Physicalia Mag. **6** *(1984) pp 105-16*

MESURE DE L'HYDROGENE ET DU DEUTERIUM DEPUIS SPACELAB 1

G.KOCKARTS[1], E.VAN RANSBEECK[1], J.L.BERTAUX[2],
E.DIMARELLIS[2] *et* F.GOUTAIL[2]

[1] *Institut d'Aéronomie Spatial de Belgique*
3, avenue Circulaire, B-1180 Bruxelles, Belgique

[2] *Service d'Aéronomie du CNRS*
B.P. 3, F-91370 Verrières-le-Buisson, France

1. INTRODUCTION

L'expérience 1ES017, destinée à mesurer l'hydrogène et le deutérium dans l'atmosphère terrestre, est une collaboration entre le Service d'Aéronomie du Centre National de la Recherche Scientifique de France et l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique. Elle fait partie des expériences de l'Agence Spatiale Européenne placées à bord de Spacelab 1 qui était transporté par la navette spatiale STS-9 mise sur orbite, par la National Aeronautics and Space Administration, le 28 novembre 1983. Le périgée et l'apogée de l'orbite étaient respectivement situé à 239 et 252 km d'altitude. Cette orbite quasiment circulaire était inclinée de 57,02 degrés par rapport à l'équateur terrestre et la période de révolution était de 89,39 minutes. La durée du vol fut de 10,32 jours.

Après une description de l'origine aéronomique de l'hydrogène et du deutérium dans l'atmosphère, nous exposerons le principe physique de l'observation de ces constituants minoritaires. Ensuite, nous donnerons un aperçu du fonctionnement de l'instrument en orbite ainsi que quelques résultats obtenus au cours de cette mission spatiale.

2. ORIGINE AERONOMIQUE DE L'HYDROGENE ET DU DEUTERIUM

Bien que l'hydrogène atomique H soit l'élément chimique le plus abondant de l'univers, il est pratiquement inexistant au niveau du sol sous sa forme atomique. Par contre, l'hydrogène moléculaire H_2 existe au niveau du sol. Son origine est due à l'oxydation naturelle du méthane CH_4 et à la

combustion dans les moteurs à hydrocarbure. Pour cette raison l'abondance de H_2 varie d'un site à l'autre entre 0,6 ppmv et 3 ppmv; la forte valeur correspond aux zones de traffic urbain. Rappelons qu'un rapport de mélange ou abondance volumique de 1 ppmv (1 partie par million par volume) correspond à un rapport de 10^{-6} entre la concentration (cm^{-3}) du constituant considéré et la concentration totale du milieu ambiant.

L'hydrogène moléculaire de la troposphère entre 0 et 10 km d'altitude n'est cependant pas la source principale de l'hydrogène atomique observable dans la thermosphère au-dessus de 85 km d'altitude. En effet, il y a une quantité d'eau liquide sur la Terre qui s'évapore dans la troposphère. Une fraction de cette vapeur d'eau peut atteindre la stratosphère au-dessus de 10 km et être transportée vers le haut jusqu'à la stratopause vers 50 km d'altitude. Aux altitudes supérieures, dans la mésosphère jusque 85 km et dans la thermosphère, cette vapeur d'eau est progressivement photodissociée par le rayonnement solaire ultraviolet. En fait, l'abondance de la vapeur d'eau au-dessus de la stratopause dépend surtout de la compétition entre le transport vertical et la conversion photochimique en hydrogène atomique et moléculaire. Cette conversion débute par la photodissociation de H_2O par les quanta ultraviolets $h\nu$ et s'effectue suivant des processus tels que

$$H_2O + h\nu \rightarrow H + OH \qquad (1)$$
$$OH + O \rightarrow H + O_2 \qquad (2)$$
$$\text{bilan :} \quad H_2O + O \rightarrow 2H + O_2 \qquad (3)$$

ou

$$H_2O + h\nu \rightarrow 2H + O_2 \qquad (4)$$
$$O + OH \rightarrow H + O_2 \qquad (5)$$
$$H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M \qquad (6)$$
$$H + HO_2 \rightarrow H_2 + O_2 \qquad (7)$$
$$\text{bilan :} \quad H_2O + O \rightarrow H_2 + O_2 \qquad (8)$$

Dans ces réactions l'oxygène atomique O résulte de la photodissociation de O_2 et M représente un troisième corps, par exemple N_2, nécessaire pour assurer la conservation de l'énergie dans les réactions à trois corps comme la réaction de recombinaison (6). Les réactions (1) à (8) ne représentent pas tous les processus dans lesquels intervient l'atome d'hydrogène. Si l'on veut tenir compte de l'ozone (O_3) et des espèces excitées on arrive aisément à plusieurs dizaines de réactions; cela montre la complexité des

processus aéronomiques qui dépendent non seulement de réactions chimiques avec des radicaux libres, mais aussi des phénomènes de transport (vents, turbulence et diffusion moléculaire). La figure 1 montre, à titre d'exemple, une distribution verticale calculée de l'hydrogène atomique entre 70 km et 250 km c'est-à-dire l'altitude de Spacelab 1. Au-dessus de 100 km, la distribution verticale de l'hydrogène atomique dépend essentiellement du transport par diffusion moléculaire et de l'échappement des atomes hors du champ gravifique de la Terre vers 500 km d'altitude. Au-dessous de 100 km d'altitude, la compétition entre les processus de production et de destruction de H, fait apparaître un maximum dans la distribution verticale.

Comme il existe au niveau du sol une quantité d'eau HDO dans laquelle un atome d'hydrogène H est remplacé par son isotope lourd D (deutérium), il est facile d'imaginer pour HDO une série de transformations

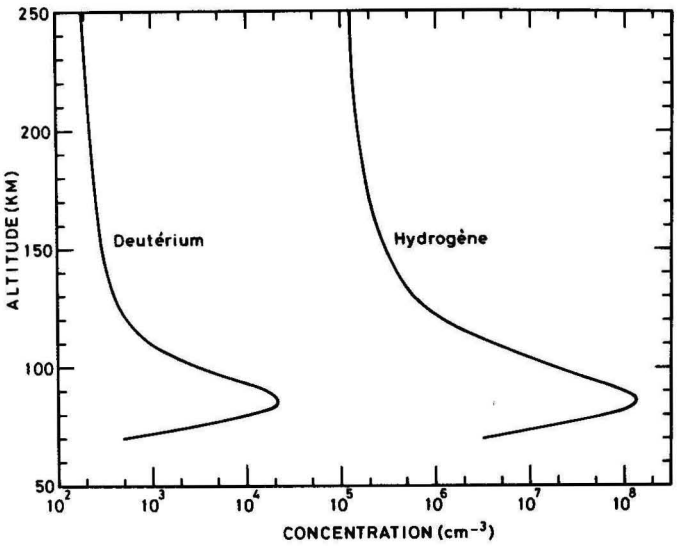

Fig. 1 : Exemple de distribution verticale de l'hydrogène et du deutérium atomiques.

analogues à celles subies par H_2O. Ainsi l'isotope deutérium, dont le noyau est composé d'un proton et d'un neutron, devrait être présent aux altitudes où H existe à l'état libre. Dans l'eau de mer, le rapport isotopique D/H est de $1,6 \times 10^{-4}$ par volume. Une distribution verticale théorique du deutérium est également montrée sur la figure 1. Tout comme l'hydrogène atomique, le deutérium peut s'échapper du champ d'attraction de la Terre. Cependant, l'échappement d'un constituant atmosphérique vers l'espace interplanétaire décroît exponentiellement avec la masse du constituant. Comme le deutérium a une masse double de celle de l'hydrogène, son flux d'échappement sera nettement plus faible. Par conséquent, on peut s'attendre à un enrichissement du deutérium par rapport à l'hydrogène. Sur l'exemple de la figure 1, le rapport D/H est $1,6 \times 10^{-4}$ entre 70 km et 90 km, et atteint une valeur de 10^{-3} à 150 km d'altitude.

L'efficacité des mécanismes de l'origine de H et de D est liée au fait que la vapeur d'eau, photodissociée par le rayonnement solaire de longueur d'onde inférieure à 200 nm (1 nm = 10^{-9} m), est surtout détruite par la radiation solaire Lyman-α à 121,6 nm qui est la raie plus intense dans le spectre solaire ultraviolet. Ce rayonnement léthal n'atteint heureusement pas le sol, car il est absorbé par l'oxygène moléculaire qui a un rapport de mélange de 0,21 jusqu'aux environs de 85 km d'altitude. Cependant, l'oxygène moléculaire a une faible section efficace d'absorption (environ 10^{-20} cm^2) à la longueur d'onde Lyman-α, alors que la section efficace d'absorption de la vapeur d'eau atteint 10^{-17} cm^2. Cela explique pourquoi la vapeur d'eau peut-être photodissociée dans la mésosphère terrestre pour autant que le rayonnement solaire Lyman-α ne soit complètement absorbé par l'oxygène moléculaire. Il s'agit là d'une de ces coïncidences dont la nature garde encore le secret.

3. PRINCIPE PHYSIQUE DE L'OBSERVATION

L'hydrogène et le deutérium diffèrent uniquement par la masse et la composition de leurs noyaux; pour l'hydrogène, le noyau est composé d'un seul proton et pour le deutérium, il comprend un proton et un neutron. Un seul électron tourne autour du noyau sur des orbites sélectives correspondant à des niveaux d'énergie.

La différence d'énergie entre le niveau 1, appelé aussi niveau fondamental, et le niveau 2 est de 10,3 électron volts. Si un atome est excité sur le niveau 2 par absorption d'énergie lumineuse, l'électron sur le niveau 2 retourne spontanément sur le niveau 1 en un temps très court, de l'ordre de 10^{-9} s. Durant cette transition, l'atome émet l'énergie absorbé sous la forme d'un photon dont la longueur d'onde est de 121,566 nm pour H et 121,533 nm pour D. Cependant, le photon émergeant n'a pas la même direction que le photon excitateur incident (voir figure 2). Ce mécanisme est appelé résonance optique.

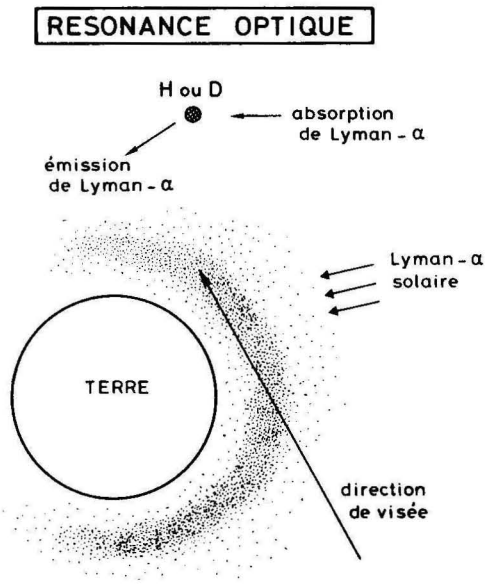

Fig. 2 : Principe de la résonance optique.

Le Soleil est une énorme source de radiation Lyman-α à 121,6 nm dont l'intensité au voisinage de l'orbite terrestre est de $(3 \pm 1) \times 10^{11}$ photons cm^{-2} s^{-1}, suivant le degré de l'activité solaire. Cette raie est

suffisamment large pour englober les longueurs d'onde de résonance de l'hydrogène et du deutérium. Ainsi, chaque atome d'hydrogène ou de deutérium dans le système solaire sera exposé au rayonnement solaire Lyman-α et sera soumis au phénomène de résonance optique pour autant que le rayonnement incident ne soit pas absorbé par d'autres constituants atmosphériques, comme l'oxygène moléculaire par exemple. Les atomes d'hydrogène deviennent ainsi une source secondaire de radiation Lyman-α qui est même observable du côté nuit de la terre par suite de résonances optiques successives. Des photographies prises depuis la Lune au cours de la mission Apollo-16 montrent sans ambiguité que la Terre est entourée d'un nuage d'atomes d'hydrogène appelé géocouronne.

En observant l'intensité lumineuse le long d'une ligne de visée, comme il est indiqué à la figure 2, on obtient une information sur le nombre d'atomes émetteurs intégrés le long de la ligne de visée.

4. FONCTIONNEMENT DE L'INSTRUMENT

Bien que les raies de résonance Lyman-α de H et de D ne soient distantes que de 0,033 nm, elles sont cependant bien séparées, car leur largeur thermique est seulement de l'ordre de 0,002 nm. Pour des questions de volume et de masse, il était exclu de construire un spectromètre classique ayant un pouvoir résolvant suffisant pour distinguer les raies à 121,566 nm et 121,533 nm. Dès lors un spectrophotomètre équipé de deux cellules à absorption a été construit afin d'éliminer sélectivement une ou les deux émissions naturelles de H et D. La figure 3 montre une photographie de l'instrument dont la masse est de 12,5 kg. La longueur est de 685 mm, la largeur 300 mm et la hauteur 320 mm, tandis que la consommation électrique moyenne est de 40 watt.

Avant de décrire le fonctionnement du spectrophotomètre dont le schéma optique est donné à la figure 4, il est nécessaire de spécifier le principe de fonctionnement des cellules à absorption. Elles sont construites en pyrex avec deux fenêtres en fluorure de magnésium ($Mg\ F_2$) qui est transparent pour le rayonnement Lyman-α. La cellule à hydrogène contient de l'hydrogène moléculaire H_2, et la cellule à deutérium contient du deutérium moléculaire D_2. Contrairement aux atomes H et D, les molécules

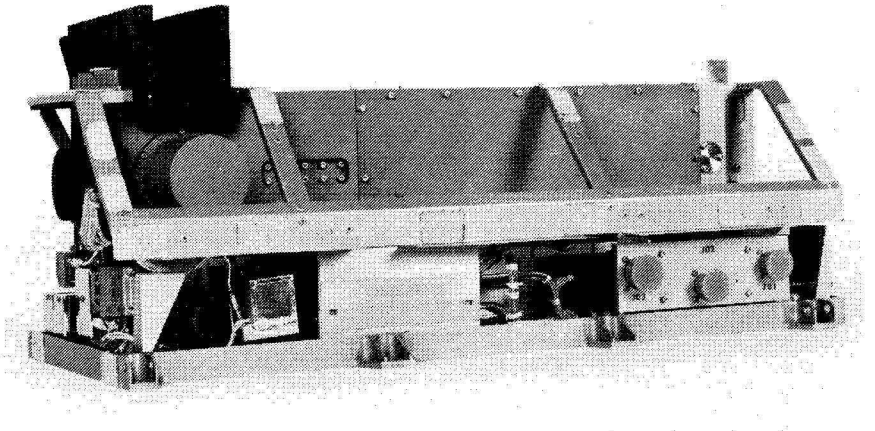

Fig. 3 : Le spectrophotomètre Lyman-α.

H_2 et D_2 sont insensibles au rayonnement Lyman-α. Mais, lorsqu'un courant électrique circule dans les filaments de tungstène, une fraction de H_2 ou D_2 plus ou moins importante selon l'intensité du courant est dissociée. Une cellule sous tension contient ainsi une quantité d'hydrogène ou de deutérium atomiques qui peut absorber le rayonnement Lyman-α. Par calibration au laboratoire avant le vol, on peut ainsi déterminer l'efficacité de l'absorption de chaque cellule en fonction de l'intensité du courant dans les filaments. Lorsque le courant est coupé les atomes se recombinent spontanément pour former des molécules H_2 ou D_2 transparentes à Lyman-α. Ainsi, au cours du vol orbital, les cellules à absorption servent en quelque sorte de rhéostats capables de laisser passer plus ou moins de radiation Lyman-α en fonction de l'intensité du courant qui est programmable depuis le Spacelab ou même depuis le sol.

Il est maintenant aisé de comprendre le schéma de l'instrument sur la figure 4. Lorsque la navette spatiale est dans une certaine attitude, toute la lumière émise par l'atmosphère est récoltée par un petit miroir parabolique capable de tourner autour d'un axe afin d'obtenir un balayage de plusieurs zones de l'atmosphère. La lumière passe ensuite à travers la cellule à hydrogène qui n'a aucun effet si elle n'est pas activée. Elle entre dans le spectromètre proprement dit constitué d'un réseau concave et d'un diaphragme de sortie qui définit un champ de vue de 2,5° et une bande passante de 4,5 nm. On élimine ainsi le rayonnement qui n'est pas à la longueur d'onde Lyman-α et en particulier une émission de l'oxygène atomique de l'atmosphère à 130,4 nm. Finalement, le rayonnement Lyman-α est focalisé sur un photomultiplicateur en passant au travers de la cellule à deutérium. Les photons sont comptés à l'aide de deux compteurs, dont l'un correspond par exemple au cas où la cellule à deutérium n'est pas active et dont l'autre est utilisé lorsque la cellule à deutérium est active.

L'utilisation programmable des cellules à absorption et les diverses possibilités d'orientation de la navette offrent ainsi des conditions d'observation capables de couvrir des objectifs scientifiques très différents.

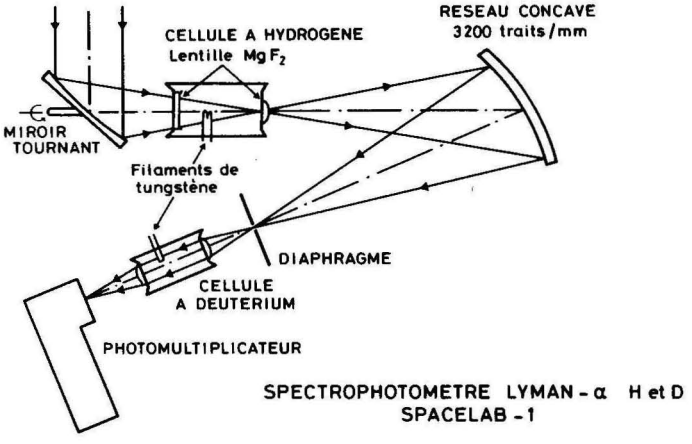

Fig. 4 : Schéma simplifié de l'expérience 1ES017.

5. QUELQUES RESULTATS

L'observation de la radiation Lyman-α de l'hydrogène atomique a été effectuée à plusieurs reprises par fusées et par satellites. Le Service d'Aéronomie du CNRS a d'ailleurs acquis une réputation mondiale dans l'utilisation de cette technique. Au cours du vol Spacelab 1, l'émission de l'hydrogène atomique fut évidemment observée. Les résultats obtenus devraient permettre de déterminer un profil vertical de l'hydrogène atomique entre 90 km et 250 km d'altitude. D'autre part, lorsque l'instrument balayait l'espace interplanétaire, l'émission Lyman-α fut également observée et son analyse conduira à une amélioration de la connaissance de ce milieu. Finalement, en pointant l'instrument vers les régions aurorales de l'atmosphère, nous avons observé d'énormes accroissements de l'émission Lyman-α, même du côté éclairé de la planète. Ces accroissements doivent correspondre à des aurores de jour provoquées par des précipitations de protons le long des lignes de force du champ géomagnétique terrestre. Par échange de charge électrique avec l'hydrogène atmosphérique, ces protons donnent naissance à des atomes excités capables d'émettre du rayonnement Lyman-α.

La collaboration entre l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique et le Service d'Aéronomie du CNRS de France était surtout basée sur la possibilité de détecter le deutérium qui n'avait jamais été observé sous sa forme d'élément atomique simple. Les premiers résultats sont montrés sur la figure 5.

Lorsque la navette vole sur le dos avec la palette des instruments dirigées vers la Terre, il est possible de faire effectuer au miroir tournant (voir figure 4) un balayage suivant un angle α indiqué sur la figure 5. Ce balayage entre le nadir et l'horizon local est en fait un balayage en altitude. Au cours de ce balayage la cellule d'hydrogène est activée afin d'absorber l'émission atmosphérique de l'hydrogène atomique. Etant donné la largeur de cette émission une faible fraction peut encore atteindre la cellule à deutérium. En allumant et en éteignant successivement la cellule à deutérium, la différence du nombre de coups enregistrés par les compteurs du photomultiplicateur indique la quantité de

rayonnement Lyman-α du deutérium qui est absorbée par la cellule à deutérium. Cette différence de nombre de coups est portée en ordonnée sur la figure 5 en fonction de l'angle α d'observation. Ces résultats sont obtenus à partir d'une moyenne de 74 balayages verticaux. Si le deutérium n'était pas détectable, la différence de nombre de coups serait réparties aléatoirement autour de zéro. La figure 5 indique très clairement que ce n'est pas le cas. Pour la première fois le deutérium a été détecté à l'état atomique dans l'atmosphère terrestre. Le maximum de l'émission Lyman-α du deutérium est observé pour α = 78°, ce qui correspond à une altitude de l'ordre de 110 km. L'ordonnée de droite de la figure 5 est donnée en Rayleigh. Il s'agit d'une unité photométrique qui correspond à une intensité de 10^6 photons cm^{-2} s^{-1} par colonne. La conversion du nombre de coups en Rayleigh se fait lors de la calibration de l'instrument au sol.

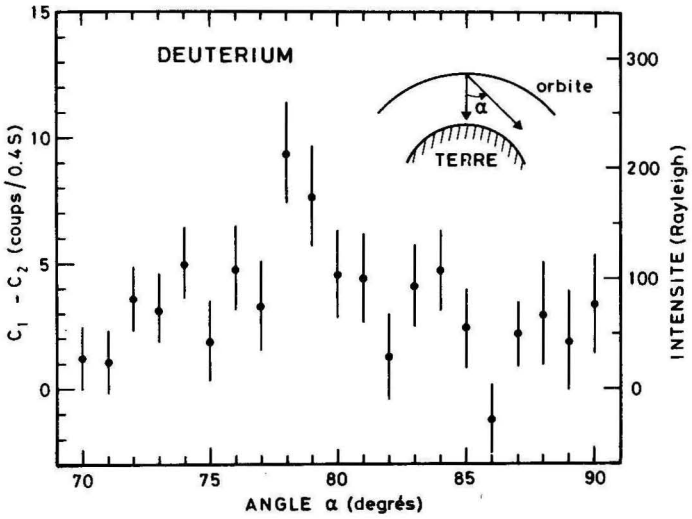

Fig. 5 : Emission Lyman-α atmosphérique du deutérium absorbée par la cellule à deutérium.

Pour faire comprendre la difficulté de cette mesure de l'intensité Lyman-α du deutérium de quelque 300 Rayleigh, il est utile de faire remarquer que l'émission atmosphérique de l'hydrogène atomique au cours du vol Spacelab 1 était de l'ordre de 20000 Rayleigh.

6. CONCLUSION

Au cours du vol STS-9, nous avons pu enregistrer sur place à Houston environ 50% de l'ensemble de nos observations effectuées durant les 10 jours de mission. La possibilité d'interaction pratiquement directe avec la navette fut un facteur essentiel de la réussite de l'expérience. En effet, des actions ont pu être entreprises en fonction des données brutes recueillies; le délai d'une modification du programme d'observation était inférieur à 12 heures.

Les résultats relatifs à l'hydrogène atomiques sont en cours de dépouillement qui ne pourra être achevé que lorsque les bandes magnétiques finales du vol seront disponibles vers le milieu de 1984. La faisabilité et le bon fonctionnement de notre programme de détection du deutérium offrent des perspectives intéressantes. En effet, la connaissance du rapport D/H est un élément essentiel pour comprendre l'évolution des atmosphères planétaires. Pour les planètes internes (Vénus, Terre, Mars) ce rapport est directement lié à l'évolution de la quantité d'eau depuis la formation du système solaire.

La technique de détection du deutérium développée pour la mission de démonstration Spacelab 1 est maintenant applicable à d'autres missions.

7. REMERCIEMENTS

Le financement de la réalisation de l'expérience 1ES017 a été assuré par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) en France et par l'Administration de la Recherche Scientifique du Ministère de l'Education Nationale en Belgique. La compétence des techniciens de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique et du Service d'Aéronomie du CNRS de France fut un élément essentiel pour la réussite de cette expérience. Lors de l'intégration de l'expérience et au cours du vol, le support technique de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) et de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) fut hautement apprécié.