

INSTITUT D'AERONOMIE SPATIALE DE BELGIQUE

3 - Avenue Circulaire

B - 1180 BRUXELLES

AERONOMICA ACTA

A - N° 80 - 1970

De l'aéronomie d'hier à l'expérience spatiale de demain

par M. NICOLET

BELGISCH INSTITUUT VOOR RUIMTE-AERONOMIE

3 - Ringlaan

B - 1180 BRUSSEL

DE L'AERONOMIE D'HIER A L'EXPERIENCE SPATIALE DE DEMAIN

par

M. NICOLET.

1. LES AVANT-VEILLES

Il y a 75 ans, la théorie cinétique des gaz était suffisamment développée (Boltzmann, Maxwell) en vue d'une application aux atmosphères planétaires. Dès lors, on peut dire que la théorie de l'Atmosphère a l'âge de la théorie cinétique des gaz. Mais la composition chimique et la constitution physique de l'atmosphère de la Terre et des principales planètes du système solaire ne se sont révélées définitivement qu'au cours des dernières années.

Le phlogistique du 18e siècle de Lavoisier, Schraele, Priestley et Cavendish avait fait connaître l'existence de deux gaz, l'oxygène et l'azote. Tout comme aujourd'hui par le moteur à explosion polluant l'atmosphère, les oxydes d'azote (NO , NO_2) avaient été produits (Cavendish) dans une décharge d'air sec et additionné d'oxygène. Néanmoins, il fallut attendre 1895 - il y a exactement 75 ans - avant d'arriver à la découverte de l'hélium [$\eta\lambda\iota\omicron\varsigma$ = soleil] (Kayser) et de l'argon [$\alpha\rho\gamma\acute{o}\varsigma$ - $\omicron\nu$ = inactif] (Ramsay) dans l'atmosphère terrestre. On attendit 1898 pour la détection, grâce à l'air liquide, des autres gaz nobles, le krypton [$\chi\rho\acute{\upsilon}\pi\tau\omicron\nu$ = caché], le néon [$\nu\acute{\epsilon}\omicron\nu$ = nouveau] et le xénon [$\xi\acute{\epsilon}\nu\omicron\nu$ = étranger] dont l'étymologie est liée à la chronologie des opérations.

Au 19e siècle, l'observation était limitée ; les moyens utilisés étaient loin de permettre la prospection verticale de l'atmosphère à haute altitude. On possédait seulement quelques observations météorologiques.

Les traînées d'étoiles filantes dans le ciel n'étaient pas encore interprétées dans le contexte d'une destruction au sein de la haute atmosphère. L'onde radioélectrique n'avait pas encore franchi de grandes distances et n'avait pas encore été associée à l'existence d'une ionosphère. La photographie des aurores boréales avait seulement commencé et, c'est à la suite de la découverte de l'électron que Birkeland avait lancé l'idée de la formation du phénomène lumineux de l'aurore par l'arrivée d'électrons émis par le soleil et entrant en collision avec les molécules terrestres. Ainsi, on introduisait l'effet du champ magnétique terrestre - déjà bien connu au cours du 19e siècle - influençant la trajectoire d'une particule électriquement chargée comme l'électron en l'amenant dans les régions polaires. Enfin, le spectroscope avait détecté des radiations dans les aurores boréales, mais les connaissances spectroscopiques étaient encore à l'état embryonnaire pour susciter des idées claires sur la constitution de l'atmosphère supérieure.

Il fallut attendre le début de ce siècle pour attirer des regards suffisamment pénétrants sur les problèmes de l'atmosphère supérieure. En effet, Saint-Jean de Terre-Neuve était relié par radio à partir de Poldhu, en Cornouailles (1901, Marconi), ce qui fut bientôt interprété en postulant l'existence d'une couche conductrice dans l'atmosphère supérieure (1902, Kennely, Heaviside). Cette couche "réfléchissante" de l'onde radioélectrique devait être constituée de particules chargées (ions) produites par la radiation solaire ionisant les molécules de la haute atmosphère. Ceci remettait à l'honneur une ancienne hypothèse introduite en 1878 (Stewart) et reprise en 1889 (Schuster), qui suggérait qu'une partie du champ magnétique terrestre se manifestant par la variation diurne était associée à des courants électriques dans la haute atmosphère.

La première guerre mondiale ne permit aucun progrès dans la connaissance de la haute atmosphère, sauf peut-être par l'intermédiaire d'un résultat inattendu dû à la propagation anormale du bruit du canon ; on découvrit, en effet, des zones de silence au-delà desquelles le bruit réapparaissait à des distances anormales. On l'attribua, quelques années plus tard à la suite

d'expériences pacifiques, au retour d'une onde sonore allant se réfléchir dans la stratosphère où la température est supérieure à celle de la tropopause. Aujourd'hui, on utilise d'ailleurs le procédé de l'explosion de grenades à haute altitude en vue de déterminer la température à des hauteurs allant jusqu'à 85 km.

Après la première guerre mondiale, il y a 50 ans, se profilait toute une série de progrès qui allait profiter à l'aéronomie [$\alpha\eta\rho$ = air, νόμος = loi] c'est-à-dire à l'étude des phénomènes liés à la dissociation et à l'ionisation des constituants de l'atmosphère. Tout d'abord, la spectroscopie s'orientait vers l'identification et l'interprétation des radiations caractéristiques des principaux éléments de l'atmosphère, l'azote et l'oxygène. On pouvait ainsi reconnaître que l'oxygène apparaissait sous forme d'atomes au-delà de 100 km, mais que l'azote se maintenait sous forme moléculaire jusqu'aux plus hautes altitudes. Néanmoins, il n'apparaissait pas que l'atmosphère (1922, Chapman et Milne) était soumise à un mélange permanent au-delà de 20 km. Toutefois dès 1928, Maris examinant le problème de la diffusion des gaz dans le champ de la pesanteur ne manquait pas de considérer que la distribution de chaque gaz suivant la loi de Dalton, c'est-à-dire suivant sa propre masse, ne pouvait avoir lieu qu'au-delà de 150 km. Entretemps, les radio-amateurs avaient découvert la propagation à longue distance des ondes courtes (1921-1925) et Larmor (1924) avec sa théorie de la réfraction électronique offrait un nouveau champ d'investigation scientifique à l'étude de l'ionosphère et ainsi à l'aéronomie. De plus, la propagation radioélectrique par l'étude des échos d'ondes courtes (1926, Breit et Tuve) et par son analyse dans le cadre de la théorie magnéto-ionique (1932, Appleton) devenait un véritable sondage de l'ionosphère, c'est-à-dire de toute la région au-dessus de 60 km où des électrons sont produits par ionisation des atomes et des molécules sous l'effet de la radiation ultraviolette et des rayons X solaires. Enfin, grâce au développement de spectrographes de plus en plus lumineux, la lumière du ciel nocturne était analysée spectroscopiquement. On commençait à concevoir comment les

réactions chimiques pouvaient donner lieu à des émissions lumineuses lorsque la seconde guerre mondiale fut déclenchée.

Au cours de la guerre, l'utilisation intensive des radio-communications conduisit à une étude obligée de l'ionosphère soumise au rayonnement ultraviolet du soleil et à la variation de son activité au cours de son cycle undécennal. Au surplus, le radar fut à la base de la découverte d'émissions solaires dans le domaine des ondes ultracourtes. De là, une étude obligée pour l'aéronomie des relations entre les phénomènes solaires et terrestres allait amener de nouveaux développements.

Enfin, il y a 25 ans, l'aéronomie devenait également une science expérimentale. En effet, les premières fusées scientifiques - provenant de la récupération des V 2 qui n'avaient pu être utilisés avant la fin de la guerre - nous apportaient des données sur les paramètres physiques mesurés in situ au-delà de 100 km. Ainsi débutait une ère nouvelle qui nous a conduit au lancer du premier satellite artificiel en 1957, au cours de l'Année Géophysique Internationale, alors que tous les géophysiciens de la Terre avaient mis, pour la première fois, leurs efforts en commun en vue d'explorer notre planète sous toutes les latitudes et longitudes jusqu'aux plus hautes altitudes.

Depuis la fin de l'Année Géophysique Internationale, aucun frein n'a pu arrêter la conquête scientifique vers le sommet puisque les planètes voisines - Mars et Vénus - ont été l'objet des missions spatiales en même temps que l'espace interplanétaire était soumis à une prospection intensive.

2. L'AIR PUR ET POLLUE

La composition de l'air que nous respirons est celle de l'air de la troposphère, c'est-à-dire de la région de l'atmosphère qui est en contact avec le sol et s'élève jusqu'à la tropopause [$\mu\pi\omicron\lambda\acute{o}\varsigma$ = mouvement ; $\pi\alpha\tilde{\nu}\sigma\iota\varsigma$ = cessation] dont l'altitude de l'ordre de 17 km à l'équateur s'abaisse

à quelque 6 km aux pôles. Cette région est soumise en permanence à un brassage puissant et ainsi la plupart des constituants - principaux et minoritaires - conservent les mêmes proportions ; pour la plupart des constituants le mélange est assuré en moins d'un mois. L'azote moléculaire avec 78,08 % en volume et l'oxygène moléculaire 20,95 % représentent les deux constituants principaux. Le cycle de l'azote comprend tous les domaines de la biosphère. Toutefois, il doit être associé à l'hydrogène et à l'oxygène avant d'être assimilé par les plantes supérieures qui, à leur tour, passent dans le domaine animal. L'intervention de l'homme se manifeste par la fixation industrielle de l'ordre de 30 %. Ces diverses fixations de l'azote sont compensées par l'apport de l'azote (organique et non organique) du sol. Comme moins d'un dix-millionième de la quantité totale d'azote atmosphérique intervient dans le cycle annuel, on peut dire qu'une variation de la quantité d'azote atmosphérique ne peut se produire à brève échéance et à grande échelle.

Quant à l'oxygène, dont l'origine dans l'atmosphère remonte à sa production par les plantes, on peut dire qu'il est recyclé tous les deux mille ans. Mais le cycle de l'oxygène est extrêmement compliqué parce qu'il apparaît sous de nombreuses formes chimiques (O_2 , H_2O , CO_2 , ...). En tout cas, l'oxygène atmosphérique est intimement lié à la biosphère et requiert encore une étude détaillée. Il ne faut pas oublier que l'oxygène n'est apparu dans l'atmosphère qu'il y a deux milliards d'années. D'ailleurs, il atteignait que 10 % de son abondance actuelle il y a 500 millions d'années, et il n'a atteint sa proportion d'aujourd'hui qu'il y a peut-être seulement quelque 20 millions d'années.

L'argon constitue le dernier pourcent (0,934 %) de l'air pur. Sa masse moléculaire 40 parmi les isotopes de l'argon indique son origine. En effet, l'argon terrestre est un résultat de la radioactivité du Globe ; le potassium radioactif K_{40} devient soit du calcium-40, soit de l'argon-40 (12 %) qui diffuse de la croûte vers l'atmosphère. Ainsi, l'argon a été un des premiers constituants de l'atmosphère actuelle de la Terre lorsqu'il y a

plus de 4 millions d'années le potassium radioactif atteignait encore son maximum de concentration à l'intérieur du Globe. L'argon a probablement constitué le premier écran aux rayons X solaires en les empêchant d'atteindre le sol.

L'anhydride carbonique (CO_2) est un des gaz minoritaires les plus abondants dans l'atmosphère terrestre alors que les atmosphères de Mars et de Vénus révèlent qu'il en est le constituant principal. Le cycle du carbone atmosphérique débute par la fixation de l'anhydride carbonique dans le processus de photosynthèse qui fournit l'oxygène à l'atmosphère et se termine en rendant le CO_2 par la respiration des plantes, des animaux et du sol. Des variations journalières et saisonnières sont donc dues à la photosynthèse. En outre, la circulation du carbone dans la biosphère se présente sous des aspects différents à la surface des continents et des océans. Cependant un des aspects importants est celui de la pollution de l'air naturel par les produits de la combustion qui apportent chaque année une quantité équivalente à 5/1000 du CO_2 atmosphérique. L'océan jusqu'à présent accumule la majeure partie de cet excédent d'anhydride carbonique. Ainsi, l'accroissement du CO_2 atmosphérique, qui se manifeste par suite du développement industriel, doit être surveillé.

Il n'est pas nécessaire de rappeler que la vapeur d'eau (H_2O) constitue un des éléments minoritaires les plus importants de la troposphère. Mais il faut signaler que la tropopause se présente comme une barrière pour la vapeur d'eau ; en effet, dans la stratosphère, la proportion de H_2O n'est plus que de l'ordre de 3 millièmes de l'air et n'a donc plus l'importance qu'elle a dans l'air que nous respirons normalement. La présence d'une aussi faible quantité de vapeur d'eau dans la stratosphère indique que de faibles additions artificielles peuvent modifier la quantité naturellement présente.

L'ozone, qui constitue pour les êtres vivants un écran absorbant pour l'ultraviolet abiotique, est formé dans la stratosphère à la suite d'une

photodissociation de l'oxygène moléculaire sous l'effet du rayonnement ultraviolet de longueurs d'ondes inférieures à 2400 Å. Il est transporté vers le bas suivant les mouvements de l'air résultant de la circulation atmosphérique à grande ou petite échelle. C'est un des rares composés dont on peut dire que la concentration augmente avec l'altitude pour atteindre un maximum vers 25 km. L'ozone présente une importance exceptionnelle, car il constitue un élément dont les propriétés physiques et chimiques conditionnent toute l'atmosphère jusqu'à 100 km.

Quant au méthane (CH_4) et à l'oxyde azoteux (N_2O) dont le mélange dans l'air est presque parfait au sein de la troposphère, il faut leur attribuer une origine biologique. Le méthane produit principalement au niveau du sol par les animaux domestiques et assimilés est rapidement mélangé dans la proportion d'un millionième à l'air troposphérique pour être oxydé par l'oxygène atomique et détruit dans la stratosphère. L'oxyde azoteux produit dans le sol par des bactéries est également mélangé dans une abondance relative de quelque 2 dix-millionièmes à l'air troposphérique et est détruit par photodissociation dans la stratosphère.

Enfin, un gaz noble, tel que l'hélium, qui est le produit radioactif (particules α) du thorium et de l'uranium de la croûte et du manteau, arrive continuellement dans l'atmosphère. Sa proportion, qui n'est que de l'ordre du millionième dans la troposphère alors que sa production atteint pratiquement 1 million d'atomes par cm^2 et par seconde, indique que l'hélium s'échappe continuellement de l'atmosphère par un processus qui lui donne la vitesse de libération de 11 km par seconde.

Lorsqu'on trouve dans l'air que nous respirons de l'ammoniac (NH_3), de l'oxyde de carbone (CO), des composés du soufre (SO_2 par exemple), des oxydes d'azote (NO et NO_2), ... on peut dire que l'air est pollué. La molécule SO_2 qui résulte de la combustion du charbon est soumise à l'oxydation dans l'air et donne l'acide sulfurique. Mais un des aspects les plus étranges

est la formation des oxydes d'azote par suite de la dissociation de l'azote dans la combustion automobile. Cette dernière pollution ne doit pas être confondue avec la formation naturelle de l'oxyde d'azote dans l'atmosphère supérieure où l'azote est finalement dissocié à la suite de réactions ioniques de l'ion moléculaire N_2^+ conduisant à la production d'atomes d'azote et, en conséquence, par réaction avec l'oxygène à la formation de la molécule NO. Il faut signaler également que NH_3 dans les planètes extérieures est un élément important de la constitution de leurs atmosphères et que l'oxyde de carbone apparaît dans l'atmosphère supérieure de Vénus et de Mars. Enfin, CO est rapidement transformé dans la stratosphère en CO_2 par suite de réactions avec les radicaux OH et HO_2 résultant de l'oxydation de la vapeur d'eau et du méthane par les atomes d'oxygène produits par la photodissociation de l'ozone.

3. DE LA STRATOSPHERE A LA THERMOSPHERE

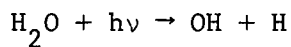
Lorsqu'au début du siècle Teisserenc de Bort découvrit la stratosphère où la température ne diminuait plus avec l'altitude, on ne s'imaginait pas que la température pouvait atteindre un maximum de l'ordre de $0^\circ C$ vers 50 km, qu'une nouvelle région, la mésosphère [$\mu\acute{e}σ\sigma\varsigma$ = milieu] allait se manifester avec un profond minimum de température descendant même au-dessous de $-100^\circ C$ vers 85 km et qu'enfin l'atmosphère supérieure allait se traduire par une thermosphère où les températures pouvaient dépasser largement $1000^\circ C$.

Avant l'utilisation des fusées pour la recherche spatiale, on s'imaginait que l'oxygène une fois dissocié aux environs de 100 km disparaissait aux dépens de l'oxygène atomique qui se maintenait jusqu'aux plus hautes altitudes. Mais, dès que les premiers lancers d'instruments adéquats eurent fourni leurs premiers résultats sur l'absorption du rayonnement solaire au-delà de 100 km, la théorie (1954, Nicolet et Mange) montra que l'oxygène moléculaire était distribué verticalement suivant les lois de la

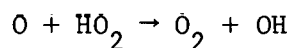
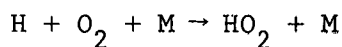
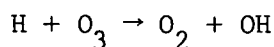
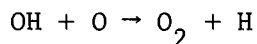
diffusion des gaz dans le champ de la pesanteur. Ainsi, il devint clair que la distribution verticale de l'oxygène moléculaire et atomique différait complètement de l'équilibre photochimique auquel on s'était toujours accroché. Un tel effet amenait l'oxygène moléculaire à des altitudes supérieures à 150 km où il est d'ailleurs requis pour expliquer les réactions ioniques dans l'ionosphère.

Le fait d'introduire l'action de diffusion des gaz dans le champ de la pesanteur au-delà de 120 km s'est répercuté sur tout le concept de la constitution physique de l'atmosphère supérieure de la Terre comme celle de toutes les planètes. Ainsi, l'hélium, gaz noble mais minoritaire avec sa proportion de l'ordre du milliardième dans toute l'homosphère (au-dessous de 100 km) finit par devenir (1961, Nicolet) un important constituant de l'atmosphère supérieure. Au cours d'une phase déterminée du cycle solaire, un certain régime apparaît où une ceinture d'hélium se présente dans toute son ampleur par rapport à celles de l'oxygène et de l'hydrogène atomiques.

L'atome d'hydrogène est créé dans la mésosphère (1950, Bates et Nicolet) par des processus de dissociation moléculaire dans lesquels sont impliqués une série de constituants que l'on étudie bien que dans la chémosphère terrestre. Sous l'effet de la radiation solaire ultraviolette non absorbée par la molécule d'oxygène, la vapeur d'eau subsistant au-dessus de 85 km est dissociée sous la forme



produisant un radical OH et un atome H. Ces deux produits de la dissociation réagissent respectivement avec l'oxygène atomique O et moléculaire O₂ tout en impliquant l'ozone O₃.



Ainsi, un circuit s'accomplit entre H, OH et HO₂ résultant de la dissociation de H₂O qui est apporté continuellement de la stratosphère à la mésopause par diffusion turbulente particulièrement importante dans la mésosphère. L'hydrogène atomique, qui est un catalyseur, atteint une proportion qui n'est pas inférieure à un dix-millionième à l'altitude de 100 km. Cet atome d'hydrogène, 25 fois plus léger que l'azote moléculaire, 16 fois plus léger que l'oxygène atomique et seulement 4 fois plus léger que l'hélium diffuse rapidement vers le haut pour s'échapper de l'atmosphère avec un flux pouvant atteindre environ 100 millions d'atomes par cm² et par seconde (1963, Kockarts et Nicolet ; Bates et Patterson). Il en résulte que l'atmosphère - comme probablement toute atmosphère planétaire - se termine par une couronne constituée d'hydrogène atomique qui s'étend jusqu'à 100.000 km.

Ainsi, on peut dire que la partie de l'atmosphère comprenant la troposphère, la stratosphère et la mésosphère présente une composition constante d'oxygène et d'azote, d'où le nom d'homosphère [*ὁμοῖος* = semblable]. Au-delà de la mésopause, dès que l'on pénètre dans la thermosphère sous l'effet d'abord de la dissociation de l'oxygène moléculaire et ensuite de la diffusion dans le champ de la pesanteur, on est dans l'hétérosphère (*ἕτερος* = autre) où la proportion de différents gaz change avec l'altitude.

Lorsqu'on analyse les données obtenues depuis 1957 sur le freinage que les satellites subissent dans l'hétérosphère par la présence des atomes et des molécules subsistant à ces altitudes, on constate que la pression de l'hétérosphère est soumise à des variations considérables. Au cours de l'Année Géophysique Internationale (1957-58), l'activité solaire a été très forte et les pressions au sein de l'hétérosphère ont été extrêmement élevées. Au cours de l'Année du Soleil Calme (1964), au minimum d'activité solaire, on a déterminé les pressions les plus faibles de toute la thermosphère. L'origine de cette variation de la pression avec l'activité solaire - pouvant atteindre un facteur 1000 au cours d'un cycle d'activité

solaire à l'altitude de 750 km - se trouve dans les effets du chauffage ultraviolet solaire. La chromosphère et la couronne solaires émettent dans l'ultraviolet lointain des radiations susceptibles d'ioniser tous les atomes et les molécules de la haute atmosphère. Ces diverses radiations varient d'intensité suivant le degré d'activité solaire que l'on a coutume de représenter par des indices comme le nombre de taches solaires ou le flux radioélectrique émis dans le domaine des ondes centimétriques et décimétriques. L'absorption du rayonnement ultraviolet variable conduit à un chauffage variable compensé par un refroidissement dû au transport de chaleur par conduction vers les couches inférieures. Il existe donc une variation diurne de la température de la thermopause traduisant l'effet exclusif du chauffage de jour et celui du refroidissement permanent par conduction. En outre, les périodes de 27 jours que l'on détecte dans les variations de la densité de l'hétérosphère doivent être mises en corrélation avec le passage dans l'hémisphère visible de plages particulièrement actives sur le disque du soleil en rotation. Enfin, la variation undécennale d'activité solaire se traduit automatiquement par une variation undécennale de la pression, c'est-à-dire de la densité et de la température de la haute atmosphère de la Terre.

4. DE L'EXOSPHERE A L'ESPACE INTERPLANETAIRE

Dans l'hétérosphère comme dans l'homosphère, on sait que les chocs entre atomes ou molécules sont suffisamment nombreux en vue d'assurer une distribution égale d'énergie correspondant à une température unique. Ainsi, tous les gaz, qui ne sont pas liés à des conditions chimiques trop strictes sont soumis exclusivement à l'équilibre hydrostatique. Toutefois, au fur et à mesure que l'on s'élève dans l'hétérosphère, le nombre de chocs entre les atomes diminue par suite de la diminution de la pression. Le libre parcours moyen entre deux chocs augmente avec l'altitude et au-delà d'un certain niveau l'uniformité du gaz atmosphérique n'existe plus. Une zone critique apparaît où les collisions deviennent de moins en moins nombreuses et où les atomes peuvent accomplir de longs parcours sans subir

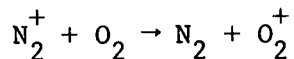
de collisions. Au-delà de cette zone, le libre parcours moyen est tel qu'on peut considérer chaque atome avec sa propre vitesse et soumis au champ de la pesanteur. On se trouve alors dans l'exosphère ($\epsilon\zeta\omega$ = au dehors) où les atomes ayant acquis la vitesse de libération (11 km par seconde) peuvent échapper à l'attraction terrestre. C'est le cas permanent de l'hydrogène atomique, l'élément le plus léger, qui finit d'ailleurs par constituer la couronne terrestre. Quant à l'hélium neutre, son échappement ne peut avoir lieu que pour les températures suffisamment élevées du maximum du cycle solaire. Enfin, l'atome d'oxygène est trop lourd pour atteindre des vitesses d'échappement dans l'exosphère terrestre.

Afin d'apprécier quelle est la distribution verticale des atomes dans une exosphère, on doit se reporter aux diverses trajectoires que peuvent adopter des particules soumises au champ de la pesanteur. Si l'on considère un volume déterminé de l'exosphère, on peut avoir affaire à des atomes venant de l'hétérosphère et franchissant la zone critique. Dans un premier cas, une particule peut avoir une vitesse inférieure à la vitesse de libération ; elle retourne par la voie d'une trajectoire balistique à l'hétérosphère. Dans l'autre cas, une particule a une vitesse supérieure à celle de libération ; elle s'échappe dans l'espace interplanétaire par la voie d'une trajectoire hyperbolique. A l'opposé des particules venant de l'intérieur de l'atmosphère, on peut imaginer des particules venant de l'extérieur. En fait, étant trop peu peuplé, l'espace interplanétaire ne permet pas de considérer un apport effectif à l'exosphère. Enfin, on peut considérer que des particules satellites existent ; elles doivent avoir la vitesse adéquate pour se maintenir sur une orbite elliptique. Il apparaît que, dans le cas de l'hydrogène atomique dans l'exosphère terrestre, on doit s'attendre surtout à une population concentrée sur les orbites balistiques, c'est-à-dire à des atomes allant et retournant à l'hétérosphère terrestre pendant qu'une fraction de l'ordre de 10^8 atomes par cm^2 et par seconde s'échappent dans l'espace interplanétaire. Le comportement des diverses exosphères planétaires ne doit pas être différent.

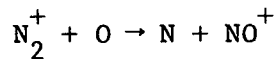
5. DE L'ETAT D'IONISATION DE L'ATMOSPHERE TERRESTRE

Au niveau du sol et dans les régions inférieures de l'atmosphère, la présence des ions se manifeste. Mais il faut atteindre la mésosphère et surtout la thermosphère pour trouver les états d'ionisation les plus remarquables. Par des observations continues (Washington aux Etats-Unis, Huancayo au Pérou et Watheroo en Australie), la méthode des sondages (radio-écho) nous a apporté avant la seconde guerre mondiale des données révélatrices sur la constitution de l'ionosphère avec ses trois couches ionisées (région D, 1.000 électrons par cm^3 ; région E, 100.000 électrons et région F, 1.000.000 électrons). On pouvait, déjà en 1940, dans les milieux avertis, concevoir comment se comportait l'ionosphère en fonction de la latitude et de la longitude, de la saison, du jour et de la nuit et même de l'année. Néanmoins l'utilisation des fusées fut nécessaire pour permettre une interprétation correcte de la distribution verticale de la concentration électronique entre les maxima de concentration de la région D au-dessus de 85 km, de la région E vers 160 km et de la région F au-delà de 200 km. De plus le satellite a été requis en vue de prospecter tout le domaine ionisé situé au-dessus du maximum de la région F que les ondes radioélectriques envoyées du sol ne pouvaient pas atteindre par suite de leur réflexion vers le sol. Grâce aux ionosondes placées à bord de satellites se déplaçant aux hautes altitudes, l'ionosphère supérieure a été analysée très rapidement. Mais les résultats les plus intéressants au point de vue aéronomique ont été obtenus grâce à l'utilisation des spectrographes de masse qui ont détecté les différents ions et leur distribution verticale. C'est ainsi que l'on a détecté (1955, Johnson) l'ion d'oxyde d'azote (NO^+) que la théorie (1945, Nicolet) exigeait pour expliquer la région D avant que la molécule neutre ne soit observée par fluorescence (1965, Barth) par des fusées lancées dans le crépuscule du soir ou du matin. D'ailleurs l'analyse de l'ionosphère par spectrographie de masse permet de se rendre compte combien les réactions ioniques sont importantes. Alors qu'il est bien démontré que dans la région d'intense production ionique, la molécule

d'azote N_2 donne lieu à l'ion moléculaire N_2^+ , celui-ci a une durée de vie très brève. Dans les régions D et E, il est pratiquement transformé par transfert de charge

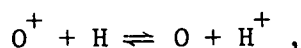


c'est-à-dire que l'ion N_2^+ rencontrant une molécule d'oxygène O_2 lui cède sa charge. A plus haute altitude, dans la région E supérieure et dans la région F, l'atome d'oxygène O rencontrant l'ion N_2^+ provoque une réaction



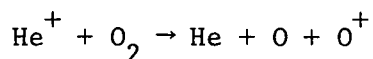
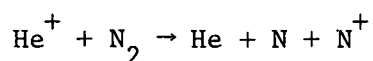
conduisant à la formation de l'ion NO^+ simultanément à la dissociation de l'azote. Comme l'ion NO^+ est très stable, c'est-à-dire ne transmet sa charge qu'à des atomes du type métallique comme le calcium, le magnésium, le silicium et le fer dont le potentiel d'ionisation est relativement bas et non à des éléments importants comme l'azote et l'oxygène, on arrive à la conclusion que cet ion contrôle l'équilibre ionique général dans l'ionosphère. C'est là un des paradoxes apparents des études de l'ionosphère que les observations spatiales nous ont révélé au cours de ces dernières années : un élément mineur contrôlant toute la recombinaison ionique alors que l'élément principal, l'azote, est éliminé par des réactions des autres constituants, l'oxygène atomique et moléculaire.

Comme dans le cas de l'hétérosphère supérieure, on retrouve dans l'ionosphère supérieure les éléments légers que sont l'hélium et l'hydrogène. Alors que l'hydrogène est pratiquement d'abord en équilibre ionique avec l'oxygène dans l'ionosphère moyenne par la réaction de résonance



car les potentiels d'ionisation sont pratiquement identiques. L'ion d'hélium

entre en réaction avec l'azote et l'oxygène moléculaires



et perd sa charge. Ce n'est qu'aux très hautes altitudes où l'azote et l'oxygène ne sont plus très abondants que l'ion d'hélium peut survivre. De là, l'ionosphère supérieure constituée des ions d'oxygène et d'hélium et d'hydrogène se termine par une couronne d'ions d'hydrogène. Ceux-ci se trouvant dans l'exosphère ionique ne peuvent s'échapper que s'ils se trouvent dans les régions polaires où les lignes de force du champ magnétique s'ouvrent vers l'extérieur. Ainsi, si l'exosphère ionique est en principe similaire à l'exosphère neutre, elle en diffère fortement par suite de l'effet du champ magnétique terrestre qui confine les particules à suivre des trajectoires imposées par la configuration des lignes de force.

Enfin, un des aspects de l'ionosphère auquel il faut attribuer une attention particulière est celui des températures. A côté des molécules et des atomes neutres, éléments permanents de l'hétérosphère, les ions et les électrons apparaissent et disparaissent suivant un certain nombre de processus allant de la recombinaison à des transferts de charge et à des échanges d'atomes et d'ions. Dans les couches inférieures de l'ionosphère (au-dessous de 200 km), les électrons de haute énergie produits par photo-ionisation perdront leur excès d'énergie en entrant en contact avec les molécules. Dans l'ionosphère moyenne (150-200 km), les électrons photo-électriques entreront d'abord en contact avec les électrons déjà présents et leur excès d'énergie provoquera une augmentation générale de l'énergie de ces électrons avant que ceux-ci ne puissent perdre leur énergie dans des collisions avec les particules plus lourdes. Dès lors la température électronique sera supérieure à celle des ions et des atomes neutres. Dans l'ionosphère supérieure, le contact entre électrons et ions sera plus important que celui des électrons

avec les atomes neutres ; de là, la température ionique augmentera également. Ainsi l'hétérosphère supérieure sera caractérisée par trois types de températures - températures des atomes neutres, des ions et des électrons - correspondant aux énergies cinétiques respectives de ces trois types de constituants. A ces trois " gaz", on appliquera les lois de la conduction de la chaleur, ce qui implique la considération de régions isothermes à l'entrée des exosphères neutres et ioniques. En fin de compte les études aéronomiques ont acquis ainsi un vaste champ d'expériences que le laboratoire conventionnel ne peut fournir par suite des restrictions imposées à ses dimensions.

6. DE L'IONOSPHERE A LA MAGNETOSPHERE

Il y a dix ans le vocable "magnétosphère" était encore un néologisme, car l'image du champ magnétique terrestre était encore celle d'un dipôle dont les lignes de force s'étendaient pratiquement sans limite dans l'espace interplanétaire. Aujourd'hui, la forme de la magnétosphère n'a plus cette symétrie. Face au soleil, un flux continu de particules appelé "vent solaire" compresse le champ magnétique terrestre jusqu'à ce que la "pression" du vent solaire corresponde à la "pression" du champ magnétique. La frontière est bien définie à une distance variant de 10 à 14 rayons terrestres où une onde de choc apparaît dans une enveloppe d'une épaisseur de quelque 4 rayons terrestres. La face interne de cette enveloppe est la magnétopause qui représente la limite du champ géomagnétique. Il faut s'imaginer que le milieu intérieur de l'enveloppe est chauffé et que des fluctuations tant électrostatiques qu'électromagnétiques ont des amplitudes suffisantes pour produire des champs magnétiques désordonnés en même temps qu'une distribution des ions différente de celle de l'ionosphère. L'effet du vent solaire sur la magnétosphère consiste à drainer les lignes de force loin de la Terre jusqu'au-delà de la Lune. Mais dans la magnétosphère où l'énergie du champ magnétique excède celle des particules, le mouvement des particules chargées est donc contrôlé. Au sein du système des lignes de

force fermées, les particules peuvent être piégées : ce sont les zones de radiation découvertes il y a un peu plus de dix ans (1958, Van Allen). Toute la région située entre 3.000 et 50.000 km au-dessus du globe est peuplée de particules chargées de toutes énergies. Lorsqu'une collision apparaît, on entre dans l'ionosphère où les particules ont des énergies très basses (énergies thermiques) par rapport à celles des particules piégées dans la magnétosphère. On passe ainsi suivant les circonstances dans des régions différentes de l'atmosphère ionisée. Ainsi, si l'aurôre boréale résulte de l'arrivée de particules chargées dirigées par le champ magnétique terrestre, c'est par suite de l'existence de "fenêtres" magnétiques dans les régions polaires, c'est qu'il existe une magnétosphère ouverte où les particules peuvent passer. C'est là également qu'on retrouve le vent polaire, c'est-à-dire des protons ionosphériques qui s'échappent de l'ionosphère. On ne peut rappeler ici tous les problèmes de la magnétosphère, car son image a constamment varié au cours des dix dernières années. A l'image simple primitive se substitue une image de plus en plus complexe, car la rotation journalière de la Terre tout comme sa révolution annuelle autour du Soleil modifie à tout instant les conditions magnétosphériques. L'interaction avec le vent solaire très variable en est la cause principale.

Le vent solaire est le résultat de l'expansion de la couronne que les observations d'éclipse avaient bien montrée et que la théorie essayait d'expliquer. Encore une fois, les observations spatiales ont été requises afin de fournir les paramètres physiques d'un flux continu de particules chargées (plasma) venant du Soleil et se répandant dans l'espace interplanétaire à des vitesses moyennes de quelque 500 km par seconde. Il est apparu que le vent solaire ne provient pas uniformément du disque du Soleil ; il est plutôt associé à des régions de la surface où les champs magnétiques faibles sont dirigés vers l'intérieur ou l'extérieur et il ne semble pas lié aux régions caractérisées par les taches où se présentent des champs magnétiques forts et de signes opposés. En fin de compte, il apparaît que la structure du vent solaire résulte d'une combinaison d'effets dus à des courants différant par la densité et par la vitesse.

En tout cas, si l'énergie totale du flux du vent solaire dépasse celle du flux ultraviolet, il faut l'attribuer non au nombre de particules mais à leur énergie relativement élevée. Le libre parcours moyen est dès lors très grand, il est comparable à la distance Soleil-Terre. On peut donc considérer le problème du vent solaire comme celui d'un gaz dans une exosphère ; mais comme les particules sont "accrochées" aux lignes de force, elles peuvent être assimilées à un fluide de vitesse supersonique, ayant un nombre de Mach de l'ordre de 10, qui va à la rencontre du champ géomagnétique. Cette interaction entre le vent solaire et le champ géomagnétique sera un des éléments d'étude permanente des dix prochaines années.

Il convient d'ajouter encore quelques mots après l'allusion faite au vent solaire dans l'examen de son interaction avec la magnétosphère. La conception (Parker) du vent solaire s'est en effet considérablement développée depuis les premières mesures en 1962. A une unité astronomique, on peut dire que le champ magnétique interplanétaire, transporté par le vent solaire est de l'ordre de 5γ ($1\gamma = 10^{-5}$ gauss) et peut varier de 2 à 40γ . Le flux de particules est de l'ordre de 10^8 ions par cm^2 et par seconde et peut atteindre parfois 10^{10} particules par cm^2 et par seconde. Si on tient compte d'une vitesse moyenne de 400 km par seconde, on trouve qu'il y a en moyenne 5 ions par cm^3 . En tenant compte des variations d'énergie allant de 500 électron-volts à 5 kiloélectron-volts, les concentrations ioniques dans le vent solaire peuvent osciller entre 0,5 et 100 ions par cm^3 . Ainsi le plasma interplanétaire n'est pas en équilibre thermodynamique. Les ions s'alignent sur le champ magnétique et ont évidemment des températures dépendant des conditions d'anisotropie. La composition est également très variable ; les protons sont les plus nombreux et constituent généralement 95 % du total et les particules α avec une moyenne de 5 % représentent l'autre élément important du plasma interplanétaire. Si l'on tient compte d'abord de l'ensemble des propriétés les plus générales, on voit qu'avec une vitesse de 400 km par seconde on couvre en 100 heures le domaine interplanétaire dans une sphère d'une unité astronomique. Il s'agit alors d'une structure du plasma interplanétaire liée à

la rotation du soleil et qui fait apparaître une division en secteurs, sous forme de spirales d'Archimède, dépendant de son origine dans l'atmosphère solaire. Cette structure générale est évidemment liée à l'activité solaire et les détails au sein de celle-ci apparaissent évidemment à une échelle plus faible où des variations se manifestent par suite de discontinuités ou de modifications dans le plasma. Ces aspects sont encore loin d'être analysés avec une certitude suffisante. Il en est de même lors de la micro-structure qui doit être étudiée à l'échelle cinétique, qui se révèle souvent fructueuse lorsqu'on a identifié les constituants.

7. DU VENT SOLAIRE AUX PLANETES

Si l'interaction du vent solaire avec la magnétosphère de la Terre constitue un élément nouveau qu'apporte la recherche spatiale en permettant d'ajouter aux études du laboratoire conventionnel des études beaucoup plus profondes d'un laboratoire naturel, elle se présente sous des aspects différents pour les diverses planètes. En effet, Mars et Vénus, les deux planètes les plus proches de la Terre ne semblent pas posséder de champ magnétique. Il en résulte que le vent solaire ne peut être confronté aux problèmes d'obstruction que pose un champ magnétique permanent. Ainsi les protons solaires peuvent pénétrer au sein de l'ionosphère planétaire et compresser l'ionosphère de jour. Quant à l'ionosphère nocturne, elle est protégée en grande partie par le globe de la planète et son état d'ionisation dépendra de la durée de la rotation de la planète et du transport d'ions de l'atmosphère éclairée à l'atmosphère nocturne.

Jusqu'à présent, deux planètes ont été soumises à la prospection spatiale. La planète Mars a été observée d'assez près par des sondes spatiales qui ont permis une analyse très poussée de son atmosphère depuis le niveau du sol jusqu'à l'exosphère. La planète Vénus a également été soumise à la pénétration de sondes spatiales soviétiques jusqu'à quelques km du sol tandis que la sonde spatiale américaine a fourni des données tant sur l'atmosphère

neutre que sur l'atmosphère ionisée. Quant à la planète Jupiter, il faut la considérer en tenant compte des distances. Se trouvant sur une orbite à plus de cinq fois la distance de la Terre au Soleil, elle sera l'objet de différents "Grands Tours" qui conduiront les sondes spatiales jusqu'aux confins du système solaire. Elle sera donc l'objet d'études très poussées au cours des vingt prochaines années. Néanmoins, Jupiter a révélé, grâce à des observations dans la gamme des ondes radioélectriques, la présence d'un champ magnétique qui doit être de 10 à 100 fois plus intense que le champ géomagnétique. L'énergie rayonnée dans le domaine des ondes métriques indique que la magnétosphère de Jupiter est puissamment structurée en vue de permettre une émission liée aux électrons piégés dans une atmosphère d'une planète en rotation extrêmement rapide, inférieure à 10 heures.

Les autres planètes extérieures seront spécialement étudiées à l'occasion du "Grand Tour", mais il est probable que l'effet du vent solaire s'estompe de plus en plus avec la distance.

Mercure, la planète la plus proche du Soleil, sera sous peu observée de près par une sonde spatiale américaine qui passera auparavant au voisinage de Vénus. Il semble bien que Mercure n'ait pas d'atmosphère propre, mais l'intérêt va résulter du fait que la durée extrêmement longue du jour et de la nuit sur Mercure rendra possible l'examen de l'effet du vent solaire sur le sol de cette planète dans des conditions bien définies.

Il apparaît donc que, dans les prochaines années, l'intérêt va se concentrer surtout sur Vénus et Mars pour lesquelles un premier effort a été fait et dont on dira quelques mots en terminant.

8. MARS ET VENUS

Le fait que Vénus et Mars sont les deux planètes voisines de la Terre n'indique pas qu'elles présentent beaucoup d'analogies. En fait, le caractère commun semble être la composition de leurs atmosphères qui sont

essentiellement composées d'anhydride carbonique. Le spectrographe avait déjà révélé la présence des bandes de CO_2 depuis environ 40 ans. Mais il a fallu attendre 1968 pour considérer que CO_2 était l'élément nettement le plus abondant et que l'azote moléculaire N_2 était très certainement un élément minoritaire c'est-à-dire pratiquement absent de la chémosphère et de l'ionosphère. Dans le cas de Mars, les observations d'occultation d'émissions radioélectriques lorsque la sonde spatiale passait derrière la planète par rapport à la Terre ont permis l'étude de la réfractivité jusqu'au niveau du sol et dans l'ionosphère. La pression au niveau du sol, conforme aux résultats spectroscopiques, est très basse ; elle atteint difficilement le dixième de la pression au sol sur la Terre, très probablement inférieure à 10 millibars. Il faut se rappeler qu'il n'y a que quelques années, on estimait que la pression était au moins de 85 millibars. Une telle différence est importante, car une pression de 10 millibars correspond à une altitude terrestre qui n'est pas inférieure à 30 km, tandis que la pression de 85 millibars se rapportait à celle de la tropopause tropicale terrestre vers 17 km.

Les mesures de température du sol martien indiquent que la température varie considérablement ; elle dépasse 0°C à l'équateur à midi, mais tombe à -80°C au cours de la nuit. Dans les régions polaires, on observe des températures suffisamment basses pour expliquer la présence de calottes polaires dues au CO_2 solide.

Par suite de la présence permanente d'une couche nuageuse, l'atmosphère inférieure de Vénus n'a jamais été observée directement. Ce sont les procédés de la radio-astronomie qui ont permis de révéler que le sol de Vénus était à une température très élevée et que la troposphère de Vénus devait être soumise à un effet de serre. Tout d'abord les observations dans le domaine infrarouge de quelques microns indiquent des températures de l'ordre de 250°K , comme d'ailleurs l'ensemble des mesures très précises des températures dans les bandes de CO_2 qui donne $240 \pm 10^\circ\text{K}$; ces données se rapportent au voisinage de la couche nuageuse située vers 60 km, tandis que

les observations dans le domaine centimétrique permettent de pénétrer au sein de la troposphère et que celles dans le domaine décimétrique permettent d'atteindre le sol. Après quelques années d'observations, on est arrivé à la conclusion que les ondes de 1 à 2 cm sont émises au sein de couches atmosphériques qui n'ont pas de contact avec le sol. A 3 cm, près de 90% de l'émission peuvent être attribués à l'atmosphère, tandis qu'à 10 cm presque la moitié de la radiation émise provient encore de l'atmosphère. On constate ainsi une augmentation de la température avec l'augmentation de la longueur d'onde pour atteindre des valeurs de plusieurs centaines de degrés au niveau du sol.

Lorsque la méthode d'occultation est utilisée pour le sondage de Vénus, la réfractivité est telle qu'on ne peut pénétrer très profondément dans la troposphère. Mais elle permet une analyse de la structure de l'atmosphère vénusienne au voisinage de la tropopause en indiquant que le minimum de température est de l'ordre de 250°K aux environs de 60 km et que la température augmente de 9° à 10° par km vers le bas. En extrapolant jusqu'au niveau du sol, on arrive à une température de l'ordre de 800°K. C'est ce résultat que fournissent également les mesures directes effectuées par les sondes russes entre 50 km et 20 km ; par extrapolation adiabatique jusqu'au niveau du sol, on obtient 800°K.

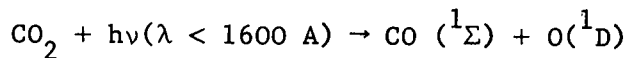
L'ensemble de ces diverses mesures indique, en fin de compte, que la température au niveau du sol de Vénus est de l'ordre de 500°C et que la pression correspondante est de l'ordre de 100 atmosphères. De telles données sont explicables par un effet de serre où l'anhydride carbonique est le constituant à 100% de la troposphère vénusienne à condition d'introduire une quantité de vapeur d'eau comprise entre 0,1 et 1%. La grande quantité de CO₂ absorbant dans l'infrarouge n'est pas suffisante pour l'absorption requise pour l'effet de serre ; quelques fenêtres subsistent que la vapeur d'eau peut occuper utilement en vue de restreindre au minimum le refroidissement de la basse atmosphère de Vénus par émission infrarouge.

Il en résulte donc que l'étude de l'atmosphère de Vénus pose d'autres problèmes que ceux de l'atmosphère de Mars. D'ailleurs, le fait que le jour martien ne diffère pas du jour terrestre permet de ramener beaucoup de problèmes des hautes atmosphères de la Terre et de Mars à des conditions identiques si on tient compte de la distance des planètes au Soleil et de la durée différente des saisons. Dans le cas de Vénus, alors que l'année sidérale est d'environ 224 jours, le jour de Vénus est de 116,8 jours terrestres ; il faut donc analyser les conditions physiques en tenant compte que la nuit ou la journée de Vénus atteint 1.400 heures.

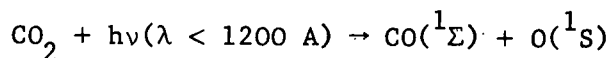
Enfin, il faut admettre que si l'étude des atmosphères inférieures des planètes fournit des indications sur les principaux phénomènes physiques, elle ne fixe pas toutes les conditions nécessaires à l'étude des atmosphères supérieures. Par exemple, la vapeur d'eau dans la troposphère terrestre est nettement plus abondante que dans la stratosphère où sa proportion par volume ne peut être que légèrement supérieure à 3×10^{-6} . Il semble qu'il en soit de même dans l'atmosphère de Vénus où la proportion requise dans la troposphère ($\geq 10^{-3}$) est nettement supérieure à celle que l'on observe par les études spectroscopiques à grande dispersion. Il semble, en effet, que la quantité de vapeur d'eau au-dessus de la couche nuageuse (au-dessus de la tropopause) soit variable ; dans certains cas, le spectrographe ne détecte même pas de vapeur d'eau. Toutefois la spectroscopie fournit d'autres données au même niveau ; c'est la présence dans les atmosphères supérieures de Vénus et de Mars de l'oxyde de carbone, CO, composé auquel on doit s'attendre lorsque CO_2 est soumis à la photodissociation. Cependant, la proportion de CO par rapport au CO_2 est seulement de 4×10^{-5} sur Vénus alors que des molécules inattendues comme l'acide chlorhydrique (HCl) atteignent déjà un rapport 6×10^{-7} c'est-à-dire une proportion identique à celle de l'hydrogène moléculaire par rapport à l'azote et l'oxygène dans l'atmosphère terrestre.

Jusqu'à présent, les atmosphères supérieures de Vénus et de Mars ont été analysées d'abord par la méthode d'occultation d'ondes radioélectriques

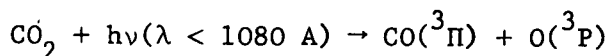
dans la bande décimétrique lorsque la station spatiale est masquée à la Terre par l'atmosphère ionisée de la planète. On obtient ainsi une distribution verticale de la concentration électronique. On trouve une ionosphère de jour sur Mars comme sur Vénus, avec la particularité suivante qu'elle disparaît pratiquement au-dessus de 500 km. Un tel résultat doit s'interpréter par l'absence d'un champ magnétique planétaire permanent qui devrait protéger l'ionosphère du vent solaire. Quant à l'ionosphère nocturne de Vénus, elle s'étend au moins jusqu'à 1.500 km alors que la nuit est de plus de 1.000 heures. Il faut donc recourir à des transports d'ions formés dans l'hémisphère éclairé. Ces ions doivent, au surplus, avoir la possibilité de survivre un temps suffisant à la recombinaison. On peut avoir une première idée de cette structure ionosphérique en se basant sur des résultats spectroscopiques obtenus récemment lors de l'observation du spectre d'émission de l'atmosphère de Mars. L'analyse de l'école de Boulder (Barth) indique la présence simultanée des bandes de CO_2^+ , de CO et des raies de l'oxygène atomique alors qu'aucune radiation de l'azote moléculaire ou atomique n'est observée. Sous l'effet du rayonnement ultraviolet solaire, la molécule CO_2 est d'abord photodissociée



où $\text{CO} (^1\Sigma)$ est l'état normal de l'oxyde de carbone et $\text{O} (^1\text{D})$ l'état excité de l'atome d'oxygène donnant lieu à la raie rouge à λ 6300 Å, et

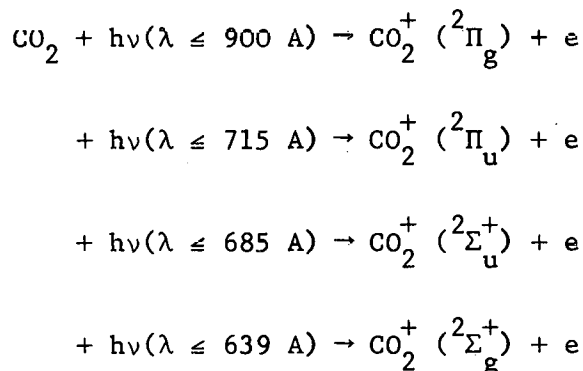


où $\text{O} (^1\text{S})$ est l'état excité de l'atome d'oxygène donnant lieu à la raie verte à λ 5577 Å et la raie ultraviolette λ 2972 Å qui est d'ailleurs observée. Une autre photodissociation apparaît,



donnant lieu à la molécule $\text{CO}(^3\Pi)$ excitée qui produit par la transition vers l'état normal $\text{CO}(^1\Sigma)$ les bandes de Cameron qui sont bien observées dans le spectre.

Enfin, la photo-ionisation apparaît sous l'effet du rayonnement des longueurs d'onde inférieures à 900 Å. Les différents processus sont les suivants

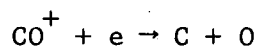
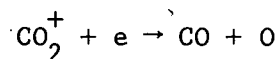


A partir des niveaux excités $^2\Pi_u$ et $^2\Sigma_u^+$ des émissions apparaissent par le retour de la molécule vers son état normal $^2\Pi_g$. Ce sont des bandes situées respectivement entre 3000 et 4000 Å et vers 2890 Å qui sont observées avec grande intensité dans le spectre de Mars. Ainsi, on a une idée des processus de départ dans la formation de l'ionosphère de Mars et également de Vénus. Cependant, l'exemple de l'atmosphère terrestre démontre qu'il ne faut pas se fier à certaines apparences. Rappelons d'abord que l'oxyde d'azote NO et son ion NO^+ jouent un rôle considérable dans le concept ionosphérique terrestre alors que le rôle minoritaire de NO est reconnu. Ensuite, on doit se référer au cas de l'hélium et de l'hydrogène dont les rôles sont extrêmement importants alors que leurs proportions dans l'homosphère terrestre ne sont que de l'ordre du millionième. En fait, l'hydrogène atomique - par l'observation de sa raie fondamentale Lyman- α à λ 1215,7 Å - a été observée dans la couronne de Mars et de Vénus. L'hélium dont l'observation ne peut se faire par des moyens optiques que dans l'ultra-violet lointain - λ 584 Å ou λ 304 Å - n'a pu être détecté. Rappelons encore que sa concentration est d'abord fonction de sa production radioactive dans

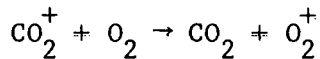
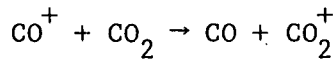
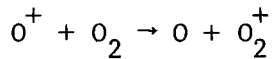
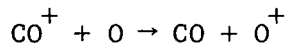
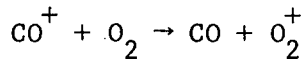
le sol, c'est-à-dire de la désintégration de l'uranium et du thorium de Mars et de Vénus ; elle dépendra donc de la constitution interne de ces deux planètes.

Quant à l'oxygène atomique dont la mesure peut se faire dans l'ultraviolet par ses raies de résonance vers 1300 Å, il joue un rôle fondamental. Il intervient dans la formation de la molécule O_2 dont les propriétés absorbantes sont très importantes surtout lorsqu'elles sont associées à celles de l'ozone (O_3). Le problème de la chémosphère de Vénus et de Mars est lié aux conditions d'équilibre photochimique $CO_2 - CO - O - O_2 - O_3$ et des conditions de transport par diffusions moléculaire et turbulente. Jusqu'à présent, de nombreuses questions sont posées en vue de déterminer les conditions aéronomiques d'une atmosphère où le constituant principal est l'anhydride carbonique.

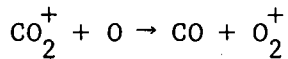
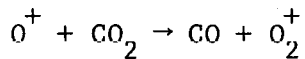
Dans le cas des conditions ionosphériques, il faut également souligner que les réactions ioniques dépendent beaucoup de la valeur des concentrations de l'oxygène moléculaire et atomique. Au sein d'une atmosphère où les ions produits sont CO_2^+ et CO^+ , les conditions aéronomiques basées sur la présence de l'oxygène moléculaire et atomique, conduisent invariablement à la création de l'ion moléculaire d'oxygène O_2^+ comme ion principal. En effet, aux recombinaisons dissociatives



s'opposent les réactions de transferts de charge



et des réactions d'échanges d'ions et d'atomes



Toutes ces réactions conduisant à la production de O_2^+ , il est donc probable que l'ion moléculaire d'oxygène est l'ion principal dans la partie principale de l'ionosphère de Vénus et de Mars. L'extension vers les hautes altitudes doit, probablement comme dans l'atmosphère terrestre, être recherchée à l'aide d'ions plus légers comme O^+ , He^+ et finalement H^+ . Néanmoins, l'absence de champ magnétique conduit à considérer le problème de l'exosphère ionique sous une forme tout à fait différente de celle de l'atmosphère terrestre où la magnétosphère jouait un rôle essentiel. D'ailleurs, l'exosphère neutre se pose sous une autre forme également, car les températures au sommet de la thermosphère de Vénus et de Mars n'atteignent peut-être pas 500°K ; en tout cas, les températures sont inférieures à celles de l'exosphère terrestre par suite de l'émission infrarouge de CO_2 et CO . En conséquence, il faut attendre de nouvelles observations. Ce doit être l'objet des recherches non seulement de nouvelles sondes spatiales mais également de satellites.

9. VERS D'AUTRES PROBLEMES

On ne peut dans un court article être complet et d'importants aspects sont négligés ; ceux que nous avons signalés ont été glanés parmi la multitude des données d'observations accumulées et des résultats théoriques qui se sont succédés au cours des années. Des observations exactes ont conduit à des théories fausses comme des observations inexactes ont suggéré des théories correctes. C'est d'ailleurs la combinaison de toutes ces incertitudes recouvrant les réalités physiques qui a créé cet esprit des mystères de la nature auquel la Société belge d'Astronomie, de Météorologie et de Physique du Globe s'attache depuis 75 ans. Certains verront à l'occasion de son centenaire si l'évolution qui va s'accomplir pourra laisser subsister quelques unes des idées exprimées aujourd'hui.

En attendant il convient de se préparer à des tâches qui incombent normalement aux scientifiques européens. Il faut rechercher de meilleures conditions d'observation de l'atmosphère de Vénus en utilisant un satellite porteur d'instruments qui pourrait tourner autour de cette planète comme le font déjà des satellites autour de la Terre et pourra le faire bientôt un satellite autour de Mars. De même il s'agit de continuer la prospection de l'atmosphère terrestre afin d'apporter les éléments de recherche que ne peuvent apporter les laboratoires terrestres par suite de la limite de leurs dimensions. C'est un des buts de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique de travailler dans le cadre de ses moyens budgétaires en vue de faire progresser un domaine de la connaissance dont les limites ne sont pas fixées.

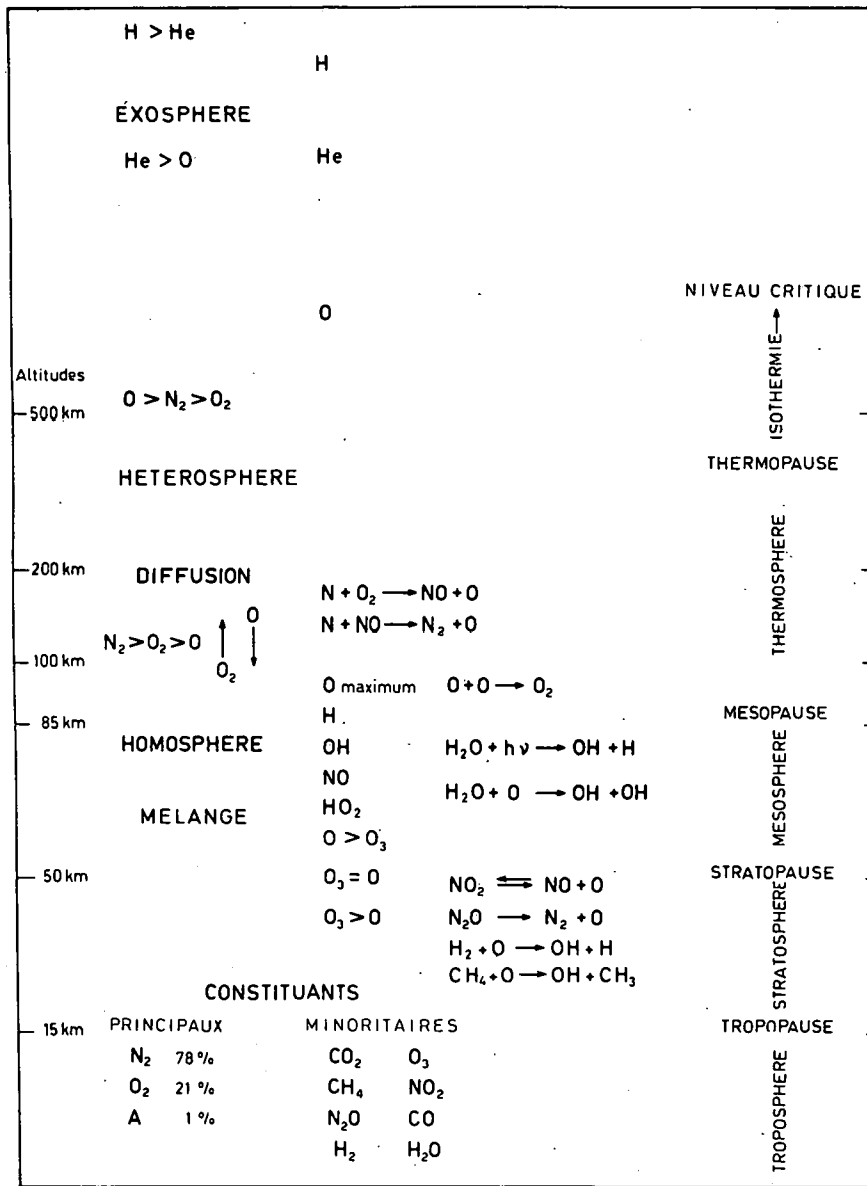


Fig. 1.- Toute atmosphère planétaire est divisée en trois régions principales: l'homosphère où les constituants principaux sont dans les mêmes proportions (mélange), l'hétérosphère où les constituants sont distribués verticalement suivant la loi de la diffusion des gaz dans le champ de la pesanteur et l'exosphère où chaque constituant suit sa trajectoire propre sans effet de collision. L'homosphère est constituée de trois régions: la troposphère, la stratosphère et la mésosphère où les gradients de température sont différents.

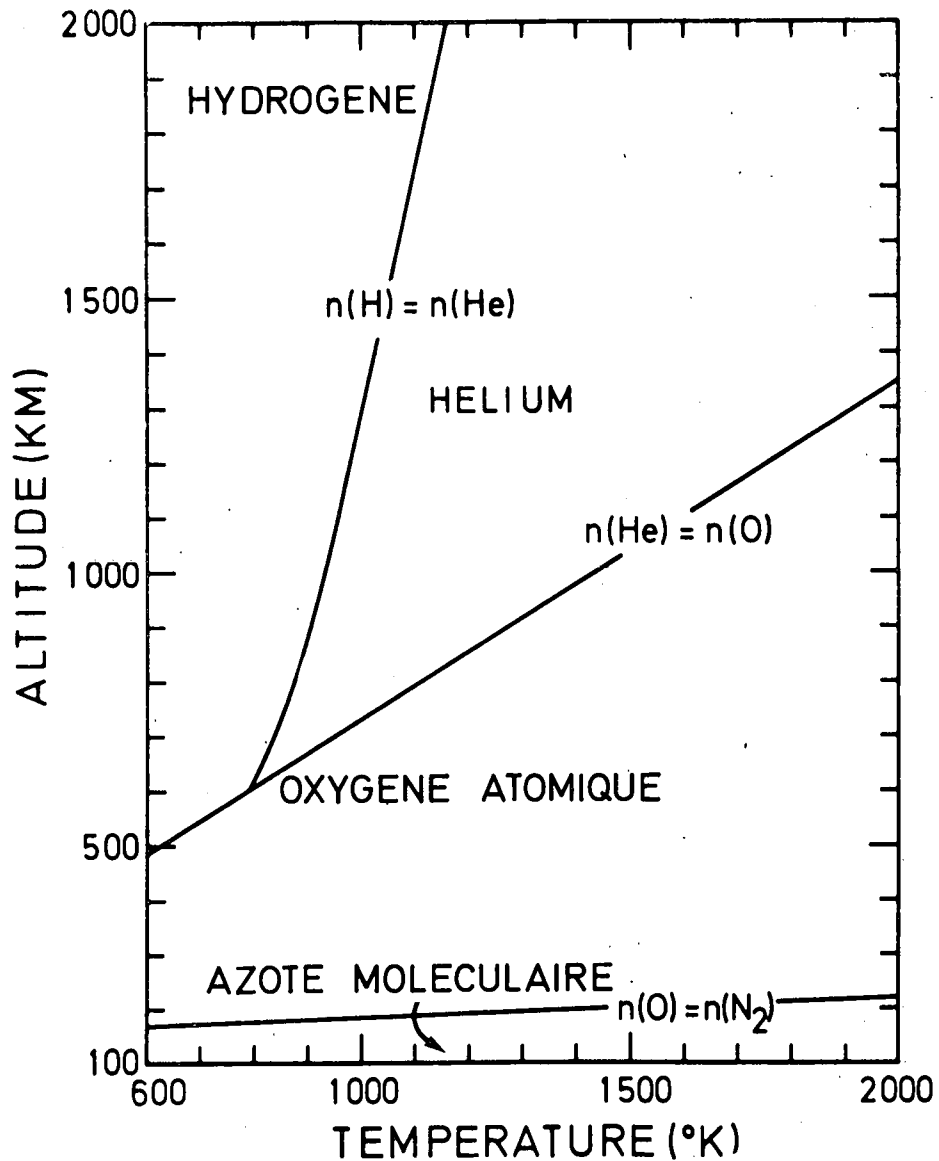


Fig. 2.- Ceintures d'oxygène atomique, d'hélium et d'hydrogène atomique. Les ceintures ont une ampleur fixée par la température. La ceinture d'hélium se manifeste le mieux au maximum d'activité solaire lorsque la température est la plus élevée. L'hydrogène atomique, au contraire, marque son importance lorsque la température est la plus basse. Les lignes de séparation correspondent à des concentrations identiques ; par exemple, $n(He) = n(O)$, concentrations identiques d'hélium et d'oxygène atomique.

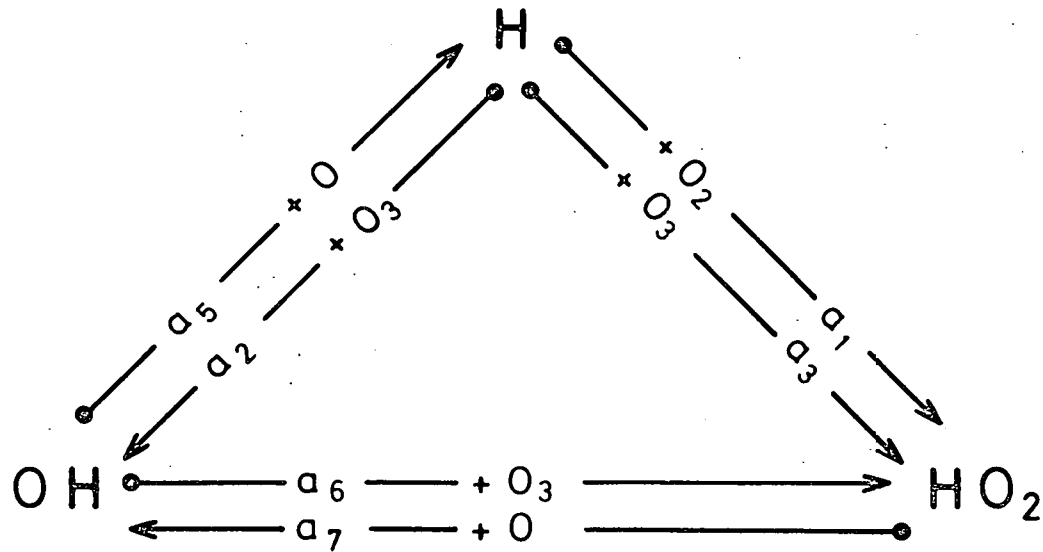


Fig. 3.- Schéma des réactions principales entre l'hydrogène atomique H, le radical OH et la molécule HO₂ dans l'oxygène moléculaire O₂ et atomique O avec l'ozone O₃. Dans la mésosphère supérieure, l'hydrogène atomique H l'emporte tandis que dans la stratosphère, H est négligeable vis-à-vis de OH et HO₂.

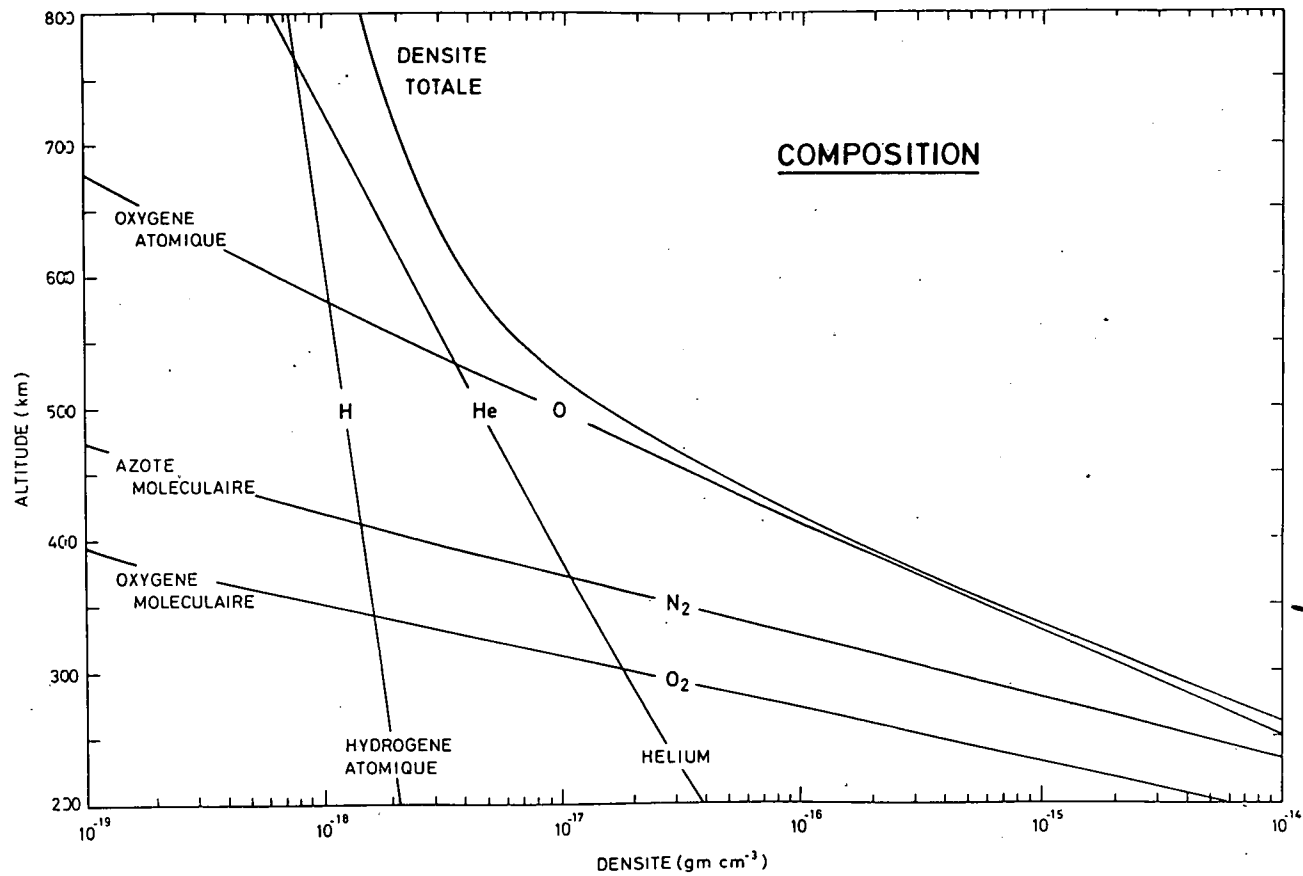


Fig. 4.- Densité en grammes par cm³ des différents constituants de l'hétérosphère terrestre au-dessus de 200 km au cours du minimum d'activité solaire. La température de la thermopause est de 600°K. On voit comment l'hélium et l'hydrogène deviennent, sous l'effet de la diffusion dans le champ de la pesanteur, des éléments les plus abondants au-delà de 500 km alors qu'à 200 km, ils sont encore des constituants minoritaires.

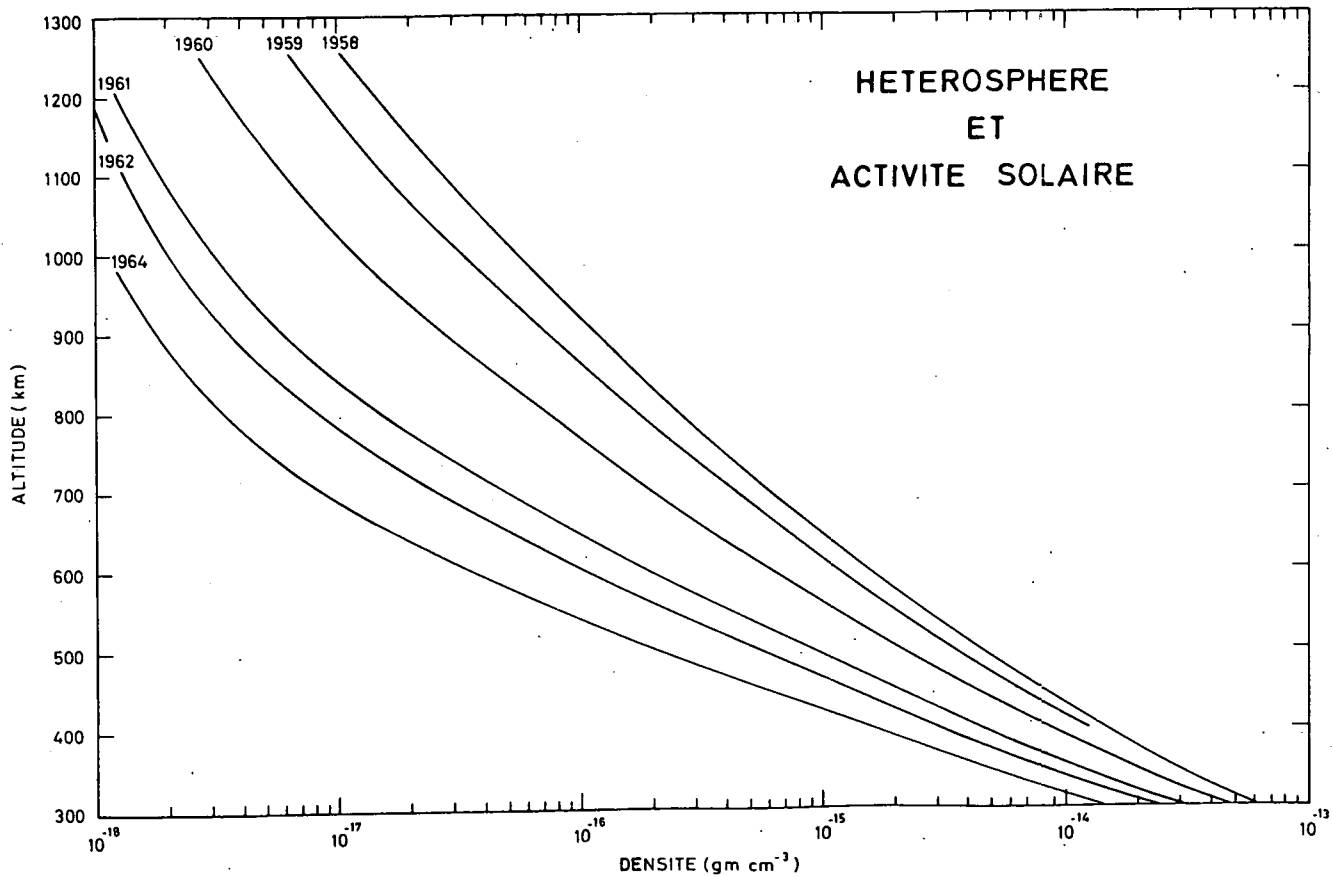


Fig. 5.- La densité de l'atmosphère supérieure (hétérosphère) varie fortement au cours d'un cycle d'activité solaire particulièrement au-dessus de 300 km. Les courbes de la moyenne annuelle de la densité de 1958 à 1964 montrent bien qu'à une altitude de l'ordre de 1.000 km la densité a atteint en 1958 (maximum d'activité solaire) 50 fois la valeur observée en 1964 (minimum d'activité solaire).

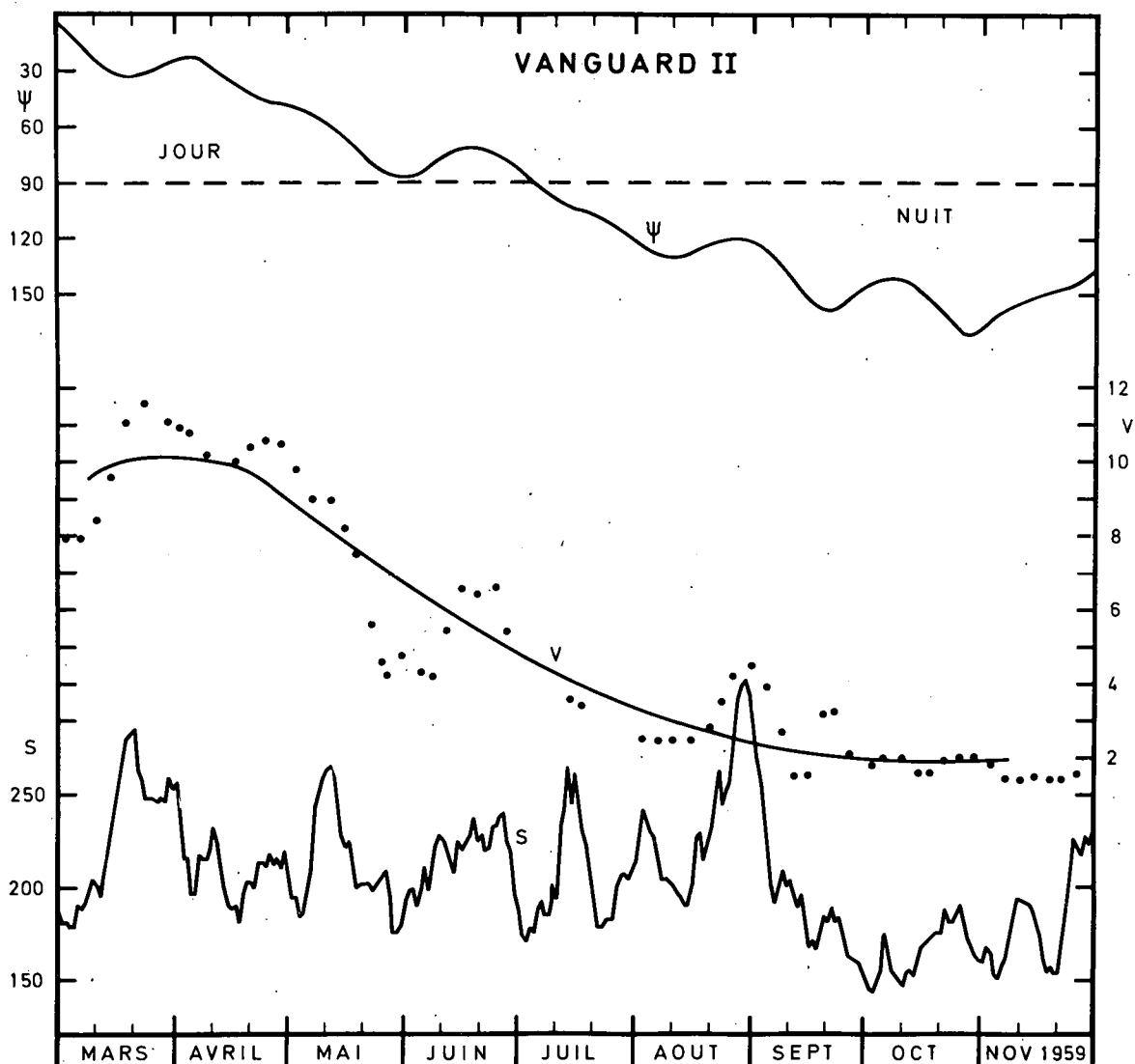


Fig. 6.- Variation de la période de révolution autour de la Terre du satellite artificiel VANGUARD II, avec périégée à 560 km, de mars à novembre 1959; cette variation correspond à des variations de la densité de l'atmosphère à cette altitude. Les points représentent les observations de la variation de la période dont une valeur moyenne est donnée par la courbe (V). Dans la partie supérieure, on a indiqué l'angle (ψ) du Soleil montrant que le périégée du satellite est dans la partie éclairée (Jour) ou dans la partie non éclairée (Nuit) de l'hétérosphère. Les fluctuations que l'on décèle dans les valeurs de la période (points par rapport à la courbe V) sont bien associées avec les fluctuations de l'activité solaire (courbe inférieure S) représentée par le flux radioélectrique à 10 cm.

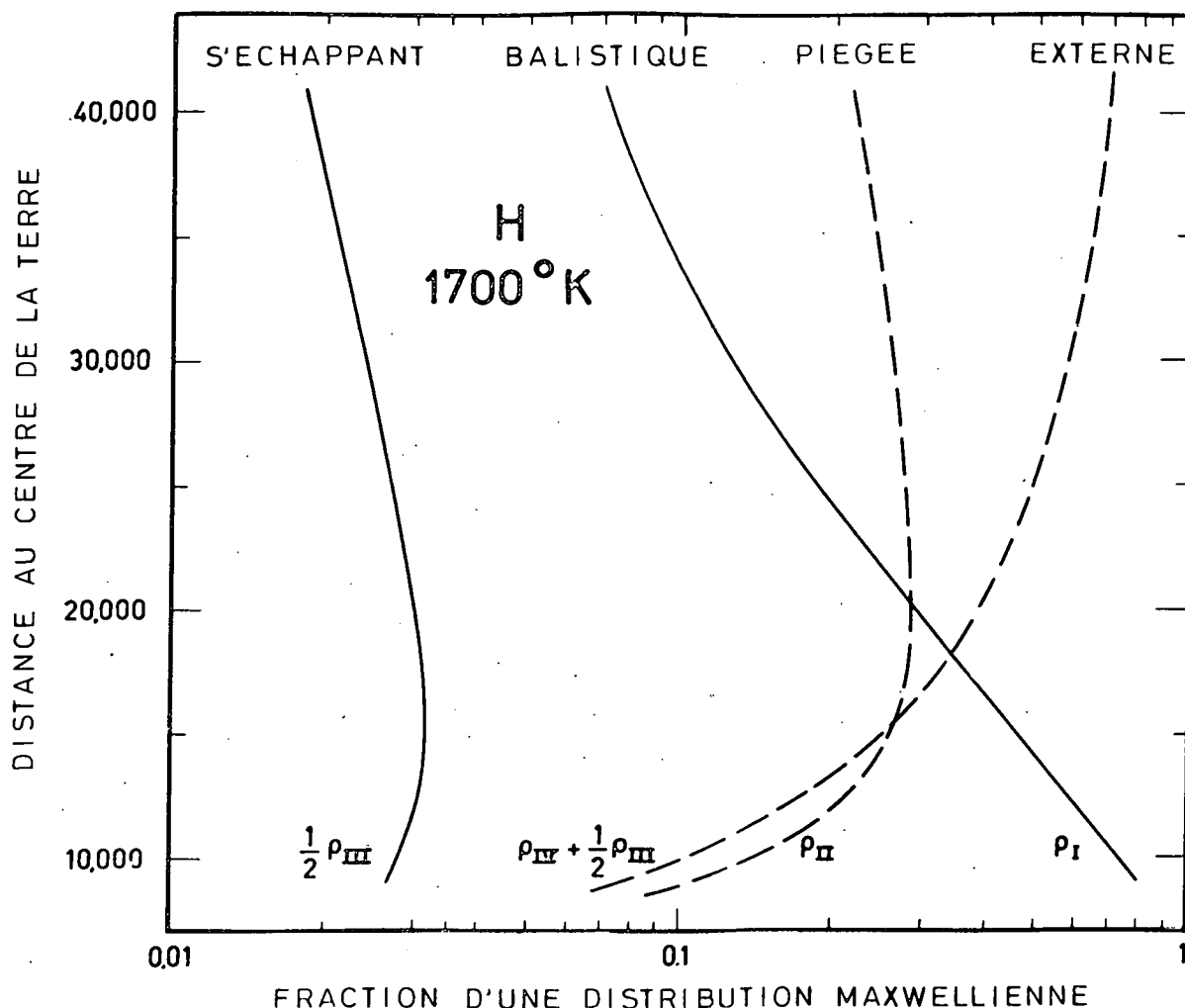


Fig. 7.- Distribution exosphérique des divers composants d'une distribution maxwellienne de l'hydrogène à 1700°K. On note que la composante balistique est la plus importante jusqu'au-delà de 10.000 km. Les composantes de particules piégées (trajectoires satellites) et externes (trajectoires hyperboliques) prendraient toute leur importance à partir de 20.000 km si elles existaient. Quant à la fraction d'atomes s'échappant, elle reste pratiquement constante.

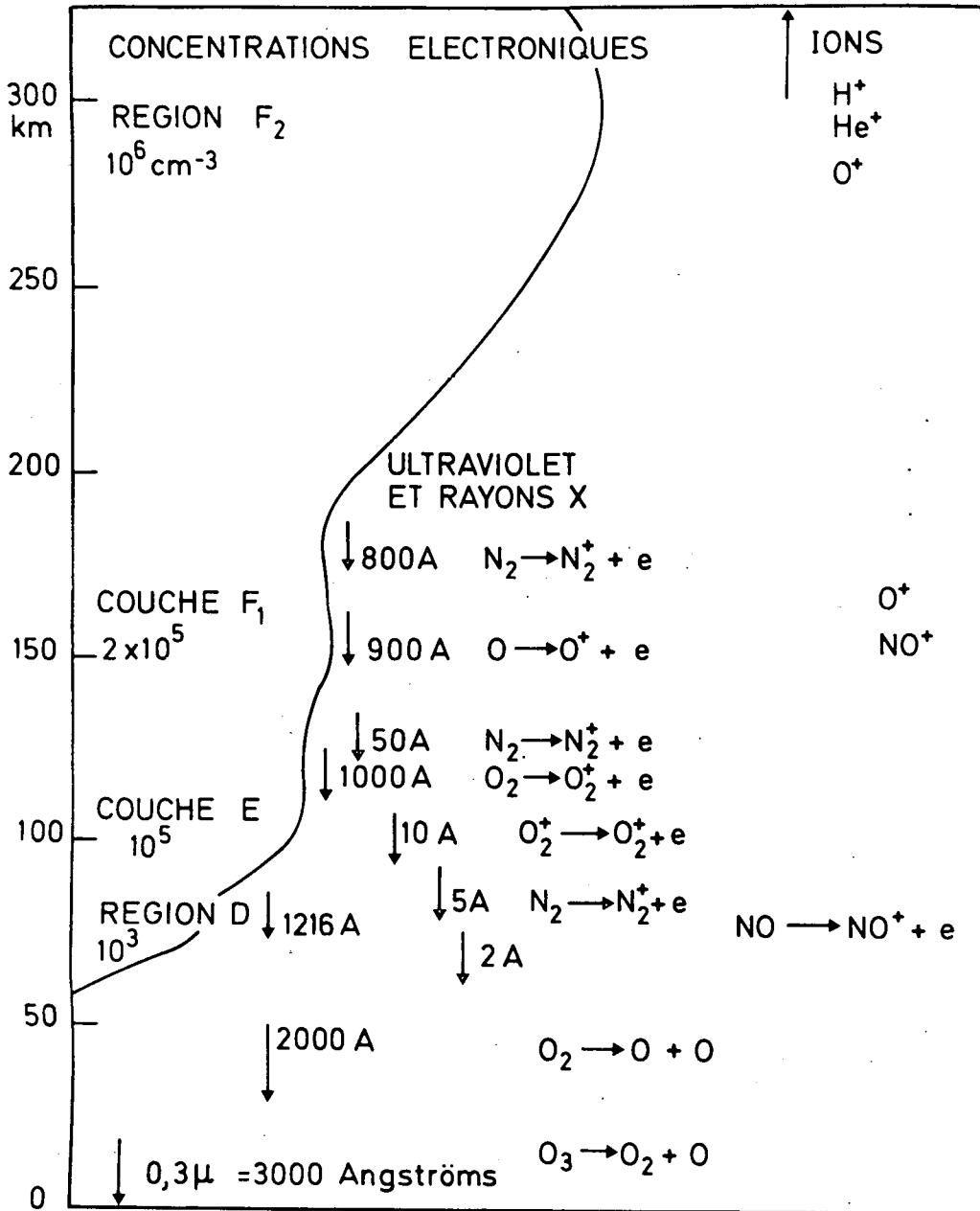


Fig. 8.- L'ionosphère est représentée par 3 régions : la région D avec une concentration d'électrons ne dépassant pas 1.000 par cm³, la couche E avec une concentration maximum de l'ordre de 100.000 par cm³ et la région F avec sa couche F₁ de 200.000 électrons par cm³ et la région F₂ pouvant atteindre à son maximum 1 million d'électrons par cm³. La pénétration de la radiation solaire est indiquée par des flèches indiquant à peu près le maximum d'absorption. La production de dissociation ou d'ionisation est également mentionnée en même temps que les principaux ions résultants.

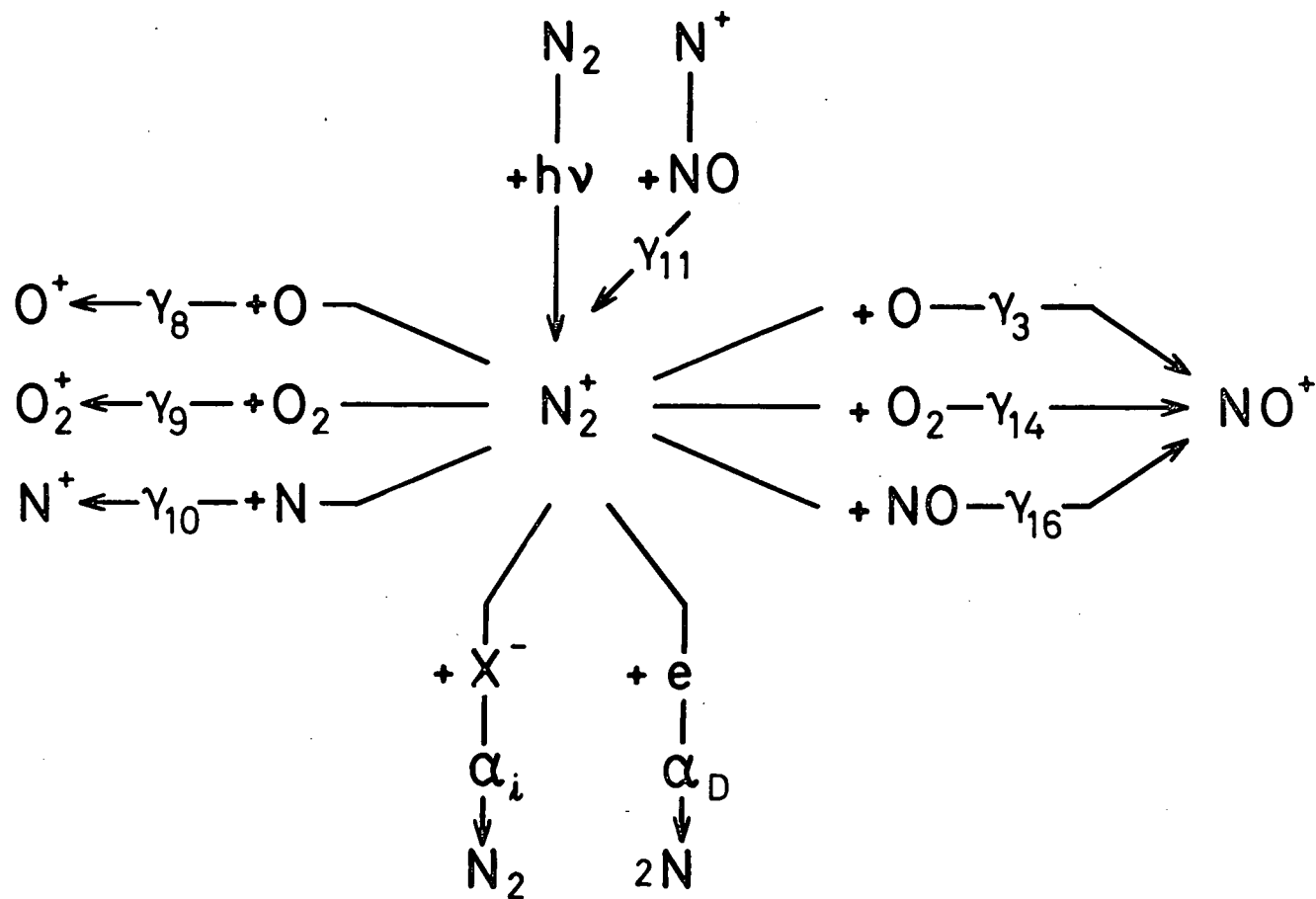


Fig. 9.- Schéma des réactions de l'ion d'azote moléculaire. La recombinaison par effet d'ion négatif ($+X^-$) est négligeable tandis que la recombinaison dissociative avec électron ($+e$) n'intervient effectivement qu'aux hautes altitudes où O et O_2 n'ont qu'un rôle secondaire. Au sein de l'ionosphère inférieure la réaction N_2^+ et O_2 donnant O_2^+ est l'unique réaction et dans l'ionosphère moyenne la réaction N_2^+ + O donnant NO^+ + N est extrêmement importante. Celle-ci produit d'ailleurs l'ion NO^+ et l'atome N .

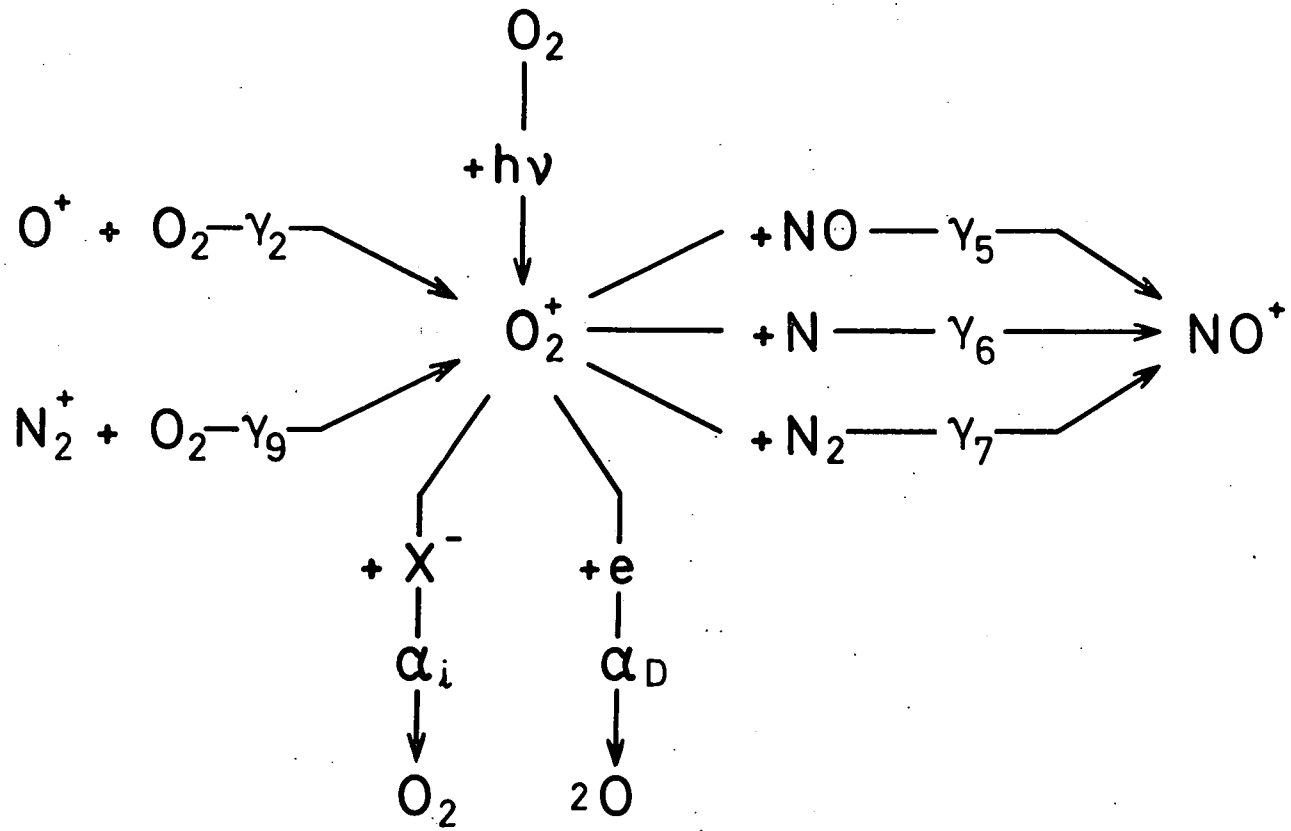


Fig. 10.- Schéma des réactions de l'ion moléculaire d'oxygène. A la production de O_2^+ par photo-ionisation, il faut ajouter les réactions avec O^+ et N_2^+ de l'oxygène moléculaire. La disparition de l'ion O_2^+ résulte essentiellement de la recombinaison.

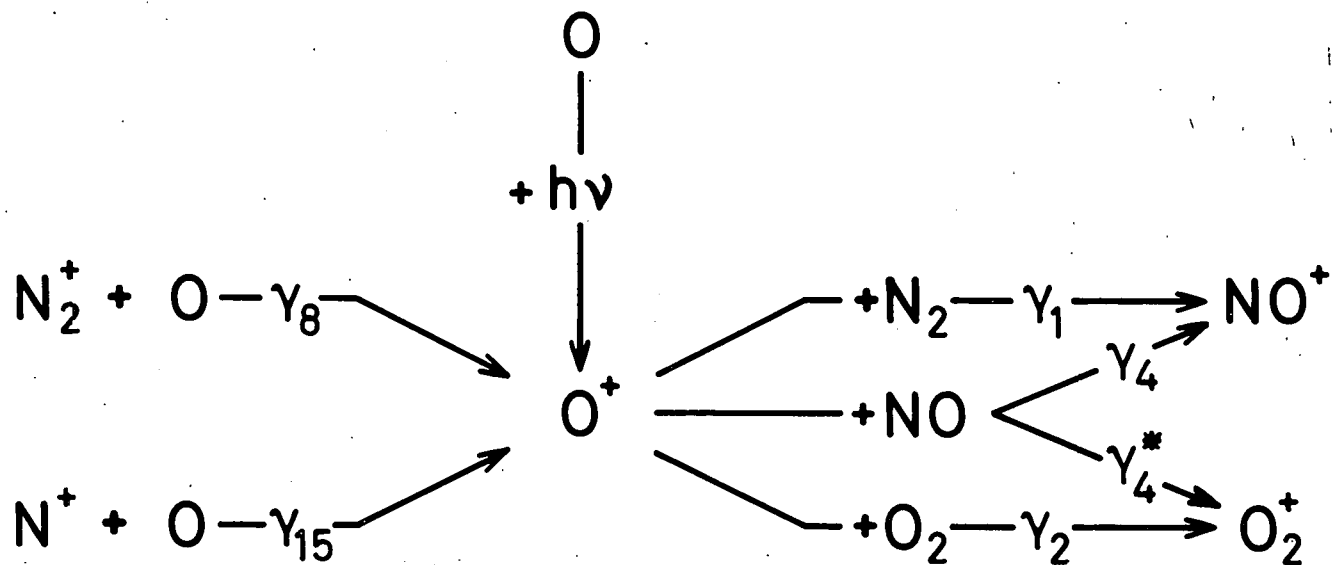


Fig. 11.- Schéma des réactions de l'ion atomique d'oxygène. A la production de O^+ par photo-ionisation, on ajoute la réaction de l'oxygène atomique avec l'ion moléculaire d'azote N_2^+ . La disparition de l'ion O^+ a lieu par transformation en NO^+ ou O_2^+ respectivement par réaction avec l'azote moléculaire N_2 et l'oxygène moléculaire O_2 .

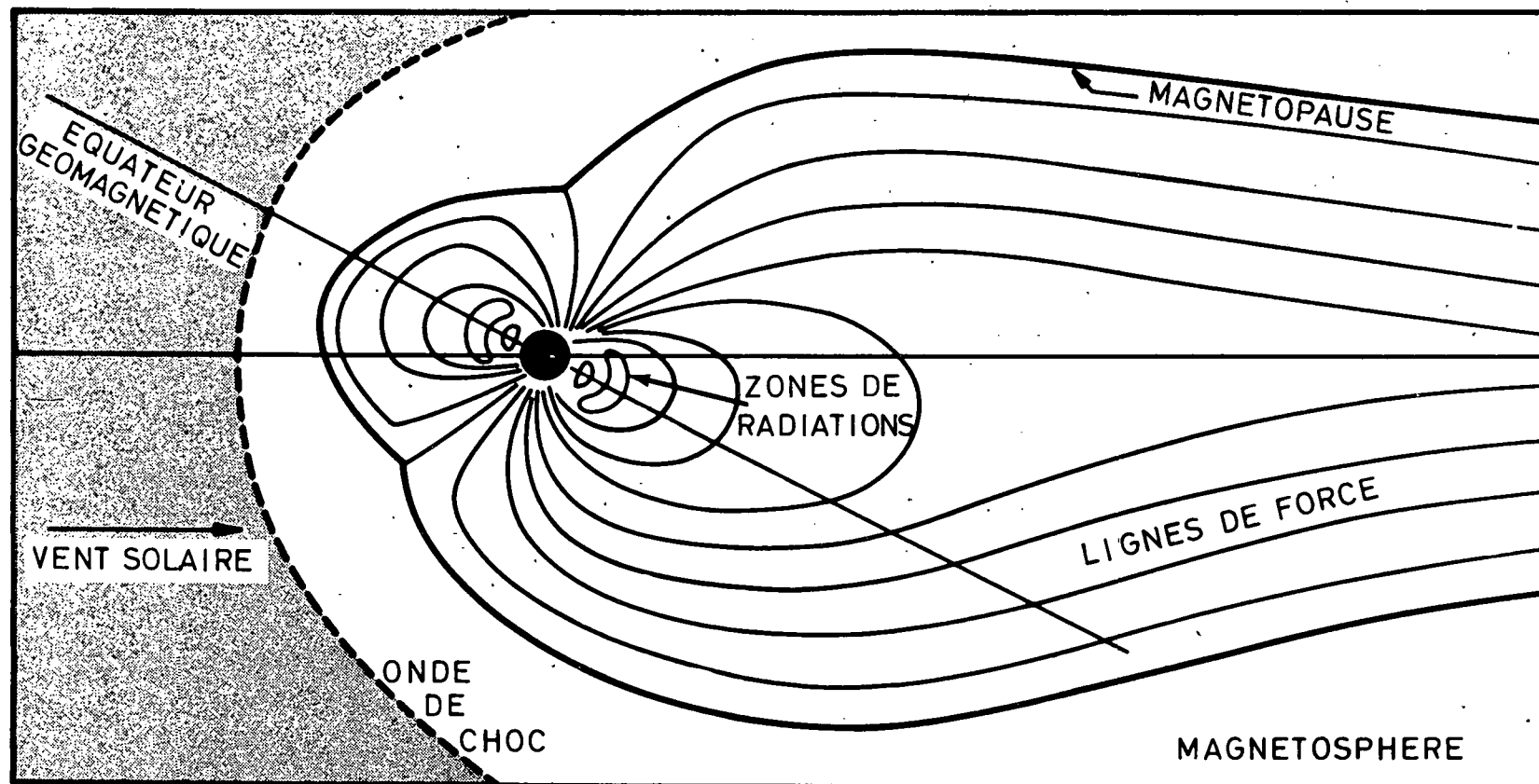


Fig. 12.- La configuration du champ magnétique général de la Terre est continuellement déformée sous l'effet du vent solaire, c'est-à-dire des particules émises par le Soleil. Les lignes de force sont comprimées du côté du Soleil et sont étendues du côté opposé. Des particules (protons et électrons) sont piégées dans le domaine des lignes de force fermées. Le champ magnétique étant ouvert dans les régions polaires du côté opposé au Soleil permet l'échappement. Le cercle noir représente le globe terrestre.

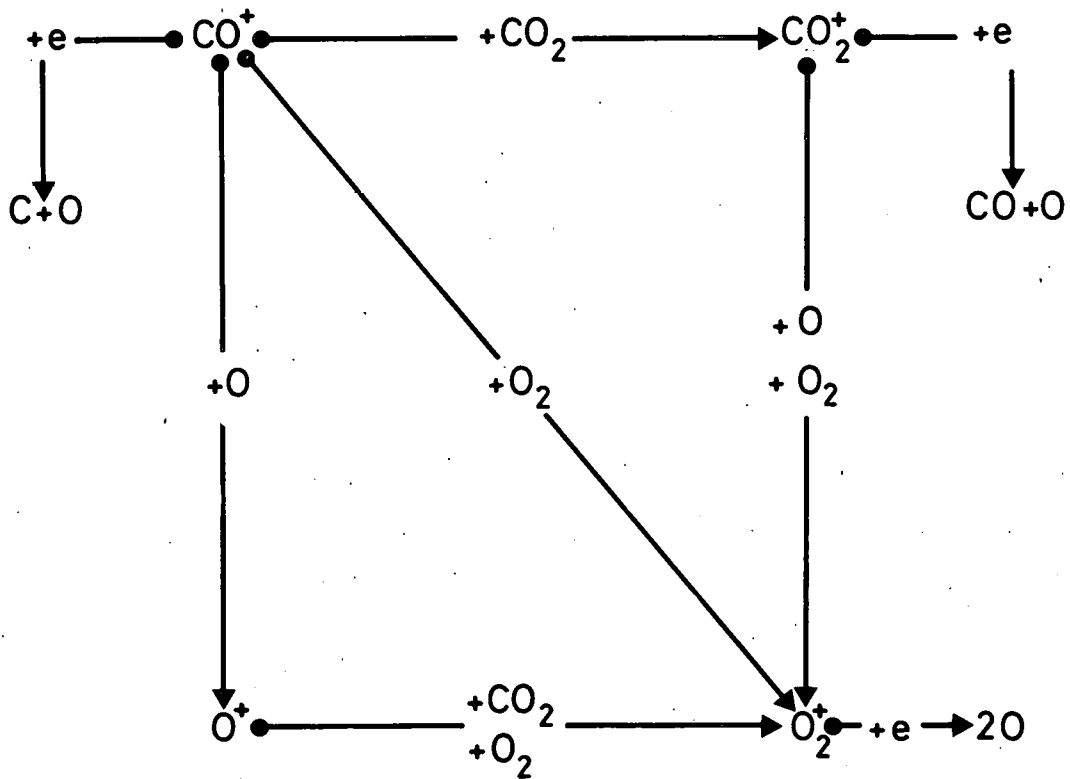


Fig. 13.- Dans une atmosphère constituée presque exclusivement d'anhydride carbonique (CO_2), les réactions des ions CO^+ et CO_2^+ conduisent très rapidement à une ionosphère constituée d'ions d'oxygène moléculaire (O_2^+) même si l'oxygène atomique ou moléculaire est un constituant minoritaire car les réactions sont extrêmement rapides.