

Scheer Marc
2/01/69

INSTITUT D'AERONOMIE SPATIALE DE BELGIQUE

3, avenue Circulaire, UCCLE - BRUXELLES 18

AERONOMICA ACTA

A - N° 36 - 1964

Le milieu ionisé de l'atmosphère terrestre

par M. NICOLET

BELGISCH INSTITUUT VOOR RUIMTE-AERONOMIE

3, Ringlaan, UKKEL - BRUSSEL 18

AVANT PROPOS

La présente Note est le texte d'une conférence donnée lors de la réunion de la Fédération Astronautique Internationale à Varsovie, Pologne, en septembre 1964.

M. Nicolet.

VOORWOORD

De onderhavige Nota is de tekst van een voordracht, die gegeven werd op de bijeenkomst van de Internationale Astronautische Federatie in Warschau, Polen, in september 1964.

M. Nicolet.

FOREWORD

The present note is the text of a talk given at the International Astronautical Congress in Warsaw (Poland) in September 1964.

M. Nicolet.

VORWORT

Die vorliegende Notiz ist der Text einer Konferenz, die während der Versammlung der Internationalen Astronautischen Kongress in Warschau (Poland) in September 1964 gegeben wurde.

M. Nicolet.

LE MILIEU IONISE DE L'ATMOSPHERE TERRESTRE

par

M. NICOLET.

I.- INTRODUCTION.

Le milieu ionisé entourant la Terre est un milieu complexe où interviennent de nombreux processus fixant les conditions physiques. Aussi, de grands efforts ont-ils été accomplis récemment en vue de déterminer la distribution verticale des électrons et des ions en même temps que leurs variations en fonction des conditions solaires et atmosphériques.

Tout d'abord, les sondages ionosphériques conventionnels nous avaient habitués à considérer l'ionosphère sous une forme relativement simple : (a) Une région ionisée inférieure au-dessous de 85 km, appelée la région D, caractérisée par une concentration électronique maximum de l'ordre de $1000 \text{ électrons cm}^{-3}$;
(b) Une couche ionisée avec un maximum de l'ordre de $100.000 \text{ électrons cm}^{-3}$ située légèrement au-dessus de 100 km ;
(c) Une région ionisée supérieure caractérisée par un maximum de concentration électronique pouvant dépasser $1.000.000 \text{ d'électrons cm}^{-3}$ à des altitudes supérieures à 250 km.

Ensuite, les sondages par fusées ont non seulement permis d'approfondir l'examen de la distribution verticale des électrons, mais également et surtout de déterminer la nature des ions. Cette détermination est extrêmement importante, car elle permet en fait de déduire quelle est la nature de l'ionosphère. En outre, l'observation des radiations ultraviolettes et du rayonnement X émis par le Soleil a conduit à une analyse plus précise de l'ionisation des constituants atmosphériques et ainsi à développer une comparaison beaucoup plus poussée de la production des ions et de leur disparition.

De plus, l'extension des observations au-delà du maximum de la région F a révélé que l'ionosphère supérieure présentait un caractère différent de celui que l'on avait déduit par les méthodes conventionnelles. On a vu apparaître les ions d'hélium et d'hydrogène alors que dans les régions inférieures l'ionosphère est caractérisée par des ions moléculaires et par l'ion atomique d'oxygène. De là, on a compris que l'extension considérable de l'ionosphère vers les plus hautes altitudes résulte de la présence d'ions légers.

Enfin, l'effet du champ magnétique terrestre a pour effet aux très hautes altitudes de piéger les particules chargées de haute énergie. Ainsi, apparaît la magnétosphère caractérisée par des particules chargées d'énergie superthermique voisinant avec l'ionosphère formée par des particules d'énergie thermique. La limite extérieure de la magnétosphère est plongée dans le milieu interplanétaire soumis au flux de particules venant du soleil : le vent solaire.

II.- L'IONOSPHERE ET LE RAYONNEMENT SOLAIRE.

La production normale des ions dans le domaine de l'ionosphère situé au-dessous du maximum de concentration électronique caractérisant la région F est due à la photo-ionisation directe des éléments principaux de l'atmosphère (Fig. 1). La seule exception est une ionisation par le rayonnement cosmique qui se manifeste dans la partie inférieure de l'ionosphère, c'est-à-dire à des altitudes inférieures à 70 km. Les rayons X ionisent les constituants atmosphériques à des altitudes inférieures à 150 km et leur extrême variabilité au cours d'un cycle d'activité solaire, et en particulier lors des flambes solaires, n'influencent pas le milieu où les satellites peuvent être maintenus sur des orbites stables.

C'est le rayonnement ultraviolet de longueurs d'onde inférieures à 910 Å ionisant l'oxygène atomique ($\lambda < 910 \text{ \AA}$) et l'azote moléculaire ($\lambda < 796 \text{ \AA}$) qui joue le rôle essentiel. Dans ce cas, le nombre d'ions

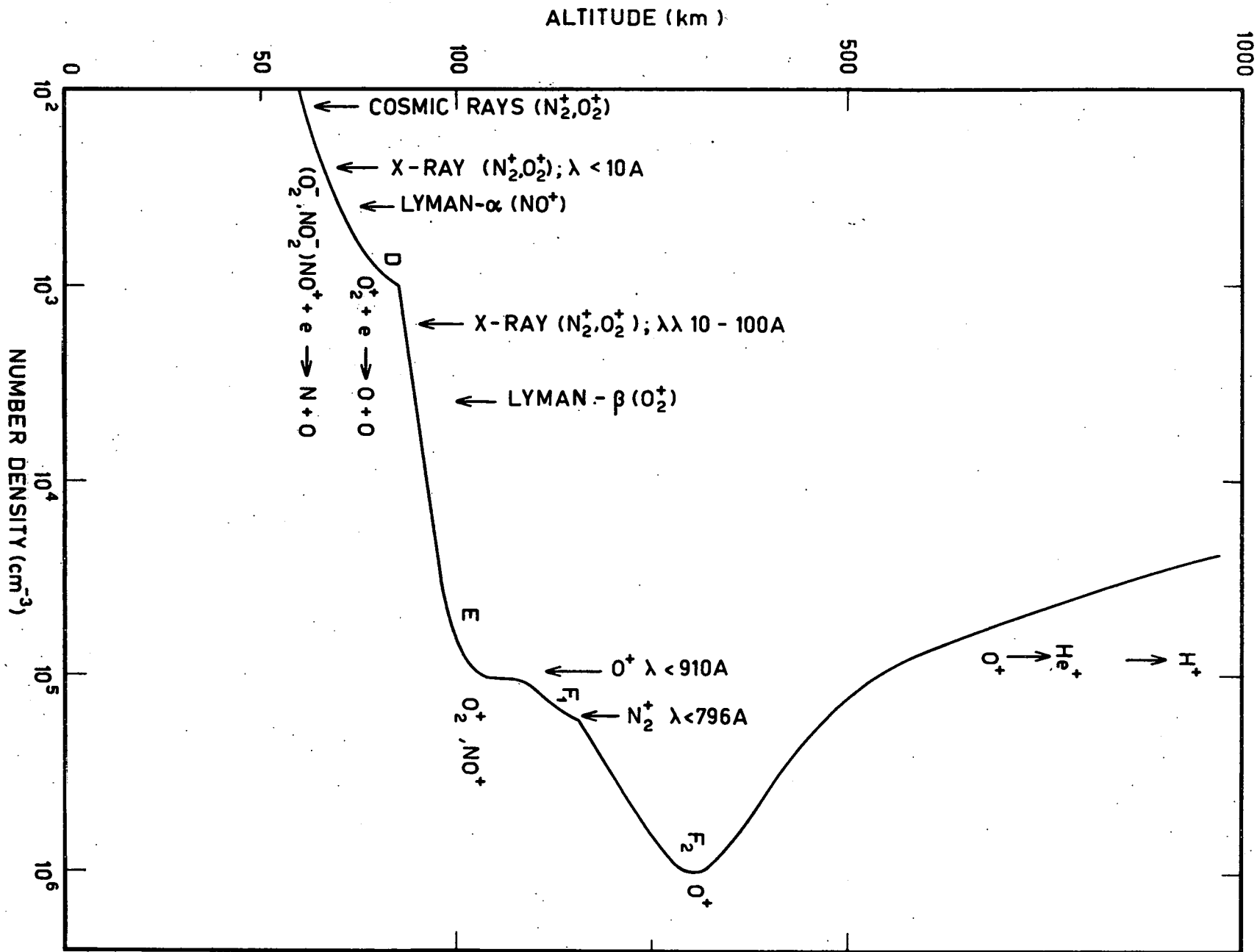


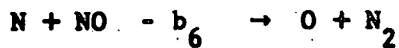
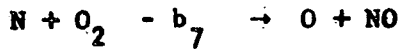
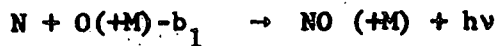
Fig. 1.- Schéma de l'ionosphère.

(et d'électrons) produit dans une colonne verticale est compris entre 10^{10} et $10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$. Comme une variation journalière est observée, on peut donc dire que la recombinaison des ions et des électrons en une période de 24 heures correspond à leur production au cours d'une journée de 12 heures. Comme la concentration électronique est très réduite au cours de la nuit au-dessus de 250 km, il existe donc un équilibre d'ionisation où la production est rapidement compensée par la recombinaison. En conséquence, il s'agit bien de la formation de l'ionosphère par effet des radiations solaires.

La structure de cette ionosphère formée par photo-ionisation est cependant très différente de celle que l'on peut imaginer dans le simple cadre d'une production et d'une recombinaison. En fait, la recombinaison directe n'apparaît qu'après l'action d'un certain nombre de réactions. L'électron photoélectrique est soumis à des collisions avant d'atteindre sa distribution maxwellienne des vitesses. Il perd son énergie grâce à de nombreuses collisions avec les molécules neutres dans l'ionosphère inférieure et avec les ions aux altitudes plus élevées. De même, un ion déterminé échange sa charge très rapidement avec les atomes neutres de son espèce. Par exemple, $(O^+)_{A} + (O)_{B} \rightarrow (O)_{A} + (O^+)_{B}$. Au surplus, les ions d'une certaine espèce peuvent échanger leur charge avec d'autres ions. Par exemple, $N_2^+ + O \rightarrow O^+ + N_2$. Dans le même ordre d'idées, des échanges peuvent apparaître tels que le suivant: $O^+ + N_2 \rightarrow NO^+ + N$ où un nouvel ion apparaît. Ainsi, la structure ionique de l'atmosphère est loin de représenter celle que l'on pourrait déduire à la suite du processus de photo-ionisation.

C'est pourquoi dans l'ionosphère inférieure où les ions produits sont N_2^+ et O_2^+ , on rencontre d'abord l'ion NO^+ (Fig. 2). Dans la région E, l'ion NO^+ est aussi important que O_2^+ et N_2^+ est insignifiant; à la production directe qui apparaît dans l'ordre suivant N_2^+ et O_2^+ s'opposent les concentrations respectives O_2^+ et NO^+ .

CHEMOSPHERE



IONOSPHERE

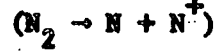
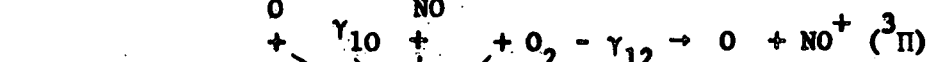
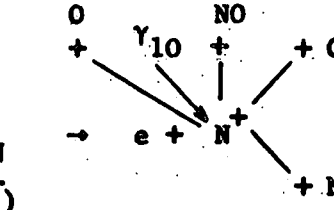
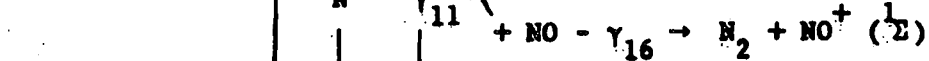
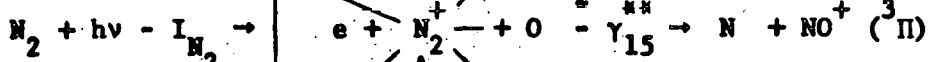
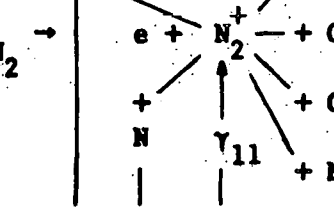
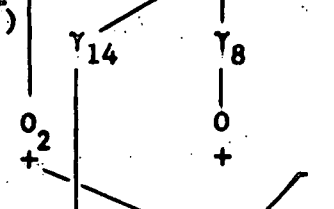
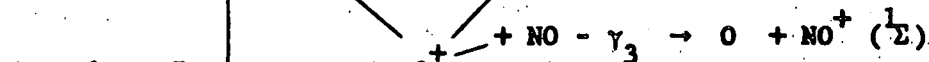
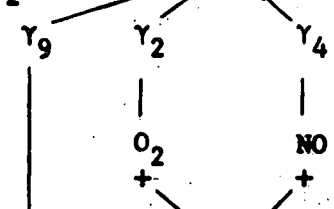
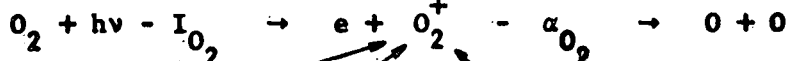
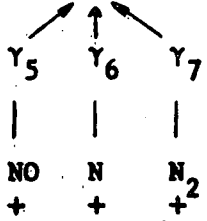
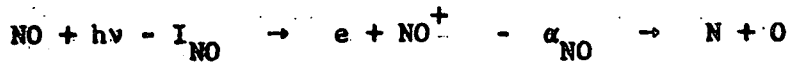


Figure 2.

III.- L'IONOSPHERE ET LA DIFFUSION.

Il est bien connu que le maximum de concentration électronique dans l'ionosphère résulte à la fois des effets de diffusion et de recombinaison. Par suite de la diminution avec l'altitude du processus de recombinaison liée en quelque sorte à la décroissance de la densité atmosphérique, la concentration électronique a tendance à augmenter avec l'altitude. Cependant, une telle distribution ne peut se maintenir par suite du processus de diffusion des ions dans le champ de la pesanteur. Une compensation s'effectue et il en résulte qu'au delà du maximum électronique résultant de ces deux effets, le processus essentiel dirigeant la distribution verticale ionosphérique est la diffusion. Ceci apparaît clairement dans le cas des ions d'hydrogène et d'hélium. Mais, encore une fois, l'atmosphère neutre intervient, car une réaction d'échange de charge telle que $O^+ + H \rightleftharpoons H^+ + O$ joue un rôle essentiel.

Avant de voir les distributions effectives que prendront les ions aux hautes altitudes où la diffusion intervient, il convient de revoir quelles sont les conditions imposées lors d'un calcul. Soient des électrons de charge $-e$ et de masse m_e et des ions de diverses espèces de charge $+e$ et de masse m_i soumis respectivement à des champs de potentiel ϕ_i et ϕ_e (énergie potentielle par unité de masse).

En écrivant que

$$\frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dr} = - \frac{m_e}{kT_e} \frac{d\phi_e}{dr} \equiv - \frac{1}{H_e} \quad (1)$$

et

$$\frac{1}{n_i} \frac{dn_i}{dr} = - \frac{m_i}{kT_i} \frac{d\phi_i}{dr} \equiv - \frac{1}{H_i} \quad (2)$$

on fait implicitement un certain nombre d'hypothèses qui ne pourraient être vérifiées dans le cas d'un plasma s'éloignant de certaines formes

de l'équilibre. Cependant, on suppose que la distribution des vitesses des ions et des électrons s'approche suffisamment d'une distribution maxwellienne avec des températures respectives T_i et T_e pour les ions et les électrons. C'est le cas qui est facilement admissible dans l'ionosphère lorsqu'on a affaire à un état quasi stationnaire. Dans de telles conditions, l'énergie potentielle par unité de masse Φ est la somme de celles de la gravité, de la force centrifuge, du champ magnétique et du champ électrique. Ainsi on écrira que :

$$\Phi = \Phi_{\text{grav.}} + \Phi_{\text{centrif.}} + \Phi_{\text{mag.}} + \Phi_{\text{élect.}} \quad (3)$$

Pour l'atmosphère en rotation, on a

$$\Phi_{\text{grav.}} + \Phi_{\text{centrif.}} = -gr + \frac{1}{2} \omega^2 \sin^2 \theta r^2 \equiv \Phi \quad (4)$$

où ω est la vitesse angulaire de rotation et θ la colatitude; pour un champ magnétique, on a, par exemple,

$$\Phi_{\text{mag.}}(e) = - \frac{e}{m_e} M \omega \sin^2 \theta \frac{1}{r} \quad (5)$$

et

$$\Phi_{\text{mag.}}(i) = + \frac{e}{m_i} M \omega \sin^2 \theta \frac{1}{r} \quad (6)$$

où M est le moment magnétique du champ; pour le champ électrique, les relations pour l'électron et l'ion s'écrivent :

$$\Phi_{\text{élect.}}(e) = - \frac{e}{m_e} \psi \quad (7)$$

et

$$\Phi_{\text{élect.}}(i) = + \frac{e}{m_i} \psi \quad (8)$$

où ψ est le potentiel du champ électrique.

En introduisant la condition de neutralité générale du gaz ionisé, on admet que :

$$n_e = \sum_i n_i^+ \quad (9)$$

ou

$$\frac{dn_e}{dr} = \frac{d(\sum_i n_i^+)}{dr} \quad (10)$$

En appliquant ces dernières conditions, on obtient après intégration des expressions (1) et (2) les résultats suivants représentant la distribution verticale des électrons et celle des divers ions d'espèce i .

$$\left[\frac{n_e}{n_{e,a}} \right]^{1 + T_e/T_i} = \frac{\sum_{ia}^+ (n_i/n_{ia}) T_i}{\sum n_{ia}^+} \quad (11)$$

$$\frac{n_i^+}{n_{ia}^+} = (n_i/n_{ia}) T_i (n_{ea}/n_e)^{T_e/T_i} \quad (12)$$

Ces intégrations ont été effectuées en considérant des températures constantes $T_e \neq T_i \neq T_n$ température du gaz neutre où l'indice a correspond au niveau inférieur où on admet les conditions d'équilibre de diffusion.

En considérant que les ions essentiels au-dessus du maximum de la région F_2 sont les atomes et molécules une fois ionisés tels que H^+ , He^+ , O^+ , N^+ , O_2^+ et N_2^+ , on peut appliquer les formules précédentes pour des conditions d'équilibre bien déterminées. Le cas où O^+ , He^+ et H^+

interviennent comme ions principaux, est le cas le plus important.

Tout d'abord, l'équation (12) appliquée à H^+ , He^+ et O^+ permet d'écrire, si $T_n = T_i$,

$$\frac{n^+(H) n_a(H)}{n_a^+(H) n(H)} = \frac{n^+(O) n_a(O)}{n_a^+(O) n(O)} = \frac{n^+(He) n_a(He)}{n_a^+(He) n(He)} \quad (13)$$

En considérant que les conditions aux limites inférieures, c'est-à-dire au niveau a, sont fixées par rapport à l'ion d'oxygène atomique, qui doit être en général l'ion le plus abondant, on écrit que les concentrations $n^+(H)$ et $n^+(He)$ sont données par les expressions suivantes :

$$\frac{n^+(H)}{n_a^+(O)} = \frac{n(H) n_a(O)}{n(O) n_a(H)} \times \frac{n_a^+(H)}{n_a^+(O)} \quad (14)$$

et

$$\frac{n^+(He)}{n_a^+(O)} = \frac{n(He) n_a(O)}{n(O) n_a(He)} \times \frac{n_a^+(He)}{n_a^+(O)} \quad (15)$$

Il résulte donc, de (14) et (15), que si on parvient à fixer les rapports des concentrations d'ions au niveau a, la distribution verticale des rapports des ions ne dépendra que des concentrations des atomes neutres.

Il n'y a plus de raison de douter que le processus essentiel déterminant les conditions d'ionisation de l'ion H^+ dans l'ionosphère est le processus d'échange de charges



La réaction (16) permet d'écrire pour le niveau a où on applique les conditions d'équilibre :

$$n_a(H) n_a^+(O) = \frac{8}{9} n_a^+(H) n_a(O) \quad (17)$$

où le facteur 8/9 tient compte des divers poids statistiques.

L'introduction de (17) dans (14) conduit à la relation générale :

$$\frac{n^+(H)}{n^+(O)} = \frac{9}{8} \frac{n(H)}{n(O)}, \quad (18)$$

fixant le rapport des ions H^+ et O^+ en fonction du rapport des atomes neutres dont nous avons déterminé la variation en fonction de la température. Ainsi, à la figure 3, la variation $n(H)/n(O)$ en fonction de la température est pratiquement celle correspondant au rapport des ions. Le rapport $n^+(H)/n^+(O)$ est de l'ordre de l'unité à 1250 km, 1500 km, 1750 km et 2000 km pour des températures respectives de 1200°K, 1400°K, 1550°K et 1700°K. Lorsque la température de la thermopause descend jusqu'à 1000°K et 800°K, l'égalité $n(H) = n(O)$ est atteinte respectivement aux environs des niveaux de 1000 km et de 800 km.

Il est bien entendu que les données présentées à la figure 3 ne représentent qu'un cas possible, car les températures indiquées sont considérées comme identiques pour le gaz neutre, les ions et les électrons. Néanmoins, elles indiquent que l'extension de l'ionosphère dépend de la hauteur d'échelle.

$$H_e = \frac{k(T_e + T_i)}{m^+ g} \quad (19)$$

où m^+ est la masse ionique moyenne qui décroît avec la masse propre des ions, car

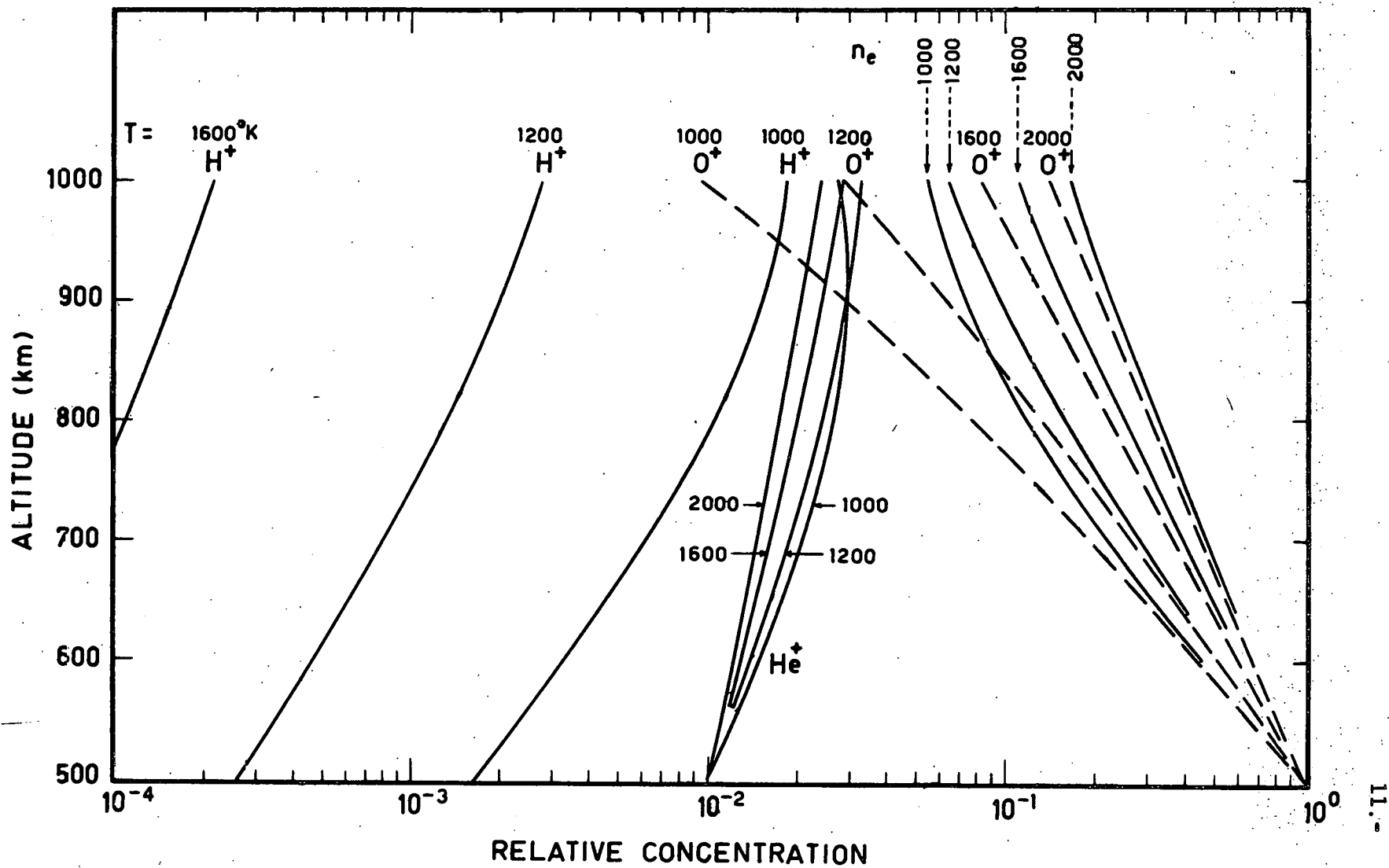


Fig. 3.- Variations des concentrations ioniques et électroniques dans le cas où le rapport $n^+(\text{He})/n^+(\text{O})$ est fixé et lorsque le rapport $n^+(\text{H})/n^+(\text{O})$ varie proportionnellement avec le rapport $n(\text{H})/n(\text{O})$.

$$m^+ = \frac{\sum n_i^+ m_i}{\sum n_i} \quad (20)$$

L'extension de l'ionosphère est donc maximum lorsque l'ion principal est celui provenant de l'hydrogène atomique dont la concentration augmente avec la diminution de la température.

IV.- INTERACTION ENTRE L'IONOSPHERE ET L'EXOSPHERE.

On a déjà insisté sur le fait qu'un échange de charge tel que (16) détermine la structure de l'ionosphère supérieure. Mais le rôle de l'ionosphère est également important dans la détermination de la structure de l'exosphère. Rappelons tout d'abord (Fig. 4) la distribution normale des éléments neutres dans l'atmosphère supérieure lorsque la température varie. Au-dessus de la ceinture d'hélium, l'hydrogène atomique apparaît. On se trouve à des niveaux où le libre parcours moyen est très grand et la concentration d'un constituant doit dépendre plutôt de l'ensemble des trajectoires dynamiques que d'une distribution hydrostatique. En effet, la distribution des vitesses ne pourrait être maxwellienne que si toutes les trajectoires étaient peuplées.

A partir du niveau inférieur de l'exosphère appelé niveau critique, on peut considérer qu'en un point de l'exosphère (Fig. 5), il y a deux types de trajectoires : balistiques ρ_I (quittant et retournant au niveau critique) et hyperboliques ρ_{III} (quittant le niveau critique sans retour ou arrivant de l'extérieur au niveau critique). De plus, on peut imaginer en ce même point de l'exosphère des particules satellisées ρ_{II} et des particules hyperboliques ρ_{IV} (venant et retournant à l'infini).

En appliquant l'équation de l'hydrostatique, la densité totale résultant d'une distribution maxwellienne des vitesses s'écrit :

$$\rho = \rho_I + \rho_{II} + \rho_{III} + \rho_{IV} = \rho(1) e^{-E(1-y)} \quad (21)$$

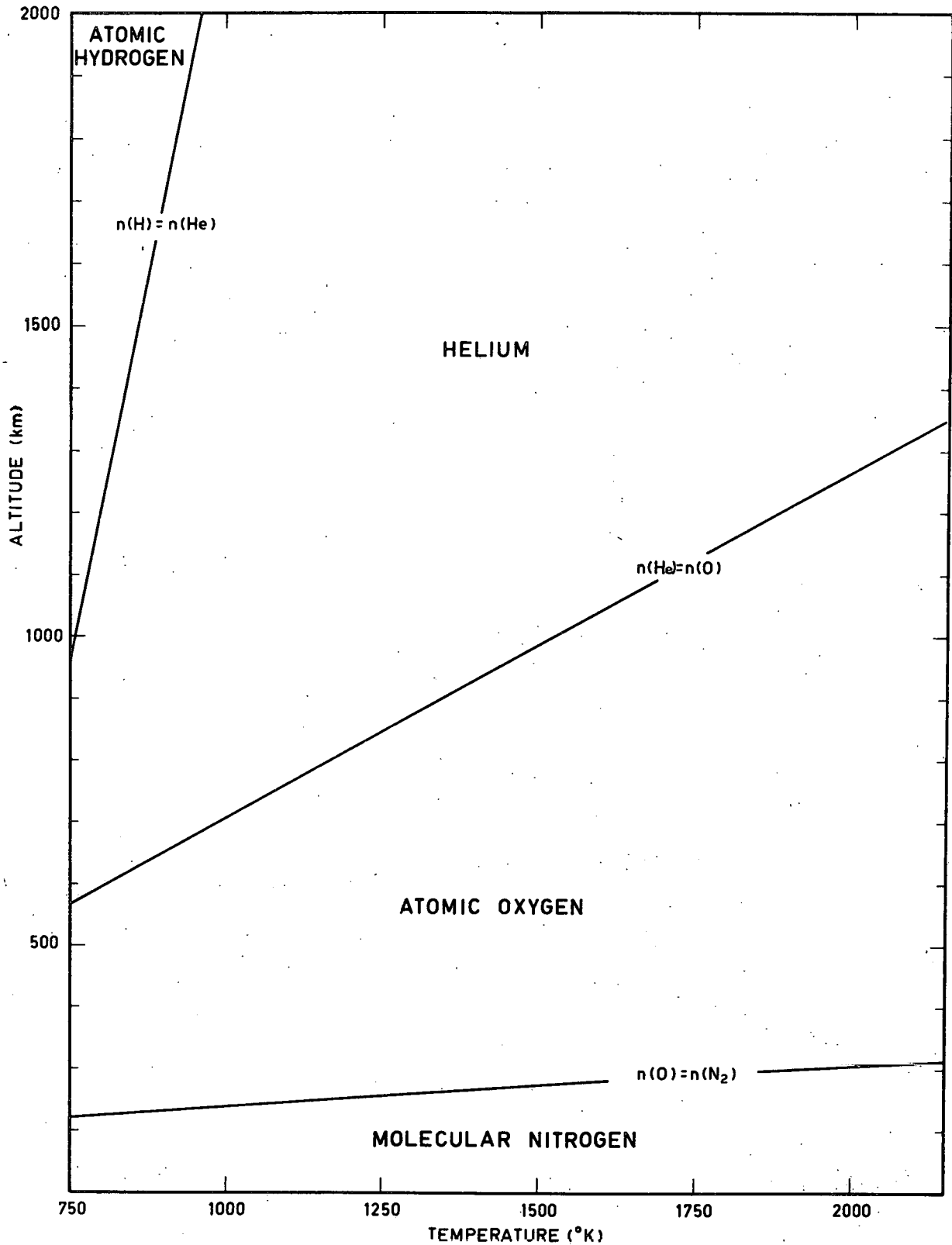


Fig. 4.- Distribution des principales ceintures atomiques lorsque la température à la thermopause varie de 750°K à plus de 2000°K.

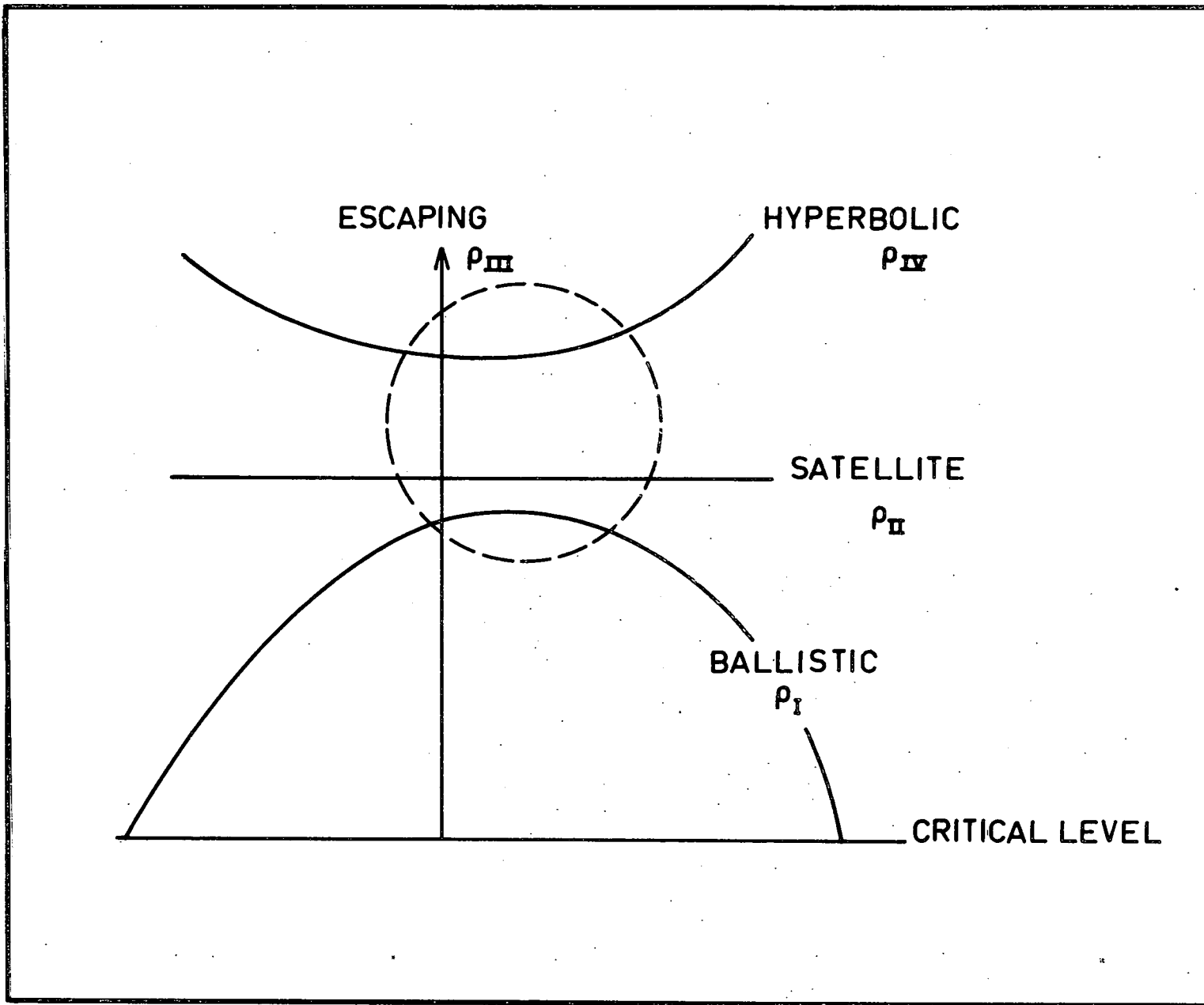


Fig. 5.- Composantes d'une distribution maxwellienne des vitesses dans l'exosphère.

où $y = a/r$ est le rapport de la distance a du niveau critique au centre de la Terre et de la distance considérée r dans l'exosphère. $E = a/H_a$ où H_a est la hauteur d'échelle de l'élément considéré à la distance a .

On trouve que les atomes neutres, qui n'atteignent pas le niveau critique, sont représentés (Fig. 6) par :

$$\rho_{II} + \rho_{IV} = \rho(1) \left[(1 - y^2)^{1/2} e^{-Ey^2/(1+y)} \right] \quad (22)$$

Les atomes liés au niveau critique sont évidemment représentés par l'expression

$$\rho_I + \rho_{III} = \rho(1) \left[1 - (1 - y^2)^{1/2} e^{-Ey^2/(1+y)} \right] \quad (23)$$

On voit immédiatement que le problème qui se pose est celui de l'existence des particules elliptiques ρ_{II} et hyperboliques étrangères ρ_{IV} . En effet, au niveau critique, $y = 0$, on doit avoir

$$\rho_{II} + \rho_{IV} = 0 \quad (24)$$

et

$$\rho_I + \rho_{III} = \rho(1) \quad (25)$$

A l'infini, $y = 1$, on a les relations :

$$\rho_I + \rho_{III} = 0 \quad (26)$$

et

$$\rho_{II} + \rho_{IV} = \rho_{IV} = 1 \quad (27)$$

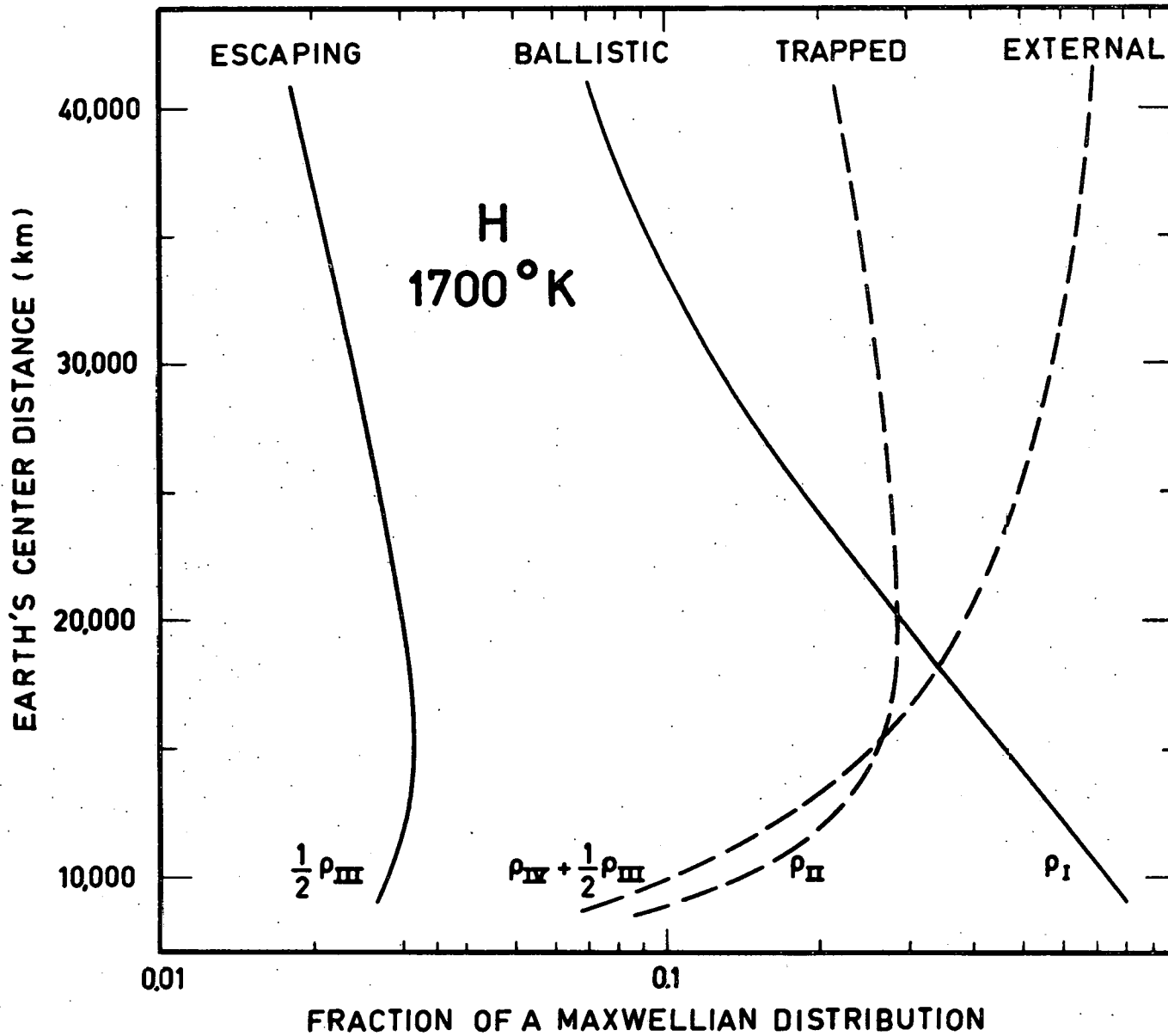


Fig. 6.- Distribution verticale de l'hydrogène atomique lorsque la température de la thermopause est de l'ordre de 1700°K.

Si l'on ne considérait aucune interaction entre l'ionosphère et l'exosphère, on pourrait toujours imaginer des conditions telles que des particules se maintiennent satellisées ou viennent de l'espace avec des vitesses hyperboliques. Mais, dès que l'on tient compte qu'un transfert de charge tel que $H^+ + H \rightarrow H + H^+$ ou $He^+ + He \rightarrow He + He^+$ peut apparaître avec un coefficient de l'ordre de $10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$, on s'aperçoit immédiatement que le maintien en orbite n'est pas possible. Dès que l'atome neutre se transforme en ion; il est soumis au champ magnétique terrestre et ne peut être maintenu sur son orbite elliptique. D'autre part dans le cas des orbites hyperboliques étrangères, la densité du milieu interplanétaire n'est jamais suffisante pour introduire la concentration requise de particules qui maintiendrait une éventuelle distribution maxwellienne.

En conséquence, on peut donc dire que, par suite de l'interaction entre l'ionosphère et l'exosphère, la concentration des constituants (Fig. 7) est essentiellement due à la composante balistique, c'est-à-dire aux atomes quittant le niveau critique pour y revenir après avoir accompli une trajectoire dépendant de leur vitesse initiale.

V.- PARTICULES CHARGÉES ET LA MAGNETOSPHERE.

A des altitudes supérieures à 1000 km, il ne s'agit plus de considérer uniquement un milieu ionisé constitué uniquement de particules chargées ayant des vitesses thermiques de l'ordre de 1000°K ou même quelques milliers de degrés. En effet, les ions (protons) et électrons de haute énergie sont piégés dans le champ magnétique terrestre. Il est clair que les conditions physiques sont telles que ces dernières particules ont un rôle essentiellement différent des particules ionosphériques d'énergie thermique.

Il n'est pas nécessaire de rappeler ici que si le mouvement des particules chargées dans le champ magnétique terrestre s'interprète facilement, il n'en est pas de même de leur origine et de leur caractère

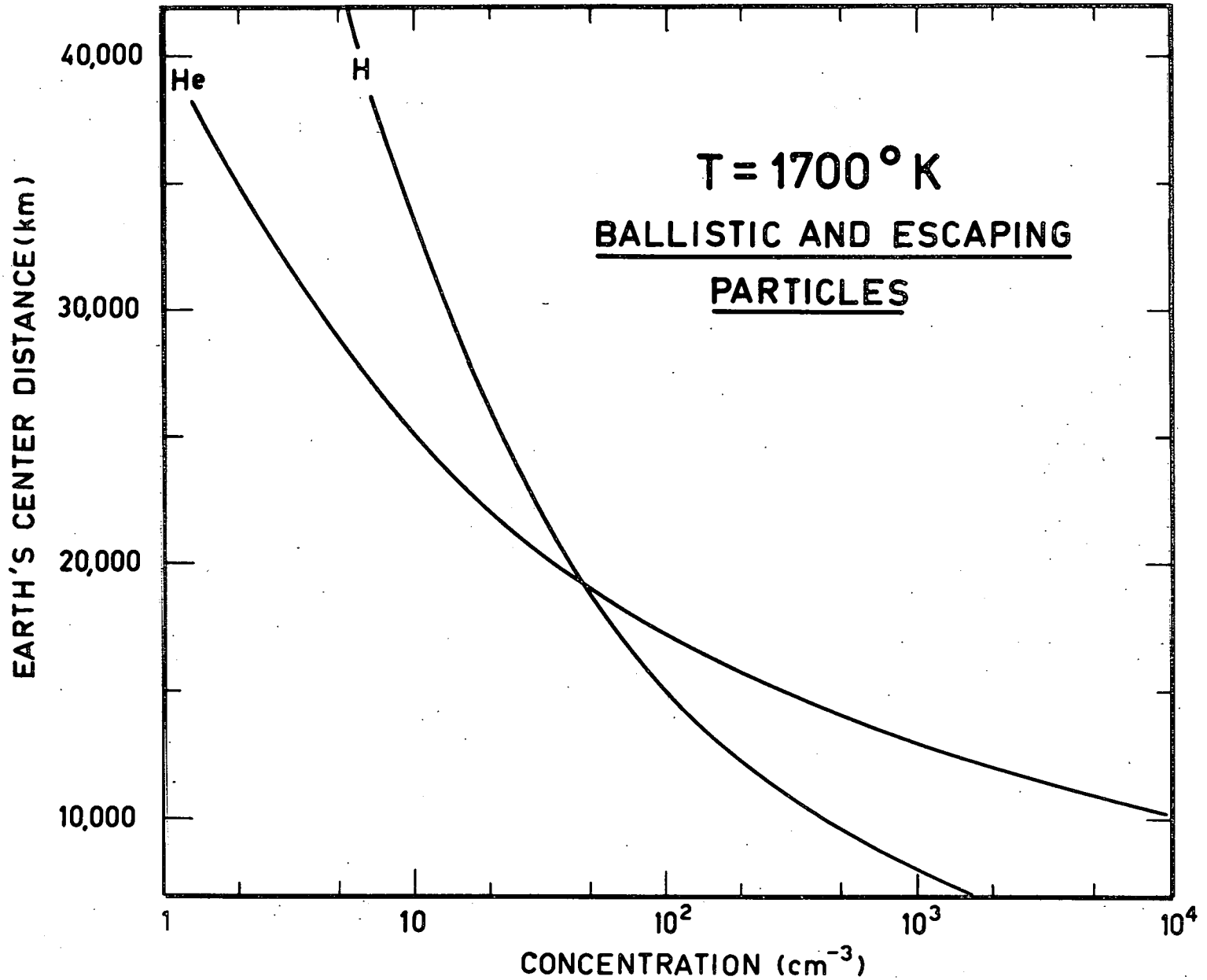


Fig. 7.- Distribution verticale des concentrations de l'hydrogène et de l'hélium dans l'exosphère pour une température de la thermopause de l'ordre de 1700°K.

énergétique. De plus, il s'agit essentiellement de protons dans le cas de particules positives avec un très faible pourcentage de deutérons et de tritons. Les distributions spatiales observées à des distances de 3 à 8 rayons terrestres correspondent à des flux allant de 10^6 à 10^8 protons $\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$, avec des énergies de 1 MeV et au-delà. Même si la concentration est inférieure à un proton cm^{-3} , l'énergie est le paramètre physique essentiel. En d'autres termes, l'énergie par unité de volume des ions dans la magnétosphère est supérieure à celle de l'ionosphère associée.

Il est donc certain qu'il n'est pas possible de séparer les conditions ionosphériques de celles de la magnétosphère. L'exosphère neutre et l'ionosphère supérieure définissent les conditions aux limites inférieures de la magnétosphère. La détermination de ces conditions est très délicate, car elles ne peuvent être considérées comme constantes par suite des variations diurnes de l'atmosphère sans oublier la variation en fonction de la latitude et à plus long terme avec l'activité solaire. D'ailleurs, toute la question est liée à celle des conditions aux limites supérieures, c'est-à-dire à l'effet variable du vent solaire. Il s'agit donc d'un vaste problème qui requiert encore de nombreuses observations et des recherches théoriques approfondies.