

LES ÉLÉMENTS VOLATILS

DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

Écrit par Léa Baubant, janvier 2023

INTRODUCTION

Les éléments volatils se caractérisent par une faible température d'ébullition. Ces éléments chimiques se retrouvent dans tout le système solaire et sont tout particulièrement abondants dans les planètes Joviennes.

Dans la liste on retrouve l'hydrogène ; l'élément volatil le plus léger et le plus abondant de l'univers. Sur Terre, on le retrouve dans l'atmosphère. C'est également un composant important de l'eau qui recouvre notre planète, mais aussi celui des composés organiques et un combustible essentiel pour de nombreux processus industriels.

Le carbone, lui aussi présent au début de cette liste, est l'un des éléments volatils le plus primordial pour la vie sur Terre car il constitue les fondations de toutes les molécules organiques. L'azote est un autre élément volatil important car il constitue environ 78 % de l'atmosphère terrestre et est un composant essentiel de tous les organismes vivants en permettant la formation d'ADN par exemple.

Ainsi, étudier la spéciation et la distribution des éléments volatils dans le système solaire, c'est étudier les mécanismes de l'apparition de la vie. On peut ainsi, par exemple, donner un aperçu de la possibilité de l'existence d'eau et d'autres substances nécessaires à la vie sur d'autres planètes. Mais ces éléments chimiques révèlent bien d'autres découvertes scientifiques de par de nombreuses observations et calculs. Ils nous permettent de déterminer les conditions dans lesquelles les planètes se forment, se distribuent et évoluent. Les études minéralogiques permettent plus spécifiquement de connaître les compositions des astéroïdes et intérieurs planétaires. La connaissance de l'origine des éléments volatils est donc la clé de voûte pour la compréhension de la formation des corps planétaires et de la vie dans l'univers.



Grande nébuleuse de Carina par Amit Ashok Kamble

Un autre moyen de comprendre les conditions du vivant est de se pencher sur les climats régnant sur les planètes. Ceci nous permet de comprendre les mécanismes de formation des atmosphères planétaires et de mieux appréhender l'habitabilité d'une planète. Là encore, les éléments volatils nous donnent des clés de réponses solides, leurs présences à la surface d'une planète étant influencée par les conditions physiques et chimiques de celle-ci.

Les éléments volatils participent fortement aux atmosphères des planètes, primitives et actuelles, et ont de fait un effet important sur le climat et les conditions météorologiques.

Par exemple sur Terre, la vapeur d'eau qui est un élément volatil, joue un rôle essentiel dans la formation des nuages et des précipitations, ainsi que dans la régulation de la température de la planète par l'effet de serre. Sur Vénus, le dioxyde de soufre contribue de manière significative à la présence d'une atmosphère épaisse et toxique créant ainsi un environnement hostile.

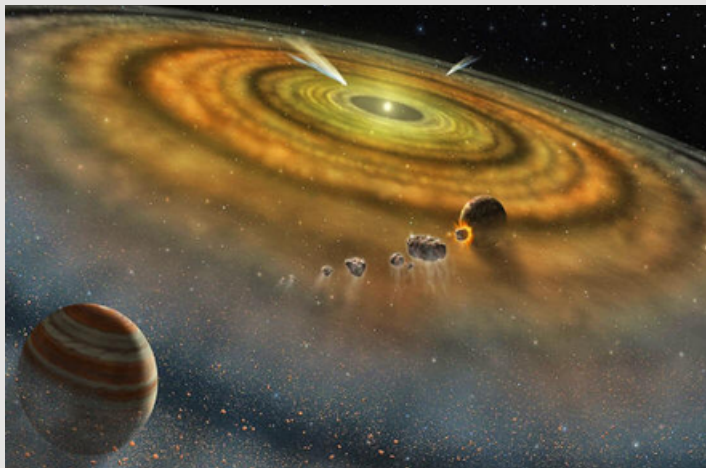
Plus largement, les mécanismes climatiques à l'échelle de l'univers et même du système solaire sont des sources d'informations qui permettent de mieux comprendre notre propre climat terrestre, enjeu central pour les prochains siècles.

On retrouve les éléments volatils sous de nombreuses formes différentes sur Terre, jouant un rôle majeur dans de nombreux processus géologiques, biologiques et surtout dans les cycles biogéochimiques. Par exemple, on sait aujourd'hui que la présence d'éléments volatils dans le manteau a un impact significatif sur les propriétés physiques et chimiques de ce dernier, ainsi que sur les processus qui s'y déroulent - la présence d'hydrogène peut par exemple affecter la rhéologie du manteau et influencer la façon dont il se déforme et s'écoule. Il semble donc important de comprendre la présence d'éléments volatils dans notre atmosphère ou bien même dans notre manteau. Leurs présences sur Terre nous donne aussi des informations importantes, notamment grâce à leurs signatures isotopiques, pour retracer l'histoire de notre planète.

Les éléments volatils renferment donc de nombreux secrets à découvrir et sont donc des outils formidables pour continuer à acquérir du savoir. L'étude des éléments volatils dans le système solaire a beaucoup progressé grâce aux récents progrès de l'exploration spatiale et de la technologie. Les missions vers les planètes intérieures et extérieures, ainsi que vers les comètes et les astéroïdes, ont fourni des données précieuses sur la composition et la distribution des éléments volatils dans notre système solaire. L'étude plus approfondie des éléments volatils restera un domaine de recherches important, car elle est un pilier pour l'avancement ainsi que pour la durabilité de notre existence et peut contribuer à notre compréhension de la vie potentielle sur d'autres planètes.

C'est donc sur les trois grands axes, introduits dans les paragraphes précédent, que portent les sujets de cet écrit.

L'approche choisie a pour but de parler de l'histoire et de la présence des éléments volatils dans l'univers, mais aussi de comprendre comment les chercheurs utilisent ces éléments comme outils de leurs découvertes.



Représentation artistique de la formation des planètes, NASA/Lynette Cook

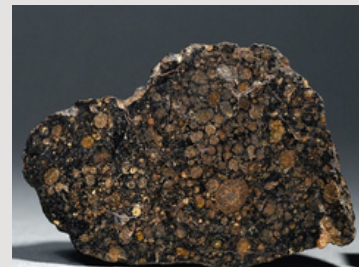
1. LES ORIGINES : DES ELEMENTS VOLATILS AU SYSTEME SOLAIRE

Comment reconstituer l'origine des éléments volatils et leur devenir au sein de notre système solaire ? La réponse se trouve notamment sur Terre, grâce aux météorites qui y tombent et qui renferment de nombreuses informations. Ces dernières, appelées chondrites, renferment des éléments volatils qui, selon leurs origines, ont des signatures isotopiques différentes.

Après avoir fait un exposé nécessaire des différentes classes de chondrites, nous verrons comment le caractère volatil d'un élément a joué un rôle central dans la distribution des planètes et comment la signature isotopique de ces éléments volatils nous permettent aujourd'hui de reconstruire l'histoire de notre système solaire.

LES CHONDrites

Certaines météorites (appelées chondrites) constituent le principal objet d'étude qui, par la connaissance des compositions chimiques des roches extraterrestres, permet de comprendre les processus physico-chimiques qui ont



NWA 2502, CV3 chondrite, Sahara

mené à leur constitution. Formées par un refroidissement rapide il y a 4,6 milliards d'années, elles renferment de nombreuses informations sur la formation et l'évolution de notre système solaire.

Les chondrites sont divisées en trois classes selon leur minéralogie, leur composition chimique et isotopique: les chondrites carbonées (CI, CM, CO, CV, CK, CR, CB, CH), les chondrites ordinaires (H, L, LL) et les chondrites à enstatite (EH, EL).

Les chondrites carbonées de type CI ont une composition en éléments réfractaires, chalcophiles et modérément volatils identique à celle de la protosphère solaire (à l'exception d'éléments volatils comme H, C, N). Ces météorites sont donc considérées comme les météorites les plus primitives identifiées à ce jour. Inversement, les chondrites CI sont aussi les plus hydratées.

LE DISQUE PROTOSOLAIRE

Il y a 4,74 milliards d'années, l'effondrement d'un nuage moléculaire géant fait de poussières interstellaires et de gaz a formé ce qu'on appelle le disque protosolaire d'où naîtra notre système solaire. Tous ces éléments s'agrègent et forment peu à peu par accréation le soleil, les planètes et d'autres objets stellaires. Pour se faire, les particules se mettent en mouvement et sont transportées dans ce disque d'accréation où elles vont rencontrer d'autres poussières. Certaines particules ont de la glace d'eau et des matières organiques qui font augmenter leurs adhérences : ceci favorise la croissance rapide d'objets décimétriques. C'est pourquoi, à des températures suffisamment basses pour éviter l'évaporation, les glaces enrichies en éléments volatils ont joué un rôle central dans la formation de planétésimaux en augmentant les coagulations de particules.

De nombreuses zones d'ombres persistent dans la compréhension de tous les événements durant les accréations planétaires. Pour mieux comprendre l'évolution et la composition des planètes, il est notamment très intéressant de se pencher sur la composition du disque protosolaire.

En effet, en fonction des compositions chimiques et des propriétés au sein de ces zones d'accréation, la présence et la préservation d'éléments volatils dans les corps célestes sera différentes. Ceci sera distinctement le cas pour les corps parents des météorites primitives.

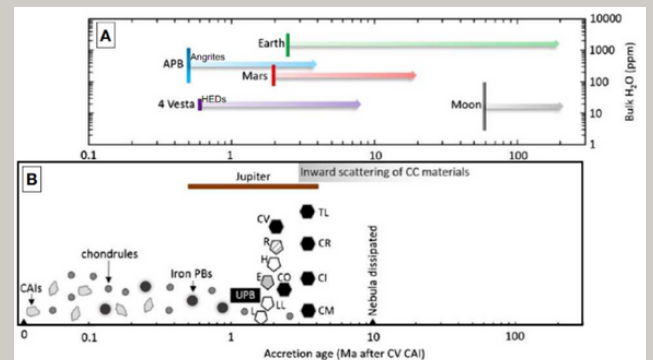
Une première différence physique notable dans le disque protosolaire est la température. En effet, il se forme en son centre une étoile qui croît de plus en plus et qui émet ainsi un gradient de chaleur décroissant vers le milieu interstellaire froid qui l'entoure.

Ainsi, les éléments chimiques vont réagir différemment. Selon leur caractère plus ou moins volatil, ils vont en effet être soit sous forme solide soit sous forme gazeuse, et ce en fonction de leur distance à l'étoile. Ainsi, une " ligne de glace " peut être définie au front de condensation de l'eau qui se situe environ à 160 k. L'azote et le carbone, deux autres éléments hautement volatils, vont se condenser non

loin puisque leurs températures de condensation se situent en dessous de 200 K. En revanche, il existe de nombreuses autres lignes de condensations selon l'espèce volatils considérée; les lignes de NH_3 , CH_4 et N_2 seront à des distances héliocentriques différentes.

Tout ceci nous indique que les éléments volatils existent nécessairement à de grandes distances héliocentriques ou bien sur des zones qui ont une température très faible .

Dans les zones au plus proche du soleil, dans la partie interne du disque protosolaire, les éléments réfractaires vont être en grande partie condensés. Les éléments volatils restent eux sous forme de gaz dans ces zones puisque les températures sont bien trop élevées. Ceci forme donc des objets fait de réfractaires, dit CAIs, très pauvre en éléments volatils. Il y aurait donc également une ligne de condensation des composés organiques réfractaires appelée "tar-line" située entre la ligne de glace et le soleil, zone où l'eau n'existe donc que sous forme de vapeur.

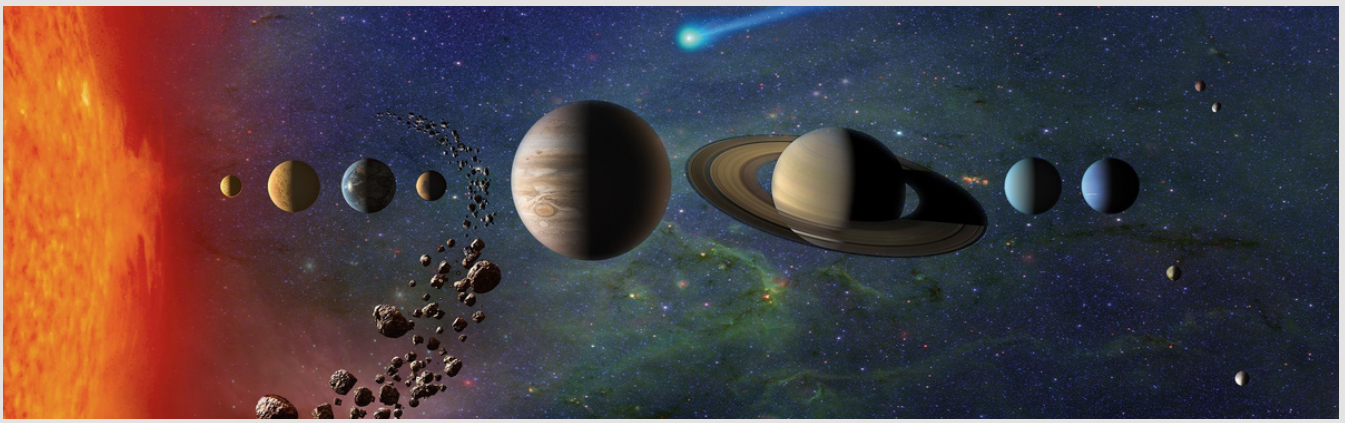


A: Teneur estimée en eau en fonction de l'âge d'accréation (Ma) de corps du système solaire.

B: Âge d'accréation (Ma) des composants des chondrites et de leurs corps parents que sont les chondrites.

Figures modifiées d'après McCubbin et Barnes 2019

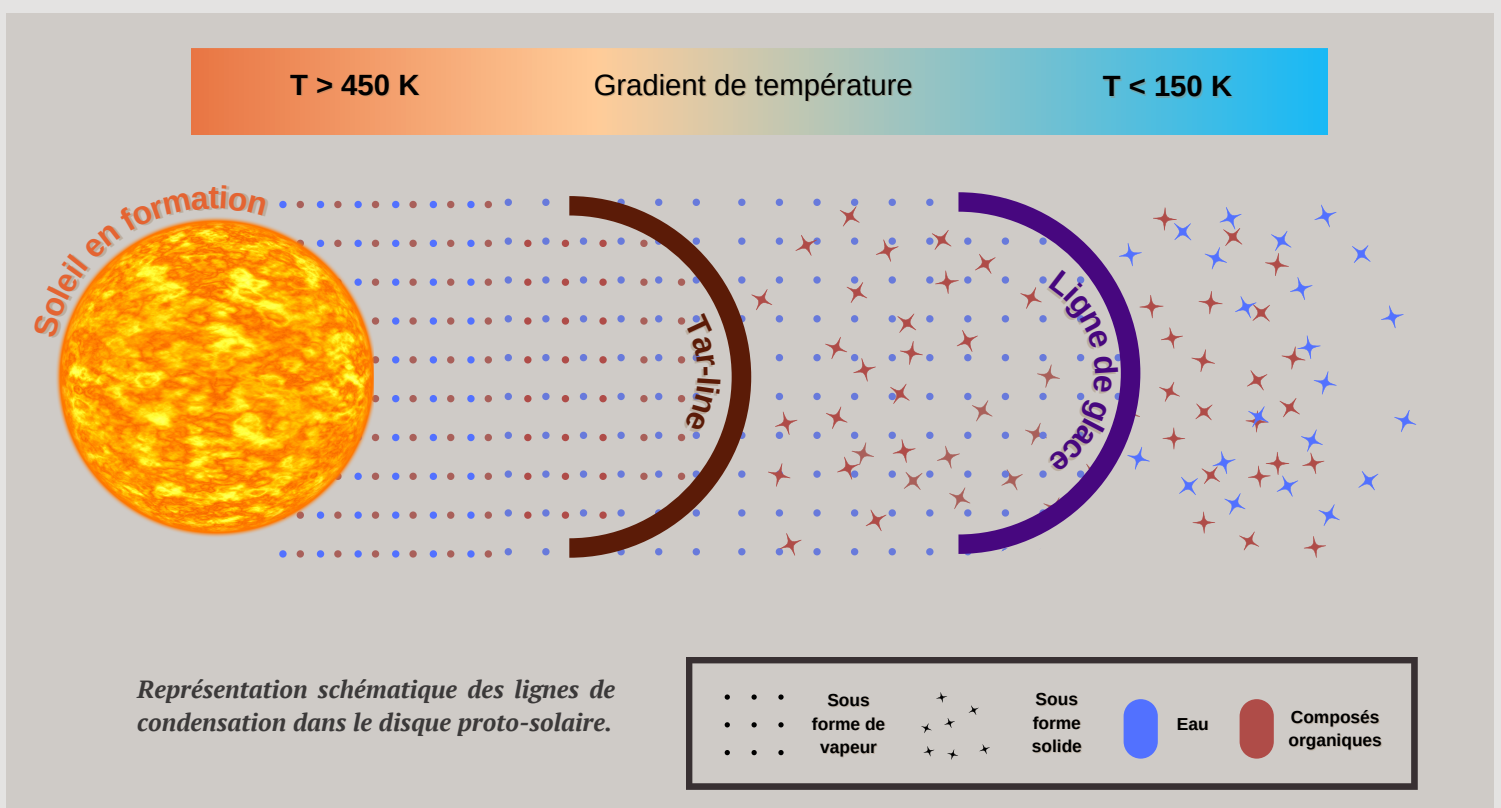
Sur la figure A, on voit bien que l'accréation de planétésimaux comme Vesta 4 et APB s'est déroulée avant la formation de planètes. On peut aussi voir qu'ils comportent des proportions moindres en eau que sur Terre mais plus que la Lune. Enfin sur la figure B, on voit clairement que les éléments réfractaires contenus dans les CAIs ou les chondrules, se sont accrétés avant de former les chondrites.



Dessin artistique des planètes du système solaire dans leurs positions actuelles (Mercure, Venus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune) , NASA

Il est maintenant facile de comprendre comment la position de ces lignes de condensation affecte directement les accrétions planétaires, ainsi que la présence d'éléments volatils dans les corps du système solaire. Cependant, les chercheurs ont mis en évidence une séparation physique entre le système solaire interne et externe qui vient également jouer un rôle sur la présence d'éléments dans les planètes. Des études isotopiques sur des chondrites ont détecté des anomalies qui soutiennent cette hypothèse et qui aurait eu comme conséquence l'inhibition du transport d'éléments volatils.

En effet, de par notamment sa taille, Jupiter aurait eu une attraction très importante pour les particules migrantes depuis les zones froides et externes du disque protosolaire vers les zones internes et chaudes de formations des planètes telluriques. Jupiter aurait donc joué un rôle dans l'appauvrissement des planètes internes en éléments volatils en bloquant les échanges et les migrations d'éléments . Les planétésimaux des planètes dites telluriques n'auraient donc pas pu piéger de volatils provenant des zones externes, lors des premiers stades d'accrétion. Cette ségrégation aurait persisté 3 à 4 millions d'années après la formation des CAIs et aurait conduit à cette dichotomie des planètes au sein de notre système solaire.



LES VOLATILS DES CHONDRITES COMME OUTIL DE COMPRÉHENSION

• L'OXYGÈNE À L'ORIGINE ...

L'oxygène est un élément abondant du Système Solaire : c'est un composant majeur de nombreux minéraux (silicates, oxydes) ainsi que des gaz (CO et H₂O principalement) qui constituent notre planète. L'oxygène est aussi un élément très abondant dans les chondrites ; il apparaît donc intéressant de se pencher sur lui pour comprendre notre système solaire et notre planète.

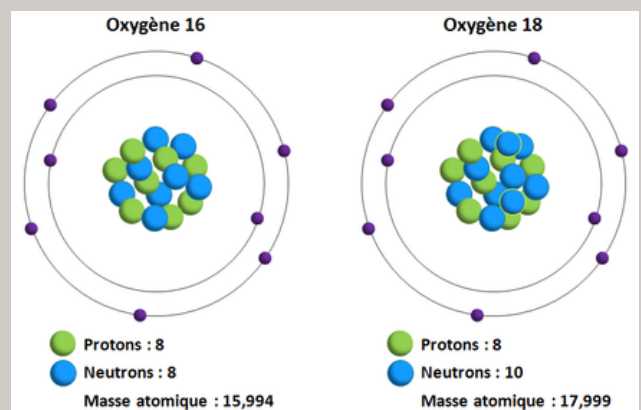
Nous avons vu qu'une classification des chondrites existe. Celle-ci est basée sur le caractère plus ou moins oxydé de ces corps, ce qui se confirme avec leurs compositions isotopique en oxygène (même si aujourd'hui aucune corrélation directe n'a été trouvée entre ces deux critères). Grâce à cette classification, des hypothèses sur ces variations de compositions ont été émises. Il se pourrait que ceci soit lié à une zonation isotopique de la nébuleuse solaire qui aurait conduit, lors de la condensation des chondrites, à des compositions chimiques différentes en fonction de leur distance au soleil.

L' EXPLICATION

En effet, l'oxygène possède trois isotopes stables (16O, 17O et 18O) qui existent en proportions différentes. Si lors de la formation du Soleil et de la nébuleuse protosolaire, la matière de départ a été homogénéisée isotopiquement, alors les compositions isotopiques de l'oxygène des matériaux du Système Solaire suivent la loi de fractionnement de masse suivante :

$$R^{17} = (R^{18})^{0.516} \text{ où } R^{17,18} = \frac{{}^{17,18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{Ech}}}{{}^{17,18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{SMOW}}}$$

En effet, le rapport 17O / 16O est deux fois moins affecté que le rapport 18O / 16O lorsque ces isotopes subissent un fractionnement (phénomène résultant d'une différence de comportement entre des isotopes d'un même élément chimique aboutissant à des rapports isotopiques variant au cours du processus).



Isotopes de l'oxygène svt.enseigne.ac-lyon.fr

Si les propriétés physico-chimiques sont principalement les mêmes entre deux isotopes du même élément, certaines peuvent légèrement varier à cause de leur différence de masse. Cette propriété est par exemple utile pour la recherche en paléoclimats.

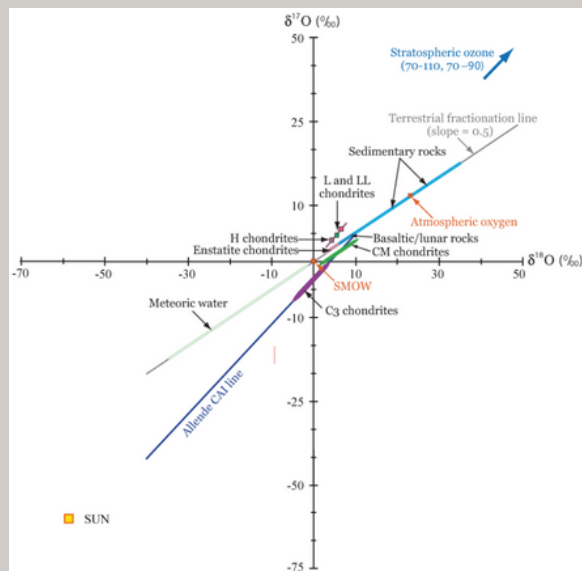
Si on se place dans un diagramme $\delta^{17}\text{O} : \delta^{18}\text{O}$, alors la loi que l'on vient d'exposer indique que les corps terrestre, mais aussi lunaire et certaines météorites, s'alignent sur une droite de pente $\sim 1/2$ passant par l'origine. L'origine des coordonnées peut être représentée par l'eau de mer - référentiel nommé SMOW (99,76 % d'¹⁶O ; 0,20% d'¹⁸O ; 0,04 % d'¹⁷O).

Dans le cas d'un fractionnement isotopique normal suivant la loi, tous les corps du système solaire devraient se situer sur cette pente dite "droite de fractionnement terrestre". Or on peut voir dans le diagramme (cf: page suivante) que ce n'est pas le cas.

Une des façons d'expliquer ces écarts est donc de considérer la non homogénéité initiale de la nébuleuse. Il est cependant possible que ceci soit dû aux processus de fractionnement isotopique indépendant de la masse, comme ceux de la nucléosynthèse stellaire.

En lisant le diagramme on remarque que les chondrites enstatites s'alignent bien sur la droite de fractionnement terrestre. Ainsi, du fait de leur ressemblance isotopique avec les roches terrestres, les chondrites enstatites peuvent être considérées comme un des corps parents de la Terre.

Ces chondrites ont des abondances en Fer (à l'état métallique et non oxydé) et en Oxygène qui sont plus proches de celles terrestre que les chondrites carbonées. Ces dernières sont plus riches en éléments volatiles (H et C notamment) et se différencient par une plus grande présence de fer oxydé. Sachant que les vents solaires ont balayé les éléments volatiles des zones internes du système solaire vers les zones externes au début de la séquence d'accrétion, il est assez certain que les chondrites enstatite se situaient plus proche du soleil que celles carbonées.



Composition isotopique de l'oxygène dans les météorites et dans les principaux réservoirs terrestres.

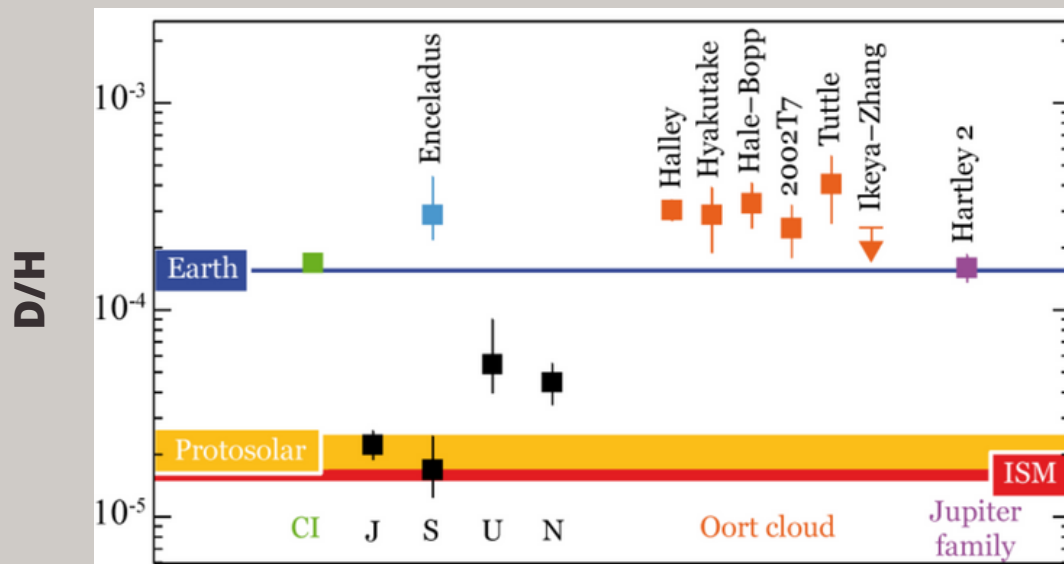
L.Pianni (2013), figure modifiée d'après Thiemes (2006)

Sur cette figure on peut voir la droite de fractionnement terrestre qui passe par l'origine, référentiel SMOW de l'eau de mer. On remarque que la composition isotopique en O des chondrites enstatites est alignée sur cette droite et que celle des chondrites carbonées (CM) lui est perpendiculaire. D'autres chondrites sont représentées ainsi que le soleil qui a visiblement une signature isotopique en oxygène bien différente de celle des autres corps.

• LE POUVOIR DE DEUX VOLATILS

L'émergence de la vie sur Terre est une question qui s'ancre nécessairement avec la présence d'eau, notamment liquide, à sa surface. Longtemps, le dégazage du manteau terrestre était le phénomène mis en avant pour expliquer la présence liquide de cette molécule d' H_2O , traduisant d'une origine interne remontant au début de l'accrétion planétaire.

Or des études récentes démontrent que les corps internes du système solaire étaient probablement sec, suggérant un modèle d'accrétion sèche de la Terre. Depuis, de nouvelles données effectuées sur des chondrites et des comètes proposent un héritage double des composés volatils de ces corps qui auraient probablement pu former par la suite la molécule d'eau.



*D/H du système solaire dans l'eau de différents corps dont la Terre, des comètes, des chondrites et atmosphères des planètes joviennes.
Figure tirée de Hartogh et al.2011*

Sur cette figure on peut voir que la Terre a un D/H plus proche des comètes du nuage de Oort (orange) que celui des atmosphères présentes sur les planètes joviennes. Les chondrites carbonées les plus anciennes ont elles un rapport très proche de la valeur terrestre. Il est cependant très intéressant d'observer qu'une comète à période courte comme Hartley 2, appartenant à la famille de Jupiter, ai le D/H le plus proche de la Terre.

En regardant les mesures de D/H de différents corps, on s'aperçoit de similitudes. Si la majorité des chondrites possède un rapport C/D proche de celui terrestre (non représentés sur ce graphique) le rapport le plus frappant est au niveau des chondrites carbonées (en vert) qui sont presque alignées sur la valeur terrestre. Il semblerait donc qu'il y ait une influence forte de ces chondrites concernant la présence d'eau sur Terre.

Sachant que les comètes sont formées d'un noyau de glace, on pourrait facilement imaginer que notre eau provient directement de ces corps. Or, on voit que les comètes de Oort n'ont pas un D/H identiques aux valeurs terrestre. Si l'origine de l'eau sur Terre ne peut pas être exclusivement cométaire, elles y ont cependant certainement participé. En effet, les mesures de comètes de période courte issues de la famille de Jupiter (en violet) ont révélées des D/H très proches de ceux terrestres.

CONCLUSION PARTIE 1

Les chondrites sont des objets formidables qui nous permettent de reconstruire les histoires au sein de notre système solaire grâce aux éléments volatils qu'elles contiennent.

On peut ainsi supposer que la distribution des planètes du système solaire et leurs compositions sont la résultante : du caractère plus ou moins volatil d'un élément, de sa position par rapport à notre jeune soleil naissant et de l'hétérogénéité isotopique des volatils dans le disque protosolaire.

Les éléments volatils imprègnent notamment les corps célestes de signatures isotopiques particulières. L'étude de celles-ci nous permet, entre autres, de comprendre l'origine sur Terre de ces éléments essentiel à la vie que nous connaissons.

2. LES VOLATILS DANS LES ATMOSPHERE PLANETAIRES

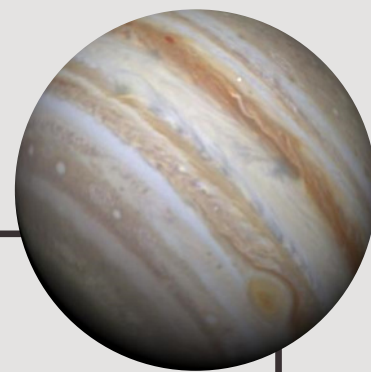
L'un des outils au centre de l'étude des caractéristiques de planètes est l'utilisation de leur composition chimique actuelle pour comprendre comment elles se sont formées. La majorité des éléments composant les atmosphères des planètes sont les éléments volatiles ; c'est pourquoi leurs études sont cruciales pour retracer des histoires et pour comprendre notre propre atmosphère et climat. Par exemple, le ratio C/O a longtemps été reconnu comme portant des informations importantes sur la chimie des éléments volatils.

Au contraire, les éléments réfractaires comme le magnésium, le fer ou le silicium ne sont que peu utilisés puisque pour la majorité des planètes observées à atmosphère (dont des exoplanètes) ont une température inférieure à 2 000 K. Or ces éléments réfractaires condensent en solides à ces températures. Ils peuvent cependant être étudiés pour les planètes plus chaudes, comme Jupiter, puisque la condensation est évitée. Néanmoins, nous nous focaliserons donc ici sur les éléments volatils pour retracer l'histoire des atmosphères de notre système solaire et mieux comprendre comment ces éléments participent aux climats qui y règnent.



La région équatoriale de Jupiter captée par Juno en 2017.
NASA/JPL-CALTECH/SWRI/MSSS/KEVIN M. GILL

JUPITER, DIEU DU CIEL



• UNE STRATIFICATION ... STRATOSPHERIQUE !

Grâce à la sonde Galileo lancée en 1989, l'atmosphère de Jupiter est la mieux connue des géantes gazeuses. On sait ainsi qu'elle est composée majoritairement de dihydrogène et d'hélium, éléments volatils abondamment présents dans notre système solaire. On remarque sur cette planète une sous abondance légère d'hélium par rapport à la valeur du système solaire, chose que l'on ne comprend pas encore très bien. Il est possible qu'une partie de l'hélium se soit condensé vers le cœur de la planète, étant plus lourd que l'hydrogène. Concernant le deutérium, isotope de l'hydrogène, son abondance sur Jupiter représenterait certainement la valeur primordiale de la nébuleuse protosolaire. C'est donc un outil précieux.

L'atmosphère de Jupiter contient aussi du NH_3 , H_2S , PH_3 et encore d'autres composants que l'on retrouve dans l'atmosphère terrestre comme l' H_2O et le CH_4 . Ils sont surtout concentrés dans la troposphère profonde, c'est-à-dire la partie de l'atmosphère la plus "interne". Leur abondance importante traduisent d'un enrichissement sur Jupiter en C, N, S et O par rapport au soleil.

Quant à la haute atmosphère, celle-ci contient du C_2H_6 ou bien encore du C_2H_2 ; des hydrocarbures qui peuvent former par la suite le gaz à effet de serre CH_4 à cause de photodissociation engendrée par des ultraviolets solaires. On y retrouve aussi du CO_2 , CO et H_2O .

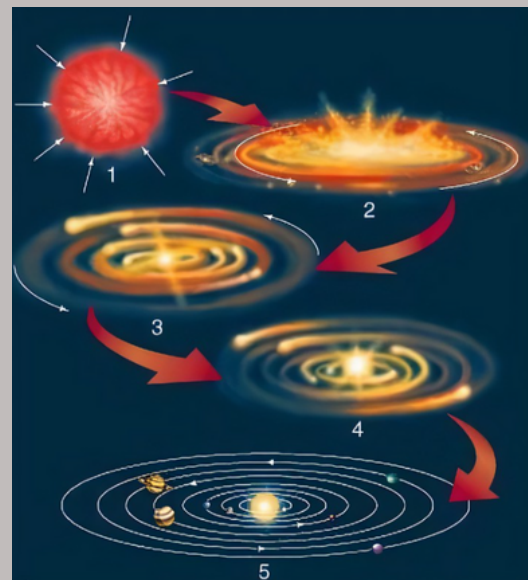
La présence majeure d'éléments volatils sur Jupiter a un impact direct sur la température qui y règne et ainsi que sur son climat. En effet, Jupiter se situe relativement loin du soleil et voit cependant sa température se positionner autour des -145°C , ce qui est plus que "prévu" au regard de son positionnement dans le système solaire. Ceci peut être attribué aux éléments volatils dans l'atmosphère qui permettent de retenir une partie de la chaleur au sein de la planète. Néanmoins, elle est composée majoritairement d'hélium et d'hydrogène qui sont des gaz qui retiennent moins la chaleur comparé, par exemple, aux gaz présents dans l'atmosphère terrestre. Ainsi, on sait qu'une partie de la chaleur produite au cœur de Jupiter est perdue dans l'espace.

• LA RECETTE POUR UN ENRICHISSEMENT

L'abondance des éléments volatils dans l'atmosphère de Jupiter a été mesurée en 2000 par un spectromètre à bord de la fameuse sonde Galileo. Les résultats montrent, comme introduit plus tôt, qu'elle est 3 fois enrichie en C, N, S, Xe, Kr, Ar comparé à l'abondance du soleil. L'une des théories avancée et étudiée pour comprendre ce phénomène serait la conséquence de planétésimaux (fractions ou "briques élémentaires" permettant la formation d'une planète) faits de glace qui auraient piégé ces éléments volatils.



Vue d'artiste d'un objet transneptunien découvert par © KO ARIMATSU



Etapes principales de la formation du système solaire, clercsvt.jimdofree.com

1. Contraction du nuage d'hydrogène et d'hélium; augmentation de la gravité en son centre.
2. Aplatissement du système en un disque.
3. Formation de planétésimaux (protoplanètes qui, en s'accumulant, vont former les planètes actuelles).
4. Mise en route des réactions thermonucléaires au centre du système; création du soleil.
5. Apparition du système solaire sous sa forme actuelle après la formation des planètes et autres corps.

Grâce à des travaux publiés en 2004 (dit G04), la structure de Jupiter comprenant sa masse ou bien encore sa température de surface sont connues. Ainsi, les résultats de chercheurs montrent qu'il est tout à fait possible que l'enrichissement en éléments volatils dans l'atmosphère de Jupiter soit le résultat de l'accrétion de $25.4 M_{\oplus}$ ($1 M_{\oplus} = \text{masse de la Terre}$) de planétésimaux formés de glace amorphes. Ces données visant à expliquer les enrichissements en éléments volatils peuvent corroborer avec les résultats de G04 si les planétésimaux contenaient au moins 60% de glace.

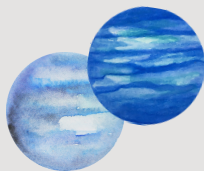
Ces données sur les volatiles nous permettent d'émettre des suggestions sur la formation de Jupiter. En effet, la présence des planétésimaux de glace implique des températures basses. Ceci peut suggérer la formation de Jupiter dans une zone du système solaire assez froide, puis elle se serait ensuite déplacée vers sa position actuelle (une zone plus chaude) dû à des attractions gravitaires par d'autres corps célestes.

Une autre explication peut être donnée en suggérant que les éléments volatils peuvent être piégés par de la glace à des températures plus élevées s'ils sont sous la forme de clathrate hydrates (une molécule hôte ici à base H_2O renfermant une molécule incluse). L'origine d'enrichissements en éléments volatils dans l'atmosphère peut ainsi s'expliquer par l'accrétion sur Jupiter de planétésimaux formés dans une région plus chaude de la nébuleuse protosolaire.

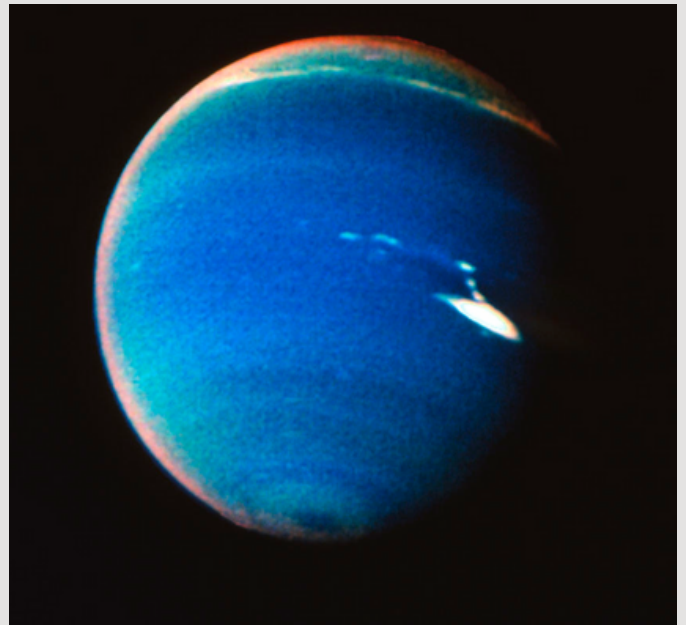
Enfin, revenons brièvement sur la présence en CO_2 , CO et H_2O dans la haute atmosphère. Leur présence serait originaire de comètes s'étant écrasées sur Jupiter. Ceci est soutenue par l'impossibilité que l'eau provienne de la basse atmosphère de Jupiter car les températures glaciales au sein de la tropopause empêchent la migration de l'eau vers la haute stratosphère.

URANUS ET NEPTUNE

• LES GÉANTES DE "GLACES"



Les données récoltées in situ par Voyager 2 en 1989 restent les meilleures à ce jour pour connaître la composition des deux géantes de glace : Uranus et Neptune. Ces données, toujours en train d'être étoffées, sont importantes pour comprendre leurs formations, les migrations ainsi que la dynamique de leurs atmosphères. Le nombre de planètes géantes de glace détectées ne cesse d'augmenter et sont ainsi plus abondante dans notre galaxie que les géantes gazeuses comme Jupiter. Il semble par conséquent important de se pencher sur ces corps qui renferment de nombreuses informations sur les exoplanètes et leurs caractères *habitables* au vivant.



Photographie de Neptune capturée par Voyager 2 en 1989, NASA

L'atmosphère de Neptune ressemble à celle d'Uranus. On y retrouve de l'hélium, du dihydrogène mais également des traces d'hydrocarbures (C_2H_6 ; C_2H_2) et d'ammoniac. Les éléments volatils comme l'eau et le méthane sont en très grande concentration dans la partie interne de leurs atmosphères.

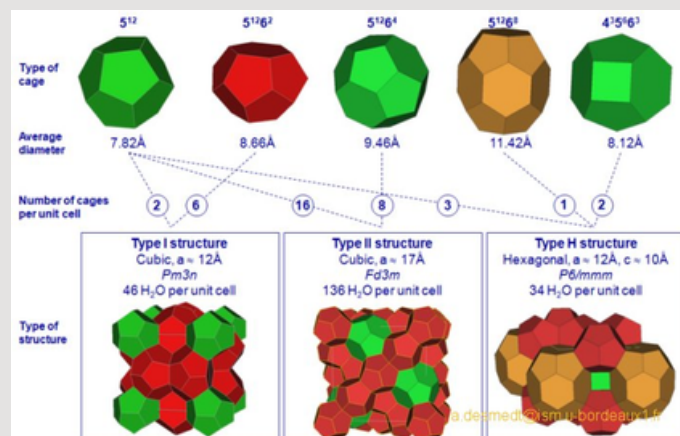
Les éléments volatils plus lourds que l'hélium et l'hydrogène sur Neptune et Uranus, y sont plus abondants que sur Jupiter. Ils se seraient, en effet, fait piéger dans de la glace d'eau, ce qui donna ainsi les noms de *géantes de glace*.

Pour comprendre l'enrichissement de ces éléments volatils, des explications se basent sur la même hypothèse vue précédemment pour Jupiter. Les volatils peuvent être enfermés sous forme de solides de clathrates hydrates et ainsi incorporés aux planétésimaux qui ont ensuite participé à la formation des planètes géantes. La masse des volatils resterait constante dans le temps alors que celle de l'hydrogène pourrait décroître jusqu'à ce que la formation de la planète soit complétée. Il en résulte ainsi un ratio croissant de la masse d'éléments volatils par rapport à celle de l'hydrogène.

• UNE QUESTION DE MASSE ET DE CLATHRATES

Dès 1996, des recherches proposent des scénarios de formation des quatre géantes de notre système solaire, qui nous permettent de comprendre les différences notables de composition entre les géantes *gazeuses* et de *glaces*. Selon ces chercheurs, les géantes de gaz se forment en trois phases. Dans un premier temps le noyau accumule des planétésimaux puis dans un second temps se met en place une accréation très lente de gaz couplé aux planétésimaux. Enfin, les planètes arrivent à une taille tellement conséquente que le gaz de la nébuleuse protosolaire est déstabilisé et s'effondre sur le noyau, ce qui donne ensuite les enveloppes d'hydrogène présentes sur Jupiter et Saturne.

Cette dernière phase ne se serait pas déroulée sur Neptune et Uranus car la masse de leurs noyaux était encore trop faible pour générer un effondrement hydrodynamique lorsque la nébuleuse protosolaire a commencé à se dissiper. L'hydrogène présent dans l'atmosphère des géantes de glace aurait ainsi été acquis durant la phase numéro deux, donnant des enveloppes atmosphérique assez fines comparé à la masse de leur noyau.

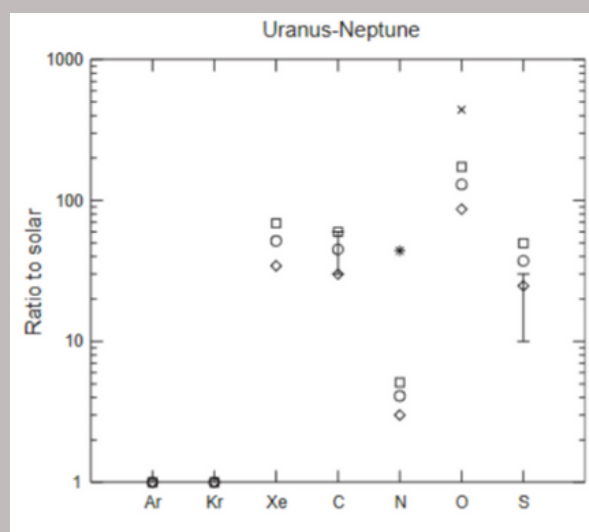


Les structures des clathrates hydrates.
Arnaud Desmedt's Research (hydrate.eu)

Les clathrates hydrates sont des matériaux cristallins nanoporeux fait d'un réseau d'hydrogènes reliés à des molécules d'eau formant des "cages hôtes" qui prennent des structures différentes. Ils se stabilisent avec la présence de molécules étrangère, souvent hydrophobes, devant les "invités" retenus.

Sur la figure ci-dessous, on peut voir les enrichissements en éléments volatils, par rapport au soleil, sur les géantes de glace. Ces compositions nous donnent des informations sur l'histoire de la formation de ces planètes et des événements qui se sont déroulés aux alentours.

Par exemple, on peut voir un enrichissement en soufre. Ainsi, la théorie du piégeage d'éléments volatils par une clathration pourrait répondre à un enrichissement en soufre prédit par les modèles mais jusque là inexpliqué.



Enrichissement en éléments sur Uranus et Neptune.
F. Hersant, D. Gautier, J.I. Lunineb (2004).

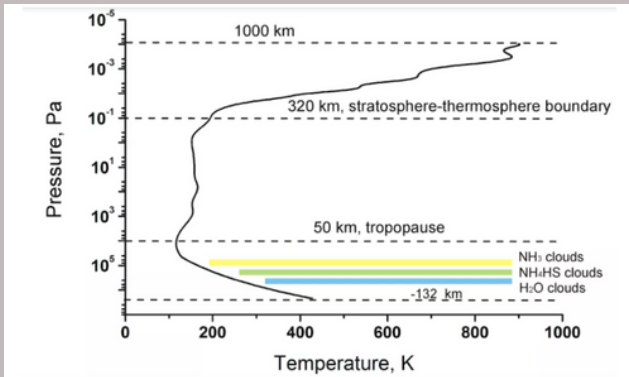
Les mesures (avec les barres d'erreurs) et les calculs sont réalisés par une calibration au ratio CH₄/H₂ pour 30 (diamant), 45 (rond) et 60 (carré). En comparaison, l'astérisque montre un enrichissement si N et N₂ avaient été piégés. La croix est la valeur O/H prédite sur Neptune.

On voit clairement un enrichissement potentiel en Xe, C, N, O et S sur les géantes de glace par rapport au soleil. En revanche, aucun enrichissement n'est prédit pour Ar et Kr.

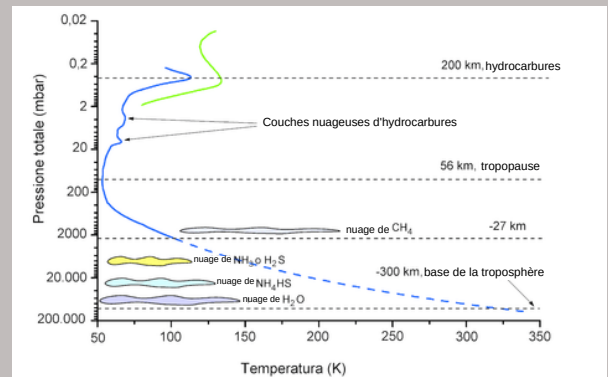
De la même manière, l'amplitude des résultats donnés pour l'enrichissement en azote dépend de l'efficacité du piégeage de diazote dans les zones d'alimentation ayant permis la formation de Neptune et Uranus. Il semble néanmoins que la majorité du diazote n'a pas été piégé. La figure montre que l'argon et le krypton n'ont certainement pas du tout été piégés de cette manière proche de la formation des géantes de glace, puisque les abondances sont similaires à celles présentes dans le soleil.

• LES VOLATILS DANS LES ATMOSPHÈRES : UN CLIMAT

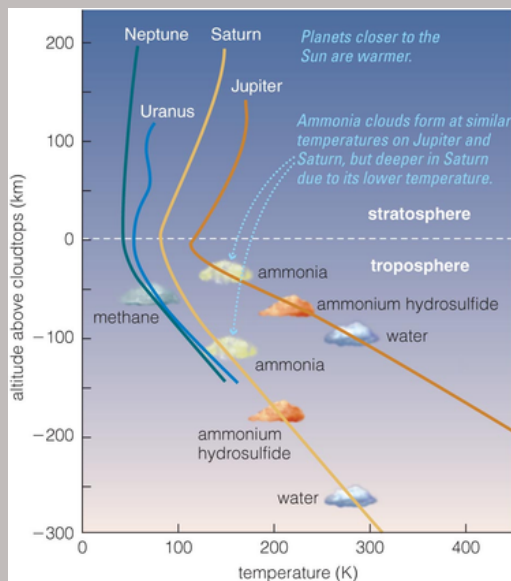
Les éléments volatils sont abondamment présents à la surface des planètes dans leurs atmosphères. Ils influencent donc directement leurs climats en formant différents nuages à différentes pressions, hauteurs, températures en fonctions des caractéristiques physicochimiques des éléments qui les composent. Ceci a donc une incidence sur les phénomènes météorologiques et les caractéristiques climatiques d'une planète.



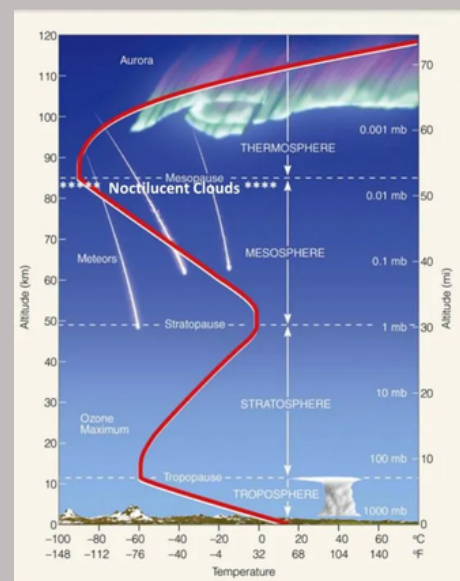
Stratification verticale de l'atmosphère de Jupiter,
www.techno-science.net



Stratification verticale de l'atmosphère d'Uranus,
Figure modifiée depuis Revista científica



Comparaison des stratifications verticales de
l'atmosphère des planètes Joviennes.
Pearson Education 2008, via www.physast.uga.edu



Stratification verticale de l'atmosphère de Terre,
www.electroverse.net

Sur ces figures représentant la stratification verticale des planètes, on peut observer la présence de nuages faits d'éléments volatils de natures différents. Il est notamment intéressant de noter qu'il y a de fortes similitudes entre toutes les planètes Joviennes, même si les nuages d'éléments apparaissent dans des conditions physiques différentes. Sur Terre et sur les autres planètes, dû aux comportements des éléments volatils, la stratification verticale thermique bloque la majorité des nuages à la troposphère.

C'est donc dans la tropopause que se déroulent les phénomènes météorologiques majeurs. Ces derniers sont différents en fonction des caractéristiques physiques, la nature chimique des nuages et des océans (ces derniers permettent l'évaporation des éléments puis leurs condensations sous forme de nuages). Par exemple sur Jupiter, la forte instabilité des bandes nuageuses peut créer de géants cyclones avec une activité orageuse très forte et des tempêtes, ou bien encore d'impressionnants vortex (dont le plus grand fait trois fois le diamètre de la Terre).

CONCLUSION PARTIE 2

De nombreux facteurs comme la distance au soleil, la vitesse d'accrétion et d'acquisition de masse, la composition et le lieu de naissance des planétésimaux ou bien encore la formation de clathrates hydratés ont participé à la répartition d'éléments volatils à la surface des planètes. Bien qu'elles aient des compositions différentes, les atmosphères des planètes Joviennes possèdent un enrichissement en éléments volatils et ont une stratification verticale ressemblantes. En effet, les éléments volatils dont elles sont composés induisent la formation de nuages similaires mais à des altitudes et conditions physiques différentes. De plus, les éléments volatils participent fortement sur ces planètes, et sur Terre, aux phénomènes météorologiques dans la tropopause. L'étude des éléments volatils est donc très pertinente pour comprendre les systèmes climatiques, sur Terre et sur les exoplanètes dont certaines contiennent peut-être la vie.

3. LES ELEMENTS VOLATILS SUR TERRE

Nous avons exploré principalement les éléments volatils dans le cosmos et dans les atmosphères des géantes de notre système solaire, mais qu'en est-il sur Terre ? Nous avons vu que des chondrites ont participé à leur présence sur notre planète bleue, mais comment ? Où sont-ils ? À quoi servent-ils ?

NOTRE ATMOSPHÈRE

• QU'EST CE QUE JE RESPIRE ?

En regardant la composition de l'atmosphère terrestre, on se rend vite compte qu'elle est bien différente de celle d'autres planètes et du soleil lui-même qui ont des proportions importantes d'hydrogène et d'hélium. Notre atmosphère, elle, est composée à 78 % molaires de diazote et d'un cinquième de dioxygène. Comment expliquer ces différences ?



Ce qui semble de prime abord caractériser notre atmosphère est la présence en grande quantité de dioxygène. Cependant, il en est ainsi seulement depuis la grande oxydation il y a environ 2 milliards d'années. Ceci résulte d'un événement singulier ...

... sur Terre et déterminant pour la vie comme nous la connaissons ; une activité biologique bactériennes qui combinent, par leurs métabolismes, le CO₂ et l'H₂O pour donner de la matière organique et du dioxygène. Cette singularité dans notre système solaire - mais peut-être pas dans les confins de l'univers - met en exergue l'importance capitale des cycles biogéochimiques des éléments, notamment volatils.

Pour comprendre l'appauvrissement dans notre atmosphère en certains éléments volatils, on pourrait facilement penser que nombreux d'entre eux ont été piégés dans d'autres réservoirs sur Terre, ou bien que leur spéciation diffère. En effet, on peut voir par exemple que l'atmosphère terrestre est très appauvrie en carbone comparé à celle de Mars et Vénus qui en contiennent environ 97% . Mais sur Terre la forme du carbone dépend fortement de réactions qui contrôlent sa spéciation et son abondance dans certains réservoirs.



Carbonate de Calcium dans le Sussex, Tim Grist

Dans les domaines du magmatisme ou du métamorphisme, les pressions sont basses et les températures très hautes, ce qui fait passer le carbone sous la forme de CO₂. A la surface terrestre, où les pressions et températures sont moyennes, le carbone se retrouve dans les carbonates, dans la matière organique ou bien dissous dans les océans ; il ne reste donc que très peu de carbone dans notre atmosphère. A l'inverse,

l'atmosphère bien plus dense et chaude de Vénus explique l'abondante présence de CO₂ sur cette planète.

Cependant, même en tenant compte de transferts dans les réservoirs, les proportions terrestres en éléments volatils ne sont pas compatibles aux abondances solaires. Pourtant, ce ne devrait pas être le cas puisque la Terre s'est formée à partir des mêmes éléments composant le soleil ; ceux provenant de la nébuleuse protosolaire.

• ORIGIN...AL !

Si l'origine de notre atmosphère est encore discutée, de nombreuses pistes sérieuses sont avancées:

- Le dégazage.

Comme nous l'avons vu, certains modèles émettent la possibilité d'une accréation sèche remettant en cause la présence d'eau dans le cœur de la Terre primitive. Les autres éléments volatils ont, eux, certainement été piégés dans la matière solide lors de l'accréation. Durant les 150 premiers millions d'années de son histoire, de très nombreuses éruptions volcaniques ont eu lieu sur Terre. Ces événements ont certainement participé au dégazage d'éléments volatils provenant de l'intérieur planétaire et expulsés vers l'atmosphère primitive. Bien que notre atmosphère actuelle soit différente de celle dites *primitive*, certains éléments volatils ont pu y subsister.

- Apport extra terrestre.

Comme nous l'avons beaucoup vu grâce aux signatures isotopiques, les chondrites et quelques comètes ont certainement apportés d'importantes proportions d'éléments volatils lors de ...

... bombardements survenus notamment en fin d'accrétion planétaire.

- Une perte d'éléments.

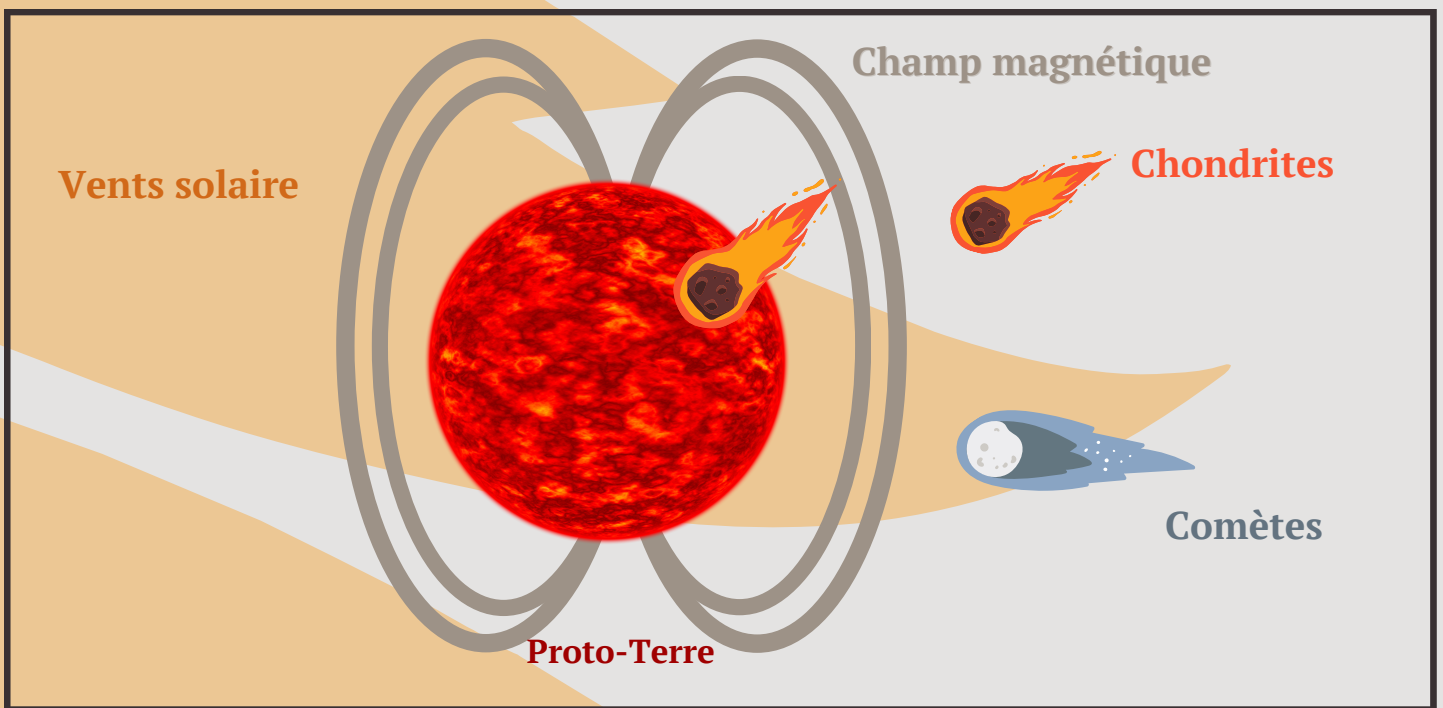
Durant la phase primitive d'évolution du soleil, appelée T-Tauri, les réactions thermonucléaires en son centre sont si intenses que de violents vents solaires balayent la zone interne du système solaire. Les quatre planètes les plus proches, dont la Terre, ont très certainement perdu une bonne partie des éléments volatils qui composaient leurs atmosphères primitives. Cet échappement considérable n'aurait donc pas eu lieu pour les 4 planètes géantes, n'étant que peu touché par les vents solaires à cette distance.

- Le champ magnétique.

Bien que la Terre possède un champ magnétique crucial pour l'habitabilité du vivant, celui-ci est bien plus faible que celui d'autres planètes plus massives. De fait, une partie des gaz atmosphériques sont retenues sur Terre mais une partie s'en échappe.

SUR QUOI ON MARCHE ?

Une bonne façon de connaître la potentielle origine des éléments volatils sur notre Terre, est de s'intéresser à la composition de notre manteau.



Sources principales d'apports, d'exports et de maintien des éléments volatils sur proto-Terre lors de la genèse du système solaire.

- Une multitude de relations et d'événements géochimique au cours du temps.

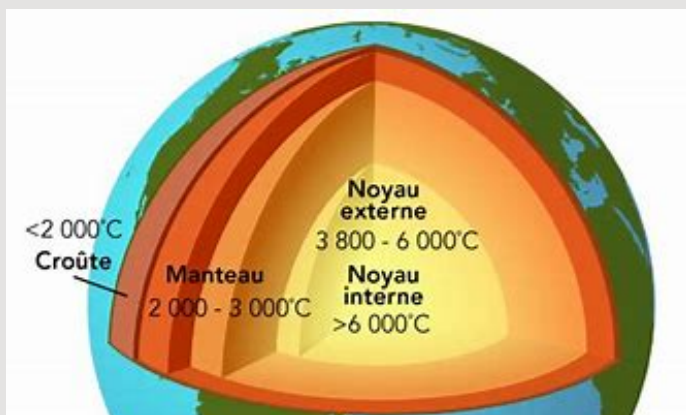
L'atmosphère de notre planète a ensuite été modifiée par de nombreux processus comme l'incorporation dans le manteau d'éléments comme la subduction des carbonates, le rôle des organismes comme nous l'avons vu ou bien encore tous les processus d'oxydo-réduction notamment à la surface de la Terre.

Comme nous l'avons vu dans la partie 1, les chondrites enstatite sont considérées comme étant certainement l'un des corps parents de la Terre. Ceci est dû aux signatures isotopiques qui sont similaires entre ces météorites et le manteau terrestre. Ces chondrites ont également des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ négatives proche des valeurs du manteau primitif terrestre, ce qui en fait de très bon candidats pour l'apport d'azote sur ..

... Terre. Cependant, d'autres échantillons dans le manteau supérieur moderne terrestre montrent une corrélation isotopique à l'azote avec des chondrites CI et CM. Également, des rapports isotopiques avec l'hydrogène montrent que pour les valeurs les plus basses recueillies dans le manteau terrestre, une grande ressemblance est observable avec les chondrites carbonées de type CM. De plus, les rapports élémentaires des éléments volatils comme le C/H ou le C/S du manteau terrestre montrent des concordances encore avec les chondrites carbonées CM et CI. Ainsi, les sources de chondrites sont diversifiées, à savoir principalement des enstatites et des carbonées.

• LA CROÛTE

Nous avons quitté les atmosphères pour nous pencher sur les matières solides de notre système solaire. En regardant les éléments volatils, on voit qu'une grande partie des croûtes de satellites naturels ou des planètes naines en sont composés, et que Jupiter est recouverte d'une couche profonde d'hydrogène métallique. Comme nous l'avons vu, la Terre est globalement appauvrie en ces éléments et, du fait de leurs basses températures d'ébullition, on s'attendrait moins à les retrouver sous forme condensées dans les croûtes continentales et océaniques de surface que dans l'atmosphère.



Températures internes de la Terre, www.parlonssciences.ca

Cependant, nous avons déjà discuté de la présence de carbone sous forme de carbonates et de carbone organique qui peut se retrouver dans les roches sédimentaires. Si ces derniers ont un temps de séjour dans la croûte assez court, on retrouve un autre élément volatil dans de nombreuses roches.



Quartzite (SiO₂), theconstructor.org

En effet, en regardant les composants majeurs de la croûte continentale on retrouve beaucoup de roches silicatées composées de SiO₂ mais aussi d'autres minéraux fait de TiO₂, Al₂O₃, FeO, MgO, etc. Tous contiennent un élément volatil central, l'oxygène, sans quoi ces minéraux ne pourraient pas se former. Il est très intéressant de voir l'importance de cet élément volatil pour la formation de notre planète.

D'autres éléments volatils légers se retrouvent dans la croûte. Tout d'abord on peut se pencher sur l'hydrogène dont le réservoir externe principal sur Terre est l'océan. Dans les silicates comme la muscovite, la biotite ou bien la chlorite, on retrouve l'hydrogène sous forme de OH. Ceci n'est pas négligeable puisque selon la composition minéralogique de la croûte, les OH représentent 1% de celle-ci, correspondant ainsi à 12% de l'eau externe totale (rappelons que l'hydroxyde est un ion basique car il peut accepter un proton et donner ainsi lieu à la formation d'une molécule d'eau).

On peut aussi trouver dans la croûte les éléments halogènes qui sont eux aussi des éléments volatils. Ils sont souvent liés aux roches sédimentaires ou bien, pour le cas du fluor, entrer en substitution d'hydroxyde dans la structure cristalline des silicates. Par exemple, le brome ou le chlore sont retrouvés dans les roches salines. Ces dans ces dernières qu'on peut aussi retrouver du soufre, élément chalcogène volatil, sous forme de sulfates.

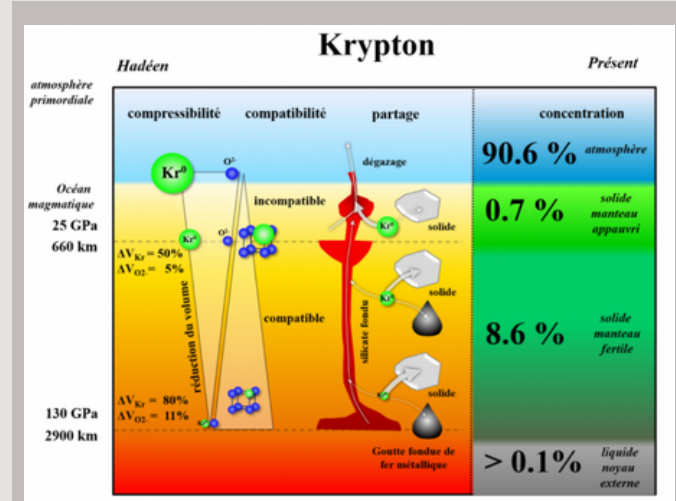
• LE MANTEAU

Selon les calculs des équilibres géochimiques, une quantité importante d'éléments volatils n'aurait pas été dégazée lors de la fin de l'accrétion terrestre. Ceci impliquerait la présence de ces éléments, notamment des gaz rares, stockés dans des réservoirs profonds comme le manteau inférieur.

En effet, il a été démontré que les minéraux contenus dans le manteau inférieur ont une capacité de stockage en gaz rares comme le xénon, l'argon ou le krypton. Mais est ce que ces réservoirs de volatils existent-ils vraiment ?

Pour répondre à cette question, des chercheurs se sont penchés sur la solubilité du krypton dans l'une des phases les plus importantes du manteau inférieur (ferropericlas) et dans différents alliages métalliques que l'on retrouve dans le manteau inférieur. Ils ont découvert que la ferropericlas peut effectivement retenir ce gaz rare. Grâce à nos compréhensions sur la compressibilité des gaz rares,

il est possible de mettre en lumière des substitutions au krypton dans des conditions identiques au manteau inférieur. Puis, en utilisant des outils de modélisation de déformation de réseaux cristallins, il est possible d'estimer les concentrations relatives en autres gaz rares. Les données obtenues indiquent que manteau inférieur profond est potentiellement un réservoir de gaz rares.



Etats du Krypton sous différentes conditions et les concentrations relatives dans différents réservoirs. www.cnrs.fr

Graphe illustrant le comportement physico-chimique du krypton pendant le refroidissement de l'océan magmatique lors de l'Hadéen (compressibilité, compatibilité et comportement de partage). Les différentes caractéristiques du Kr peuvent expliquer ses concentrations actuelles dans différents réservoirs de la Terre.

MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	FeO*	Molar Mass (g/mol)	Fe ³⁺ /Fe	Reference
36.9	47.3	1.2	1.7	12.9	54.79	0.30 (±0.04)	This study, J95 REDUCED [Gu et al., 2016]
37.1	47.3	1.2	1.6	12.7	54.70	0.35 (±0.04)	This study, J95 OXIDIZED [Gu et al., 2016]
37.1	47.7	1.1	1.7	12.5	54.67	NA	Enstatite Chondrite LM, [Javoy, 1995]
27.1	41.6	13.0	10.3	8.0	60.72	0.11 (±0.03)	This study, MIX REDUCED [Creasy et al., in review]
28.5	40.3	12.9	10.5	7.8	60.35	0.55 (±0.04)	This study, MIX OXIDIZED [Creasy et al., in review]
25.3	46.4	9.1	12.5	6.7	59.18	NA	MIX1G pyroxenite [Hirschmann et al., 2003]
49.4	39.2	2.3	3.3	5.8	51.83	NA	Pyrolite, [McDonough & Sun, 1995]

Composition du manteau selon différentes études, K. Lee (2018).
Si certains résultats divergent entre eux (notamment pour FeO, CaO et Al₂O₃) notre connaissance sur la composition du manteau devient de plus en plus précise; les recherches continues.

Cependant, on sait que les gaz rares sont des marqueurs géochimiques qui nous permettent de reconstruire la distribution d'éléments volatils au cours du temps. Grâce à ces découvertes et des mesures de rapports isotopiques sur des basaltes, la présence de deux réservoirs en éléments volatils dans le manteau terrestre est démontrable. Cependant, la taille et la localisation de ses réservoirs restent inconnus. Ces réservoirs ont pu se former pendant la cristallisation de l'océan magmatique terrestre, qui s'est certainement produit après le dernier impact avec la lune, où des éléments volatils ont été piégés.

Nébuleuse de la Carène, Bastien Foucher

Située à 1.500 années lumière, cette nébuleuse abrite l'une des étoiles les plus massive de la voie lactée. Les volutes rouge violet du nuage sont dues à l'interaction entre l'hydrogène, qui enveloppe de jeunes étoiles massives, et le rayonnement ultraviolet de ces dernières. Large de 100000 années-lumière, la nébuleuse contient plus d'une douzaine d'étoiles, dont la masse est comprise entre 50 et 100 fois celle du Soleil.

CONCLUSION PARTIE 3

Les éléments volatils sur Terre sont importants car ils rentrent en jeu dans la présence de la vie, constituent nos roches, influencent les processus géologiques ou encore participent largement aux cycles biogéochimiques. Leurs distributions actuelles dans les différents réservoirs terrestres nous informe sur les processus géodynamiques et la formation de notre Terre.

Les volatils sur Terre et dans les chondrites nous permettent de retracer l'origine potentielle de ces éléments sur notre planète. Néanmoins, les mécanismes primordiaux d'acquisition de ces éléments restent encore en recherches. Les gaz nobles présents dans notre atmosphère et certainement dans notre manteau sont aujourd'hui des pistes très intéressantes pour continuer de retracer l'origine et l'évolution des éléments volatils sur Terre.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les éléments volatils peuvent, en un sens, être considérés comme les clés de voûte de l'univers: de la formation des étoiles à l'ADN, leurs contributions sont primordiales.



Ces éléments sont d'excellents outils pour les chercheurs. Au travers d'objets comme les chondrites, les signatures isotopiques des volatils qui y sont contenus permettent de retracer la genèse de notre système solaire, ou encore l'apparition de l'eau sur Terre. C'est ainsi qu'on se rend compte que les éléments volatils ne permettent pas seulement d'élargir notre champs de connaissances ; ils ont également joué un rôle prépondérant pour former le système solaire tel que nous le percevons.

On suppose ainsi que le caractère plus ou moins volatils des éléments, et leurs hétérogénéités isotopique dans la nébuleuse protosolaire, auraient contribué à la naissance des planètes de notre système et ce, avec leurs différences.



*La Terre vue depuis Saturne,
NASA/JPL Caltech Space Science
Institute (2013)*

Photo prise par la sonde Cassini à 1,44 milliards de kilomètres de la Terre.

Cette photographie nous permet de se représenter l'étendu et la grandeur que peuvent prendre les phénomènes géochimiques au sein de notre système solaire.

Notre planète est le petit point le plus brillant de la photo, sous les anneaux de saturne, dans la partie gauche au centre de l'image.

LES ELEMENTS VOLATILS

” DU FIN FOND DU COSMOS,
JUSQU'À SOUS NOS PIED ...

L'étude du maintien de la vie sur Terre et celles possiblement sur des exoplanètes, renvoient entre autres aux conditions atmosphériques et climatiques. Bien que différentes, les atmosphères sont majoritairement composées d'éléments volatils dans notre système solaire. La composition du duo Jupiter - Saturne se distingue de celui Neptune - Uranus.

Néanmoins, les quatre Géantes sont enrichies en éléments volatils par rapport à la Terre. Pour l'expliquer, les chercheurs ont mis en lumière l'importance de la séquestration de volatils par des clathrates hydrates au sein de leurs planétésimaux.

Il semble donc nécessaire de comprendre l'apparition de ces éléments sur notre planète ainsi que leurs rôles multiples dans les domaines de la vie, la géologie, les (géo)dynamiques, les transferts, etc. Néanmoins, si la composition et les concentrations

en éléments volatils sont bien connus dans notre atmosphère, ces données sont encore débattues pour le manteau terrestre.

L'exploitation des éléments volatils pour la compréhension de notre monde n'est donc pas terminée. Depuis le fin fond du cosmos jusqu'à sous nos pieds, l'utilité et la dispersion de ces éléments sont encore à explorer.

Certains se tournent vers les exoplanètes (avec l'étude en volatils des atmosphères dont nous avons parlé) pour éventuellement trouver une solution *B* aux problèmes climatiques et environnementaux auxquels notre humanité fait face. A mon sens, et en tant que future chercheuse, l'étude des éléments volatils sur Terre dans les cycles biogéochimiques, est une direction qui me semble prometteuse pour tenter de résoudre ou limiter certains de nos maux ●

BIBLIOGRAPHIE

« Abe, Y., Matsui, T., 1985. The formation of an impact-generated H₂O atmosphere and its implications for the early thermal history of the Earth. *Proc. Lunar Sci. Conf.* 15, C545–C559. », s. d.

Bureau, Hélène. « Etude du cycle profond des éléments halogènes et de l'eau : le rôle de la zone de transition », s. d.

« Cécile Deligny. Origine des éléments volatils et chronologie de leur accréation au sein du Système Solaire interne: Apport de l'analyse in-situ des achondrites. *Planète et Univers [physics]*. Université de Lorraine, 2021. Français. ffNNT: 2021LORR0329ff. fftel-03719225 », s. d.

F. Hersant, D. Gautier, et J.I. Lunine. « Enrichment in volatiles in the giant planets of the Solar System F. Hersant; c;d;*, D. Gautiera, J.I. Lunine ». *Elsevier Planetary and Space Science* (1 décembre 2003).

« Fegley, B., Schaefer, L., 2008. Chemistry during accretion of the Earth. I. Volatiles in the “steam” atmosphere. *Meteorit. Planet. Sci.* 43 (Suppl.), 5036. », s. d.

« Hashimoto, G.L., Abe, Y., Sugita, S., 2007. The chemical composition of the early terrestrial atmosphere: Formation of a reducing atmosphere from CI-like material. *J. Geophys. Res.* 112. », s. d.

« Hashizume, K., Sugiura, N., 1998. Transportation of gaseous elements and isotopes in a thermally evolving chondritic planetesimal. *Meteorit. Planet. Sci.* 33, 1181–1195. », s. d.

Iizuka, Atsushi, Sachiko Hayashi, Hideo Tajima, Fumio Kiyono, Yukio Yanagisawa, et Akihiro Yamasaki. « Gas Separation Using Tetrahydrofuran Clathrate Hydrate Crystals Based on the Molecular Sieving Effect ». *Separation and Purification Technology* 139 (janvier 2015): 70-77. doi:10.1016/j.seppur.2014.10.023.

Iizuka, Riko, Kazuki Komatsu, Hiroyuki Kagi, Takaya Nagai, Asami Sano-Furukawa, Takanori Hattori, Hirotada Gotou, et Takehiko Yagi. « Phase Transitions and Hydrogen Bonding in Deuterated Calcium Hydroxide: High-Pressure and High-Temperature Neutron Diffraction Measurements ». *Journal of Solid State Chemistry* 218 (octobre 2014): 95-102. doi:10.1016/j.jssc.2014.06.010.

« INSU | Institut national des sciences de l'Univers du CNRS », 10 novembre 2022. <https://www.insu.cnrs.fr/fr>.

L'univers de la géologie. « La formation du Système solaire », 5 février 2023. <https://actugeologique.fr/2023/02/la-formation-du-systeme-solaire/>.

Pollack, James B., Olenka Hubickyj, Peter Bodenheimer, Jack J. Lissauer, Morris Podolak, et Yuval Greenzweig. « Formation of the Giant Planets by Concurrent Accretion of Solids and Gas ». *Icarus* 124, no 1 (novembre 1996): 62-85. doi:10.1006/icar.1996.0190.

Schaefer, Laura, et Bruce Fegley. « Chemistry of Atmospheres Formed during Accretion of the Earth and Other Terrestrial Planets ». *Icarus* 208, no 1 (juillet 2010): 438-48. doi:10.1016/j.icarus.2010.01.026.

Thomas Smith, et Huaiyu He. « The exploration of Neptune: a noble gas and volatile perspective ». *EPSC Abstracts Vol. 13, EPSC-DPS2019-1439-1* (2019).

Yann Alibert, Olivier Mousis, et Willy Benz. « ON THE VOLATILE ENRICHMENTS AND COMPOSITION OF JUPITER ». *The Astrophysical Journal* 622:L145–L148 (2005).