

Modélisation du deutérium atomique dans la haute atmosphère de Mars

Chaufray, J-Y¹, F. Gonzalez-Galindo², F. Leblanc¹, R. Modolo¹, F. Montmessin¹, M. Vals¹, L. Rossi¹, F. Lefèvre¹, F. Forget³, M. Lopez-Valverde²

¹LATMOS-IPSL, Guyancourt, France, ²IAA-CSIC, Granada, Spain, ³LMD, Paris, France

1) Introduction

Alors que sur Terre, l'eau se trouve essentiellement sous forme liquide, sur Mars l'eau est présente uniquement sous forme de glaces et de vapeur. L'observation d'anciens réseaux de vallées fluviales et d'argiles dans les terrains anciens indiquent que de l'eau liquide était présente en abondance de façon stable dans le passé. L'une des énigmes majeures martienne est de comprendre les mécanismes à l'origine de l'évolution d'une planète primitive riche en eau liquide à la planète actuelle.

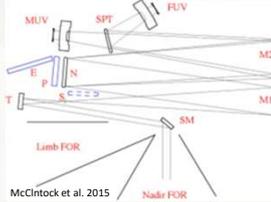
Un de ces mécanismes est l'échappement atmosphérique de l'eau sous forme atomique qui pourrait avoir conduit à appauvrir la planète en eau. L'enrichissement en deutérium (un isotope lourd de l'hydrogène) de l'atmosphère de Mars par rapport à la Terre semble confirmer l'importance de l'échappement atmosphérique. En effet le deutérium étant plus lourd que l'hydrogène, il est plus difficile de le faire s'échapper. L'échappement préférentiel de l'hydrogène par rapport au deutérium est une explication probable de l'enrichissement en deutérium sur Mars et de l'échappement d'une grande quantité d'eau au cours du temps.

Un paramètre important pour caractériser l'enrichissement isotopique d'une atmosphère est le facteur de fractionnement isotopique qui est le rapport entre les taux d'échappement des deux isotopes divisés par le rapport de leur concentration dans l'atmosphère. Ce facteur n'est pas simple à estimer car l'échappement du deutérium peut être produit par différents processus thermiques ou non-thermiques.

A l'aide du modèle de circulation générale martien (GCM) développé au LMD, nous avons maintenant commencé à inclure le deutérium atomique dans la haute atmosphère ainsi que son échappement thermique (échappement de Jeans).

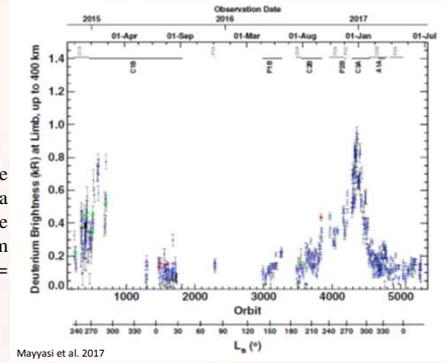
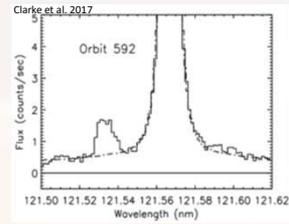
2) Observations

Schéma optique de l'instrument IUVS à bord de la sonde MAVEN. Le réseau N peut être tourné (position en pointillé), dans ce cas la lumière passe à travers le réseau échelle : E).



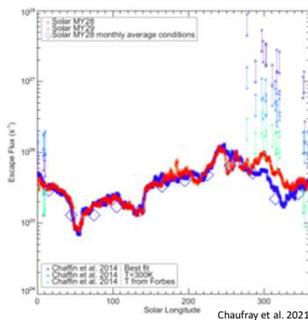
Les observations régulières de l'émission du deutérium atomique par la sonde MAVEN montre une forte variation saisonnière avec un maximum au voisinage du solstice d'été sud (Ls = 270°).

Spectre obtenu par le canal échelle et présentant les raies Lyman-alpha de l'hydrogène (121.567 nm) et du deutérium (121.533 nm).

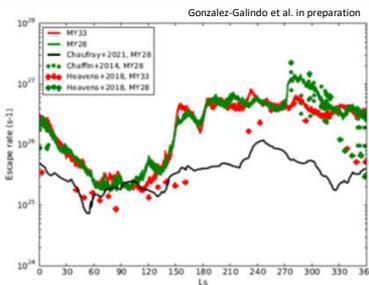


3) Modelisation

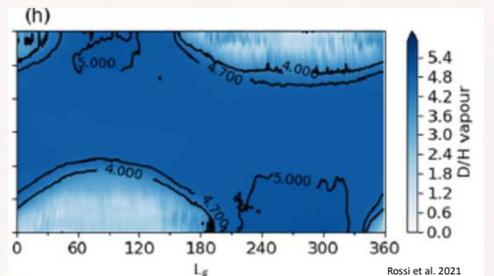
Le Modèle de circulation générale (GCM) de Mars développé au LMD (Forget et al. 1999) en collaboration avec le LATMOS et l'IAA a été utilisé pour simuler l'hydrogène atomique, son échappement et ses variations au cours d'une année Martienne (Chaufray et al. 2015, 2021). Une première version reproduisait assez bien les observations de la sonde Mars Express sauf vers Ls = 230 - 330 où l'échappement est fortement sous-estimé.



Plusieurs améliorations récentes (meilleure description de la microphysique des nuages, chimie ions - H₂O) permettent de mieux reproduire les observations vers Ls = 270.

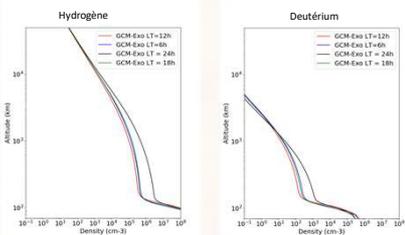


Le cycle de HDO a été ajouté récemment, ainsi que la photochimie de HDO pour décrire le deutérium atomique et ses variations dans la haute atmosphère de Mars.

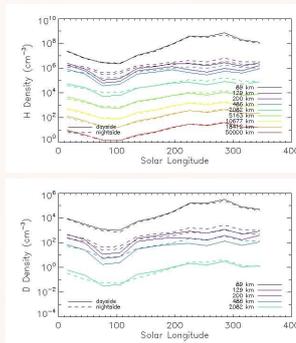


4) Résultats préliminaires

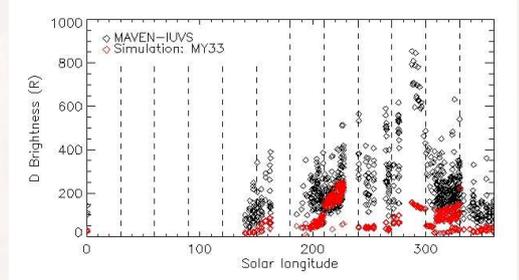
Le GCM permet de décrire la densité de H et D jusqu'à l'exobase (~ 200 km). Un modèle cinétique (Vidal-Madjar et Bertaux 1972) est utilisé pour prolonger les densités des deux espèces au-dessus de l'exobase. Les profils de densités simulés à l'équateur à différentes heures locales pour Ls = [270-300°] sont représentés ci-dessous.



Variations simulées de la densité de H et D à différentes altitudes en fonction du temps pendant une année martienne.



Pour chaque observation faite par MAVEN, nous avons simulé l'intensité de du deutérium obtenu en intégrant la densité colonne le long de la ligne de visée. Les premières comparaisons montrent une sous estimation importante de l'abondance de deutérium par le modèle.



5) Conclusion et travaux futurs

La densité atomique du deutérium est sous-estimée par le modèle actuel. Les réactions chimiques entre les ions et les molécules de deutérium (par exemple la réaction HD + CO₂⁺ → HCO₂⁺ + D) sont probablement une source importante et sont en cours d'inclusion.

Par ailleurs, l'échappement thermique de D n'est peut être pas le processus de perte principal et l'échappement non-thermique (photochimique) ou l'échappement sous forme d'ions résultants de l'interaction avec le vent solaire font l'objet de deux stages actuels, utilisant les modèles développés au LATMOS (EGM et LatHys), pour mieux quantifier leur importance dans le fractionnement isotopique de l'hydrogène sur Mars.

Simulation de la densité de H+ du vent solaire autour de Mars (LatHys)

Ces protons peuvent, par échange de charge avec D dans l'exosphère de Mars produisant des ions D⁺ qui sont entraînés dans le vent solaire et pourrait être une source non négligeable d'échappement de D.

