Zeitschrift: Archives des sciences physiques et naturelles
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 24 (1942)

Artikel: Recherches sur la genèse, la nature et l'évolution des planètes [suite]
Autor: Dauvillier, M.A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-741736

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

RECHERCHES
SUR
LA GENÈSE, LA NATURE ET L'ÉVOLUTION DES PLANÈTES

PAR

M. A. DAUVILLIER

(Avec 12 fig.)

(suite)

II. — La structure et l'évolution des planètes.

Sommaire.

L'auteur, se basant sur l'hypothèse cosmogonique exposée dans la première partie de ce travail, étudie successivement l'évolution chimique des deux groupes de planètes.

Aux réactions chimiques ayant eu lieu pendant leur refroidissement, ont succédé des réactions photochimiques dues à l'ultra-violet solaire qui se poursuivent encore actuellement. Il rend compte de l'aspect et des particularités des grosses planètes: tache rouge de Jupiter, densité anormale de Saturne, anomalie spectroscopique de Pluton, ainsi que de leur spectre. Pour connaître la nature des planètes denses, il cherche, d'abord, à reconstituer la défunte planète d'Olbers. Sa masse primitive est estimée, d'après la totalité de la matière solide dispersée existant dans le système solaire: astéroïdes, satellites capturés, comètes, météorites et poussière cosmique. L'étude statistique des analyses chimiques et minéralogiques des diverses classes de météorites permet de reconstituer chimique-

BIBLIOTHÈQUE DE L'UNIVERSITÉ NEUCHATEL

ment et minéralogiquement cette planète. Il étudie, sur ces bases, l'évolution chimique des planètes denses durant leur refroidissement, l'histoire de leurs lithosphères et de leurs atmosphères successives. Cette évolution est conditionnée par leurs masses. Les plus petites planètes, ainsi que la Lune, voient celle-ci arrêtée à un stade primitif par la perte de leur atmosphère, tandis que Vénus et la Terre poursuivent encore de leur évolution. Il rend compte de la formation des océans, du gaz carbonique et de l'apparition du magnétisme. Il montre l'importance des réactions photochimiques — permises par l'atmosphère primitive de la Terre refroidie superficiellement — et aboutissant à la formation de la matière organique. Il cherche enfin à rendre compte, sur ces bases, des particularités des diverses planètes denses.

* * *

Nous avons vu, dans la première partie de ce travail, comment la cosmogonie et la physique solaire nous amenaient à concevoir l'existence de deux groupes absolument distincts de planètes: les petites planètes denses et les grosses planètes de faible densité. Nous nous proposons maintenant d'étudier la structure et l'évolution de chacun des deux groupes. Les grosses planètes étant les plus simples, nous commencerons cette étude par celles-ci.

1. — *Les grosses planètes: Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune et Pluton.*

Nous avons exposé les raisons qui nous conduisaient à admettre que ces planètes sont essentiellement formées des cinq éléments légers: H, He, C, N et O, appartenant aux deux premiers groupes de la classification périodique. Nous avons vu que chacune d'elles provenait de la fusion de deux masses gazeuses raréfiées de grand volume (de l'ordre de celui du Soleil) d'abord refroidies à basse température. Si nous appliquons la théorie de Helmholtz à ces sphèroïdes de masses mille fois plus faibles que les masses stellaires, nous savons que le travail

contraction les échauffera d'autant plus qu'elles seront plus massives et qu'elles passeront par un stade pseudo-stellaire très fugace, pendant lequel elles donneront naissance à leurs satellites lors de leur réunion puis, qu'elles se refroidiront par rayonnement, d'autant plus rapidement qu'elles seront moins massives.

Si nous considérons ces planètes durant leur stade stellaire, les conditions physico-chimiques y seront plutôt simples. A la

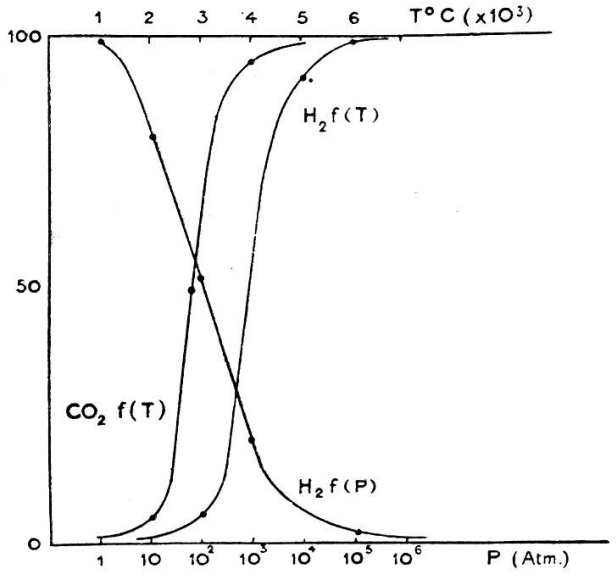


Fig. 4.
Dissociation, en fonction de la température T et de la pression P, de l'hydrogène et du gaz carbonique.

périphérie, c'est-à-dire sous faible pression, les éléments y seront à l'état atomique, à l'exception de quelques molécules, telles que O_3, C_2H_2, qui peuvent coexister (les produits de leur réaction: CO_2, H_2O, seraient dissociés), alors que leur mélange à la température ordinaire constituerait un puissant explosif.

La figure 4 représente, par exemple, d'après E. Briner, le degré de dissociation de H_2 et de CO_2 en fonction de la température T (P = 1 atm.), et de H_2 en fonction de la pression P (T = 6000° C.). La courbe relative à H_2O serait voisine de celle de CO_2.

A mesure que nous considérons des couches plus profondes, sous des pressions croissantes, les combinaisons bi-atomiques

deviennent possibles, si la température n'y croît pas trop rapidement. Nous ne considérerons ici que l'état superficiel probable, afin de pouvoir le comparer aux données de l'observation.

Dès que la température superficielle atteint celle des taches solaires, nous assistons à la formation progressive des molécules H_2, C_2, N_2 et O_2, ainsi que des combinaisons: CH, NH, OH et CN, CO, NO.

Il est à remarquer que toutes ces combinaisons: O_3, NO, etc... qui sont endothermiques quand elles sont effectuées à partir des molécules, sont fortement exothermiques lorsqu'elles sont produites à partir des atomes. E. Briner a montré, par exemple, que la chaleur de formation de O_3 à partir des atomes était de + 140.000 calories, au lieu de — 34.000 à partir des molécules. Mais nous pouvons négliger, du point de vue cosmogonique, cette production de chaleur — de même que celle qui se produira ultérieurement lors des réactions chimiques ayant lieu entre molécules — devant la chaleur libérée par le travail de gravitation. Elles diffèrent d'un ordre de grandeur.

La température s'abaissant, les édifices tels que CH, NH, OH deviennent instables et, vers 2800° C., sous une pression superficielle que nous supposons toujours être de l'ordre de l'atmosphère, il s'ébauche des molécules polyatomiques telles que CO_2, H_2O, NH_3. Aux températures inférieures à 1000° C., il n'y a plus d'ozone (maximum: 3.500° K.); CO s'est transformé en CO_2, NO en N_2O_3. Le cyanogène se polymérise, en paracyanogène et en carbone, l'acétylène donne, de même, CH_4 et des polymères bruns solides.

Les grosses planètes, très éloignées du Soleil, ne reçoivent de lui qu'un *flux* thermique insignifiant, égal au plus, pour Jupiter, à 0,037 de celui que reçoit la Terre. Elles pourront donc se refroidir à de très basses températures et pourront, lorsque l'équilibre thermique sera atteint, être considérées comme *isothermes*. La pression y sera alors décroissante, en fonction du rayon, selon la loi exponentielle. Si elles demeuraient gazeuses, la pression au centre de Jupiter et de Saturne serait de l'ordre de 10^7 atmosphères. La limite de compressibilité des gaz serait rapidement atteinte et l'on pourrait les considérer

comme de densité sensiblement uniforme. Mais nous allons voir qu'en réalité, elles ne sauraient demeurer gazeuses.

Jupiter.

Considérons donc Jupiter refroidi à sa température d'équilibre, soit — 120° C. Etant donnée l'abondance solaire des éléments, nous y aurons d'abord un excès d'hydrogène et d'azote avec des gaz rares (He, Ne, ...) tous gazeux et au-dessus de leur température critique. Tout l'oxygène sera combiné en donnant un noyau solide de H_2O, CO_2 et N_2O_3. L'hydroglace H_2O sera sous la forme de la glace VII de Bridgman, qui ne fond qu'à 192° C. sous 10^4 atmosphères et qui a une densité voisine de 1,1. La carboglace CO_2, qui fond au-dessus de 31° C. sous 6.10^3 atm. aura une densité très voisine de 2,0. Enfin, N_2O_3 y sera un solide bleu foncé fondant à — 103° et de densité 1,78.

La tension de vapeur de l'hydroglace à — 120° C. est négligeable, mais celle de la carboglace sera appréciable (5 mm de mercure) si le gaz carbonique n'entre pas en combinaison.

Le reste du carbone sera à l'état libre, de carbures d'hydrogène solides et de CH_4, tous résultant de la décomposition thermique de C_2H_2. De même, le reste de l'azote sera à l'état de gaz N_2, de paracyanogène et de NH_3. Le carbone, le paracyanogène, les carbures d'hydrogène et l'ammoniac contribueront à former et à colorer le noyau solide. Le point de fusion de NH_3 est, en effet, de — 70° C. et sa densité est 0,82, mais sa tension de vapeur à — 120° C., quoique très faible (10^{-3} atm. ?) est encore sensible, et il se répandra partiellement dans l'atmosphère.

Quant au méthane, il formera un océan liquide sous la pression partielle de 11 atmosphères, mais sa densité est si faible (0,41) qu'il flottera dans l'atmosphère d'azote comprimé dont la densité, sous la pression de 650 atm. et à — 120° C., atteint déjà 0,82. Il en sera de même pour les glaçons d'ammoniac qui se mettront en équilibre hydrostatique à un niveau plus profond.

Ce niveau sera d'ailleurs très superficiel, étant donné le très grand rayon de la planète ($R = 72.10^3$ km) et la valeur

de la pesanteur à sa surface. C. Fabry [1] a calculé, d'après la loi exponentielle, applicable à une atmosphère isotherme, les épaisseurs atmosphériques planétaires pour lesquelles la densité est réduite à 10^{-6}. Pour Jupiter, cette épaisseur ne serait que de 18 km pour une atmosphère d'azote et de 258 km pour une atmosphère d'hydrogène. La planète doit donc offrir un bord net (voy. fig. 5).

A la basse température de Jupiter, toutes les combinaisons chimiques que nous prévoyons sont stables: l'atmosphère ne

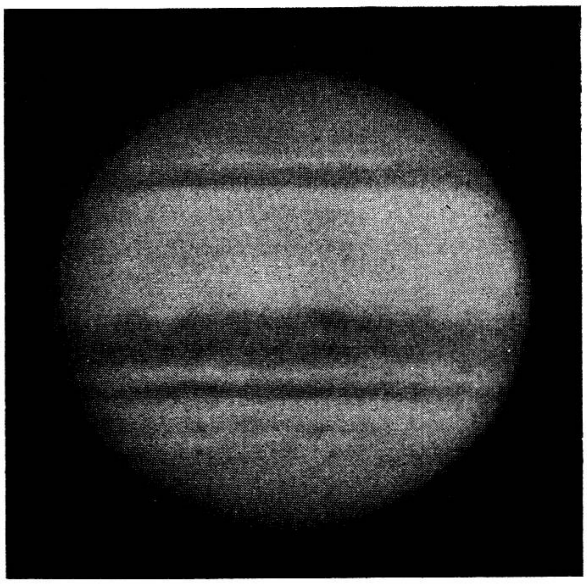


Fig. 5.

Photographie de Jupiter obtenue au Pic du Midi par M. Camichel, le 20 septembre 1941 à 3 h. 44 m.

peut réagir ni sur le noyau, ni sur les îles ou nuages solides ou liquides flottant dans l'atmosphère. Le rayonnement thermique du Soleil ne saurait y engendrer une turbulence comparable à celle que nous observons dans notre atmosphère [2]. On observe pourtant des changements à la surface de Jupiter: ils sont, à notre avis, dus à l'action photochimique du Soleil et, tout

[1] C. FABRY: *Annuaire Bur. Long.* (1938): Les atmosphères des planètes.

[2] La présence d'hydrogène assure une bonne conductibilité thermique aux atmosphères des grosses planètes.

particulièrement, à son rayonnement ultra-violet de très courte longueur d'onde.

On sait que l'arc à haute pression, comme l'arc à vapeur de mercure de Boll, émet un spectre continu analogue à celui de la photosphère ou du corps noir. Si l'on assimile le rayonnement du Soleil à celui du radiateur intégral à 6000° K. on peut calculer son rayonnement ultra-violet, inaccessible à nos mesures. On trouve que son spectre s'étendrait pratiquement jusqu'à 1500 Å et que, pour 2000 Å, l'intensité atteindrait le dixième du maximum, qui a lieu, comme on le sait, pour 5000 Å. Mais, outre cet ultra-violet à spectre continu, émis par la photosphère, la chromosphère doit émettre un rayonnement extrêmement intense, formé de radiations monochromatiques et s'étendant fort loin du côté des rayons Röntgen mous. L'excitation en serait de nature électrique et l'on sait que le rendement de la conversion de l'énergie électronique en ultra-violet extrême est très élevé dans les tubes à vide. Nous avons étudié [1] ce rayonnement par ses propriétés ionisantes, pour toutes les régions de la décharge.

L'existence d'un tel rayonnement ultra-violet solaire semble par ailleurs nécessitée par de multiples effets:

1. L'apparition de queues cométaires à des distances atteignant deux unités astronomiques et l'apparition du spectre du sodium dans les têtes cométaires à une demi-unité astronomique, semblent montrer que l'échauffement du noyau est plus grand que celui qui résulterait de l'absorption du seul rayonnement décelé par la mesure de la constante solaire;
2. Les variations corrélatives de l'activité cométaire et de l'activité solaire, particulièrement bien établies par H. Deslandres [2] et Bosler, dans le cas de la comète d'Encke, montrent l'existence d'un rayonnement ultra-violet intense variant avec l'activité chromosphérique;

[1] A. Dauvillier: *Journ. de Phys.*, t. 7, p. 369-389 (1926): Recherches sur la décharge électrique et les rayonnements émis par les gaz et les solides bombardés par des électrons lents.

[2] H. Deslandres: *C. R.*, t. 126, p. 1326 (1898).

3. La variation de la vitesse de fusion des calottes polaires de Mars, en fonction de l'activité solaire, établie par Antoniadi [1] plaide dans le même sens;
4. L'existence de la couche d'ozone, l'ionisation et l'échauffement de la haute atmosphère terrestre semblent dues à ce rayonnement.

Or, une atmosphère planétaire formée d'hydrogène, d'hélium, d'azote et de traces de gaz carbonique et d'ammoniac est transparente dans l'ultra-violet lointain jusque vers 1500 Å. Le gaz carbonique sera dissocié en CO et oxygène atomique O, qui se polymérisera en O_3, et se condensera en un brouillard bleu [2], très dense (1,71), ayant la propriété de colorer fortement en rouge orangé (au-dessous de — 46° C.) les glaçons de NH_3. Nous considérons ainsi la *tache rouge* de Jupiter comme un immense glaçon plat, ovale (14.000 × 46.000 km), sans doute fort mince, de NH_3 coloré par O_3, flottant dans l'atmosphère d'azote-hydrogène. Cette île possède en effet une vitesse variable en longitude et divers objets remarquables ont été vus passer *au-dessous*. Les nuages bleus d'ozone, au contact de l'atmosphère de NH_3 se coloreront également en rouge orangé, puis donneront des fumées blanches d'azotite d'ammonium tombant sur le noyau:

$$3O_3 + 2NH_3 = NO_2\,NH_4 + 3O_2 + H_2O\ .$$

O_2 reformera O_3. Quant au CO formé, il sera réoxydé en CO_2 par O_3 et réagira photochimiquement sur NH_3 en donnant un dépôt blanc d'amide formique:

$$CO + NH_3 = H.CO.NH_2\ .$$

Le gaz carbonique et l'ammoniac s'évaporent du noyau à mesure que leur tension de vapeur tend à diminuer, par suite

[1] ANTONIADI: *Revue du Ciel* (déc. 1916).

[2] Les filets bleus observés sur Jupiter par Antoniadi en 1926 peuvent être formés d'ozone liquide ou de N_2O_3 solide, mais la forte tension de vapeur de O_3 à —120° C. (½ atm.) semble devoir faire écarter la première de ces hypothèses.

de ces réactions photochimiques, si bien que la production de $H.CO.NH_2$ et de $NO_2\,NH_4$ peuvent se poursuivre indéfiniment.

L'azote peut enfin être partiellement transformé en *azote actif* par l'ultra-violet extrême, capable de réagir sur H_2 en donnant NH_3 et sur O_3 avec formation de cirri bleus de N_2O_3. Nous n'insisterons pas sur ces réactions.

Il est difficile de préciser la densité moyenne du noyau solide de Jupiter, car nous ignorons les proportions initiales des divers gaz ayant constitué la planète. L'aplatissement étant inférieur (1/15) à celui (1/9,4) que l'on peut calculer en admettant une densité homogène et égale à la densité moyenne 1,36, la présence d'un fort noyau interne solide et dense est certaine. L'atmosphère ayant une densité limite de 1,2, il est probable que la densité moyenne du noyau est voisine de 1,4. Elle correspondrait à un mélange de 0,7 d'hydroglace et de 0,3 de carboglace en volumes, celle-ci occupant sans doute surtout la partie centrale.

L'hydrogène, l'azote, les gaz rares, ne sont pas décelables spectroscopiquement. On sait que CH_4 et NH_3 ont effectivement été découverts par Wildt en 1932 dans les atmosphères de Jupiter et de Saturne.

Les satellites de Jupiter doivent posséder une densité voisine de celle de la planète, pouvant varier de 0,82 pour NH_3 solide à 2,0 pour la carboglace. Cette densité est extrêmement difficile à mesurer. La méthode interférentielle et celle de la double image donnent des résultats assez concordants pour la mesure du diamètre et conduisent, d'après Bosler, à des valeurs comprises entre 1,1 et 1,8. Les masses, de l'ordre de celle de la Lune, varient de 48.10^{24} gr à 152.10^{24} g, c'est-à-dire qu'ils ne sauraient retenir, même à — 120° C., une atmosphère importante. Cependant, le troisième satellite possède une calotte polaire peut-être due à une trace d'atmosphère de NH_3. Les albédos, très variables, varient selon la concentration en carbone. Les satellites extérieurs, qui sont des astéroïdes capturés, doivent, au contraire, avoir des densités caractéristiques variant de 3,3 à 8,0.

On est tenté de rapprocher les variations d'aspect et d'éclat de Jupiter de la période d'activité undécennale du Soleil.

Cependant, une étude soigneuse des changements de couleur de la zone équatoriale portant sur 150 ans, a conduit Stanley Williams [1] à une période de 11,95 ans, très voisine de la période de révolution (11,86 ans) et ne pouvant se confondre avec la période undécennale (11,1 ans). De plus, la couleur ocreuse se manifeste à l'aphélie et non au périhélie. Cette question n'est pas épuisée.

Particularités des autres grosses planètes.

Les considérations exposées ci-dessus sont applicables aux autres grosses planètes. Les seules différences que nous pouvons prévoir seront dues à leur distance, exponentiellement croissante, du Soleil et à leur température corrélativement décroissante. Leur commune nature est établie par le fait que les densités de Jupiter, d'Uranus et de Neptune sont les mêmes. Cependant la densité exceptionnelle de Saturne: 0,7, presque égale à la moitié de celle des autres, était toujours demeurée inexplicable. Il serait invraisemblable de supposer cette planète d'une nature différente. Mais, si nous remarquons que sa température — 150° C. coïncide avec la température critique de l'azote, — 147° C., et que la densité critique de ce corps est 0,31, nous concevons aussitôt la cause de cette anomalie exceptionnelle. Si le noyau solide a la même densité 1,4 que dans les autres planètes, il suffit que son volume soit égal à 0,4 et que celui de l'océan d'azote au point critique soit de 0,6, pour offrir la densité moyenne 0,7 observée.

L'océan de Saturne est donc un mélange de N_2 à l'état critique et de CH_4 liquide, de densités très voisines. Contrairement au cas précédent, il ne flotte pas dans l'atmosphère — qui n'est plus guère constituée que d'hydrogène et d'hélium — mais recouvre le noyau solide. La pression critique de N_2 est de 33,5 atm.; la tension de vapeur du méthane n'est plus que de 2 atm.; celles du gaz carbonique (100 b) et de l'ammoniac sont devenues presque insensibles. Cependant, ce dernier gaz y a encore été décelé spectroscopiquement par des bandes d'absorp-

[1] *Monthly Notices*, t. 80, p. 467-475 (mars 1920).

tion très faibles, mais sa concentration est devenue insuffisante pour produire les colorations rouges caractéristiques de Jupiter.

L'anneau de Saturne, résultant de la fragmentation d'un astéroïde capturé, ayant dépassé la limite critique de distance de Roche, est composé de poussière cosmique de nature météoritique (voy. fig. 6).

Fig. 6.

Photographie de Saturne obtenue au Pic du Midi par M. Camichel, le 22 septembre 1941 à 3 h. 20 m.

Sur Uranus, où la température s'abaisse à — 207° C., le méthane est solide, sa tension de vapeur n'est plus que de 50 mm; l'azote est au voisinage de son point de fusion (— 210° C.), sa tension de vapeur n'est que de 86 mm. L'hydrogène et l'hélium sont encore gazeux et constituent l'atmosphère. Les tensions de vapeur de CO_2 et de NH_3 ne sont plus sensibles. Ce dernier gaz n'est plus décelable spectroscopiquement. La densité de N_2 liquide étant de 0,88 et celle de N_2 solide de 1,02, l'existence d'une grande proportion d'azote — si elle a lieu — ne peut entraîner une densité moyenne anormale de la planète, ainsi que dans le cas précédent.

Enfin, sur Neptune, où la température s'abaisse à — 221° C., l'azote est entièrement solide. Les conditions générales sont sensiblement les mêmes.

LABORATOIRE DE PHYSIQUE UNIVERSITÉ NEUCHATEL

Le cas de Pluton, dernière planète actuellement connue du système solaire, est quelque peu différent. Cette planète est caractérisée par une très faible masse que l'on estime égale à 0,7 de celle de la Terre. L'hydrogène y atteint sans doute sa température critique (— 240° C.). L'atmosphère n'est plus constituée que d'hydrogène (P = 13 atm.) et d'hélium. La présence d'une grande quantité d'hydrogène à l'état critique, de densité 0,03 pourrait encore causer une densité moyenne très faible. La tension de vapeur de CH_4 est devenue trop faible pour que le spectre présente aucune bande d'absorption. C'est pour cette raison que Slipher a rangé Pluton, non avec les grosses planètes, mais avec les petites planètes denses. Nous voyons, au contraire, que l'anomalie spectroscopique de Pluton n'est due qu'à sa basse température et que sa nature ne saurait différer de celle des grosses planètes.

2. — *Les petites planètes : Mercure, Vénus, la Terre, Mars et Vulcain.*

L'histoire des petites planètes denses est beaucoup plus complexe que celle des grosses, car, outre les éléments légers dont ces dernières sont constituées, elles comportent de nombreux éléments plus lourds, provenant du filament de vapeurs métalliques ayant servi à les édifier. Le fait qu'elles offrent, comme les grosses planètes, toutes sensiblement la même densité (de 6 pour Mercure à 3,8 pour Mars) montre qu'elles sont construites d'une manière analogue. Pour élucider cette structure, nous nous baserons sur le fait que la fragmentation de la planète d'Olbers (Vulcain) nous offre le moyen, par l'étude statistique des analyses chimiques des météorites, de connaître la structure interne de cette planète défunte. C'est donc, tout d'abord, celle-ci que nous allons essayer de reconstituer et qui nous servira ensuite de modèle.

La planète Vulcain.

Nous avons vu que la presque totalité la matière solide existant à l'état dispersé dans le système solaire provenait nécessairement de la fragmentation des deux planètes jumelles

situées, d'après la loi exponentielle, entre Mars et Jupiter. Comme Pluton représente l'extrémité des fuseaux photosphériques de gaz légers, Vulcain représente l'extrémité du fuseau de vapeurs métalliques. Ce sera donc, vraisemblablement, la plus petite planète du premier groupe, et sa masse sera inférieure à celle de Mercure. Si nous extrapolons la courbe représentant la masse des planètes denses en fonction de leur numéro d'ordre n, nous sommes conduits à la même conclusion. Cherchons à estimer cette masse.

La masse de Vulcain est égale à la somme des masses des astéroïdes libres et capturés, des comètes, des météorites et de la poussière cosmique encore présents dans le système solaire, augmentée de la matière cosmique reçue par la Terre, les planètes et le Soleil depuis l'époque de la rupture. L'âge des météorites étant, d'après Paneth, de 3.10^9 ans, cette époque ne peut être plus reculée.

Le *volume* total des petites planètes a été estimé par Stroobant, par une méthode photométrique, égal à $9{,}4.10^{-4}$ celui de la Terre, soit à 10^{24} cm^3, ou une masse de $5{,}2.10^{24}$ g, en adoptant la densité moyenne des planètes denses. La masse des satellites capturés par Mars, Jupiter et Saturne est négligeable, sauf Titan, qui a une masse de $1{,}2.10^{26}$ g.

La masse des noyaux cométaires est faible: Lindemann a estimé celui de la comète de Halley à 2.10^{14} g. On s'accorde à leur attribuer un volume inférieur au kilomètre cube ($M < 5{,}2.10^{15}$ g). Même en admettant 10^6 comètes, leur masse totale serait encore insignifiante (10^{20} g).

Les météorites reçues par la Terre ont une masse négligeable: on estime leur masse annuelle à 10^7 g. A ce taux, les météorites reçues par la Terre depuis 10^9 ans ne représenteraient que 10^{16} g.

On pourrait penser que la majeure partie des débris de Vulcain existent encore dans l'espace environnant le Soleil jusqu'à l'orbite de Jupiter, sous forme de poussière cosmique: c'est la théorie classique de la lumière zodiacale. Fessenkoff [1]

[1] FESSENKOFF : *La lumière zodiacale.* Paris, Gauthier-Villars, (1914).

a montré que ce volume aurait la forme d'un ellipsoïde de révolution très aplati (0,9) et que la densité y varierait en raison inverse de la distance au Soleil. Mais la densité moyenne ne saurait y être supérieure à la limite permise par la mécanique céleste. Hirn [1] a montré que cette densité ne peut atteindre 10^{-16} g/cm^3 sans réduire la durée de l'année terrestre d'une quantité incompatible avec les observations. P. Salet [2] interprétant, de même, la luminosité du ciel nocturne comme due à la poussière cosmique, arrive à une densité de 10^{-21} g/cm^3, 10^5 fois plus petite. Prenons, pour demi-grand axe de l'ellipsoïde de la lumière zodiacale, le rayon de l'orbite de Jupiter ($R = 7{,}8.10^{13}$ cm), un aplatissement égal à 0,9 et la limite de Hirn, nous obtenons, pour la masse totale actuelle:

$$M < \frac{4}{3}\pi \overline{7{,}8}^3 . 10^{38} . 10^{-16} < 19 . 10^{24} \text{ g}$$

soit une masse de l'ordre de celle des astéroïdes et, probablement, considérablement plus faible.

Par conséquent, si nous ne trouvons plus, dans le système solaire actuel, assez de matière solide dispersée pour construire notre double planète, cela signifie que la plus grande partie de ses débris ont été, depuis 10^9 ans, recueillis par le Soleil et les planètes. Le système évolue, comme le disait Charlier, vers l'état « d'un espace débarrassé de comètes, de météorites et de poussière cosmique ». Nous voyons, en passant, combien grande est l'erreur de tous ceux — et ils sont nombreux — qui cherchent encore à « faire » de la poussière cosmique en « condensant » des gaz et qui utilisent cette poussière, soit à entretenir le rayonnement du Soleil, soit à construire les planètes, soit même à produire des orages magnétiques et à transporter des germes vivants !

L'estimation de la quantité de poussière cosmique actuellement reçue par la Terre est incertaine. En comptant 20.10^6 étoiles filantes par jour, de masse moyenne égale à 1/4 g, on

[1] HIRN: *Constitution de l'espace céleste.* Paris, Gauthier-Villars (1889).

[2] P. SALET: *Astronomie*, p. 145 (1923).

obtiendrait: 2.10^9 g par an. Les étoiles filantes télescopiques[1] sont cent fois plus nombreuses, mais beaucoup plus petites, ce qui donnerait, au plus, 2.10^{10} g. Salet a donné 10^{11} g/an, Radau: 10^{12} g, Nordmann: 10^{13} g. Si nous adoptons la valeur ici calculée, soit libéralement 10^{11} g, nous devons encore la multiplier par la durée de la capture: 10^9 ans, en admettant un taux de récolte constant[2] et par un coefficient 10^6 tenant compte de la masse du Soleil et de celle des autres planètes. Nous obtenons ainsi, finalement, pour masse de Vulcain:

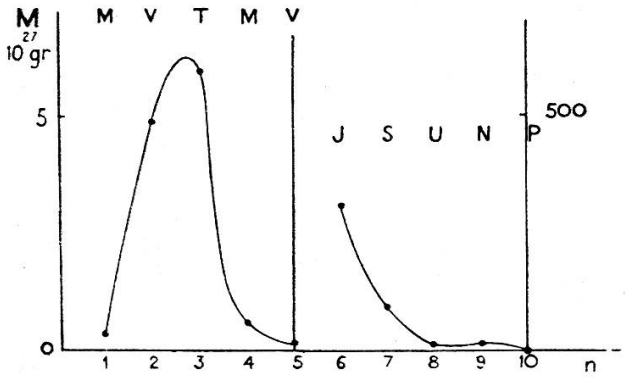


Fig. 7.
Variation de la masse des planètes en fonction de leurs numéros d'ordre n.

10^{26} g, soit 1/60 de la masse terrestre et un peu plus que la masse lunaire (1/81 T). Cette valeur se place bien sur la courbe des masses planétaires (voir fig. 7). Elle ne saurait être dix fois plus petite, auquel cas la masse gazeuse se serait diffusée, ni dix fois plus grande, car elle excéderait celle de Mars. Titan représente peut-être, alors, l'une des planètes Vulcain ayant échappé à la fragmentation.

Nous aurons donc affaire à la plus petite planète du système solaire, mais cette faible masse ne saurait être une cause d'instabilité et nous ne saurions y trouver la raison d'une fragmentation spontanée[3]. L'étude minéralogique des météo-

[1] Celles-ci, montrant pour la plupart des vitesses supérieures à la vitesse parabolique, sont étrangères au système solaire et ne doivent pas être prises ici en considération.

[2] La matière cosmique était, à l'origine, moins fragmentée qu'aujourd'hui.

[3] Sans doute observe-t-on des couples d'astéroïdes jumelés et des

rites montre, en effet, que la rupture a eu lieu à un âge déjà avancé où l'évolution chimique était terminée. Nous avons vu que cette rupture était due au frôlement des deux planètes jumelles Vulcain et Vulcain′ et que cet accident, en apparence anodin, dominait, en fait, toute la cosmogonie.

Ce n'est point ici le lieu de discuter la question de l'origine des comètes, aujourd'hui résolue grâce aux travaux de E. Strömgren, de Fayet et de L. Fabry, non plus que celle de l'origine des astéroïdes, des météorites et des étoiles filantes. Rappelons seulement: l'impossibilité, pour ces petits corps, d'une formation directe à partir d'un gaz; le fait que les orbites des deux plus gros astéroïdes, Cérès (780 km) et Pallas (490 km), sont encore presque sécantes; la loi des distances au Soleil de Stroobant (courbe en cloche); la forme polyédrique des astéroïdes et des météorites démontrant qu'ils proviennent de corps éclatés (Eros a la forme d'un prisme de 11 × 35 km); le fait des radiants stationnaires, montrant que les météores décrivent, dans le sens direct, des orbites elliptiques faiblement inclinées sur le plan de l'écliptique, ce qui les apparente avec les comètes à courtes périodes; la continuité complète entre les orbites des planètes et des comètes, en passant par les astéroïdes (on connaît des astéroïdes à orbites cométaires); les pluies d'étoiles filantes consécutives à la fragmentation des noyaux cométaires; etc...

Enfin, il n'est pas inutile de faire remarquer que la composition isotopique du fer et du nickel des météorites est identique à celle des éléments terrestres. Il serait *possible* que cette composition variât avec le lieu d'élaboration des éléments, c'est-à-dire d'une étoile à une autre.

Les météorites ont été magistralement étudiés par Daubrée [1] et la statistique de leurs analyses chimiques a été faite par

ruptures spontanées de noyaux cométaires, mais les tensions internes dues aux inégalités thermiques ne peuvent jouer librement que pour des fragments déjà éclatés et de faible masse.

[1] A. DAUBRÉE: *Les régions invisibles du Globe et des espaces célestes*. Paris (1889).

Farrington [1]. Voici le résultat de l'analyse de 125 *météorites pierreuses* et de 318 *sidérites:*

Fe	72,06	S	0,49	P	0,14
O_2	10,10	Ca	0,46	Cr	0,09
Ni	6,50	Co	0,44	K	0,04
Si	5,20	Al	0,39	C	0,04
Mg	3,80	Na	0,17	Mn	0,03

Ti, Sn, Cu, Na, As, Cl_2, N_2, He, H_2, etc. : 0,05

Une faible partie seulement du fer, du nickel et du cobalt sont combinés (6%), l'alliage natif atteignant la proportion de 68,4%. Le volume des gaz occlus: CO_2, CO, CH_4, H_2, He est quatre fois celui des échantillons. L'hydrogène et l'oxyde de carbone sont contenus dans les sidérites, le gaz carbonique dans les roches. C'est le dégazage thermique de météorites par le rayonnement solaire qui donne naissance aux aspects cométaires, comme nous avons essayé de le montrer [2].

On voit immédiatement que les planètes denses sont toutes essentiellement constituées d'un gros noyau de ferro-nickel ($d = 8$) (sidérites) entouré d'une scorie de silicates de magnésium et d'aluminium ($d = 3,5$) (météorites pierreuses). Si ces deux constituants sont d'égal volume, la planète a une densité moyenne de 5,7, voisine de la densité des planètes denses. Un corps ayant la composition atomique indiquée au tableau précédent aurait une densité de 5,57 qui était celle de Vulcain. Si nous admettons que la masse de chacune des planètes Vulcain était de 10^{26} g, leur diamètre était de: 3250 km.

Le noyau de ferro-nickel des planètes est formé de *plessite*, mélange de *camasite* (7 % Ni, $d = 7,90$) et de *taenite* (27% Ni, $d = 8,15$). Par suite du refroidissement extrêmement lent, ces cristaux sont volumineux (de l'ordre du mètre). Les noyaux des planètes sont donc fragiles et l'on conçoit leur fragmentation facile. La concentration moyenne en Ni est de 9,5%. Comme la proportion de C est très faible ($< 4.10^{-4}$) on a affaire, non à une *fonte*, mais à un *acier* au nickel-cobalt-

[1] O. C. FARRINGTON: *Meteorites.* Chicago (1915).

[2] A. DAUVILLIER : *Bull. Astr.*, t. 8, p. 213-220 (1933); Sur le mécanisme des phénomènes cométaires.

chrome, extrêmement dur et rigide, même au voisinage de son point de fusion, ce qui explique la rigidité interne du globe.

En dehors de cet alliage natif, les météorites renferment des carbures, tels que la *cohénite* $(Fe, Ni, Co)_3 C$, analogue à la *cémentite* (Fe_3C), du *carborundum* SiC — qui n'existe pas à l'état naturel sur la Terre —, du *graphite*, du *diamant*. Elles contiennent des phosphures, comme la *shreibersite* $(Fe, Ni, Co)_3 P$, des sulfures: *pyrrhotine*: FeS, *daubréelite:* FeS, $Cr_2 S_3$, *oldhamite:* CaS. Quelques minéraux sont communs aux météorites et à la Terre: péridot, pyroxène, enstatite, feldspath anorthite, fer chromé, pyrite magnétique, fer oxydulé, graphite. On ne trouve jamais dans les météorites d'orthose, de mica, de quartz, de tourmaline; ni granite, ni gneiss, ni aucune roche sédimentaire, en un mot, aucun minéral ayant pu prendre naissance grâce à l'action minéralisatrice de la vapeur d'eau surchauffée.

Les *tectites* sont des météorites rares qui ont fait couler beaucoup d'encre. Ce sont essentiellement des verres fondus légers ($d = 2,5$), piriformes, silicates d'aluminium riches en silice libre, se rapprochant chimiquement des granites. Ils représentent, à notre avis, la croûte superficielle vitreuse de Vulcain, qui a pu être partiellement refondue lors de la rencontre. Enfin, les *météorites charbonneuses* très rares (6 chutes), sont de très faible densité ($1,9 < d < 3$); le carbone n'y est pas libre, mais combiné à l'hydrogène et à l'oxygène. Elles renferment des hydrocarbures solides et liquides qui ont pu avoir l'origine exposée plus haut, à propos de l'évolution chimique des grosses planètes (dissociation thermique du cyanogène et de l'acétylène). Il va sans dire que l'on n'a jamais trouvé, dans les météorites, le moindre germe vivant (Pasteur), pour cette simple raison qu'une aussi petite planète ne pouvait retenir ni vapeur d'eau, ni atmosphère.

L'évolution chimique des planètes denses.

Nous allons maintenant chercher à préciser l'évolution chimique des planètes denses — comme nous l'avons fait pour les grosses planètes — en les prenant à leur stade gazeux. Nous avons vu que ces planètes, par suite de leur faible

masse, n'étaient pas passées par une véritable phase stellaire ($T > 6000°$ C.) et que leur échauffement par contraction était demeuré modéré. Dès l'origine, leurs deux constituants essentiels: les gaz légers (qui devaient seuls former les grosses planètes) et les vapeurs métalliques (qui devaient les constituer presque entièrement), se sont ordonnés par ordre de densité. Nous avons déjà étudié les réactions superficielles auxquelles avaient donné naissance les gaz légers et nous n'y reviendrons pas: nous ajouterons seulement qu'aux premières molécules diatomiques: CH, NH, CN, nous devons en ajouter de plus denses, présentes dans les taches solaires (où la température est moindre (3700° K.) et la pression plus élevée). Ce sont: MgH, CaH, AlH, TiO, AlO, ZrO, SiF. Il est à remarquer qu'en présence d'un excès d'hydrogène atomique, nous aurons MgH et CaH et non MgO et CaO.

Les premières gouttelettes liquides qui se solidifieront seront celles des carbures des éléments Ti, Zr, Ct, dont les points de fusion sont respectivement de 3420, 3805 et 4160° K. Ce sont les corps les plus réfractaires connus. Elles flotteront au sein des vapeurs métalliques sous haute pression et formeront l'embryon du futur noyau. Au-dessous de 3500° C. le noyau de ferro-nickel (Fe, Ni, Co, Cr, Mn, etc...) se condensera à l'état liquide en même temps que s'effectueront les réactions du four électrique. Moissan a montré qu'elles étaient caractérisées par la dissociation des composés oxygénés et la stabilité des carbures et des siliciures métalliques.

Il se formera des *pluies* de carbures tels que: C_2Ca, CFe_3, CMn_3, C_3Al_4; de siliciures: SiFe, SiC, Si_2Ca; de borures: TiB; de nitrures: N_2Al_2, N_4Si_3, N_2Si_2, N_2Ca_3, NB; d'hydrures: CaH_2, MgH_2, puis, plus tard, d'oxydes: CaO, MgO, SiO_2, de sulfures: CaS, FeS; de phosphures: P_2Ca_3, PFe, etc... Les éléments alcalins: Na, K, se combineront avec les halogènes: Cl, F... pour donner des chlorures et fluorures volatils demeurant dans l'atmosphère.

En réalité, les carbures, les sulfures, les phosphures et les halogénures ne se formaient qu'en infime proportion, étant donné la rareté du carbone, du soufre, du phosphore et des halogènes. Par contre, il se formait une grande quantité d'hy-

drures, de nitrures, de siliciures et d'oxydes. En effet, si l'on se reporte au tableau précédent et si l'on cherche à y oxyder totalement les éléments le plus électropositifs: Ca, Mg, Al, on constate qu'il ne reste plus d'oxygène que pour oxyder la moitié du silicium. Cet élément n'existant jamais à l'état libre dans la nature, nous en déduisons la formation d'une grande quantité de siliciures — surtout de fer — devant encore exister dans le noyau. Comme les météorites renferment, en outre, encore quelque 6% de métaux ferreux *oxydés* (Fe, Cr, Mn), il est établi que *tout l'oxygène fut fixé dès l'origine par les éléments électropositifs*. Les combinaisons telles que CO, NO, H_2O n'auront pas lieu en présence de Ca et de Mg. Nous verrons ultérieurement l'importance de cette conclusion.

Au-dessous de 3000° C., les planètes denses seront encore à peu près entièrement liquides, étant formées d'un noyau métallique se refroidissant lentement, entouré d'une scorie d'oxydes légers en ébullition. L'atmosphère, dont la pression dépassait, sur la Terre, 300 kg/cm² était formée de vapeurs d'oxydes métalliques et d'halogénures alcalins [1], des gaz rares, de cyanogène et d'acétylène et d'un excès d'hydrogène et d'azote. C'est à cette phase tardive que se sont rencontrées et fusionnées les deux planètes jumelles devant constituer la Terre et qu'est née la Lune, fragment détaché de la lithosphère. C'est aussi à cette phase de leur évolution que les plus petites planètes denses et la Lune ont perdu leur atmosphère. Appliquant la théorie cinétique des gaz aux atmosphères planétaires, Johnstone Stoney (1867) a montré qu'aux températures élevées, la vitesse moyenne d'agitation thermique pouvait, sur de petits astres, excéder la vitesse critique au-dessus de laquelle tout corps matériel, lancé radialement, quitte définitivement la planète. Si l'on désigne par T la température absolue et par m la masse moléculaire, la vitesse quadratique moyenne v_m s'exprime:

$$v_m = 15790 \sqrt{T/m} \text{ cm/sec.}$$

[1] Ceci explique la *diffusion* complète, dans la nature actuelle, d'éléments cependant peu abondants, comme Na, ou rares, comme B.

Nous avons représenté les variations de v_m en fonction de T sur la figure 8, pour l'hydrogène et l'azote, en faisant figurer, en outre, les points relatifs à He, O_2, Cl_2, ainsi que les vitesses critiques v_c relatives à Mars, Mercure, Vulcain et la Lune. Si l'on désigne par M la masse de la planète, par R son rayon, par G la constante de la gravitation ($G = 6{,}66.10^{-8}$ C.G.S.), cette vitesse s'exprime par:

$$v_c = \sqrt{2\,GM/R}\ .$$

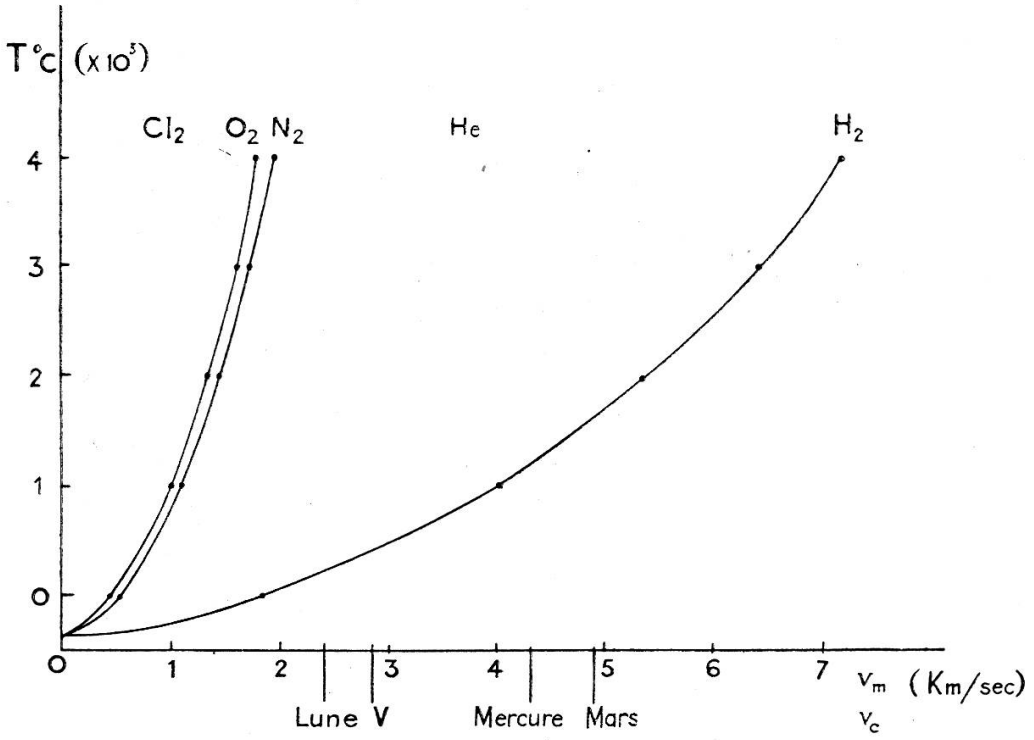


Fig. 8.

Vitesses quadratiques moyennes moléculaires v_m de quelques gaz, en fonction de la température T, comparées aux vitesses critiques d'extraction planétaires v_c.

On voit sur le graphique qu'à 3000° C., l'hydrogène n'est retenu par aucun d'eux, que l'hélium s'échappe de la Lune et de Vulcain et que, seuls les gaz lourds, N_2, H_2O, CO_2 pourraient être retenus. En réalité, la petite proportion de molécules animées de plus grandes vitesses[1], suffit à épuiser l'atmosphère.

Vers 2000° C., l'ébullition de la silice cesse et à 1750° C., la

[1] 4% des molécules ont une vitesse double de v_m.

première écorce silicatée se solidifie sur le noyau liquide. Elle est formée de silicates de magnésium denses (3,4) réfractaires et basiques, comme le *péridot:* SiO_2, 2 (Mg, Fe)O. Elle est séparée du noyau métallique par une couche encore fondue de silicate ferreux comme la *fayalithe:* SiO_2 . 2FeO ou *péridot noir* (qui cristallise dans les laitiers). Celui-ci est très dense (3,9 à 4,2); il se solidifie à 1500° C. et se trouve encore séparé du noyau par une couche intermédiaire de siliciures de fer.

Peu après, la silice légère (2,2), en excès, se solidifie à la surface, en formant la première croûte vitreuse (1685° C.). Vers 1500° C., le noyau métallique commence à son tour à se solidifier, mais tout l'interieur de la planète demeurera à une température élevée, par suite du dégagement de chaleur causé par la présence des éléments radioactifs U, Th, K, comme nous le verrons en détail dans la troisième partie de ce travail.

Bientôt (1400° C.), la croûte solide se recouvre d'une mer d'halogénures alcalins fondus d'une quarantaine de mètres d'épaisseur (NaCl: 40 m, KCl: 1 m, etc...). En même temps, se forment les cyanures, à partir de la cyanamide calcique: CN_2Ca, elle-même produite par l'action des éléments N_2 et C sur les carbures et les azotures alcalino-terreux:

$$C_2Ca + N_2 = CN_2Ca + C$$
$$N_2Ca_3 + 5C = CN_2Ca + 2C_2Ca$$
$$CN_2Ca + C = Ca(CN)_2$$
$$CN_2Ca + 2NaCl + C = 2NaCN + CaCl_2$$

C'est à cette époque que se précise l'évolution chimique des silicates à la faveur du *bain minéralisateur* des halogénures fondus et de la vapeur d'eau surchauffée sous haute pression, qui fait alors son apparition. Le magma fondu, saturé d'hydrogène, de carbures d'hydrogène et d'hydrures, d'azote et de gaz rares, renferme des oxydes ferreux du type Fe_2O_3 seul stable au-dessous de 1370° C. [1]. Ces oxydes sont réduits en donnant de la *magnétite* et de la *vapeur d'eau*:

$$3\ Fe_2O_3 + H_2 = 2\ (FeO.\ Fe_2O_3) + H_2O\ .$$

[1] Pour l'étude de la réduction des oxydes de fer par l'hydrogène et l'oxyde de carbone en fonction de la température, on se reportera à la thèse de Chaudron, Paris (1921).

Celle-ci, réagissant à son tour sur les siliciures, carbures, nitrures, hydrures, sulfures, phosphures, arséniures, mettra en jeu toute la *chimie du volcanisme*; citons par exemple:

$$2C_3Al_4 + 12H_2O = 6CH_4 + 4Al_2O_3$$
$$Ca_3N_2 + 3H_2O = 2NH_3 + 3CaO$$
$$2BN + 3H_2O = B_2O_3 + 2NH_3$$
$$3FeS + 4H_2O = Fe_3O_4 + 3H_2S + H_2$$
$$Ca_3P_2 + 3H_2O = 3CaO + 2PH_3$$

Le magma, émulsionné par la vapeur d'eau et les produits volatils résultant de ces réactions, va se gonfler en produisant des phénomènes physiques que nous étudierons dans la troisième partie de ce travail. Notons seulement ici que l'atmosphère va s'enrichir de méthane, d'ammoniac, de vapeur de soufre, d'hydrogène sulfuré, phosphoré, arsénié, etc... qui réagiront d'ailleurs aussitôt sur la vapeur d'eau en grand excès. C'est ainsi que les hydrocarbures seront transformés en oxyde de carbone, puis en gaz carbonique:

$$CH_4 + H_2O = CO + 3H_2$$
$$CO + H_2O = CO_2 + H_2$$

Finalement, une fois la consolidation des magmas éruptifs terminée, l'atmosphère ne sera plus constituée que d'un excès d'hydrogène et d'azote, des gaz rares, de vapeur d'eau, d'ammoniac et de gaz carbonique. *Aux composés hydrogénés auront succédé les composés acides oxygénés*, tels que l'anhydride carbonique, l'acide borique, l'acide phosphoreux, l'anhydride sulfureux, etc...

Les petites planètes, comme Vulcain et Mercure, de même que la Lune, qui perdent au fur et à mesure tous ces gaz et produits volatils, ainsi que la vapeur d'eau, verront leur évolution chimique s'arrêter à ce stade, que nous appellerons le *stade lunaire* et leur surface ne changera désormais plus d'aspect. Pour les deux grosses planètes denses, Vénus et la Terre, l'évolution chimique va, au contraire, se poursuivre et se compliquer par l'action de la vapeur d'eau. L'évolution de Mars s'arrêtera à un stade intermédiaire.

A 580° C., point de Curie de la magnétite, l'écorce des planètes denses s'aimantera dans le champ magnétique cosmique représenté par les courants radiaux que constituent les jets coronaux et leur prolongement ou lumière zodiacale. C'est l'origine du magnétisme terrestre [1] et lunaire.

Nous avons vu que la lithosphère était essentiellement formée de trois oxydes principaux, dont un, acide: SiO_2 et deux basiques: MgO et Al_2O_3. Les silicates magnésiens, abondants et denses, en constitueront la majeure partie, que nous appellerons le *sima* (Suess), tandis que les silicates alumino-alcalins légers formeront la croûte superficielle ou *sial*. A la surface, la silice se trouvera en présence d'alumine et d'alcalins (K_2O, Na_2O ou CaO) et, d'après la loi des phases, ces trois constituants pourront donner naissance à trois espèces de cristaux qui seront les *feldspaths*, les *micas* et le *quartz*. Un type de feldspath sera, par exemple, l'*orthose* ou feldspath potassique: $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6\,SiO_2$, de densité 2,56, fondant à 1200° C. Un type de mica sera la *muscovite* (H, K) $O \cdot Al_2O_3 \cdot 2\,SiO_2$. La cristallisation de ces trois constituants — le quartz agglomérant les deux autres — donnera les *gneiss* primitifs [2] qui formèrent ainsi la seconde croûte terrestre.

Le quartz a très probablement cristallisé au-dessous de 400° C., température d'altération de la topaze. Le fait d'y trouver des *inclusions* de CO_2 liquide, N_2, H_2, CH_4 et de solutions salines de chlorures et carbonates alcalins (Renard, De la Vallée Poussin), prouve la présence, dans l'atmosphère primitive, de CO_2 sous forte pression, d'un excès de gaz hydrogénés et l'absence d'oxygène libre. Le *sel gemme* de Wieliczka renferme aussi: H_2, CH_4 et CO.

L'atmosphère contenait aussi davantage de gaz rares: Lord Rayleigh [3] a récemment trouvé dans le granite treize fois plus de néon que dans l'atmosphère actuelle. Les expériences de J. J. Thomson et de Ramsay (1912) avaient déjà montré que le mica et la plupart des métaux renfermaient une éton-

[1] BIRKELAND: *C. R.*, t. 157, p. 275 (1913); A. DAUVILLIER: *Revue scientifique*, t. 73, p. 73-82 (1935); *C. R.*, t. 210, p. 177 (1940).
[2] H. DOUVILLÉ: *C. R.*, t. 159, p. 221 (juillet 1914).
[3] Lord RAYLEIGH: *Nature*, t. 141, p. 410 (1938).

nante quantité d'hélium et de néon. Le rapport invariable des gaz rares à l'azote (Moureu et A. Lepape) date de cette époque et non de l'origine première du globe, car nous avons vu l'azote jouer un rôle chimique actif durant la haute température primitive, avant de se transformer partiellement en NH_3. L'existence de cristaux de quartz enfumé, colorés en brun par des carbures [1] est à rapprocher de l'existence des météorites charbonneuses et des produits de polymérisation de C_2N_2 tels que N_2C_4 et N_4C_5.

Clarke a montré, par la statistique de l'analyse de 700 roches ignées, que les proportions relatives des feldspaths, du quartz et des micas étaient:

Feldspaths	59,5
Hornblende et pyroxène . . .	16,8
Quartz	12,0
Micas	3,8
Autres minéraux	7,9
Total	100,0

Nous concevons maintenant pourquoi les météorites pierreuses ne renferment ni orthose, ni micas, ni quartz, mais seulement du *feldspath anorthite* — $CaO . Al_2O_3 . 2 SiO_2$ — formé par fusion ignée (1550° C.). C'est que la rupture de Vulcain s'est produite au stade lunaire. S. Meunier avait déjà insisté sur l'évolution minéralogique très poussée de l'astre qui a donné naissance aux météorites (on y trouve des *filons en cocarde*). Il en faisait un ancien satellite de la Terre, mais celui-ci étant emprunté à la lithosphère, n'aurait pu dépasser la densité de la lune (3,33) et n'aurait pu donner autant de sidérites.

C'est aussi à la vapeur d'eau surchauffée qu'il faut attribuer, à la suite des belles synthèses de Gay-Lussac et de Sénarmont, la formation des filons et des gîtes métallifères. C'est ainsi que le *fer oligiste* cristallisé, la *cassitérite*, le *rubis*, étaient produits par les réactions:

$$Fe_2Cl_6 + 3H_2O = Fe_2O_3 + 6HCl$$
$$SnF_4 + 2H_2O = SnO_2 + 4HF$$
$$Al_2F_6 + 3H_2O = Al_2O_3 + 6HF$$

[1] M. Berthelot: *C. R.*, t. 143, p. 477 (octobre 1906).

D'autres halogénures métalliques issus du magma cristallisaient directement dans les failles de la lithosphère, comme la *cryolithe :* 6 NaF . Al_2F_6 qui existe en filons dans le gneiss. De nombreux sulfures métalliques prirent aussi naissance sous l'action des vapeurs de S, H_2S, CS_2 sur les oxydes métalliques (Frémy). Ces réactions terminent l'évolution chimique du magma — comme les fumerolles marquent la fin de l'activité volcanique. Elles aboutissent à une minéralogie riche sur la Terre de plus de 2.500 espèces.

A la température de 370° C., la vapeur d'eau atteignait sa température critique et se condensait en un océan bouillonnant érodant profondément la croûte de gneiss primitive et acquérant d'*emblée* une salure élevée. Les silicates alumino-alcalins étaient partiellement décomposés par l'atmosphère riche en CO_2 en donnant naissance aux carbonates alcalins et à de la silice hydratée qui formait, avec l'alumine, les argiles kaoliniques :

$$K_2O.Al_2O_3.\ 6SiO_2 + CO_2 = CO_3K_2 + Al_2O_3.\ 6SiO_2$$

Les gneiss érodés, sédimentés et métamorphisés, donnaient naissance à la croûte granitique actuelle qui allait se recouvrir, durant les âges géologiques, d'une épaisseur de sédiments atteignant plusieurs kilomètres.

La formation des matières organiques.

Considérons maintenant la Terre ou Vénus refroidies superficiellement et leurs océans condensés. L'ammoniac et le gaz carbonique se sont dissous dans les eaux océaniques. L'hydrogène et l'hélium se sont peu à peu échappés. L'atmosphère est formée d'un excès d'azote, de gaz carbonique, des gaz rares et d'un peu de vapeur d'eau. Comme sur les grosses planètes et avec plus d'intensité encore, les réactions photochimiques dues à l'ultra-violet solaire extrême vont se manifester, *ces atmosphères étant transparentes jusque vers 1500* Å. Etant très réduites (celle de la Terre a une masse de $5{,}2.10^{21}$ g, soit 10^{-6} de la masse du globe), ces réactions se poursuivront jusqu'à la surface des océans et dans la couche superficielle (< 1 cm) de ceux-ci.

Comme D. Berthelot et H. Gaudechon [1] l'ont montré, l'acide carbonique dissous et l'eau se dissocient en donnant de l'*oxygène libre* [2] et de l'*aldéhyde formique :*

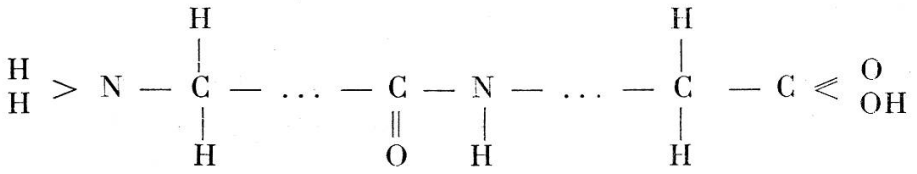
Cet aldéhyde, point de départ des synthèses organiques de M. Berthelot, a une grande tendance à se polymériser en donnant des *hydrates de carbone* (aldolisation) :

$$n\ CH_2O = C_n(H_2O)_n = CH_2OH\ .\ (CHOH)_{n-2}\ .\ COH$$

De même, la photolyse de CO_2 en présence d'ammoniac dissous, conduit à l'*amide formique :*

$$CO + NH_3 = H.CO.NH_2$$

corps ayant également une grande tendance à la polymérisation. La condensation de l'aldéhyde formique avec l'amide formique conduit au *glycocolle* $NH_2\ .\ CH_2\ .\ CO_2H$, point de départ de la synthèse des *acides aminés* constituant les longues *chaînes polypeptidiques :*



Il se constituait ainsi à la surface des océans encore chauds une *formation géologique* d'un nouveau genre. Alors que les *glucides* ne pouvaient constituer qu'une *nourriture* pour une future matière vivante, les *acides aminés* étaient capables, en

[1] D. Berthelot et H. Gaudechon : *C. R.*, t. 150, p. 1690 (1910) et suivantes. H. Slosse (Institut Solvay, 1898) avait déjà produit la réaction : $n\ CO + n\ H_2 = C_n(H_2O)_n$, en soumettant un mélange de CO et H_2 à l'action de l'effluve, et avait obtenu des sucres.

[2] La présence d'oxygène libre dans une atmosphère planétaire prouverait celle de matière organique, mais non encore celle de matière organisée.

s'orientant, d'édifier des membranes plasmiques douées de propriétés catalytiques intenses. Ils devaient constituer la *structure* de la matière vivante. L'azote nitrique prenait naissance avec l'azotite d'ammonium résultant de l'action de O_3 sur NH_3.

D'autres éléments, tels que S, P, Mg, Fe, ... contenus dans le milieu marin, purent s'introduire dans ces substances, si bien qu'il apparut, à la surface des océans, des masses importantes de matières gélatineuses, de complexité croissante, en milieu ammoniacal légèrement alcalin. Le dégagement d'oxygène, aussitôt transformé en O_3 par l'ultra-violet, limita progressivement le spectre solaire à sa valeur actuelle (2900 Å) et la photosynthèse de la matière organique fut arrêtée pour toujours.

Ces matières endothermiques renfermaient une énergie interne considérable: elles se trouvaient dans un état *métastable*, et avaient tendance à se recombiner avec l'oxygène libre produit. Elles ne pouvaient, cependant, ni brûler, ni exploser, étant en milieu aqueux, mais leur énergie interne devait bientôt se manifester grâce à une organisation convenable: *cette organisation sera la vie dont nous concevons ainsi la cause et la nécessité* [1].

Particularités des planètes denses.

Les planètes denses, selon leur masse et leur distance au Soleil, offrent des particularités que nous allons examiner rapidement.

Mercure. — La plus petite planète actuelle du système solaire, Mercure, a, comme Vulcain et la Lune, complètement perdu son atmosphère dès sa solidification: elle est demeurée au stade lunaire. Sa densité, mal connue, mais élevée (6) montre que le noyau y est un peu plus important que dans les autres planètes du même groupe. Son albédo et sa couleur sont

[1] E. DESGUIN et A. DAUVILLIER: *C. R.*, t. 208, p. 294 (janv. 1939); *Revue scientifique*, nº 5-6, p. 292-296 (mai-juin 1940). Pour une étude générale de cette question, voir A. DAUVILLIER et E. DESGUIN: *La genèse de la vie, phase de l'évolution géochimique*, 1 vol. Act. Sc. et Ind. Paris, Hermann (sous presse).

comparables à ceux de la Lune. Sa proximité du Soleil fait que sa face insolée est portée à une haute température (400° C.). Les marées solaires, intenses à cette distance, ont freiné son mouvement de rotation original jusqu'à sa période de révolution (88 jours).

Les *nuées* qui ont été signalées à sa surface sont peut-être dues à des poussières chargées photoélectriquement par le rayonnement ultra-violet solaire.

Vénus. — Vénus, avec une masse comparable à celle de la Terre, est beaucoup plus intéressante du point de vue qui nous occupe. Ainsi que pour Mercure, sa rotation, d'abord voisine de celle de la Terre, a été freinée par l'action des marées solaires, mais d'une manière moins complète. G. H. Darwin a calculé que l'action retardatrice du Soleil était, pour Mercure, mille fois plus grande et, pour Vénus, onze fois plus grande que pour la Terre. Sa période de rotation est, spectroscopiquement [1] certainement dix fois plus longue que la nôtre. Elle ne saurait cependant égaler sa période de révolution (225 jours) car, si elle présentait toujours la même face au Soleil, son atmosphère serait congelée sur son hémisphère obscur (Arrhenius). Or, l'atmosphère de Vénus possède des nuages et montre la présence d'une quantité considérable de CO_2.

En outre, le spectre infra-rouge du disque situé dans l'ombre montre la présence de la forte radiation 14,5 μ de CO_2 (Coblentz). La durée de rotation ne saurait donc guère excéder de beaucoup la limite spectroscopique.

La température de la face insolée est élevée, car la planète reçoit 1,91 fois plus de rayonnement que la Terre et elle tourne beaucoup plus lentement. Elle atteindrait 95° C. à l'équateur et, si la pression y était la même que sur notre globe, les océans y seraient presque en ébullition. Il ne serait donc pas surprenant que la planète fût, comme elle le paraît (albédo: 0,70), couverte de nuages (0,65). Cependant B. Lyot [2] observant la polarisation de ces nuages, a montré qu'ils se comportaient,

[1] Slipher: *M. N.*, t. 93, p. 661 (1933).

[2] B. Lyot: *Recherches sur la polarisation de la lumière des planètes et de quelques substances terrestres.* Thèse, Paris (1929).

non comme les gouttelettes de nos cumuli, dont le diamètre est de l'ordre de 5 μ, mais comme formés de particules plus petites: 2 μ. Il se pourrait que les cumuli d'eau soient situés à un niveau inférieur et que les nuages que nous voyons soient d'une autre nature. Des fumées blanches de particules solides semblent exclues par la polarisation, mais des nuages de gouttelettes organiques huileuses, comme celles résultant de la réaction photochimique de CO_2 sur des traces de vapeur d'eau ou d'ammoniac demeurent possibles. Il est probable que la Terre est passée, vers la fin de son refroidissement, par un état très analogue à celui que présente actuellement Vénus. La température élevée de la planète et l'absorption exercée par l'atmosphère de CO_2 sur l'ultra-violet solaire, semblent prévenir toute formation de matières organiques à la surface de ses océans. Par contre, un refroidissement de la planète, causé, par exemple, par le passage du système solaire dans un nuage cosmique absorbant, pourrait développer sur Vénus une évolution analogue à celle que nous connaissons sur la Terre.

Mars. — Nous avons vu que Mars, avec sa masse comprise entre celles de Mercure et de Vénus, avait vu son évolution arrêtée à un stade intermédiaire, par suite de la perte de la plus grande partie de son atmosphère primitive. Celle-ci est aujourd'hui très raréfiée et semble se réduire à une pression d'azote de l'ordre du centimètre de mercure. La température de la calotte polaire hivernale s'abaissant à — 70° C., celle-ci ne peut être constituée de neige carbonique, comme on l'a prétendu, auquel cas la pression de CO_2 serait considérable (2 atm.). Elle ne peut être formée que de givre dont la tension de vapeur ne serait alors que de quelques baryes. Si la calotte a une surface de 10^6 km^2 et une épaisseur de l'ordre du centimètre, la quantité d'eau

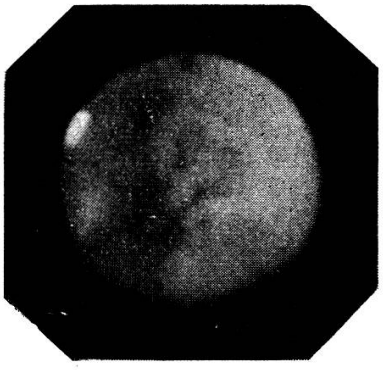


Fig. 9.

Photographie de Mars obtenue au Pic du Midi par M. Camichel, le 20 septembre 1941 à 1 h. 59 m.

martienne ne dépasse pas 10^{16} g, soit ½ millionième de la masse de l'atmosphère terrestre.

La couleur ocreuse des continents martiens, sans doute due à Fe_2O_3 contenu dans de légers sédiments, se distingue des colorations gris bleuâtre des « mers » occupant principalement l'hémisphère austral. Celles-ci virent au brun foncé lors de la fonte des neiges polaires, en commençant par les régions polaires et en s'avançant vers l'équateur. Si la tension de la vapeur d'eau en été s'élève à quelques millimètres de mercure (fusion des neiges), ce phénomène peut être dû au changement de couleur réversible causé par l'hydratation de boues basaltiques brunes, recouvertes en hiver d'efflorescences salines hygroscopiques (NaCl, KCl, etc.), colorées en bleu verdâtre par l'ultra-violet solaire. Il ne saurait, d'après le sens de déplacement de la coloration, s'agir d'un effet photochimique.

La Terre et la Lune. — Nous étudierons la Terre et la Lune dans la troisième partie de ce travail, des points de vue des structures interne et superficielle, de la chaleur interne, du volcanisme et de l'orogénèse.

(à suivre)