

La découverte spatiale de l'atmosphère et de l'environnement de la Terre

par Jacques VERCHEVAL,
Institut d'Aéronomie spatiale de Belgique

DEPUIS le 4 octobre 1957, jour de lancement du premier satellite artificiel *Sputnik 1*, nous n'avons cessé d'être les témoins de missions spatiales automatiques et habitées particulièrement remarquables. Les vols d'exploration interplanétaire ou planétaire ont été autant de prouesses techniques qui ont permis d'accumuler une moisson considérable d'informations souvent inédites sur le milieu interplanétaire et les planètes Mars et Vénus. Lorsqu'il s'agit de la Lune, le chemin parcouru semble plus spectaculaire encore puisqu'il s'est écoulé dix ans entre les premières photographies de la face cachée retransmises par *Luna 3* et les premiers pas de l'homme sur la Lune, le 21 juillet 1969, par l'équipage d'*Apollo 11*. Sur un autre plan, les applications par satellites sont déjà nombreuses et plus particulièrement dans les domaines de la météorologie, la navigation et les

télécommunications; chacun, à des degrés divers, a pu apprécier l'aspect utilitaire de ces applications spatiales vouées à un développement sans cesse croissant.

Ces missions d'application ou d'exploration lunaire et planétaire suscitent l'attention, voire l'admiration de tous par leur côté tantôt spectaculaire, tantôt profondément humain, ou simplement parce qu'elles apportent dans la vie de tous les jours des satisfactions immédiates qui sont ressenties directement par chacun de nous. Il faut constater, par contre, le désintéressement quasi général à l'endroit de l'ensemble des missions scientifiques d'investigation terrestre, ces dernières n'ayant pas la faculté de séduction de celles-là. Cette réaction, il faut la déplorer à double titre. En premier lieu, c'est sous l'impulsion de l'Année géophysique internationale 1957-1958, dont le professeur Nicolet, directeur de l'Institut d'Aéronomie spatiale de

Belgique, assurait la tâche de secrétaire général qu'a été accompli, en matière d'aéronautique, l'effort remarquable qui devait conduire à la satellisation du premier satellite soviétique, le 4 octobre 1957, et du premier satellite américain, le 1^{er} février 1958, deux satellites à vocation purement scientifique. D'autre part, en raison de l'abondance et de la qualité des données scientifiques recueillies jusqu'à ce jour, il n'est pas déraisonnable de parler d'une véritable découverte de la Terre grâce à l'Aéronautique.

Vouloir dresser, en quelques pages, un bilan des progrès scientifiques accomplis depuis les débuts de l'ère spatiale dans le domaine très vaste de l'étude de notre planète est une gageure. C'est pourquoi, devant le grand nombre et l'extrême diversité des disciplines scientifiques concernées, nous nous bornerons, dans cet article, à décrire quelques résultats essentiels acquis dans le domaine de l'aéronomie, science dont le but fondamental est d'étudier les régions de l'atmosphère où les phénomènes de dissociation et d'ionisation sont importants.

Les moyens d'investigation

Avant 1945, l'étude de la haute atmosphère de la Terre reposait presque exclusivement sur l'analyse des résultats obtenus en exploitant les possibilités offertes par la spectrographie et la radio-électricité. Ainsi, l'analyse spectrale de la lumière émise par les aurores polaires et même de la lueur, beaucoup plus faible, du ciel nocturne permet d'identifier les atomes et les molécules responsables de ces émissions et d'obtenir par conséquent des indications sur la composition de la haute atmosphère. Lorsqu'on analyse la lumière des aurores, on y trouve les radiations caractéristiques émises par les molécules neutres et ionisées d'oxygène et d'azote à des altitudes supérieures

à 100 km, indiquant par conséquent la présence, jusqu'aux plus hautes altitudes, de molécules qu'on trouve dans l'air au niveau du sol. Les radiations dues à l'atome d'oxygène et à l'atome d'azote apparaissent également avec une intensité remarquable dans la luminescence aurorale. Enfin, on observe des radiations faibles de l'hélium et, dans quelques aurores, des émissions de l'hydrogène atomique. Cependant, ces analyses spectroscopiques ne permettent pas d'établir les proportions exactes de la concentration de ces divers constituants car les théories de la formation des aurores ne sont pas encore suffisamment élaborées pour permettre de tels calculs.

On sait par ailleurs que des signaux radioélectriques sont réfléchis par l'ionosphère, c'est-à-dire les couches ionisées de l'atmosphère. Le sondage radioélectrique sert encore actuellement à la détermination journalière des caractères de l'ionosphère. Cette méthode a permis, à l'origine, de déceler l'existence de plusieurs régions ionosphériques bien précises.

A partir de 1945, les fusées, munies d'instruments scientifiques, sont devenues la source principale des données concernant les altitudes supérieures, les résultats des mesures étant transmis au sol par télémétrie. Les spectromètres de masse et les jauges de pression ou de densité ont permis d'établir notamment que la composition atmosphérique demeure pratiquement invariable jusqu'à une centaine de kilomètres d'altitude. L'utilisation des fusées a permis de concevoir une variété de techniques destinées à préciser nos connaissances sur les conditions physiques qui règnent dans l'atmosphère supérieure. L'envoi de grenades explosives, le largage de sphères tombantes munies d'accéléromètres, la formation de nuages lumineux artificiels et la mesure de l'extinction du rayon-

nement solaire constituent autant de méthodes de sondages qui actuellement sont encore fréquemment à l'honneur. Cependant, les mesures par fusées sont rendues difficiles aux altitudes supérieures à 200 km par suite de la densité atmosphérique très faible et de la brièveté du temps disponible. Ainsi, à une altitude de 100 km déjà, la densité est de l'ordre du millionième de la densité au sol et une fusée demeurerait environ six minutes au-dessus de cette altitude si son apogée atteignait 175 km! Des inconvénients surgissent également dus à la tendance qu'ont les fusées à perdre continuellement des gaz.

En fait, il a fallu attendre l'avènement des satellites artificiels pour explorer notre atmosphère aux altitudes les plus élevées, mais à partir de 130 kilomètres déjà, sans aucune limitation dans l'espace et dans le temps. Pour les mesures de la densité, les satellites présentent un avantage certain sur les fusées, car évoluant pour plusieurs mois ou plusieurs années sur des orbites dont l'altitude du périégée varie très peu au cours du temps, une série importante de mesures de la densité ou de la composition à une altitude précise peut être obtenue et analysée. D'autre part, en aéronomie, une des méthodes les plus simples et les plus précises pour déterminer la densité de l'atmosphère entre 150 et 3.000 kilomètres consiste à analyser minutieusement le mouvement des satellites artificiels soumis au freinage du milieu qu'ils traversent. Cette technique repose essentiellement sur une poursuite précise et continue afin de mettre clairement en évidence les variations des éléments orbitaux dues aux fluctuations des conditions atmosphériques. La méthode est très convaincante d'autant plus qu'elle présente également l'avantage d'éviter des opérations difficiles et coûteuses, à savoir la mise au point et la construction d'ins-

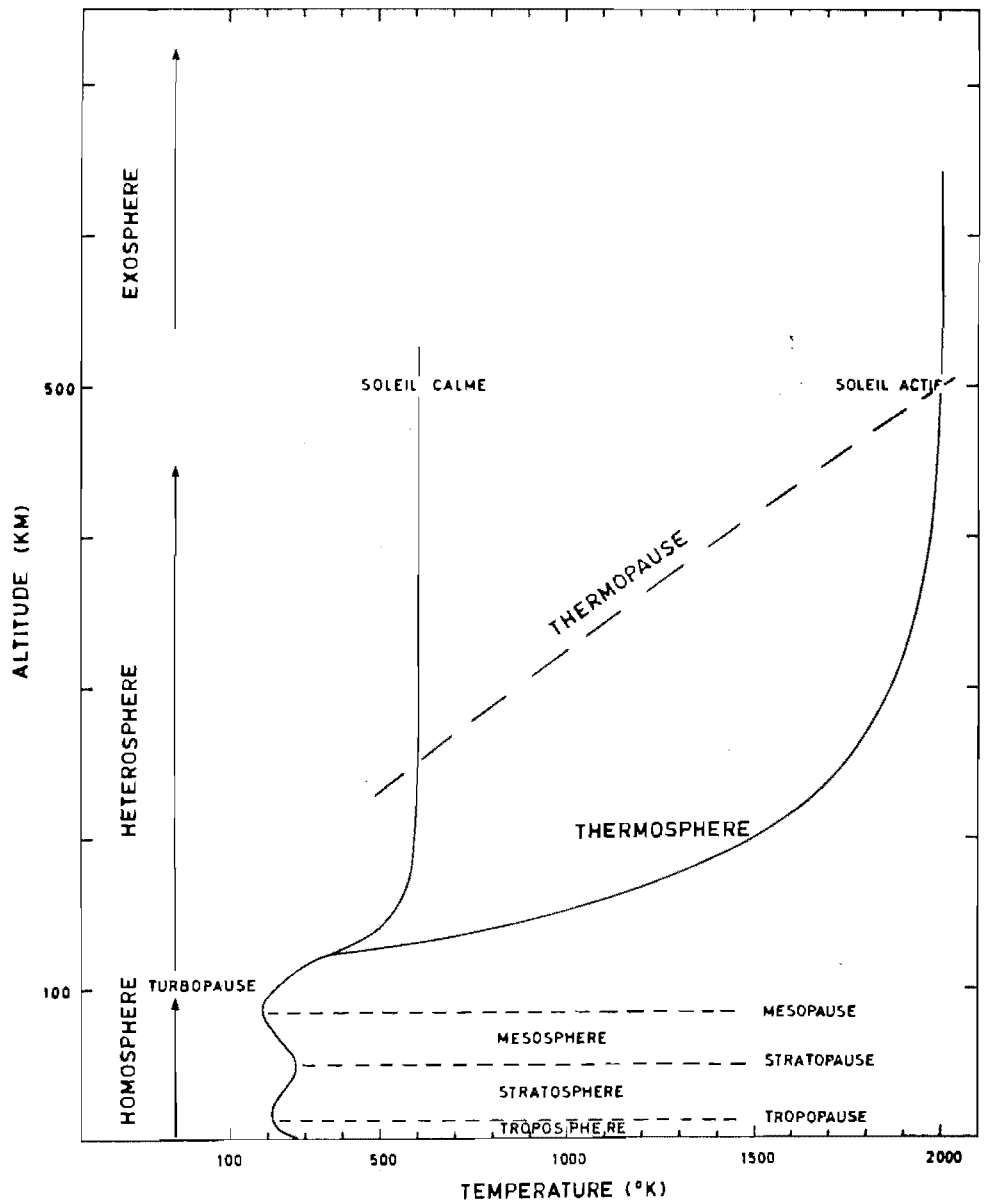
struments de mesure de la densité et des facilités nécessaires aux tests et à la calibration de ceux-ci. Enfin, cette technique de l'analyse orbitale est applicable, en principe, à tous les engins satellisés soumis à un freinage atmosphérique décelable par l'observation.

Les satellites artificiels offrent également la possibilité de préciser la structure et le comportement de l'ionosphère, soit par l'acquisition de données prélevées *in situ* par des instruments de mesure très perfectionnés, soit par la technique des sondages radioélectriques effectués cette fois par le haut.

Un autre domaine, qui a très largement profité de l'astronautique, est celui de l'étude de l'environnement terrestre défini ici comme le milieu où le champ géomagnétique devient l'élément organisateur principal. Les satellites placés sur une orbite élevée ou très excentrique et les sondes spatiales interplanétaires ont permis, grâce à un équipement adéquat essentiellement composé de magnétomètres et de détecteurs de particules dans diverses gammes d'énergie, de dresser une configuration assez précise de cet environnement.

L'hétérosphère

L'hétérosphère désigne les régions atmosphériques situées au-dessus de 100 kilomètres d'altitude (voir figure 1). Précisons que cette altitude de référence n'a pas été fixée arbitrairement. En réalité, à ce niveau, on rencontre une zone de transition appelée *turbopause* dans laquelle le brassage de l'air n'est plus suffisant pour maintenir la distribution de mélange parfait observée aux altitudes inférieures, c'est-à-dire dans l'homosphère. Les premières données acquises au moyen des fusées sondes indiquèrent, en effet, que dans la mesure où seuls les constituants principaux sont concernés, la composition volu-



1. Schéma des diverses régions atmosphériques et de leurs zones de transition qui est déterminée par la distribution verticale de la température ou par celle de la composition et de la constitution. Des variations apparaissent dans la thermosphère qui sont liées à l'activité solaire.

mique de l'air observée au niveau du sol (78 % d'azote moléculaire N_2 , 21 % d'oxygène moléculaire O_2 , 1 % d'argon) se maintient pratiquement jusqu'à une centaine de kilomètres d'altitude au travers des diverses régions atmosphériques que sont la troposphère, la stratosphère et la mésosphère. Ainsi, dans l'hétérosphère, sous l'effet du phénomène de diffusion des gaz dans le champ de la pesanteur, chaque constituant suit sa propre distri-

bution verticale plutôt que celle de l'atmosphère générale; il en résulte une variation de la masse moléculaire moyenne avec l'altitude.

Les mesures effectuées par les spectromètres de masse placés à bord des fusées ont révélé que l'atome d'oxygène à 100 km joue un rôle dans la détermination de la masse moléculaire moyenne : à côté de la masse 32 de la molécule O_2 et 28 de la molécule N_2 , il convient d'ajouter la masse 16

de l'atome d'oxygène O. Ainsi apparaît une diminution de la masse moléculaire moyenne, due essentiellement à la photodissociation de la molécule d'oxygène sous l'influence du rayonnement solaire ultraviolet de longueurs d'onde inférieures à 1750 Å.

Aux altitudes supérieures, c'est l'analyse des densités déduites de l'étude du freinage des satellites artificiels qui a confirmé l'existence du phénomène de diffusion. Tandis que, dans l'homosphère, la pression et la densité décroissent d'un facteur supérieur à un million sur 100 km, l'analyse du freinage des satellites a montré que, dans l'hétérosphère, ces grandeurs décroissent beaucoup plus faiblement. La figure 2 montre la variation de la densité telle qu'elle fut déterminée par l'étude du freinage exercé sur les premiers satellites artificiels. La lente diminution de la densité dans l'hétérosphère doit être expliquée principalement par une augmentation de la température ou une diminution de la masse moléculaire moyenne.

En réalité, l'effet de la température domine dans l'hétérosphère inférieure où le rayonnement solaire ultraviolet joue un rôle essentiel. Outre sa capacité à dissocier les molécules d'oxygène, l'absorption de ce rayonnement est responsable de l'échauffement des constituants de l'hétérosphère. Ainsi, au-dessus de 85 km, niveau supérieur de la mésosphère où la température atteint un minimum d'environ $(170 \pm 25)^\circ\text{K}$, on enregistre une augmentation progressive de la température avec un gradient qui dépend étroitement de l'énergie ultraviolette solaire absorbée. On se trouve alors dans une région atmosphérique appelée *thermosphère*, partie intégrante de l'hétérosphère (voir figure 1). L'augmentation continue de la température avec l'altitude se maintient jusqu'à un niveau appelé *thermopause*, base d'une région isotherme où la température peut

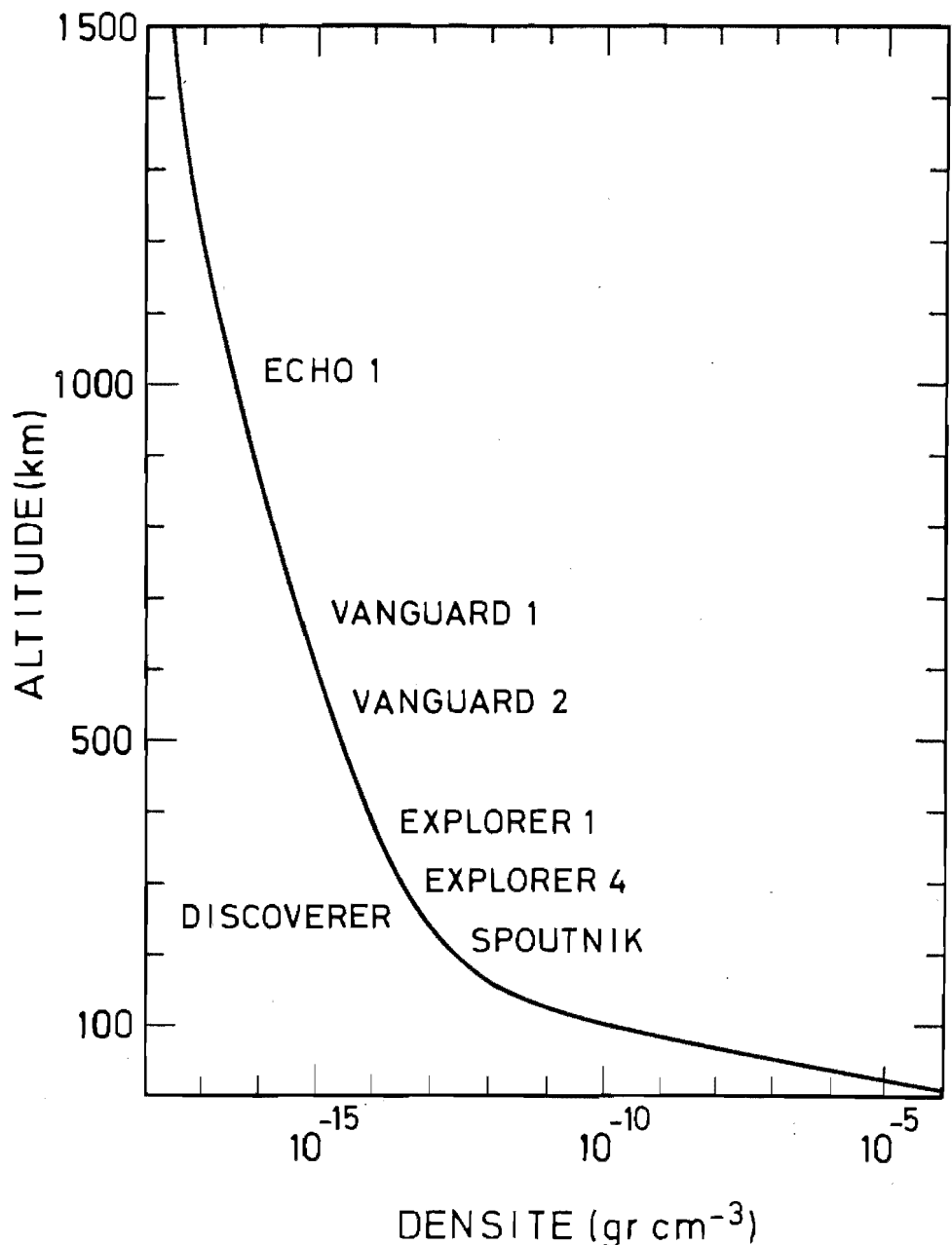
atteindre des valeurs de l'ordre de 600°K à 2.000°K suivant le degré de l'activité solaire.

La figure 1 montre les distributions verticales de la température correspondant à un Soleil calme et un Soleil actif. Ce comportement de la température a été obtenu en tenant compte également du transport de la chaleur par conduction, seul mode possible de transport de la chaleur dans le régime hydrodynamique de l'hétérosphère, et des données

fournies à la fois par l'expérience et la théorie sur la nature et la concentration des constituants à la base de l'hétérosphère.

Par contre, dans la partie isotherme de l'atmosphère, c'est la diminution de la masse moléculaire moyenne, sous l'effet du phénomène de diffusion, qui permet d'expliquer la distribution verticale observée de la densité. Nous avons déjà signalé qu'à partir de 100 km, l'oxygène atomique devient progressivement

2. Variation de la densité moyenne obtenue à partir de l'analyse orbitale des premiers satellites artificiels.



un constituant non négligeable. Lorsqu'on considère des altitudes de plus en plus élevées, d'autres éléments s'affirment comme constituants essentiels. C'est le cas pour l'hélium He, produit par la désintégration radioactive du thorium et de l'uranium à l'intérieur de la Terre, et de l'hydrogène atomique H qui résulte d'une série complexe de réactions et de dissociation du méthane CH_4 et de la vapeur d'eau H_2O dans l'homosphère. Sous l'effet de la

diffusion moléculaire, la décroissance avec l'altitude de la concentration d'un élément dépend de la masse de cet élément : plus l'élément est léger, moins rapide est la décroissance. C'est pourquoi l'hélium et l'hydrogène atomique, dont les abondances dans l'homosphère sont négligeables, finissent par devenir des éléments prépondérants aux très hautes altitudes. En définitive, le transport des éléments par diffusion a pour effet de créer dans l'hétérosphère

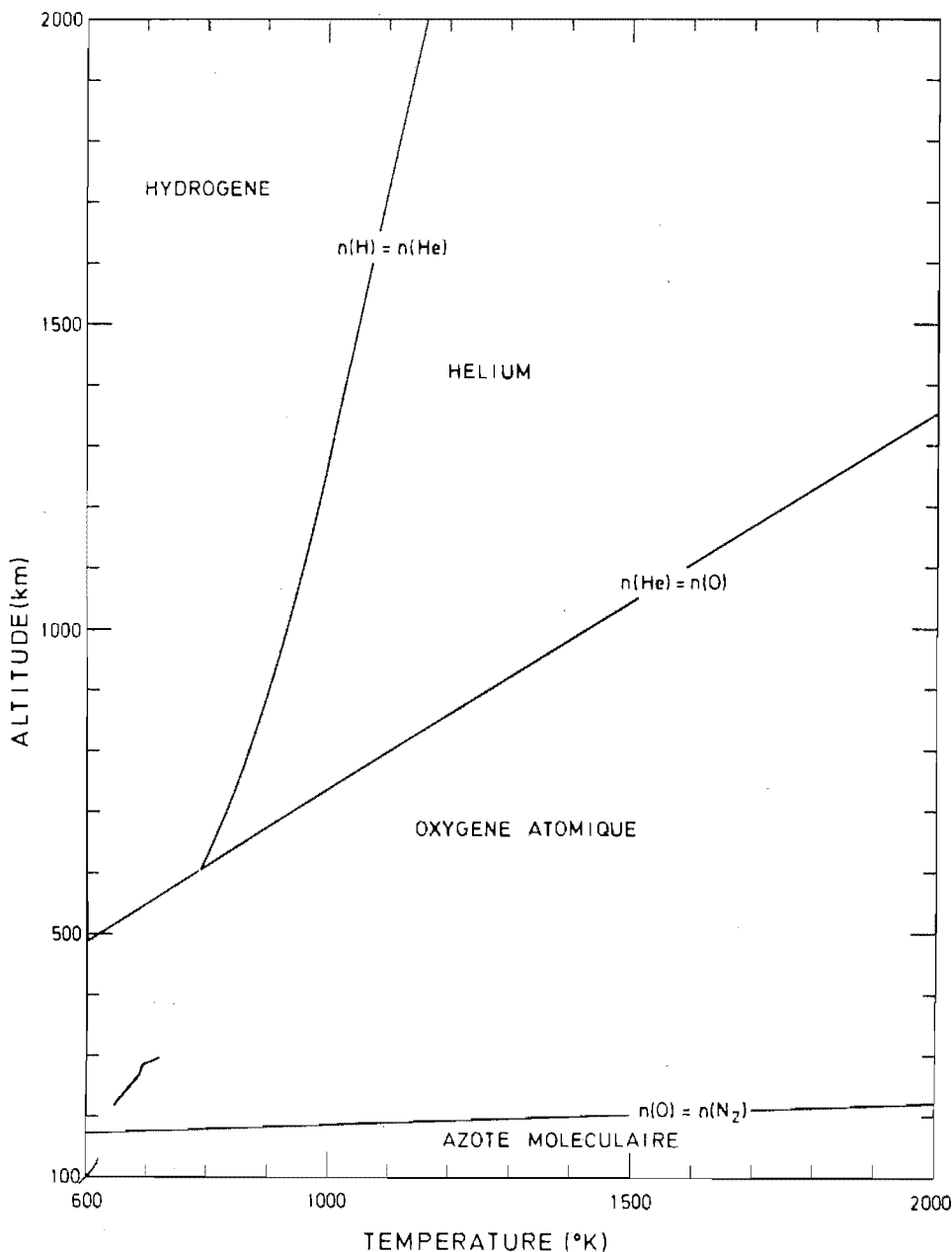
diverses ceintures que nous avons représentées, à la figure 3, en fonction de la température de l'atmosphère isotherme. En premier lieu, on rencontre une ceinture d'azote moléculaire, puis une ceinture d'oxygène atomique, une ceinture d'hélium et finalement une ceinture d'hydrogène atomique. Signalons que l'existence des ceintures d'hélium et d'hydrogène avait été établie théoriquement par le professeur Nicolet avant le lancement du premier satellite artificiel. On constate, par ailleurs, que l'étendue des ceintures est liée à la température de l'atmosphère isotherme et par conséquent à l'activité solaire. Les variations de cette dernière entraînent des modifications dans la structure de l'hétérosphère et lui confèrent un caractère dynamique très marqué.

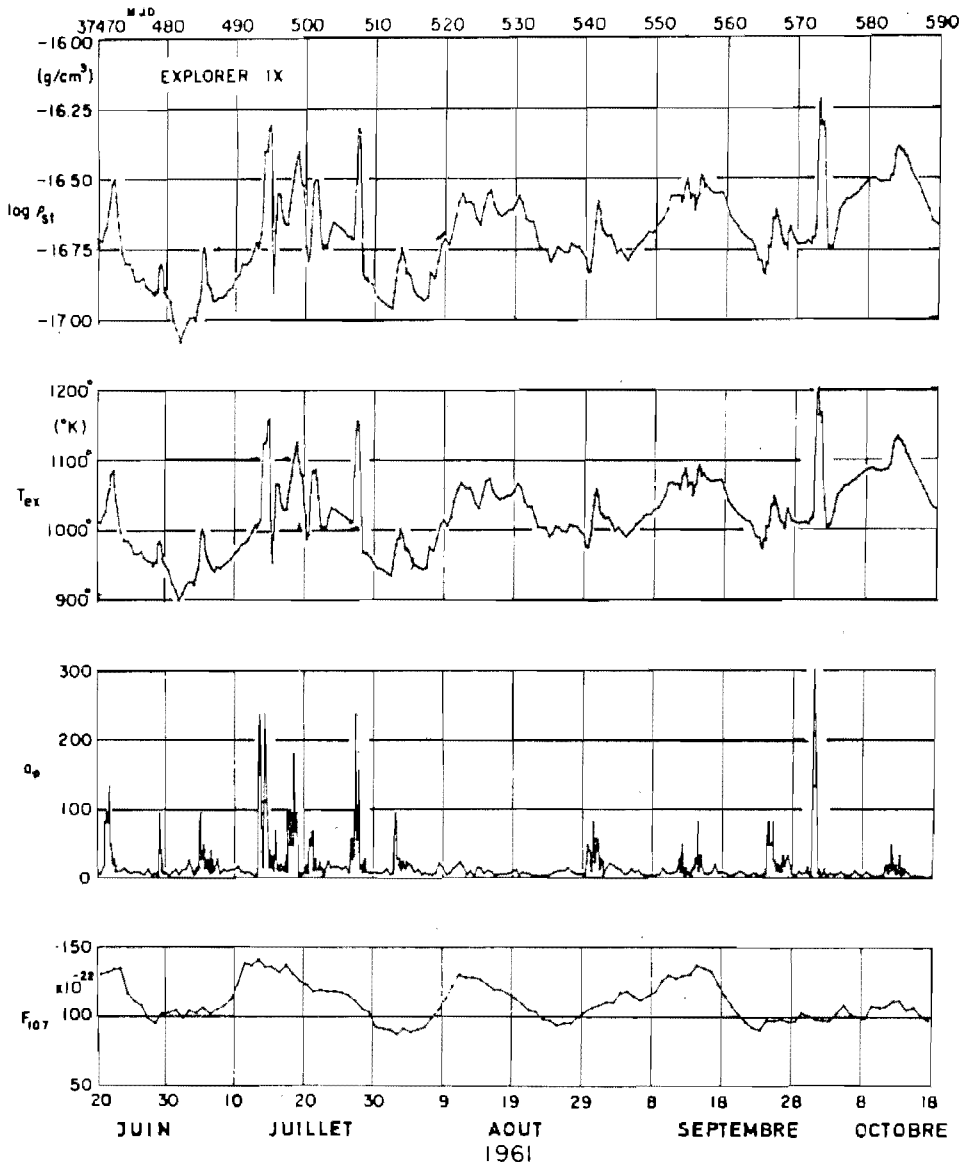
En définitive, en tenant compte des trois processus fondamentaux qui régissent le comportement de l'atmosphère supérieure, à savoir la diffusion des gaz dans le champ de la pesanteur, le chauffage par le rayonnement ultraviolet du Soleil et le transport de chaleur par conduction, et en adoptant des conditions aux limites à une altitude voisine de 100 km, il a été possible de construire des modèles atmosphériques représentatifs de la structure observée de l'atmosphère supérieure.

Lorsqu'on analyse les densités obtenues à une altitude particulière au cours d'une période de temps s'étendant sur plusieurs mois ou plusieurs années, divers types de variations essentielles peuvent être discernés.

La figure 4 représente les densités ρ_{st} calculées entre juin et octobre 1961 à partir de l'analyse orbitale du satellite *Explorer 9* mais réduites à une altitude standard de 730 km pour permettre une comparaison dans le temps. On y a également représenté les variations de la température à la thermopause T_{ex} , parfois appelée *température exosphérique*, de l'indice géomagnétique a_n , qui

3. Etendue des ceintures d'azote moléculaire, d'oxygène atomique, d'hélium et d'hydrogène en fonction de la température de l'atmosphère isotherme.





4. Variations de la densité atmosphérique à 730 km et de la température à la thermopause entre juin et octobre 1961. Les variations de l'indice géomagnétique a_n et du flux radioélectrique solaire $F_{10.7}$ sont également représentées.

caractérise l'amplitude des variations du champ géomagnétique, et du flux solaire radioélectrique $F_{10.7}$ de longueur d'onde 10,7 cm, mesuré en 10^{-22} watts/cm² (cycle/sec)⁻¹. Ce flux, mesuré au sol, peut être considéré comme un indice de l'activité solaire, car il provient des couches solaires correspondant à la chromosphère supérieure et à la couronne inférieure où sont émis les rayons ultraviolets responsables du chauffage de la haute atmosphère. La figure 4 fait apparaître l'existence d'une période de 27 jours

dans les variations de la densité et de la température; on constate que cette oscillation est en phase avec la période de 27 jours observée dans le flux décimétrique, cette période étant en fait associée à la rotation du Soleil.

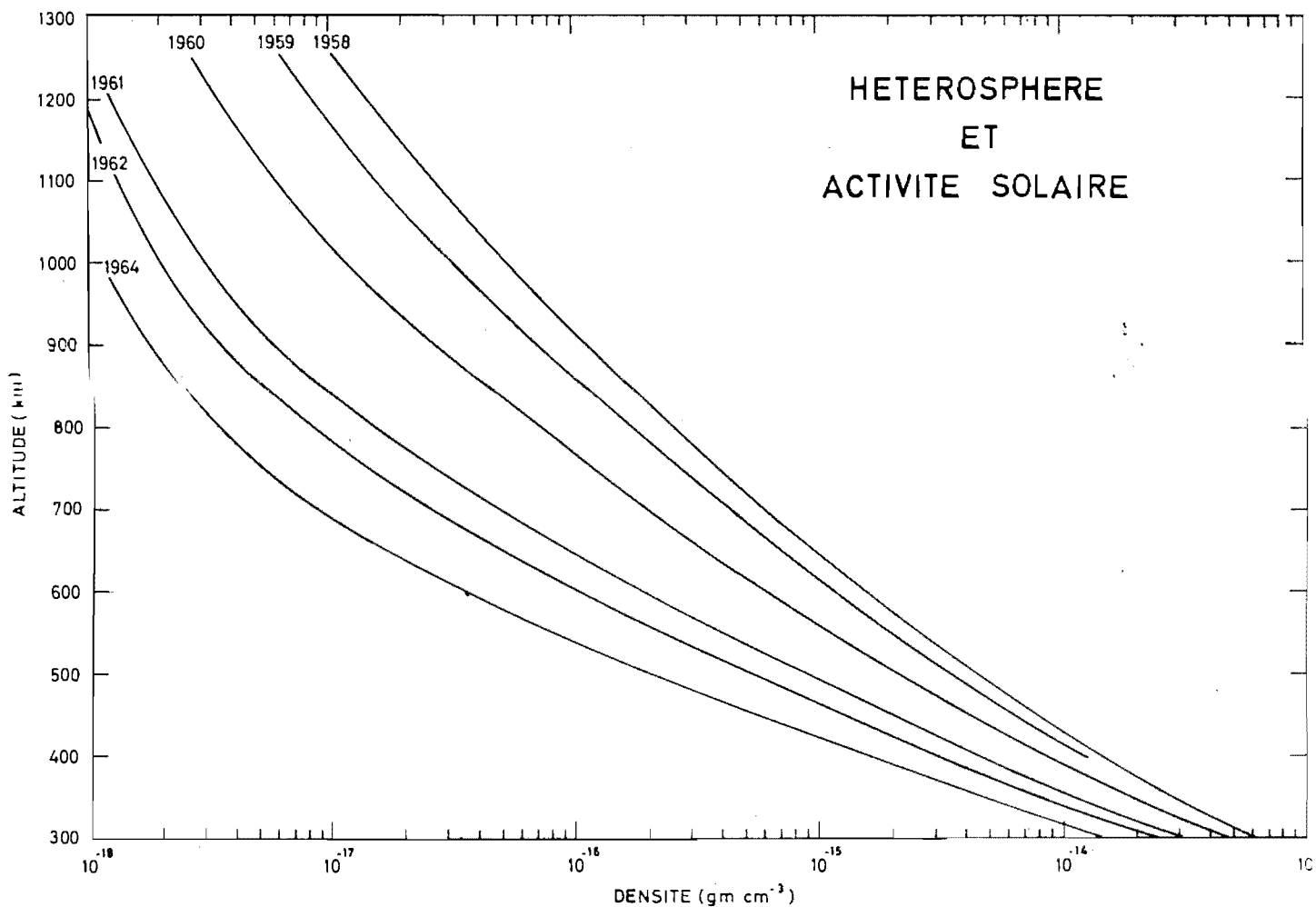
D'autre part, à certaines époques, on observe d'importantes fluctuations brèves et rapides, liées cette fois à l'activité géomagnétique. A la figure 5, ont été représentées diverses distributions verticales de la densité moyenne obtenues à partir de l'analyse orbitale des satellites

pour la période 1958-1964, c'est-à-dire entre un maximum et un minimum d'activité solaire. On s'aperçoit que la densité de l'hétérosphère est soumise à des variations considérables entre le maximum d'activité solaire de 1958 et le minimum d'activité solaire de 1964. Ainsi, à 500 km, la densité moyenne en 1958 atteignait 25 fois la valeur observée en 1964. Ce comportement traduit, en fait, une variation lente d'une période de 11 ans, liée au cycle undécennal de l'activité solaire. La structure de l'hétérosphère est soumise à deux autres phénomènes importants : c'est, tout d'abord, la variation diurne marquant une différence de densité (ou de température) entre le jour et la nuit. La figure 6 en est une illustration : elle révèle qu'en 1960, la densité de jour était très supérieure à la densité de nuit, l'écart étant cependant fonction de l'altitude. Cet effet s'explique par le fait qu'au cours de la nuit le chauffage ultraviolet solaire n'a pas lieu et l'hétérosphère se refroidit par conduction de la chaleur vers le bas. D'autre part, la densité et la température subissent également une variation semi-annuelle avec l'apparition, chaque année, d'un minimum prononcé en juillet, d'un maximum en octobre, d'un minimum secondaire en janvier et enfin d'un maximum secondaire en avril. Les physiciens s'attachent actuellement à donner une explication satisfaisante à cet effet.

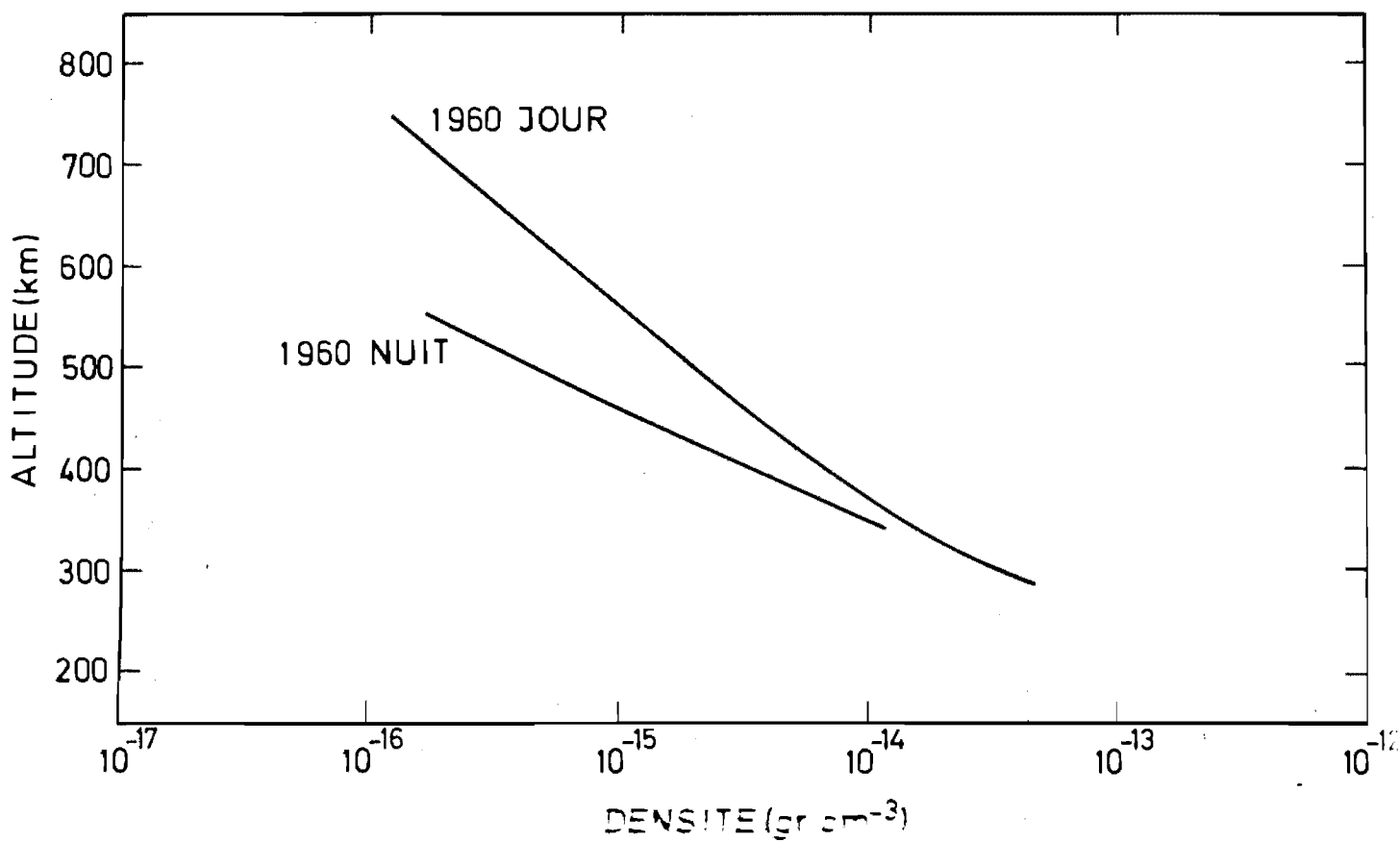
L'ionosphère

L'ionosphère est la région atmosphérique riche en particules chargées. Elle est située à des altitudes supérieures à 60 km et s'étend jusqu'aux confins de l'atmosphère.

L'existence de l'ionosphère a été révélée expérimentalement par les ondes radio après qu'on eût découvert que ces ondes pouvaient être transmises autour de la surface courbée de la Terre.



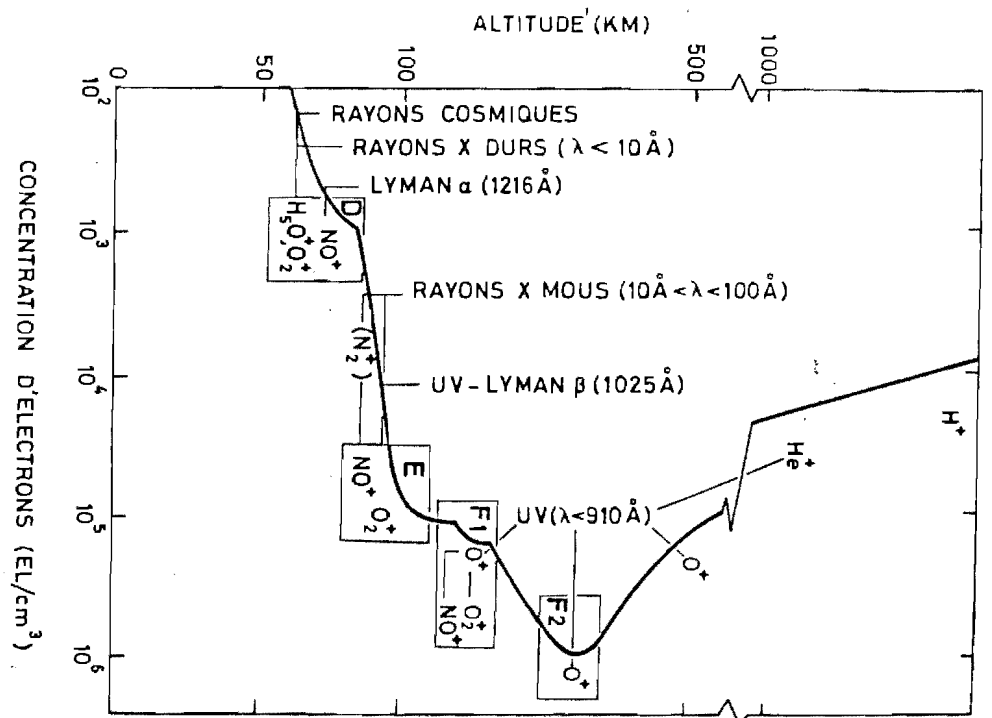
5. Distributions verticales de la densité moyenne entre 1958 et 1964, c'est-à-dire entre un maximum et un minimum de l'activité solaire.
6. Distributions verticales de la densité de jour et de la densité de nuit au cours de l'année 1960.



La concentration électronique nécessaire pour réfléchir une onde radio dépend de la fréquence de celle-ci et de l'angle d'incidence. La méthode des sondages radio-électriques a permis de déceler l'existence de régions ionosphériques bien caractérisées et correspondant à autant de maxima d'ionisation (figure 7). L'observation basée sur les ondes kilométriques indique qu'une première région d'ionisation maximale existe vers 80 km : c'est la région D où la concentration des électrons pendant le jour est comprise entre 1.000 et 10.000 électrons par cm^3 . L'onde de l'ordre de l'hectomètre est en général renvoyée par une région E, située vers 100 km, et caractérisée par une concentration maximum de l'ordre de 100.000 électrons par cm^3 . Enfin, les ondes décamétriques prouvent l'existence d'une région F qui se subdivise généralement en deux couches, la couche F_1 , située vers 170 km où l'ionisation est approximativement deux fois plus élevée que dans la région E, et la couche F_2 , dernière région observable au-delà de 250 km où le maximum de la concentration électronique est de l'ordre de 1.000.000 d'électrons par cm^3 .

Ces régions ionosphériques sont soumises à des variations liées à la distance zénithale du Soleil, au champ magnétique terrestre, aux perturbations de l'atmosphère solaire, et, en général, à l'activité undécennale solaire. Les divers maxima d'ionisation possèdent toutefois des propriétés essentiellement différentes. Ainsi, la région F_2 est la seule couche normale dont l'ionisation est encore importante au cours de la nuit.

Avant l'utilisation des satellites, il ne fut jamais possible d'obtenir des mesures de la concentration électronique au-dessus du maximum de concentration de la région F_2 . L'emploi de sondes satellisées a permis de combler cette lacune. Il apparut bien-



7. La concentration d'électrons, les ions positifs et les sources d'ionisation dans l'ionosphère.

tôt que la distribution en latitude et longitude des électrons dans l'ionosphère supérieure est étroitement liée aux effets du champ magnétique terrestre. En principe, la répartition, en altitude, des électrons au-dessus du maximum de la région F s'aligne sur une ligne de force du champ magnétique terrestre.

En réalité, bien que l'ionosphère soit généralement décrite en termes de concentrations d'électrons, ce sont surtout les ions et leurs réactions qui déterminent le comportement de chacune de ces régions. D'autre part, les conditions aéronomiques de l'état d'ionisation dépendent à la fois de la distribution verticale des éléments neutres et de la distribution spectrale du rayonnement solaire et de son absorption. L'analyse du comportement de la structure ionosphérique ne peut donc être complète sans une connaissance, elle-même complète et permanente, du spectre solaire. Avant l'apparition des

fusées, on n'avait jamais pu observer le rayonnement solaire de longueurs d'ondes inférieures à 3.000 Å. Le domaine spectral compris entre 3.000 Å et 2.000 Å ne fut connu qu'en 1950 lors du lancement d'une fusée, équipée d'un spectrographe, au-dessus de la couche d'ozone responsable de l'absorption du rayonnement solaire dans cette gamme de longueurs d'onde. Ensuite, la connaissance du spectre solaire s'est étendue dans des domaines de longueurs d'onde de plus en plus courtes jusqu'aux rayons X. En définitive, un nombre considérable de fusées atteignant ou dépassant l'altitude de 200 km, a permis d'acquérir une connaissance de tout le spectre solaire au moment où les satellites ont pu être utilisés pour une surveillance permanente du Soleil. Nous avons représenté également, à la figure 7, les ions positifs présents dans l'ionosphère ainsi que les radiations responsables de leur formation.

Dans la région D, on rencontre des ions complexes tels que H_3O^+ avec les ions NO^+ et O_2^+ . Les sources d'ionisation sont, pour un Soleil calme, le rayonnement Lyman alpha (1216 Å) qui ionise l'oxyde d'azote (NO) et, pour un Soleil très actif, une forte émission de rayons X durs ($\lambda < 10$ Å) responsables de l'ionisation de l'azote moléculaire (N_2) et de la production de NO^+ .

La couche E est principalement constituée d'ions positifs O_2^+ et NO^+ . Dans ce cas, le rayonnement solaire ultraviolet ($170 \text{ Å} < \lambda < 1027 \text{ Å}$, Lyman β avec $\lambda = 1027 \text{ Å}$) joue un rôle aussi important que les rayons X mous ($10 \text{ Å} < \lambda < 100 \text{ Å}$). Notons toutefois que quelques données fournies par des fusées signalent une concentration relativement élevée d'ions métalliques, tels que le sodium et le magnésium, entre 85 et 110 km d'altitude provenant des météores.

Pendant le jour, la partie inférieure de la couche F_1 contient principalement des ions O_2^+ et NO^+ . On rencontre l'ion O^+ dans la partie supérieure de la couche F_1 ainsi que dans la région F_2 au-dessous de 1.000 km. Aux altitudes plus élevées, ce sont les ions H^+ et He^+ qui dominent.

L'environnement terrestre

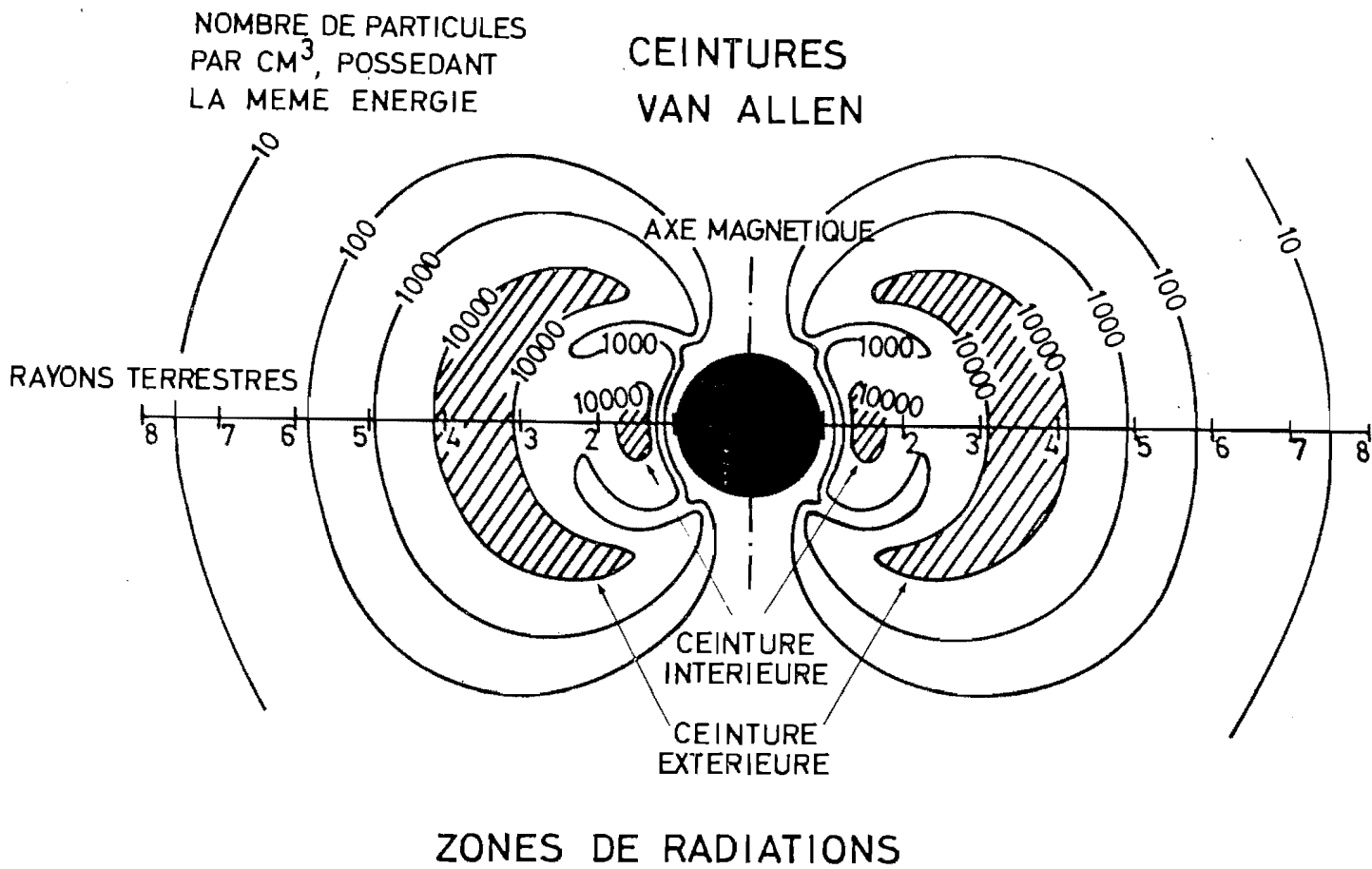
Une des premières découvertes fondamentales sur cet environnement fut faite en 1959 : les informations transmises par le satellite américain *Explorer 1* montrèrent que la Terre était entourée, à une distance de quelques milliers de kilomètres, de deux zones de particules de grande énergie et nombreuses appelées depuis *ceintures de Van Allen*. Ces particules dont l'énergie, principalement de nature cinétique, peut atteindre plusieurs millions d'électrons-volt, présentent des phénomènes ondulatoires, comme par exemple l'interférence et la diffraction. C'est pourquoi l'on parle égale-

ment de *ceintures de radiations*. Au début, il n'était question que de deux ceintures : une ceinture de protons centrée à une distance géocentrique de 1,5 rayon terrestre et une ceinture d'électrons centrée à 3,5 rayons terrestres. Cette distinction, toutefois, n'était que le résultat de la gamme dynamique assez restreinte des premiers détecteurs et de leur manque de sensibilité. En fait, une ceinture est simplement une zone où les particules atteignent une densité maximale. Ces particules se déplacent en spirale autour des lignes de force du champ magnétique terrestre et se réfléchissent d'un hémisphère à l'autre lorsque ce champ devient suffisamment dense au voisinage de la Terre. C'est pourquoi on dit que ces particules sont piégées par le champ géomagnétique.

Les zones de radiations ont été schématisées à la figure 8. Cette figure, toutefois, n'est pas très réaliste. En fait, déjà en 1954, le physicien Sydney Chapman pressentit que le champ magnétique terrestre devait être comprimé par le vent solaire du côté où celui-ci souffle tandis que du côté opposé au Soleil, les lignes de force devaient avoir tendance à s'étirer pour se refermer ensuite sur elles-mêmes beaucoup plus loin. La magnétosphère était alors définie comme la cavité dans laquelle le vent solaire enferme le champ géomagnétique, cette cavité protégeant la Terre de l'action du vent solaire. La limite extérieure de la magnétosphère est appelée *magnétopause* dont une meilleure définition consiste à dire qu'elle est la zone où se manifeste l'équilibre entre la pression dynamique du vent solaire et la pression du champ géomagnétique; c'est aussi la région qui sépare l'espace interplanétaire et le champ d'action du magnétisme terrestre. Tel était le schéma de la magnétosphère qui existait encore en 1960 avec toutefois, comme fait nouveau, l'existence des zones de radiations.

Cependant, les observations ultérieures des satellites américains *Explorer*, *Pioneer* et *IMP* et de certaines sondes soviétiques allaient modifier ce premier modèle. Si elles confirmèrent l'existence de la cavité magnétosphérique, elles conduisirent néanmoins à en changer la structure au fur et à mesure que ces observations devenaient plus précises et plus lointaines. La figure 9 montre la configuration de l'environnement terrestre actuellement admise. Du côté du Soleil, le vent solaire comprime bien le champ magnétique terrestre à partir d'une distance de l'ordre de 10 rayons terrestres. Du côté opposé au Soleil, les lignes de force sont effectivement étirées. On appelle *magnétosphère intérieure* la partie de la magnétosphère caractérisée par des lignes de force fermées (partie hachurée). La limite de la magnétosphère intérieure semble coïncider avec des latitudes de 78° du côté diurne et 67° du côté nocturne. Il existe, par contre, une région de la magnétosphère où les lignes de forces sont ouvertes : c'est la magnétosphère extérieure. D'autre part, la magnétopause fut observée du côté du Soleil : elle apparaît comme une membrane d'environ 100 km d'épaisseur dont l'emplacement et la forme subissent des variations qui dépendraient de la vitesse du vent solaire. Du côté du Soleil, il existe, en outre, à une distance de l'ordre de 12 à 13 rayons terrestres, une autre frontière insoupçonnée jusqu'en 1961 : c'est l'onde de choc produite par le heurt du vent solaire contre le champ terrestre, les particules du vent solaire se déplaçant à des vitesses localement supersoniques. La position et la forme de cette onde de choc subissent des variations qui dépendraient, elles-aussi, de la vitesse du vent solaire.

La région comprise entre l'onde de choc et la magnétopause est une zone de transition dans laquelle peuvent pénétrer les champs magnétiques interplané-



8. Les zones de radiations.

taires. C'est le fourreau magnétique, siège de turbulence.

C'est du côté opposé au Soleil que les sondes spatiales interplanétaires et les satellites à orbites géocentriques très allongées ont fourni les résultats les plus inédits. On s'est rendu compte que les lignes de force du champ magnétique terrestre s'étiraient dans la direction opposée au Soleil en restant quasi parallèles à l'axe Terre-Soleil sur une distance beaucoup plus grande que prévu; c'est pourquoi l'on parle à présent de la *queue de la magnétosphère*. D'après les données transmises par les *Pioneer 6* et *7*, cette *queue* s'étendrait au moins jusqu'à une distance de 5 millions de kilomètres. Les mesures effectuées par les sondes spatiales montrent également que la queue

est divisée dans le sens de la longueur par une région centrale appelée *couche neutre* où les lignes de champs magnétiques de sens opposés s'annulent. La couche neutre commence à se manifester à 9 ou 10 rayons terrestres. Enfin, certains phénomènes observés suggèrent que les lignes de force de la magnétosphère extérieure partant des latitudes élevées seraient connectées à celles du champ magnétique interplanétaire par l'intermédiaire de la *queue*; cette conception de la magnétosphère ouverte serait de nature à confirmer l'origine solaire directe des particules de grande énergie responsables des phénomènes auroraux. Toutefois, certains autres phénomènes plaident en faveur d'une magnétosphère fermée. En réalité, puisque aucun

des deux modèles n'est en mesure de décrire tous les phénomènes observés, l'apport de données supplémentaires est nécessaire pour cerner davantage ce problème particulièrement délicat.

A l'ordre du jour permanent
de l'Astronautique

Les quelques résultats essentiels décrits dans cet article témoignent, à suffisance, de l'importante contribution que l'astronautique a apportée dans le domaine de l'étude de l'atmosphère et de l'environnement de notre planète. Sans cette contribution, il est clair que le champ de nos connaissances en cette matière n'aurait pas atteint le développement extraordinaire que nous constatons aujourd'hui.

Cependant, si l'on pénètre dans les détails et les arcanes de la physique atmosphérique, force nous est de constater que bien des problèmes font encore l'objet de controverses. C'est pourquoi, il faut souhaiter que les responsables de l'élaboration des projets spatiaux ne cessent d'accorder aux programmes scientifiques l'importance qu'ils méritent incontestablement tant il est vrai que l'avenir dépend beaucoup de la science sous ses divers aspects.

9. Configuration de l'environnement terrestre.

