCURE

##### III.3.1.1 Les processus de formation de l'exosphère

La première difficulté pour comprendre l'origine des exosphères en relation directe avec la surface de leur objet est liée à l'identification et description des processus donnant lieu à de l'éjection de matière dans l'exosphère. Ces processus sont pour les plus efficaces (Leblanc et al. 2007):

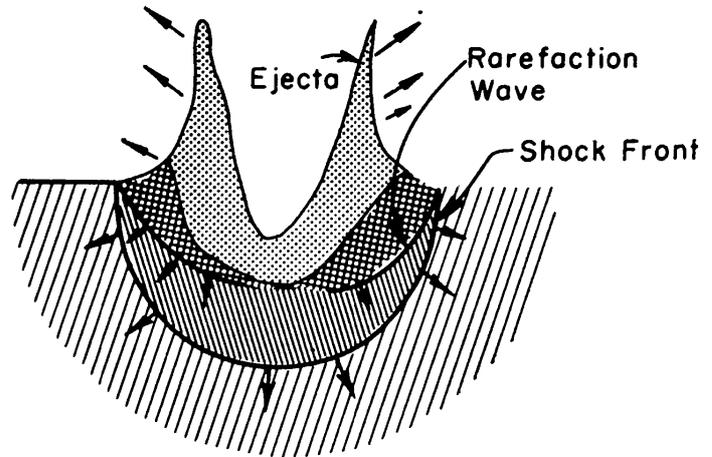
- la désorption thermique : si la surface est suffisamment chaude (le cas de Mercure du côté jour), alors l'agitation thermique dans les premiers microns de la surface des grains du régolite de ces objets est suffisamment énergétique pour qu'une partie des volatiles puisse s'échapper de la surface et peupler l'exosphère.

- la désorption par stimulation photonique : ce mécanisme propre aux surfaces a été étudié en laboratoire (Yakshinskiy et al. 1999, Madey et al. 2002). La libération d'électron dans la surface solide est induite par le bombardement photonique. Ces électrons peuvent alors se recombiner avec les volatiles qui sont piégés dans la matrice solide sous forme ionique, pour former une particule neutre (figure 8). Cette particule est alors repoussée par la matrice solide par effet coulombien et peut être éjectée de la surface avec des énergies pouvant atteindre l'énergie de libération du champ gravitationnel dans le cas de Mercure.



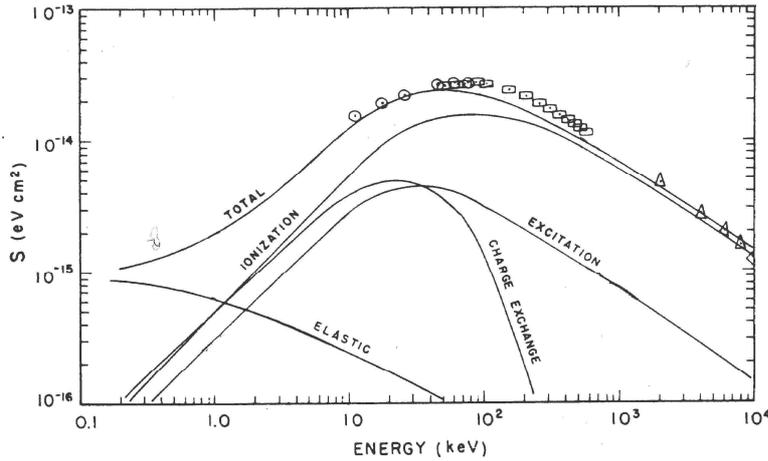
**Figure 8** : Schéma du principe de l'éjection d'un atome de sodium par stimulation photonique dans la surface solide (ici SiO<sub>2</sub>) (d'après Madey et al. 2002)

- la vaporisation du sol par impact météoritique. Étudié en laboratoire, ce mécanisme a fait l'objet de nombreux travaux théoriques depuis une dizaine d'années (Pierazzo and Melosh 2000). L'impact météoritique induit une onde de chaleur dans le régolite qui induit la vaporisation d'une partie de la météorite et du sol et la liquéfaction d'une autre partie (figure 9). Les éjectas produits peuvent avoir des énergies largement supérieures à l'énergie de libération. C'est un mécanisme qui agit de manière à peu près stœchiométrique, et qui peut donc éjecter volatile, réfractaire et molécules du sol.

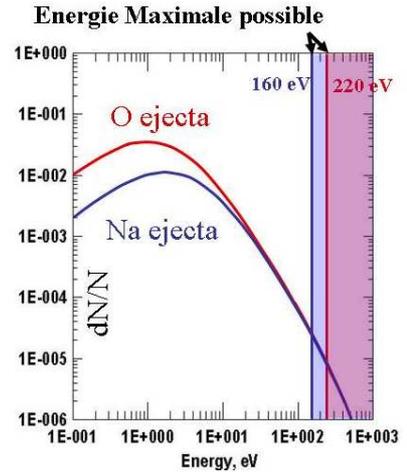


**Figure 9:** Schéma de principe de l'éjection de matière induite par bombardement météoritique (Ahrens and O'Keefe, 1972)

- le dernier processus potentiellement important pour l'origine des exosphères planétaires est le criblage qui agit par bombardement de la surface par des particules énergétiques, tout comme dans le cas des exosphères en relation avec une atmosphère (section III.2.1.1). Dans le cas de Mercure, le criblage pourrait être à l'origine des pics d'émission des raies du sodium atomique observés dans l'exosphère à haute latitude (Potter et al. 2006). En effet, les particules solaires pénétrant la magnétosphère de Mercure formée par le champ dipolaire intrinsèque de Mercure sont susceptibles d'impacter la surface de Mercure, de préférence à hautes latitudes, et d'induire l'éjection de matière de la surface et notamment les plus volatiles dont les atomes de sodium. Ce phénomène a parfois été qualifié d'aurore bien que l'origine de cette émission n'est pas l'excitation des particules exosphériques par les particules incidentes comme c'est classiquement le cas sur Terre ou sur Mars (section III.2.2.2). L'origine de ces émissions est plus probablement liée à la formation localement de pics de densité d'atomes de sodium qui sont par la suite excités par les photons solaires. Le criblage est donc particulièrement intéressant car peut être utilisé comme traceur de la magnétosphère de Mercure.



**Figure 10:**  $S = (dE/dx)/n_B$  énergie déposée dans une surface de glace d'eau par des protons de 1 keV par unité de distance et de densité surfacique (Johnson 1990). Cette énergie déposée se décompose notamment comme  $E_A = \eta(E_A) + \nu(E_A)$  où  $\eta$  est l'énergie perdue par collision électronique (ionisation, échange de charge et excitation) et  $\nu$  l'énergie déposée par interaction entre les noyaux atomiques.

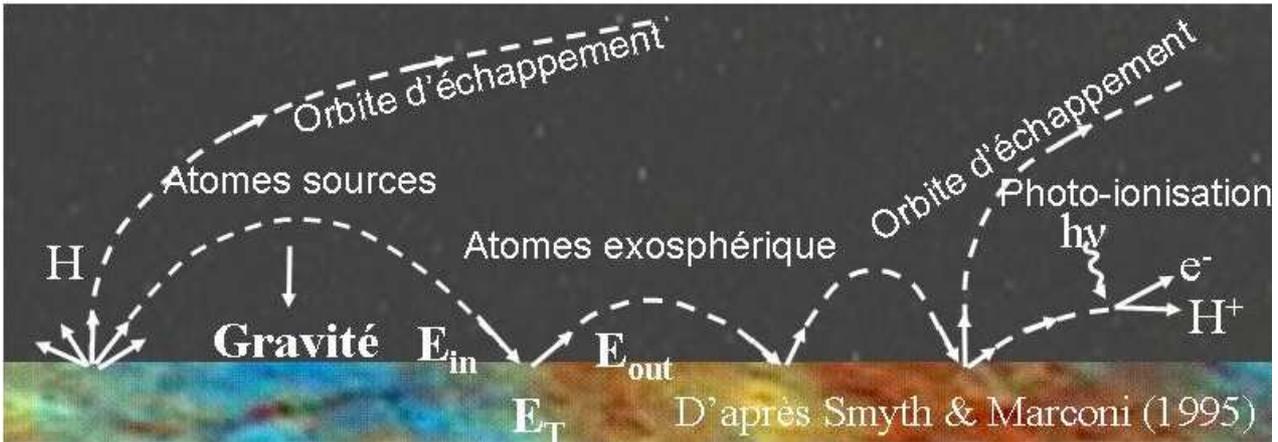


**Figure 11:** Distribution en énergie des particules éjectées par criblage d'une surface par des protons de 1 keV dans le cas d'un régime de collision simple (cf figure 3).

L'énergie des particules pénétrant une surface, tout comme dans le cas d'une atmosphère, se répartit en de l'énergie élastique (interaction entre noyaux atomiques), en énergie d'ionisation, en énergie d'excitation et en énergie d'échange de charge (figure 10). Suivant cette répartition de l'énergie (principalement liée au type de particule impactant la surface et au type de surface), deux régimes collisionnels peuvent se déclencher. Le régime dit de collision simple correspond au cas où la particule impactant interagit élastiquement dans les premières couches atomiques de la surface et produit des particules potentiellement très énergétiques (figure 11). Ce cas de figure est par exemple celui des protons solaires interagissant avec une surface et induit l'éjection de très peu de particules de la surface, son rendement, équation (6), étant très inférieur à 1. Le deuxième régime est celui décrit par la figure 3 (régime de cascade collisionnelle). La particule impactant pénètre la surface plus profondément et dépose son énergie par collisions élastique et électronique. Ce régime correspond à un régime nettement plus efficace pour l'éjection, avec des rendements proches de un, voire supérieur, mais produit des particules dont l'énergie est de seulement quelques eV.

Une fois les processus de formation de l'exosphère connus, il est aussi important de prendre en compte l'ensemble des processus qui régissent la dynamique de celle-ci. Plusieurs effets ont une influence majeure :

- le champ gravitationnel de la planète,
- les sources et intensités d'ionisation des particules neutres, une fois ionisées ces particules sont rapidement accélérées dans l'environnement magnétique et électrostatique, et soit s'échappent de la planète soit la reimpactent,
- la pression radiative solaire, qui peut avoir un rôle majeur dans la structure d'une exosphère si l'espèce est sensible à cette force (le cas du sodium atomique mais pas de l'oxygène par exemple),
- les mécanismes de réabsorption et de réémission de la surface qui sont liés à la physisorption d'une particule dans le régolite de surface qui peut être plus ou moins efficace suivant les espèces, et les conditions de surface (température, composition, porosité...).



**Figure 12 :** Mouvement des particules (ici hydrogène) dans l'exosphère de Mercure. Les particules peuvent être éjectées de la surface (atomes sources) suivant soit des orbites d'échappement soit des orbites balistiques et effectuer alors des rebonds successifs à la surface. A chaque rebond, une thermalisation partielle a lieu avec l'énergie d'arrivée ( $E_{in}$ ) qui, peu à peu, converge vers l'énergie de surface ( $E_T$ ).

L'ensemble de ces processus est résumé sur la figure 12. Cette figure illustre la dynamique des particules exosphériques piégées dans le champ gravitationnel de la planète qui migrent stochastiquement, au cours de rebonds successifs à la surface, du côté jour vers le côté nuit de la planète où la surface plus froide est plus efficace à thermaliser les particules exosphériques.

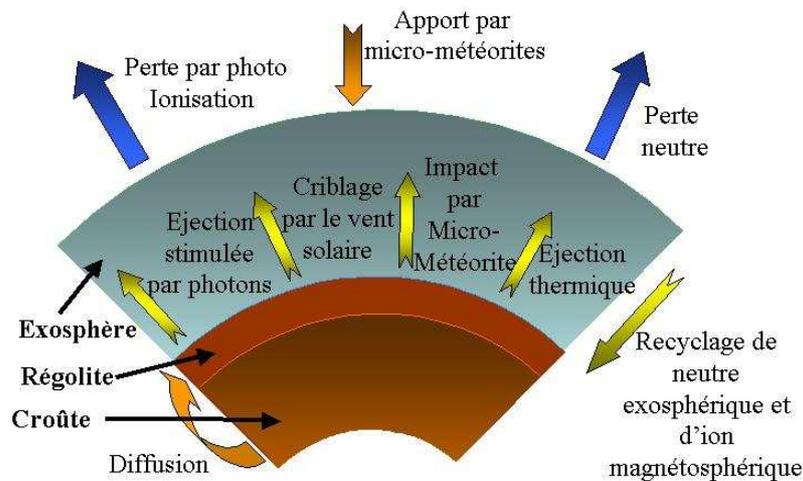
### III.3.1.2 Relations exosphère/surface/magnétosphère

Jusqu'à maintenant, seules les sondes Mariner 10 et Messenger sont passées en tout cinq fois à proximité de Mercure en 1973 – 1974 et en 2008. Les quelques informations obtenues par ces deux sondes ont cependant révolutionné notre connaissance de cette planète. La présence d'un champ magnétique intrinsèque dipolaire à Mercure a été ainsi une des plus surprenantes découvertes faites par la sonde Mariner 10. La présence d'atomes d'hydrogène, d'hélium et d'oxygène dans l'atmosphère de Mercure a été constatée par Mariner 10, tout comme la nature exosphérique de cette atmosphère, c'est-à-dire l'absence de collision entre particule neutre circulant dans l'environnement de Mercure (Broadfoot et al. 1976). Plus récemment, l'émission d'atomes exosphériques de magnésium a été découverte par Messenger (McClintock et al. 2009). Les atomes de Na, K et Ca ont été également observés dans l'environnement immédiat de Mercure par spectrométrie depuis la terre (Potter et al. 1985 ; 1986 ; Bida et al. 2000). L'observation des atomes de Na, parce qu'un des éléments les plus facilement observables depuis la terre, est aujourd'hui la principale source d'information sur l'exosphère neutre de Mercure et sa dynamique. Ainsi, les récentes mesures de Messenger sur l'environnement ionisé de Mercure ont montré que les ions de sodium produits par photo-ionisation de l'exosphère neutre représentent une des composantes majoritaires de l'exo-ionosphère de Mercure. Messenger a également constaté que les structures magnétosphériques sont fortement influencées par l'exo-ionosphère. De la même manière, la dynamique de l'exosphère de sodium montre que la surface de Mercure s'enrichit en atomes volatiles du côté nuit et s'appauvrit rapidement dès que le jour se lève. L'analyse des spectres de surface et la caractérisation de sa minéralogie seront donc également tributaires des mécanismes d'enrichissement/appauvrissement de l'exosphère.

En 2003, j'ai débuté un travail de modélisation de l'exosphère de sodium de Mercure afin de préparer au mieux les futures mesures des instruments sélectionnés pour la mission ESA/JAXA Bepi-Colombo, PHEBUS, spectromètre UV dont le LATMOS a la responsabilité (section III.3.1.3.1)

et PICAM, spectromètre de masse pour les ions pour lequel le LATMOS contribue fortement (section III.3.1.3.2). Trois travaux ont été réalisés :

- La modélisation de l'interaction d'un événement énergétique solaire avec la magnétosphère de Mercure et avec la surface (Leblanc et al. 2003a).
- La modélisation 3D de l'exosphère neutre de Na de Mercure en tenant compte du couplage avec la surface des principaux mécanismes de production et de leur changement au cours d'une année de Mercure, figure 13, (Leblanc et Johnson 2003).
- La modélisation 3D du transport des ions  $\text{Na}^+$  dans la magnétosphère de Mercure (Delcourt et al. 2003) et son couplage avec surface et exosphère neutre (Leblanc et al. 2003b).



**Figure 13:** Le système exosphérique de Mercure (Leblanc et al. 2007).

En 2004 et 2005, dans le cadre de la thèse de N. Yan (thèse dirigée par E. Chassefière et co-encadré par F. Leblanc, soutenue en décembre 2005), un modèle thermique de la surface de Mercure a été développé (Yan et al. 2006a). Le but de ce travail était originellement de construire un outil qui aurait permis de prédire l'effet d'un laser à désorption (LIDNIS : projet de recherche et développement financé par le CNES) sur le régolite de Mercure. LIDNIS était un projet d'instrument pour l'atterrisseur de la mission Bepi-Colombo (depuis lors annulée) couplant un laser à désorption à un spectromètre de masse et permettant l'analyse in situ du contenu du régolite de Mercure. N. Yan a également travaillé sur la description de la diffusion des éléments volatiles dans le régolite de Mercure en relation avec le cycle diurne. Ce modèle a également été utilisé pour décrire l'effet sur la température du régolite des irrégularités topographiques associées avec les cratères à la surface de Mercure et leur implication sur l'absorption/désorption des volatiles de l'exosphère de Mercure (Yan et al. 2006b).

Suite aux campagnes d'observation de Mercure (section III.3.1.2), notamment du cycle annuel du sodium exosphérique et du potassium, deux analyses théoriques de ces données sont en cours de finalisation:

- la modélisation du cycle annuel du sodium exosphérique basée sur une étude paramétrée des différents mécanismes de production du sodium (Leblanc and Johnson 2009). Ce travail a permis de mettre en évidence et de contraindre le rôle respectif des mécanismes d'éjection (section III.3.1.1.1), leur variation au cours du cycle annuel et la relation entre la surface, la magnétosphère et l'exosphère.

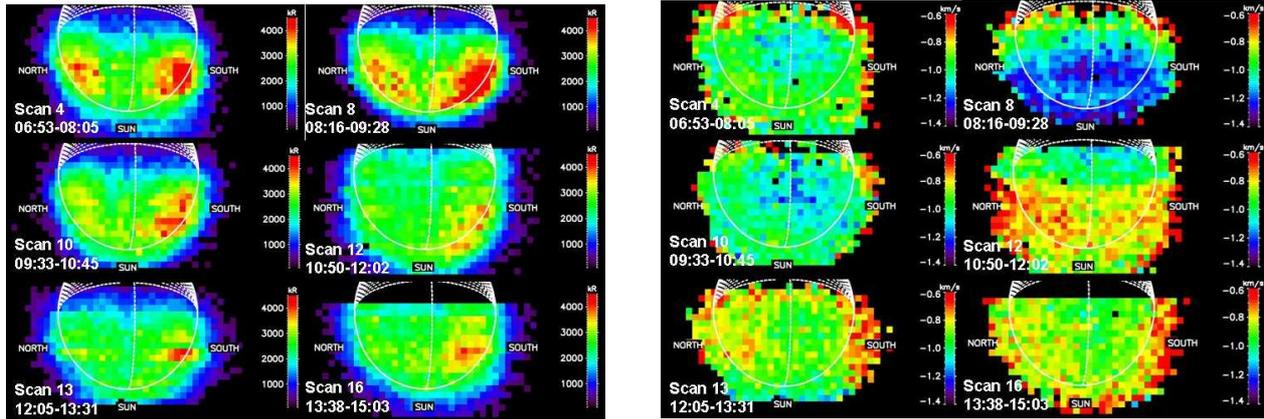
- la modélisation simultanée du sodium et potassium exosphérique afin de comprendre l'origine du rapport sodium/potassium nettement plus grand que sur la Lune et que l'abondance solaire (Leblanc et al. 2009b).

### **III.3.2 REALISATION ET ANALYSE D'OBSERVATIONS DEPUIS LA TERRE DE MERCURE**

Depuis 2006, je collabore avec un groupe de chercheurs italiens de Padoue (C. Barbieri, G. Cremonese et P. Borin) et de Rome (V. Mangano, S. Orsini et S. Massetti), avec A. Doressoundiram de l'observatoire de Paris et N. Schneider de l'University de Boulder (Etats Unis). Cette collaboration a pour principal objectif la réalisation et l'analyse d'observations de l'exosphère de Mercure avec le Telescopio Nazionale Galileo (TNG, La Palma, Canaries, Espagne), le CFHT (Hawaii, Etats Unis), le NTT (ESO, Chili) et THEMIS télescope solaire (Tenerife, Canaries). J'ai développé les outils d'analyse de toutes ces données, tout d'abord pour les observations réalisées au TNG (traitements des données, calibrations spectrale et en flux et intégration des raies d'émissions ; Leblanc et al. 2006c). Ces méthodes d'analyse sont désormais utilisées systématiquement pour les observations du sodium de Mercure réalisées par le TNG (Mangano et al. 2009). Pour le CFHT et le NTT, j'ai développé les procédures d'analyse de ces données : la calibration en flux, l'analyse spectrale et l'intégration des raies d'émissions (Doressoundiram et al. 2009a ; 2009b). Enfin depuis 2007, je suis responsable des campagnes d'observation utilisant le télescope solaire THEMIS pour lesquelles nous avons obtenu en 2007, 10 jours, en 2008, 35 jours et en 2009 44 jours d'observation.

Les campagnes d'observation utilisant le TNG ont montré l'extrême variabilité de l'exosphère de sodium de Mercure et ont souligné quelques unes des origines de celles-ci (Leblanc et al. 2006c; Mangano et al. 2009). Elles ont eu lieu simultanément avec d'autres équipes d'observateurs dont des américains de l'Université de Boston et des japonais de l'Université de Tokyo rassemblés dans un groupe de travail, International Mercury Watch Group (IMW) dont le but est de discuter et coordonner nos observations respectives. Les campagnes d'observation utilisant le CFHT et le NTT ont permis d'affiner les quantités maximales d'un certain nombre d'espèces potentiellement présentes dans l'exosphère de Mercure (Doressoundiram et al. 2009a) et de déterminer pour la première fois la répartition spatiale du rapport sodium/potassium (Doressoundiram et al. 2009b).

Les dernières années ont été consacrées à l'utilisation de THEMIS, aux Canaries. THEMIS étant capable d'observer avec des résolutions spectrales sans égal chez la plupart des autres télescopes diurnes, il nous a permis de résoudre à la fois spatialement la structure de l'exosphère de sodium (figure 14, gauche), de déterminer simultanément le doppler de la raie de sodium (figure 14, droite) et d'observer ces deux paramètres durant quelques heures consécutives en même temps que l'élargissement de la raie spectrale (Leblanc et al. 2008b). Cette observation est la première montrant une telle variabilité sur une échelle de temps aussi courte (quelques heures terrestres étant quelques minutes solaire sur Mercure) et montre à quel point l'exosphère de Mercure est susceptible de changer rapidement.

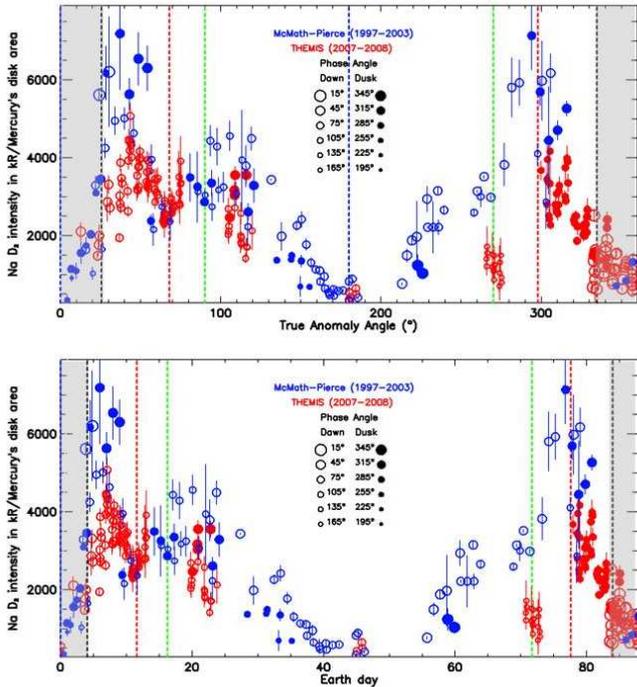


**Figure 14:** Gauche : Intensité de l'émission de la raie D<sub>2</sub> du sodium atomique (en kilo-Rayleigh, c'est-à-dire en 10<sup>9</sup> photons/cm<sup>2</sup>/s par 4π steradian) mesurée durant six mesures consécutives le 13 juillet 2008. Le disque de Mercure est dessiné, le soleil est vers le bas de la figure. Une observation est réalisée en déplaçant la fente du télescope de bas en haut d'une largeur de la fente après ~4 mn d'exposition pour chaque positions (~20 successives). Seuls les pixels où le signal sur bruit était supérieur à 150 sont représentés. Droite : doppler de la raie de sodium (en km/s) mesuré simultanément (Leblanc et al. 2009c)

L'un des objectifs principaux de ces observations est d'obtenir une statistique significative sur de nombreux aspects de l'exosphère de sodium de Mercure :

- sur les variations de l'exosphère de sodium au cours de l'année de Mercure d'un point de vue des courtes (moins d'un jour terrestre) et longues échelles temporelles (de l'ordre du jour de Mercure soit 176 jours terrestres),
- sur les variations de la structure spatiale de l'exosphère,
- sur d'éventuelles corrélations avec des structures à la surface de Mercure
- sur la variabilité spatiale et temporelle de la structure énergétique de l'exosphère.

Par exemple, la figure 15 compare les informations accumulées sur le cycle annuel de l'intensité lumineuse de la raie D<sub>2</sub> du sodium atomique exosphérique de Mercure, en bleu telles que mesurées par Potter et al. (2007) en six années d'observation et en rouge celles récemment obtenu par THEMIS au cours des deux dernières années. L'excellent accord entre les deux jeux indépendants de données montre la réalité d'un certain nombre de caractéristiques de ce cycle et la richesse d'information contenue dans la figure 15 (et ce, malgré les différentes conditions d'observation, c'est-à-dire, les différences en angle de phase, en qualité d'atmosphère terrestre et en sensibilité des télescopes utilisés). Une analyse de ce cycle est en cours par comparaison avec le modèle 3D de l'exosphère de Mercure (Leblanc and Johnson 2009). Par exemple, si l'exosphère de sodium de Mercure contenait toujours la même quantité d'atomes, alors deux pics de l'émission de même amplitude auraient dû être observés à la position des traits verticaux rouges sur la figure 15, en accord avec la variation de l'intensité du flux solaire capable d'exciter la raie d'émission du sodium atomique qui est fonction du doppler et de la distance de Mercure par rapport au soleil. Or très clairement, ce n'est pas le cas du cycle annuel observé. La comparaison avec le modèle montre en fait que la variation observée est le fruit d'une compétition entre les différents processus d'éjection au cours de l'année de Mercure (section III.3.1.1), induite par l'appauvrissement de la surface en volatile au cours de la journée et de la migration globale des atomes de sodium du jour vers la nuit.

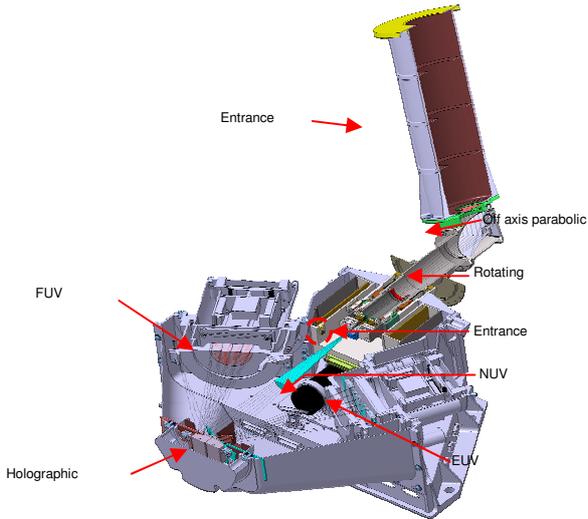


**Figure 15:** Intensité de l'émission mesurée en kilo-Rayleigh (kR) par unité de section du disque de Mercure durant une année de Mercure en fonction de l'anomalie angulaire vraie (figure du haut) et en fonction du nombre de jours terrestres (figure du bas). Symboles bleus: données de Potter et al. (2007). Symboles rouges: données obtenues par THEMIS (Leblanc et al. 2009a). La taille des cercles est fonction de la proportion de l'exosphère vue durant chaque observation. Les cercles pleins correspondent à des observations du côté soir de Mercure et les cercles vides du côté matin. Les traits verticaux correspondent à la position du périhélie et aphélie de Mercure (en bleu), à la zone de mouvement rétrograde du mouvement apparent du soleil dans le ciel de Mercure (en noir, zone grisée), aux pics du doppler radial de Mercure (en vert) et aux pics d'efficacité des raies résonantes du sodium atomique (en rouge).

### III.3.3 PREPARATION DE LA LA MISSION BEPI COLOMBO

#### III.3.3.1 PHEBUS (PROBING THE HERMEAN EXOSPHERE BY UV SPECTROSCOPY)

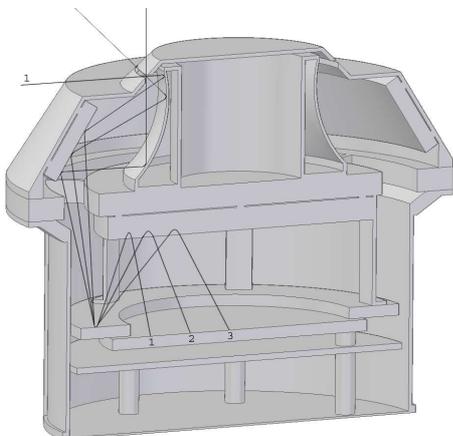
Parmi les instruments à bord de Mercury Planetary Orbiter (MPO), le spectromètre UV, PHEBUS, est sous responsabilité du LATMOS (PI : E. Quemerais). Le travail de préparation de cet instrument a initialement consisté en l'estimation d'un certain nombre d'émissions associées avec les différents éléments attendus dans l'exosphère de Mercure (Chassefière et al. 2009). Cette étude a permis de définir la meilleure gamme spectrale, la sensibilité et résolution nécessaires de l'instrument et les capacités de pointage nécessaires pour accéder à la meilleure mesure connaissant l'orbite de la plateforme. L'objectif final était de trouver le meilleur compromis entre masse de l'instrument et ses performances. Un prototype de cet instrument est maintenant à l'étude au sein d'une équipe dirigée par le LATMOS (Chef de projet : Jean-Luc Maria) en collaboration avec des ingénieurs du CNES, des chercheurs et ingénieurs japonais et russes (figure 16). J'ai personnellement contribué à la définition des performances de cet instrument et suis maintenant les choix techniques qui sont faits et leur implication sur ces performances. J'ai aussi en charge, en tant que « model scientist », tous les développements scientifiques nécessaires à l'interprétation future des données de PHEBUS, notamment de la partie modélisation, par exemple de l'exosphère d'hydrogène de Mercure (thèse de M. Wedlund, section IV.2.3).



**Figure 16:** Schéma de PHEBUS avec son baffle d'entrée pour limiter la lumière parasite provenant de la surface de Mercure, les deux détecteurs (EUV et FUV) ainsi que les deux photodiodes pour le NUV (raie du potassium et du calcium).

### III.3.3.2 PICAM/SERENA (PLANETARY ION CAMERA)

PICAM a été également sélectionné comme instrument à bord de MPO. Cet instrument dont Klaus Torkar (Institut für Weltraumforschung der ÖAW, Autriche) est le PI, et pour lequel je suis responsable de la participation française à ce projet, a été spécialement conçu pour mesurer les ions de l'exosphère de Mercure. Il associe une masse faible (environ 2.5 kg) avec des capacités de mesure tout à fait adaptées aux faibles densités attendues dans l'environnement de Mercure (large angle de vue, bonne sensibilité de l'instrument aux faibles énergies et capacités d'analyse de la masse et de l'énergie des particules, figure 17). Cet instrument est issu d'un concept proposé pour Mars 96 par O. Vaisberg (IKI, Russie). PICAM a été proposé au sein d'un ensemble d'instruments particules, SERENA (PI : S. Orsini) sélectionné sur MPO pour mesurer la composition de l'exosphère neutre et ionique de Mercure. Un certain nombre de travaux préparatoires pour cet instrument a été publié (Leblanc et al. 2003b ; Leblanc et al. 2004). Le LATMOS participe à la construction des détecteurs et à la définition de l'optique de cet instrument. J'ai récemment étudié une autre option pour l'optique pour améliorer la sensibilité de cet instrument. Cette option est en cours de validation pendant le stage de Master Pro de Joël Becker (directeur : J.J Berthelier et co-directeur : F. Leblanc).



**Figure 17:** Coupe de l'instrument PICAM montrant les trajectoires des ions à travers les éléments électrostatiques. L'entrée de l'instrument se situe en haut de la figure et les détecteurs sont placés aussi loin que possible de celle-ci afin de réduire au maximum leur température (particulièrement élevée dans l'environnement de Mercure).

## IV PROJET SCIENTIFIQUE

Ce chapitre donne une brève vue de mes projets scientifiques actuels. L'étude de Mercure à l'aide d'observations depuis la terre (section IV.1) et la modélisation théorique de son exosphère (section IV.2) n'en sont qu'à leur début. D'autre part, notre projet de modélisation et couplage de l'environnement martien a obtenu récemment un financement (section IV.3). Ce projet s'inscrit dans le cadre des futures missions et de leurs objectifs scientifiques. Enfin, le support que nous avons obtenu récemment pour le développement d'un instrument dédié à l'exploration des exosphères planétaires nous offre la possibilité de concrétiser les 5 dernières années de recherche et développement sur ce sujet et de maintenir et de développer, une nouvelle branche d'activité instrumentale au LATMOS (section IV.4). Parallèlement à ces trois grands axes, je souhaite maintenir quelques unes des collaborations en cours notamment avec les équipes de l'ESTEC et de l'Université de Boulder sur l'étude de l'environnement des satellites galiléens (section IV.1.4) et avec l'équipe de l'Osservatorio Astronomico di Trieste sur l'étude de l'environnement cométaire afin de préparer l'exploitation des données de la sonde Rosetta (non abordé dans ce document).

### IV.1 OBSERVATION DES EXOSPHERES PLANETAIRES

#### IV.1.1 LE SODIUM DE MERCURE

Le programme d'observation de Mercure depuis la terre a débuté par un projet initié par l'Universita di Padova et l'Osservatorio Astronomico di Padova. Cette collaboration s'est par la suite considérablement enrichie grâce à la participation de l'Observatoire de Paris-Meudon et a donné lieu à la création d'un groupe de travail international d'observateurs de Mercure (IMW). Il semble logique de poursuivre nos efforts dans cette direction, notamment à travers notre programme d'observation utilisant le télescope solaire THEMIS. Le but de ce programme est d'obtenir une statistique suffisante pour accéder aux principales propriétés de l'exosphère de Mercure. En effet, les observations depuis la Terre complètent et compléteront les observations prochaines de la sonde Messenger. Une observation depuis la Terre permet d'obtenir en quelques heures une vue complète de l'exosphère et de sa variabilité et de faire des mesures avec un pouvoir de résolution spectrale sans égal.

Nous souhaiterions poursuivre nos efforts pour caractériser :

- la structure spatiale de l'exosphère de Mercure, en particulier l'asymétrie entre le matin et le soir et sa dépendance en fonction de la position de Mercure le long de son orbite,
- l'origine des inhomogénéités spatiales de l'exosphère, notamment des pics d'intensité de l'émission à hautes latitudes, leur fréquence, leur dépendance en fonction des conditions solaires (grâce aux très prochaines données in situ de la sonde Messenger) et leur évolution sur des échelles de temps de l'ordre de celle du vent solaire.
- le cycle annuel de l'exosphère de Mercure, en particulier confirmer ou infirmer les grandes structures de ce cycle, visibles sur la figure 15.

L'utilisation de télescopes possédant des résolutions spectrales très grandes nous permettra de :

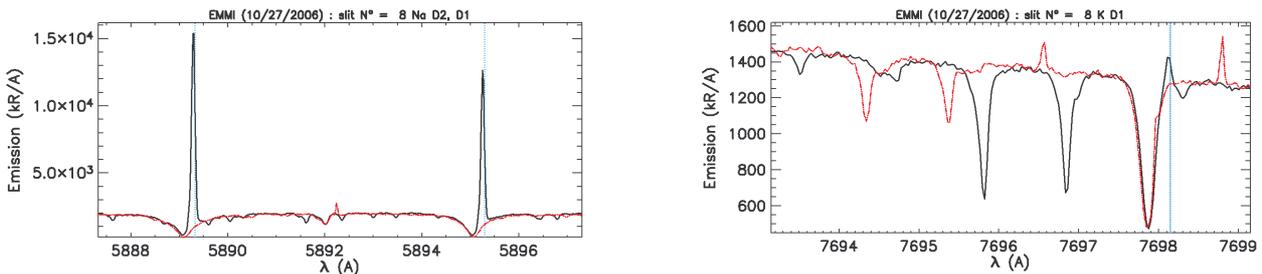
- mesurer les raies de sodium avec suffisamment de résolution pour pouvoir caractériser spatialement la structure énergétique de l'exosphère. Une des améliorations de cette mesure en cours de réalisation est l'utilisation simultanée de deux raies de sodium,
- obtenir une statistique sur la variation temporelle à courte et grande échelles des caractéristiques énergétiques de l'exosphère de sodium,

Enfin, nous envisageons également d'explorer deux axes prometteurs dans les années à venir :

- la recherche de signatures de polarisation dans l'exosphère de Mercure. Des premiers essais ont été réalisés en 2008 et répétés en 2009 afin d'étudier la possibilité de mesurer et d'interpréter la polarisation des raies de sodium, le télescope THEMIS étant un des meilleurs télescopes en matière de mesure de polarisation solaire.
- l'utilisation de l'optique adaptative pour l'observation de Mercure. Il existe actuellement un programme de développement et validation de l'optique adaptative sur THEMIS qui devrait se conclure à la fin de l'année 2010. L'adaptation du système d'optique adaptative à l'observation planétaire semble possible moyennant l'achat d'une caméra très sensible. Nous sommes actuellement en train de monter un projet de financement dans ce sens. L'objectif est d'améliorer d'un facteur 10 la résolution spatiale qui est au mieux d'un quart de rayon de Mercure aujourd'hui. Une telle possibilité permettrait de résoudre précisément les pics de sodium, de les associer avec des structures magnétiques (de suivre les ovales auroraux de la magnétosphère de Mercure) mais également avec des signatures spectrales (donc de caractériser finement la structure énergétique de ces pics).

#### IV.1.2 LE SODIUM/POTASSIUM DE MERCURE

Le sodium et potassium sont tous les deux des volatiles dont les processus d'éjection de la surface de Mercure sont proches, ce qui laisse à penser que les exosphères de sodium et potassium devraient être structurellement similaires. Or les premières observations du sodium/potassium ont révélé la présence de bien plus d'atomes de sodium dans l'exosphère de Mercure que d'atomes de potassium par rapport à ce qui a été observé dans l'exosphère de la Lune et que l'abondance solaire.



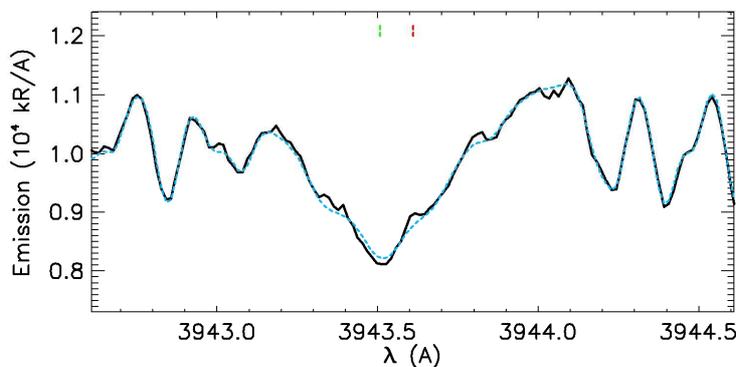
**Figure 18:** Gauche: spectre de l'exosphère de Mercure centré autour des raies d'émission résonnantes D<sub>1</sub> and D<sub>2</sub> du sodium atomique. Droite : spectre de l'exosphère de Mercure autour de la raie d'émission résonnante D<sub>1</sub> du potassium atomique. Traits bleus verticaux : position des raies d'émissions. Ligne noire : spectre de la lumière provenant de Mercure. Ligne rouge : spectre mesuré sur un astéroïde durant la même campagne de mesure. Ces mesures ont été réalisées par le spectrographe EMMI/NTT le 27/10/2006.

En collaboration avec l'observatoire de Paris-Meudon (A. Doressoundiram), nous avons entrepris, ces dernières années, un programme d'observations simultanées de ces éléments afin de mieux comprendre l'origine de ce rapport d'abondance et de nous aider à en modéliser l'origine (section IV.2.1). Malheureusement, nos essais d'observation de la raie de potassium avec THEMIS se sont révélés infructueux car l'intensité des émissions associées avec le potassium est plus faible de un ou deux ordres de grandeur que celle du sodium. Il nous a donc fallu utiliser des télescopes plus grands qui n'existent que pour l'observation de nuit (donc dans des conditions d'observation plus difficiles que de jour). Il n'en reste pas moins que nos premières campagnes de mesure utilisant le NTT (Chili) et le CFHT (Hawaii) ont été couronnées de succès (figure 18). La première cartographie du rapport du sodium et potassium suggère en particulier que l'hypothèse de deux exosphères similaires n'est pas exacte et qu'une partie de l'origine du rapport d'abondance entre ces deux émissions provient d'une distribution spatiale différente pour ces deux éléments. Nous souhaitons poursuivre nos efforts dans les années qui viennent, en utilisant d'autres télescopes permettant de détecter ces émissions

simultanément. Il est à noter que Messenger ne pourra pas observer simultanément le potassium et le sodium de Mercure et que donc seule l'observation depuis la terre permettra de faire progresser toute solution à ce problème, d'ici l'arrivée de PHEBUS qui a été conçu pour observer simultanément ces deux éléments.

#### IV.1.3 RECHERCHE DE NOUVELLES ESPECES EXOSPHERIQUES DE MERCURE

J'ai aussi commencé, en collaboration avec A. Doressoundiram (observatoire de Paris-Meudon), un programme de recherche d'espèces exosphériques non identifiées jusqu'à maintenant. Ce programme se base sur l'utilisation des grandes gammes spectrales disponibles sur les grands télescopes (classe 4 m). Il a pour objectif d'affiner notre connaissance de l'exosphère de Mercure, en identifiant de nouvelles espèces ou en donnant des seuils d'abondance maximale pour des espèces attendues. La figure 19 ci-dessous présente un exemple d'une telle observation, centrée sur la raie d'émission résonnante de l'atome d'aluminium qui nous a permis d'établir un seuil limite pour l'abondance de cet élément.



**Figure 19:** Spectre mesuré par EMMI/NTT centré autour de la raie d'émission à 3944 Å de l'aluminium atomique. Le trait noir représente la lumière provenant de Mercure (lumière réfléchie et émission exosphérique de Mercure). Le trait bleu représente un spectre solaire typique. Les traits en pointillé vert et rouge sont pour la position de la raie solaire réfléchie à la surface de Mercure et la position de la raie exosphérique éventuelle (Doressoundiram et al. 2009).

Là aussi, nos premières analyses des spectres de Mercure nous ont permis de suggérer la possibilité de détecter dans l'exosphère de Mercure l'émission de l'aluminium atomique ce que nous chercherons à confirmer au cours de futures campagnes d'observation. D'autre part, notre capacité de déduire d'une observation un seuil maximal d'abondance est liée à l'optimisation de l'observation et aux conditions atmosphériques durant celles-ci. Aussi, pensons-nous possible de grandement améliorer nos premiers résultats en utilisant des télescopes mieux adaptés et surtout un protocole de mesure optimisé.

#### IV.1.4 LE SODIUM EXOSPHERIQUE D'EUROPE

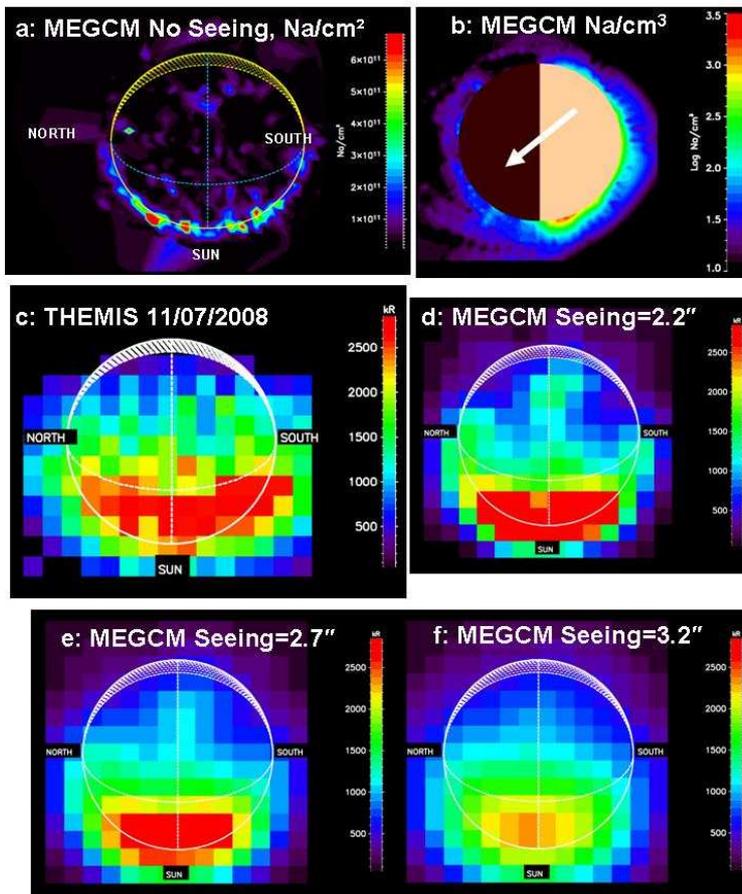
Un sujet qui n'a pas été abordé dans la section III est la modélisation de l'exosphère d'Europe, satellite de Jupiter. J'ai travaillé lors de mon séjour postdoctoral à l'Université de Virginia sur la modélisation du sodium et potassium d'Europe, en utilisant les deux seuls jeux d'observations d'Europe depuis la terre, l'un obtenu par M. Brown (Leblanc et al. 2002b) et l'autre par A.E. Potter (Leblanc et al. 2005). Les modèles de simulation de cette exosphère ont depuis été nettement améliorés par F. Cipriani, en séjour postdoctoral à l'ESTEC/ESA avec O. Witasse (Cipriani et al. 2008 ; 2009), afin de décrire plus précisément les relations entre la surface et l'exosphère (signatures de la surface dans l'exosphère, rapport sodium/potassium dans la surface et l'exosphère...). Fort de cette expérience, nous avons récemment obtenu du temps d'observation (8 jours) pour une observation combinée d'Io et d'Europe sur le TNG en 2009 (responsable : Nick Schneider,

Université de Boulder, USA). Ce programme de travail implique l'utilisation et l'amélioration des outils de modélisation de l'émission du sodium à Europe et de leur adaptation au cas d'Io.

## IV.2 MODELISATION: MERCURY EXOSPHERIC GLOBAL CIRCULATION MODEL

### IV.2.1 COUPLAGE SURFACE/MAGNETOSPHERE/EXOSPHERE

J'ai entrepris depuis 2001 la modélisation de l'exosphère de Mercure ce qui m'a amené à construire le premier modèle 3D de l'exosphère de Mercure prenant en compte le couplage entre surface, magnétosphère et exosphère : Mercury Exospheric Global Circulation Model. Ce modèle basé sur un formalisme de type Monte Carlo - particules tests, prend en compte le détail connu de la physique des quatre principaux mécanismes d'éjection (section III.3.1.1), des caractéristiques orbitales de Mercure et de l'influence du soleil sur la dynamique des particules éjectées depuis la surface. Un de mes premiers efforts a consisté en une comparaison détaillée avec quelques observations du sodium de Mercure (Leblanc and Johnson 2003). Suite aux récentes publications de données désormais suffisamment nombreuses pour être statistiquement significatives (Potter et al. 2006 ; 2007 ), j'ai entrepris de modifier ce modèle afin d'en extraire des données comparables (figure 20).



**Figure 20:** Exemple de comparaison entre MEGCM (figures a, b, d, e and f) et observation (intensité de la raie D<sub>2</sub> du sodium exosphérique mesurée par THEMIS 11/07/2008, 11h00-12h00 UT, figure c). Le « seeing » a été estimé égal à 1.06 R<sub>M</sub> (2.69±0.31'').

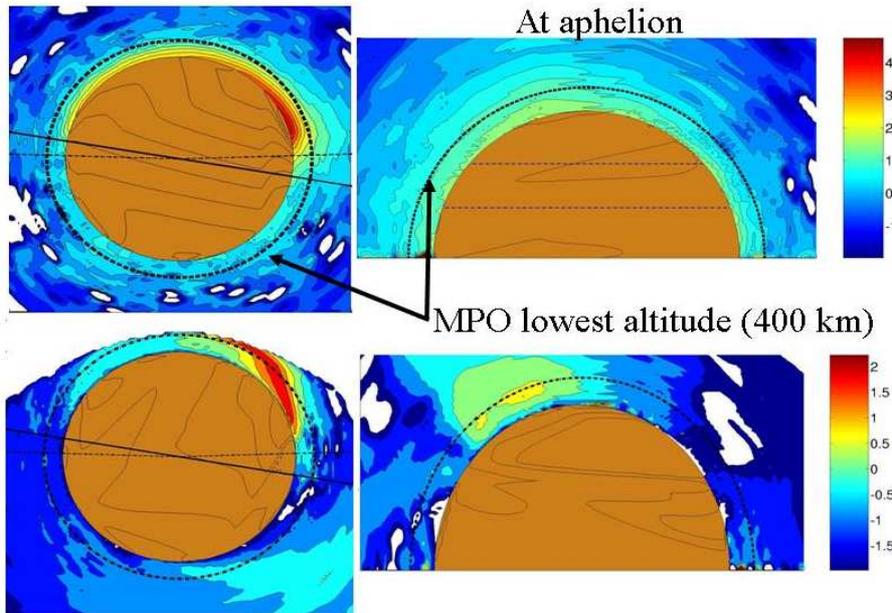
a: densité colonne calculée par MEGCM (à la résolution spatiale du modèle) pour les mêmes conditions que l'observation figure c.

b: Log<sub>10</sub> de Na/cm<sup>3</sup> de la densité exosphérique moyennée dans une bande équatoriale de ±10°. La flèche blanche indique l'angle de visée de l'observation par THEMIS.

d, e et f: intensité de l'émission de la raie D<sub>2</sub> du sodium simulée par MEGCM pour un « seeing » de 2.2'' (d), 2.7'' (e) et 3.2'' (f). La même échelle de couleur a été utilisée pour les figures c, d, e et f.

L'exemple de la figure 20 est la première comparaison détaillée entre une observation 2D de l'exosphère de sodium et une simulation. Cette figure montre que les images de l'exosphère de Mercure peuvent fournir des informations originales quand comparées à la simulation mais qu'elles sont difficiles à interpréter sans celle-ci (en particulier pour observer l'asymétrie matin-bas de la figure ; soir-haut de la figure). D'autre part, cette figure montre aussi tout l'intérêt que représentera l'apport de l'optique adaptative qui devrait réduire l'effet du seeing sur la qualité de l'image à un « seeing » égale à 0.5 arc-seconde.

Une deuxième possibilité en cours de réalisation est la comparaison entre les exosphères de sodium et de potassium. En effet comme expliqué dans la section IV.1.2, l'origine du rapport sodium/potassium n'est pas comprise aujourd'hui. Elle suggère un rapport d'abondance dans la surface de Mercure très différent de celui des autres corps du système solaire. La simulation et la comparaison avec les données d'observation permettra de déterminer le rapport d'abondance des termes sources de ces deux exosphères et les flux d'échappement respectifs afin de donner la première estimation du rapport des abondances en sodium et potassium dans Mercure.



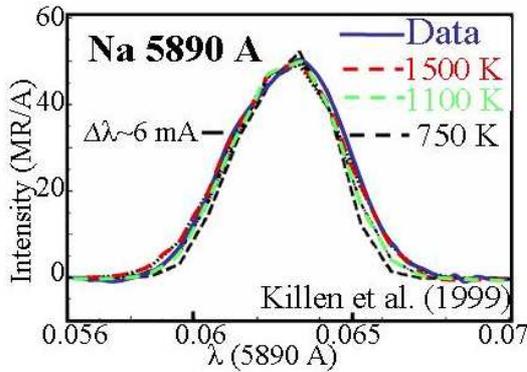
**Figure 21:** Densités neutre (figures du haut) et ionique (figures du bas) en  $\log_{10}$  de  $\text{Na}$  et  $\text{Na}^+/\text{cm}^3$  simulées par MEGCM dans le plan équatorial (figures de gauche) et dans le plan perpendiculaire à celui-ci et contenant le point subsolaire (figures de droite). Cette simulation est pour Mercure à son aphélie. Aussi indiquée, est l'altitude minimale de MPO/Bepi-Colombo (Leblanc et al. 2003b)

Une autre exploitation possible de ce travail est la prédiction des densités ioniques pour différentes espèces. En particulier, les premières mesures dans l'environnement de Mercure ont montré une composition ionique dominée par le sodium et très riche en ions lourds planétaires (Zurbuchen et al. 2009). D'autre part, les structures observées dans la magnétosphère de Mercure sont probablement induites par le plasma planétaire et son interaction avec la magnétosphère (Slavin et al. 2009). Jusqu'à maintenant, le calcul des densités ioniques est réalisé dans MEGCM en couplant dynamiquement le modèle neutre avec un modèle simplifié de magnétosphère (figure 21). Il semble donc qu'un couplage plus complet avec un modèle capable de simuler les variations de la magnétosphère induite par le vent solaire est nécessaire pour réellement appréhender la structure ionosphérique et interpréter correctement les futures mesures in situ. Un modèle hybride appliqué à Mercure est en cours de développement au LATMOS en collaboration avec le LPP (E. Richter, thèse débutant en septembre 2009). Son couplage avec MEGCM semble être une opportunité pour ces deux développements de s'approcher d'une description réaliste de l'environnement ionisé de Mercure. Ce travail en particulier sera grandement utile pour l'exploitation des données de PICAM et MSA, deux spectromètres de la mission Bepi-Colombo auxquels je suis associé.

#### IV.2.2 MODELISATION DES RAIES DE SODIUM

La modélisation détaillée de la raie de l'émission de sodium et de son couplage avec un modèle de transfert radiatif permettra de prendre en compte correctement l'épaisseur optique de l'exosphère de sodium (qui n'est pas complètement négligeable, notamment son effet sur la forme de la raie). De ce travail, on peut s'attendre, en tout premier lieu, à l'interprétation optimale des informations obtenues par les observations de THEMIS sur la structure énergétique de l'exosphère de Mercure (section

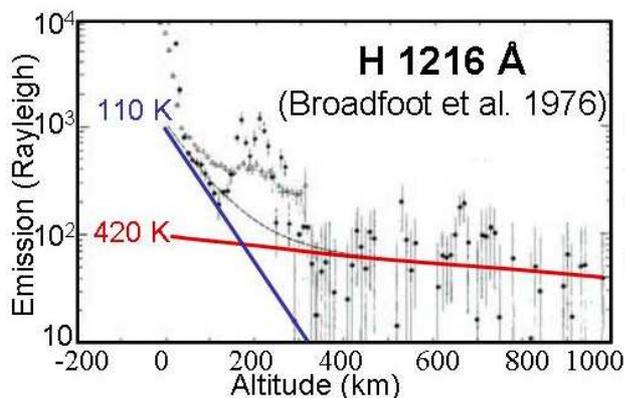
IV.1.1, figure 22). Ce travail nécessitera surtout la mise au point d'un code de transfert radiatif adapté à des milieux hors équilibre locale comme l'exosphère de Mercure, à sa forte non-uniformité et aux conditions particulières d'observation depuis la terre. Ce développement bénéficiera en fait des travaux réalisés dans le cadre de la modélisation de l'oxygène exosphérique martien basée sur une approche très similaire (Chaufray et al. 2009), tout comme de ceux envisagés pour la modélisation de l'exosphère d'hydrogène (section IV.2.3).



**Figure 22:** Exemple de spectre du sodium exosphérique mesuré en utilisant un grand pouvoir de résolution spectrale. La comparaison avec un modèle simple de formation des raies de cette émission montre que l'exosphère de Mercure est entre 300 et 1000 K plus chaude que la température de surface (~550 K).

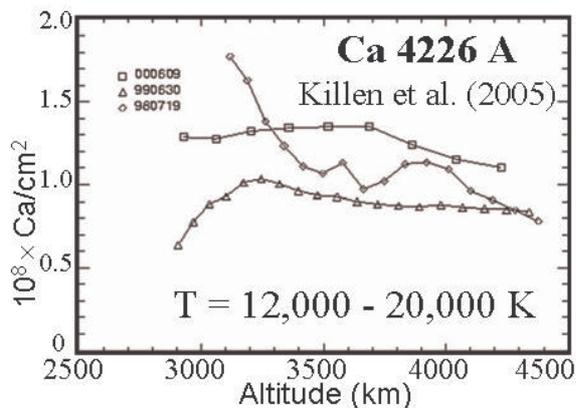
### IV.2.3 MEGCM POUR L'HYDROGENE ET LE CALCIUM

Il est difficile de modéliser d'autres espèces exosphériques de Mercure faute de contraintes observationnelles. Il existe cependant une autre espèce, l'hydrogène, pour laquelle un certain nombre de mesures ont été effectuées par Mariner 10. L'observation de la raie de Lyman- $\alpha$  a ainsi permis de construire les premiers profils de densité mettant en évidence la présence de deux populations dans l'exosphère de Mercure, une froide à la température de la surface de Mercure du côté nuit et une chaude à la température de la surface du côté jour (figure 23). D'autre part, la mesure de l'intensité du signal à diverses heures locales montre que l'hydrogène varie en densité par rapport à la température de surface, d'une manière soulignant l'absence de thermalisation totale entre l'exosphère d'hydrogène et la surface. Cette exosphère est donc originale, différente par sa nature et son origine (probablement essentiellement du vent solaire) de celles du sodium ou du potassium et mérite un effort particulier de modélisation pour être comprise. C'est le sujet de la thèse de Mea Wedlund (thèse commencée en 2008, directeur : E. Chassefière, co-directeur : F. Leblanc) qui est en charge sous ma direction de modéliser l'exosphère d'hydrogène et de calculer le signal attendu par PHEBUS. Le développement d'un tel modèle est essentiel pour notre compréhension des futures mesures de PHEBUS. Il permettra de mieux comprendre les différences de formation entre espèces et fournira une information essentielle pour les modèles magnétosphériques, les protons planétaires étant une des composantes majoritaires de l'exo-ionosphère de Mercure.



**Figure 23:** profil de l'émission de la raie Lyman- $\alpha$  de l'hydrogène atomique présent dans l'exosphère de Mercure. L'analyse de ce profil révèle deux populations principales, une froide dont la température est proche de la température moyenne de la surface côté nuit et une plus chaude dont la température est plus proche de la température de surface du côté jour. L'origine de cette dichotomie n'est pas bien comprise (Broadfoot et al. 1976).

Parallèlement à la description d'espèces volatiles, comme le sodium, le potassium ou l'hydrogène, il apparaît important aussi de pouvoir comprendre la formation et dynamique des exosphères des espèces réfractaires. Pour ce type d'espèce, la grande différence avec les exosphères des espèces volatiles tient dans les mécanismes à leur origine. En fait, il existe par exemple quelques observations depuis le sol et récemment depuis la sonde Messenger, de l'émission associée avec les atomes de calcium de l'exosphère de Mercure qui montrent en particulier le caractère très énergétique de ces particules (figure 24). Puisque le calcium sera observé par PHEBUS grâce à une photodiode dédié, il est important pour l'interprétation de ces mesures de pouvoir disposer d'un modèle de formation. Par exemple, il a été suggéré que le calcium ne pouvait atteindre de telles énergies que suite à la dissociation d'une molécule parente dans l'exosphère de Mercure (Killen et al. 2005). Une telle hypothèse pourra être validée ou non, grâce à une modélisation détaillée des processus d'éjection du calcium exosphérique.



**Figure 24:** Profil de la densité colonne du calcium atomique présent dans l'exosphère de Mercure. La variation de la colonne en fonction de l'altitude suggère des températures supérieures à 12000 K, c'est-à-dire un ordre de grandeur plus grand que la température de surface (Killen et al. 2005).

## IV.3 MODELISATION ET OBSERVATION DE L'ENVIRONNEMENT DE MARS

### IV.3.1 LE PROJET HELIOSARES

La compréhension de la formation, de la dynamique et de l'évolution des atmosphères des planètes du système solaire est devenue une composante à part entière de l'étude de notre propre environnement. L'objectif des travaux proposés dans le projet HELIOSARES est de décrire l'interaction de l'atmosphère de Mars avec le rayonnement et le vent solaires. Cette interaction modifie considérablement non seulement l'environnement ionisé mais participe également à l'érosion de l'atmosphère de la planète.

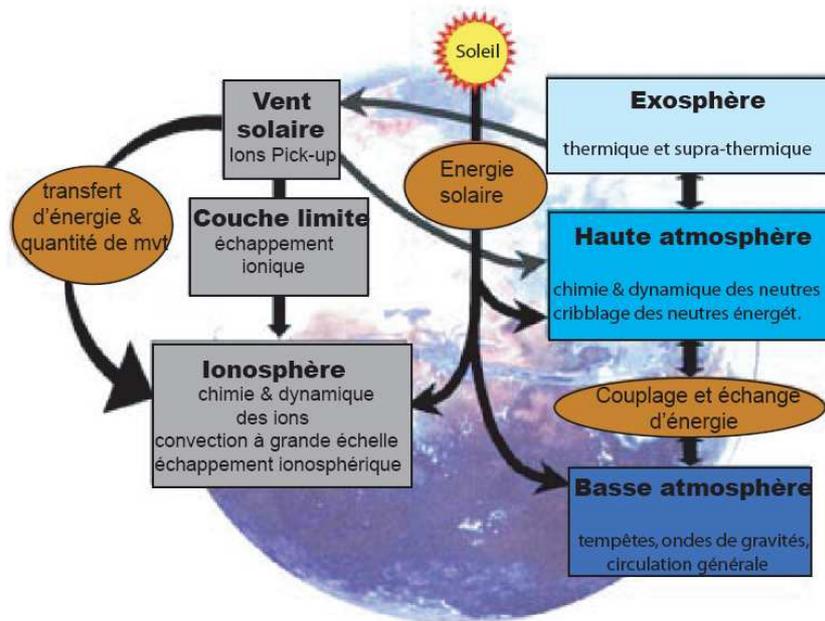
Il est à présent bien établi que Mars a possédé un environnement similaire à celui de la Terre, il y a 4 milliards d'années (notamment l'existence d'une dynamo martienne et d'eau liquide stable à la surface), bien que Mars présente aujourd'hui une atmosphère ténue et sèche et ne possède pas de champ magnétique intrinsèque significatif. Nous ignorons encore comment la dynamo martienne s'est éteinte et surtout comment la plupart de cette eau a disparu. En fait, nous ne savons même pas si l'atmosphère martienne actuelle est la trace d'une atmosphère dense primitive ou plus récente ou si elle résulte d'un équilibre entre dégazage et échappement atmosphérique actuel.

Dans ce projet, nous cherchons à développer, tester et appliquer à Mars une approche détaillée pour décrire l'interaction du vent solaire avec Mars et sa relation avec la haute atmosphère martienne. Trois modèles globaux ont été développés dans des laboratoires français, chacun d'eux permettant de caractériser une ou plusieurs régions particulières de l'environnement martien :

- un modèle de circulation générale pour l'atmosphère martienne (de la surface à la thermosphère) développé au Laboratoire de Météorologie Dynamique (Forget et al, 1999),

- un modèle exosphérique tridimensionnel développé au LATMOS (Leblanc et al, 2001 ; 2002 ; Chaufray et al. 2007)
- un modèle magnétosphérique tridimensionnel et multi-espèces développé au LATMOS en collaboration avec le LPP (Modolo et al, 2005 ; 2006)

Un premier couplage entre les modèles magnétosphérique et exosphérique a été réalisé par Chaufray et al (2007) et a clairement mis en évidence la nécessité d'une meilleure description des différentes régions martiennes et de leurs échanges (figure 25).



**Figure 25:** Couplage Soleil – Mars montrant les différents échanges entre la magnétosphère et l'ionosphère (boîtes grises), l'exosphère (boîte bleu clair) et les haute et basse atmosphères (boîtes bleues). Schéma adapté de Bougher et al (2000).

Par ailleurs, la NASA a sélectionné une mission d'exploration, Mars Atmosphere and Volatile EvolutionN (MAVEN, PI : B. Jakosky) dédiée à l'étude de l'échappement atmosphérique actuel et sa variation en fonction des conditions solaires. MAVEN sera lancé en 2013 et va explorer la haute atmosphère de Mars, son ionosphère et son interaction avec le flux radiatif solaire et le vent solaire. HELIOSARES se fera en étroite collaboration avec les équipes US de MAVEN. Du côté européen, la mission MarsNext est en cours d'étude et pourrait embarquée des instruments dédiés à l'étude de l'impact du vent et du flux solaires sur la thermosphère et l'ionosphère de Mars, son exosphère et sa magnétosphère.

HELIOSARES a donc comme objectif le développement des couplages entre les différentes couches de l'environnement de Mars afin de décrire pour la première fois, et ce de manière auto-consistante, les échanges entre celles-ci. Il est prévu :

- d'étendre le modèle de circulation générale à l'ionosphère et ce jusqu'à l'exobase, ce qui implique un couplage avec le modèle magnétosphérique,
- de changer le modèle 3D exosphérique en un modèle 3D multi-espèces prenant en compte les conditions limites données par le modèle de circulation globale,
- de réduire significativement la résolution spatiale du modèle magnétosphérique afin de rendre compatible les échelles spatiales de ces différents modèles,

Ce projet durera de fin 2009 à fin 2013 et implique plusieurs laboratoires français et des collaborations avec l'Espagne, la Hollande et les Etats-Unis. Il se veut aussi générique que possible et pourra être par la suite appliqué à Vénus et Titan notamment.

### **IV.3.2 ANALYSE DES DONNEES SUR LES AURORES MARTIENNES**

Une des découvertes les plus inattendues par SPICAM a été l'existence de phénomènes auroraux sur la planète Mars (section III.2.2.2), qui a mis en évidence un effet original des champs rémanents et de leur rôle dans l'interaction avec le vent solaire. Suite à cette première découverte, nous avons conduit, en collaboration avec O. Witasse (ESA/ESTEC) et J. Lilensten (LPG, Grenoble), une étude des données pour mieux comprendre l'origine de ces aurores martiennes. Nous avons notamment utilisé les outils de simulation des émissions lumineuses de la haute atmosphère martienne, le code TransMars, pour simuler l'émission induite par la précipitation d'électron dans la haute atmosphère martienne. Ce premier travail a montré que même avec un code relativement simple comme TransMars, il est possible de déduire des informations sur l'origine des aurores martiennes (Leblanc et al. 2006b).

Depuis lors, de nombreuses autres aurores ont été observées sur Mars (Leblanc et al. 2008a) et de nouvelles mesures de ces aurores ont été réalisées en coordination avec d'autres instruments de Mars Express. Il existe donc aujourd'hui un certain nombre de mesures coordonnées des aurores martiennes. La suite logique du travail qui a déjà débuté est d'adapter le code TransMars à la simulation des différentes mesures qui ont été faites et d'analyser en détails l'ensemble des données disponibles sur les aurores martiennes. Ce travail nécessite auparavant de modifier TransMars afin de pouvoir proprement tenir compte de toutes les sources possibles d'émission, de pouvoir simuler correctement la distribution d'électron impactant l'atmosphère de Mars et de pouvoir introduire un modèle d'atmosphère réaliste (un travail en cours d'élaboration par C. Simon du BIRA).

L'autre aspect de ce travail est de continuer à analyser les données de SPICAM afin d'identifier les séquences de mesure où sont observés des phénomènes auroraux. SPICAM a effectué régulièrement des observations du côté nuit de Mars et il existe aujourd'hui un très grand nombre de données qui restent à analyser. Une fois cette analyse réalisée nous espérons avoir ainsi une base de données significative pour en tirer quelques informations statistiquement fiables sur les facteurs favorables au déclenchement d'aurores sur Mars, sur leurs effets sur l'atmosphère martienne et plus généralement sur le rôle des champs rémanents.

### **IV.4 L'ORIGINE DES ATMOSPHERES DES PLANETES TELLURIQUES**

La compréhension de l'histoire des planètes telluriques et en particulier du rôle possible de l'échappement atmosphérique dans l'histoire de Vénus, Mars et de la Terre peut progresser grâce à des développements théoriques sur l'interaction de Mars avec le vent solaire (projets HELIOSARES et d'étude des phénomènes auroraux, sections IV.3.1 et IV.3.2) et grâce aux mesures in situ de l'échappement actuel (projet de mission MAVEN et d'instrument NIMEIS, section IV.5). Cependant, on ne sera pas capable de pleinement comprendre l'origine des atmosphères des planètes telluriques sans mieux connaître l'histoire de la formation de ces planètes. Par ailleurs, ce n'est qu'à travers la comparaison des trois planètes telluriques Vénus, la Terre et Mars, que nous pourrons obtenir le maximum de contraintes sur les premières centaines de million d'années du système solaire. Ainsi, dans le cadre d'un projet de collaboration entre le LATMOS et IDES (Helene Massol, Philippe Sarda, E Chassefière et moi-même), nous réfléchissons à des scénarios de formation de l'atmosphère de ces planètes. Ce travail implique notamment le couplage entre modèle de circulation atmosphérique dans les conditions d'activité solaire du soleil primitif (incluant les effets de serre et de « thermal blanketing » induit par les impacts météoritiques, section III.2.1.2), modèle

d'échappement atmosphérique (à cette époque, les processus dominant étaient probablement l'échappement hydrodynamique et l'échappement induit par impact météoritique), modèle de formation d'un océan de magma à la surface induit par l'effet de serre dû à une atmosphère épaisse et riche en eau, modèle de différenciation progressive de l'intérieur de la planète et modèle de cristallisation de l'océan de magma laissant place à la formation d'un océan d'eau ou non. Ce projet doit, entre autre, être capable de tenir compte des échelles de temps et conditions d'accrétion des planètes telluriques (section III.2.1.2) et des scénarios possibles d'accrétion de l'eau.

Ma contribution à ce projet consiste en la modélisation des processus d'échappement atmosphérique induit par le bombardement météoritique, suivant les conditions atmosphériques et de formation des planètes. Ce modèle devra ensuite être intégré à un modèle global de formation des atmosphères, but de cette collaboration, qui devrait déboucher sur un des tous premiers modèles de formation des atmosphères planétaires prenant en compte de manière consistante tous ces processus.

#### **IV.5 INSTRUMENTATION : NIMEIS, UN SPECTROMETRE DEDIE**

En avril 2002, le CNES lançait un appel d'offre pour des instruments scientifiques dédiés à la mesure de la haute atmosphère martienne dans la perspective de la mission Mars PREMIER. Parmi les projets proposés en réponse à cet appel d'offre, figurait un ensemble d'instruments DYNAMO conçu spécifiquement pour réaliser l'étude, la plus complète possible, de la haute atmosphère martienne (Chassefière et al. 2004). La mission PREMIER a été annulée fin 2002.

DEMAI dont j'avais la responsabilité en tant que PI faisait partie de DYNAMO et consistait en deux spectromètres de masse dédiés à la mesure des atomes neutres thermiques et suprathermiques et des ions thermiques de la haute atmosphère. DEMAI pour "DYNAMICS AND ESCAPE OF THE MARTIAN ATMOSPHERE AND IONOSPHERE" était constitué d'un ensemble de deux spectromètres, Ion Neutral Spectrometer (INS) pour la mesure des ions et neutres thermiques de la haute atmosphère et Hot Neutrals Analyzer (HNA) pour la mesure des neutres énergétiques. Les buts de ces instruments étaient:

- de déterminer la nature des régions d'interaction entre le vent solaire et l'atmosphère martienne,
- d'étudier comment le flux solaire (photon et particule) affecte la structure de la haute atmosphère,
- de déterminer les caractéristiques des populations de neutre chauds.

Originellement conçu dans le cadre de Mars, HNA est en fait adapté à la mesure des environnements neutres raréfiés comme l'exosphère de Mars, de Venus, d'Europa, des astéroïdes ou de Titan. HNA avait comme principales caractéristiques de pouvoir mesurer de faibles densités de neutres mais également de réaliser une analyse en masse et en énergie dans un domaine d'énergie couvrant les thermiques et les supra-thermiques, c'est-à-dire entre  $\sim 0$ eV et 20 eV, un domaine en énergie jusqu'ici inexploré.

Malgré l'abandon de la mission PREMIER, le développement instrumental de HNA s'est poursuivi tout d'abord au CETP sous la direction de J.-J. Berthelier avec ma collaboration. Ce travail a été l'objet de la thèse de F. Cipriani au CETP qui a étudié une source d'ion par microcathode puis par nanotubes de carbone (soutenance en 2006). Cette thèse a permis de caractériser les propriétés du flux d'électron émis par ces cathodes en fonction de la puissance requise, de mettre au point un mode de fonctionnement de celles-ci et de choisir entre les cathodes à microcathode ou à nanotubes. La principale originalité de HNA est donc d'utiliser une source d'ionisation de très grande efficacité pour l'ionisation des particules neutres atmosphériques et une optique qui permet simultanément la détection et la caractérisation des particules dans toute la gamme d'énergie ce qui assure un cycle de

travail continu et contribue à la grande sensibilité de l'instrument. La source d'ionisation fondée sur l'utilisation de cathodes à micro-pointes ou à nanotubes de carbone (NTC) permet une consommation énergétique raisonnable pour une intensité des faisceaux d'électrons d'un ordre de grandeur supérieure à celle obtenue avec des filaments chauffés. Un prototype de source d'ionisation est en cours de réalisation et de test par Fabrice Cipriani dans le cadre d'un séjour postdoctoral à l'ESTEC/ESA en étroite collaboration avec nos laboratoires (jusqu'en avril 2010).

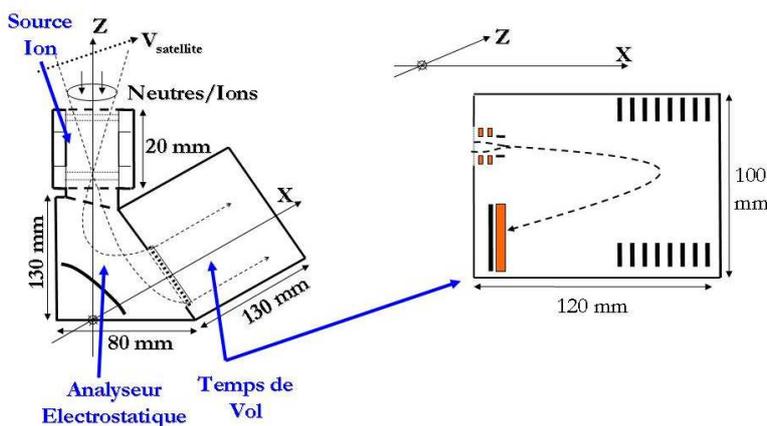
Suite à cette thèse, un concept complet de HNA a été imaginé (figure 26). Une solution pour la mesure du temps de vol a été conçue qui permet de connaître simultanément masse et énergie des particules avec une faible résolution (en utilisant notamment les propriétés des détecteurs développés dans le cadre de PICAM), ou suivant un autre mode de fonctionnement permettant d'obtenir une résolution en masse bien supérieure. En particulier, le concept de l'instrument a été affiné pour permettre de le faire fonctionner suivant différents modes:

- un mode neutre mesurant la masse des particules entrant dans le spectromètre avec, ou une résolution en masse faible mais avec une résolution en énergie simultanée, ou une résolution en masse bien meilleure mais avec un cycle de mesure pour la résolution en énergie.

- un mode ion qui possède les mêmes caractéristiques que le mode neutre.

Ce nouveau concept permet notamment d'étendre les champs d'utilisation possible de cet instrument et de le proposer dans le cadre de mission d'exploration d'environnements comme celui d'Europe (préparation de la mission EJSM/Laplace) ou des astéroïdes (préparation de la mission Marco-Polo).

Suite à cette évolution de l'instrument, nous en avons changé le nom en NIMEIS pour « Neutral and Ion Mass and Energy Imaging Spectrometer ». La gamme d'énergie couverte par NIMEIS reste encore à préciser lors d'une étude numérique en cours. Nous avons obtenu un support financier pour réaliser une étude complète de ce concept instrumental qui devrait commencer à l'automne 2009 (responsable : F. Leblanc).



**Figure 26:** Schéma de l'instrument NIMEIS, composé de: une source d'ionisation où pénètrent les particules neutres ou les ions, un analyseur électrostatique qui disperse les particules ionisées en énergie et d'un temps de vol qui pour chaque gamme d'énergie mesure la masse des particules. Le temps d'entrée dans le temps de vol est donné soit par un système d'ouverture et de fermeture (haute résolution en masse avec cycle de mesure) ou de champ défléchissant (basse résolution en masse sans cycle de mesure). Le dessin de droite est une coupe perpendiculaire de la partie temps de vol du dessin de gauche.

L'objectif de ce projet de recherche et développement est de poursuivre le travail entamé au cours de la thèse de Fabrice Cipriani en développant dans une première étape un modèle numérique complet

de l'instrument. Ce modèle numérique servira à l'optimisation du fonctionnement de l'optique d'analyse en énergie et en masse. Pour la mesure en masse, qui est fondée sur une mesure de temps de vol, une déflexion variable dans le temps est appliquée à l'entrée de l'espace de dérive ce qui permet de remonter au temps d'entrée grâce à la mesure de la position d'arrivée de la particule sur le détecteur. Cette technique de mesure du temps de vol a l'avantage d'éviter tout temps mort de la mesure mais permet une résolution en masse limitée. Aussi afin de proposer un mode de résolution en masse plus élevée, un système d'ouverture et de fermeture à l'entrée est aussi envisagé.

La seconde étape consistera en une étude mécanique de l'instrument conduisant à la construction d'un prototype de laboratoire. L'électronique des détecteurs associée est en grande partie disponible et bénéficiera aussi de la mise au point dans le cadre de Bepi-Colombo d'un composant très performant pour la détection, la localisation des positions d'impact et la mesure des temps de vol sur le détecteur.

La troisième étape sera de tester en laboratoire ce prototype et d'en démontrer l'ensemble des caractéristiques attendues. L'objectif affiché de ce projet est d'atteindre un niveau de maturité suffisant pour pouvoir répondre à l'AO instrument Cosmic Vision qui est prévu en 2011 pour le premier cycle Cosmic Vision.

## **V CONCLUSION**

Par définition, dire exactement de quoi sera constituée mon activité de recherche au-delà de quelques années est difficile, un constat qui constitue d'ailleurs une bonne partie de la sève de ce métier.

Mais il peut, quoi qu'il en soit, être intéressant de donner quelques unes des pistes principales que pourrait suivre mon cheminement professionnel, notamment en s'aidant des grands jalons probables de l'exploration spatiale des dix années qui viennent.

Au-delà de la mission Bepi-Colombo, il y a, semble-t-il, un intérêt renouvelé pour l'exploration de la Lune, et peut être dans un futur pas si lointain que cela, la possibilité de promouvoir des développements théoriques et instrumentales dédiés à cet objet et son interaction avec le vent solaire. Clairement dans ce cadre, l'application des travaux théoriques de modélisation de l'exosphère de Mercure au cas lunaire semble un passage obligé, tout comme la promotion d'un instrument particulièrement adapté à la mesure in situ de milieux très faiblement denses, comme NIMEIS.

J'ai par ailleurs, déjà évoqué les travaux passés réalisés sur les environnements des satellites galiléens, leur modélisation et leur observation. Ces efforts devraient être poursuivis dans l'optique des projets de futures missions spatiales vers Jupiter. L'étude de NIMEIS et son développement instrumental sont associés à la future mission spatiale EJSM vers Jupiter (projet de mission conjointe ESA-NASA de satellites d'Europe et de Ganymède/Callisto, dont le lancement est prévu en 2020).

Le travail qui ne fait que commencer sur la modélisation de l'environnement de Mars a été pensé originellement de manière générique. Il a pour objectif de servir de base à d'autres applications à des objets planétaires comme Vénus et Titan, afin de permettre plus tard une analyse plus approfondie des données des sondes Venus Express et CASSINI. Il devrait aussi nous permettre d'appréhender les prochaines mesures des environnements cométaires.

Enfin, il est évident que tous ces travaux sur la formation et la viabilité d'une atmosphère planétaire en interaction avec son étoile pourront donner lieu à d'éventuelles modélisations de l'environnement des planètes extrasolaires quand nous disposerons de plus amples informations sur leur environnement et la structure de leur atmosphère. On pourrait ainsi imaginer pouvoir être capable de décrire un jour la viabilité d'une atmosphère suivant l'activité de son étoile, la distance de la planète à son étoile, sa taille, la présence ou non d'un champ magnétique intrinsèque et d'autres paramètres qu'il nous reste à déterminer, grâce à l'étude des objets de notre propre système solaire.

## REFERENCES

- Acuña, M. H., et al. Magnetic field of Mars: Summary of results from the aerobraking and mapping orbits, *J. Geophys. Res.*, 106, 23,403-23,417, 2001.
- Ahrens T.J. and D.J. O’Keefe, Shock melting and vaporization of lunar rocks and minerals, *Moon*, 4, 214-249, 1972.
- Andrews-Hanna J.C., Zuber M.T. and W.B. Banerdt, Borealis basin and the origin of the martian crustal dichotomy, *Nature*, 453, doi: 10.1038/nature07011, 1212-1216, 2008.
- Barth C.A., J.B. Pearce, K.K. Kelly, L. Wallace, W.G. Fastie, *Science*, 158, 1675, 1968.
- Barth C.A., Hord C.W., J.B. Pearce, K.K. Kelly, G.P. Anderson and A.I. Stewart, Mariner 6 and 7 Ultraviolet Spectrometer Experiment: Upper atmosphere data, *J. Geophys. Res.*, 76, 2213-2227, 1971.
- Bertaux, J-L. et al., Lyman-alpha observations of Venera 9 and 10 I The non-thermal hydrogen population in the exosphere of Venus, 1978.
- Bertaux, J.L., D. Fonteyn, O. Korablev, E. Chassefière, E. Dimarellis, J.P. Dubois, A. Hauchecorne, M. Cabane, P. Ranou, A.C. Levasseur-Regourd, G. Cernogora, E. Quemerais, C. Hermans, G. Kockarts, C. Lippens, M. De Maziere, D. Moreau, C. Muller, E. Neefs, P.C. Simon, F. Forget, F. Hourdin, O. Talagrand, V.I. Moroz, A. Rodin, B. Sandel, and A. Stern, 2000. The study of the Martian atmosphere from top to bottom with SPICAM Light on Mars Express. *Planet. Space Sci.*, 48, 1303-1320, 2000
- Bertaux, J.-L., F. Leblanc, S. Perrier, E. Quemerais, O. Korablev, E. Dimarellis, A. Reberac, F. Forget, P.C. Simon, A.S. Stern, and B. Sandel, First observation of nightglow in the upper atmosphere of Mars: the NO bands in UV and implications for atmospheric transport, *Science*, 307, 566-569, 2005a.
- Bertaux, J.-L., F. Leblanc, O. Witasse, E. Quémerais, J. Lilensten, A.S. Stern, B. Sandel, and O. Korablev, Discovery of aurora on Mars, *Nature*, 435, 790-794, 2005b.
- Bibring, J-P., Y. Langevin, J.F. Mustard, F. Poulet, R. Arvidson, A. Gendrin, B. Gondet, N. Mangold, P. Pinet, F. Forget and OMEGA team, Global Mineralogy and Aqueous Mars History derived from OMEGA/Mars Express data, *Science*, 312, 400, 2006.
- Bida, T.A., R.M Killen, T.H. Morgan, Discovery of calcium in Mercury’s atmosphere, *Nature* 404: 159-161, 2000.
- Blelly, P.L. and R.W. Schunk, A comparative study of the time-dependent standard 8-, 13- and 16-moment transport formulations of the polar wind, *Ann. Geophys.*, 11, 6, 443-469, 1993.
- Bougher, S.W., S. Engel, R.G. Roble, and B. Foster, Comparative terrestrial planet thermospheres 3. Solar cycle variation of global structure and winds at solstices, *J. Geophys. Res.*, 105, 17669, 2000.
- Brain, D.A., and B.M. Jakosky, Atmospheric loss since the onset of the Martian geologic record : Combined role of impact erosion and sputtering, *J. Geophys. Res.*, 103, 22689, 1998.
- Brain D.A., Lillis R.J., Mitchell D.L., Halekas J.S. and R.P. Lin, Electron Pitch Angle Distributions as Indicators of Magnetic Field Topology near Mars, *J. Geophys. Res.*, Submitted, 2007.
- Breuer, D., and T. Spohn, Viscosity of the Martian mantle and its initial temperature: Constraints from crust formation history and the evolution of the magnetic field, *Planet. Space Sci.*, 54, 2, 153-169, 2006.
- Broadfoot, A. L., D. E. Shemansky, and S. Kumar, Mariner 10: Mercury atmosphere, *Geophys. Res. Lett.* 3: 577 - 580, 1976.
- Carr, M.H. and J.W. Head. Oceans on Mars : An assessment of the observational evidence and possible fate, *J. Geophys. Res.*, 108, doi : 10.1029/2002JE001963, 2003.
- Chamberlain, J.W., Planetary coronae and atmospheric evaporation, *Planet. Space Sci.*, 11, 901, 1963.

- Chapman C.R., Cohen B.A. and D.H. Grinspoon, What are the real constraints on the existence and magnitude of the late heavy bombardment, *Icarus*, 189, 233-245, 2007.
- Chassefière, E., and F. Leblanc, Mars atmospheric escape and evolution : interaction with the solar wind, *Planet. Space Sci.*, 52, 1039, 2004.
- Chassefière, E., F. Leblanc, and B. Langlais, The combined effect of escape and magnetic field histories at Mars, *Planet. Space Sci.*, 55, 343, 2007.
- Chassefière E., A. Nagy, M. Manda, F. Primdahl, H. Reme, J.-A. Sauvaud, R. Lin, S. Barabash, D. Mitchell, T. Zurbuchen, F. Leblanc, J.-J. Berthelier, H. Waite, D. T. Young, J. Clarke, M. Parrot, J.-G. Trotignon, J.-L. Bertaux, E. Quémérais, F. Barlier, K. Szegö, S. Szalá, S. Bougher, F. Forget, J. Lilensten, J.-P. Barriot, G. Chanteur, J. Luhmann, G. Hulot, M. Purucker, D. Breuer, S. Smrekar, B. Jakosky, M. Menvielle, S. Sasaki, M. Acuna, G. Keating, P. Touboul, J.-C. Gérard, P. Rochus, G. Cerutti-Maori, J. Porteneuve, M. Meftah, Ch. Malique, DYNAMO : A Mars upper atmosphere package for investigating solar wind interaction and escape processes, and mapping martian fields, COSPAR Conference proceeding, *Advanced Space Research*, 33, 12, 2228-2235, 2004.
- Chassefière E., J.-L. Maria, J.-P. Goutail, E. Quémérais, F. Leblanc, S. Okano, I. Yoshikawa, O. Korabely, V. Gnedykh, G. Naletto, P. Nicolosi, M.-G. Pelizzo, J.-J. Correia, S. Gallet, C. Hourtoulé, P.-O. Mine, C. Montaron, N. Rouanet, J.-B. Rigal, G. Muramaki, K. Yoshioka, O. Kozlov, V. Kottsov, P. Moisseev, N. Semena, J.-L. Bertaux, M.-Th. Capria, J. Clarke, G. Cremonese, D. Delcourt, A. Doressoundiram, S. Erard, R. Gladstone, M. Grande, D. Hunten, W. Ip, V. Izmodenov, A. Jambon, R. Johnson, E. Kallio, R. Killen, R. Lallement, J. Luhmann, M. Mendillo, A. Milillo, H. Palme, A. Potter, S. Sasaki, D. Slater, A. Sprague, A. Stern, N. Yan, PHEBUS : A double ultraviolet spectrometer to observe Mercury's exosphere, *Planet. Space Sci.*, Sous presse, 2009.
- Chaufray J.Y., Etude de l'exosphère Martienne et traitement des données UV de SPICAM, Thèse de doctorat de l'Université Paris VI, 2007
- Chaufray, J.Y., Modolo R., Leblanc F., G. Chanteur, R.E. Johnson and J.G. Luhmann, Mars Solar Wind interaction: formation of the Martian corona and atmospheric loss to space, *Journal of Geophysical Research*, Volume 112, Issue E9, CiteID E09009, doi: [10.1029/2007JE002915](https://doi.org/10.1029/2007JE002915), 2007.
- Chaufray J.Y Bertaux J.L., Leblanc F., and E. Quémérais, Observation of the hydrogen corona with SPICAM on Mars Express, *Icarus*, 195, 2, 598-613 2008.
- Chaufray, J.Y., F. Leblanc, E. Quémérais, and J.-L. Bertaux, Martian oxygen density at the exobase deduced from OI 130.4-nm observations by Spectroscopy for the Investigation of the Characteristics of the Atmosphere of Mars on Mars Express, *Journal of Geophysical Research*, 114, E02006, doi:10.1029/2008JE003130, 2009.
- Chevrier V., Poulet F. and J.P. Bibring, Early geochemical environment of Mars as determined from thermodynamics of phyllosilicates, *Nature*, 448, doi: 10.1038/nature05961, 60-63, 2007
- Cipriani F., La couronne neutre suprathermique de Mars : Modélisation et étude d'une instrumentation pour sa mesure in-situ, Thèse de docteur-ingénieur Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, 2006.
- Cipriani, F., F. Leblanc, and J. J. Berthelier, Martian corona: Nonthermal sources of hot heavy species, *J. Geophys. Res.*, 112, E07001, doi:10.1029/2006JE002818, 2007.
- Cipriani, F., F. Leblanc, O. Witasse, and R. E. Johnson, Sodium recycling at Europa: what do we learn from the sodium cloud variability?, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L19201, doi:10.1029/2008GL035061, 2008.
- Cipriani, F., F. Leblanc, O. Witasse, and R.E. Johnson, Exospheric signatures of alkali abundances in Europa's regolith, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L12202, doi:10.1029/2009GL038636, 2009.
- Cox C., A. Saglam, J.-C. Gérard, J.-L. Bertaux, F. G. Galindo, F. Leblanc, and A. Reberac, The distribution of the Ultraviolet Nitric Oxide Martian Night Airglow: observations from Mars Express and comparisons with a one-dimensional model, *Journal of Geophysical Research*, 113, E08012, doi:10.1029/2007JE003037, 2008.

- Connerney J.E.P., Acuna M.H., Ness N.F., Spohn T. and G. Schubert, Mars Crustal Magnetism, *Space Science Review*, 0, 1-33, 2004
- Debaille V., Brandon A.D., Yin Q.Z. and B. Jacobsen, Coupled  $^{142}\text{Nd}$  –  $^{143}\text{Nd}$  evidence for a protracted magma ocean in Mars, *Nature*, 450, doi: 10.1038/nature06317, 525-528, 2007
- Delcourt, D.C., Grimald, S., Leblanc, F., Bertherlier J.-J., Millilo, A., and A. Mura, A quantitative model of planetary  $\text{Na}^+$  contribution to Mercury's magnetosphere, *Ann. Geophysicae*, 21, 1723-1736, 2003.
- Demars, H.G., and R.W. Schunk, Transport equations for multispecies plasmas based on individual bi-Maxwellian distributions, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 12, 1051, 1979.
- Doressoundiram A., F. Leblanc, C. Foellmi and S. Erard, Metallic Species in Mercury's exosphere: EMMI/NTT Observations, *The Astronomical Journal*, 137, 3859-3863, 2009a.
- Doressoundiram A., F. Leblanc, C. Foellmi, G. Cremonese, F. Donati, and C. Veillet, Sodium/Potassium ratio at Mercury with CFHT/Espadons and NTT/EMMI observations: Spatial distribution, *Icarus*, Accepted, 2009b.
- Elkins-Tanton, L.T., Zaranek, S., Parmentier, E.M., Early magnetic field and magmatic activity on Mars from magma ocean overturn. *Earth Planet. Sci. Lett.* 236, 1–12, 2005.
- Elkins-Tanton, L.T., Linked magma ocean solidification and atmospheric growth for Earth and Mars, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 271, 181-191, 2008.
- Fama, M., Shi J. and R.A. Baragiola, Sputtering of ice by low-energy ions, *Surface Science*, 602, 156-161, 2008.
- Forget, F., F. Hourdin, R. Fournier, C. Hourdin, O. Talagrand, M. Collins, S. R. Lewis, P. L. Read, and J.-P. Huot., Improved general circulation models of the Martian atmosphere from the surface to above 80 km, *J. Geophys. Res.*, 104, 24,155.24,176, 1999.
- Frey, H., Ages of very large impact basins on Mars: Implications for the late heavy bombardment in the inner solar system, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L13203, doi: 10.1029/2008GL033515, 2008.
- Gilman, C., Chassefière E. and P. Lognonné, A consistent picture of early hydrodynamic escape of Venus atmosphere explaining present Ne and Ar isotopic ratios and low oxygen atmospheric content, *Icarus*, Submitted, 2009
- Gomes, R., H. Levison, K. Tsiganis, and A. Morbidelli, Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment of the terrestrial planets, *Nature*, 435, 466-469, doi: 10.1038/nature03676, 2005
- Grad Hand. der Phys., Principles of the kinetic theory of gases, 12, 1958.
- Halliday A. N., Wanke H., Birck J. L., and Clayton R. N. 2001. The accretion, composition, and early differentiation of Mars. *Space Science Reviews* 96:197–230.
- Hartman, W.K, Quantin C., and N. Mangold, Possible long-term decline in impact rates 2. Lunar impact-melt data regarding impact history, *Icarus*, 186, 11-23, 2007
- Hubert D., Leblanc F. and Gaimard P., Current state-of-the-art for the measurement of non-Maxwellian plasma parameters with the EISCAT UHF facility, *Ann. Geophysicae*, 14, 1506-1512, 1996.
- Hubert D. and Leblanc F., The 1-D  $\text{O}^+$  ion non-Maxwellian velocity distribution function revisited, *Ann. Geophysicae*, 15, 249-254, 1997.
- Hunten, D.M., The escape of light gases from planetary atmospheres. *J. Atmos. Sci.* 30, 1481-1494, 1973.
- Hunten, D.M., Atmospheric evolution of the terrestrial planets, *Science*, 259, 915-920, 1993.
- Jakosky, B.M., and J.H. Jones. The history of Martian volatiles, *Rev. Geophys.* 35, 1-16, 1997.
- Johnson, R.E., Energetic charged particle interactions with atmospheres and surfaces, Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- Johnson, R.E., and J.G. Luhmann, Sputter contribution to the atmospheric corona on Mars, *J. Geophys. Res.*, 103, 3649-3653, 1998.
- Johnson, R.E., D. Schnellenberger, and M.C. Wong, The sputtering of an oxygen thermosphere by energetic  $\text{O}^+$ , *J. Geophys. Res.*, 105, 1659, 2000.

- Johnson R.E., Leblanc F., Madey T.E., and B. Yakshinskiy, Velocity Distributions for Electronically Stimulated Desorption: the sodium to potassium ratio at Europa. *Icarus*, 156, 136-142, 2002.
- Kass, D.M., and Y.L. Yung, The loss of atmosphere from Mars due to solar-wind induced sputtering, *Science*, 268, 697, 1995.
- Kass, D.M., and Y.L. Yung, The loss of atmosphere from Mars : Response, *Science* 274, 1932-1933, 1996.
- Killen, R.M., A.E. Potter, A. Fitzsimmons, and T.H. Morgan, Sodium D2 Line Profiles: Clues to the temperature structure of Mercury's exosphere. *Planet. Space Sci.*, 47, 1449-1458, 1999.
- Killen, R.M., Bida T.A., and Morgan T.H., The calcium exosphere of Mercury, *Icarus*, 173, 3000-311, 2005.
- Kim, J., A.F. Nagy, J.L. Fox, and T.E Cravens, Solar cycle variability of hot oxygen atoms at Mars, *J. Geophys. Res.*, 103, 29339, 1998.
- Kleine, T., Münker C., Mezger K. and H. Palme, Rapid accretion and early core formation on asteroids and the terrestrial planets from Hf-W chronometry, *Nature*, 418, 952, 2002
- Kortenkamp, S.J, Wetherill G.W., and I. Satoshi, Runaway growth of planetary embryos facilitated by massive bodies in a protoplanetary disk, *Science*, 293, 1127-1129, 2001
- Langlais B., Leblanc, F., Fouchet T., Barabash S., Breuer D., Chassefière E., Coates A., Dehant V., Forget F., Lammer H., Lewis S., Lopez-Valverde M., Manda M., Menvielle M., A. Pais, Paetzold M., Read P., Sotin C., Tarits P., Vennerstrom S., Cremonese G., Walhund J.E., Rème H., Merayo J.G.M., Trotignon J.G. and Branduardi-Raymont G., Mars Environment and Magnetic Orbiter: model payload, *Experimental Astronomy*, DOI 10.1007/s10686-008-9101-1, 2008.
- Leblanc F. and Hubert D., A generalized model for the proton expansion in astrophysical winds. I. The velocity distribution function representation, *Astrophysical Journal*, 483, 464-474, 1997.
- Leblanc F. and Hubert D., A generalized model for the proton expansion in astrophysical winds. II. The associated set of transport equations, *Astrophysical Journal*, 501, 375-385, 1998, et Erratum : *Astrophysical Journal*, 511, 515, 1999.
- Leblanc F., Hubert D. and P.-L. Blelly, A generalized model for the proton expansion in astrophysical winds. III. The collisional transfers and their properties, *Astrophysical Journal*, 530, 478, 2000.
- Leblanc F., Hubert D. and P.-L. Blelly, Comparison of the generalized and bi-Maxwellian multimoment multispecies approaches of the terrestrial polar wind, *Journal of Geophysical Research*, 105, 2551, 2000.
- Leblanc, F. and R.E Johnson, Sputtering of the martian atmosphere by solar wind pick-up ions, *Planet. Space Sci.*, 49, 645-656, 2001.
- Leblanc, F., and R.E. Johnson, Role of molecules in pick-up ion sputtering of the Martian atmosphere, *J. Geophys. Res*, 107, doi : 10.1029/2000JE001473, 2002a.
- Leblanc F., R.E. Johnson, and M.E. Brown, Europa's sodium atmosphere: An ocean source? *Icarus*, 159, 132-144, 2002b.
- Leblanc F., J.G. Luhmann, Johnson R.E., and Liu M., Solar Energetic Particles event at Mercury, *Planet. Space Sci.*, 51, 339-352, 2003a.
- Leblanc F., Delcourt D. and R.E. Johnson, Mercury's sodium exosphere: Magnetospheric ion recycling, *Icarus, JGR-Planets*, 108, E12, 5136, doi: 10.1029/2003JE002151, 2003b.
- Leblanc F., and Johnson R.E., Mercury's sodium exosphere, *Icarus*, 164, 261-281, 2003.
- Leblanc F., Lammer, H., Torkar, K., Berthelier, J.-J., Vaisberg, O. and J. Woch, Ion of planetary origins at Mercury: Some estimates, *Notes du Pôle de Planétologie de l'IPSL*, 5, 2004.
- Leblanc F., Potter A., Killen R. and Johnson R.E., Origins of Europa Na cloud and Torus, *Icarus*, 178, 365-387, 2005.
- Leblanc F., Chaufray J.Y., O. Witasse, J.Lilensten and Bertaux J.-L., The Martian dayglow as seen by SPICAM UV spectrometer on Mars Express, *Journal of Geophysical Research*, 111, No. E9, E09S11, 10.1029/2005JE002664, 2006a.

- Leblanc, F., O. Witasse, J. Winningham, D. Brain, J. Liliensten, P.-L. Blelly, R. A. Frahm, J. S. Halekas, and J. L. Bertaux, Origins of the Martian aurora observed by Spectroscopy for Investigation of Characteristics of the Atmosphere of Mars (SPICAM) on board Mars Express, *J. Geophys. Res.*, 111, A09313, doi:10.1029/2006JA011763, 2006b.
- Leblanc F., Barbieri, C., G. Cremonese, S. Verani, R. Cosentino, M. Mendillo, A. Sprague, and D. Hunten, Observations of Mercury's Na-D emission spectrum with the TNG in August 2003, *Icarus*, 185 (2), 395-402, 2006c.
- Leblanc, F., J. Y. Chaufray, and J. L. Bertaux, On Martian nitrogen dayglow emission observed by SPICAM UV spectrograph/Mars Express, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02206, doi:10.1029/2006GL028437, 2007a.
- Leblanc F., Chassefière E., Johnson R.E., Hunten D.M., Kallio E., Delcourt D.C, Killen, R.M., Luhmann J.G., Potter A.E., Jambon A., Cremonese G., Mendillo M., Yan N. and A.L. Sprague, Mercury's exosphere : origins and relations to its magnetosphere and surface, *Planetary Space Science*, 55 1069–1092, 2007b.
- Leblanc F., Witasse O., Liliensten J., R. Frahm, Ali Safaenili, D. Brain, J. Mouginot, H. Nilsson, Y. Futaana, J. Halekas, M. Holmstrom, J.L. Bertaux, D. Winningham, W. Kofmann and R. Lundin, , Observations of aurorae by SPICAM UVS on board Mars Express: simultaneous ASPERA-3 and MARSIS measurements, *Journal of Geophysical Research*, 113, A08311, doi:10.1029/2008JA013033, 2008a.
- Leblanc F., A. Doressoundiram, V. Mangano, A. Lopez-Ariste, C. Lemen, B. Gelly, C. Barbieri, G. Cremonese and N. Schneider, High latitude peaks in Mercury's sodium exosphere: Spectral signature using THEMIS Solar Telescope, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L18204, doi:10.1029/2008GL035322, 2008b.
- Leblanc, F., Langlais B., Fouchet T., Barabash S., Breuer D., Chassefière E., Coates A., Dehant V., Forget F., Lammer H., Lewis S., Lopez-Valverde M., Mandea M., Menvielle M., A. Pais, Paetzold M., Read P., Sotin C., Tarits P., and Vennerstrom S., Mars Environment and Magnetic Orbiter: Science and measurements objectives, *Astrobiology Journal*, 9, 71-89, doi:10.1089/ast.2007.0222, 2009a.
- Leblanc F. and R. E. Johnson, Mercury exospheric global circulation model: I The sodium component, *Icarus*, Submitted, 2009.
- Leblanc F., Doressoundiram A. and R.E. Johnson, Mercury Exospheric Global Circulation Model: II The sodium/potassium ratio, *Icarus*, in preparation, 2009b.
- Leblanc F., A. Doressoundiram, N. Schneider, S. Massetti, M. Wedlund, A. López Ariste, C. Barbieri, V. Mangano, and G. Cremonese, Short term variations of Mercury's Na exosphere observed with very high spectral resolution, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L07201, doi:10.1029/2009GL038089, 2009c.
- Lemaire, J. and M. Scherer, Kinetic models of the solar wind, *J. Geophys. Res.*, 76, 7479-7490, 1971
- Lillis, R. J., H. V. Frey, and M. Manga, Rapid decrease in Martian crustal magnetization in the Noachian era: Implications for the dynamo and climate of early Mars, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L14,203, doi:10.1029/2008GL034338, 2008.
- Luhmann, J.G., and J.U. Kozyra, Dayside pickup oxygen precipitation at Venus and Mars-Spatial distributions, energy deposition and consequences, *J. Geophys. Res.*, 96, 5457-5468, 1991.
- Luhmann, J.G., R.E. Johnson, and M.H.G. Zhang, Evolutionary impact of sputtering of the Martian atmosphere by O<sup>+</sup> pick-up ions, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 2151, 1992.
- Lundin, R., Barabash, S., Andersson, H., Holmström, M., and the ASPERA-3 team, Solar wind induced atmospheric erosion at Mars—First results from ASPERA-3 on Mars Express. *Science* 305, 1933–1936, 2004.
- Lunine, J.I., Chambers J., Morbidelli A., and ..A. Leshin, The origin of water on Mars, *Icarus*, 165, 1-8, 2003

- Madey, T.E., Johnson R.E., and T.M. Orlando, Far-out surface science: radiation-induced surface processes in the solar system, *Surf. Sci.*, 500, 838-858, 2002.
- Mangano V., F. Leblanc, C. Barbieri, S. Massetti, A. Milillo, G. Cremonese, C. Grava, Observation of a Southern peak in intensity during three continuous Earth days in Mercury's sodium exosphere, *Icarus*, 201, 2, 424-431, doi: 10.1016/j.icarus.2009.01.016, 2009.
- Marinova M.M., Aharonson O. and E. Asphaug, Mega-Impact formation of the Mars hemispheric dichotomy, *Nature*, 453, 10.1038/nature07070, 1216, 2008
- Marsch, E., K.-H. Muhlhauser, R. Schwenn, H. Rosenbauer, W. Pilipp, and F. Neubauer, Solar wind protons: Three-dimensional velocity distributions and derived plasma parameters measured between 0.3 and 1 AU, *J. Geophys. Res.*, 87, 52– 72, 1982.
- McElroy, M.B., and T.M. Donahue, Stability of the martian atmosphere, *Science*, 177, 986-988, 1972.
- McClintock W.E., Bradley E.T., Vervack R.J., Killen R.M., Sprague A.L., Izenberg N.R. and S.C Solomon, Mercury's exosphere: observations during Messenger's first Mercury flyby, *Science*, 321, 92, 2008.
- Melosh H.J. and A.M. Vickery, Impact erosion of the primordial atmosphere of Mars, *Nature*, 338, 487-489, 1989
- Modolo, R., Modélisation de l'interaction du vent solaire ou du plasma kronien avec les environnements neutres de Mars et de Titan, Thèse de doctorat de l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, 2005.
- Modolo, R. et al., Influence of the solar EUV flux on the Martian plasma environment, *Ann. Geophys.*, 23, 433, 2005.
- Modolo, R., Chanteur G.M., Dubinin E. and A.P. Matthews, Simulated solar wind plasma interaction with the Martian exosphere : influence of the solar EUV flux on the bow shock and the magnetic pile-up boundary, *Ann. Geophys.*, 24, 3403-3410, 2006
- Nagy, A.F., and T.E. Cravens, Hot oxygen atoms in the upper atmospheres of Venus and Mars, *Geophys. Res. Lett.*, 15, 433, 1988.
- Nilsson, H., Carlsson E., Brain D.A., Yamauchi M. Holmström M., Barabash S., Lundin R., and Y. Futaana, Ion escape from mars as a function of solar wind conditions: a statistical study, *Icarus*, In press, 2009
- Nimmo, F., Hart, S.D, Korycansky D.G. and C.B. Agnor, Implications of an impact origin for the martian hemispheric dichotomy, *Nature*, 453, doi: 10.1038/nature07025, 1220, 2008.
- Parker, E. N. *Interplanetary Dynamical Processes*, Wiley-Interscience Publishers, New York, 1963.
- Pham L. B. S., Karatekin O. and V. Dehant, Effects of meteorite impacts on the atmospheric evolution of Mars, *Astrobiology*, 9-1, 45, 2009.
- Phillips, R.J., M.T. Zuber, S.C. Solomon, M.P. Golombek, B.M. Jakosky, D.E. Smith, R.M.E. Williams, B.M. Hynek, O. Aharonson, and S.A. Hauck, Ancient Geodynamics and global-scale hydrology on Mars, *Science*, 291, 2587, 2001.
- Pierazzo E. and H.J. Melosh, Melt production in Oblique impacts, *Icarus*, 145, 252-261, 2000.
- Potter, A. E. and T. H. Morgan, Discovery of sodium in the atmosphere of Mercury, *Science* 229: 651 - 653, 1985.
- Potter, A. E. and T. H. Morgan, Potassium in the atmosphere of Mercury, *Icarus* 67 336 - 340, 1986.
- Potter, A.E., Killen, R.M. and Sarantos, M., Spatial distribution of sodium on Mercury, *Icarus* 181, 1, 2006.
- Potter, A. E.; Killen, R. M.; Morgan, T. H., Solar radiation acceleration effects on Mercury sodium. *Icarus*, 186, 571-580, 2007.
- Ribas I., E. F. Guinan, M, Güdel, and M. Audard, Evolution of the solar activity over time and effects on planetary atmospheres, I High energy irradiances (1-1700 A), *Astrophys. J.*, 622, 680–694, 2005.

- Roberts, J.H., Lillis, R.J. and M. Manga, Giant impacts on early mars and the cessation of the Martian dynamo, *J. Geophys. Res.*, In press, 2009
- V.I. Shematovich, D.V. Bisikalo, J.-C. Gérard, C. Cox, S.W. Bougher, and F. Leblanc, Monte Carlo model of electron transport for the calculation of Mars dayglow emissions, *Journal of Geophysical Research*, 113, E02011, doi:10.1029/2007JE002938, 2008.
- Segura, T.L., O.W. Toon, Colaprete A. and K. Zahnle, Environmental effects of large impacts on Mars, *Science*, 298, 1977-1980, 2002
- Simon C., Witasse O., Leblanc F., Gronoff G. and J.L. Bertaux, Characterising Mars' dayglow using Mars Express' SPICAM ultraviolet data in combination with a kinetic model, *Plan. Space Science*, 57, 1008-1021, 2009.
- Slavin J.A. et 17 co-auteurs, MESSENGER Observations of Magnetic Reconnection in Mercury's Magnetosphere, *Science*, 324, 5927, 606, 2009.
- Solomon, S.C., O. Aharonson, J.M. Aurnou, W.B. Banerdt, M.H. Carr, A.J. Dombard, H.V. Frey, M.P. Golombek, S.A. Hauck, J.W. Head, Jakosky, B.M., Johnson, C.L., McGovern, P.J., Neumann, G.A., Phillips, R.J., Smith, D.E., and Zuber, M.T., New perspective on ancient Mars, *Science*, 307, 1214, 2005.
- Wetherill G.W. and S. Inaba, Planetary accumulation with a continuous supply of planetesimals, *Space Sci. Rev.*, 92, 311-320, 2000.
- Whealton, J. H., and Woo, S.-B., Ion Velocity Distribution of a Weakly Ionized Gas in a Uniform Electric Field of Arbitrary Strength, *Phys. Rev. A*, 6, 2319, 1971.
- Witasse, O., Modélisation des ionosphères planétaires et de leur rayonnement : la Terre et Mars, Thèse, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 2000.
- Wood, B. E., Müller, H.-R., Zank, G. P., Linsky, J. L., and Redfield, S., New Mass-Loss Measurements from Astrospheric Ly $\alpha$  Absorption, *Astrophys. J.*, 628, L143, 2005.
- Yashinskiy, B.V. and T. E. Madey, Photon-stimulated desorption as a substantial source of sodium in the lunar atmosphere, *Nature*, 400, 642-644, 1999.
- Yan, N., Leblanc F. and E. Chassefière, Role of Caloris basin in producing short time variation of Na Mercury's exosphere, *Icarus*, 181, 348-362, 2006a.
- Yan, N., E. Chassefière, F. Leblanc and A. Sarkissian, Thermal model of Mercury's surface and subsurface: Impact of subsurface physical heterogeneities on the surface temperature, *Advances in Space Research*, 38, 583-588, doi:10.1016/j.asr.2005.11.010, 2006b.
- Yin, A. S.B. Jacobsen, K. Yamashita, J. Blichert-Toft, P. Télouk and F. Albarède, A short timescale for terrestrial planet formation from Hf-W chronometry of meteorites, *Nature*, 418, 949, 2002
- Zurbuchen, T.H. et 9 co-auteurs, MESSENGER Observations of the Composition of Mercury's Ionized Exosphere and Plasma Environment, *Science*, 321, 5885, 90, 2008.



## **ANNEXE**

**ANNEXE 1: ASTROPHYSICAL JOURNAL, 483, 464-474, 1997**

*LEBLANC F. AND HUBERT D., A GENERALIZED MODEL FOR THE PROTON EXPANSION IN ASTROPHYSICAL WINDS. I. THE VELOCITY DISTRIBUTION FUNCTION REPRESENTATION, ASTROPHYSICAL JOURNAL, 483, 464-474, 1997.*



**ANNEXE 2: PLANETARY SPACE SCIENCE, 49, 645-656, 2001.**

*LEBLANC, F. AND R.E JOHNSON, SPUTTERING OF THE MARTIAN  
ATMOSPHERE BY SOLAR WIND PICK-UP IONS, PLANET. SPACE  
SCI., 49, 645-656, 2001.*



**ANNEXE 3: ICARUS, 164, 261-281, 2003.**

*LEBLANC F., AND JOHNSON R.E., MERCURY'S SODIUM  
EXOSPHERE, ICARUS, 164, 261-281, 2003.*



**ANNEXE 4: JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 113, A08311, 2008.**

*LEBLANC F., WITASSE O., LILENSTEN J., R. FRAHM, ALI SAFAENILI, D. BRAIN, J. MOUGINOT, H. NILSSON, Y. FUTAANA, J. HALEKAS, M. HOLMSTROM, J.L. BERTAUX, D. WINNINGHAM, W. KOFMANN AND R. LUNDIN, , OBSERVATIONS OF AURORAE BY SPICAM UVS ON BOARD MARS EXPRESS: SIMULTANEOUS ASPERA-3 AND MARSIS MEASUREMENTS, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 113, A08311, DOI:10.1029/2008JA013033, 2008.*



**ANNEXE 5: GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 36, L07201, 2009.**

*LEBLANC F., A. DORESSOUNDIRAM, N. SCHNEIDER, S. MASSETTI, M. WEDLUND, A. LÓPEZ ARISTE, C. BARBIERI, V. MANGANO, AND G. CREMONESE, SHORT TERM VARIATIONS OF MERCURY'S NA EXOSPHERE OBSERVED WITH VERY HIGH SPECTRAL RESOLUTION, GEOPHYS. RES. LETT., 36, L07201, DOI:10.1029/2009GL038089, 2009.*