



Résumé des activités de recherche

Activités de recherche

La question de l'habitabilité des planètes telluriques est devenue, en particulier depuis quelques années, un thème central de la planétologie et des sciences de l'univers en général. Elle s'inscrit directement dans les préoccupations actuelles soulignées par les changements observables au niveau de notre planète, la Terre. La planétologie comparée et l'étude des astres voisins tels Mars et Vénus sont des outils privilégiés pour apporter des éléments de compréhension dans des questions essentielles comme l'évolution du climat, les conditions de surface planétaires, le devenir des ressources en eau ou l'émergence de la vie et sa pérennité. De plus, la découverte de plus de 550 planètes extrasolaires orbitant autour d'étoiles lointaines, dont plusieurs super-Terre, par différentes missions comme Kepler ou CoRoT a donné un nouvel élan, non seulement à la recherche d'une meilleure connaissance de notre planète et de ses sœurs, mais aussi à l'observation d'un vaste panel de comportements qui sont autant de nouveaux sujets d'étude. Mon domaine d'étude s'inscrit tout à fait dans cet arc de recherche, tant par mes travaux passés que par mes sujets d'intérêt actuels.

Ma thèse (2005-2009) et l'année d'ATER qui a suivi m'ont permis de développer des scénarios d'évolution cohérents pour deux planètes de notre système solaire : Mars et Vénus. Ces travaux ont d'ailleurs mené à quatre publications (Gillmann et al., 2009a, 2009b, 2011 ; van Thienen et al., 2007) chez EPSL et Space Science Review (cette dernière liée à un atelier de l'International Space Science Institut). En effet, intitulée « Habitabilité à long terme des planètes telluriques », ma thèse traite directement des facteurs influençant les conditions de surface des planètes solides de notre système solaire, c'est-à-dire, principalement, l'évolution volcanique liée à la dynamique mantellique et la perte de volatils atmosphériques par divers mécanismes tels que l'échappement, thermique ou non, l'érosion par impact ou la subduction.

Les premiers résultats obtenus concernent Mars (Gillmann et al., 2009a). Cette étude propose de modéliser l'évolution des espèces importantes de l'atmosphère de la planète (CO_2) d'après les flux entrant et sortant les mieux contraints, c'est-à-dire l'échappement atmosphérique et le dégazage volcanique au cours des trois derniers milliards d'années. L'échappement atmosphérique considéré est non-thermique : il s'agit des interactions entre le flux extrême UV (EUV) provenant du soleil et les molécules de la haute atmosphère. Les processus considérés sont le criblage, l'écoulement ionosphérique et la recombinaison dissociative. Ces flux sont estimés à partir d'études numériques, telles des simulations Monte-Carlo 3D, reproduisant ces mécanismes (Chaufray et al., 2007 ; Ma et al., 2007 ; Cipriani et al., 2007) ainsi qu'au travers de l'observation par l'instrument ASPERA-3 sur le satellite Mars Express (par exemple, Lundin et al., 2009). L'évolution temporelle est obtenue en observant les variations des mesures en fonction de l'intensité des émissions solaires au cours d'un cycle solaire. En effet, le flux EUV d'une étoile comme le soleil décroît globalement avec le temps, contrairement à sa luminosité, alors qu'au cours d'un cycle, le soleil passe par des phases intenses et plus faibles. Ainsi, un maximum solaire correspond à une intensité moyenne plus ancienne (voir Ribas et al., 2005). Le flux entrant de volatils est obtenu en employant un panel de résultats tirés de



modélisations numériques (Breuer et Spohn, 2006 ; Manga et al., 2006 ; O'Neill et al., 2007), qui permettent d'obtenir la quantité de laves produites. L'effet sur l'atmosphère est alors étudié en fonction de différentes compositions réalistes des laves. Le modèle a plus tard (Gillmann et al., 2011) été approfondi, d'une part en raffinant les estimations des flux d'échappement et de dégazage, d'autre part en comparant les résultats à l'observation des coulées de surface (Greeley et Schneid, 1991) et aux études géochimiques récentes (Hirschmann et al., 2008) et en étendant la période étudiée à 4 milliards d'années. De même l'étude de H_2O , Ar et N_2 a été implémentée. Mes résultats indiquent clairement l'importance du volcanisme dans l'évolution de l'atmosphère martienne tant au niveau du gaz principal, CO_2 , qu'au niveau isotopique (pour Ar et CO_2 , comparés aux résultats de Phoenix ; Niles et al., 2010), ou à celui de la quantité d'eau à la surface de la planète. Mars serait donc une planète dont l'atmosphère actuelle est secondaire, c'est-à-dire tardive et issue majoritairement du volcanisme. Son âge moyen serait ainsi de 2 milliards d'années. De la même manière, l'eau présente à la surface et observée au niveau des calottes sous forme solide (Bibring et al., 2004, 2005 par exemple) proviendrait en grande partie du volcanisme. L'Argon (en particulier le rapport Ar^{40}/Ar^{36}) serait lui aussi un traceur du volcanisme martien. Les variations de pression et de température (obtenues à l'aide des travaux sur un modèle de circulation globale de l'atmosphère de Mars ; Forget et al., 1999) de surface liées à l'évolution du CO_2 et de l'eau disponible sont néanmoins insuffisantes pour garantir l'existence de l'eau liquide ou de conditions d'habitabilité pendant l'évolution tardive de Mars (les 3,5 à 4 derniers milliards d'années). Dans l'état actuel de l'atmosphère martienne, même une variation de pression d'un facteur 2 (par exemple liée à la sublimation des réservoirs de CO_2 solide découverts par la NASA grâce à l'orbiteur MRO en 2011) n'aurait pas d'effet notable sur les conditions de surface, bien que l'eau soit disponible sous forme solide. Un changement radical des conditions martiennes serait donc nécessaire pour observer de l'eau liquide à la surface de la planète, comme un changement de paramètres orbitaux (Laskar et al., 2004). L'échappement atmosphérique, quant à lui, serait un processus secondaire au cours de l'évolution tardive mais resterait l'effet majoritaire au cours du premier milliard d'années au moins. Ces conclusions correspondent aux études de l'échappement primitif martien (Tian et al., 2009) et corroborent les résultats présentés par Bibring et al. (2006), laissant supposer que la période d'habitabilité de Mars a sans doute été confinée au premier milliard d'années et en particulier à la période précédant le bombardement massif il y a environ 3,8 milliards d'années. Ces résultats ont été complétés par une modélisation numérique du dégazage volcanique de Mars en 1D et 3D réalisée en partenariat avec l'université d'Utrecht.

La seconde partie des résultats obtenus concerne l'évolution de Vénus (Gillmann et al., 2009b). Le but de cette étude était de proposer un scénario cohérent des premières centaines de millions d'années de l'évolution de cette planète, une phase cruciale où plusieurs mécanismes complexes tels que l'océan de magma ou l'échappement hydrodynamique sont impliqués. Nous désirions contraindre notre scénario à l'aide des données isotopiques disponibles. Le travail a porté principalement sur la quantification des effets de l'échappement primitif intense et les paramètres qui déterminent ces derniers. Nous avons tout d'abord développé une méthode de calcul permettant de prendre en compte l'entraînement des espèces lourdes présentes dans l'atmosphère par le flux d'hydrogène vers l'espace. Ces flux dépendent de l'énergie transmise à l'atmosphère par les EUV émis par l'étoile, la taille de l'atmosphère et sa température. Les espèces considérées sont les gaz



rares, qui seront soumis à un fractionnement isotopique gravitationnel entre l'homopause et le niveau de l'échappement effectif, au cours de cet entrainement, mais aussi l'oxygène, espèce majoritaire de l'atmosphère à cette époque qui consomme une large part de l'énergie incidente lors de son échappement. Nous avons fondé notre modélisation sur les travaux de Zahnle et Kasting (1986), Kasting et Pollack (1983), Hunten et al., (1987) et Chassefière (1996a,b). Nous obtenons des simulations reproduisant le fractionnement isotopique des gaz rares mesuré pour Vénus mais aussi pour un cas similaire à celui de la Terre. De plus, le suivi de la quantité d'hydrogène et d'oxygène perdue au cours du processus implique que ces cas favorables nécessitent que l'oxygène soit entraîné par l'hydrogène et ralentisse ainsi l'échappement. La situation contraire générerait un fractionnement trop important et une perte d'eau irréaliste. De plus la différence entre les flux d'hydrogène et d'oxygène nous permet de proposer un scénario expliquant les données isotopiques et la différence entre les situations de la Terre et de Vénus. Ainsi, Vénus recevrait en moyenne moins d'eau que la Terre lors de sa formation et des premiers stades de son évolution (Morbidelli et al., 2000 ; Raymond et al., 2006), ce qui permettrait néanmoins de construire une atmosphère dense (~300K) et de maintenir une température élevée à la surface de la planète (~1500K). Ces conditions sont compatibles avec la présence d'un océan de magma primitif et sa survie pendant plusieurs dizaines de millions d'années (Elkins-Tanton, 2008). Dans cet état, l'eau disponible est répartie entre l'atmosphère et l'océan de magma, et établit un tampon qui maintient une atmosphère stable au cours de l'échappement. L'eau retirée de l'atmosphère est remplacée par une quantité équivalente rejetée par l'océan de magma, menant à sa solidification progressive. Sur Vénus, l'échappement hydrodynamique serait directement responsable de la disparition de l'océan de magma : il pomperait toute l'eau disponible en moins de 100 millions d'années, durée nécessaire à la perte de l'équivalent d'environ 5 océans terrestres d'eau. Il en résulte le fractionnement isotopique observé par les sondes Vénéra, et une planète sèche, n'ayant jamais été capable d'abriter la vie. Si, à l'inverse, comme il est raisonnable de le penser, la Terre a reçu plus d'eau au cours de son évolution primitive, l'échappement hydrodynamique ne parvient pas à retirer toute l'eau présente avant la solidification de l'océan de magma (au plus tard vers 160 Ma, alors qu'il faudrait 300 Ma pour retirer 15 océans terrestres d'eau de l'atmosphère), nous obtenons donc une planète dont le manteau est hydraté. Une différence essentielle entre la Terre et Vénus, menant l'une vers des conditions habitables alors que l'autre est sèche, pourrait donc se situer dans les premiers millions d'années de leurs évolutions respectives. Notre étude nous a aussi permis, en observant les flux d'hydrogène et d'oxygène, de proposer l'existence d'une possible période dans l'évolution de Vénus lors de laquelle l'atmosphère aurait été constituée en grande partie d'oxygène, bien que probablement incapable de soutenir la vie. Une telle situation pourrait s'avérer importante dans l'observation et l'étude des exoplanètes, car une telle planète constituerait un faux-positif pour l'identification de la vie.

Mon travail actuel est un développement des résultats et hypothèses mis en place au cours de ma thèse : ces derniers ont montré l'importance du volcanisme et donc de la dynamique des manteaux des planètes telluriques dans l'évolution des atmosphères planétaires. Cet aspect méritait d'être traité en détail. Le but est donc d'étudier les effets de la dynamique interne sur l'atmosphère et inversement. La relation entre dynamique planétaire et habitabilité a, en effet, été suggérée auparavant (Franck et al., 2000, Frank et Bounama, 2001, Sleep, 1995, Zahnle et al., 2007) et pourrait faire varier la zone habitable de façon significative. Nous cherchons à obtenir un couplage robuste



entre les enveloppes fluides externes et la partie solide de la planète. Pour cela, nous disposons du code StagYY développé par le Professeur P. Tackley depuis plus de 15 ans (Tackley, 1993 ; 2008). Ce code inclut de nombreuses fonctions essentielles pour modéliser de façon réaliste l'évolution des manteaux planétaires et la convection à couvercle fixe, telles que les zones de transition chimique entre minéraux, la rhéologie non linéaire, la fusion partielle, la compressibilité etc. Le modèle donne en particulier accès à des grandeurs essentielles dans l'étude de l'habitabilité, comme la production de laves ou les flux de chaleur de surface et hors du noyau. Il est de plus adapté à l'utilisation pour des planètes telluriques différentes de la Terre comme Mars ou Venus, ou même des exoplanètes, comme Keller et Tackley (2009) l'ont prouvé. La production de laves nous permet d'obtenir des estimations de la quantité de gaz apportée à l'atmosphère. Inversement, il est aussi possible de quantifier le recyclage des volatils présents en surface dans le manteau et donc la réhydratation de celui-ci (Elkins-Tanton et al., 2007), ce qui permet de s'intéresser à l'importance des volatils dans les processus internes. La partie atmosphérique du code consiste en un modèle d'atmosphère grise radiative-convective (Phillips et al., 2001 ; Bullock et Grinspoon, 2001), combiné avec une étude de l'échappement atmosphérique sur la planète considérée. Nous appliquons notre modèle en premier lieu à Vénus. Ainsi, nous reproduisons le comportement volcanique de Vénus, marquée par des périodes d'activité intense séparées par des périodes plus calmes. Nous obtenons un taux de production de laves cohérent avec l'observation, aussi bien sur le dernier milliard d'années que sur les 300 derniers millions d'années (Nimmo et McKenzie, 1998 ; Strom et al., 1994). Chaque période d'activité correspond à la plongée de masses de matériau froid appauvri depuis la partie supérieure du manteau vers la limite noyau-manteau, où elles s'accumulent. Ces épisodes volcaniques ont un impact direct sur les températures de surface qui augmentent avec l'ajout d'eau dans l'atmosphère sèche de Vénus, ce qui est clair d'après les profils verticaux de températures que nous obtenons. La quantité de CO₂ dans l'atmosphère de Vénus, cependant, ne change que peu, étant donné le faible échappement de cette espèce et sa faible teneur supposée dans le manteau. Nos résultats doivent être comparés à ceux de Noack et al. (2011), qui utilisent une approche similaire. De plus, il est important de prendre en compte les effets du volcanisme sur les gaz rares de l'atmosphère en tant que contrainte majeure des évolutions planétaires. Notre modèle est capable de suivre cette évolution et en particulier d'étudier les rapports isotopiques de l'Argon (Kaula, 1999). L'étude du xénon est aussi un sujet d'intérêt, en particulier en comparaison de la situation terrestre (Coltice et al., 2009). Nous avons enfin pour objectif de pouvoir étendre, à terme, notre étude à une vaste gamme d'exoplanètes en prenant en compte les différences existant entre les planètes de type terrestre (Kaltenegger et al., 2007 ; Elkins-Tanton et Seager, 2008). Nous pourrions ainsi étudier les paramètres importants pour l'évolution planétaire, tels que la taille de la planète, sa distance à son étoile, l'apport primitif en volatils etc., et déterminer quels éléments peuvent se combiner pour influencer sur l'habitabilité des planètes, qu'elles fassent partie de notre système solaire ou soient découvertes autour d'autres étoiles.

Nos projets futurs incluent deux axes d'étude principaux. Le premier concerne le développement de la modélisation atmosphérique des planètes de façon à représenter plus précisément les processus qui ont lieu en leur sein. Ainsi nous pourrions obtenir un profil vertical 1D complet de l'atmosphère étudiée plutôt qu'un bilan global de son contenu. Un tel modèle permettrait de s'intéresser à la photochimie de l'atmosphère et pourrait être comparé aux observations. Il permettrait aussi une



meilleure compréhension des conditions de surface et de l'habitabilité. De tels modèles ont été réalisés, en particulier pour Vénus (Kasting et Pollack, 1983 et suivants), qui constituerait un terrain de test approprié, mais le couplage avec la partie dynamique n'a pas été réalisée et serait sans doute importante, comme l'indiquent nos travaux. Le second axe qui nous intéresse est l'étude de l'effet des impacts sur l'évolution atmosphérique et planétaire. En effet, les impacts majeurs peuvent avoir plusieurs effets, comme une intense érosion atmosphérique (Melosh et Vickery, 1989 ; Svetsov, 2007), mais aussi un apport d'énergie à la surface et la basse atmosphère (Matsui et Abe, 1986), une contribution à la formation du noyau métallique (Golabek et al., 2009) ou un apport de volatils (Pham et al., 2009, Raymond et al., 2006). De tels effets ont sans doute d'importants effets sur la formation et l'évolution précoce de l'atmosphère des planètes telluriques. Nous disposons, avec notre modèle de couplage atmosphère/dynamique interne d'un outil de choix pour étudier cet aspect de l'évolution planétaire. En particulier, la question de savoir si un impact majeur tel que celui de la proto-lune peut avoir une influence au long terme sur l'habitabilité d'une planète nous intéresse : serait-ce un des facteurs qui différencie Vénus de la Terre ?