

L'eau dans le Système Solaire



Thérèse Encrenaz

LESIA, Observatoire de Paris

Colloque de la Société Royale des Sciences de Liège

3 décembre 2010

L'eau... pourquoi?

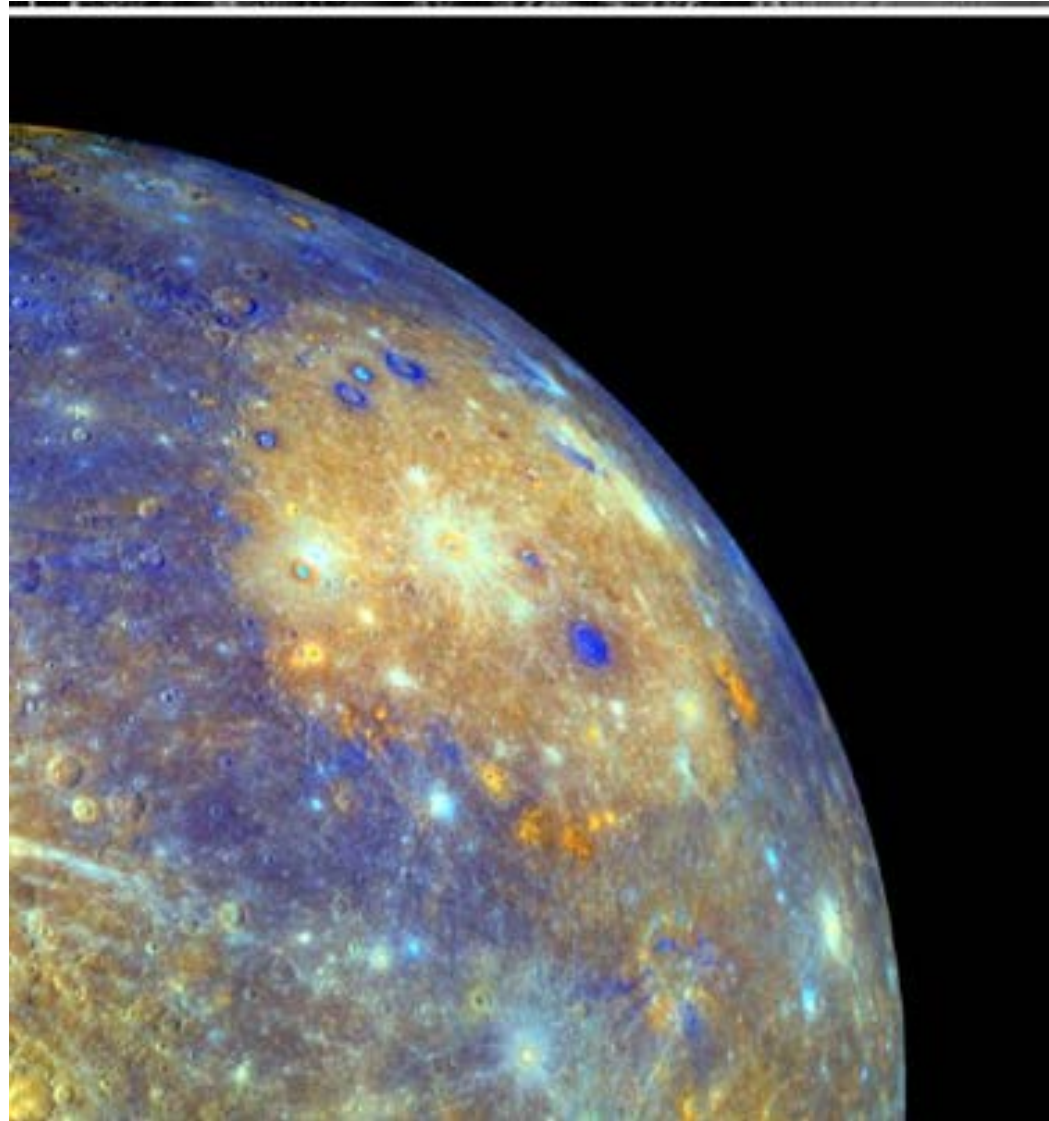
- Une molécule qui nous est familière...
- Une molécule indispensable à la vie sur Terre
- Une molécule omniprésente dans l'Univers
- Un rôle essentiel dans la formation des planètes du système solaire
- Un rôle essentiel dans l'évolution des planètes telluriques
- L'eau liquide: un traceur possible de la présence de vie sur les exoplanètes

La quête de l'eau cosmique: une recherche d'actualité!

- De l'eau sur Mercure
- De l'eau sur la Lune
- De l'eau dans les satellites extérieurs
- De l'eau sous la surface de Mars
- De l'eau dans les exoplanètes...

2008: La sonde Messenger trouve des traces d'eau dans l'exosphère de Mercure

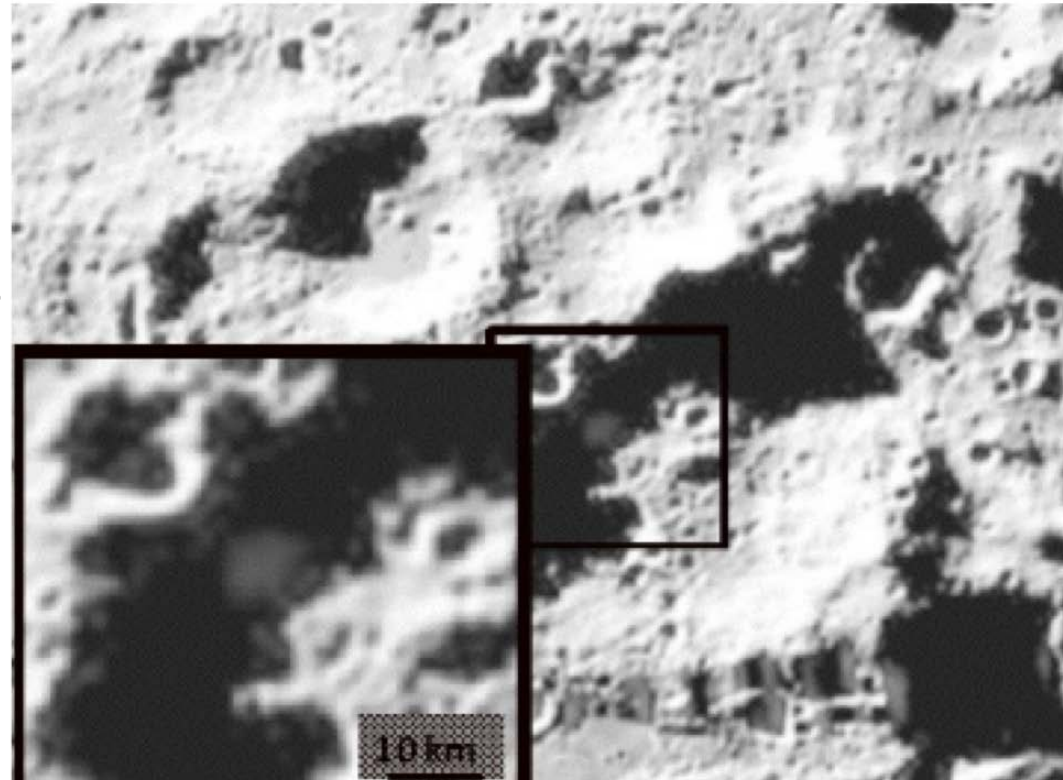
Origine: interaction des atomes d'hydrogène du vent solaire avec les atomes d'oxygène de la surface



2009: de l'eau sur la Lune! ... mais des traces seulement...

-A la surface: par impact du vent solaire
(Chandrayaan, Expoxi, Cassini)

-En sub-surface:
mise en évidence lors
de l'impact L-CROSS
(9 octobre 2009)



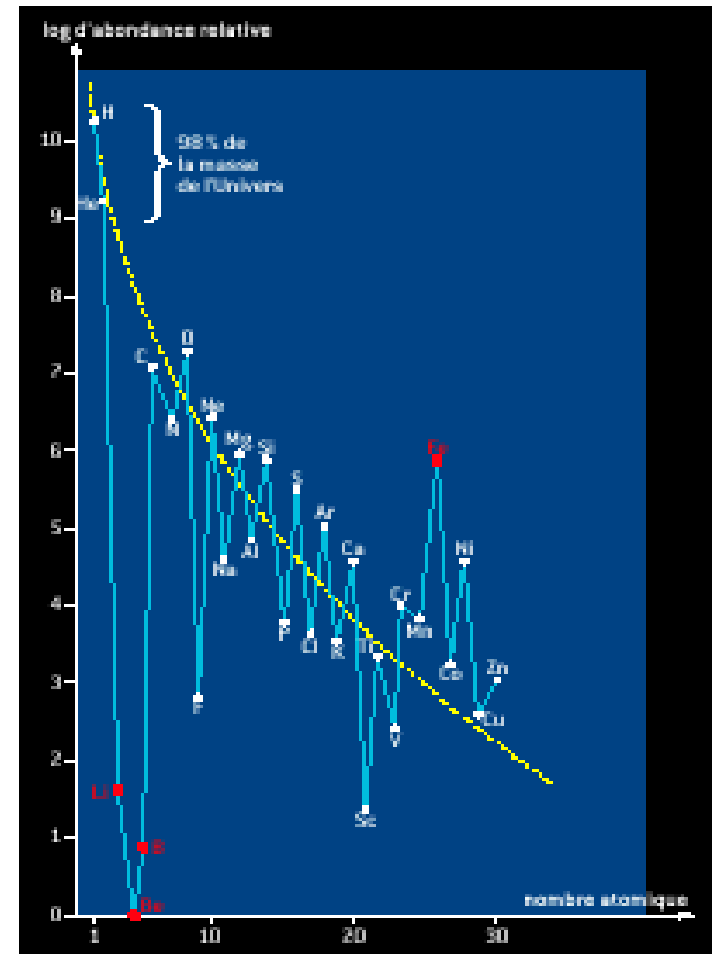
H₂O : Une molécule toute simple

- Présente sur la Terre sous ses trois formes: solide, liquide, vapeur
- Liquide sur un large intervalle de températures
- Excellent solvant, favorise les réactions chimiques
- -> Rôle essentiel dans le développement de la vie



Une molécule très abondante dans l'Univers

- Les éléments les plus abondants: H, He
- Viennent ensuite: O, C, N (synthétisés dans les étoiles), puis les éléments plus lourds
- Formation de H_2O à partir de H et O: possible dans le milieu interstellaire (à basse température)



L'eau: liquide sur la Terre, mais solide ou vapeur dans les astres

Milieu interstellaire (froid):

H₂O solide (surtout amorphe)
ou vapeur en milieu très dilué

Environnements stellaires

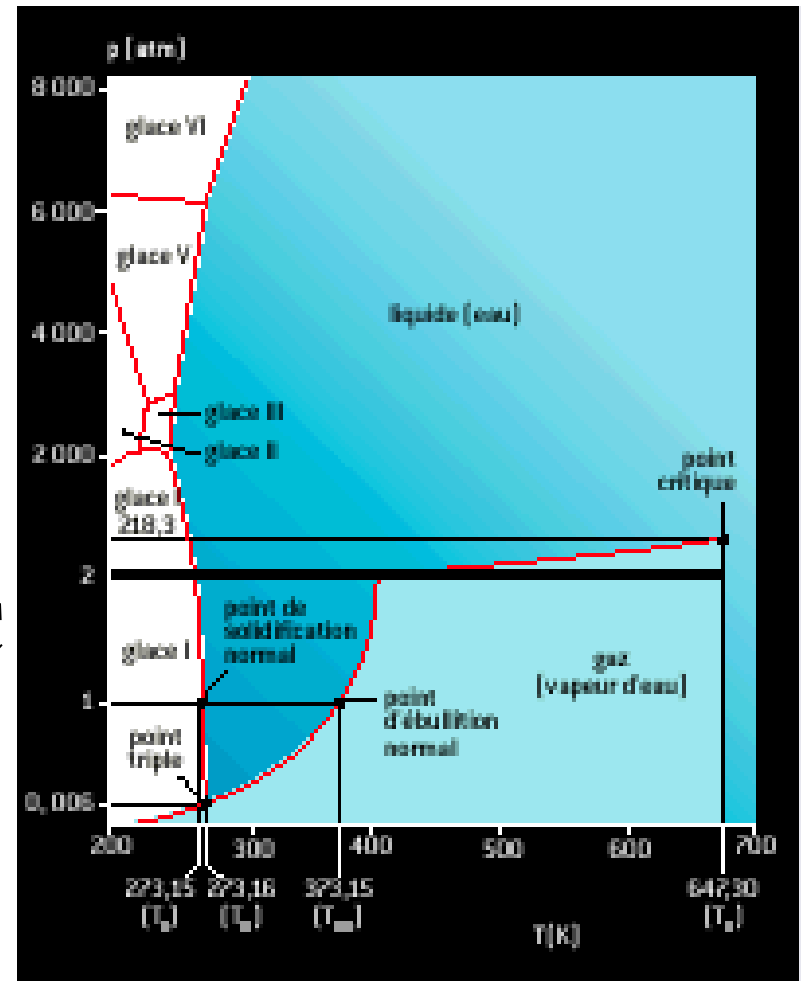
(T élevé, faible pression):

H₂O vapeur

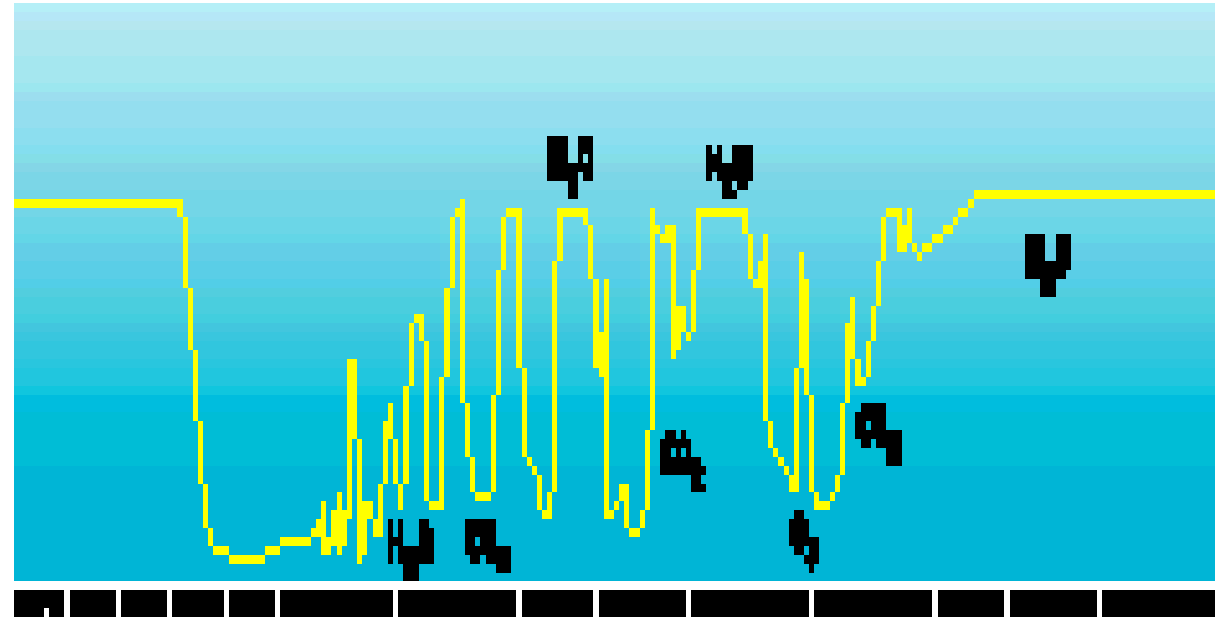
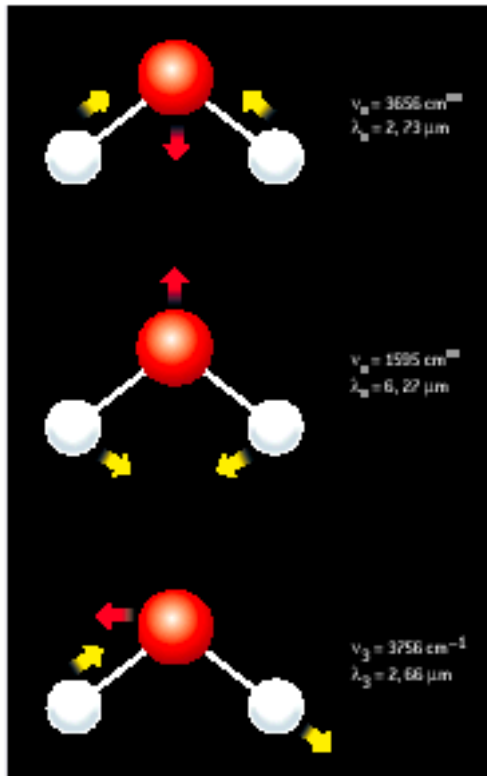
Où trouver l'eau liquide?

-A faible pression: $T = 0-100^\circ \text{C}$
(atmosphères des planètes telluriques)

-A forte pression et $T > 100^\circ \text{C}$
(intérieur des satellites)



Comment observer la molécule d'eau dans les astres?



λ (μm) 0.5 1.0 5.0 10.0 40.0

Modes de vibration et rotation dans l'infrarouge
-> observation hors de l'atmosphère terrestre

La découverte de l'eau extraterrestre avec le satellite ISO

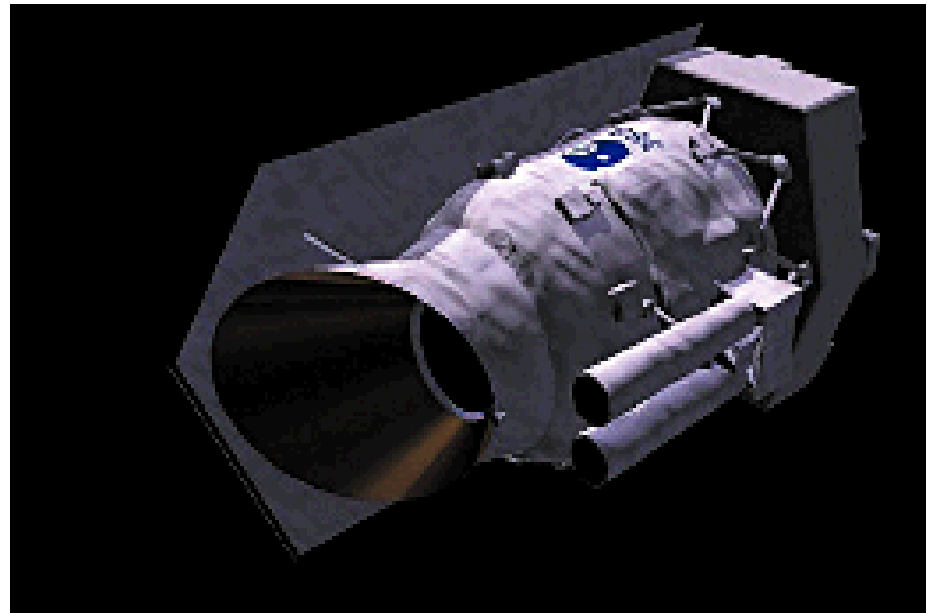
- Satellite européen en orbite terrestre de 1995 à 1998

- Une multitude de découvertes:

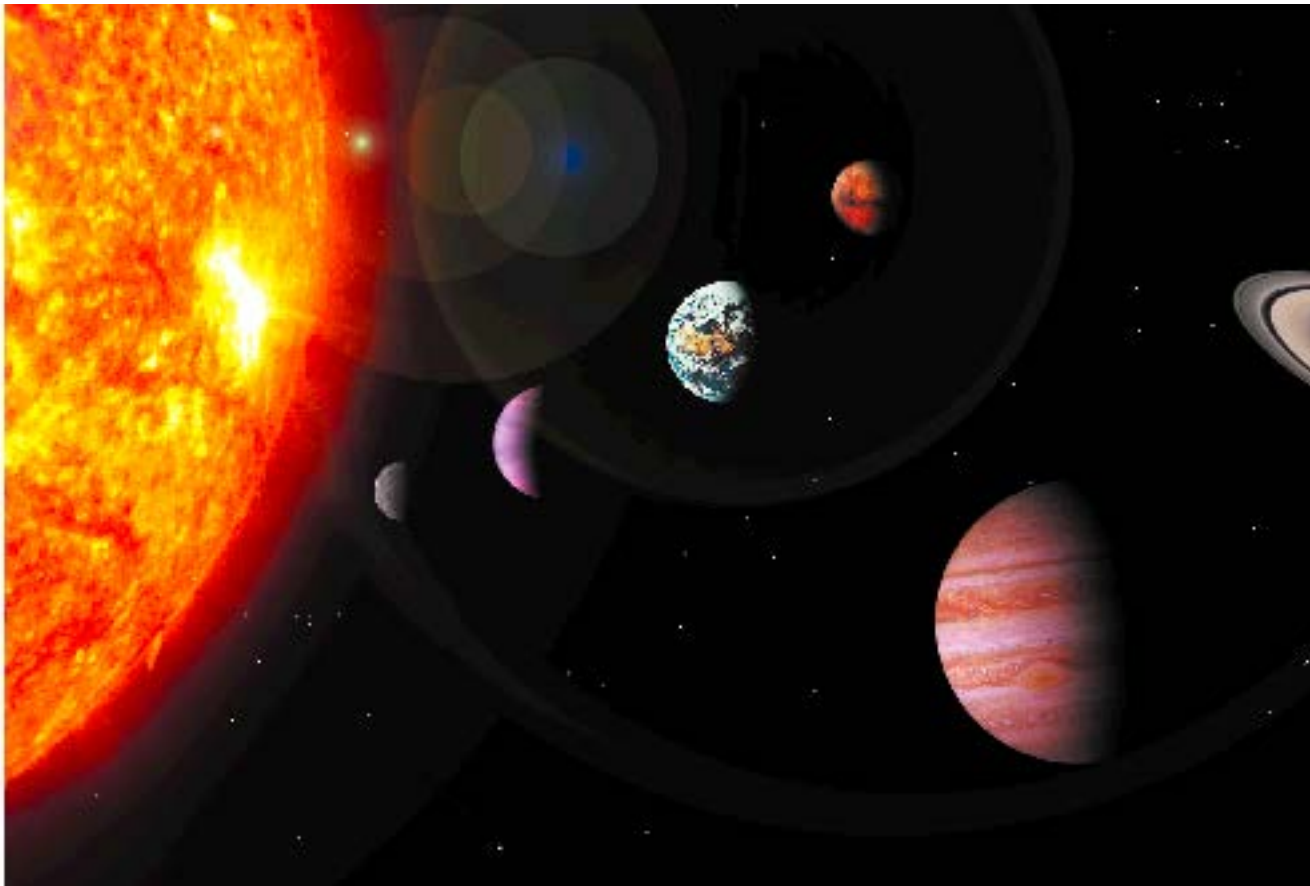
l'eau est présente

partout dans l'Univers, du système solaire aux galaxies lointaines

- Les successeurs d'ISO: Spitzer, Herschel (2009)



Le rôle de l'eau dans la naissance et l'évolution des planètes



Les observations fondamentales

- Des orbites quasi-coplanaires, circulaires et concentriques
- Des planètes qui tournent dans le sens direct, celui de la rotation du Soleil
- Les observations suggèrent fortement la formation des planètes au sein d'un disque, produit de l'effondrement gravitationnel d'une nébuleuse en rotation

Un scénario conforté par l'observation d'étoiles voisines

- Observation par HST, ISO, Spitzer et les radiotélescopes au sol d'étoiles jeunes ou en formation
- Mise en évidence de disques d'accrétion
- Observation de phases d'activité intense (phase T-Tauri) chez les étoiles jeunes
- ->La formation stellaire suite à l'effondrement d'un disque semble un phénomène courant dans l'Univers

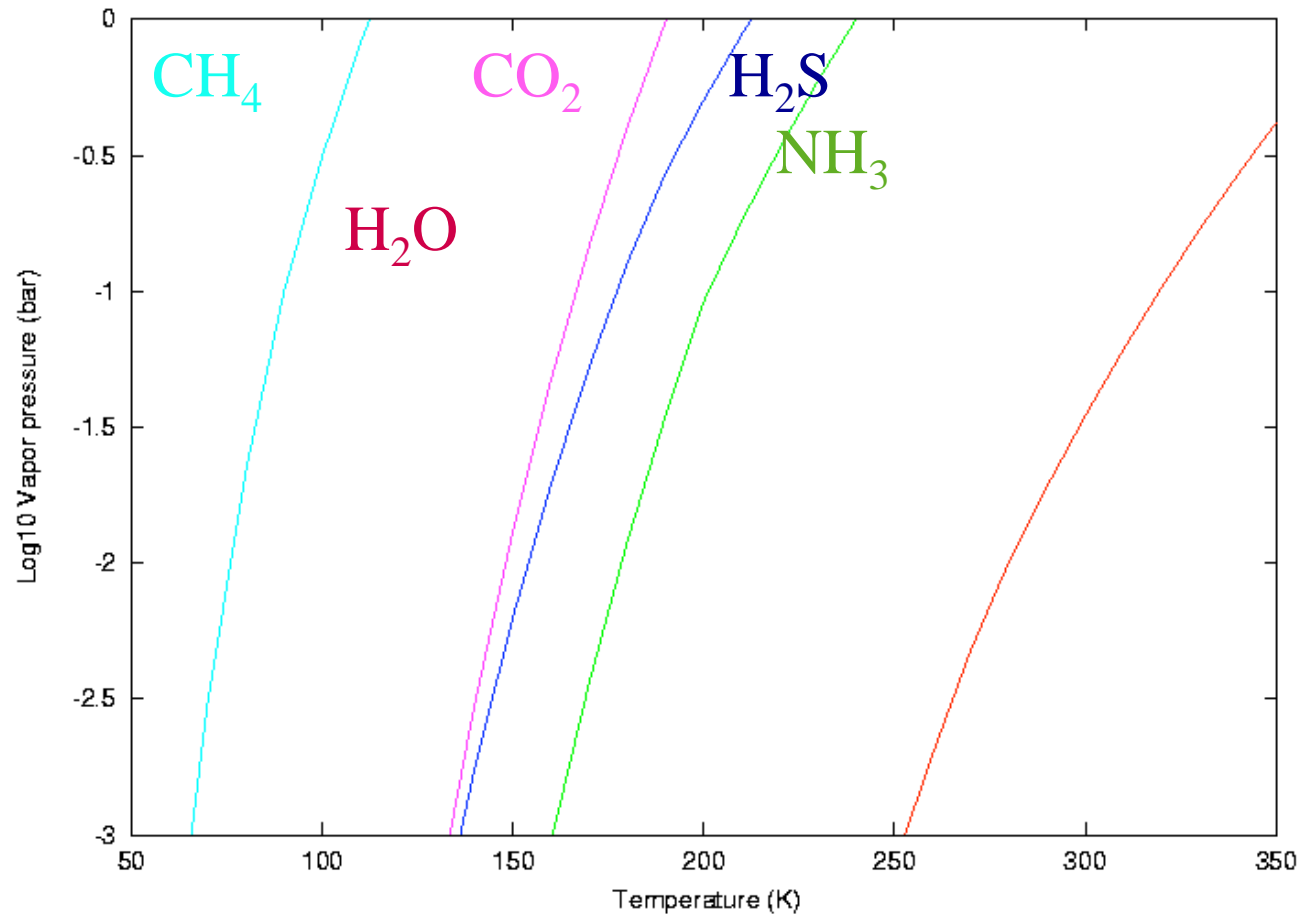
Les grandes lignes du modèle d'effondrement

- Un nuage protosolaire en rotation rapide, se contracte suite à une instabilité (turbulence)
- Effondrement en un disque perpendiculaire à l'axe de rotation
- Apparition d'inhomogénéités au sein du disque turbulent
- Agrégation de particules solides
- Croissance des agrégats par le jeu des collisions -> concentration dans le plan de l'écliptique
- Croissance des plus gros corps par gravité
- Balayage des débris par le vent solaire intense (phase T-Tauri)

Le rôle de l'eau et la ligne des glaces

- Dans le disque, T décroît quand la distance au Soleil augmente
- Près du Soleil (>200 K) seuls les silicates et les métaux sont sous forme solide \rightarrow faible masse solide disponible \rightarrow planètes telluriques
- Loin du Soleil, les éléments H_2O , CH_4 , $NH_3\dots$ sont sous forme de glace \rightarrow disponibles pour former de gros noyaux \rightarrow effondrement du gaz protosolaire environnant (H, He) dès que $M_N > 10-15 M_T \rightarrow$ planètes géantes

Entre les telluriques et les géantes, la ligne des glaces



Quand la température décroît, H₂O est la première molécule qui condense -> Marque la ligne des glaces (environ 180 K)

Les petits corps du système solaire

- Tous les petits fragments n'ont pas été incorporés dans les planètes ou les satellites
- Les plus petits ont été balayés vers l'extérieur lors d'une phase d'activité intense du jeune Soleil (phase T-Tauri)
- Près du Soleil: fragments rocheux et silicatés (-> [astéroïdes](#))
- Loin du Soleil: noyaux glacés, riches en glace d'eau (-> [comètes et objets transneptuniens](#))

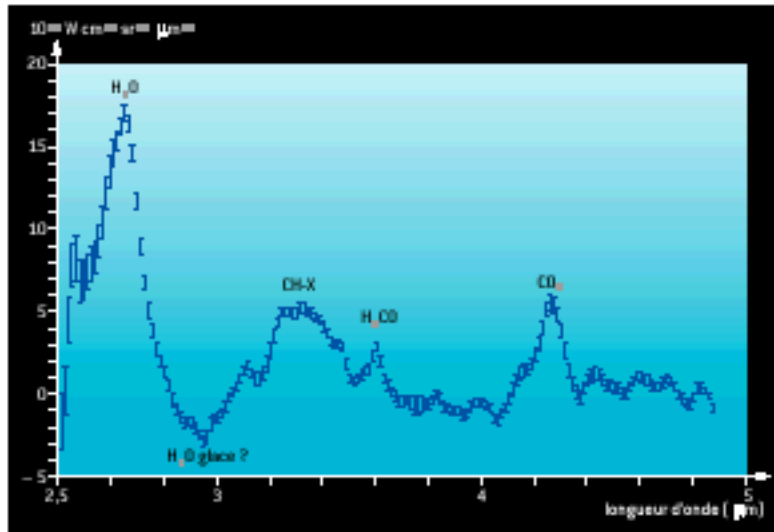
L'eau des comètes



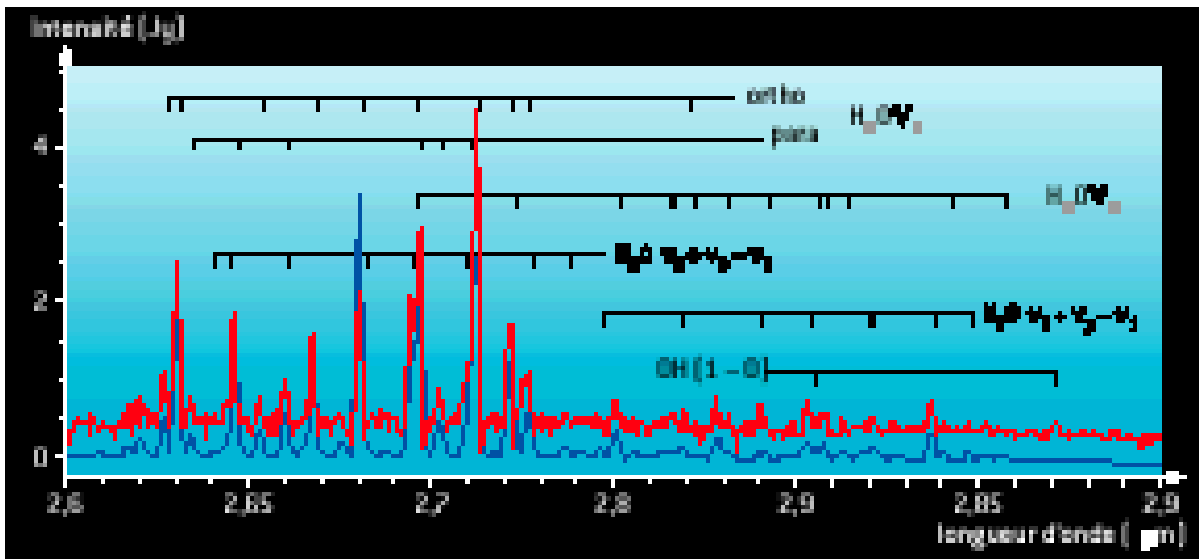
La comète de Halley (1986):
une « boule de neige sale »...

Halley 1986: une exploration par cinq sondes spatiales

- Sonde Giotto (ESA):
observation du noyau
- Sondes Vega (URSS-Europe):
détection de l'eau et de
molécules hydrocarbonées
complexes

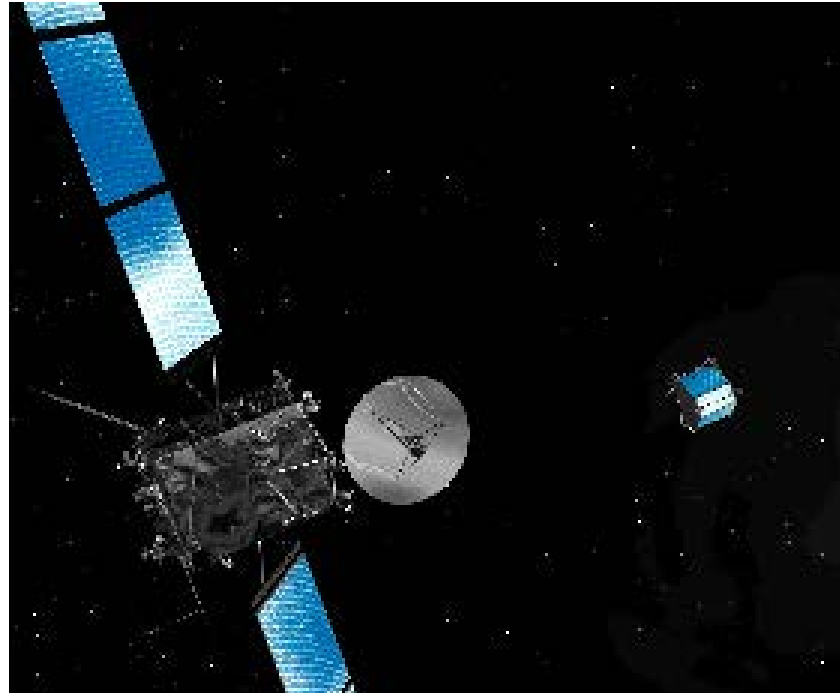


1997: Hale-Bopp, la comète géante



Le spectre infrarouge
de l'eau, observé
par le satellite ISO
(2.7 μm)

Le futur de la recherche cométaire: la mission Rosetta



Lancement: février 2004 (ESA)

Rencontre avec la comète Churyumov-Gerasimenko

Fin de la mission: 2015