Observatoire de Paris

Diplôme d'Université « Structuration de l'Univers » Année 2010 - 2011

> *présenté par* Jacques Sauquet

L'EAU DANS L'UNIVERS

sous la direction de Alain Doressoundiram

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier chaleureusement les Astrophysiciens de l'Observatoire de Paris-Meudon, grâce à qui j'ai pu découvrir tant de choses passionnantes au cours de ces deux années de DU ECU 2009 puis de DU SU 2010, et rédiger ce mémoire :

Merci à Alain DORESSOUDIRAM, qui m'a guidé tout au long de ce travail, tant sur l'organisation du mémoire que sur son contenu, et qui m'a fait découvrir l'incroyable diversité de notre système solaire, et sa richesse en eau dans tous ses états.

Merci à Chantal BALKOWSKY, qui a mis en place et qui anime ces deux années de DU, et qui m'a orienté vers ce thème de « L'eau dans l'Univers », proposé par Alain DORESSOUNDIRAM

Et merci à toute l'équipe des Enseignants Chercheurs de l'Observatoire de Paris-Meudon, animée par Chantal BALKOWSKY, pour ces deux années de formation en « présentiel », de stages à Meudon et en Haute Provence, et de contacts avec les autres participants.

SOMMAIRE

CHAPITRE I - INTRODUCTION	5
CHAPITRE II – LA MOLECULE D'EAU	6
II – 1 Abondance et origine de la molécule d'eau	7
II – 1 – 1 Nucléosynthèse primordiale	7
II – 1 – 2 Formation de l'eau dans l'Univers	8
II – 2 Originalité des propriétés physiques et chimiques de la molécule d'eau	9
II − 2 − 1 Les différents états de l'eau : diagramme de phase de l'eau, point	t
triple	
II – 2 – 2 La glace d'eau existe sous deux formes	
II – 2 – 3 L'eau liquide : quelques propriétés remarquables	11
II – 2 – 4 La vapeur d'eau	12
II – 2 – 5 Les isotopes de l'eau, l'eau lourde	
CHAPITRE III – COMMENT DETECTER L'EAU DANS L'UNIVERS	
III – 1 Observation par spectrographie	
III – 1 – 1 Complexité du spectre de la molécule d'eau	
III – 1 – 2 Les modes de vibration – rotation de la molécule d'eau	
III − 1 − 3 Etats ortho et para de l'eau	
III - 1 — 4 Spectre des glaces d'eau	
III - 1 — 5 Spectre de la vapeur d'eau	18
III – 2 Observation occultée par l'atmosphère terrestre	20
CHAPITRE IV – INVENTAIRE DE LA PRESENCE D'EAU DANS L'UNIVERS	22
IV – 1 Dans le système solaire	23
IV − 1 − 1 Ligne des glaces et cryovolcanisme dans le système solaire	23
IV − 1 − 1 - 1 La ligne des glaces	23
IV − 1 − 1 − 2 Le cryovolcanisme	24
IV − 1 − 2 Les quatre planètes telluriques	26
IV – 1 – 2 – 1 planétologie comparée	26
IV − 1 − 2 − 2 L'eau et les quatre planètes telluriques	27
<i>IV</i> − 1 − 2 − 3 Effet de serre	27
<i>IV</i> − 1 − 2 − 4 <i>Mercure</i>	30
IV – 1 – 2 – 5 Vénus	30
<i>IV</i> − <i>1</i> − <i>2</i> − <i>6 Terre</i>	30
IV – 1 – 2 – 7 Mars	31
IV − 1 − 2 − 8 La composition des atmosphères de Mars, Terre et Vénus	33

IV− 1 − 3 Les quatre planètes gazeuses	34
IV – 1 – 3 – 1 planétologie comparée	34
IV- 1 - 3 - 2 L'atmosphère des planètes géantes	35
IV− 1 − 3 - 3 L'eau des planètes géantes	35
IV – 1 – 4 Les lunes des planètes solaires	37
<i>IV − 1 − 4 − 1 Lune de la Terre</i>	37
IV − 1 − 4 − 2 Europe et Ganymède, lunes de Jupiter	
IV – 1 – 4 – 3 Titan et Encelade, lunes de Saturne	39
<i>IV</i> − 1 − 4 − 4 <i>Triton, lune de Neptune</i>	42
IV- 1 - 5 Les objets transneptuniens	
IV – 1 – 5 – 1 Pluton	46
<i>IV</i> − <i>1</i> − <i>5</i> − <i>2 Quaoar</i>	47
<i>IV</i> − 1 − 5 − 3 Les Centaures, Chiron	
IV − 1 − 6 Les astéroïdes	48
IV − 1 − 7 Les comètes	50
IV – 2 Dans le milieu interstellaire et dans les étoiles	53
IV – 3 Dans les autres galaxies	55
CHAPITRE V – PEUT ON TROUVER DE L'EAU LIQUIDE EN SURFACE HORS DE	LA
TERRE ?	
V – 1 De l'eau sur des exoplanètes ?	
V – 2 Perspectives des grands projets de recherche nationaux et internationaux	
V – 2 – 1 Projets en cours	
V – 2 – 2 Projets futurs	
CHAPITRE VI – CONCLUSIONS	65
CHAPITRE VII – ANNEXES	
VII - 1 Eléments du spectre de l'eau	
VII – 2 Exoplanètes : zones habitables	
VII - 3 Le cycle de l'eau sur Terre	
VII - 4 Le cycle du méthane sur Titan	
VII – 5 Qu'est-ce que la vie ?	
VII – 6 La célèbre expérience de Miller et Urey	
VII – 7 Missions spatiales terminées pour la recherche d'eau dans l'Univers	
VII – 8 Les dimensions du Système solaire	
VIII REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	76

CHAPITRE I - INTRODUCTION



Source : fond d'écran Microsoft

Peut-on espérer trouver de l'eau liquide ailleurs que sur la Terre, ou, en d'autres termes : la situation de la Terre et les conditions de formation et d'évolution de la planète Terre autour de son étoile seraient-elles tellement exceptionnelles et peu probables qu'elle seule pourrait receler et conserver de l'eau liquide à ciel ouvert ?

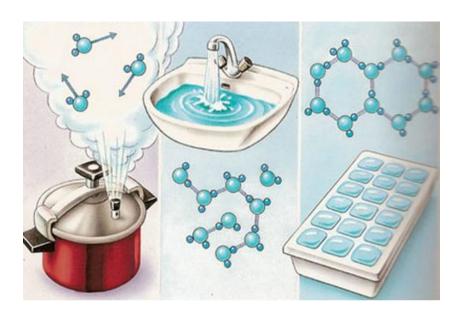
Tout au long de ce mémoire, après avoir analysé les caractéristiques très particulières de la molécule d'eau, puis investigué les méthodes utilisées par les astrophysiciens pour détecter la présence d'eau par spectroscopie, nous parcourrons l'univers à la recherche de l'eau.

D'abord le système solaire, gorgé de vapeur d'eau en deçà de la ligne des glaces, puis de glace au-delà. Et nous nous intéresserons à quelques lunes de nos planètes gazeuses, qui pourraient bien cacher de l'eau liquide dans leurs profondeurs...

Puis nous poursuivrons notre exploration au-delà, dans notre galaxie en s'intéressant à une étoile qui fabrique de l'eau, et nous irons enfin découvrir qu'une lointaine galaxie recèle elle aussi de l'eau.

N'ayant pas décelé d'eau liquide à ciel ouvert dans notre système solaire, nous nous tournerons vers la recherche d'exoplanètes qui pourraient receler de l'eau liquide et des conditions propices à l'existence d'une forme de vie. Et nous finirons par les perspectives de cette recherche passionnante dans les années à venir, dont l'objectif en filigrane est bien sûr la réponse à la question : sommes-nous seuls dans l'Univers ?

CHAPITRE II – LA MOLECULE D'EAU



Site « eau – tour du monde »

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux origines de l'eau, et verrons pourquoi on doit s'attendre à en trouver en abondance dans l'Univers.

Puis nous ferons le tour des principales propriétés physiques et chimiques de l'eau.

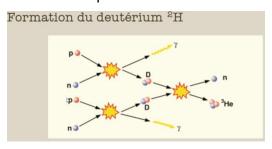
Et nous verrons que certaines de ces propriétés ont eu un rôle prépondérant dans la formation de molécules complexes sur les objets sidéraux, et aussi un rôle majeur dans la création de molécules pré biotiques.

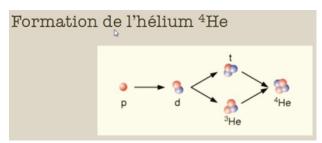
Nous verrons aussi que la mesure de rapport Deutérium/Hydrogène des objets célestes participe à la compréhension de sa formation.

II - 1 Abondance et origine de la molécule d'eau

II – 1 – 1 Nucléosynthèse primordiale

L'abondance de l'eau dans l'Univers est directement liée à l'abondance de ses constituants, l'hydrogène et l'oxygène : or ces deux éléments sont respectivement les 1° et 3° plus abondants éléments présents dans l'Univers, et ceci s'explique par le modèle standard cosmologique, et la nucléosynthèse primordiale ; en effet, une seconde après le big-bang, se sont formés les premiers noyaux de deutérium 2H , de tritium 3H , d'hélium 3He et d'hélium 4He selon le processus suivant :





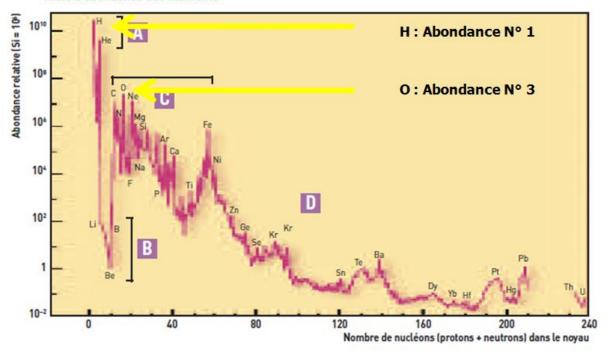
A cet instant, la matière est constituée, en masse, de 75% de noyaux d'hydrogène, et de 23% de noyaux d'hélium, le reste étant constitué de traces d'autres noyaux légers, comme le lithium.

300 000 ans plus tard, la température de l'Univers étant descendue à 3 000K, les électrons et les photons cessent d'interagir en permanence, et les électrons devenus stables peuvent se combiner avec les noyaux pour former les premiers atomes d'hydrogène et d'hélium.

Un ou deux milliards d'années plus tard, les premières étoiles, au sein des premières galaxies, après avoir brulé tout leur hydrogène en le transformant en hélium, comme le fait encore notre soleil, ont commencé à former les premiers éléments plus lourds, notamment le carbone, l'oxygène et l'azote.

Et treize milliards et demi d'années plus tard, à l'époque actuelle, le résultat de ce processus est une répartition des abondances en baryons de l'Univers telle que décrit sur le schéma ciaprès :

Table d'abondance des éléments



Abondance des éléments chimiques dans l'Univers, rapportée à celle du Silicium, prise arbitrairement à $10^6\,$ CEA

Où l'on voit que l'hydrogène et l'oxygène sont respectivement les 1° et 3° plus abondants éléments présents dans l'Univers.

On comprend alors que l'eau soit extraordinairement abondante dans l'Univers.

II - 1 - 2 Formation de l'eau dans l'Univers

A partir des atomes d'hydrogène et d'oxygène, dont on vient de voir la création, comment se forme l'eau dans l'Univers ?

Dans l'espace interstellaire, à une température de moins de 100 K, seules des réactions fortement exothermiques peuvent se produire ; c'est le cas de la formation de l'eau à partir de la molécule H_3^+ obtenu grâce à l'ionisation de H et H_2 :

$$H_3^+ + O \rightarrow OH^+ + H_2$$

 $OH^+ + H_2 \rightarrow H_2O^+ + H$
 $H_2O^+ + H_2 \rightarrow H_3O^+ + H$

Enfin H_3O^+ réagit avec des électrons libres, pour former le radical OH et l'eau H_2O .

L'espace interstellaire comporte aussi des nuages moléculaires denses, encore plus froids à quelques dizaines de Kelvin. L'eau peut alors se former directement sous forme de glace par des réactions chimiques intervenant à la surface des grains interstellaires, constitués de noyaux carbonés ou silicatés sur lesquels les atomes et molécules viennent se coller : la grande mobilité des atomes d'hydrogène sur ces surfaces froides favorise la formation de molécules d'eau.

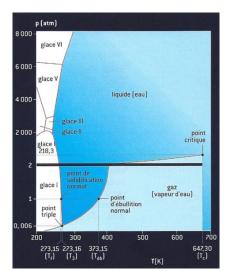
Par contre, la molécule d'eau est détruite à haute température, (quelques milliers de degrés), et est dissociée comme toutes les petites molécules par le rayonnement UV permanent intense: Or ces deux conditions sont souvent celle du milieu interstellaire : c'est pourquoi il y aurait moins d'eau dans l'univers que ce que l'on pourrait attendre au vu des abondance de Hydrogène, 70% de la masse de l'Univers, et de l'oxygène, 1%. On estime que la quantité d'eau dans l'univers serait de un millionième de sa masse totale. (Source site CNRS :

http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/univers/eauCosmos2.html)

II — 2 Originalité des propriétés physiques et chimiques de la molécule d'eau

Ce chapitre fait largement appel au livre de Thérèse Encrenaz, « A la recherche de l'eau dans l'Univers », et parfois à WIKIPEDIA pour quelques données physiques et chimiques.

II - 2 - 1 Les différents états de l'eau : diagramme de phase de l'eau, point triple



Point triple : P = 0,006 bars - T = 273,16 K

Point critique : P = 218 bars - T = 642,30 K

Diagramme de phase de l'eau

Les courbes du diagramme indiquent les frontières entre les différents états de l'eau en fonction de la température et de la pression. Noter un changement d'échelle en ordonnée à 2 bars. (les chiffres romains apparaissant en haut de la figure correspondent à différents types de glace cristalline)

Thérèse Encrenaz, A la recherche de l'eau dans l'Univers, Belin 2004

Dans les conditions de l'atmosphère terrestre, la molécule d'eau $H_2\mathcal{O}$ se forme par une combinaison de trois réactions chimiques, dont le bilan énergétique (exothermique) est très élevé, 219 kcals par molécule :

$$2H \rightarrow H_2$$

$$20 \rightarrow 0_2$$

$$O_2 + 2H_2 \rightarrow 2H_2O + 219 kcal$$

Dans l'Univers, la formation de l'eau peut passer par d'autres équations.

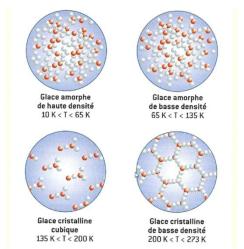
Cette molécule peut être détruite par le rayonnement ultraviolet.

L'eau est le seul composant atmosphérique terrestre que l'on trouve sous ses trois phases, solide, liquide et gazeuse.

II – 2 – 2 La glace d'eau existe sous deux formes

Elle peut prendre deux formes : cristalline, que l'on trouve sur la Terre et dans les planètes du système solaire, ou amorphe, observée dans le milieu interstellaire froid.

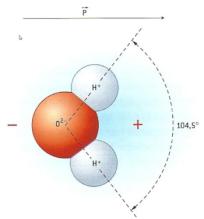
- Les cristaux de glace sont formés par un réseau cristallin hexagonal, qui exclut toute autre matière.
- La glace sous forme amorphe (au dessous de 135 °K) est couramment observée dans le milieu interstellaire ; elle peut piéger un élément extérieur comme le méthane ou le dioxyde de carbone, formant alors un autre type de composé, appelé clathrate (une ou plusieurs molécules hôtes qui emprisonnent une autre molécule dans la même structure cristalline). Peut-être ont-elles joué un rôle important dans la formation des planètes, des satellites du système solaire extérieur et des comètes.



Les différentes formes de la glace d'eau (O en rouge, H en blanc) Thérèse Encrenaz, A la recherche de l'eau dans l'Univers, Belin 2004

II - 2 - 3 L'eau liquide : quelques propriétés remarquables

• L'eau liquide est un solvant puissant qui, grâce à un moment dipolaire \vec{p} élevé, peut dissocier électriquement les molécules présentes dans le liquide en anions (-) et en cations (+), ce qui favorise les réactions chimiques.



Structure de la molécule d'eau électriquement polarisée.

Thérèse Encrenaz, A la recherche de l'eau dans l'Univers, Belin 2004

- Cette propriété a permis une évolution de notre planète favorable au développement de la vie :
 - Elle a permis au dioxyde de carbone présent en abondance dans l'atmosphère primitive de la Terre de se dissoudre au fond des océans, et de former la calcite (composant principal du calcaire) C_aCO_3 en réagissant avec l'oxyde de calcium C_aO du sol : cette régulation de l'abondance en gaz carbonique a permis la stabilisation de la température atmosphérique de la Terre, paramètre favorable à l'apparition de la vie.
 - Elle a permis la création de molécules complexes, à partir de molécules plus simple contenues dans l'eau, et en particulier la création d'acides aminés, appelés molécules pré-biotiques, car point de départ du processus conduisant à la vie. (Voir les annexes VII 5, Qu'est ce que la vie, et VII 6, La célèbre expérience de Stanley et Miller).
- L'eau liquide a une faible viscosité, $(10^{-3} Pa * s)$ ce qui la rend très mobile et capable de rester piégée dans le sol, particularité importante pour la survie des espèces vivantes.
- L'eau liquide a une forte inertie thermique, du fait de sa chaleur spécifique élevée (4186 Joule/kg K) et de sa faible conductivité thermique (0.6 W·m-1·K-1) : ce qui donne aux océans de la Terre (71% de la surface du globe) un rôle de régulateur thermique.

- Les chaleurs latentes de vaporisation (2258 KJ/Kg sous 1 bar) et de fusion (333 KJ/Kg, sous 1 bar) sont très élevées. Elles ont pour effet de diminuer sensiblement les écarts de température entre basse et haute atmosphère, car un changement d'équilibre glace-liquide-vapeur demande une grande dépense d'énergie.
- Autre propriété remarquable : la densité maximale de l'eau est dans sa phase liquide, à 4°C : c'est pourquoi la glace flotte, ce qui empêche les océans de geler, à partir du fond, et cela a permis la survie des espèces au fond de l'eau, et a eu un impact sur l'évolution de l'atmosphère terrestre.

II – 2 – 4 La vapeur d'eau

La vapeur d'eau, gaz invisible, est l'un des principaux gaz à effet de serre.

La quantité maximale de vapeur d'eau présente à une température donnée dans une atmosphère est liée à la pression de vapeur saturante de l'eau, donnée la formule approximative de Duperray :

$$Ps = (\frac{t}{100})^4$$

(P en bar, t en °C)

Au-delà, l'excédent de vapeur précipite en eau liquide.

II – 2 – 5 Les isotopes de l'eau, l'eau lourde

Les deux constituants de la molécule d'eau, H et O possèdent plusieurs isotopes :

hydrogène ¹H, 1 proton, 1 électron

deutérium ²H ou D 1 proton, 1 électron, 1 neutron

tritium ³H ou T : 1 proton, 1 électron, 2 neutron

oxygène ¹⁶0: 8 protons, 8 électrons, 8 neutrons

oxygène ¹⁷0: 8 protons, 8 électrons, 9 neutrons

oxygène ^{18}O : 8 protons, 8 électrons, 10 neutrons

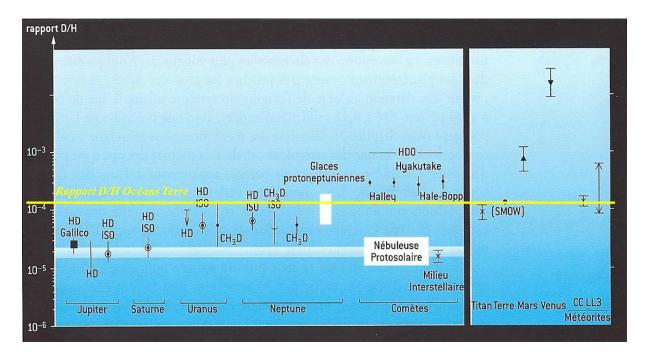
Les combinaisons de ces isotopes conduisent aux quatre isotopes principaux de la molécule d'eau :

- La molécule la plus abondante : H₂ ¹⁶0
- L'eau lourde : HDO
- H₂¹⁷0
- H₂¹⁸0

Notons que les abondances de ces isotopes dans l'Univers sont en moyenne :

- D/H < 10^{-3}
- $^{16}0/^{18}0 \cong 500$
- $^{16}0/^{17}0 \cong 2700$

La figure suivante donne le rapport D/H dans différents objets du système solaire :



Le rapport D/H dans le système solaire (SNOW = Standard Mean Ocean Water) Thérèse Encrenaz, A la recherche de l'eau dans l'Univers, Belin 2004

Ces éléments sont des indices intéressants et importants pour l'étude de l'eau extraterrestre et de son histoire, car ils donnent une indication sur leur température et la distance au Soleil lors de leur formation, comme on peut le comprendre sur les deux exemples suivants :

- Uranus et Neptune, les deux géantes glacées, ont un rapport D/H supérieur à la valeur « protosolaire » : ces deux planètes ont été le dernières à se former, après Jupiter et Saturne, et il restait peu de gaz protosolaire, elles ont donc accrété peu de gaz protosolaire, et sont essentiellement constituées de leur noyau de glace d'eau.
- La valeur de D/H observée dans les comètes est supérieure à celle des océans terrestres : ceci montre que l'eau de la Terre ne provient pas uniquement des comètes, mais plus probablement majoritairement des chondrites carbonnées des astéroïdes, dont la valeur de D/H est voisine de la valeur des océans terrestres.

CHAPITRE III – COMMENT DETECTER L'EAU DANS L'UNIVERS



Comment détecter l'eau dans l'Univers ? En scrutant le ciel ! Galilée scrutant le ciel en 1610 LESIA, OBS. P.M.

Dans ce chapitre, nous allons découvrir comment les techniques modernes de spectroscopie ont permis des progrès considérables dans la connaissance des caractéristiques d'objets de plus en plus éloignés, comme les transneptuniens situés à plus de six milliards de kilomètres, ou comme des exoplanètes, dont les plus proches sont à 40 années lumières, et aussi bien sûr les étoiles et les galaxies.

Nous nous focaliserons sur la possibilité qu'offre la spectroscopie de différencier les glaces amorphes de glaces cristallines, et l'intérêt de cette différentiation.

Et nous verrons pourquoi les satellites et les sondes spatiales ont été le moteur de la recherche de l'eau dans l'univers, puisque l'atmosphère terrestre est en grande partie opaque aux rayons infrarouges, qui sont justement ceux émis ou absorbés par l'eau.

III – 1 Observation par spectrographie

III – 1 – 1 Complexité du spectre de la molécule d'eau

L'analyse spectroscopique des astres permet non seulement de détecter la présence d'eau sous l'un ou l'autre de ses trois états, mais aussi de remonter directement à la température à laquelle elle s'est constituée, information qui aide à retracer l'histoire des corps célestes observés.

Il est donc intéressant de bien connaître les différentes composantes de la signature de l'eau, qui s'avèrent nombreuses et complexes, la molécule d'eau n'est pas si simple...

III — 1 — 2 Les modes de vibration — rotation de la molécule d'eau

On a vu que la structure de la molécule d'eau est triangulaire, avec au sommet l'atome d'oxygène et les deux atomes d'hydrogène, placés en triangle à une distance de $95,7~\mu m$ pour un angle voisin de $104,5^{\circ}$.

Les transitions de la vapeur d'eau en rotation et en translation se traduisent par des émissions en infrarouge et en ondes radio. La connaissance de ces transitions permet de détecter la présence d'eau dans l'Univers, par observation des spectres des objets célestes. Il convient donc d'analyser plus en détail ces divers modes de vibration – rotation.

 Les 3 modes normaux de vibration: ils correspondent à des modes vibrationnels synchrones (deux modes d'élongation, et un mode de déformation angulaire), générés par des combinaisons de vibrations atomiques: leur fréquence propre se situent dans l'infrarouge. Le spectre infrarouge de l'eau se situe donc au voisinage des trois longueurs d'onde 2,66 μm, 2,73 μm et 6,27 μm.

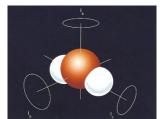






Thérèse Encrenaz, A la recherche de l'eau dans l'Univers, Belin 2004

• Les 3 modes normaux de rotation : ils correspondent aux trois rotations de la molécule d'eau comme sur la figure ci-dessous. Ils induisent des raies dans l'infrarouge lointain, au-delà de 20 μm , entre 32 μ m et 77 μ m.



Thérèse Encrenaz, A la recherche de l'eau dans l'Univers, Belin 2004

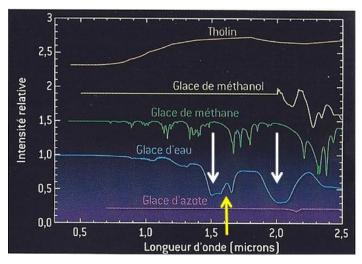
 Spectres de vibration-rotation: enfin, chaque mode de vibration peut être accompagné de transition rotationnelles; ceci résulte en fait des longueurs d'onde multiples dans des « spectres de bande » caractéristiques de la présence d'eau dans l'observation spectrographique de l'Univers.

III – 1 – 3 Etats ortho et para de l'eau

Autre singularité importante pour l'observation de l'eau dans l'Univers, les états « para » et ortho » de la molécule d'eau. Les spins de chacun des électrons des deux atomes d'hydrogène d'une molécule d'eau peuvent être soit opposés, et dans ce cas on est en présence d'une molécule d'eau « para », dans le cas contraire on est en présence d'une molécule d'eau « ortho ». Or, ces deux variétés de molécules ont des vibrations à des fréquences voisines mais un peu différentes ; et, il a été démontré qu'il y a trois fois plus de chance d'être en face d'un état ortho qu'en face d'un état para. Et de plus, le rapport d'abondance des deux variétés ne dépend que de la température de formation initiale de chaque molécule : si l'on mesure le ratio entre ces deux variétés, dans la spectrographie d'un objet de l'Univers, on peut donc estimer sa température de création !

III - 1 - 4 Spectre des glaces d'eau

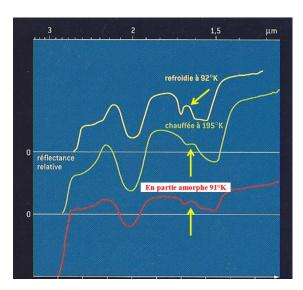
La connaissance du spectre des glaces d'eau est bien sûr fondamentale pour analyser la présence, et on va le voir, la nature des glaces d'eau présentes sur les astres. Les progrès de la spectroscopie moderne, et l'utilisation des télescopes les plus puissants, terrestres ou spatiaux, a permis de détecter de la glace d'eau sur la plupart des objets connus du système solaire, y compris désormais sur les objets transneptuniens. Les glaces présentes sur les astres ont des signatures spectrales dans le domaine infrarouge, principalement dans la bande 0,8 à 3 µm. L'utilisation des plus grands télescopes actuels permettent une très grande résolution, permettant d'identifier non seulement la nature des glaces, mais aussi certains de leurs caractères spécifiques, tels que la structure moléculaire des glaces d'eau (état amorphe ou état cristallin) : cette structure moléculaire donne des informations supplémentaires sur la température de formation des glaces détectées : la glace amorphe se forme à très basse température, tandis que la glace cristalline ne peut se former qu'au-delà de 100 K environ, et on verra au chapitre des objets transneptuniens les hypothèses surprenantes que cette propriété physique a entrainées.



Exemples de spectres d'absorption en laboratoire de différents composés, dont la glace d'eau

Alain Doressoundiram – Emmanuel Lellouch, Aux confins du système solaire, Belin 2008.

On peut distinguer sur le graphique ci-dessus les deux raies d'absorption caractéristiques de la glace d'eau, autour de 1,5 μ m et 2 μ m (flèches blanches), et un pic caractéristique de la glace cristalline à 1,65 μ m (flèche jaune)



Différence de spectre d'absorption entre glace cristalline et glace amorphe, à température identique

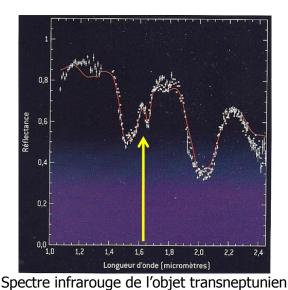
Thérèse Encrenaz, A la recherche de l'eau dans l'Univers, Belin 2004

La figure ci-dessus illustre le lien qui existe entre la structure de la molécule d'eau glacée et la température, mise en évidence en laboratoire. On distingue trois spectres d'absorption de la glace d'eau :

- Le spectre (courbe rouge), d'une glace en partie amorphe, formée à 91 K : la bande d'absorption à 1,65 μm (flèche jaune) est très discrète, car la glace amorphe est très majoritaire.
- Le spectre (courbe verte) de cette glace réchauffée à 195 K, température à laquelle peut apparaître la glace cristalline : on a donc créé de la glace cristalline, mais la bande d'absorption reste discrète à cette température.
- Enfin le spectre (courbe rouge) de la glace refroidie à nouveau à 92 K, voisine de la température initiale de formation, car pour être comparables, deux spectres doivent être à des températures voisines : on voit alors que le décrochement caractéristique de la glace cristalline (flèche jaune) apparaît très nettement.

Cette expérience met en évidence le fait que lorsque l'on trouve des spectres de glace cristalline sur des objets très lointains et très froids, comme les transneptuniens, cette glace d'eau n'a pas été formée dans l'environnement présent, mais à une température supérieure à cet environnement.

Un exemple de ce phénomène est le spectre de l'objet transneptunien HAUMEA, dont la surface est à une température de 50 °K, et dont la bande d'absorption à 1,65 μ m (flèche jaune) est très nette, comme on peut le voir sur le spectre ci-après :



HAUMEA

Alain Doressoundiram – Emmanuel Lellouch,

Aux confins du système solaire, Belin 2008

III - 1 - 5 Spectre de la vapeur d'eau

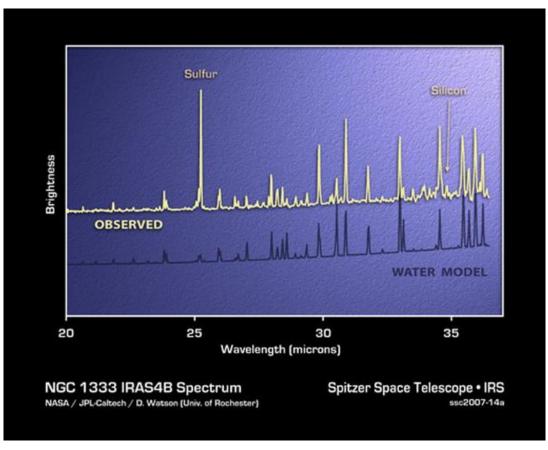
Le spectre des objets célestes gravitant autour des étoiles est dû à deux origines distinctes, dans deux bandes de fréquences distinctes :

 A faible longueur d'onde on trouve les signatures spectrales des gaz composant l'atmosphère de l'objet, qui absorbent les rayonnements de l'étoile réfléchis sur la surface et qui en retraversant l'atmosphère renvoie des raies d'absorption caractéristiques des gaz traversés. Il s'agit des rayonnements ultraviolets, visibles et infrarouges proches. • Les raies d'émission dans les longueurs d'onde plus élevées, infrarouge moyen ou lointain, correspondent aux rayonnements émis par la surface de l'objet lui-même, et sont fonctions de la température de surface.

La recherche de la vapeur d'eau dans l'Univers se fait par spectroscopie, dans les domaines infrarouge, millimétriques et radio, car les raies dans ces domaines sont les plus intenses, donc moins difficiles à observer. Mais la vapeur d'eau étant présente abondamment dans l'atmosphère terrestre, cela ne permet pas d'isoler les raies infrarouges provenant de l'espace absorbées par l'atmosphère: on doit donc rechercher la vapeur d'eau au moyen de satellites, notamment le satellite de l'ESA « ISO », entre 1995 et 1998 ; ces observations ont permis de constater que l'eau est omniprésente dans l'Univers !

Par contre on a pu observer les raies à 22 GHz (λ = 13 mm) visibles depuis la Terre dès la fin les années 60.

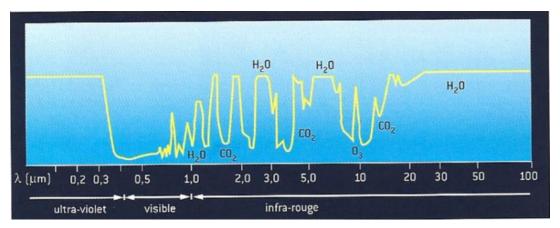
On trouve une raie d'émission de la vapeur d'eau dans la bande spectroscopique fondamentale de $\lambda = 2,2~\mu m$.



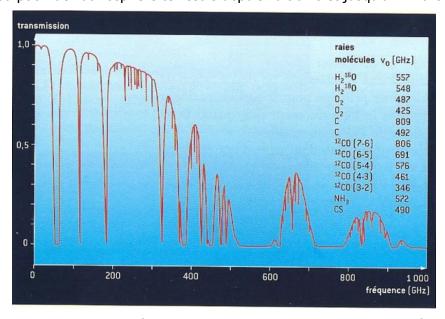
Modèle de spectre de la vapeur d'eau, en bleu Spectre de la nébuleuse NGC 1333, située à 1000 al dans la constellation de Persée Figure NASA – mission Spizer

III – 2 Observation occultée par l'atmosphère terrestre

L'observation spectrale de l'eau à travers l'atmosphère terrestre se heurte à l'opacité de la vapeur d'eau et du gaz carbonique aux rayonnements infrarouges arrivant sur la Terre, comme on peut le voir sur la figure ci-après. Quelques fenêtres d'observation apparaissent dans l'infrarouge proche, et c'est l'opacité totale (absorption égale à 1) dans l'infrarouge lointain : la vapeur d'eau est justement la principale responsable des trous de transmission.



Absorption de l'atmosphère terrestre depuis l'ultraviolet jusqu'à l'infrarouge



Transmission de l'atmosphère terrestre dans le domaine radio, millimétrique et submillimétrique.

Thérèse Encrenaz, A la recherche de l'eau dans l'Univers, Belin 2004

La solution pour contourner ce problème est l'utilisation des satellites depuis les années 70, puissants outils pour la recherche de l'eau dans l'Univers

En effet l'utilisation des satellites pour observer l'eau en dehors de l'atmosphère est indispensable pour s'affranchir de la vapeur d'eau de l'atmosphère ; de nombreuses missions ont à leur bord des instruments pour détecter l'eau sous toutes ses formes, dont on trouvera la liste plus loin (*chapitre V - 2 et annexe VII – 7*).

CHAPITRE IV – INVENTAIRE DE LA PRESENCE D'EAU DANS L'UNIVERS



L'Univers : de l'eau et des étoiles... Van Gogh – « Nuit étoilée sur le Rhône »

Dans ce chapitre, nous ferons l'inventaire de la présence d'eau dans l'univers, dans tous ses états, liquide, vapeur, glace cristalline et glace amorphe.

Nous nous intéresserons à la ligne des glaces et au cryovolcanisme.

Nous trouverons de la vapeur et de la glace sur la plupart des objets de notre Système solaire, planètes telluriques, planètes gazeuses et leurs lunes.

Nous focaliserons sur l'effet de serre sur les planètes telluriques, sur le cycle de l'eau sur Terre et celui du méthane sur Titan.

Nous verrons que notre Terre aurait été alimentée en eau par des comètes et des astéroïdes.

On trouvera aussi de l'eau dans le milieu interstellaire de notre galaxie, et on s'intéressera même à une étoile qui en fabrique. On en trouvera aussi dans une galaxie jeune, ce qui prouve que l'eau pouvait déjà exister dès les premiers milliards d'années de notre univers. Et on constatera ainsi que l'eau est très abondante dans l'univers.

Malgré cela, jusqu'à présent, on n'a jamais pu déceler d'eau liquide ailleurs que sur la surface de la Terre.

Par contre, on soupçonnerait quelques lunes de nos planètes géantes de receler de l'eau liquide sous une épaisse couche de glace...

IV - 1 Dans le système solaire

Réf : notamment :

- Les cours « DU ECU », A. Doressoundiram, OBSPM 2010
- Thérèse Encrenaz, «A la recherche de l'eau dans l'Univers », Belin 2004
- Alain Doressoundiram Emmanuel Lellouch, «Aux confins du système solaire », Belin 2008

IV - 1 - 1 Ligne des glaces et cryovolcanisme dans le système solaire

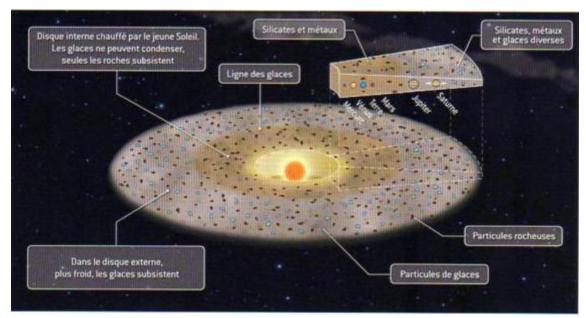
IV – 1 – 1 - 1 La ligne des glaces

La ligne des glaces a eu un rôle très important dans la formation des planètes, et l'évolution des différents états qu'a pris l'eau au cours de la formation du système solaire. Elle délimite une zone circulaire autour du soleil, dans le plan de l'écliptique, en deçà de laquelle on peut trouver de l'eau liquide en surface des corps célestes dotés d'atmosphère, c'est-à-dire en fait de certaines planètes telluriques, puisque la ligne des glaces est située entre Mars et Jupiter, à environ 3 UA du Soleil. On comprend alors qu'au-delà de la ligne des glaces l'eau est condensée en glace, ce qui explique que l'on trouve une plus grande quantité de matière solide au-delà de 3 AU, et que les glaces proviennent de cette région via les comètes. Ceci explique aussi pourquoi le cœur des Planètes glacées soit principalement composé de glace.

Au cours de la formation du système solaire, lorsque le refroidissement a atteint un niveau suffisant, les molécules d'eau se sont formées à partir des atomes d'hydrogène et d'oxygène, et la glace d'eau s'est condensée autour de -100° C, bien au dessous des la valeur 0° C connue sur Terre, car la pression était extrêmement faible : on voit sur le diagramme de phase de l'eau (*paragraphe II* -2-1) que au dessous de 0,0006 bars, il n'y a plus d'eau liquide, et que la température de condensation de la vapeur en glace baisse très rapidement avec la pression ambiante.

En deçà de la ligne des glaces, seuls les éléments réfractaires ont contribué à la formation des planètes telluriques, petites et en petit nombre, puisque toute la matière volatile, eau mais aussi tous les autres gaz constitués d'azote, carbone, hydrogène et oxygène étaient en phase vapeur.

Au-delà de la ligne des glaces au contraire, beaucoup plus de matière a contribué à former les planètes, et de grand blocs de glaces (jusqu'à 12 masse solaires) ont pu se former, provoquant l'effondrement des gaz protosolaires, conduisant à la formation des planètes géantes : Jupiter et Saturne sont principalement composées de gaz, Uranus et Neptune sont surtout composées de glaces



La ligne des glaces

Alain Doressoundiram – Emmanuel Lellouch, Aux confins du système solaire, Belin 2008

On voit sur le schéma ci-dessus que les glaces ne peuvent normalement pas condenser sur les roches exposées au Soleil en deçà de la ligne des glaces; en fait, on observe des condensations de glace aux pôles non exposés au Soleil pendant certaines saisons, comme c'est le cas sur la Lune ou sur Mars.

IV - 1 - 1 - 2 Le cryovolcanisme

Nous allons voir dans ce chapitre IV que l'on soupçonne la présence d'eau liquide dans le sous-sol de certains grands corps célestes bien au-delà de la ligne des glaces, par exemple sur le satellite Europe (*voir paragraphe IV-1-4-2*) de Jupiter, et peut être même sur des objets transneptuniens comme Quaoar (*voir paragraphe IV-1-5-2*), en observant le phénomène de « cryovolcanisme »

En effet, on a vu plus haut (paragraphe III - 2 – 4 Spectre des glaces d'eau) que de la glace amorphe, formée à une température inférieure à 100 K, puis réchauffée au dessus de 100 K pouvait générer de la glace cristalline, qui resterait dans cet état une fois refroidie à nouveau au dessous de 100 K, et observable par spectrographie.

Cette propriété est à la base de l'hypothèse d'un « cryovolcanisme » observable sur des corps situés bien au-delà de la ligne des glaces : l'eau accumulée lors de la formation de ces objets serait plus chaude en profondeur, soit par le fait d'une radioactivité intrinsèque de ces objets, soit par effet de réchauffement mécanique du à l'effet de marée de certaines lunes des planètes.

L'eau présente en profondeur se présenterait alors sous forme d'un mélange de glace amorphe et cristalline, voire même sous forme d'eau liquide à très grande profondeur. Celleci serait expulsée vers la surface par cryovolcanisme, la glace cristalline restant cristalline en surface, malgré les températures extrêmement basses qui règnent sur ces objets lointains.

L'existence de glaces plus chaudes qu'en surface et la coexistence possible de glaces d'eau et d'eau liquides en profondeur des objets lointains peut se comprendre en reprenant le diagramme de phase de l'eau déjà évoqué au chapitre II - 3 - 1

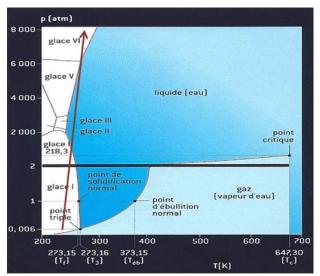


Diagramme de phase de l'eau

Observons la ligne rouge montante superposée au diagramme de phase de l'eau : elle démarre à basse température, comme celle que l'on trouve sur les objets lointains. Au fur et à mesure que l'on s'enfonce vers le cœur d'un objet situé au-delà de la ligne des glaces, la pression augmente ainsi que la température ; et on observe qu'il existe un vaste domaine de pression – température qui peut conduire à trouver de l'eau liquide, prise en sandwich entre deux couches de glaces. Si l'on fait glisser cette ligne vers les plus basses températures, on voit que l'on n'a plus que de la glace en profondeur.

D'aucuns prédisent que ce sandwich d'eau glacée/liquide pourrait se trouver sur Cérès, planétoïde situé dans la ceinture d'astéroïde, sur des lunes des planètes gazeuses ainsi que sur des transneptuniens, comme nous le verrons plus loin.

IV - 1 - 2 Les quatre planètes telluriques IV - 1 - 2 - 1 planétologie comparée

	MERCURE	VENUS	TERRE	MARS
Orbite soleil a - Période	0,39 UA - 87 J	0,72 UA - 224 J	1 UA - 265 J	1,52 UA – 687 J
Diamètre D	0,38 D _{Terre}	0,95 D _{Terre}	1 D _{Terre}	0,53 D _{Terre}
Masse M	0,06 M _{Terre}	0,82 M _{Terre}	1 M _{Terre}	0,1 M _{Terre}
Vitesse de libération V _{lib}	4,4 km/s	10,3 km/s	11,2 km/s	5 km/s
Température	≈ 703-203 K	≈ 733 K	≈ 288 K	≈ 230-90 K
Volcanisme	éteint depuis 3*10 ⁹ années	Toujours en activité	activité éparse	éteint depuis 5*10 ⁸ années
Cratères	beaucoup	peu	peu, érodés	moyennement
Atmosphère	10 ⁻¹² bars au sol	épaisse, nua- geuse, 90 bar au sol	transparente, 1 bar au sol	ténue, 0,006 bars au sol
Eau liquide	non	non	abondant en surface	Non, connaissances actuelles
Vapeur d'eau	non	traces	abondant	traces
Glace d'eau	traces aux pôles	non	abondant en surface	aux pôles et dans le sol pergasols) ?
Albédo	0,06	0,66	0,39	0,16

Montage à partir des cours de Cours des DU's de l'Observatoire de Paris - Meudon Photos : Messenger et Hubble, NASA, mises à l'échelle de la Terre

IV — 1 — 2 — 2 L'eau et les quatre planètes telluriques

Du point de vue de la présence d'eau, ces quatre planètes se distinguent des quatre géantes gazeuse par leur formation lors de l'effondrement du disque protosolaire en deçà de la « ligne des glaces », définie par la température de condensation de l'eau : en deçà, présence de roches, au-delà présence de glace essentiellement.

Lors de leur formation, les planètes telluriques ont restitué une grande quantité d'eau dans leur atmosphère primitive, soit par dégazage volcanique, soit par l'apport de l'eau des météorites et micrométéorites. Les atmosphères de Vénus, de la Terre et de Mars étaient sans doute à l'origine très voisines, riches en vapeur d'eau, dioxyde de carbone, et en moindre quantité, d'azote. Les trois planètes ont ensuite évolué de façons très différentes, bien que les atmosphères actuelles de Mars et Vénus, aux pressions et températures considérablement éloignées, ont une composition remarquablement semblable.

Quand à Mercure, trop petite et trop proche du Soleil, elle n'aurait jamais constitué d'atmosphère significative dès sa formation, car la vitesse d'échappement thermique des gaz très chauds était supérieure à la vitesse de libération (4,3 km/s) due à la gravité.

IV - 1 - 2 - 3 Effet de serre

La différence fondamentale entre les compositions des atmosphères des trois planètes est attribuée à un phénomène au centre des préoccupations actuelles sur l'avenir de notre planète bleue : l'effet de serre.

Trois gaz sont particulièrement efficaces pour le processus de l'effet de serre : la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et le méthane.

Or la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone étaient à l'origine les principaux constituants des atmosphères de Vénus, de Mars et de la Terre.

Les bandes de vibrations infrarouges intenses de ces deux molécules leur permettent d'absorber le rayonnement solaire et de le convertir en énergie thermique : cette énergie est alors piégée entre la surface et la basse atmosphère, et la température de la basse atmosphère (au dessous de 5 km) augmente alors progressivement.

Analysons plus avant ce mécanisme :

Le Soleil chauffe le sol de la planète, qui atteint une température fonction de l'albédo (typiquement 0,3 pour les planètes telluriques), et de la distance du Soleil : pour la Terre, située à 1 UA du Soleil, cette température s'établit à 255 K à une altitude de 5 km.

Or, au sol, cette température est supérieure : en effet, à la température de 255 K, la surface émet un rayonnement vers l'atmosphère, avec un maximum défini par la loi de Wien :

 $\lambda \text{max} (\mu \text{m}) * T(K) = 2900$

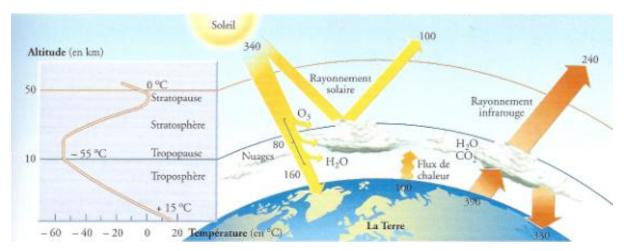
Soit, à 255 K:

 $\lambda \text{max} (\mu \text{m}) = 11 \, \mu \text{m}$

Rayonnement qui est à son tour absorbé par la vapeur d'eau et le gaz carbonique, qui présentent des transitions très importantes dans ce domaine spectral, et contribue à

réchauffer à son tour par rayonnement la basse atmosphère et le sol, ce cycle s'amplifiant jusqu'à atteindre un nouvel équilibre, actuellement à 296 K sur Terre, au lieu des 255 K de l'origine.

Ce mécanisme est schématisé sur le montage ci-dessous :



Mécanisme de l'effet de serre

Thérèse Encrenaz, Atmosphères planétaires, Origine et évolution, Belin-CNRS édition, 2000 Extrait de S. Jousseaume, Climats d'hier à demain, CNRS Editions –CEA 1993=

Observons de plus près l'équilibre radiatif atteint :

Le Soleil apporte en moyenne 340 W/m² à la Terre.

80 W/m² chauffent directement la tropopause : 100 W/m² sont réémis vers l'espace par effet albédo, et 160 W/m² arrivent finalement à la surface de la Terre

Une partie de cette énergie et réémise vers la haute atmosphère sous forme de chaleur : 100 W/m². Et l'on observe enfin l'effet de serre : un échange de rayonnement entre le sol et la troposphère, dont l'équilibre actuel est de 390 W/m² montant et 330 W/m² descendant.

Si on fait le bilan, on voit que $160 + 330 = 490 \text{ W/m}^2$ sont absorbés par la surface terrestre, qui en réémet $100 + 390 = 490 \text{ W/m}^2$: l'équilibre est assuré, mais on comprend que si l'effet de serre s'amplifie, la Terre absorbera plus d'énergie, et la température d'équilibre sur Terre augmentera, ce qui est une préoccupation dramatique actuelle des scientifiques qui nous alertent...

Quelle est actuellement l'évolution du taux de dioxyde de carbone dans notre atmosphère ? Le taux du dioxyde de carbone en 2009 est de 385 ppm¹ (en 2009)

Si le taux d'oxyde de carbone devait augmenter comme on le craint aujourd'hui, il pourrait déséquilibrer gravement l'équilibre thermique de la Terre, prédisent les climatologues.

En 2010, 30,6 gigatonnes supplémentaires ont été rejetés dans l'atmosphère, à comparer à la masse actuelle de dioxyde de carbone dans l'atmosphère :

Taux actuel de CO_2^* masse de l'atmosphère terrestre en t)

 $0.0385\%*5*10^{15} = 1,93*10^{12} \text{ t soit } 1930 \text{ gigatonnes}$

¹ ppm = partie par million

La masse de gaz carbonique a augmenté de 30,6/1930 = 1,6% en 1 an.

Soit une augmentation de 6 ppm.

Or si on relève les teneurs en ppm du gaz carbonique sur deux siècles et demi *(source Planètes extrasolaires, Fabienne CASOLI – Thérèse ENCRENAZ, édition 2005, Belin, et Revue Nature pour 2009,* http://www.nature.com/scitable/knowledge/library/effects-of-rising-atmospheric-concentrations-of-carbon-13254108

on trouve:

1750 : 280 ppm 1900 : 295 ppm 1959 : 315 ppm 1990 : 350 ppm

2009 : 385 ppm soit 35 ppm en 19 ans...

On voit nettement que le phénomène accélère, on lit même une prévision de 500 à 1000 ppm en 2100 dans l'article de Nature cité plus haut. Notons par ailleurs que si la température de la Terre devait augmenter, il y aurait plus d'évaporation d'eau des océans, or la vapeur d'eau est elle-même le premier des gaz à effet de serre...

Cet effet de serre a joué de façon totalement différente sur Vénus, (dont L'atmosphère est constituée à 96% de dioxyde de carbone, la pression au sol étant de 90 bars et la température de 730°K) et sur la Terre ; Mars, trop petite, donc avec une vitesse de libération faible (5 km/s), n'a pas conservé son atmosphère, bien qu'elle ait été froide.

IV-1-2-4 Mercure

Mercure est très difficile à observer depuis la Terre, car trop proche du soleil (angle de vision avec le soleil toujours inférieur à 30°). Sa surface est constellée de cratères.

Mercure, trop petite et trop proche du soleil, n'aurait donc jamais constitué d'atmosphère stable significative dès sa formation, car la vitesse d'agitation thermique (fonction de la température) des gaz présents à l'origine était supérieure à la vitesse d'échappement (4,4 km/s).

Par contre, en 1991, la sonde Mariner 10 a détecté au voisinage des pôles des zones de cratères toujours à l'ombre, maintenus à température basse de 135K, et aurait repéré une fine pellicule de glace d'eau ; les futures missions Messenger (NASA, la sonde a été placée en orbite le 17 mars 2011) et Bepi Colombo (ESA, lancement prévu en 2014) devront vérifier ces premières observations.

Et bien sûr aucune trace d'eau liquide.

IV - 1 - 2 - 5 Vénus

On n'a aujourd'hui trouvé aucune trace d'eau liquide ni de glace, les conditions de température due à l'effet de serre primordial et de pression au sol (733 K en moyenne, et 90 bars) ne laissant aucune chance à ces deux états.

Mais cela n'a pas toujours été le cas, ainsi, au moment de la formation des planètes, il y aurait eu abondance d'eau : le rapport D/H, découlant du rapport HDO/H2O a été mesuré sur Vénus égal à 120 fois la valeur mesurée sur Terre (1,5*10⁻⁴) : l'explication actuelle est que la vapeur d'eau aurait été dissociée en haute altitude par les UV, et que la vitesse d'agitation thermique de l'hydrogène était supérieure à la vitesse de libération de Vénus (10,3 km/s), au contraire du deutérium, deux fois plus lourd, et l'eau a fini à disparaitre quasi-complètement.

IV - 1 - 2 - 6 Terre

Des quatre planètes telluriques, seule la Terre a conservé son eau liquide

Initialement, l'atmosphère de la Terre était comparable à celle de Vénus et de Mars. La température aurait baissé rapidement, permettant à la vapeur d'eau de précipiter et de former les océans liquides, dans lesquels le dioxyde de carbone s'est rapidement dissous pour former des carbonates déposés au fond : la vapeur d'eau et le gaz carbonique ayant alors considérablement diminué en proportion dans l'atmosphère, l'effet de serre est devenu marginal.

La Lune aurait aussi contribué à cette stabilité de température, en maintenant très stable et invariante l'orientation oblique de l'axe de rotation de la Terre, une fois établie l'équilibre dynamique du couple Terre – Lune.

Quant à l'origine de l'abondance d'eau sur la Terre, l'analyse du rapport D/H des océans terrestres a montré que ce rapport est comparable à celui des météorites : cette observation

montre qu'on ne peut donc pas attribuer l'eau de la Terre aux seules comètes, et qu'il a fallu aussi l'apport des météorites et du dégazage par volcanisme du globe lui-même.

Un phénomène particulier à la Terre, le « cycle de l'eau », contribue à brasser perpétuellement l'eau, ceci conduisant à un échange permanent entre ses trois états (voir paragraphe VII - 3)

IV-1-2-7 Mars

La même mesure du rapport D/H a été réalisée en 1989 sur Mars : l'enrichissement en deutérium est seulement de 6 : or si on suppose un scénario identique à celui de Vénus, même si l'atmosphère de Mars est moins massive, en proportion on devrait avoir le même D/H que sur Vénus. Mais Mars étant beaucoup plus légère aurait eu un échappement différentiel de son atmosphère bien plus faible qui aurait conduit à un déséquilibre plus faible du rapport D/H.

Mais Mars reste encore une énigme. Ayant une surface 4 fois moins grande que la Terre, elle a donc reçu beaucoup moins de météorites gorgés d'eau que la Terre, et disposant de moins d'énergie interne d'origine nucléaire, contribuant au dégazage. Par contre, le mécanisme volcanique s'est poursuivi pendant plus d'un milliard d'années après la formation de la planète, du à une « dynamo interne » très efficace, identifiée grâce à un champ magnétique détecté par Mars Surveyor dans les terrains anciens. La fin du volcanisme a ralenti l'effet de serre et a donc refroidi la planète.

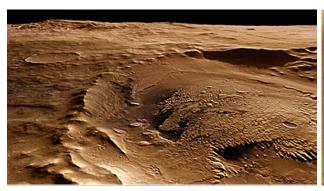
L'eau de l'atmosphère se serait alors trouvé piégée dans le sol, sous forme de glace ou de « pergélisol » (ou permafrost) ; mais alors l'énigme persiste sur ce que serait devenu le dioxyde de carbone de l'atmosphère : à ce jour, on a trouvé aucune trace en surface d'éventuels carbonates, qui permettrait de faire un parallèle avec le processus terrestre.

Mars est actuellement l'objet d'une exploration intense, par des sondes orbitant autour de la planète et déposant par ailleurs des robots au sol (2 sondes Viking, NASA, lancées en 1975. Mars Global Surveyor, NASA et JPL, lancée en 1996. Mars Odyssey, NASA, lancée en 2002, Mars Express, ESA et Astrium, lancée en 2003. Rover Spirit et Opportunity, NASA, posés sur qwMars en 2004. Mars Reconnaissance Orbiter, NASA, lancé en 2005). La topographie des fameux canaux de Mars et la détection d'une ligne parfaitement horizontale de démarcation entre deux zones distinctes de Mars laisse supposer qu'il y aurait eu un océan sur Mars, puis de forts écoulements d'eau à la surface.

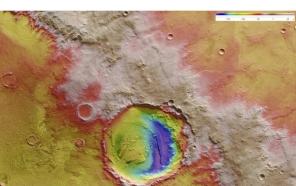
C'est par exemple l'hypothèse qui a été émise après l'analyse des images du cratère Schiaparelli, découvert en 1877 par Giovanni Schiaparelli (1835–1910), et abondamment photographié en haute résolution et 3D par Mars Express.

On pense que ce cratère a été modelé par la présence d'eau il y a trois milliards d'années, puis par des tempêtes violentes successives : cette hypothèse tient à la présence de canaux et zones de sédiments sombres, comme on peut en observer sur Terre. Pour la petite histoire, ces canaux vus par Giovanni Schiaparelli avec l'instrumentation de l'époque ont contribué au mythe des petits hommes verts jusqu'au début du vingtième siècle par le public comme par quelques astronomes...

On peut observer cette sédimentation, façonnée par les tempêtes, sur les photos 3D prises en 2010 par Mars Express, ainsi que la forme du lac d'eau liquide qui aurait occupé le fond du cratère.



Planète MARS, cratère Schiaparelli où l'on voit les couches sédimentaires érodées par le vent.

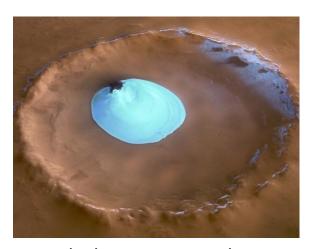


Planète MARS, cratère Schiaparelli en fausses couleurs, liées à l'altitude, on voit aussi un canal, probablement d'adduction d'eau dans le lac, si l'on observe les altitudes (échelle ci dessous)



Site ESA Mars Express

Il reste des traces d'eau sur Mars, dans les flans des cratères exposés toujours à l'ombre, ou aux pôles, où l'on retrouve de larges plaques de glaces d'eau, comme sur le cratère Vastitas Borealis :



Flaque d'eau glacée résiduelle dans le cratère Vastitas Borealis Site ESA Mars Express

Et le radar Marsis de Mars Express, capable d'analyser le sous sol de mars en 3D à des profondeurs kilométriques, a pu déceler des couches de glaces d'épaisseur de 1 km ou plus.

Un cycle de l'eau sur Mars

Sur Mars, comme sur la Terre il y aurait aussi un cycle de l'eau, beaucoup plus simple, d'autant qu'il concerne une toute petite quantité d'eau.

Un grand glacier comprenant aussi des poussières et des sédiments d'eau s'est formé au fil du temps sur le pôle nord. En été, la glace se sublime sous l'effet des rayons du soleil, et la faible quantité de vapeur d'eau résultante est alors transportée vers d'autres latitudes par la circulation atmosphérique. Une partie de cette vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère peut imprégner le sol des latitudes faibles. Une autre partie continue jusqu'à la calotte polaire sud, couverte de glace carbonique.

Peut-on espérer trouver de l'eau liquide dans le sous-sol de Mars?

Jeffrey Plaut (coresponsable de l'instrument Mars Express Marsis, JPL, USA) n'en avait pas encore détecté avec cet instrument en 2007 ; pas de trace d'eau liquide sous la croûte des zones ombrées de Mars ; selon lui, de nombreux scientifiques pensent qu'il y aurait de l'eau liquide sous la croute de Mars, mais où, et à quelle profondeur ? La question est : l'absence de détection d'eau liquide par Marsis est elle due aux limites technologiques de l'instrument, ou n'y a-t-il en fait pas d'eau ? Les recherches continuent, et continueront certainement avec de nouvelles générations d'instruments plus puissants.

IV — 1 — 2 — 8 La composition des atmosphères de Mars, Terre et Vénus

La composition actuelle des atmosphères de Mars et Vénus est très voisine, bien que les pressions soient considérablement différentes : 95% de dioxyde de carbone, quelque % d'azote et des traces de monoxyde de carbone et de vapeur d'eau.

L'atmosphère de la Terre est très différente, 21% d'oxygène, 78% d'azote, beaucoup de vapeur d'eau, et bien sûr du dioxyde de carbone, 0,0385%, soit 385 ppm (en 2009). Mais si l'on prend en compte le gaz carbonique dissout au fond des océans sous forme de carbonates, ou calcites, le rapport CO_2/N_2 est très voisin pour les trois planètes.

La différence fondamentale entre les compositions actuelles de l'atmosphère des trois planètes reste donc la vapeur d'eau, abondante sur la Terre, n'est présente seulement qu'à l'état de traces sur Vénus et Mars, moins de 0,1%.

IV-1-3 Les quatre planètes gazeuses

IV – 1 – 3 – 1 planétologie comparée

	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
Orbite soleil a - Période	5.2 UA - 11,9 A	9,6 UA - 29,5 A	19,2 UA - 84 A	30,1 UA - 64,8 A
Diamètre D	11,2 D _{Terre}	9,4 D _{Terre}	4 D _{Terre}	3,9 D _{Terre}
212	318 M _{Terre}	95 M _{Terre}	14 M _{Terre}	17 M _{Terre}
Masse M	Dont 95% gaz	Dont 95% gaz	Dont 30% gaz	Dont 30 % gaz
Atmosphère	Très p rofonde, H ₂ H _e			
Température	167 K à 1 bar	138 K à 1 bar	79 K à 1 bar	70 K à 1 bar
Eau liquide	Non	Non	Non	Non
Vapeur d'eau	troposphère 3– 5 bars	troposphère >3 bars	Présence soupçonnée > 10 bars	Présence soupçonnée > 10 bars
Glace d'eau	?	?	oui, noyau en glace d'eau	oui, noyau en glace d'eau
A <i>lbédo</i>	0,42	0,45	0,53	0,66

Montage à partir des cours des DU's de l'Observatoire de Paris - Meudon

Photos : Hubble, NASA, mises à l'échelle de Jupiter

IV- 1 - 3 - 2 L'atmosphère des planètes géantes

L'atmosphère des planètes géantes est dominée par l'hydrogène. Les couches nuageuses contiendraient de la vapeur d'eau, sous une pression de quelques bars sur Jupiter et Saturne, et une dizaine de bars sur Neptune et Uranus.

IV— 1 — 3 - 3 L'eau des planètes géantes

Dans l'atmosphère des planètes géantes, la présence en abondance d'hydrogène devrait conduire à l'observation de l'oxygène directement sous forme d'eau, si l'on considère que l'hydrogène est majoritairement sous forme moléculaire H_2 , et l'oxygène entièrement contenue dans la vapeur d'eau H_2 O. D'après la théorie de l'accrétion, on s'attendait à ce que le rapport O/H soit plus élevé que la valeur cosmique : selon cette théorie, sachant que les éléments plus lourds que l'hélium au moment de la formation des planètes représentaient 2% de la nébuleuse protosolaire, le calcul de la quantité d'eau dans Jupiter, en prenant 2% pour l'atmosphère initiale, et 100 % pour le noyau, conduit à un facteur 3. Or des observations récentes et convergentes (sonde Voyager, Galileo) ont montré que dans la basse troposphère de Jupiter, l'eau est présente en quantité bien inférieure à l'attente cidessus, et d'au moins deux ordres de grandeur !

Des mesures ultérieures (satellite ISO) ont confirmé cette constatation dans l'atmosphère de la planète Saturne.

L'explication serait la suivante : sur Jupiter, comme sur Saturne, l'atmosphère est en perpétuel mouvement convectif violent : les bandes observées en surface de l'atmosphère de ces planètes seraient dues aux courants ascendants, les bandes plus profondes étant au contraire dues aux courants descendants ; les courants ascendants ont pour effet d'enrichir l'atmosphère en composés condensables, comme l'eau, et les courants descendants ayant l'effet inverse d'assécher ces composants. La sonde Galileo, qui a pénétré dans une des bandes de Jupiter, et a mesuré en effet une faible abondance d'eau.

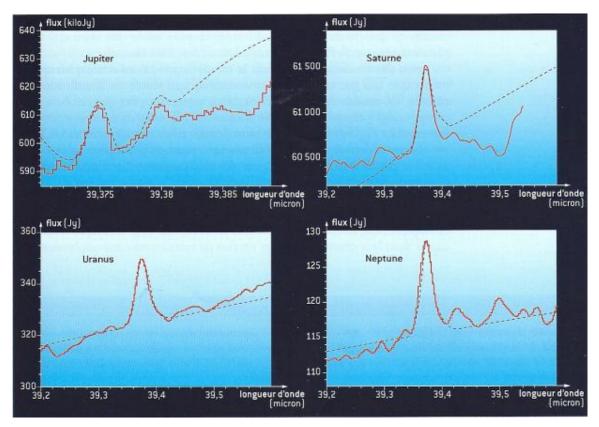
Il n'est donc pas possible actuellement de déterminer l'abondance effective de l'eau dans les couches profondes des atmosphères des planètes géantes.

Quant à Uranus et Neptune, la présence d'eau n'a pas encore été détectée dans leur troposphère.

De la vapeur d'eau a été détectée dans la troposphère de Jupiter et de Saturne par des raies d'absorption infrarouge, ce qui était attendu (lois de Kirchhoff). Et bien sûr, les noyaux des planètes Uranus et Saturne sont essentiellement composés de glace d'eau.

Par contre, le satellite ISO a détecté des raies de vapeur d'eau en émission dans le spectre d'Uranus, or la température de la troposphère n'est que de 50 K : donc il y aurait de la vapeur d'eau au-delà de la ligne des glaces ?

A la suite de quoi des mesures ont aussi été effectuées sur Jupiter, Saturne, Neptune ainsi que sur Titan : toutes ont présenté des raies infrarouges en émission (voir figure suivante) : ceci prouverait que ces émissions proviendraient de la stratosphère de ces planètes puisqu'il a été montré que la température de l'atmosphère des planètes gazeuses augmente avec l'altitude.



Signature spectroscopique de $\rm H_2O$ dans les stratosphères des quatre planètes géantes, observées par le satellite ISO; Il s'agit de raies d'émission, car dans la stratosphère la température augmente avec l'altitude. En pointillé, spectres des modèles théoriques.

Thérèse Encrenaz, A la recherche de l'eau dans l'Univers, Belin 2004

Alors, quelle est la provenance de cette eau ? Elle ne peut venir sous forme de vapeur par convection depuis le centre des planètes, car le vapeur d'eau chaude condenserait au passage de la troposphère très froide. D'où l'idée que cette eau serait d'origine externe.

Deux hypothèses sont émises : cette eau peut provenir des anneaux et satellites de glaces tournant autour des planètes géantes. Ou bien de micrométéorites et de comètes du disque solaire, captées au passage du voisinage des planètes, dont on sait qu'elles ont fortement contribué à remplir les océans terrestres.

Les missions Herschell et Cassini devraient donner des connaissances nouvelles sur ces questions.

Mais si personne ne s'attend à trouver de l'eau liquide sur l'une des planètes géantes, certaines de leurs lunes pourraient en receler. C'est ce que nous allons approcher dans le paragraphe suivant.

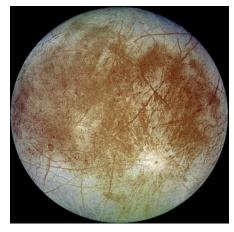
IV – 1 – 4 Les lunes des planètes solaires IV – 1 – 4 – 1 Lune de la Terre

La lune de la Terre est trop petite pour avoir été recouverte d'une atmosphère car la vitesse d'agitation thermique (fonction de la température) des gaz présents à l'origine était supérieure à la vitesse d'échappement (Vlib = 2,3 km/s).

Elle n'a bien sûr pas d'eau liquide en surface, mais elle aurait un peu de glace aux pôles, révélée par la sonde Clementine (NASA, 1994) et la sonde Lunar Prospector (NASA, 1998).

IV - 1 - 4 - 2 Europe et Ganymède, lunes de Jupiter

Europe



Europe, vu depuis la sonde

Photo: NASA - JPL

Galiléo

Europe étant très au-delà de la limite des glaces, on ne doit donc pas espérer trouver de l'eau liquide en surface. Par contre, on soupçonne la présence d'un océan d'eau liquide sous la couche de glace.

Une mission spatiale, « Europa Jupiter Mission», avait pour objet d'explorer dans les années 2020 la présence de cet océan et sous la couche de glace d'Europe et de Ganymède. La NASA a pour l'instant renoncé à cette mission, seule l'ESA continue avec Ganymède

On soupçonne cet océan par l'observation d'éruption de glace chaude sortant de la croûte de glace à travers des fissures (cryovolcanisme, voir paragraphe IV - 1 -1 - 2

Europe pourrait être un exemple unique d'océan liquide directement en contact avec la roche du manteau de l'astre, alors que les autres océans liquides soupçonnés dans le système solaire, comme Ganymède ou Callisto, autres lunes de Jupiter, serait en contact avec de la glace, au dessus comme au dessous. Ce fait est fondamental, car l'énergie interne de Europe pourrait alors réchauffer directement cet océan, et alors l'hypothèse d'une forme de vie dans cet océan n'est pas invraisemblable... Et ceci ouvrirait la porte à un phénomène similaire hors système solaire, autour d'exoplanètes dans des configurations similaires.

L'idée d'un océan liquide en sous sol d'Europe est étayée par des photos ci-après prises par la sonde Galileo (NASA):

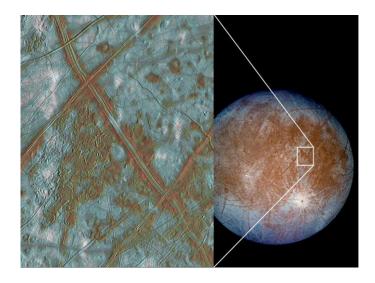
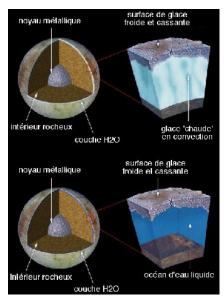


Photo d'une lune de Jupiter : Europe

Sonde Galileo, NASA (1996)



« Coupe » de la Lune Europe

NASA ; DU ECU : Alain Doressoundiram, Le système solaire, les planètes géantes et les mondes glacés

Les blocs rouge-bruns seraient des blocs rocheux résultant de l'activité géologique ; les zones blanches seraient formées d'éjection de matière dues à l'impact d'un objet (cratère de Pwill). Les plaines glacées seraient des mers de glace, en bleu foncé des gros grains de glace, et en bleu clair des grains plus fins. Les très longues lignes foncées seraient des fractures dans la croûte, certaines dépassant 3400 km de longueur.

Ces fractures intriguent les chercheurs : elles pourraient être le vecteur du cryovolcanisme, mais aussi d'une circulation possible de molécules créés dans l'océan liquide, circulation montante et descendante : ainsi il pourrait y avoir enrichissement de molécules de plus en plus complexes par les molécules tombées sur la surface glacée, et pourquoi pas génération d'organismes vivants...

Une « coupe » d'Europe, figure ci-dessus, aide à comprendre ce qui est soupçonné par les chercheurs : glace chaude ou eau liquide sous la surface de glace froide et cassante d'Europe.

Ganymède



Ganymède, vu depuis la sonde Galiléo *Photo : NASA*

Ganymède est la plus grosse des lunes du système solaire. Comme Europe, elle pourrait receler de l'au liquide sous la couche de glace de la surface, mais contrairement à Europe, cette eau liquide serait séparé du cœur de la lune par une autre couche de glace.

Sa surface est striée de longues failles.

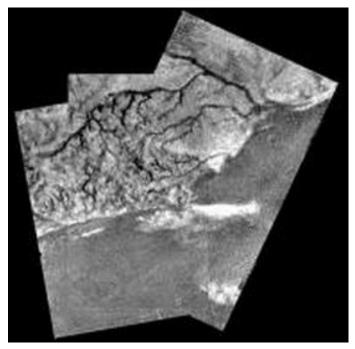
IV – 1 – 4 – 3 Titan et Encelade, lunes de Saturne

Titan

Titan, lune de Saturne, est l'objet actuellement de recherches intenses, intéressant le méthane, l'eau, le cryovolcanisme et l'exobiologie.

C'est le seul astre situé au-delà de la ligne des glaces sur lequel s'est posée une sonde qui a pris des photos jusqu'au moment de l'atterrissage, car la sonde était freinée par un parachute. Cette sonde, faisait partie de la mission Cassini –Huygens (NASA – ESA) et s'est posée en 1985, alors que l'orbiteur Cassini continue encore à tourner autour de Saturne, en traversant périodiquement ses anneaux.

Ci-dessous, les premières images de l'approche et de l'arrivée sur le sol de Titan, que nous avons eu la chance de vivre en direct à la cité des sciences de Paris, le 25 janvier 2005.



Mosaïque de trois photos prises avec l'instrument DISR à bord de la sonde Huygens de l'ESA. On distingue les affluents convergeant vers une «rivière» qui se dirige elle-même vers une surface foncée : étendue de méthane liquide ?



Sol de Titan, sonde Huygens posée – cailloux de glace d'eau, d'une quinzaine de cm pour les plus gros

© ESA. NASA. JPL. University of Arizona

Titan est la plus grosse lune connue de Saturne, s'insérant en diamètre entre Mercure et Mars, et elle est située à 25 rayons saturniens de sa planète ; elle est constituée pour moitié de roches, et pour moitié d'eau glacée.

Elle est entourée d'une épaisse atmosphère, composée de 98% d'azote, et 1,4% de méthane ; la pression au sol est de 1,5 bar. La température moyenne au sol est de 93 K et descend à 70 K au niveau de la tropopause. Ceci permet d'envisager une cohabitation des états liquides et gazeux du méthane, similaire à celle que l'on trouve sur Terre pour l'eau. Elle serait ainsi le seul objet du système solaire en dehors de la Terre à posséder des étendues liquides en surface.

Elle est constituée de roches et de glaces, principalement des glaces d'eau, mais aussi d'ammoniac, de méthane et d'éthane. On soupçonne la présence d'un réservoir liquide d'eau et de méthane entre la couche de glace en surface et une autre couche glacée beaucoup plus profonde : ceci pourrait expliquer un apport continu de méthane par cryovolcanisme, pour remplacer le méthane qui serait détruit en haute atmosphère par le rayonnement solaire. La chaleur nécessaire pour obtenir ce réservoir liquide viendrait d'un puissant effet de marée dû à Saturne, ce qui expliquerait aussi pourquoi Titan présente toujours la même face à Saturne : sa rotation aurait été amortie par l'effet de marée.

Si l'on rajoute que l'on a détecté de nombreuses molécules organiques, on est alors tenté d'établir un parallèle entre la Terre et Titan, et d'établir une comparaison entre le rôle de l'eau sur Terre et celui du méthane sur Cassini.

Axes de comparaison	Terre	Titan (<i>photo Cassini</i>)
Diamètre	1 T	0,4 T
Composition de l'atmosphère	78 % N ₂	98 % N ₂
	21 % <i>O</i> ₂	1,4 % CH ₄
Pression atmosphérique au sol	1 bar	1,5 bar
Température au sol	296 K en moyenne	93 K en moyenne
	propice à la présence	propice à la présence de
	d'eau liquide	méthane liquide
Présence de glace d'eau	Marginale actuellement	La moitié de la masse totale
Cycle fondamental	Cycle de l'eau	Cycle du méthane
Etendues liquides	Océans et lacs d'eau	Lacs d'hydrocarbures
	H ₂ O	CH_4
Pluies et ruissellement dans des vallées	H ₂ O	CH_4
Biologie et exobiologie	Vie	Nombreuses molécules organiques complexes. Etat pré-biotique ?
Activité volcanique	Oui, faible	Cryovolcanisme
Inclinaison de l'axe sur le plan de l'écliptique, donc saisons	Oui	Oui

Comparaison du rôle de l'eau sur la Terre avec le rôle du méthane sur Titan

Encelade

Encelade est l'un des 5 satellites glacés en orbite quasi circulaire autour de Saturne, qui seraient constitués d'un petit noyau rocheux, entouré de glace d'eau. Au cours de leur formation, seules les glaces d'eau se seraient agrégées, car chauffés par la proximité de la planète les autres composants gazeux auraient été vaporisés et éjectés car non retenus par la faible masse de cette lune.

Encelade est l'un des objets du système solaire les plus brillants, n'absorbant que 10% de la lumière reçue de Soleil : sa surface est donc particulièrement froide, 70 K.

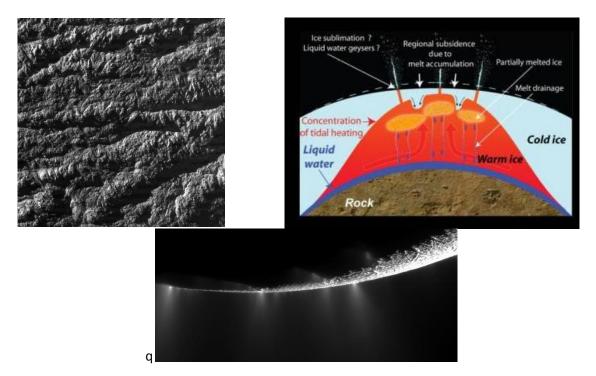


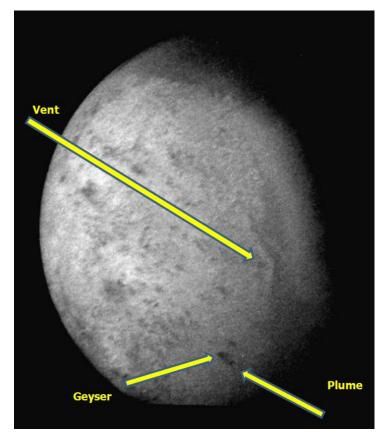
Figure et photos NASA/JPL sonde Cassini

Comme on peut le voir sur les figures ci-dessus, une partie (sud) d'Encelade est fortement crevassée, et l'on observe des éjections de matière. Une explication est la suivante : l'intérieur de ce satellite est plus chaud qu'en surface, dû aux effets de marée, comme sur d'autres lunes (voir Titan, par exemple). La couche épaisse de glace recouvrant Encelade serait alors fondue au contact de la roche, créant un océan liquide sous marin. Cet océan serait recouvert de glace chaude, partiellement fondue en surface par effet de marrée. Sous la pression interne, et à travers les crevasses, il y aurait alors création de geysers de glace fondue, on retrouve la notion de cryovolcanisme.

IV – 1 – 4 – 4 Triton, lune de Neptune

Triton, visité par la sonde Voyager II en 1989, lune de Neptune, est intéressante à plusieurs points de vue. Outre qu'elle serait gorgée d'un manteau de glace d'eau, elle serait un satellite capturé par Neptune, et serait de même origine que Pluton, en raison de fortes ressemblances. Par ailleurs, elle serait un exemple de cryovolcanisme. Sa température très basse de 38 K (un des objets les plus froids du Système solaire) lui a permis de conserver une atmosphère (0,028 mbar) d'azote moléculaire avec des traces de méthane.

Sur la photo ci-après, prise par la sonde Voyager 2 on peut voir des trainées noires qui pourraient être les ombres portées de geysers, ou de cryovolcanisme actif.



Hémisphère sud de Triton, observé par la sonde Voyager II *Photo NASA, sonde Voyager II*

IV− 1 − 5 Les objets transneptuniens

Les transneptuniens observés depuis la Terre

Les transneptuniens, objets situés dans la ceinture de Kuiper, ont probablement peu ou pas évolué depuis la formation du système solaire : ils reflèteraient alors la nature des premiers planétésimaux tels qu'ils étaient à l'origine, loin du soleil (> 40 UA) et témoigneraient de la présence de glace d'eau, amorphe ou cristalline à cette distance du Soleil.

Comparons le diamètre apparent du Soleil vu de « là-bas » :

Diamètre apparent soleil = diamètre Soleil/distance Soleil-transneptuniens = 0.01 UA/40UA = $2.5*10^{-4}$ rad

au diamètre apparent maximum de Jupiter vu depuis la Terre :

Diamètre apparent Jupiter = diamètre Jupiter/distance minimum Terre-Jupiter

- = 0.00096 UA/(5.2 1)UA
- $= 2,3*10^{-4} \text{ rad}$

Ils ont le même ordre de grandeur!

On imagine alors qu'il doit faire bien froid dans la ceinture de Kuiper, le Soleil apparaissant à peine plus gros que Jupiter vu de la Terre...

L'étude physique de ces objets ne fait que commencer, et nécessite l'utilisation des plus grands télescopes actuels, de 4 à 10 m de diamètre, du fait de leur faible luminosité. L'albédo des transneptuniens est en général compris entre 3% et 20%; ceux-ci sont donc sombres dans le ciel, sauf trois exceptions de taille : Eris (97 UA du Soleil), le plus gros des transneptuniens, un peu plus gros que PLUTON, HAUMEA et MAKE MAKE (52 UA du Soleil), un peu plus gros que QUAOAR ; ils ont tous trois un albédo supérieur à 70%.

Alors sont ils recouverts de glace fraîche, pas encore vieillie ni obscurcie par les UV du soleil ?

Pour se faire une idée de la difficulté d'observer ces objets depuis la Terre, on sait que la quantité de lumière reçue du Soleil par un astre à une distance D est proportionnelle à $1/D^2$; la quantité de lumière reçue de cet objet vu de la Terre est proportionnelle aussi à $1/D^2$, ce qui fait un retour de lumière proportionnel à $1/D^4$: le rapport de la lumière reçue d'un transneptunien² situé à 40 UA à la lumière reçue d'un astéroïde situé à 4 UA est donc de 10 000 : la lumière d'un objet transneptunien vu de la Terre, est à albédo et diamètre identiques, 10 000 fois plus faible que celle d'un objet de la ceinture principale d'astéroïdes.

Observation des transneptuniens par spectrographie

Malgré la difficulté de la spectroscopie infrarouge sur des objets de magnitude 21 ou 22, on a pu à ce jour établir la présence de glace d'eau sur une vingtaine d'objets transneptuniens, ainsi que sur une dizaine de Centaures, plus lumineux que les transneptuniens : en effet, ils sont caractérisés par une orbite qui traverse celle des planètes géantes, dont le périhélie est supérieur à 7,5 UA, et le demi grand axe est inférieur à 30 UA.

Mesure des indices de couleurs

On a pu aussi observer la palette de couleur des objets transneptuniens dont les comètes. La couleur n'est pas directement observable, mais on utilise la notion d'indice de couleur.

Le principe est le suivant : on mesure la magnitude apparente m d'un objet au travers de plusieurs filtres de calibre standard, notamment Rouge (550-800 nm), Visible (480-650) et Bleu (350-550 nm) et l'on en déduit des indices de couleurs V-R, R-B, avec lesquels on peut reconstituer une couleur, non observable directement, compte tenu de l'extrême faiblesse de la lumière reçue. Par exemple, le Soleil ayant un indice de couleur V-R = 0.36, les objets d'indice supérieur sont plus rouges que le Soleil, et plus bleus dans le cas contraire. Une fois traités et corrigés (en tenant compte notamment des variations de réflectance des objets en fonction des longueurs d'onde, ainsi que des courbes de réponse de l'œil), on a pu estimer des couleurs, comme on peut le voir sur le montage ci après :

_

² En faisant l'approximation suivante : la distance à la terre d'un transneptunien est sensiblement égale à sa distance au soleil.





Une estimation des couleurs « vraies » de quelques transneptuniens

pour comparaison, une photo en couleur réelle (Hubble) de la planète Mars

Alain Doressoundiram – Emmanuel Lellouch, Aux confins du système solaire, Belin 2008

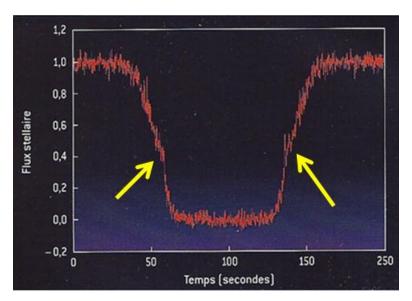
Et la surprise est venue de la grande diversité des couleurs des quelques 200 objets caractérisés de cette façon : la plupart sont rouges à très rouges, mais il y en a aussi de la couleur du Soleil, et même des bleus. Ceci peut aussi expliquer en partie les différences d'Albédo. La couleur rouge est le signe de très nombreux composés organiques déposés à la surface des transneptuniens...

IV-1-5-1 Pluton

Pluton, découverte récemment en 1930, est située à 31 UA du soleil, et elle est vue avec une magnitude actuelle de 14,4; elle a une orbite fortement excentrique (30 UA – 49 UA), inclinée de 17°, elle est rouge, près de six fois plus petite que la Terre (R = 1170 km). Son albédo moyen est très fort, ce qui a fait rapidement penser qu'elle était couverte de glace. En fait, elle est très brillante (albédo variant entre 50 et 70 %) dans son hémisphère sud et son pôle nord, avec une bande plus sombre à l'équateur. La température des régions les plus brillantes de Pluton seraient comprises entre 3,5 K à 40 K, et celle des régions les plus sombre monterait à 60 K.

La glace propre, donc fraîche, d'eau H_2O est présente à la surface de Pluton, mais semble til marginalement, à coté de glaces plus abondantes de CH_4 , N_2 , C_2H_6 et CO. Cette glace a été détectée en infrarouge, entre 1,5 et 2,5 μ m. La glace de méthane, soumise à un rayonnement UV pendant des millions d'années donne naissance à des molécules organiques pouvant être d'une certaine complexité, et qui assombrissent la surface de cette glace

La présence d'une atmosphère estimée à 1,5 bar au sol autour de Pluton a été révélée en 1988 par la méthode de l'occultation stellaire, qui montre clairement cette présence par la pente inclinée de la courbe de lumière au cours de l'occultation, voir l'image ci-après :



Observation d'une occultation stellaire de PLTON depuis l'avion KAO (Kuiper Airborne Observatory) de la Nasa, 8 juin 1988.

Alain Doressoundiram – Emmanuel Lellouch, Aux confins du système solaire, Belin 2008

On constate des ruptures de pente (flèches jaunes) à l'approche de l'atmosphère profonde, proche du sol de PLUTON est peut être due à la présence de brumes atmosphériques.

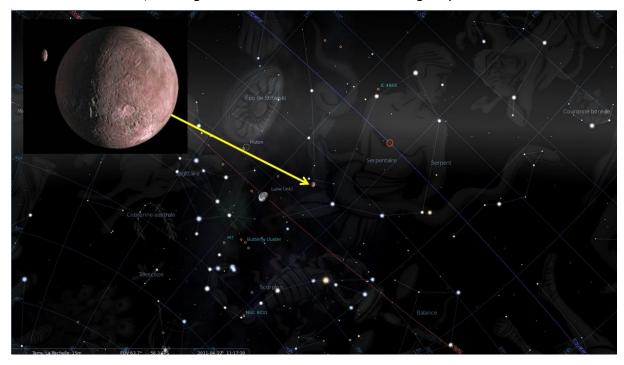
L'atmosphère de Pluton est constituée de vapeurs sublimées des glaces énumérées cidessus, avec des abondances proportionnelles à la volatilité des molécules en présence, ce qui fait supposer que l'atmosphère de Pluton est composée majoritairement d'azote. (Comme sur Terre...)

A noter que Pluton n'est pas seule, elle constitue avec Charon (12% de la masse de Pluton), Nyx et Hydra un système quadruple. Notons enfin que deux autres gros transneptuniens, CHARON et MAKE MAKE, dont les albédos sont exceptionnellement forts (≈ 70%) sont recouverts de glace d'eau fraîche.

IV – 1 – 5 – 2 Quaoar

Quaoar est un gros transneptunien de magnitude actuelle 19,1 situé actuellement à 43 UA du Soleil, (périhélie 42 UA, aphélie 45 UA, période orbitale 288 ans, inclinaison de l'orbite 8°). Le diamètre de Quaoar, égal à 1260 km est un peu plus grand que Charon mais deux fois plus petit que Pluton.

Quaoar a été découvert en 2002 par Mike Brown et Chad Trujillo, qui ont même réussi à en mesurer le diamètre grâce aux observations de Hubble indiquant un angle apparent de 0,040 d'arc. On l'a appelé Quaoar, nom du Dieu de la création dans la culture des Tongva; Quaoar porte le numéro 50 000 dans le répertoire des « petits objets du système solaire ». La surface de QUAOAR est rouge et composée de glaces d'eau et de méthane. Elle est sombre, l'albédo étant de 9%, car la glace est recouverte d'éléments organiques.



Vue d'artiste de Quaoar et de son satellite, positionnée dans le ciel le 22 avril 2011, dans la constellation du serpent, AD = 17h 29 27,86 / D = -15° 29 55,7 Ephémérides NASA/JPL, Ciel Stellarium, Quaoar vue d'artiste Planetpedia

Comme plusieurs transneptuniens, Quaoar possède un petit satellite de 100 km de diamètre, découvert en 2007. On a déjà trouvé des satellites sur plusieurs transneptuniens, et ces découvertes sont intéressantes, car en mesurant le grand axe et la période de l'orbite de ces satellites, on peut calculer la masse du système transneptunien + satellite grâce à la 3° loi de Kepler / loi de Newton :

$$T^2=\frac{4\pi^2}{GM}a^3.$$

Mais on n'a pas encore mesuré la période de ce satellite, qui permettra de calculer la masse de Quaoar.

Ce qui est particulièrement intéressant dans l'observation spectrale infrarouge de Quaoar et de quelques autres transneptuniens, c'est la présence de glace d'eau cristalline fraîche, caractérisée par le décrochement à 1,65 µm entre les deux raies d'absorption caractéristiques de la glace d'eau, autour de 1,5 µm et 2 µm, comme relevé au paragraphe III - 1 - 4 Spectre des glaces d'eau. Or la formation de glace cristalline requiert des températures entre 170 K et 273 K, cette glace cristalline s'obscurcissant par ailleurs avec le temps sous l'effet des rayons UV du Soleil, alors que la température de surface de Quaoar est beaucoup plus froide, environ 50 K, ce qui exclut l'hypothèse de la formation de glace cristalline en surface ; et une explication actuellement prise au sérieux serait celle du cryovolcanisme, c'est-à-dire de l'expulsion périodique de glace cristalline formée sous la croûte, sous l'effet de la radioactivité du cœur de Quaoar, donc à température plus chaude que en surface. Ce qui supposerait la présence en abondance d'eau à l'intérieur de Quaoar, et d'autres objets transneptuniens similaires.

IV − 1 − 5 − 3 Les Centaures, Chiron

Les Centaures, découverts seulement en 1977 par la méthode du clignotement avec le premier d'entre eux, Chiron, sont des objets provenant de la ceinture de Kuiper dont le périhélie est en deçà des planètes glacées, comme Chiron, voir même en deçà de Saturne, comme Pholus. Ils sont définis comme ayant un périhélie situé à plus de 7,35 UA du Soleil, et de demi grand axe inférieur à 30 UA.

Ces Centaures, croisant les orbites des planètes géantes, risquent soit d'être percutées, soit d'être éjectées : c'est ce qui est arrivé à la comète Shoemaker-Levy 9, sans doute un ancien Centaure, qui s'est désintégrée en heurtant Jupiter en 1994.

Ce sont des objets intermédiaires entre les transneptuniens et les comètes.

Certains Centaures se sont d'ailleurs révélés être aussi des comètes, c'est le cas de Chiron.

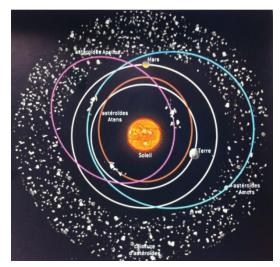
IV – 1 – 6 Les astéroïdes

Les astéroïdes parfois appelés « petites planètes », au nombre de 553 000 détectés à ce jour, sont des objets planétésimaux formés il y a 4,6 milliard d'années, et qui n'ont pas accrété ultérieurement pour former des embryons planétaires ; ils sont situés majoritairement dans la ceinture principale (2 à 3,3 UA), entre Mars et Jupiter, à la lisière de la ligne des glaces (3 UA). Ils constituent donc des objets fossiles des débuts de la formation du système solaire, et sont sans doute avec les planètes géantes et les comètes les objets les plus primitifs du système solaire. Leur diamètre est compris entre quelques dizaines de km, et un millier de km (Cérès, le plus gros connu).

Les astéroïdes du système solaire interne (en deçà de la ligne des glaces) ne contiennent pas d'eau, car l'eau qu'ils auraient pu contenir au moment de leur formation s'est évaporée depuis, ces objets étant trop petits pour retenir une atmosphère.

Par contre, certains astéroïdes du système solaire externe contiennent de l'eau sous forme de glace, dans des proportions variables ; la présence d'eau a été mise en évidence par analyse de certaines météorites tombées sur Terre et identifiées comme des fragments d'astéroïdes dont la trajectoire croisait la Terre, et qui se sont brisées en pénétrant dans l'atmosphère.

Ces derniers auraient largement contribué, en heurtant la Terre, à l'enrichir en eau. On peut voir sur la figure ci-après les orbites des principales familles d'astéroïdes, et les images de quelques spécimens.



Orbites des principales familles d'Astéroïdes : La famille des Atens croisent périodiquement l'orbite de la Terre, et ont dû contribuer à l'apport d'eau sur Terre. Thérèse Encrenaz, A la recherche de l'eau dans l'Univers, Belin 2004



Montage représentant divers astéroïdes obtenus à partir d'images de sondes spatiales de la NASA, entre 1991 et 2001

Alain Doressoundiram – Emmanuel Lellouch, Aux confins du système solaire, Belin 2008

Jusqu'à présent, on n'avait jamais observé d'eau directement sur des astéroïdes du système solaire externe : c'est chose faite récemment, et pour la première fois, comme le rapporte un article de la revue « *Nature* » du 29 avril 2010, relative à l'astéroïde THEMIS 24.

De la glace d'eau aurait été découverte sur THEMIS 24, gros astéroïde de 200 km de diamètre, en orbite dans la ceinture principale, dont l'aphélie est égale à 3,545 UA et le périhélie est égal à 2,715 UA, : donc en bordure extérieure de la ligne des glaces (située à environ 3 UA du Soleil : il était donc inattendu de trouver encore de la glace pérenne à cette distance. Non seulement de la glace d'eau d'ailleurs, mais aussi une couche de composés organiques. Une explication parmi d'autres serait l'existence d'un réservoir d'eau à l'intérieur...

Cette découverte conforte l'idée que certains astéroïdes recouverts de glace auraient joué le même role que les comètes dans l'apport d'eau sur Terre.

IV – 1 – 7 Les comètes

La plus célèbre, bien sûr, c'est la comète de Halley...

La Comète de Halley, qui revient tous les 76 ans





Premières images en 1066, le long de la tapisserie de Bayeux, images inquiétante : peu après son apparition, Harold sera vaincu par Guillaume le Conquérant lors de la bataille d'Hasting.

LESIA, OBS. P.M.

Photo plus récente, datant de 1986, prise lors du survol de la comète par la sonde Giotto

Thérèse Encrenaz, A la recherche de l'eau dans l'Univers, Belin 2004

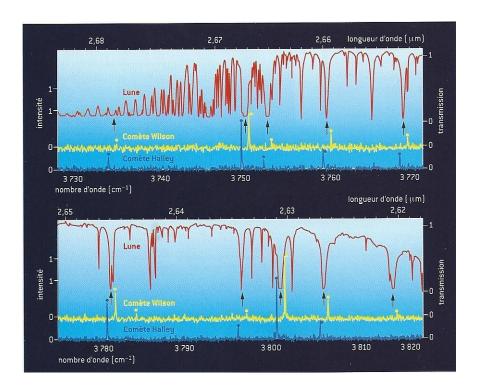
La compréhension de la nature physique des comètes est très récente, et date de 1950, lorsque l'astronome américain Fred Whipple imagina un modèle des comètes, toujours en vigueur de nos jours, les décrivant comme des objets primitifs, des agglomérats de glaces proto-solaires formées dans le milieu interstellaire. Ces glaces sont constituées majoritairement d'eau glacée (70 à 90%) et de poussières de roches (qualifiées de boules de neige sales par Fred Whipple). On sait donc maintenant qu'elles sont gorgées d'eau glacée, qui se subliment en vapeur d'eau s'échappant au passage au périhélie de leur orbite, au voisinage du Soleil, une fois franchie la ligne des glaces à 3 UA. A noter que s'agissant de petits corps de quelques km d'envergure au plus, les comètes n'ont pas subi de transformation interne due à la gravité, et restent donc intacte depuis leur formation. Pour la même raison, elles sont difformes et non sphériques, à l'opposé des objets plus grands du système solaire.

La vapeur d'eau des comètes

A l'approche du périhélie, la glace des comètes se sublime en vapeur d'eau : la première mise en évidence de ce phénomène date de 1985 par l'astronome M. Mumma, en observant

des raies dans la bande spectroscopique fondamentale, à partir d'un télescope de 90 cm, porté par un avion stratosphérique de la NASA volant à 14 000 m d'altitude.

Ce qui est intéressant dans ces observations, est que normalement les raies de la vapeur d'eau cométaire devraient être masquées par les raies d'absorption de la vapeur d'eau terrestre : or les comètes, à l'approche de leur périhélie ont une vitesse significative par rapport à la Terre, et donc par effet Doppler-Fizeau, les raies cométaires sont légèrement décalées par rapport aux raies de l'atmosphère terrestre, et sont donc visibles. Sur les graphiques suivant, la vitesse relative vue de la Terre de la comète Wilson était de – 47 km/s, et celle de la comète de Halley était de + 35 km/s : ceci a entrainé un léger décalage vers le bleu pour la comète de Halley. Ce que l'on observe très bien sur le graphique suivant :



On voit nettement le décalage vers le bleu du spectre de la comète de Wilson (pics jaunes à droite des flèches noires des raies d'absorption terrestre) et le décalage vers le rouge du spectre de la comète de Halley, pics bleus à droite des flèches noires Thérèse Encrenaz, A la recherche de l'eau dans l'Univers, Belin 2004

En effet, si l'on reprend les équations décrivant l'effet Doppler-Fizeau, le décalage spectral vers le rouge z s'exprime en fonction de la longueur d'onde par la relation :

$$z = (\lambda - \lambda 0) / \lambda 0$$

Et si V est la vitesse relative Terre/comètes, c la vitesse de la lumière :

V = c z, si z est petit, ce qui est bien sûr notre cas,

Soit un décalage de

$$(\lambda - \lambda 0) = \lambda 0 * V/c$$

Alors pour la comète de Wilson, on trouve un décalage vers le bleu de :

$$(\lambda - \lambda 0) = -2,66 \times 47 / 2,99 \times 10^5 = -4,3 \times 10^{-4} \mu m$$

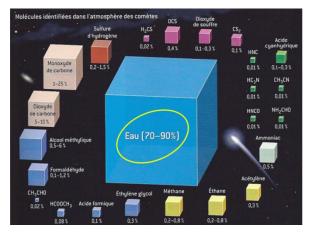
Et pour la planète de Halley, on trouve un décalage vers le rouge de :

$$(\lambda - \lambda 0) = 2,66 \times 35 / 2,99 \times 10^5 = 3,1 \times 10^{-4} \mu m$$

Ce que l'on constate bien sur le graphique ci-dessus.

- La glace des comètes

Les comètes sont composées de glace amorphes au delà de la ligne des glaces, qui se cristallisent en approchant du Soleil. Mais peut être conservent-elles un peu de glace amorphe, qui conserverait des substances organiques, qui sont au contraire chassées par la glace cristalline. Ces substances organiques pourraient ensuite atterrir dans l'atmosphère terrestre. Cette hypothèse, non encore vérifiée, serait particulièrement intéressante, s'agissant de molécules primitives... La diversité des molécules découvertes sur les comètes est surprenante, comme on peut l'observer sur le montage ci-dessus :



La glace d'eau dans les comètes est largement majoritaire, mais quelle diversité dans les autres molécules!

Alain Doressoundiram – Emmanuel Lellouch, Aux confins du système solaire, Belin 2008

La glace d'eau n'a été vraiment mise en évidence incontestable qu'en 1988, par le satellite ISO observant la comète Hale-Bopp dans la bande 45 µm dans l'infrarouge lointain. La signature est celle d'une glace cristalline, donc formée à une température supérieure à une centaine de Kelvin

En fait, il faudra attendre les premières observations de la sonde ROSETTA qui atteindra la comète Churyumov-Gerasimenko en 2014 pour en savoir plus sur la glace cométaire; notamment, trouvera – t'on des clathrates sur les comètes (*voir paragraphe II – 2 – 2*)?

De nombreuses analogies entre la constitution des comètes et celle du milieu interstellaire fait penser que les comètes ont été formées à partir de particules du milieu interstellaire : notamment une analogie relative aux abondances relatives des glaces, dont les glaces d'eau. Le rapport D/H = 3.10^{-4} évalué sur les comètes est environ deux fois plus élevé que dans les océans de la Terre et quinze fois plus élevé que dans la nébuleuse planétaire, mais comparable au rapport D/H relevé qans le milieu interstellaire. C'est ce qui a fait dire que

l'eau des océans ne pouvait venir des seules comètes, mais aussi des astéroïdes recouverts de glace, comme THEMIS 24 (voir paragraphe IV - 1 - 6).

Ceci nous conduit la recherche de l'eau dans le milieu interstellaire et des atomes d'hydrogène ambiant.

IV – 2 Dans le milieu interstellaire et dans les étoiles

L'eau dans le milieu interstellaire

La recherche de l'eau dans le milieu interstellaire est récente : en 1951, les premiers radioastronomes avaient détecté de l'Hydrogène neutre, grâce à une transition de faible intensité, à $\lambda=21$ cm ; sur cette base, un astronome américain, Charles Townes, avait prédit la présence d'eau dans le milieu interstellaire, ainsi que celle d'hydrogène atomique H et du radical OH.

Plus tard, en 1962, les radioastronomes Barrett et Weinreb ont détecté le radical OH à λ = 18 cm, sous forme de plusieurs raies intenses et distinctes, phénomène attribué à l'effet maser (microwave amplifier by stimulated emission of radiations), attribué au rayonnement cosmique, provoquant l'apparition de raies intenses d'émission par le radical OH.

Enfin en 1969, le même Charles Townes et son équipe confirment la présence d'eau en milieu interstellaire en détectant directement de la vapeur d'eau dans des régions de formation stellaires de notre galaxie, à $\lambda = 1,35$ cm.

Et c'est le satellite ISO (infrared Space Observatory) de l'ESA, grâce à ses spectromètres couvrant la bande spectrale de $2 \mu m$ à $200 \mu m$ qui a permis de confirmer définitivement la présence d'eau sous forme de vapeur et de glace dans le milieu interstellaire de notre galaxie, mais d'ailleurs aussi dans les autres galaxies.

Les observations ont montré la présence de glace cristalline autour d'étoiles jeunes ou en fin de vie, alors que l'on s'attendait à ce que la glace, déposée sur les grains du milieu interstellaire soit amorphe, car en milieu très froid : ceci montre que la température a été suffisamment élevée au moment de la création de cette glace (> 100 K).

L'abondance de l'eau dans le milieu interstellaire est très variable : par exemple, dans la nébuleuse d'Orion, l'abondance d'eau par rapport à l'hydrogène serait de 10^{-4} ou 10^{-5} .

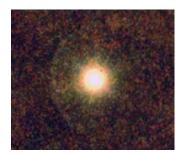
Notons enfin l'enrichissement dans un rapport de 4 à 20 du rapport D/H dans les cœurs chauds d'étoiles en formation, par rapport à la valeur mesurée dans notre nébuleuse solaire primitive (D/H = $2*10^{-5}$): or on attendrait plutôt de trouver cet enrichissement dans un milieu très froid. Ceci impliquerait que cet enrichissement soit antérieur à l'effondrement des cœurs stellaires chauds.

L'eau dans les étoiles

ISO a confirmé la présence de vapeur d'eau dans des étoiles évoluées, comme Mira (étoile de la constellation de la Balance, située à 419 al, magnitude absolue 0,91). On avait déjà détecté des « masers », voir ci-dessus, mais ISO a détecté des raies d'émission correspondantes à des températures de 500 K à 1000 K.

• Cas de l'étoile géante CW – Leo

Cette étoile géante de notre galaxie serait une usine à créer de l'eau! Découverte récente grâce à la mission Herschel de l'ESA (source : site officiel : http://www.herschel.fr/fr/herschel/actualites.php?id news=146)



Etoile IRC+10216 CW-Leo Site et Photo ESA

Cette étoile carbone géante, de magnitude apparente 11, située dans la constellation du Lion, à environ 500 al de la Terre, est l'objet le plus lumineux dans le ciel en observation dans la bande infrarouge lointain à 10 µm. Elle pèserait entre 1,5 et 4 masses solaires ; c'est une étoile jeune (10 000 à 30 000 ans), mais géante (100 fois le diamètre du Soleil), donc à durée de vie courte : elle a déjà brûlé tout son hydrogène, et produit maintenant du carbone, et deviendra dans le futur une naine blanche. Elle est entourée d'un épais nuage de poussière, qui absorbe toutes les radiations visibles et ne réémet que des rayonnements infrarouges. L'observation par les caméras Pacs, dans la gamme 60-210 µm et Spire dans la gamme 200-650 µm du satellite Herschel a dévoilé une abondance de vapeur d'eau dans son atmosphère, à une température comprise entre 73 K et +527 K, donc bien trop chaude pour avoir été produite par des comètes se rapprochant aussi près de l'étoile.

L'explication de la présence d'eau serait la suivante : le rayonnement ultraviolet des étoiles situées autour de CW-Leo pouvant percer le nuage de poussière, aurait brisé des molécules de monoxyde de carbone et de monoxyde de silicium, libérant ainsi des atomes d'oxygènes, qui auraient alors formé des molécules d'eau au contact de l'hydrogène.

IV - 3 Dans les autres galaxies

La première détection de vapeur d'eau dans une galaxie a été effectuée grâce à la radioastronomie millimétrique, par une équipe de l'Observatoire de Paris menée par Fabienne Casoli (Sources : Thérèse Encrenaz, A la recherche de l'eau dans l'Univers, Belin 2004 ; F Casoli et al., Astron Astrophys, 282, 716, 1994)

La galaxie Iras 10214+4724, très lointaine est aussi l'une des plus lumineuses ; sa luminosité est égale à 10^{14} fois la luminosité du Soleil. Elle contiendrait une masse d'hydrogène moléculaire comprise entre 2 et 6 * 10^{11} masse solaire.

Le décalage vers le rouge d'une galaxie très lointaine, (Iras 10214+4724, située à 1,5 milliard d'al), a permis de détecter la signature de la vapeur d'eau, normalement invisible à travers l'atmosphère terrestre dans sa longueur d'onde réelle.

La transition observée de la vapeur d'eau, à la fréquence 752 GHz ($\lambda 0=399 \mu m$) apparaissait en fait à 229 GHz, ($\lambda=1310 \mu m$) grâce à l'effet Doppler-Fizeau, soit un red shift z :

$$z = (\lambda - \lambda 0) / \lambda 0$$

$$z = 2,983.$$

Or on voit bien sur la figure « Transmission de l'atmosphère terrestre dans le domaine radio, millimétrique et submillimétrique » (chapitre III - 1) que l'atmosphère est totalement opaque à la fréquence 752 GHz, et transparente à la fréquence 229 GHz.

Cela montre que notre galaxie n'a pas le monopole de la création d'eau, et que cette création est intervenue tôt dans le processus d'évolution des galaxies, car il s'agirait d'une jeune galaxie elliptique en formation.

Une dizaine d'autres objets extragalactiques ont révélé la présence de vapeur d'eau, par la raie à 22 GHz (λ = 13 mm).

CHAPITRE V — PEUT ON TROUVER DE L'EAU LIQUIDE EN SURFACE HORS DE LA TERRE ?



Ce télescope de l'Observatoire de Haute Provence, le T193, est célèbre et restera historique : c'est là que deux astronomes suisses, Mayor et Queloz ont décelé en 1995 la première exo planète reconnue par la communauté scientifique, à l'aide de l'instrument ELODIE

Photo Jacques Sauguet, stage à l'Observatoire de Haute Provence, juillet 2010

Jusqu'à présent, nous n'avons pas trouvé d'eau liquide en surface dans le système solaire ailleurs que sur la Terre.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser aux exoplanètes, dont on a déjà confirmé l'existence de plus de 550 à la date de ce mémoire...

Nous décrirons ce qui est considéré comme la zone d'habitabilité des exoplanètes, en d'autres termes aux conditions dans les quelles une forme de vie pourrait se développer.

Et on verra que parmi les quelques familles d'exoplanètes, on trouve la famille des « super Terres » !

Nous focaliserons sur une exoplanète particulière située à 40 années-lumière, objet actuellement de l'intérêt des chercheurs du monde entier...

Enfin nous passerons en revue les principaux programmes spatiaux internationaux, relatifs à la recherche de l'eau dans l'univers.

V – 1 De l'eau sur des exoplanètes ?

- Recherche des exoplanètes

On a vu dans les chapitres précédents que l'on trouve de l'eau dans pratiquement tous les corps du système solaire, le plus souvent sous forme de glace, et lorsque l'on ne trouve pas d'eau, on trouve des traces d'abondance d'eau dans le passé. Par contre la Terre est le seul objet du système solaire qui contienne de façon certaine de l'eau liquide, et ou cohabitent en surface et dans l'atmosphère les trois états de l'eau.

Et on sait maintenant que cette situation tient d'une part à l'histoire de la formation de le Terre, et d'autre part de sa distance au Soleil. Et l'on sait aussi qu'une faible variation de cette distance aurait suffit pour que cette cohabitation des trois états n'existe pas.

Et en corollaire, la Terre est la seule, dans le système solaire à abriter la vie, même si on cherche toujours des trace d'organismes vivants dans un lointain passé de la planète Mars, et si on soupçonne Europe, satellite de Jupiter, de peut être contenir de l'eau liquide sous la couche de glace, et pourquoi pas des organismes cellulaires vivants.

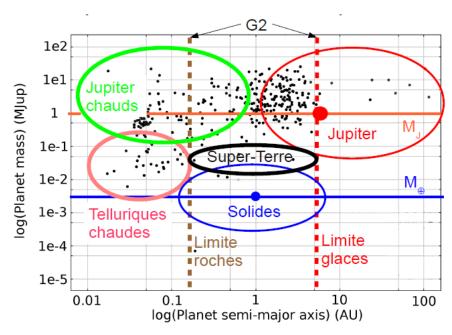
Cette dernière remarque introduit bien l'enjeu de la nouvelle aventure de recherche des exoplanètes dans notre galaxie, recherche accélérée depuis la découverte de la première exoplanète depuis l'Observatoire de Haute Provence, en 1995 (autour de l'étoile 51 Pegasi) : l'enjeu est bien sûr de déceler des exoplanètes susceptibles de receler de l'eau liquide, et donc susceptibles d'abriter une forme de vie...

Il existe au moins 5 méthodes pour détecter des exoplanètes, mais la plupart des découvertes sont dues à trois méthodes :

- Mesure de la vitesse radiale de l'étoile perturbée par le mouvement orbital de sa ou ses planètes,
- Transit de la planète devant son étoile et de l'étoile devant sa planète, possible quand le plan orbital est vu quasi perpendiculairement de la Terre
- Astrométrie, mais cette méthode est délicate en raison de la très grande différence de luminosité de la planète et de son étoile ; des instruments munis d'un coronographe ont pu être utilisés pour masquer l'étoile

L'une des premières surprises de la découverte de nombreuses exoplanètes depuis 1995 a été de s'apercevoir qu'il existait des systèmes planétaires très différents de notre système solaire, constitués notamment de « grosses Jupiter » orbitant très près de leur étoile, plus près même que ne l'est Mercure de notre Soleil

Le tableau ci-après montre la distribution des quelques 400 premières exoplanètes détectées, classées par leur masse (unité : masse de Jupiter) et par le demi grand axe de leur orbite (unité : UA) : On décèle une large majorité de « Jupiter » et encore bien peu de « Terres »...



Distribution masse fonction du demi grand axe des 400 premières exoplanètes découvertes ; Les limites « roches » et « glaces » sont celles du système solaire

Raphaël Galicher, DU ECU, janvier 2010

A la date du 27 mai, le nombre d'exoplanètes découvertes en était à 552 (source (encyclopédie des Planètes extrasolaires, CNRS/LUTH - Observatoire de Paris)

Sans compter les « candidates exoplanètes » déjà identifiées par le télescope spatial KEPLER ($voir\ paragraphe\ V-2-1$), qui a déjà dénombré 1235 par la méthode des transits, dont 16 confirmées.

Zones d'habitabilité (donc pouvant receler de l'eau liquide à leur surface) des exoplanètes

Dans quelles planètes peut –on s'attendre à trouver une vie biologique?

En fait, la recherche d'une forme de vie en dehors du système solaire s'apparente beaucoup à la recherche d'eau liquide à la surface d'une planète extrasolaire ; en effet :

- il faut un milieu liquide, l'eau étant le liquide le plus prometteur, grâce à ses caractéristiques physiques et chimiques particulières, décrites au paragraphe II 2.
- Il faut une source d'énergie « noble », à entropie (mesure de la dégradation de l'énergie d'un système) très basse, sous forme non thermique, la meilleure d'entre elle connue à ce jour étant l'énergie du rayonnement d'une étoile.

Les deux exigences ci-dessus conduisent à la recherche d'une planète située à une distance de son étoile telle que sa température de surface soit comprise entre 300 K et 400 K ; elle doit être suffisamment massive pour ne pas laisser s'échapper la vapeur d'eau, mais pas trop pour ne pas retenir aussi l'hydrogène, dont une atmosphère épaisse atténuerait la lumière de son étoile.

Rappelons en effet qu'en raison de l'agitation thermique, une molécule de gaz de masse molaire m, dans une atmosphère de température T, a une vitesse thermique Vt :

 $Vt = k * (T/m)^1/2$. (m H_2O vapeur = 18 g/mol, m $H_2 = 2$ g/mol)

D'autre part, chaque planète de rayon R et de masse M a une vitesse de libération Vlib :

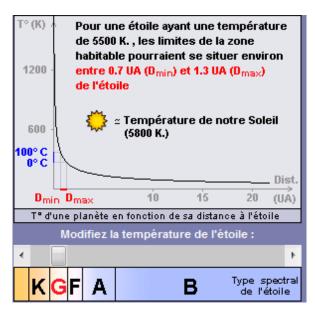
Vlib = $(2GM/R)^1/2$ (G étant la constante de gravitation universelle)

Et lorsque Vt < Vlib, les molécules de gaz restent sur la planète, et au contraire lorsque Vt > Vlib elles s'en échappent.

Sur Terre, Vlib = 11,2 km/s

Cela conduit à la recherche des planètes situées à une échelle de distance à son étoile compatible avec l'échelle de température de surface espérée, et satisfaisant les conditions Vt < Vlib énoncées ci dessus:

Pour une étoile de type Soleil tel qu'il brille aujourd'hui, cette zone est située entre 0,7 et 1,3 UA, comme on peut le voir sur la courbe ci-dessous; Elle est inférieure pour une étoile moins lumineuse, et supérieure pour une étoile plus lumineuse (Voir en annexe VII – 2 « évolution de cette zone pour les étoiles de dimensions différentes de celles du Soleil »).



« zone habitable » susceptible d'eau liquide, autour du Soleil Site http://media4.obspm.fr/exoplanetes

Les différentes considérations ci-dessus montrent que pour savoir si une exoplanète est susceptible de receler de l'eau liquide, il faut accéder (au minimum...) aux paramètres suivants

- Masse de la planète
- Rayon de la planète
- Demi grand axe de l'orbite
- Température de l'étoile

- Il y a peut-être de l'eau liquide dans le système planétaire de l'étoile GLIESE 581

Cette naine rouge est l'objet de toutes les attentions, car au moins une de ces planètes pourrait contenir de l'eau liquide. Notons que 80% des étoiles de notre galaxie sont aussi des naines rouges.

Découvert en 2007, le système planétaire de l'étoile GLIESE 581 est constitué de au moins 4 planètes, Gliese 581 b, c, d et e. L'étoile est la 87° étoile connue la plus proche de la Terre, de masse 0,31 masse solaire, située à 20,4 al, de type spectral M2,5V, donc de température voisine de 3500 K.

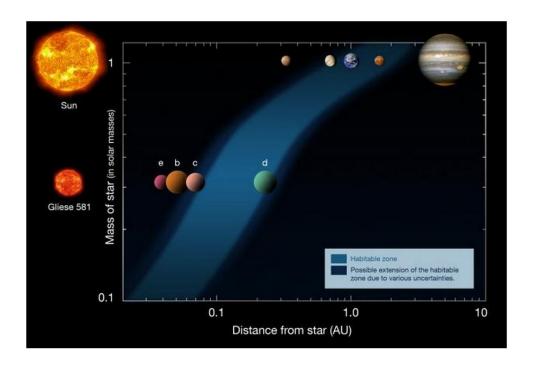
L'étoile est située dans la constellation de la Balance aux coordonnées équatoriales suivantes :

Ascension droite: 15 h 19mn 26s

Déclinaison : -07° 43′ 20″

Le positionnement des quatre planètes citées est bien mis en évidence dans le montage cidessous, ou l'on voit que l'exoplanète Gliese 581 d est située en bordure « froide » de la zone habitable définie plus haut. Lors de sa découverte en 2007, cette planète avait été jugée trop froide, mais elle a été repositionnée récemment par une équipe d'astronomes franco-suisse-portugaise : Institut National des Sciences de l'Univers - CNRS pour la France, et pour la Suisse, parmi d'autres, Michel Mayor et Didier Queloz, découvreurs de la première exoplanète en 1995.

Cette même équipe a aussi mis en évidence la planète Gliese 581 e.



La zone dite "habitable" pour l'étoile Gliese 581 et le positionnement des différentes exoplanètes b, c, d et e.

Cette découverte marque aussi une avancée dans la chasse aux exoplanètes : la grande majorité des premières centaines d'exoplanètes trouvées jusqu'alors sont des géantes gazeuses, 100 fois plus massives que la Terre (*voir plus haut « Distribution masse fonction du demi grand axe des 400 premières exoplanètes découvertes »*).

En effet, trois de ces quatre planètes telluriques sont dans la catégorie des « super Terres », dont la masse est inférieure à 10 fois la masse terrestre M_T :

$$M_b = 16 M_T$$

$$M_c = 7 M_T$$

$$M_d = 7 M_T$$

$$M_e = 5 M_T$$

Cette avancée a été rendue possible grâce au spectrographe HARPS monté sur le télescope de 3,6 m de diamètre de l'ESO à l'observatoire de La Silla au Chili. La méthode utilisée a été la mesure de la vitesse radiale de l'étoile perturbée par le mouvement orbital de ses planètes.

Cette exoplanète rocheuse vient de faire l'objet d'une nouvelle étude menée par Robin Wordsworth et François Forget du Laboratoire de météorologie dynamique (CNRS/UPMC/ENS/Ecole Polytechnique) de l'Institut Pierre-Simon Laplace à Paris, publiée le 12 mai 2011 :« Gliese 581d is the first discovered terrestrial-mass exoplanet in the habitable zone". R.D. Wordsworth, F. Forget, F. Selsis, E. Millour, B. Charnay, J-B. Madeleine, The Astrophysical Journal Letters, 12 mai, 2011.

Gliese 581 d serait une exoplanète rocheuse, 2 fois plus volumineuse que la Terre et 7 fois plus massive, recevant 3 fois moins d'énergie de son étoile que la Terre. Par contre, située beaucoup plus près de l'étoile, elle aurait subi d'importantes forces de marée, amortissant sa rotation propre jusqu'à la rendre syncrone de sa période orbitale, et de ce fait elle présenterait toujours la même face à son étoile : la moitié de la planète serait alors en permanence dans l'ombre. Ceci faisait penser qu'une atmosphère n'aurait pas pu se maintenir, l'eau et cette atmosphère éventuelle se condensant intégralement du coté froid de la planète.

La nouveauté réside dans une nouvelle approche de ces chercheurs : ils ont modélisés le comportement d'une atmosphère planétaire, avec des hypothèses de nombreux gaz différents : et ils ont trouvé qu'avec une atmosphère épaisse de dioxyde de carbone, et compte tenu de la lumière rouge de l'étoile Gliese, on pouvait atteindre des températures suffisamment élevées à la surface de la planète, pour permettre la formation d'océans, de nuages et de pluies.

Cette équipe a proposé de faire de nouvelles observations avec les télescopes les plus puissants.

Maintenant, les recherches d'exoplanètes s'orientent vers la découverte dans notre Galaxie d'une exoplanète de masse plus proche de celle de la Terre (type Gliese 581 e) à une distance la plaçant dans la zone habitable (type Gliese 581 d).

V - 2 Perspectives des grands projets de recherche nationaux et internationaux

Nous passerons en revue quelques uns des principaux programmes spatiaux en cours ou futurs contribuant à détecter l'eau dans l'Univers. Certains ont pour objectif de déceler une forme de vie extraterrestre, mais ils passent tous par la recherche de présence d'eau liquide pérenne hors de la Terre et nous intéressent donc aussi dans le thème principal de ce mémoire

On peut résumer ainsi ce que l'on peut attendre de la recherche spatiale grâce à ces programmes :

- Aller voir de près des lunes des planètes gazeuses, et détecter l'éventuelle présence d'eau liquide dans les profondeurs, et pourquoi pas des traces de molécules pré biotiques.
- Mieux connaitre le sol et le sous sol de Mars, et rechercher les preuves de la présence d'eau il a 3 milliards d'années et peut être des traces d'un début de développement de molécules pré biotiques, voir plus, stoppés très tôt dans l'histoire de la planète
- Découvrir de nouvelles exoplanètes dont les caractéristiques physiques et l'environnement serait propice à l'apparition d'une forme de vie, et en caractériser les propriétés de façon approfondie

V – 2 – 1 Projets en cours

CASSINI - HUYGENS



L'orbiteur CASSINI (NASA) lancé en le 15 octobre 1997 et porteur de la sonde HUYGENS (ESA) qui a atterri sur Titan) le 15 janvier 2005 ont déjà largement contribués à la connaissance de Saturne et de Titan, recouvert de glace d'eau

Mars Reconnaissance Orbiter



Mars Reconnaissance Orbiter (NASA) en orbite autour de MARS depuis le 10 mars 2006, avait entre autres pour mission la recherche d'eau pérenne sur Mars

HERSCHEL



Herschel, lancé le 14 mai 2009 par la NASA, est le plus grand télescope jamais mis en orbite : 350 cm de diamètre. Il travaille dans l'infrarouge moyen, lointain et submillimétrique (60 à 670 μ m). Placé au point de Lagrange L2, il est prévu pour fonctionner pendant 3 ans. Sa mission est d'étudier la formation et l'évolution des galaxies, et a déjà détecté de l'eau dans le milieu interstellaire.

KEPLER,



Le télescope spatial Kepler développé par la NASA a été lancé le 7 mars 2009, et placé au point L2 de Lagrange, en orbite héliocentrique pour une durée d'au moins trois ans. Sa mission est la détection d'exoplanètes par la méthode des transits.

A la date du 2 février 2011, Kepler avait déjà identifié 1235 candidates exoplanètes, et confirmé la réalité d'une exoplanète pour 16 d'entre elles. En Mai 2011, Képler avait trouvé 116 étoiles entourées de plusieurs planètes, dont 45 avec 3 planètes, 8 avec 4, une avec 5, et même 1 entourée de 6 planètes.

COROT



Le télescope spatial COROT développé par le CNES a été lancé le 27 décembre 2006 pour une mission d'une durée minimum de 2,5 ans, maintenant prolongée de 3 ans. Il est placé sur une orbite circulaire inertielle polaire à une altitude de 896 km. La ligne de visée est équatoriale, tantôt vers le centre de la Galaxie, tantôt à l'opposé. Sa mission est la détection d'exoplanètes par la méthode des transits.

COROT a détecté 15 planètes, confirmées par les observations faites depuis le sol par les spectrographes HARPS (sur le 2,60 m de l'ESO au Chili) et SOPHIE (sur le 193 cm de l'Observatoire de Haute Provence), d'une part, et le Très Grand Télescope de l'ESO au Chili d'autre part.

V – 2 – 2 Projets futurs

PLATO (PLanetary Transit and Oscillation of stars)



La mission PLATO, en cours d'élaboration, est un grand projet de l'ESA, prévu pour succéder aux missions en cours KEPLER et COROT. Son objectif est le même, découvrir et caractériser de nouvelles exoplanètes, par la méthode des transits.

PLATO caractérisera aussi la sismologie des étoiles hôtes, pour en évaluer précisément la masse, l'âge et le rayon. PLATO devrait être lancé en 2018.

ECHO (Exoplanet Characterisation Observatory)

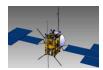


La mission ECHO, en cours d'investigation à L'ESA, aurait pour objectifs la caractérisation physico-chimique de l'atmosphère d'exoplanètes, et spécialement de « possibles Terres » : profils de température et de pression, composition chimique, notamment O_2 et O_3 , et albédo.

Placée comme KEPLER au point de Lagrange L2, elle serait équipée d'un télescope de 150 cm, et fonctionnerait dans le visible et l'infrarouge.

Elle utiliserait, comme les autres missions décrites ci-dessus, la méthode des transits.

• JGO (Jupiter Ganimède Orbiter)

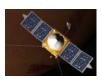


JGO faisait partie d'un programme très ambitieux de deux sondes spatiales, nommé JEO/JGO (Jupiter Europe Mission) dans lequel l'ESA devait prendre en charge la mission JGO, et la NASA la mission JEO, missions destinées à étudier les océans d'eau glacée soupçonnés sous la croute de glace d'eau de Ganymède et d'Europe. Missions prévues à l'horizon 2020.

La NASA vient d'abandonner le projet, et l'ESA continue néanmoins la mission d'exploration de Ganymède, peut être sans abandonner complètement Europe...

La sonde JGO passera plusieurs années à orbiter autour de Jupiter, en analysant l'atmosphère de Jupiter, sa magnétosphère et ses autres satellites ; puis la sonde se metre en orbite autour de Ganymède.

Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN)



Lancement prévu en fin 2013 par la NASA, elle sera la première mission consacrée à la compréhension de la haute atmosphère martienne.

Mars Science Laboratory



Lancement prévu par la NASA fin 2011. Cette mission a pour objet de découvrir si Mars a été dans le passé, voire même serait encore capable d'abriter une forme de vie.

Rosetta



ROSETTA, ESA, mission d'observation rapprochée de la comète Churyumov-Gerasimenko pendant plusieurs années, associée à un module de descente. Lancée en 2004, observations autour de 2015, année de passage au périhélie de la comète.

CHAPITRE VI – CONCLUSIONS



Photo Hubble, univers lointain

De l'eau, il y en aurait donc partout dans tout l'univers.

L'eau se révèle un vecteur essentiel et peut être unique pour la création d'acides aminés prébiotiques.

L'instrumentation moderne et les méthodes d'observation permettent de concevoir ce que sont et ce qui constituent des objets dont on ignorait même l'existence il y a encore quelques dizaines d'années : par exemple les transneptuniens.

Il y a énormément d'eau dans l'univers, dans pratiquement tous les corps célestes, mais on en manquera bientôt sur Terre...

Et il se crée encore de l'eau dans notre galaxie, à partir d'étoiles « usines à eau ».

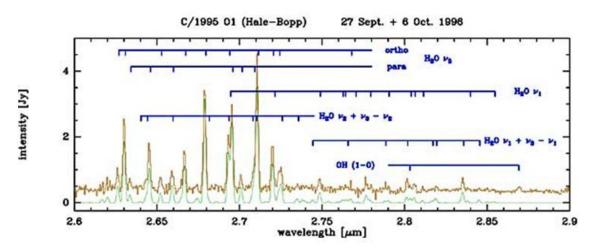
On se rapproche du moment où on trouvera des exoplanètes « super Terres» susceptibles de contenir de l'eau liquide pérenne en surface, et du moment plus lointain où on pourra les observer avec acuité.

La recherche de présence d'eau sur les exoplanètes mobilise d'innombrables chercheurs, et justifie des investissements considérables en instrumentation terrestre et spatiale, car à travers cette recherche, on espère accéder un jour (lointain ?) à la grande question : pourrait il y avoir une forme de vie telle que nous la connaissons en dehors de la Terre ?

CHAPITRE VII – ANNEXES

VII - 1 Eléments du spectre de l'eau

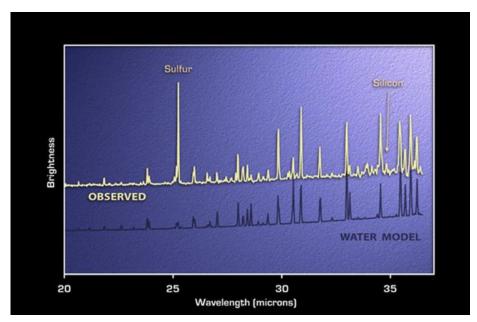
Spectre d'émission de l'eau dans le proche infrarouge (2,6 et 2,9 μm)



Spectre de l'eau observé en infrarouge dans la comète Hale-Bopp avec le satellite ISO. La courbe rouge est le spectre effectivement observé et la courbe verte celui prédit par un modèle.

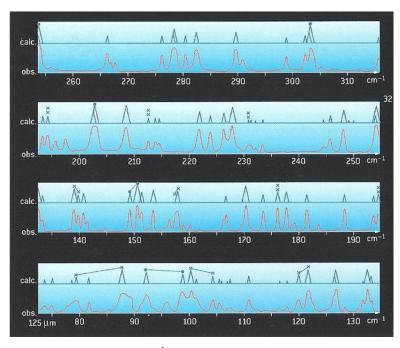
Observatoire de Paris, J. Crovisier et al

Spectre d'émission de l'eau dans l'infrarouge moyen (20 μm - 37 μm)



Modèle de spectre de la vapeur d'eau, en bleu Figure NASA – mission Spizer

Spectre d'émission de l'eau dans l'infrarouge moyen (32 μm - 77 μm)

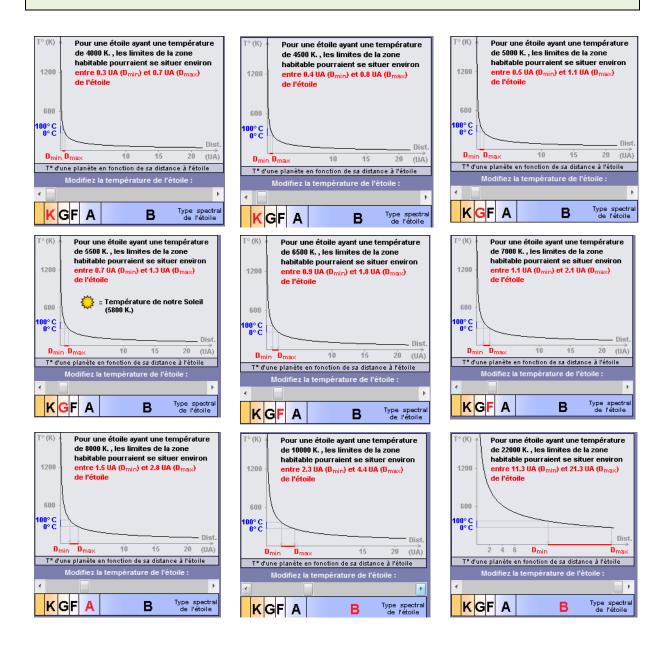


Spectre rotationnel d'émission de l'eau [32 µm - 77 µm]

Thérèse Encremaz, A la recherche de l'eau dans l'Univers, Editions Belin, 2004.

Le spectre du laboratoire (en rouge) est comparé aux valeurs théoriques des transitions rotationnelles de l'eau entre 310 et 130 cm-1 soit entre 32 et 77 µm *(d'après G. Hertzberg, Infrared and Raman spectra, Van nostrand, 1945).*

VII – 2 Exoplanètes : zones habitables



Evolution de la « zone habitable » susceptible d'eau liquide, en fonction de la température de l'étoile

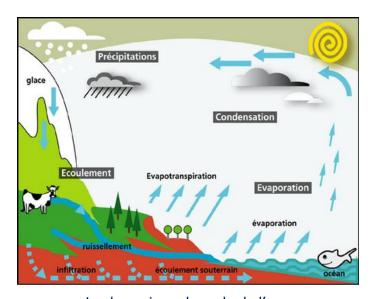
Site « http://media4.obspm.fr/exoplanetes »

VII - 3 Le cycle de l'eau sur Terre

L'eau liquide circule en permanence entre les quatre grands « réservoirs d'eau » de notre planète, constituant ce que l'on appelle l'« hydrosphère » :

- Les mers et océans
- Les eaux continentales, de surface ou souterraines
- L'atmosphère
- La biosphère

Ces échanges sont illustrés par la figure ci-dessous :



La dynamique du cycle de l'eau

En moyenne sur l'année et sur l'ensemble du globe terrestre, 65% des précipitations qui arrivent à Terre s'évaporent, 24% ruissellent et 11% s'infiltrent.

Site CNRS www.cnrs.fr

Cette circulation est alimentée par l'énergie solaire. A noter aussi quelques échanges entre l'hydrosphère et le manteau terrestre.

Par ailleurs, des molécules d'eau sont cassées en permanence par les rayonnements UV en provenance du Soleil, l'hydrogène résultant s'échappant hors de la Terre

(V thermique $H_2 > V$ libération Terre)

Ce cycle de l'eau serait invariant depuis 1 milliard d'années (estimation à partir de l'analyse des sédiments marins)

VII - 4 Le cycle du méthane sur Titan

La confirmation qu'il existe des surfaces liquides à la surface de Titan (éthane et méthane) a conforté l'hypothèse d'un « cycle du méthane », de même qu'il existe un « cycle de l'eau » sur Terre.

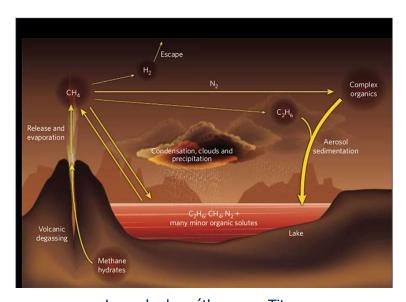
Le méthane de l'atmosphère serait en partie condensé sous forme de nuages, donnant des précipitations retombant sur le sol, tandis qu'une autre partie serait décomposée en haute atmosphère par le rayonnement solaire, laissant s'échapper de l'hydrogène.

Il y aurait un phénomène d'évaporation du méthane contenu dans les lacs, renouvelant le cycle nuages – précipitation.

Et la perte de méthane décomposé en haute atmosphère serait compensée par l'éjection de geysers d'eau glacée et de méthane, qui proviendrait d'un réservoir souterrain d'eau + méthane liquide, situé entre deux couches d'eau glacée, à une température plus chaude qu'en surface.

Des molécules organiques arrivant de l'espace par bombardement météoritique combinés aux aérosols de l'atmosphère finiraient sous forme de sédiments au sol.

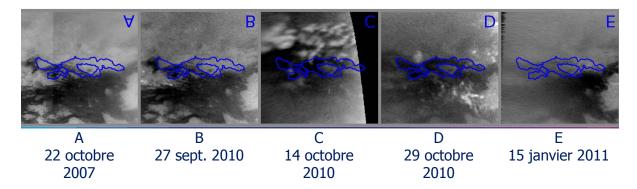
La figure ci dessous schématise ce processus :



Le cycle du méthane sur Titan

Figure de la revue Nature, recueillie sur le site de la cité des sciences à Paris.

Ce cycle peut être illustré par la séquence de photos suivantes, prises par l'orbiteur Cassini, qui mettent en évidence des précipitations de méthane.



Changements sur la surface de Titan, attribués à des pluies de méthane, images prises avec un filtre dans le proche infra rouge, 0,938 µm (sauf photo C?)

Site: http://saturn.jpl.nasa.gov

Les nuages blancs en haut des photos sont des nuages de méthane, dans la troposphère. Les nuages bas des photos sont aussi du méthane, mais dans la basse atmosphère.

- A Photo avant les tempêtes.
- B On voit apparaître un gros nuage noir à gauche
- C Un peu plus tard, on voit des changements importants à la surface de Titan ces changements s'étendant sur près de 500 000 km²
- D Après le passage de la tempête, on voit que la surface est humide (après la pluie de méthane liquide)
- E Enfin plus tard, le sol pluvieux a séché ou glacé, on ne voit plus qu'une petite surface sombre, humide

Par ailleurs, on trouvera ci après un diagramme de phase du méthane.

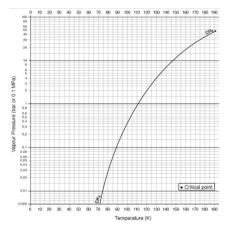


Diagramme de phase du méthane

Site de « l'air liquide »

Peu on avoir du méthane solide sur Titan ?

VII – 5 Qu'est-ce que la vie ?

Qu'est- ce que la vie ? Vaste question...

Pour rechercher s'il existe une vie extra-terrestre, il est nécessaire de disposer d'une réponse rationnelle à cette question, et de définir quelles sont les critères qui définissent la matière vivante telle que nous la connaissons. L'expression de ces critères se trouve sous des formes multiples dans la littérature, je me suis donc inspiré d'une définition contenue dans le livre de Fabienne Casoli et Thérèse Encrenaz, *Planètes extrasolaires, Belin 2005*, et de questions à des médecins, car il est apparu que les deux points de vues sont un peu différents, mais complémentaires, et pas en opposition...:

Selon les biologistes, la matière vivante doit répondre aux trois critères suivants:

- Autoreproduction, c'est-à-dire reproduction à l'identique,
- Evolution par mutation, celle-ci constituant une exception accidentelle dans la reproduction,
- Auto régulation face au milieu ambiant, ce qui assure la croissance et la conservation de l'entité vivante.

Liste à laquelle les médecins rajoutent :

• La matière vivante doit contenir de l'ARN : par exemple

La matière vivante sur Terre est organisée à partir de cellules. Les systèmes vivants utilisent tous deux types de molécules :

- Les acides nucléiques, dont les principaux sont l'ADN (acide désoxyribonucléique), en charge de la multiplication et du fonctionnement des cellules, et L'ARN (ribonucléique) les chromosomes, constitués de plusieurs molécules d'ADN, transportent l'information génétique des organismes vivants.
- Les protéines sont constituées de 20 acides aminés différents, qui ont tous été détectés à la surface de nombreux objets du système solaire, et en particulier sur des météorites ramassés sur la Terre. Ces molécules d'acides aminés sont appelés « prébiotiques.

La présence de pré-biotiques est donc une condition nécessaire mais non suffisante pour qu'il puisse exister une forme de vie, maintenant ou dans un lointain avenir : les pré-biotiques seraient apparus sur Terre il y a plus de trois milliards d'années.

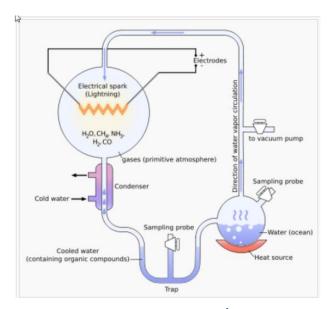
Et comme on sait que l'eau est nécessaire pour former ces molécules pré-biotiques, (voir par exemple annexe VII-6), on comprend que la recherche de l'eau liquide dans l'Univers soit la première démarche à opérer pour espérer détecter une forme de vie ailleurs que sur Terre.

En tout cas, une forme de vie telle que nous la connaissons: mais il ne s'agit que la vie dans les 4% de l'Univers auquel nous avons accès pour le moment, l'Univers baryonique...

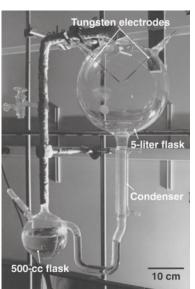
VII - 6 La célèbre expérience de Miller et Urey

En 1953, Stanley Miller et Harold Clayton Urey de l'Université de Chicago ont réalisé une expérience fondamentale qui démontre le rôle essentiel de l'eau liquide dans la génération d'acides aminés, à l'origine de la vie.

Il s'agit d'une expérience simulant en laboratoire les premiers stades de l'évolution chimique sur Terre : un mélange de gaz proche d'une atmosphère réductrice primitive terrestre supposée incluant du méthane, de l'ammoniaque, de l'hydrogène et de la vapeur d'eau, en présence d'eau liquide, est soumis à une décharge électrique simulant les éclairs d'orage fréquents à cette époque (à noter une polémique à l'époque supposant une atmosphère primitive non réductrice, à majorité de dioxyde de carbone, qui ne permettrait pas cette réaction).



Instrumentation de l'expérience



Instrumentation de l'expérience originale.

Wikipedia

Science, 2 May 2003

Le processus chimique de l'expérience est le suivant :

Lors de la première étape de la réaction, du cyanure d'hydrogène (HCN) et du formaldéhyde sont formés, ainsi que d'autres composés intermédiaires actifs (acétylène, cyan-acétylène, etc.):

 $CO2 \rightarrow CO + [O]$ (oxygène atomique)

 $CH4 + 2 [O] \rightarrow CH2O + H2O$

 $CO + NH3 \rightarrow HCN + H2O$

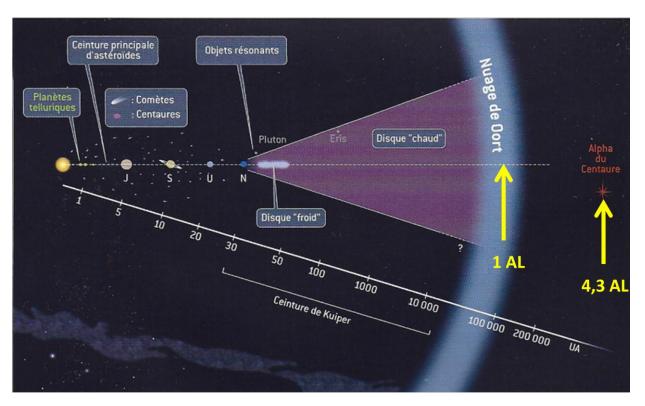
 $CH4 + NH3 \rightarrow HCN + 3 H2$

VII – 7 Missions spatiales terminées pour la recherche d'eau dans l'Univers

- **ISO** (infrared Space Observatory), ESA 1995
- **SWAS**, mini satellite NASA
- **ODIN** mini satellite Suède Canada France Finlande
 - $_{\odot}$ A noter que SWAS et ODIN sont spécialisés dans l'observation d'une transition submillimétrique de l'eau, à λ = 538 µm
- SPIZER, NASA 2003, 10 fois plus sensible qu'ISO ; explore l'infrarouge entre 3 et $180~\mu m$
- **JASON1** 2001, **JASON2** -2008, surveillance des océans terrestre, 4 agences spatiales dont le CNES
- Mars Express, lancée le 2 juin 2003 par l'ESA

VII – 8 Les dimensions du Système solaire

Le Système solaire s'étend jusqu'au nuage de Oort, autour de 1 al, à moins de 3 al de la première étoile proche de la Terre, Alpha du Centaure.



L'extension du Système solaire

Alain Doressoundiram – Emmanuel Lellouch, Aux confins du système solaire, Belin 2008

VIII REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Livres

Le Ciel, Notions d'Astronomie, Amédée GUILLEMIN, Hachette 1877

Universe, Dorling Kindersley Limited 2005 (édité aussi en Français, L'Univers, Gallimard 2005)

A la recherche de l'eau dans l'Univers, Thérèse ENCRENAZ, Belin 2004 – pour la science

Aux confins du système solaire, Alain DORESSOUNDIRAM – Emmanuel LELLOUCH, Belin 2008 – pour la science

Atmosphères planétaires, Thérèse ENCRENAZ, Belin 2000 – CNRS éditions

Astronomie, Astrophysique, Introduction, Agnès ACKER, 4° édition, Dunod 2007

La planète Mars – Histoire d'un autre monde, François FORGET - François COSTARD – Philippe LOGNOME, nouvelle édition 2006, Belin - pour la science,

Planètes extrasolaires, Fabienne CASOLI – Thérèse ENCRENAZ, édition 2005, Belin – pour la science

Périodiques

Nature, article http://www.nature.com/scitable/knowledge/library/effects-of-rising-atmospheric-concentrations-of-carbon-13254108

L'Astronomie, revue de la Société Astronomique de France N° 29, Juillet –Aout 2010 : Spécial « Y a-t-il de l'eau partout dans l'Univers ? » Science

Sites Internet

OBS. P.M.

http://www.obspm.fr/

Exoplanètes:

http://www.astrobiology.nasa.gov/exobiology

http://www.exoplanet.eu/

http://media4.obspm.fr/exoplanetes

http://exep.jpl.nasa.gov/ http://www.insu.cnrs.fr/ http://kepler.nasa.gov/

Astéroïdes

http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/ArchiveStatistics.html

Europa Jupiter System Mission (NASA/ESA)

http://www.nasa.gov/multimedia/podcasting/jpl-europa20090218.html

Mission CASSINI-HUYGENS

http://saturn.jpl.nasa.gov/index.cfm

http://www.cite-sciences.fr/

ESA Mars Express

http://www.esa.int/SPECIALS/Mars Express/index.html

NASA

http://www.nasa.gov/

ESA

http://www.esa.int/esaCP/index.html

CNES

www.cnes.fr/

CEA

http://www.cea.fr/

CNRS

http://www.cnrs.fr/

The SAO/NASA Astrophysics Data System - Centre de Données astronomiques de Strasbourg http://cdsads.u-strasbg.fr/

Bibliothèques de l'Observatoire de Paris Meudon http://sigb.obspm.fr/cgi/index.pl

Cours de l'OBSPM

DU Astronomie et Mécanique Céleste (DU AMC) DU Explorer et Comprendre l'Univers (DU ECU) Spectrographie, Chantal Balkowsky Système solaire, Alain Doressoundiram Exoplanètes, Raphaël Galicher

DU Fenêtres Sur l'Univers (DU FSU)