

De l'eau dans l'Univers

par Pierre ENCRENAZ

Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie - Paris

Chercheur à l'Observatoire de Paris

La molécule d'eau, malgré sa symétrie, a un spectre complexe. Les deux espèces - ortho et para - sont différentes et ne peuvent en principe pas se transformer simplement l'une dans l'autre. Tout le domaine visible, infrarouge, micro-ondes comprend des transitions, mais un grand nombre d'entre elles ne sont accessibles, du fait des raies telluriques de la même molécule H_2O , que par des moyens suborbitaux (avions stratosphériques, ballons, satellites - figure 1). C'est ainsi que le satellite ISO vient de démontrer de façon éclatante l'existence d'eau gazeuse dans un grand nombre d'objets célestes. Plusieurs satellites utilisant des techniques hétérodynes micro-ondes seront lancés (ODIN, 1998), (SWAS, 1998), FIRST (2006) pour observer directement notre Galaxie dans ces transitions submillimétriques. En effet ces transitions permettent par désexcitation radiative (après excitation collisionnelle) de refroidir très efficacement les nuages interstellaires qui donneront naissance aux premières étoiles.

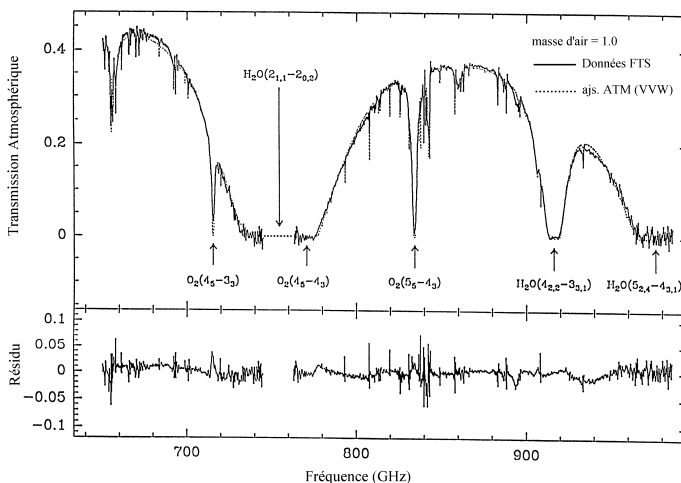


Figure 1 : La transmission atmosphérique dans le domaine submillimétrique depuis un site de très haute montagne. Une grande partie du domaine fréquentiel est inaccessible depuis le sol. La molécule H_2O ayant un très fort moment dipolaire voit ses transitions très élargies par collision avec O_2 ou N_2 (de l'ordre de 20 MHz par millibar).

Table 1. Chemical reactions
A. Molecule formation on grains and cosmic ray ionization

Reaction	Rate (s ⁻¹)	References
H + H + dust → H ₂ ⁰ P + dust ^a	10 ⁻¹¹ mH)	Hollenbach et al. (1971)
O + H + dust → OH + dust ^b	10 ⁻¹¹ mH)	Watson and Salpeter (1972b)
H + CR → H ⁺ + e ⁻ + CR	$\frac{H}{CR} = 6 \cdot 10^{-18} s^{-1}$	Note c
H ₂ ⁰ P + CR → H ₂ ⁺ + e ⁻ + CR	$\frac{H_2^+}{CR} = \frac{1}{3} \frac{H}{CR}$	
He + CR → He ⁺ + e ⁻ + CR	$\frac{He^+}{CR} = \frac{H_2}{CR}$	

B. Photoionization and photodissociation

Reaction	Comments	References
X + hν → X ⁺ + e ⁻	See note d	
O ₂ + hν → O ₂ ⁺ + e ⁻	Ion. pot = 12.08 eV (1026 Å), σ _{ion} = 4 · 10 ⁻¹⁸ cm ²	Matsunaga and Watanabe (1967)
O ₂ + hν → O + O	Photodissociation continuum in the range 1250–1750 Å	Hudson (1971)
H ₂ ⁰ P + hν → H + H	Stecher-Williams mechanism	Stecher and Williams (1967)
OH + hν → O + H	Photodissociation due to transitions X ² Π → ² Σ ⁺ continuum, 1770 Å, f = 8 · 10 ⁻⁴ X ² Π → B ² Σ ⁺ continuum, 1080 Å, f = 8 · 10 ⁻⁴ X ² Π → C ² Σ ⁺ f = 0.15 (912 Å–1000 Å)	Solomon (1968)
CO + hν → C + O	Continuum 912–960 Å (σ = 10 ⁻¹⁷ cm ²) line X ¹ Σ ⁺ (v = 0) → C ¹ Σ ⁺ (v = 1), 1063 Å, f = 2.7 · 10 ⁻³ line X ¹ Σ ⁺ (v = 0) → E ¹ π (v = 1), 1053 Å, f = 1.4 · 10 ⁻³	Smith and Stella (1975) Solomon and Klemperer (1972)
H ₂ O + hν → OH + H	Photodissociation continuum in the range 912–1800 Å	Hudson (1971)

C. Neutral-neutral, ion-molecule and charge transfer reactions

Reaction	Rate constant ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)	References
$\text{C} + \text{OH} \longrightarrow \text{CO} + \text{H}$	$4 \cdot 10^{-11}$	Herbst and Klemperer (1973)
$\text{O} + \text{OH} \longrightarrow \text{O}_2 + \text{H}$	$5 \cdot 10^{-11}$	Herbst and Klemperer (1973)
$\text{H}_2^+ + \text{H} \longrightarrow \text{H}_2^+ + \text{H}$	10^{-10}	Dalgarno et al. (1973)
$\text{H}_2^+ + \text{He} \longrightarrow \text{H}^+ + \text{H} + \text{He}$	10^{-13}	Herbst and Klemperer (1973)
$\text{H}_2^+ + \text{H}_2 \longrightarrow \text{H}_2^+ + \text{H}$	$2 \cdot 10^{-9}$	Herbst and Klemperer (1973)
$\text{H} + \text{H}_2 \longrightarrow \text{H}^+ + \text{H}_2^+$	$5.8 \cdot 10^{-10}$	De Jong (1972)
$\text{H}_2 + \text{O} \longrightarrow \text{OH}^+ + \text{H}_2^+$	$2 \cdot 10^{-9}$	Herbst and Klemperer (1973)
$\text{OH}^+ + \text{H}_2^+ \longrightarrow \text{OH}_2^+ + \text{H}$	$1.5 \cdot 10^{-9}$	Herbst and Klemperer (1973)
$\text{OH}_2^+ + \text{H}_2^+ \longrightarrow \text{OH}_2^+ + \text{H}$	$1.4 \cdot 10^{-9}$	Herbst and Klemperer (1973)
$\text{OH}_2^+ + \text{C} \longrightarrow \text{HCO}^+ + \text{H}_2^+$	$2 \cdot 10^{-9}$	Herbst and Klemperer (1973)
$\text{OH} + \text{H} \longrightarrow \text{OH}^+ + \text{H}$	10^{-9}	Herbst and Klemperer (1973)
$\text{OH} + \text{H}_2 \longrightarrow \text{OH}_2^+ + \text{H}_2^+$	$2 \cdot 10^{-9}$	Herbst and Klemperer (1973)
$\text{OH} + \text{HCO} \longrightarrow \text{HCO}_2^+ + \text{H}$	10^{-9}	Herbst and Klemperer (1973)
$\text{OH} + \text{C} \longrightarrow \text{CO} + \text{H}^+$	$2 \cdot 10^{-9}$	Herbst and Klemperer (1973)
$\text{CO} + \text{He} \longrightarrow \text{C}^+ + \text{O} + \text{He}$	$2 \cdot 10^{-9}$	Herbst and Klemperer (1973)
$\text{CO} + \text{H}_2 \longrightarrow \text{HCO}^+ + \text{H}_2^+$	$1.4 \cdot 10^{-9}$	Herbst and Klemperer (1973)
$\text{CO}^+ + \text{H} \longrightarrow \text{CO} + \text{H}^+$	10^{-9}	Solomon and Klemperer (1972)
$\text{CO}^+ + \text{H}_2^+ \longrightarrow \text{HCO}^+ + \text{H}$	$2 \cdot 10^{-9}$	Herbst and Klemperer (1973)
$\text{O}_2 + \text{H} \longrightarrow \text{O}_2^+ + \text{H}$	10^{-9}	Herbst and Klemperer (1973)
$\text{O}_2 + \text{He} \xrightarrow{38\%} \text{O}_2^+ + \text{He}$	10^{-9}	Herbst and Klemperer (1973)
$\xrightarrow{62\%} \text{O}^+ + \text{O} + \text{He}$		
$\text{O}_2 + \text{C} \longrightarrow \text{CO}^+ + \text{O}$	$1.1 \cdot 10^{-9}$	Herbst and Klemperer (1973)
$\text{O}_2 + \text{S} \longrightarrow \text{SO}^+ + \text{O}$	$2 \cdot 10^{-11}$	Oppenheimer and Dalgarno (1974a)
$\text{O}_2^+ + \text{X} \longrightarrow \text{X}^+ + \text{O}_2$	10^{-10}	Oppenheimer and Dalgarno (1974)
$\text{HCO}^+ + \text{Mg} \longrightarrow \text{Mg}^+ + \text{CO} + \text{H}$	10^{-10}	Oppenheimer and Dalgarno (1974a)
$\text{HCO}^+ + \text{Si} \longrightarrow \text{Si}^+ + \text{CO} + \text{H}$	10^{-10}	Oppenheimer and Dalgarno (1974a)
$\text{HCO}^+ + \text{Fe} \longrightarrow \text{Fe}^+ + \text{CO} + \text{H}$	10^{-10}	Oppenheimer and Dalgarno (1974a)
$\text{H}_2\text{O} + \text{H} \longrightarrow \text{OH}_2^+ + \text{H}$	10^{-9}	Herbst and Klemperer (1973)
$\text{H}_2\text{O} + \text{C} \longrightarrow \text{HCO}^+ + \text{H}$	$2 \cdot 10^{-9}$	Herbst and Klemperer (1973)
$\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2 \longrightarrow \text{OH}_2^+ + \text{H}_2^+$	$3 \cdot 10^{-9}$	Herbst and Klemperer (1973)
$\text{H}_2\text{O} + \text{HCO} \longrightarrow \text{CO} + \text{OH}_2^+$	$5 \cdot 10^{-10}$	Herbst and Klemperer (1973)

Figure 2 : Schéma réactionnel de la formation de l'eau dans le milieu interstellaire.

Mais il existe deux autres méthodes indirectes pour détecter la vapeur d'eau dans des objets célestes. La première consiste à observer des substitués isotopiques de l'eau : H_2O_{18} , H_2O_{17} , HDO. Un certain nombre de transitions de ces substitués isotopiques ont des fréquences observables depuis le sol. La difficulté associée à ces observations tient à ce que le rapport isotopique des éléments constituant $\left(\frac{[\text{D}]}{[\text{H}]}, \frac{[\text{O}^{16}]}{[\text{O}^{18}]} \right)$ ne se retrouve pas directement dans le rapport des abondances $\frac{[\text{HDO}]}{[\text{H}_2\text{O}]}$ ou $\frac{[\text{H}_2\text{O}_{18}]}{[\text{H}_2\text{O}_{16}]}$.

En effet des réactions d'échange isotopiques qui se produisent à basse température peuvent favoriser l'espèce deutérée, et provoquer ainsi un enrichissement d'un facteur 100 à 1000 par rapport à l'abondance originelle (figure 2).

La seconde méthode consiste à observer des objets dont le déplacement vers le rouge dû à l'expansion de l'Univers (par effet Doppler les photons émis à une fréquence ν_0 nous parviennent avec une fréquence $\nu_0 \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}}$ pour un objet se déplaçant à la vitesse v par rapport au référentiel de l'observateur. De telles observations ont été effectuées avec le radiotélescope de 30 m de l'IRAM (figure 3) et ont permis de détecter de la vapeur d'eau dans un objet qui n'avait alors que 10 % de l'âge de l'Univers (Casoli et al, 1996). Une autre preuve de l'existence quasi-universelle de l'eau est l'émission de très grande quantité de vapeur d'eau par les comètes lorsqu'elles s'approchent du soleil. La glace se sublime et des taux de production de 10^{29} molécules s^{-1} ont été observés, correspondant à plusieurs dizaines de tonnes d'eau/ s^{-1} qui sont émises dans les comas de la Comète (figure 4).

Une sonde envoyée par l'Agence Spatiale Européenne en 2003 ira orbiter autour de la comète Wirtanen (2007-2011) pour observer le dégazage de l'eau, de ses substitués isotopiques et de l'alcool méthylique. Plusieurs laboratoires français préparent activement les instruments devant permettre ces observations.

L'eau apparaît comme une molécule présente dans pratiquement toutes les classes d'objet célestes : comète, planètes (Mars, Uranus, Neptune, Jupiter), soleil (la température élevée de dissociation lui permet de survivre dans l'atmosphère solaire), nuages interstellaires, enveloppes circumstellaires et région d'hydrogène ionisé de notre Galaxie, galaxies très éloignées. Il semble toutefois que la Terre reste le seul objet dans lequel les trois phases liquide, solide et vapeur coexistent.

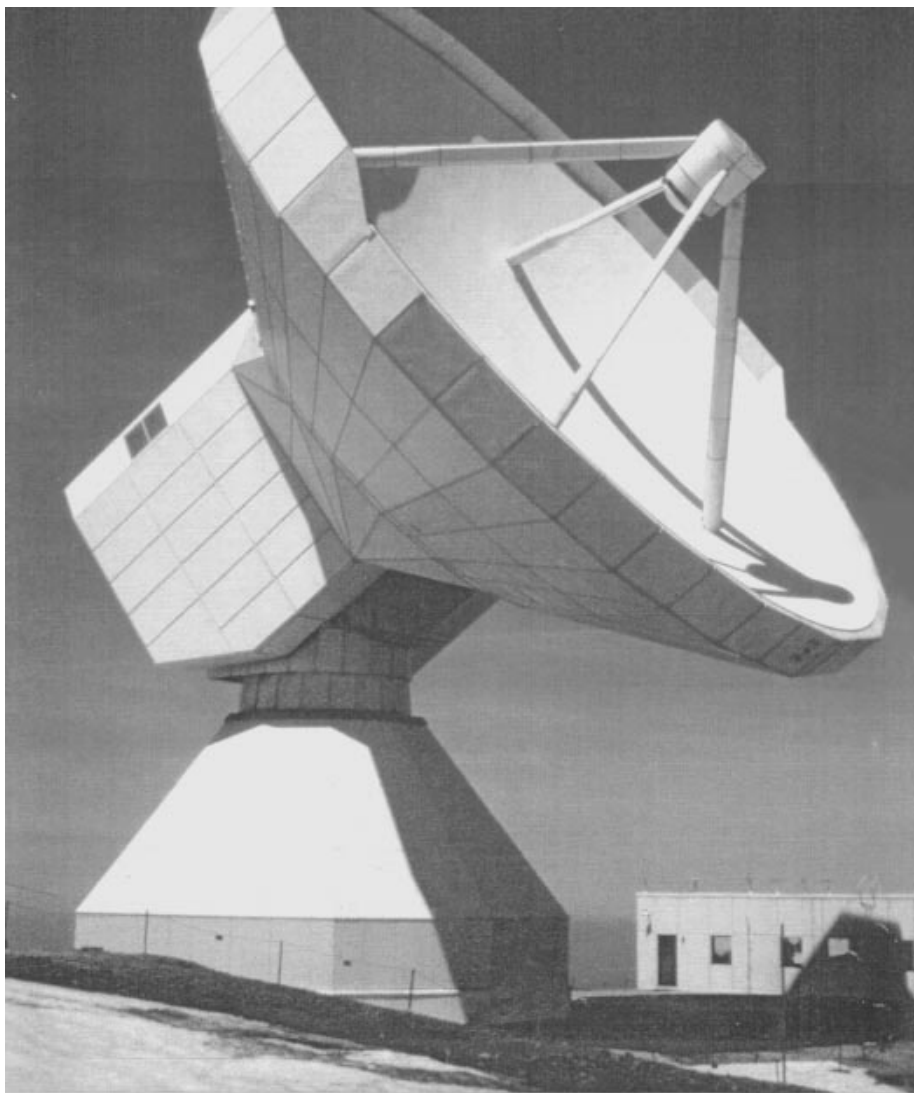


Figure 3 : Le radiotélescope de 30 mètres de diamètre de l'Institut de RadioAstronomie Millimétrique (IRAM). Installé à 2850 mètres d'altitude dans la Sierra Nevada, il permet des observations dans la bande de fréquence 70-350 Gigahertz.

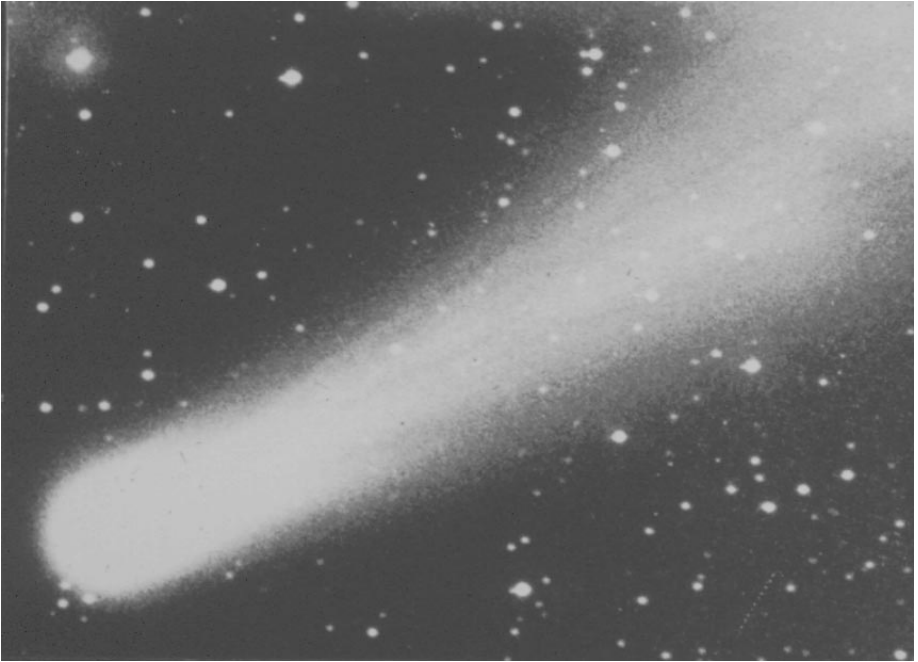


Figure 4 : L'émission de vapeur d'eau par la comète Hale-Bopp a été mesurée par l'espèce isotopique HDO.