

L'ORIGINE DU SYSTEME SOLAIRE (fin)

V - EVOLUTION DES ATMOSPHERES

Une planète acquiert une atmosphère par accretion avec une composition similaire à celle de la nébuleuse primitive : elle est estimée en fonction de ce que l'on sait sur le soleil et la matière interstellaire.

Elément	Terre totale a	Système solaire b
H	250	$2.6 \times 10^8$
He	$3.5 \times 10^{-7}$	$2.1 \times 10^7$
C	14	135 000
N	0.21	24 400
O	35 000	236 000
Ne	$1.2 \times 10^{-6}$	23 000
Na	460	632
Mg	8 900	10 500
Al	940	851
Si	10 000	10 000
A <sup>36</sup>	$5.9 \times 10^{-4}$	2 280
Kr	$6 \times 10^{-8}$	0.69
Xe	$5 \times 10^{-9}$	0.07

Tableau numéro 1 : comparaison entre la composition de la Terre et du Soleil  
(Unités : Si :  $10^4$ )

Dans le soleil, H et He sont au moins 1000 fois plus abondants que les éléments suivants (C, N, O). Les éléments lourds tels Fe, Si, Mg qui constituent l'essentiel du globe terrestre ont une concentration inférieure à 1 %. Si à l'époque de sa formation, l'atmosphère de la Terre avait une composition chimique identique à celle du soleil, elle aurait été 400 fois plus massive qu'à l'heure actuelle pour que l'on puisse retrouver les différents éléments dans les mêmes proportions.

Ceci suggère que la Terre ainsi que les autres planètes telluriques ont perdu les éléments légers plus volatils. L'atmosphère de la Terre s'est alors développée suivant les deux processus suivants :

- échappement des composés légers
- volcanisme avec dégagement d'eau et de gaz carbonique.

**1. Echappement des composés légers**

Considérons un atome ou une molécule de masse  $m$  se déplaçant à la vitesse  $v$ . Son énergie cinétique est égale à :

$$(1) \quad E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

Elle est plongée dans le champ d'attraction de la Terre et elle possède aussi une certaine énergie potentielle.

Ces phénomènes d'échappement se produisent à des altitudes très basses et on peut considérer localement que la Terre est plate. Si  $g$  est l'accélération de la pesanteur, l'énergie solaire potentielle de la particule est simplement :

$$(2) \quad E_p = -m g (R+Z) - m g R$$

où  $R$  est le rayon de la planète.

La particule pourra s'échapper si son énergie totale ( $E_c + E_p$ ) est positive. Elle pourra monter tout en transformant son énergie cinétique en énergie potentielle et elle sortira du champ d'attraction de la planète avant que sa vitesse ne soit nulle sinon elle va «retomber». La vitesse minimum telle que  $E_c = E_p$  est appelée vitesse critique. Elle est telle que :

$$(3) \quad \frac{1}{2} m v_c^2 = m g R$$

$$(4) \quad v_c = \sqrt{2 g R}$$

On doit remarquer que cette vitesse est indépendante de la masse : elle est aussi bien valable pour un atome d'hydrogène que pour une fusée.

Planète	$g$ (cm sec. <sup>2</sup> )	Rayon (km)	$V_c$ (km sec. <sup>1</sup> )
Mercure	376	2,439	4,3
Venus	888	6,049	10,3
Terre	981	6,371	11,2
Lune	162	1,738	2,3
Mars	373	3,390	5,0
Jupiter	2,620	69,500	60
Saturne	1,120	58,100	36
Uranus	975	24,500	22
Neptune	1,134	24,600	24

Tableau numéro 2 : vitesses critiques

Dans un gaz la vitesse moyenne des composants est reliée à la température par une relation très simple :

$$(5) \quad \frac{1}{2} m v^2 = k T$$

où  $k$  est la constante de Boltzmann ( $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$  erg deg<sup>-1</sup>) ;  $T$  la température en d° kelvin, et  $m$  la masse de la particule

$$(6) \quad v_0 = \sqrt{\frac{2 k T}{m}}$$

Quelques valeurs et  $v_0$  sont données dans la table 3.

Atome	Mass at.	Vitesse (kms <sup>-1</sup> )		
		Température (° k)		
		300	600	900
H	1	2.24	3.16	3.87
He	4	1.12	1.58	1.94
O	16	0.56	0.79	0.97

Tableau numéro 3 : vitesse moyenne en fonction de la température

Une comparaison entre les valeurs de  $v_o$  (tableau 3) et  $v_c$  (tableau 2) montre que :

- les atomes légers s'échappent plus facilement que les atomes lourds : l'agitation thermique répartit l'énergie équitablement entre toutes les particules indépendamment de leur masse. A énergie égale, la vitesse varie en fonction inverse de la masse. On comprend ainsi pourquoi les planètes telluriques ont perdu leur hydrogène et leur hélium ;

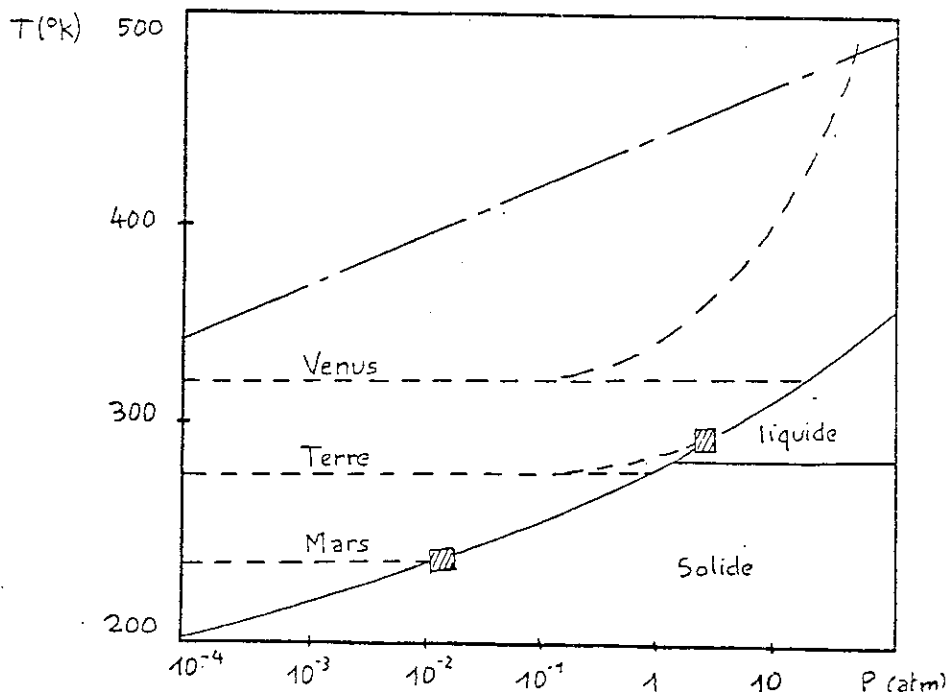
- dans le cas de la Lune, les vitesses moyennes sont toutes proches de la vitesse d'érosion et le champ d'attraction n'a pu retenir l'atmosphère primitive de la Lune.

## 2. Dégazage d'eau et de gaz carbonique

On fait l'hypothèse que l'origine des atmosphères de Venus, la Terre et Mars est la même : leur atmosphère primitive s'est évaporée et elle est lentement remplacée par des dégazages provenant de l'intérieur du globe : la composition de cet atmosphère est de 1/4 de gaz carbonique et de 3/4 de vapeur d'eau (c'est la composition moyenne des émanations volcaniques).

A mesure que l'atmosphère se forme, la température au sol augmente petit à petit par effet de serre (le rayonnement infra-rouge de la surface est piégé par l'atmosphère).

Nous allons représenter l'évolution de chacune des trois planètes dans le diagramme d'état de la vapeur d'eau. Chaque tracé part de la gauche du diagramme (pression  $\rightarrow$  0) à des températures dépendant de la distance de la planète au soleil : 216° K pour Mars, 260 pour la Terre et 320 pour Venus.

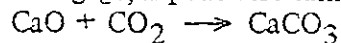


A mesure que l'atmosphère se forme, les points se déplacent vers la gauche ( $T \sim$  constant et pression augmente). Quand la pression est de l'ordre de 1/100 d'atmosphère, l'effet de serre commence à agir et les courbes bifurquent très lentement vers le haut car la température augmente. Nous allons regarder en détail ce que devient chaque planète.

- 1) MARS : très rapidement la courbe atteint l'équilibre glace-vapeur et à mesure que la vapeur d'eau et le gaz carbonique sont produits, ils sont aussitôt transformés en glace, bloquant ainsi toute augmentation de température par effet de serre.
- 2) TERRE : l'augmentation a été juste suffisante pour atteindre l'équilibre gaz-liquide. Dans ces conditions, les océans servent de réservoirs où gaz carbonique et vapeur d'eau sont dissous prévenant ainsi toute augmentation de la masse atmosphérique.
- 3) VENUS : la bifurcation a empêché l'atmosphère de Venus d'atteindre un équilibre. Les températures ont toujours été trop élevées pour que de l'eau puisse exister à l'état liquide qui agit comme un puissant stabilisateur.

La masse atmosphérique toujours plus importante a vu sa température augmenter de manière catastrophique par un effet de serre de plus en plus marqué :

quand le gaz carbonique se dégage, il peut être tamponné par des réactions du type :



Si la température dépasse un certain seuil, la réaction se produit vers la gauche en libérant du gaz carbonique et de la chaux (principe des fours à chaux !). C'est ce qui s'est produit sur Venus où les températures ont été suffisamment élevées.

Le gaz carbonique de l'atmosphère de Venus est identique à celui enterré sur Terre dans les carbonates.

J. P. PARISOT

Astronome à l'Observatoire de Besançon