

# Aux confins de l'atmosphère terrestre

par M. NICOLET

directeur du Centre National de Recherches de l'Espace

## DE L'UTILITE D'UN APERÇU RETROSPECTIF

Il y a moins de dix ans, peu de personnes admettaient la possibilité de la recherche spatiale alors que des fusées munies d'instruments scientifiques avaient dépassé l'altitude de 150 km. Il y a cinq ans, lorsque je fus chargé, en tant que Secrétaire Général de l'Année Géophysique Internationale, d'engager des pourparlers et d'annoncer l'intention du Comité des U. S. A. et ensuite du Comité de l'U. R. S. S. de lancer des satellites dans le cadre de l'Année Géophysique, les sceptiques étaient encore très nombreux. Aujourd'hui, alors qu'il y a déjà trois ans que les premiers Sputnik, Explorer et Vanguard ont été placés sur orbite, beaucoup considèrent encore avec indifférence les développements accomplis dans les cadres scientifique, technique et industriel et également les développements futurs que l'on découvre dans les intentions proclamées. Les charges utiles, qui, au début, ne furent que de quelques kilogrammes, sont passées à quelque 5.000 kg avec le Sputnik IV, passeront de 5 tonnes avec le Centaure, à 10 tonnes pour le Saturne et atteindront 50 tonnes avec le Nova. Il apparaît donc que dans quatre à cinq ans une limite de quelque 50 tonnes pourrait graviter autour de notre planète. Ainsi, il n'y a aucune difficulté à poser des problèmes scientifiques nouveaux d'autant plus qu'il est actuellement possible de récupérer des capsules d'instruments faisant partie d'un satellite dont la vitesse est de l'ordre de 30.000 km par heure. D'ailleurs, les programmes scientifiques futurs requièrent la résolution, dans des disciplines les plus diverses, de nombreux problèmes techniques qui doivent être envisagés simultanément au développement de nouveaux lanceurs se situant dans un cadre industriel nouveau. C'est pourquoi il est bon de discuter de temps à autre les résultats scientifiques déjà acquis. Ils donnent tout d'abord, une idée des nouvelles conceptions géophysiques qui seront appliquées mutatis mutandis aux autres planètes. En outre, ils permettent de déterminer quelles seront les recherches à entreprendre à bref délai. Enfin,

ils fixent les conditions du problème scientifique futur dont la priorité conditionne les aspects techniques et industriels de la recherche spatiale en cours de développement.

## LES SATELLITES TEMOINS PERMANENTS

Il y a quelques années, les observations géophysiques et astrophysiques étaient localisées au voisinage du sol et ce n'est que par des procédés indirects basés sur la spectroscopie et la radio-électricité que l'on s'attaquait aux problèmes de la haute atmosphère, des planètes, du soleil et des étoiles. La limite imposée à la lumière ultraviolette par l'absorption atmosphérique conduisait à des extrapolations erronées, par exemple dans le cas de l'ultraviolet lointain et des rayons X émis par le soleil. Aujourd'hui, on envisage les problèmes des relations entre les phénomènes solaires et terrestres sous un aspect beaucoup plus objectif.

Si la fusée fut un témoin furtif de certains phénomènes, le satellite est aujourd'hui un témoin constant permettant de rechercher quelles sont les conditions physiques de l'atmosphère supérieure au-delà de 200 km, où apparaissent tous les processus essentiels déterminant les variations des phénomènes terrestres associés à l'activité du Soleil. Ainsi, la variation de la période de révolution d'un satellite est associée à la variation du freinage qu'il subit dans son contact avec les molécules d'air dont la pression est inférieure à  $10^{-6}$  mm Hg. En fait, la diminution de la période de révolution d'un satellite et dès lors les variations dans la décélération, sont liées à la valeur de la densité de l'air aux environs du périhélie et naturellement à ses variations. C'est la loi de la distribution hydrostatique associée à la loi des gaz parfaits qui actuellement est le seul procédé de détermination de la température et ses variations à 200 km jusqu'aux plus hautes altitudes. Bientôt, il sera possible de passer à une méthode plus directe grâce à l'envoi dans l'espace de nuages artificiels d'éléments judicieusement choisis comme le sodium, le potassium, etc, pour les-

quels l'application de la méthode spectroscopique de mesure de l'effet Doppler fournira la température. En tout cas, aujourd'hui, par l'analyse de la décélération des satellites, on sait que la température au-delà de 200 km atteint des valeurs de l'ordre de 1500-1750° K pendant le jour et de l'ordre de 1100-1300° K pendant la nuit.

Dans le cas de satellite à faible masse mais de grand diamètre comme le satellite Echo, l'effet de la pression de radiation peut être déterminé et on a constaté qu'il a la même importance que celui de la densité de l'air vers 1.000 km.

### L'EXPANSION DE L'ATMOSPHERE

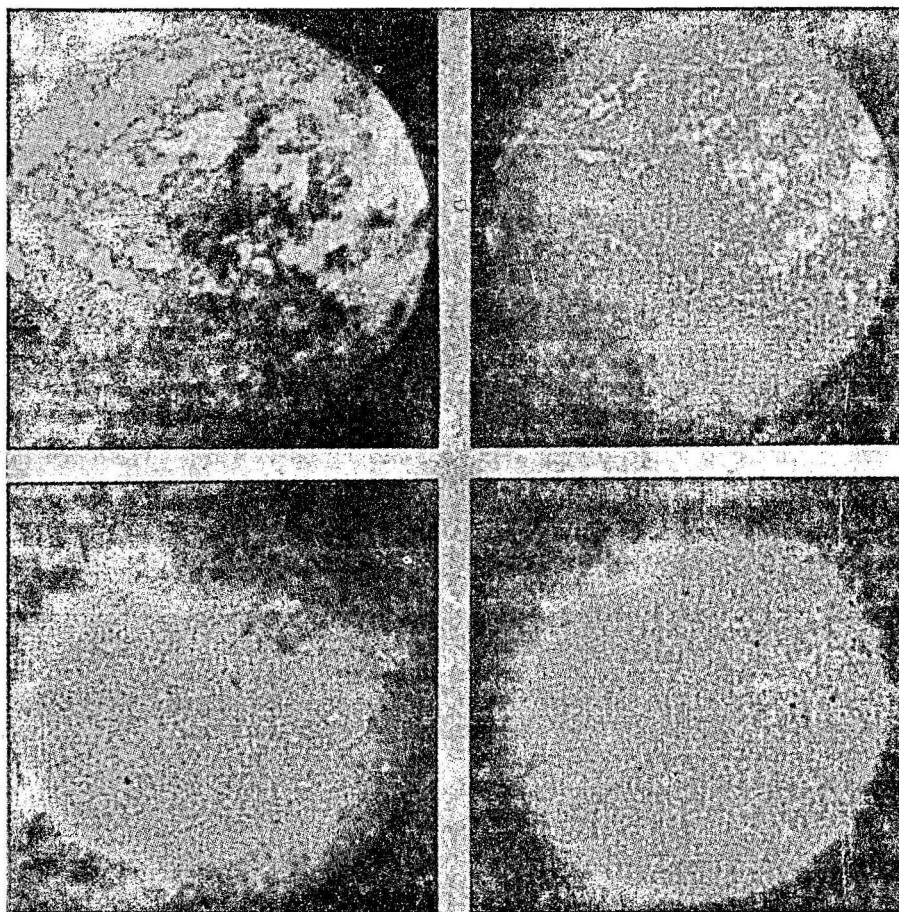
En utilisant les résultats obtenus sur la décélération des satellites dont les périgées s'échelonnent entre 200 km et 1.200 km, on peut déterminer la distribution verticale de cette densité. Si celle-ci à 200 km est réduite à un dix-milliardième de celle de l'air au niveau du sol, elle ne diminue que d'un millième entre 200 km et 600 km et ne varie que d'un centième entre 600 km et 1.200 km. Une

telle distribution verticale de la densité révélée par les observations basées sur le mouvement des satellites, indique donc que l'atmosphère terrestre s'étend à de très grandes distances. Au lieu d'être concentrée au voisinage du globe (quelque cent kilomètres), l'atmosphère s'étend à plusieurs milliers de km. L'explication d'une telle expansion peut être donnée en envisageant l'effet simultané du rayonnement ultraviolet du Soleil et de processus physiques relativement simples.

Lorsque le rayonnement ultraviolet absorbé au cours d'une journée correspond à une énergie totale de l'ordre de grandeur de l'énergie cinétique de la colonne de gaz atmosphérique absorbant, la température peut être liée à l'intensité du chauffage solaire. Ceci se passe vers 150 km où l'énergie ultraviolette de l'ordre de  $1 \text{ erg cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$  fournie pendant 12 heures correspond effectivement à l'énergie cinétique de la colonne verticale de gaz. A une telle altitude, la diffusion des gaz légers (atomes d'oxygène, d'hélium et d'hydrogène) devient effective au sein des gaz lourds

FIGURE 1.

Images du disque solaire  
du Naval Research Laboratory de Washington,  
en lumière totale et diverses lumières monochromatiques.



(oxygène et azote moléculaires). Vers 600 km, l'atome d'oxygène devient l'élément principal tandis que vers 1.500 km l'atome d'hydrogène l'emporte. Ainsi, l'atmosphère a changé complètement de composition en quelque 1.000 km. La masse moléculaire  $M = 29$  qui se maintient jusqu'aux environs de 100 km devient seulement  $M = 16$  vers 600 km et tend vers sa limite  $M = 1$  vers 1.500 km. A une telle altitude, l'atmosphère est essentiellement constituée d'atomes d'hydrogène qui s'échappent de l'atmosphère terrestre car ils ont atteint par suite des hautes températures supérieures à 1000° K la vitesse de libération de 11 km par seconde.

Lorsque la diffusion devient prépondérante dans une atmosphère à fort gradient de température, il faut évidemment tenir compte d'un processus tel que la conduction de la chaleur. Les temps de diffusion et de conduction deviennent tellement courts par rapport à ceux qui sont associés à la convection et à la radiation, que l'on est conduit tout naturellement à ne pouvoir retenir que la conduction comme seul mode possible de transport de la chaleur. C'est pourquoi aux altitudes supérieures à 300 km la distribution verticale de la température est celle d'une atmosphère isotherme. Les différences de température se manifestent par un gradient solaire associé à la rotation de la Terre autour du Soleil. Un important refroidissement nocturne après le coucher du Soleil est provoqué par la conduction.

### LE SPECTRE SOLAIRE ULTRAVIOLET

Un des caractères essentiels du rayonnement ultraviolet du Soleil est de présenter des variations importantes associées à l'activité solaire. Ces variations étaient connues sans être identifiées, grâce à l'étude des phénomènes de l'ionosphère que les variations de la propagation des ondes courtes avaient décelées. Les figures 1 et 2 nous montrent ce rayonnement sous deux aspects. La figure 1 nous présente le disque solaire sous quatre aspects : en premier lieu, observé par photographie au niveau du sol en lumière visible où apparaît l'une ou l'autre tache ; ensuite en lumière monochromatique visible, image d'hydrogène à 6563 Å dans le rouge ; en outre, en lumière monochromatique violette, image de calcium ionisé à 3960 Å ; enfin, en lumière ultraviolette au-delà de la couche absorbante au-dessus de 100 km, image d'hydrogène à 1216 Å. On voit immédiatement que le rayonnement ultraviolet ne provient pas essentiellement d'un disque uniforme mais surtout de plages brillantes. Ce phénomène traduit l'effet d'activité solaire ; les plages sont nombreuses au maximum du cycle undécennal et sont négligeables lors du minimum. Il apparaît ainsi qu'au cours d'un cycle d'activité solaire le flux de radiations ultraviolettes pourrait varier d'un facteur 5. La figure 2 souligne l'autre aspect du rayonnement ultraviolet. Il n'est pas caractérisé comme dans le domaine visible par un

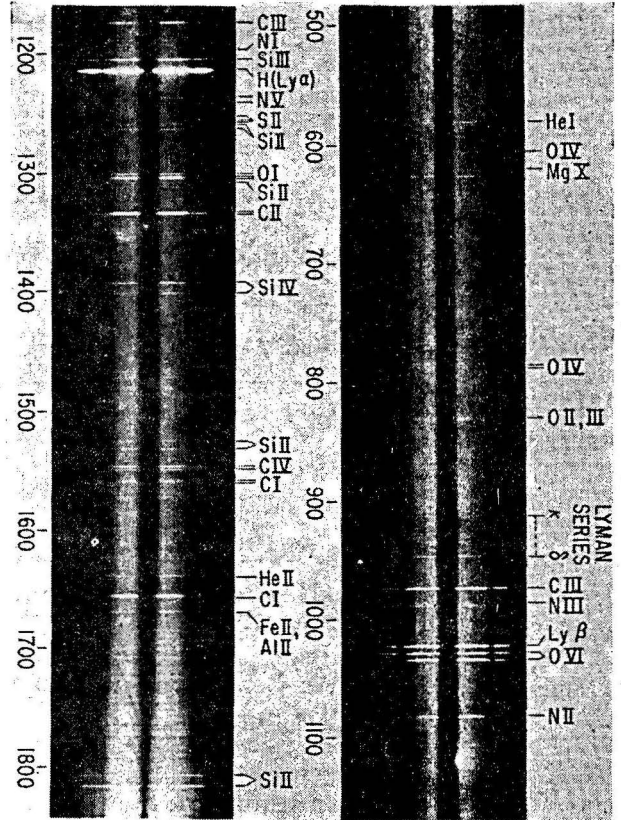


FIGURE 2.  
Spectre ultraviolet du Soleil pris à près de 200 km d'altitude par le Naval Research Laboratory de Washington.

spectre continu auquel sont superposées des raies d'absorption mais par des raies d'émission intenses superposées à un faible continuum.

Ces exemples montrent combien les problèmes peuvent être traités d'une manière plus complète et plus sûre depuis l'observation du spectre solaire ultraviolet. Lorsque les instruments seront placés dans un satellite, il sera possible d'obtenir un enregistrement continu du spectre solaire. On peut donc prévoir dès à présent que l'observation continue facilitera l'application à de nombreux problèmes. En ne citant que l'observation complète des flambes solaires provoquant l'évanouissement des ondes courtes et amenant aux orages ionosphériques, on indique que bientôt de nouveaux éléments vont intervenir dans la prévision de la propagation des ondes courtes.

### NATURE DE L'IONOSPHERE

Alors que la méthode classique du sondage ionosphérique ne permettait d'étudier la structure de l'ionosphère que par les ondes se réfléchissant dans l'atmosphère, c'est-à-dire correspondant à des altitudes inférieures à 350 km, la pénétration des satellites jusqu'aux plus hautes altitudes nous a révélé le comportement des particules chargées dans le champ magnétique terrestre. Tout d'abord,



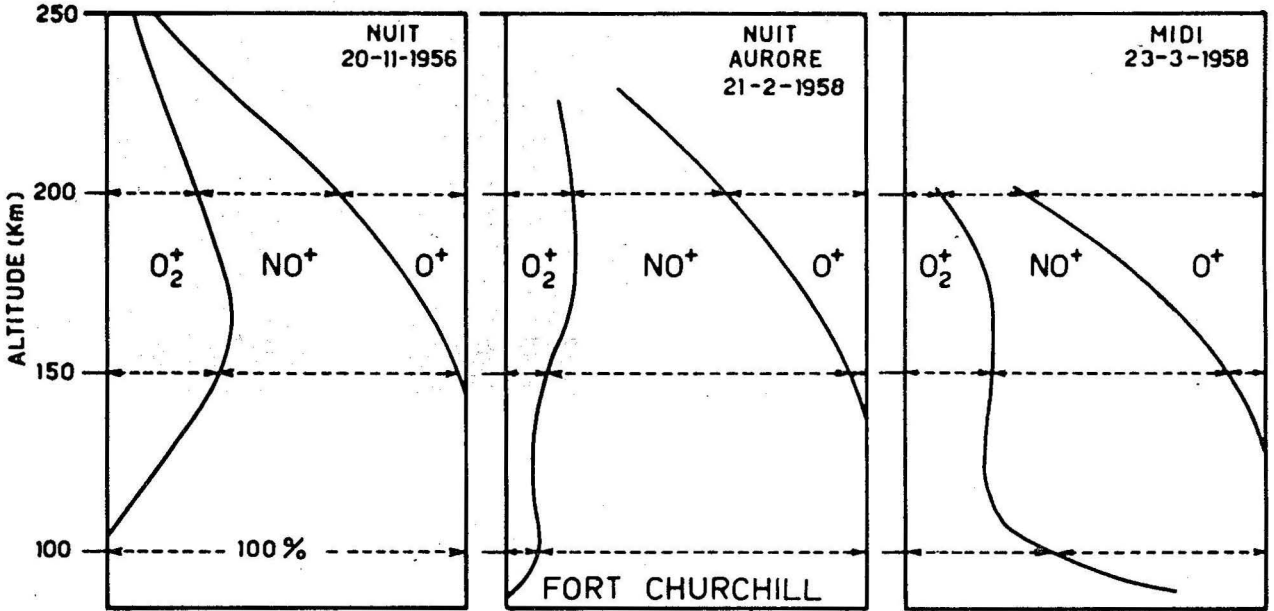


FIGURE 3.  
Distribution des ions positifs en fonction de l'altitude  
d'après le Naval Research Laboratory de Washington.

la nature des ions positifs dans l'ionosphère est connue. Alors que beaucoup prévoyaient les ions moléculaires de l'azote et de l'oxygène vers 100 à 200 km, on voit que l'ion  $NO^+$  (figure 3) est un élément important. En outre, bien que l'azote soit le constituant le plus important de l'air, c'est l'ion  $O^+$  qui l'emporte à partir de 200 km. En outre, l'extension de l'ionosphère est démontrée par la présence d'ions d'hydrogène jusqu'à plusieurs rayons terrestres. Ensuite, et ceci est un élément nouveau que l'année 1958 nous a prouvé, l'existence d'une ceinture de particules chargées dont la réaction sur les instruments indique qu'il s'agit de particules à très grandes vitesses. Enfin, l'arrivée de particules du type rayons cosmiques aux très basses altitudes (inférieures à 100 km) indique l'existence de canaux neutres dans les champs magnétiques interplanétaires. Il y a en effet, des particules emprisonnées par les lignes de force du champ magnétique terrestre; mais, il y a également lors des perturbations la possibilité de faire passer des particules chargées au travers des lignes de force pré-existantes.

\*  
\*  
\*

### LE CHAMP GEOMAGNETIQUE

La structure approximative du champ géomagnétique peut être fournie par l'assimilation au champ d'un dipôle magnétique. La représentation de la figure 4 montre comment les lignes de force sont distribuées. Celles-ci sont indiquées entre 40

et 75° de latitude géomagnétique et ont été fixées par la formule

$$R = R_E \cos^2 \Lambda$$

où  $R$  est la distance au centre du dipôle terrestre

de la ligne de force à l'équateur et  $\Lambda$  est l'angle mesuré à partir du plan équatorial. Si entre  $\pm 10^\circ$  de latitude géomagnétique les lignes de force ne dépassent pas 200 km à l'équateur, elles atteignent pour  $60^\circ$  une altitude de l'ordre de 3 rayons terrestres (environ 20.000 km) à l'équateur. Une telle représentation montre le chemin que peuvent, en l'absence de collision, suivre les particules chargées. Un proton ou un électron s'enroule en spirale autour d'une ligne de force. La spirale peut prendre diverses formes allant de la position perpendiculaire à la position parallèle. Si la position tend vers le parallélisme le mouvement est nettement hélicoïdal; si la position est strictement perpendiculaire, il n'y a pas de déplacement. Dans le cas du champ géomagnétique, il faut tenir compte du fait que son intensité augmente lorsqu'on se rapproche du globe, ce qui se traduit dans la figure 4 par le rapprochement des lignes de force. Ainsi, une particule chargée lâchée à un certain endroit dans l'espace s'enroule en spirale autour d'une ligne de force jusqu'à ce qu'elle atteigne une région où le champ magnétique est assez fort pour la renvoyer. De là, en l'absence de collision, on a un mouvement d'aller et de retour pour la particule chargée entre deux miroirs Nord et Sud. La particule est ainsi piégée. Si elle a une énergie de l'ordre de  $5 \times 10^8$  eV,

elle accomplira son mouvement de va-et-vient en latitude en moins d'une seconde (env.  $\frac{1}{2}$  seconde pour la ligne de force de  $65^\circ$ ). Le déplacement autour de la Terre par suite du gradient du champ en longitude s'accomplira en quelques centaines de secondes.

**LES CEINTURES DE RADIATION DE VAN ALLEN**

Dès que l'on admet qu'une particule peut être piégée dans un champ magnétique, on doit se poser diverses questions relatives au nombre de particules, et à leur durée de vie. De telles questions restent sans réponse et il a fallu les observations effectuées par les satellites afin de révéler une des découvertes les plus remarquables de la recherche spatiale. La figure 5 donne une des premières représentations des ceintures de radiation de Van Allen indiquant l'existence de deux zones centrées à quelque 3.500 km et à 16.000 km d'altitude à l'équateur.

La zone intérieure, limitée au domaine intérieur de latitudes géomagnétiques  $35-40^\circ$  et située à faible altitude (inférieure à 6.000 km) est caractérisée au cœur de la zone (altitude 3.500 km) par des particules d'énergie relativement élevée. Le nombre de protons d'énergie de 50 MeV à 100 MeV est de l'ordre de  $10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ stéradian}^{-1}$  et le nombre d'électrons d'énergie de l'ordre de 20 keV est de l'ordre de  $2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ stéradian}^{-1}$ , tandis que le nombre d'électrons d'énergie supé-

FIGURE 4.

Lignes de force du champ magnétique terrestre.

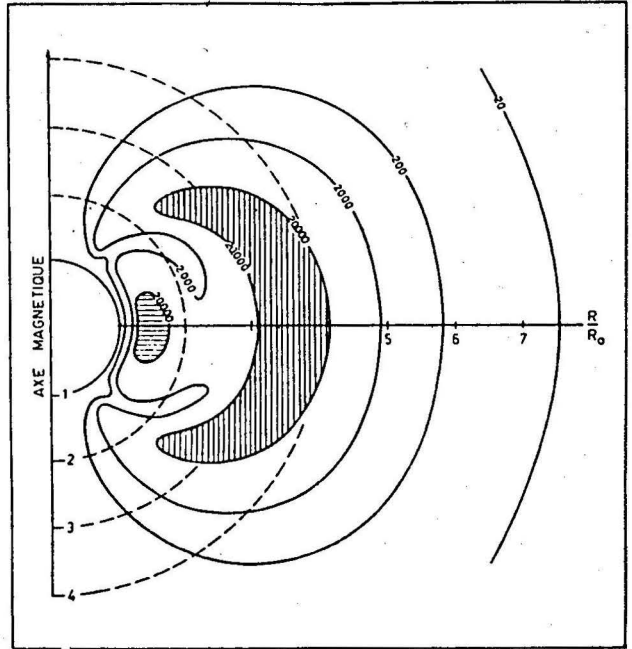
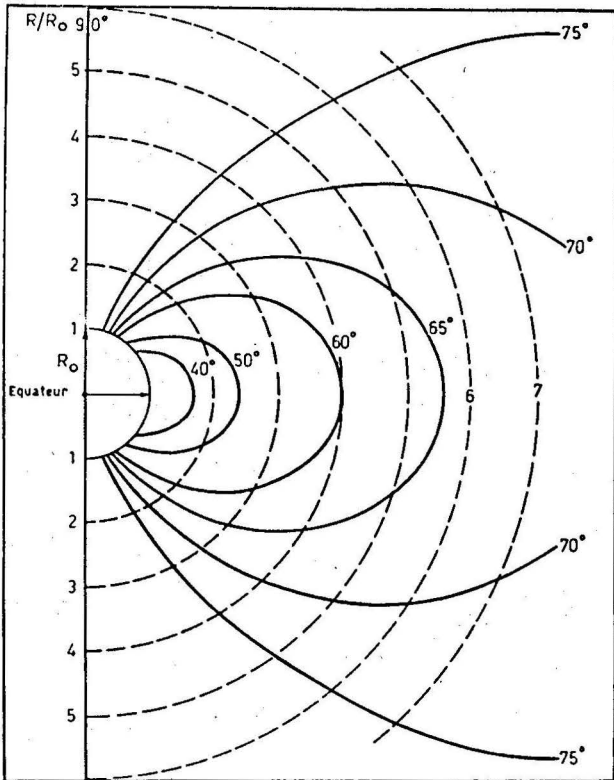


FIGURE 5.

Les zones de radiation telles qu'elles furent présentées la première fois par Van Allen.

rieure à 600 keV serait encore de l'ordre de  $10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ stéradian}^{-1}$ . L'accord apparaît général sur l'origine de la zone intérieure. Comme sa structure n'a pas beaucoup varié au cours de deux ans d'observation, sa composition peut être interprétée par la théorie de l'albedo du rayonnement cosmique. La désintégration du neutron, dont la demi-durée de vie est d'environ 12 minutes, fournit un proton d'énergie comparable à l'énergie cinétique du neutron et un électron dont le spectre est connu.

La zone extérieure se présente sous une forme tout à fait différente de celle de la zone intérieure. D'une part les énergies des particules sont nettement plus faibles et la structure de la zone extérieure peut varier très fortement. En considérant des échantillons (non nécessairement valables en tout temps) au cœur de la zone extérieure à des altitudes de 15.000 à 20.000 km sur l'équateur géomagnétique, on obtient des ordres de grandeur suivants : pour des électrons d'énergie de l'ordre de 20 keV et de 200 keV respectivement  $10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$  et  $10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$  ; pour des protons d'énergie supérieure à 60 MeV moins de  $10^2 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ .

Lorsqu'on compare les résultats obtenus depuis les premières observations de l'Explorer I en février 1959, et celles de l'Explorer IV lancé en juillet 1958, aux résultats successifs du Pioneer I en octobre 1958, du Pioneer III en décembre 1958, du Pioneer IV en mars 1959 et des fusées spatiales soviétiques en janvier et septembre 1959, on constate que des variations temporelles apparaissent au sein de la zone extérieure. Le Pioneer IV lancé

le 3 mars 1959 a mesuré au cœur de la zone extérieure la plus forte intensité, 10 à 100 fois supérieure à celle mesurée par la première fusée spatiale soviétique lancée le 2 janvier 1959, tandis que le Pioneer III en décembre 1958 a mesuré une intensité encore plus faible. De plus, la limite extrême de la zone extérieure varie suivant les cas et peut s'étendre à plus de 60.000 km du centre de la Terre. De nouveaux résultats particulièrement intéressants furent apportés grâce à des observations effectuées par l'Explorateur VI lancé le 7 août 1959. Ce satellite fut placé sur une orbite fortement elliptique dont le périhélie était à environ 6.600 km du centre de la Terre et l'apogée à 48.800 km. La période de l'orbite étant d'environ 12,7 heures, il passe 4 fois par jour au travers des ceintures de radiation. Le premier intérêt des observations résida dans le fait que la première semaine après le lancer correspondait à une période de calme relatif de l'activité solaire et de l'activité magnétique. Ainsi, la distribution des électrons dans la zone extérieure ne présentait pas de trop grandes variations journalières ( $\pm 30\%$ ). De plus, l'extrémité de l'orbite correspondait à la limite extrême de la zone de radiation le long de l'équateur géomagnétique (48.000 km); on retrouve, en effet, à de telles distances la valeur représentant le rayonnement cosmique alors que dans le cas des sondes spatiales les intensités observées étaient nettement plus élevées. En outre, deux maxima sont apparus dans la zone extérieure à des distances respectives le long de l'équateur, de 17.000 km et de 23.000 km du centre de la Terre.

Au cours de la 16<sup>e</sup> révolution de ce satellite, une perturbation s'est manifestée indiquant le début d'une perte de particules de la zone extérieure, correspondant au début brusque de l'orage magnétique du 16 août à 2 h T.U. Le résultat remarquable observé au cours des premières 24 heures de cet orage magnétique fut qu'environ les  $\frac{3}{4}$  de l'énergie contenue dans la zone extérieure fut précipitée entre les latitudes géomagnétiques 52° et 62° avec un maximum vers 57° - 58°. Cette précipitation correspondant à une décharge directe de particules de quelque 50 keV doit donner lieu aux rayons X auroraux que les ballons détectent généralement à 30 km d'altitude. Il apparaît donc que le champ magnétique perturbé par le plasma solaire conduisant à l'orage magnétique est à l'origine de la décharge des particules.

Les effets associés aux orages magnétiques indiquent que la diminution de l'intensité des rayons cosmiques galactiques n'empêche pas l'arrivée d'autres particules dans l'atmosphère terrestre. Au contraire, on voit même les rayons cosmiques solaires arriver, quelques heures après l'éruption solaire, dans des régions normalement interdites.

Ainsi, le nuage de plasma solaire trouve sa voie dans le champ magnétique terrestre perturbé et les protons ne cessent d'arriver, même lorsque l'atténuation des rayons cosmiques au cours de la décroissance de Forbush est observée.

Le champ magnétique joue donc un rôle très important dans tous les phénomènes de l'atmosphère supérieure. En fait, l'analyse du champ géomagnétique et du champ magnétique interplanétaire permet de définir la limite extérieure de l'atmosphère c'est-à-dire la limite de la géomagnétosphère ou géomagnétopause. Celle-ci est située à quelque 14 rayons terrestres du centre de la Terre. Dans le domaine de la géomagnétosphère, le Pioneer V a décelé un courant annulaire centré à 10 rayons terrestres et d'une extension d'environ 6 rayons terrestres. Ces conditions représentatives du « calme magnétique » sont complètement modifiées lorsqu'un orage magnétique apparaît à la surface de la Terre. En effet, Pioneer V a montré que tout l'espace interplanétaire participe à la perturbation provoquée par le Soleil.

#### AUTRES ASPECTS DES RECENTES DECOUVERTES

Il y aurait lieu de rappeler d'autres aspects des récentes découvertes que nous ont apportées les satellites sur l'atmosphère neutre, l'atmosphère ionisée, le champ géomagnétique, le rayonnement cosmique, la poussière cosmique, etc. Malheureusement, il n'est pas possible d'indiquer tous les résultats. Il faut d'abord souligner que le choix parmi les observations exige une analyse approfondie afin d'en tirer des conclusions suffisamment sûres. En outre, il faut tenir compte d'effets insoupçonnés comme celui du rayonnement corpusculaire permanent du Soleil sur lequel on n'a que des vues théoriques. Est-il toujours présent comme certains le supposent avec des vitesses de l'ordre de 300 km par seconde lors du minimum d'activité solaire et de 500 km par seconde au cours du maximum? Ou bien n'apparaît-il que lors de perturbations? Une réponse viendra bientôt, qui fixera des conditions aux problèmes qui se posent au-delà de l'atmosphère terrestre; c'est-à-dire à ceux liés aux atmosphères des autres planètes. En bref, le problème fondamental à résoudre est lié à la connaissance de la nature du milieu physique séparant l'atmosphère du Soleil de celle des planètes. S'agit-il d'un milieu interplanétaire indépendant ou s'agit-il d'un milieu de transition entre la couronne solaire et les couronnes planétaires? L'avenir, en nous donnant la réponse démontrera en même temps, comment ce nouveau laboratoire qu'est l'Espace, permet d'effectuer des expériences conduisant à la découverte de nouveaux phénomènes.