

I N S T I T U T   D . A E R O N O M I E   S P A T I A L E   D E   B E L G I Q U E

3 - Avenue Circulaire

B - 1180 BRUXELLES

# AERONOMICA ACTA

A - N° 125 - 1974

Aëronomie

door

M. NICOLET

B E L G I S C H   I N S T I T U U T   V O O R   R U I M T E - A E R O N O M I E

3 - Ringlaan

B - 1180 BRUSSEL

## VOORWOORD

"Aëronomie" is de nederlandse vertaling door Mr. Noel Constant van de franse tekst geschreven in 1969. Deze vertaling wordt gevolgd door de originele tekst van Mr. Noel Constant en bevat een voorbericht, een inleiding, een critische nota en een bibliografie.

## AVANT-PROPOS

"Aëronomie" est la traduction néerlandaise faite par Mr. Noel Constant du texte français écrit en 1969. Elle est suivie du texte original de Noel Constant comprenant Préface-Introduction - Note critique et Bibliographie.

## FOREWORD

"Aëronomie" is the Dutch translation by Mr. Noel Constant of the French text which was written in 1969. It is followed by the original text by Noel Constant including a foreword, an introduction, a critical note and a bibliography.

## VORWORT

"Aëronomie" ist die niederländische Übersetzung von Herrn Noel Constant, eines französischen Textes der in 1969 geschrieben worden ist. Diese Übersetzung wird gefolgt durch den originellen Text von Herrn Noel Constant und enthält ein Vorwort, eine Einleitung, eine kritische Note und eine Bibliographie.

# AERONOMIE

door

M. NICOLET

<u>INHOUDSTAFEL</u>	<u>Blz.</u>
Inleiding	2
Algemene kenmerken van de atmosfeer	3
De atmosferische gebieden	3
Samenstelling van de atmosfeer	8
De luchtdruk	10
De temperatuur	13
Visuele en fotografische waarnemingen	14
Vallende sterren	15
Het poollicht	16
Lichtende nachtwolken	18
Spectroscopische waarnemingen	18
De spectroscopische analyse	18
Het poollicht	19
Het nachtgloren	26
Ionosferische waarnemingen	36
De peiling van de ionosfeer	36
Schema van de ionosfeer	41
De normale E-laag	41
De F <sub>2</sub> -laag	45
De F <sub>1</sub> -laag	48
De D-laag	52
Boven de F-laag	57
De homosfeer	60
De chemosfeer	66
De ionosfeer	93
De exosfeer	115

## INLEIDING

Tot na de tweede wereldoorlog was de studie van de opper-atmosfeer van de aarde bijna uitsluitend gebaseerd op de analyse van de resultaten van niet rechtstreekse peilingen door middel van procédés zoals de spectrografie en de radio-elektriciteit. Voordien bestonden er slechts indirecte methoden, b.v. het aardmagnetisme of gewoonweg elementaire werkwijzen als zintuiglijke en fotografische waarnemingen van verschijnselen als lichtende nachtwolken, vallende sterren en poollichten. Dank zij de spectrograaf werd het echter mogelijk de poollichtemissies en zelfs het veel zwakkere nachtgloren te analyseren. Uit een ontleding van het spectrum kunnen we inderdaad afleiden welke atomen en moleculen verantwoordelijk zijn voor een bepaalde licht-uitstraling en bijgevolg gegevens bekomen over de samenstelling van de opper-atmosfeer.

Sedert ongeveer dertig jaar kunnen we dank zij "ionosferische peilers" golven met verschillende frequenties uitzenden die worden weerkaatst in de hoogste elektronische lagen van de atmosfeer en kunnen we aldus inlichtingen inwinnen over de fysische samenstelling van verscheidene gebieden waarin de weerkaatsing van de golven plaatsvindt. Sinds 1945 beschikken we echter over een ander observatiemiddel dan de indirecte spectrografische of radio-elektrische peiling, namelijk de directe peiling door middel van raketten met aan boord wetenschappelijke instrumenten die de mogelijkheid bieden op elke hoogte metingen uit te voeren.

De kunstsatellieten tenslotte, waarvan de eerste werd gelanceerd tijdens het Internationaal Geofysisch Jaar (1957-1958), behoren nu tot de permanente onderzoeksmiddelen van de aardatmosfeer. Daarom hebben we in het begin van het ruimtetijdperk een buitengewone ontwikkeling meegemaakt van de studie van het geheel van de fysische en chemische eigenschappen van de opper-atmosfeer waar de verschijnselen van moleculaire dissociatie en atomaire ionisatie een zeer voorname rol spelen; dat is trouwens het object van de aeronomie ( $\alpha\eta\rho$  - νομός, lucht - wet).

## ALGEMENE KENMERKEN VAN DE ATMOSFEER

### DE ATMOSFERISCHE GEBIEDEN

We zullen eerst de belangrijkste gebieden van de atmosfeer definiëren volgens de verticale temperatuurverdeling vooraleer de resultaten te beschrijven die we bekomen door de verschillende waarnemingsmethodes. Die lagen zijn : de troposfeer, de stratosfeer, de mesosfeer, de thermosfeer en de exosfeer (figuur 1).

In de meteorologische opzoekingen werd na Teisserenc de Bort de gewoonte aangenomen twee gebieden te onderscheiden : de troposfeer en de stratosfeer.

De troposfeer (τροπός, wending, omkering) is het atmosferisch gebied in contact met de aardbodem. Zij is de zetel van de hydrometeoren (bewolking, regen, sneeuw enz.) en wordt in het algemeen gekenmerkt door een temperatuu-  
rdaling van  $6^{\circ}$  per km. De bovenste begrenzing van de troposfeer heeft de naam gekregen van tropopauze (παύσις, het doen ophouden); de hoogte ervan bedraagt ongeveer 17 km aan de evenaar en slechts 6 tot 8 km aan de polen. Op de gemiddelde breedten verandert de hoogte van die begrenzingszone met de atmosferische omstandigheden; meer bepaald, in de hoge-drukgebieden (anticyclonen) bedraagt zij 13 km en in de depressiegebieden kan zij teruglopen tot minder dan 7 km.

De stratosfeer (stratum, het uitgebreide) is een atmosferische laag die we nog door meteorologische peilingen bereiken. In de onderste regionen wordt zij gekenmerkt door een vaste temperatuur of door een langzame temperatuurstijging met de hoogte. Vervolgens neemt de temperatuur sneller toe en bereikt tenslotte een maximum van  $0^{\circ}\text{C}$  op ongeveer 50 km hoogte waar zich de grens van de stratosfeer of stratopauze bevindt. De temperatuur van de stratopauze varieert niet zoals die van de tropopauze, die grosso-modo afneemt van  $-50^{\circ}\text{C}$  aan de pool tot ongeveer  $-85^{\circ}\text{C}$  aan de evenaar. Nochtans komt er een temperatuurverandering voor met de breedte en de seizoenen (zie figuur 2). De scheiding tussen de troposfeer en de stratosfeer is reëel, want we kunnen zeggen dat de uitwisseling van de troposferische en de stratosferische lucht verscheidene maanden, zometert verscheidene

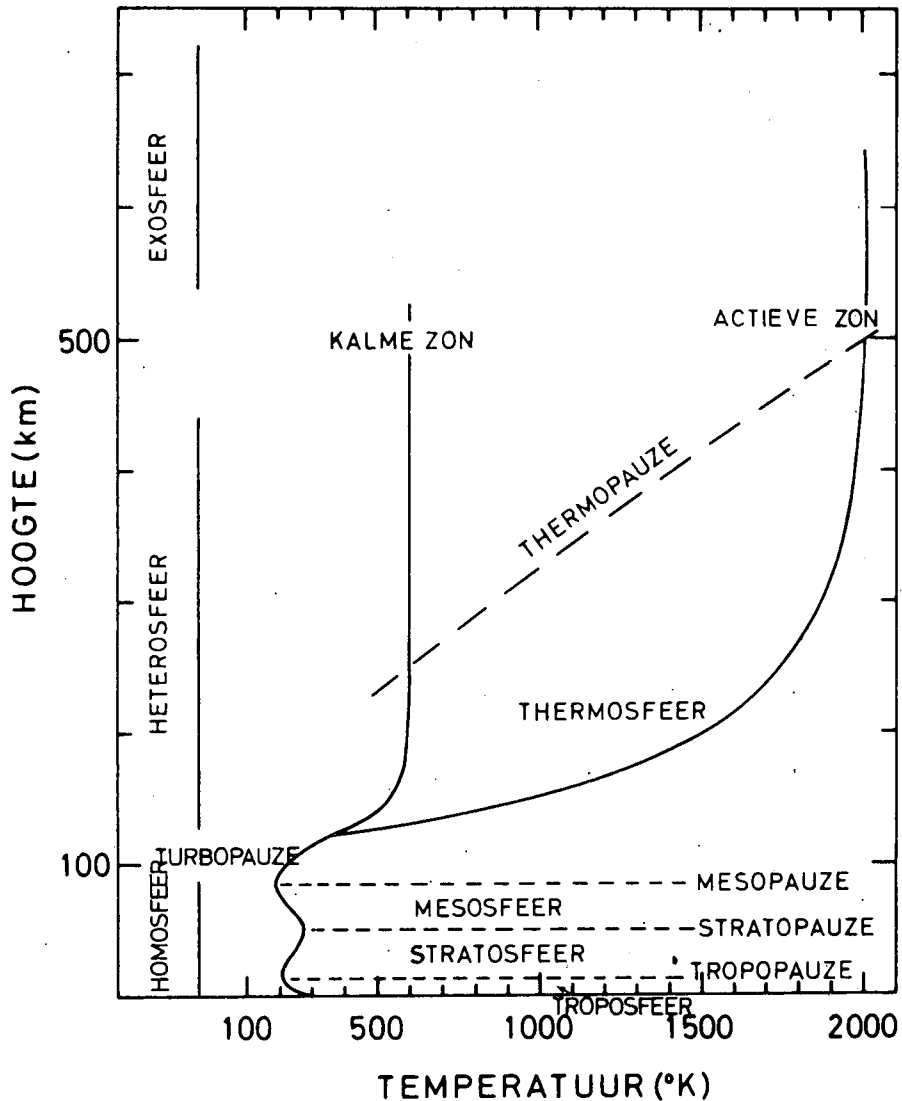


Fig. 1.- Schema met de verschillende atmosferische gebieden en hun overgangszones volgens de verticale verdeling van de temperatuur of volgens de verticale verdeling van samenstelling en vorming. In de thermosfeer treden veranderingen op die gebonden zijn aan de zonneactiviteit. Zo is de verandering van de thermopauze een merkwaardige maatstaf ; het temperatuurverschil tussen het laagste minimum 's nachts en het hoogste maximum tijdens een elfjarige cyclus van zonneactiviteit kan ongeveer  $1500^{\circ}\text{C}$  bedragen.

jaren vergt. Dat toont aan dat de luchtcirculatie in de stratosfeer verschillend is van de luchtcirculatie in de troposfeer.

Boven de 50 km bevinden we ons in de mesosfeer ( $\mu\epsilon\sigma\omicron\varsigma$ , wat in het midden is), in een gebied dat wordt gekenmerkt door een snelle daling van de temperatuur, die in het algemeen een uiterste minimum bereikt op 85 km hoogte. Dat laagtepunt kan in de zomer en op hoge breedten overeenstemmen met temperaturen lager dan  $-100^{\circ}\text{C}$ . Zoals de troposfeer is ook de mesosfeer onderworpen aan sterke temperatuurschommelingen die gebonden zijn aan de breedte en aan het seizoen. Het gewone niveau van de minimum temperatuur wijst op een scheiding in de atmosfeer, die mesopauze wordt genoemd.

Boven de mesopauze komen we in de operatmosfeer die totaal anders is dan de lagere gebieden. Eerst hebben we de thermosfeer die wordt gekenmerkt door een voortdurende stijging van de temperatuur tot  $500^{\circ}\text{C}$  bij geringe zonneactiviteit en tot meer dan  $1500^{\circ}\text{C}$  bij sterke zonneactiviteit. Op de hoogte waar de temperatuurverhoging ophoudt, bereiken we aldus de thermopauze, de basis van een isothermisch gebied dat zich zou verlengen tot de interplanetaire ruimte als de normale eigenschappen van een gas in hydrostatisch evenwicht zouden behouden blijven. In werkelijkheid wordt vanaf een bepaald niveau dat "kritiek niveau" wordt genoemd, de frequentie van de botsingen tussen de atomen van het atmosferisch gas te gering en moeten zij beschouwd worden als atomen met een eigen baan. We zijn dan terechtgekomen in de exosfeer ( $\epsilon\omega\varsigma$ , buiten) waar de fysische eigenschappen moeten worden onderzocht in het kader van de studie van de beweging van deeltjes die aan de zwaartekracht onderworpen zijn en die zelfs uit de atmosfeer kunnen ontsnappen. In de exosfeer heeft de temperatuur haar gewone betekenis verloren.

Als we de verschillende gebieden die we achtereenvolgens hebben beschreven, volgens hun samenstelling beschouwen, rekening houdend met de verticale temperatuurverdeling, dan stellen we vast dat de eerste drie lagen, de troposfeer, de stratosfeer en de mesosfeer dezelfde algemene samenstelling hebben. Met andere woorden, het troposferisch mengsel van moleculaire stikstof en moleculaire zuurstof wordt in de stratosfeer en de mesosfeer behouden. Zo zijn we in de homosfeer ( $\omicron\mu\omicron\varsigma$ , gelijk, dezelfde). Op een hoogte van 100 km, in de thermosfeer, constateren

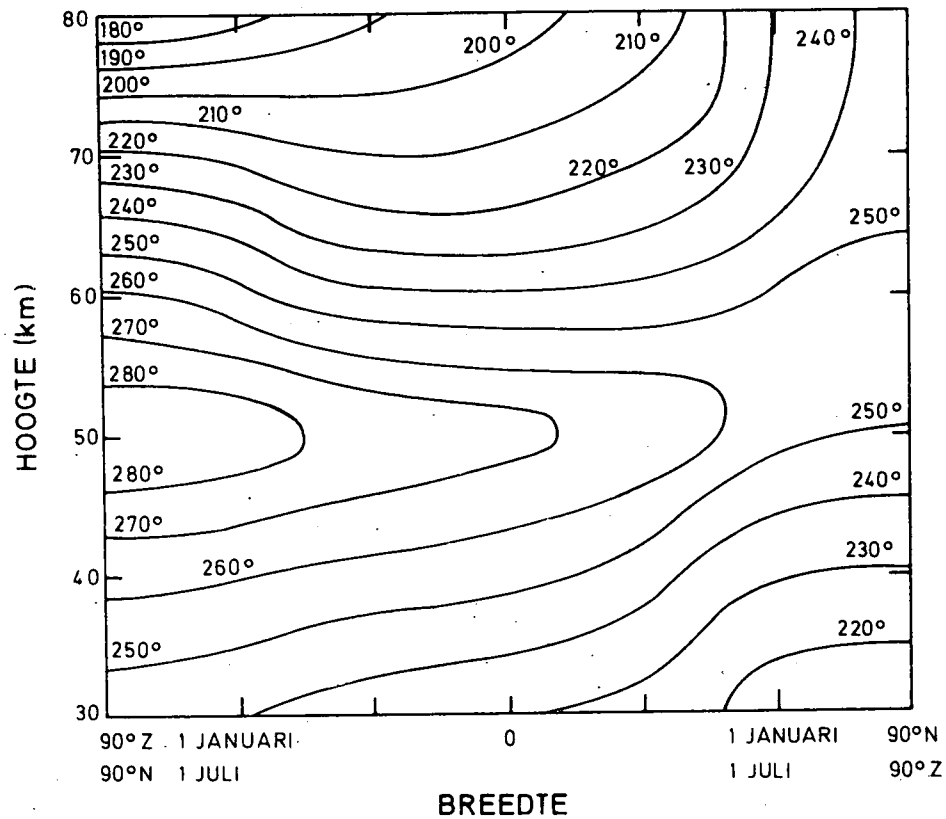


Fig. 2.- Verdeling van de temperatuur in de stratosfeer en in de mesosfeer. De maximale temperatuur komt voor in de stratopauze op ongeveer 50 km hoogte. De verdeling volgens breedte wordt afgebeeld in een halfrond (het noordelijke of het zuidelijke) tijdens de maand januari of juli.



we dat de moleculaire zuurstof een sterke dissociatie heeft ondergaan en dat atomaire zuurstof een belangrijk element van de atmosferische samenstelling is. We bevinden ons dan in de heterosfeer (Etepos, anders), die trouwens op grote hoogten gekenmerkt wordt door de aanwezigheid van lichte atomen zoals helium en waterstof. De heterosfeer wordt gekarakteriseerd door een relatieve toeneming van de lichte atomen zoals waterstof en helium ten opzichte van de zware atomen zoals stikstof en zuurstof. Dat komt omdat het doorenmengen van de lucht, dat vooral gebeurt door de diffusie van de gassen in het zwaartekrachtsveld, op die hoogte ophoudt. Dat overgangsgebied (100 - 110 km) is de turbopauze waar een element zijn eigen verticale verdeling kan beginnen volgen in plaats van die van de algemene atmosfeer.

Rekening houdend met het feit dat de normale eigenschappen van de hydrostatica niet meer van toepassing zijn boven het kritiek niveau, kunnen we zeggen dat de heteropauze samenvalt met het kritiek niveau, waar de exosfeer begint.

Tenslotte moeten we in aanmerking nemen dat boven een bepaald niveau de atmosfeer onderworpen is aan de ultraviolette straling, aan de X-stralen en aan de zonnedeeltjes. Daaruit volgt een productie van ionen en elektronen, dat wil zeggen een productie van elektrisch geladen deeltjes die afkomstig zijn van de verschillende atomen en moleculen uit de atmosfeer. Zo komen we in de ionosfeer, die zich uitstrekt van de mesosfeer tot aan de grenzen van de atmosfeer. De geladen deeltjes zijn echter onderworpen aan het aardmagnetisch veld en hun aëronomisch gedrag is van dan af anders dan dat van de neutrale deeltjes. Zolang de druk voldoende hoog is, legt de neutrale atmosfeer haar wetten op aan de ionosfeer. Dat is het geval in de mesosfeer en in het grootste gedeelte van de thermosfeer. Van zodra de verhouding tussen het aantal geladen deeltjes en het aantal neutrale deeltjes echter niet meer te verwaarlozen is, neemt de ionosfeer haar eigen natuur aan waarbij we rekening moeten houden met het elektrisch veld dat de positief geladen deeltjes (ionen) verbindt met de negatief geladen deeltjes (elektronen). Wanneer de energie van de geladen deeltjes groter is dan die welke overeenstemt met de thermische snelheden en wanneer die deeltjes zich bewegen binnen de krachtlijnen van het aardmagnetisch veld, zijn we in de

magnetosfeer. Dat uitgebreid gebied is vooral verbonden met de interplanetaire ruimte waar de geladen deeltjes, afkomstig van de zon (zonnwind), zich verspreiden. Daarom wordt er rekening gehouden met een poollichtzone die wegens haar vorm poollichtovaal wordt genoemd en die wordt gekenmerkt door de geconcentreerde verschijning van het poollicht die voortkomen uit een toevloed van geladen deeltjes. Binnen de poollichtovaal, namelijk de poolkap, brengen de zonneprotonen een bijzondere ionisatie teweeg. Op die wijze wordt de atmosfeer ook geografisch verdeeld als gevolg van de aanwezigheid van het aardmagnetisch veld.

### SAMENSTELLING VAN DE ATMOSFEER

De lucht die wij inademen heeft een welbepaalde chemische samenstelling. Zij bestaat uit moleculaire stikstof  $N_2$  (78,1% in volume), moleculaire zuurstof  $O_2$  (21%), argon (0,9%) en een kleine hoeveelheid kooldioxyde  $CO_2$  (0,03%). De atmosfeer bevat eveneens een zwak en bovendien zeer veranderlijk gehalte van waterdamp ( $H_2O$ ). Daarbij bevinden er zich ook nog sporen van methaan ( $CH_4$ ), distikstofoxyde ( $N_2O$ ), koolmonoxyde (CO), waterstof ( $H_2$ ) en ozon ( $O_3$ ) (figuur 3).

In de meteorologie wordt enkel de droge lucht beschouwd die samengesteld is uit zuurstof, stikstof en argon, waarvan het gehalte niet verandert, alsook de vochtige lucht waarin water onder verscheidene gedaanten voorkomt. In de aëronomie echter kunnen zelfs de bestanddelen die slechts sporadisch aanwezig zijn een even belangrijke fysische rol spelen als de meest voorkomende gassen.

Zo speelt ozon een essentiële rol in de mesosfeer waar het nochtans 10.000 maal minder voorkomt dan in de stratosfeer. De reactie van ozon met het waterstofatoom produceert het aangeslagen radicaal OH dat de sterkste emissie van het nachtgloren veroorzaakt. Anderzijds spelen stikstofoxydes een rol in de stratosfeer en in de mesosfeer terwijl de vorming ervan voortkomt uit het ontstaan van de stikstofmonoxydemolecule (NO) binnen de thermosfeer als gevolg van scheikundige en ionenreacties waarover wij het later zullen hebben.

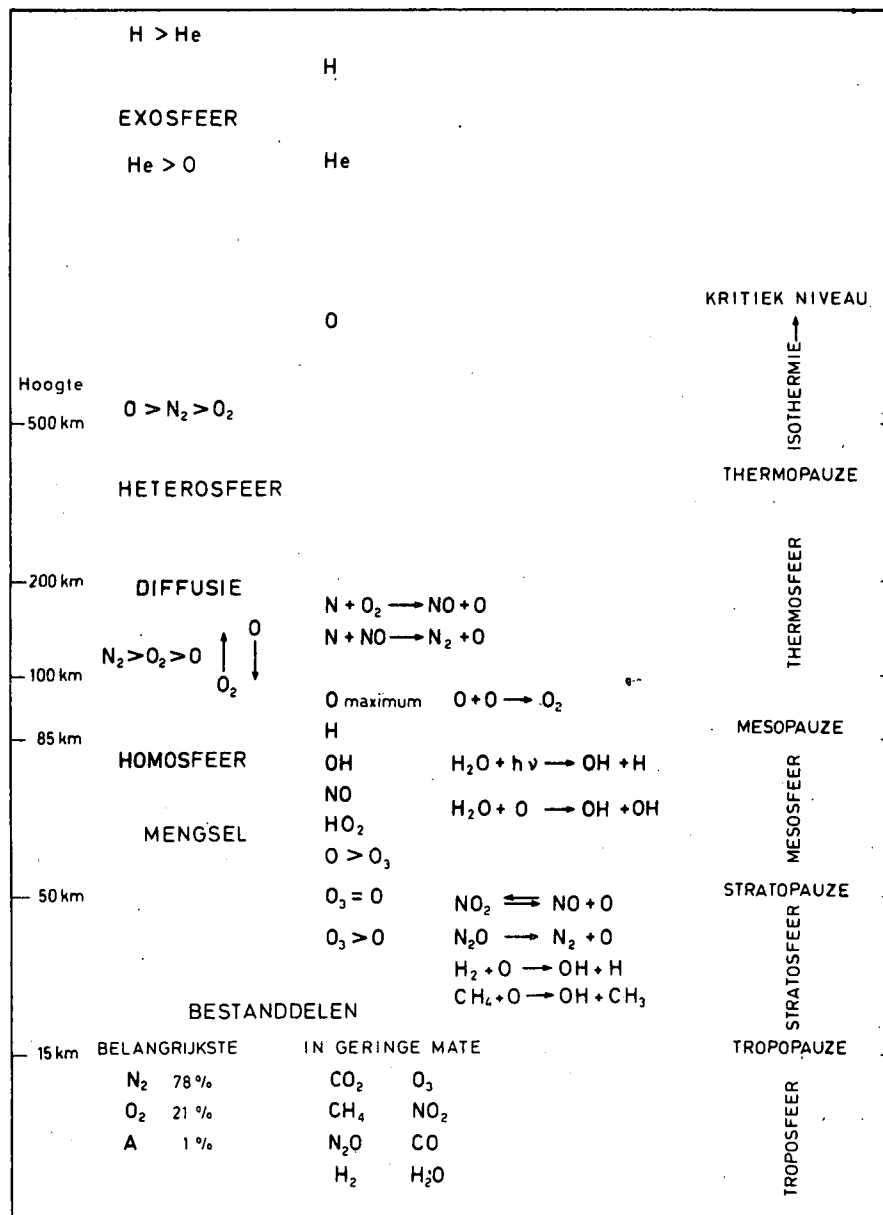


Fig. 3.- Verdeling van de belangrijkste samenstellingen en van de samenstellingen die in zeer geringe mate voorkomen in de homosfeer, de heterosfeer en de exosfeer.

We moeten nochtans beklemtonen dat de moleculaire massa van de atmosfeer niet afhangt van bovenvermelde moleculen die slechts in geringe mate voorkomen. Inderdaad, zolang het mengsel blijft bestaan als gevolg van het voldoende doorenmengen van de lucht, kunnen we zeggen dat het hoofdzakelijk is samengesteld uit moleculaire stikstof en moleculaire zuurstof. Het is slechts vanaf het niveau waar de moleculaire diffusie de overhand heeft op de turbulente diffusie dat we een relatieve verarming van de  $O_2$  en  $N_2$  moleculen noteren ten opzichte van het zuurstofatoom (O). Inderdaad, de massa van het zuurstofatoom is in relatieve eenheden 16; de massa van moleculaire zuurstof daarentegen 32 en die van moleculaire stikstof 28. Boven de 100 km komt de massa van een toenemende hoeveelheid atomaire zuurstof geleidelijk in de plaats van de gemiddelde massa van homosferische lucht, die gelijk is aan 29. En bovendien worden de elementen, die zeldzaam zijn in de homosfeer (zoals helium, 5 miljoensten van de lucht op de aardbodem en waterstof, 1 miljoenste van de lucht op de aardbodem, hier nogal talrijk. Dat is te wijten aan het feit dat door de geringe massa (4 voor helium en 1 voor waterstof), de concentratie van die atomen heel wat trager afneemt dan die van zuurstof en stikstof in de heterosfeer waar ieder element afzonderlijk onderworpen is aan het zwaartekrachtsveld. Tenslotte is de atmosfeer aan zijn uiterste begrenzing samengesteld uit waterstofatomen. Zo zullen we bij toenemende hoogte in de heterosfeer de gordels van moleculaire stikstof en moleculaire zuurstof, van atomaire zuurstof, van helium en tenslotte die van waterstof ontmoeten.

#### DE LUCHTDRUK

De luchtdruk is het gewicht van de luchtkolom boven de waarnemingsplaats. Hij hangt af van de massa van de belangrijkste bestanddelen. Zolang de samenstelling niet verandert, kunnen we de atmosferische eigenschappen bepalen in functie van de hoogte door de luchtdruk te meten (door middel van raketten).

De wet van de drukverandering (atmosferische statica) wordt uitgedrukt door de formule  $dp = \rho g dz$ ; de drukverandering  $dp$  is recht evenredig met de dichtheid  $\rho$  van de lucht en met de dikte  $dz$  van de laag. De factor  $g$  geeft de versnelling van de zwaartekracht aan. Daar de lucht met een zeer goede benadering

de wet van de ideale gassen volgt, kunnen we zeggen :  $p = nkT$ ; de druk  $p$  is recht evenredig met het aantal moleculen  $n$  en met de absolute temperatuur  $T$ . De evenredigheidsfactor  $k$  wordt constante van Boltzmann genoemd.

Aangezien de dichtheid ( $\rho = nm$ ) gelijk is aan het produkt van het aantal moleculen ( $n$ ) met hun gemiddelde massa ( $m$ ), kunnen we met behulp van de vergelijkingen van de atmosferische statica en van de ideale gassen, de atmosferische eigenschappen vaststellen in functie van de hoogte als we de druk meten of als we de dichtheid bepalen.

Als we gemiddelde waarden van de dichtheid beschouwen, kunnen we zeggen dat de dichtheid afneemt van een duizendste van een gram per  $\text{cm}^3$  ( $10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$ ) nabij het aardoppervlak tot ongeveer een miljardste van een gram per  $\text{cm}^3$  ( $10^{-9} \text{ g cm}^{-3}$ ) op ongeveer 100 km, d.w.z. een afneming met een factor 1.000.000 van 0 tot 100 km (figuur 4). Van 100 tot 150 km hoogte, neemt de dichtheid nog eens af met een factor 1000; zij bedraagt dan  $10^{-12} \text{ g cm}^3$ . We stellen echter vast dat als we een afneming met een factor 1.000.000 vanaf 150 km hoogte willen bekomen, we tenminste een hoogte moeten bereiken van 1500 km ( $10^{-18} \text{ g cm}^3$ ) of  $10^{-15}$  keer de waarde van de dichtheid nabij het aardoppervlak (figuur 4). We zien derhalve dat op grote hoogten de dichtheid en de druk langzaam afnemen vooreerst als gevolg van de temperatuurverhoging en vervolgens door de vermindering van de moleculaire massa met de hoogte.

We constateren dat de dichtheid 's nachts veel geringer is dan bij dag, wat te wijten is aan een dagelijkse temperatuurverandering. Sedert de operatmosfeer voortdurend gecontroleerd wordt door de waarneming van de satellieten, werd aangetoond dat de zonneactiviteit zich manifesteert in de druk- en dichtheidsveranderingen als gevolg van de temperatuurwisselingen. Er werd vastgesteld dat van 1958 (sterke zonneactiviteit) tot 1964 (geringe zonneactiviteit) de dichtheid op 750 km hoogte met een factor 100 is afgenomen; op 200 km daarentegen met niet meer dan 50%.

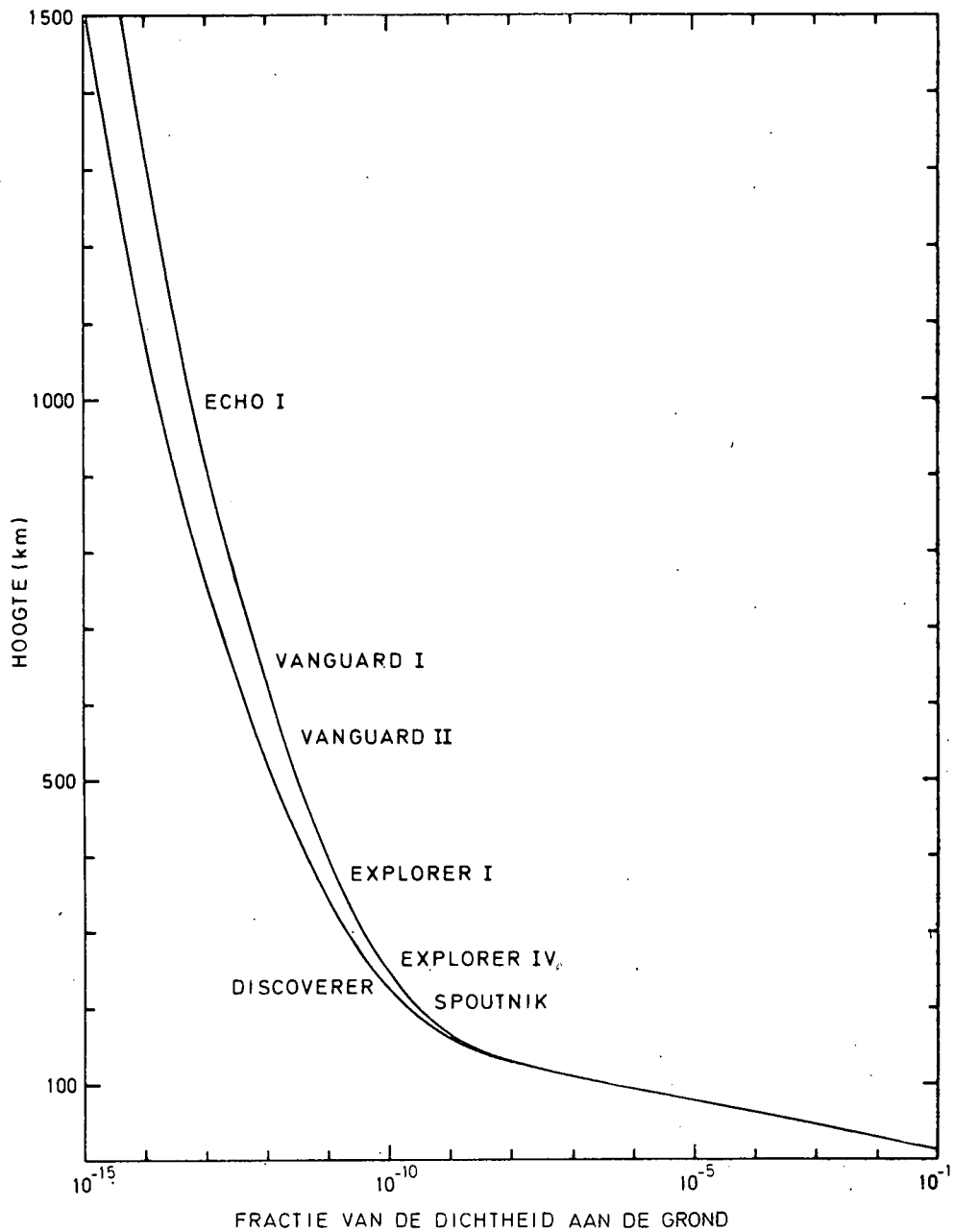


Fig. 4.- Verandering van de dichtheid zoals ze werd vastgesteld door de studie van de afremming die door de atmosfeer werd veroorzaakt op de eerste kunstmatige satellieten (Spoetniks, Explorers en Vanguards tot en met Echo I) waarvan het perigeum schommelde tussen 220 km en 1500 km. Boven 150 km hoogte komen er twee krommen voor om de veranderingen die werden waargenomen volgens de omstandigheden van de zon, te benadrukken.

## DE TEMPERATUUR

Wanneer we zeggen dat de temperatuur  $0^{\circ}\text{C}$  bedraagt op de aardbodem of op 50 km hoogte, ofwel  $1000^{\circ}\text{C}$  op 500 km hoogte, dan blijft de fysische betekenis dezelfde en zou het fout zijn te gaan denken aan verschillende begrippen. Het is overduidelijk dat de thermometer die in de meteorologie gewoonlijk wordt gebruikt niet gevoelig genoeg zou zijn voor het meten van de juiste temperatuur van de lucht op grote hoogten. Trouwens reeds op het aardoppervlak zijn veel voorzorgsmaatregelen vereist om een nauwkeurige meting van de temperatuur van de lucht te bekomen.

De kinetische gastheorie toont aan dat de gasmoleculen zeer snel door elkaar bewegen met een snelheidsverdeling die toelaat met elke vooropgestelde temperatuur een gemiddelde snelheid te associëren. Wanneer de botsingen zeer talrijk zijn, is er een gelijkmatige verdeling van de energie tussen de verschillende soorten moleculen, wat aanleiding geeft tot een welbepaalde temperatuur. Als we zeggen dat de temperatuur  $0^{\circ}\text{C}$  bedraagt op de aardbodem, op 50 en op 100 km hoogte, bevestigen we dat de kinetische energie van de moleculen op die niveaus identiek is, want het aantal botsingen is voldoende om een gelijkmatige verdeling van de energie te verzekeren. Bijgevolg zouden ideale thermometers (die onmiddellijk in evenwicht zijn) dezelfde gegevens verstrekken. Aangezien zulke thermometers in de praktijk niet realiseerbaar zijn, worden indirecte procédés gebruikt die gebaseerd zijn op de vaststelling van de druk en op de wet van de ideale gassen.

Tot op dit ogenblik waren de meeste vaststellingen gesteund op de daling van de totale atmosferische dichtheid af van de dichtheid van een bepaald element. Om het afremmen van de kunstsatellieten te verklaren worden de gepaste dichtheidswaarden bepaald. Door de verandering van de dichtheid met de hoogte in aanmerking te nemen en door een hypothese te maken over de natuur van de bestanddelen, kunnen we de temperatuur berekenen. Als we ons beperken tot de verticale verdeling van een element zoals moleculaire stikstof, kunnen we de temperatuur rechtstreeks afleiden. Door een permanente studie kunnen we op die wijze vaststellen dat boven

150 km hoogte de temperatuur onderworpen is aan grote schommelingen. De dagelijkse verandering uit zich door een temperatuur die 's nachts 30% tot 40% lager is dan overdag; de verwarming door de zon bij dag wordt gevolgd door een afkoeling 's nachts. Aangezien de ultraviolette zonnestraling varieert gedurende een cyclus van zonneactiviteit zullen we in de operatmosfeer de effecten ervan terugvinden onder de vorm van temperatuurwijzigingen. In de loop van het jaar 1964, dat overeenkwam met een geringe activiteit, bedroeg de minimum temperatuur in de thermopauze aldus ongeveer 500°C tijdens de dag en ongeveer 300°C 's nachts. In 1958 echter, bij een belangrijke sterke zonneactiviteit bereikten de temperaturen overdag en 's nachts respectievelijk ongeveer 1500°C en 1000°C.

Vanaf het kritiek niveau verliest de temperatuur natuurlijk haar gewone betekenis omdat de atomen hun kinetische baan volgen wanneer ze bijna geen botsingen meer ondergaan. Daarom moeten we in aanmerking nemen dat als de atomen bij eenzelfde temperatuur dezelfde energie bezitten, zij niet dezelfde snelheid hebben; die hangt af van hun massa. De lichte atomen bewegen zich veel sneller dan de zware atomen; bij eenzelfde energie heeft waterstof een snelheid die tweemaal zo hoog is als die van helium, dat zelf al gekenmerkt wordt door een snelheid die dubbel zo hoog is als die van atomaire zuurstof. Daarom kan in de exosfeer een licht atoom als waterstof omwille van zijn snelheid die viermaal hoger ligt dan die van atomaire zuurstof uit de aardatmosfeer ontsnappen terwijl deze laatste altijd onderworpen blijft aan het zwaartekrachtsveld.

#### VISUELE EN FOTOGRAFISCHE WAARNEMINGEN

De visuele en fotografische waarnemingen verschaffen niet zoveel inlichtingen over de fysische eigenschappen van de operatmosfeer. Het essentiële van onze kennis werd inderdaad slechts verworven door spectroscopische en radio-elektrische waarnemingen. Nochtans is het interessant iets te zeggen over de belangrijkste resultaten die door de visuele of fotografische methode werden geboekt.



## VALLENDE STERREN

Vallende sterren komen afzonderlijk of gezamenlijk in zwermen voor. Het zijn meteorieten die door het contact met de luchtmoleculen gloeiend en aldus zichtbaar worden.

De snelheid van vallende sterren in de atmosfeer ligt tussen 12 en 72 km per seconde volgens de richting van hun afkomst. Aangezien de baansnelheid van de aarde 30 km per seconde en de uiterste snelheid van de meteorieten op een ellipsvormige baan 42 km per seconde bedraagt, stellen we vast dat, naargelang van de plaats en de excentriciteit van de zwerm, de penetratiesnelheid kan variëren tussen de bovenvermelde ver uit elkaar liggende grenzen.

Door triangulatie heeft men de punten bepaald waar de vallende sterren verschijnen of verdwijnen en heeft men het verschijnsel kunnen situeren op hoogten begrepen tussen 80 en 120 km. Steunende op de fysische processen die het gloeien verklaren evenals de emissie van lichtenergie, ontstaan door het contact van de meteorieten met de luchtmoleculen, werd de vereiste orde van grootte der luchtmoleculen berekend. Een van de belangrijkste conclusies is geweest dat, om adequate gegevens te bekomen, de temperatuur wel moest stijgen in de gehele atmosfeer.

Een waarnemingsresultaat waaraan nu echter veel belang wordt gehecht is de verandering die de achtergelaten sporen ondergaan : eerst zijn zij rechtlijnig, daarna worden ze vervormd en tenslotte worden ze volledig verwrongen vooraleer te verdwijnen. Dat verschijnsel spruit voort uit de atmosferische bewegingen die in de buurt van de mesopauze bestaan. Het toont aan dat de atmosfeer ook op die niveaus onderworpen blijft aan turbulentie die het doorenmengen van de lucht en aldus het behoud van de normale samenstelling in de homosfeer veroorzaakt. De studie van de meteorieten is thans echter uitsluitend gebaseerd op de methode van radio-elektrische plaatsbepaling (radar).

## HET POOLLICHT

Het poollicht werd al meer dan 2000 jaar geleden waargenomen aan de kusten van de Middellandse Zee. De naam noorderlicht werd in 1621 door Gassendi gegeven aan een uitzonderlijk lichtverschijnsel dat 's nachts aan de hemel voorkwam ; de naam zuiderlicht ontstond als gevolg van de eerste waarneming van een poollicht in het zuidelijk halfrond door Cook 150 jaar later (1773).

De ontdekking van het elektron leidde de Noorse fysicus Birkeland ertoe in 1896 de eerste rationele theorie van het poollicht op te stellen. Hij verklaarde het verschijnsel door elektronen die door de zon worden uitgezonden, in het aardmagnetisch veld binnendringen en naar de poolstreken afwijken.

Het poollicht komt onder verschillende vormen voor en sedert de eerste waarnemingen is er een indeling gemaakt die thans nog in de poollichtatlassen te vinden is. Het poollicht heeft drie belangrijke vormen. In de eerste plaats zijn er de homogene bogen : zij zijn groenachtig, hebben een tamelijk gelijkmatige intensiteit, verplaatsen zich zeer langzaam en zijn ongeveer drie km breed. Verder zijn er diffuse plekken die op zeer verscheidene plaatsen aan de hemel verschijnen. De derde vorm tenslotte bestaat uit bogen met min of meer verticale stralen die vlug verschijnen en verdwijnen. Zeer dikwijls lijkt die vorm op bewegende gordijnen aan de hemel.

Het poollicht verschijnt gewoonlijk onder de vorm van een of meer homogene bogen of van banden in de poollichtovaal. Die bogen kunnen zich uitbreiden over duizenden km; in uitzonderlijke gevallen bereiken ze 10.000 km door de geomagnetische pool in een relatief smalle ovaal te omringen. Het actieve gedeelte van de poollichtontwikkeling manifesteert zich tegelijkertijd door de schittering van het fenomeen, de verschijning van stralen en de uitbreiding naar de gemiddelde breedten. Op dat ogenblik kan het poollicht een relatief brede gordel omvatten die zich uitstrekt naar het noorden en tevens naar het zuiden van de poollichtovaal. Die uitbreidingsfase van het poollicht wordt dan gevolgd door een inkrimpingsfase in lengte en in breedte, die echter dikwijls minder vlug gebeurt dan de eerste fase.

Uiteindelijk verschijnt de oorspronkelijke boog opnieuw met nog meer diffuse plekken die aan de hemel wazig worden.

Reeds in 1892 kon men foto's nemen van de poollichten; maar slechts na 1910 begon Stürmer met zijn systematische studie over de bepaling van de ruimtelijke ligging van het verschijnsel. De maximum breedte ligt tussen 100 en 110 km maar gewoonlijk bedraagt de gemiddelde breedte 50 km. Dat statistisch resultaat betreft nochtans de meest gewone vormen. Poollichten kunnen op uitzonderlijk lage hoogten verschijnen, maar niet lager dan 70 km. De merkwaardigste poollichten komen in feite voor onder de vorm van draperieën en vooral van stralen waarvan de top hoogten van 800 tot 1000 km kan bereiken. In dat geval verschijnen de poollichtstralen bijna uitsluitend in een atmosfeer die nog door de zon wordt verlicht.

De fotografische waarneming van de poollichten levert aldus een belangrijke bijdrage tot onze kennis van de opperatmosfeer want zij bevestigt het bestaan van moleculen en atomen tot op een hoogte van tenminste 1000 km. Daarbij maakt zij het mogelijk de werking van de deeltjes die door de zon worden uitgezonden, te bestuderen door een statistische analyse van de dagelijkse en jaarlijkse veranderingen en van de geografische verdeling.

De algemene fotografische studie die tijdens het Internationaal Geofysisch Jaar (1957-58) en ook de volgende jaren werd gemaakt, heeft de morfologie van de poollichten beter leren kennen. Dat was vooral het geval met de poollichtovaal die overeenstemt met de zone waarin het poollicht het veelvuldigst voorkomt zowel in het zuidpool- als in het noordpoolgebied; de poollichtovaal werd namelijk vastgesteld op ongeveer  $20^{\circ}$  van de magnetische polen. Tenslotte moet de aandacht er nog op gevestigd worden dat er een merkwaardige statistische relatie bestaat tussen de zonneactiviteit en de verschijning van de poollichten. Bij een geringe magnetische onrust die overeenkomt met geringe zonneactiviteit, is er bijna geen poollicht buiten de poollichtovaal, het veelvuldig verschijnen van het poollicht daarentegen houdt wel degelijk verband met hevige magnetische onrust bij sterke zonneactiviteit.

## LICHTENDE NACHTWOLKEN

We kennen de hele reeks van troposferische wolken waarvoor de meteoroloog zich interesseert en we weten dat er parelmoerachtige wolken in de stratosfeer [boven 20 km hoogte] verschijnen; op grotere hoogten, namelijk in de mesopauze, zijn er echter nog wolken die lichtende nachtwolken worden genoemd. Zij worden gewoonlijk waargenomen tussen 45° en 60° breedte. Enige tijd na het ondergaan van de zon, wanneer deze zich onder de horizon bevindt, kunnen wolken in de schemeringscirkel verschijnen die in de zomer 's nachts bestaat.

De lichtende nachtwolken, waarvan het gewone uitzicht niet veel verschilt van de cirrostratus, vertonen merkwaardige kenmerken. Hun gemiddelde hoogte, vastgesteld langs fotografische weg, is ongeveer 82 km. Hun snelheid bedraagt 50 m per seconde, maar kan 100 m per seconde bereiken en zelfs overschrijden. Zij vertonen soms interne verplaatsingen die kunnen worden vergeleken met verre golfbewegingen die ongeveer 10 km uit elkaar liggen. Over het algemeen wijst hun steeds veranderende vorm op atmosferische bewegingen in de mesopauze.

Alhoewel de oorsprong van die wolken niet volledig bepaald is, kunnen we veronderstellen dat de vorming ervan zowel een stofkern als een voldoende hoeveelheid water onder de vorm van ijskristallen vereist. In ieder geval toont de waarneming van die wolken en de meting van de temperatuur op 85 km hoogte aan dat de temperatuur lager moet liggen dan - 120°C. Zo zouden lichtende nachtwolken gevormd worden door ijskristallen die kernen van kosmische stofdeeltjes omringen; zij kunnen verschijnen wanneer er voldoende waterdamp aanwezig is in de mesopauze en de temperaturen zeer laag zijn. Zulke omstandigheden komen normaal voor in de mesosfeer tijdens de zomer en op hoge breedten.

## SPECTROSCOPISCHE WAARNEMINGEN

### DE SPECTROSCOPISCHE ANALYSE

Sedert het experiment van Newton (1666) weet men hoe het licht moet worden ontleed dat door de sterren of door ieder stralend lichaam wordt uitgezonden.

De moderne spectroscopie maakt het mogelijk de oorsprong van het uitgezonden licht te herkennen, want ieder atoom en iedere molecule vertonen karakteristieke stralingen waarvan de intensiteit afhangt van de fysische omstandigheden van het milieu dat uitzendt. Nochtans moet de spectroscop een groot uitstralingsvermogen hebben voor zwakke helderheden zoals die van het poollicht en vooral die van de nachtelijke hemel. Nu is men ertoe gekomen, net zoals in de gewone fotografie, apparaten te vervaardigen die het licht kunnen analyseren dat door de zwakste bronnen wordt uitgezonden. Alhoewel het poollicht in het donker voorkomt als iets dat schittert, blijkt zijn luminiscentie vrij zwak te zijn als het door de spectroscop wordt ontleed. We zien er enkel een groene straling - de fameuse groene lijn van het poollicht - en enkele andere stralingen die jammer genoeg in een gebied van het spectrum vallen waar het oog niet zeer gevoelig is. Het is ook zeer moeilijk de juiste positie van die stralingen in het spectrum, d.w.z. hun golflengte te bepalen. A.J. Angström was de eerste die in 1869 de groene lijn kon waarnemen en tot in 1912 brachten de meeste visuele waarnemingen weinig bruikbare inlichtingen over het poollichtspectrum. De spectrografen en de fotografische plaat maken het echter mogelijk de positie van de stralingen te bepalen; daardoor werd onmiddellijk ontdekt dat de stralingen die in het blauw (4300 Å) voorkwamen, veroorzaakt werden door de stikstofmolecule. Na dit moeilijke begin heeft de spectroscopische analyse zo'n vooruitgang geboekt dat het thans mogelijk is uiterst belangrijke inlichtingen in te winnen over de samenstelling van de opper-atmosfeer.

### HET POOLLICHT

Wanneer we het poollicht analyseren vinden we er de karakteristieke stralingen terug die door zuurstof en stikstof worden uitgezonden.

Stikstof zendt bandenspectra uit die aantonen dat stikstof onder moleculaire vorm voorkomt ( $N_2$ ), net zoals in de nabijheid van het aardoppervlak. Die banden worden banden van het eerste of tweede positief systeem van stikstof genoemd. Het eerste positief systeem bevindt zich in het gebied van de lange golflengten, dat wil zeggen in het rood en vooral het nabije infrarood. Het tweede positief systeem

bevindt zich in het gebied van de korte golflengten, dat wil zeggen in het ultraviolet. Bovendien wordt moleculaire stikstof nog gekenmerkt door het bandensysteem van Vegard-Kaplan dat in het laboratorium in welbepaalde fysische omstandigheden wordt waargenomen. Nochtans behoren de meest intense banden die door de moleculaire stikstofmoleculen worden veroorzaakt, tot de zogenoemde negatieve systemen. Zij worden veroorzaakt door de geïoniseerde moleculen, dat wil zeggen door de moleculen die een elektron heeft verloren. Met andere woorden, de deeltjes die in botsing komen met de stikstofmoleculen kunnen deze niet alleen aanslaan en de uitzending van verschillende positieve systemen veroorzaken, maar ze ook ioniseren (een elektron onttrekken) en daarbij de uitzending van negatieve systemen tot stand brengen. Hetzelfde ionisatieproces doet zich voor met de zuurstofmoleculen ( $O_2$ ) waar eveneens de stralingen worden waargenomen die kenmerkend zijn voor de geïoniseerde moleculen.

Die verschillende poollichtstralingen, die karakteristiek zijn voor de aanwezigheid van de stikstof- en zuurstofmoleculen, schijnen op het eerste gezicht geen enkel nieuw gegeven te verstrekken over de opperatmosfeer want die stralingen worden waargenomen in bepaalde ontladingen die in de lucht voorkomen. Als we nochtans de verdeling van de verschillende stralingen onderzoeken in functie van het type of de vorm van het poollicht bekomen we interessante resultaten.

Zo stellen we bijvoorbeeld vast dat het licht dat wordt uitgezonden door poollichtstralen die een hoogte van 800 tot 1000 km bereiken, vooral wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van banden van het negatieve systeem  $N_2^+$  van stikstof. Met andere woorden, de atmosfeer wordt tot op de grootste hoogten gekenmerkt door de aanwezigheid van moleculaire stikstof; aldus is de verdeling van de gassen zodanig dat er stikstofmoleculen blijven bestaan op alle hoogten.

Dank zij een preciese ontleding van de spectra kunnen we nog een ander belangrijk resultaat bekomen, namelijk de bepaling van de temperatuur. Wanneer we erin slagen de intensiteitsverdeling van een moleculaire band te bepalen, kunnen we er de temperatuur van de gasomgeving uit afleiden. Als we die intensiteitsverdeling zouden bepalen voor de banden van de stikstofmoleculen die worden uitgezonden door het poollicht, zien we dat de temperaturen gespreid liggen van



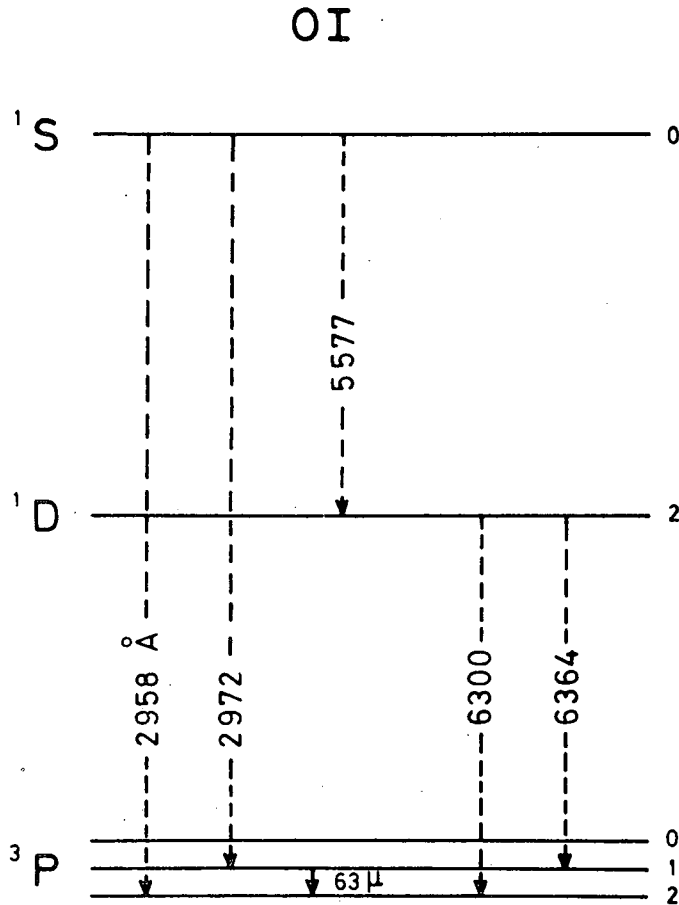


Fig. 5a. - Stralingen van neutrale atomaire zuurstof die worden uitgezonden vanuit de twee metastabiele  $^1S_0$  - en  $^1D_2$ -toestanden. De groene lijn is afkomstig van de  $^1S_0$ -toestand en de rode dubbele lijn van de  $^1D_2$ -toestand. De straling  $^1S_0 - ^3P_1$  met een golflengte van 2972 Å wordt waargenomen boven de ozonolaag waar ze geabsorbeerd wordt. De  $^1S$  - en  $^1D$ -toestanden blijven respectievelijk 1 seconde en 100 seconden bestaan.



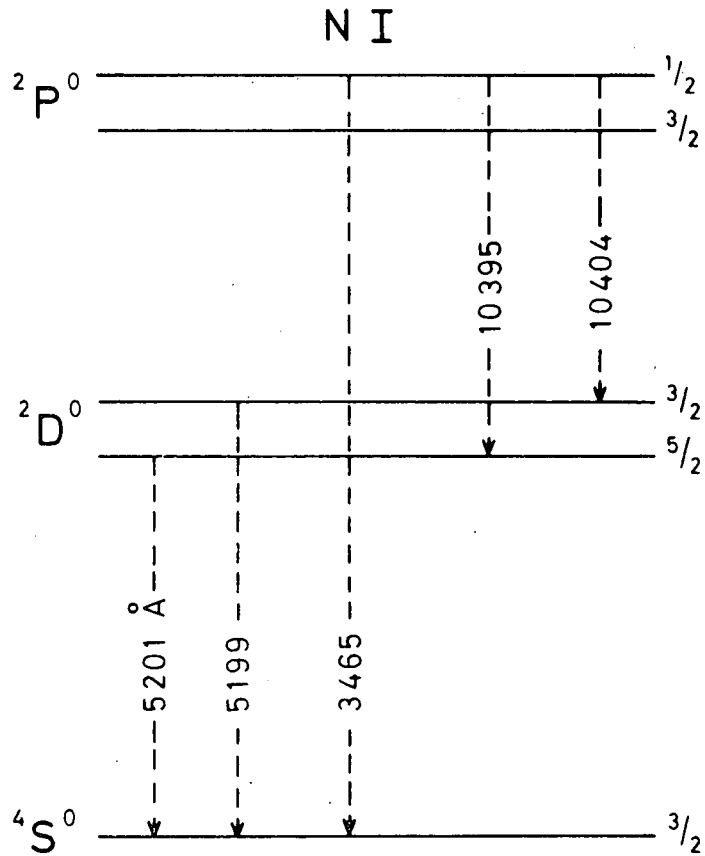


Fig. 5b.- Stralingen van neutrale atomaire zuurstof die wordt uitgezonden vanuit de twee metastabiele toestanden  $2P^0_{1/2, 3/2}$  en  $2D^0_{3/2, 5/2}$ . De stralingen met een golflengte tot 10.400 Å en 3465 Å komen in het poollicht voor. De dubbele lijn  $2D^0_{3/2, 5/2} - 4S^0_{3/2}$  met een golflengte van 5200 Å komt eveneens voor in het nachtgloren ondanks het feit dat de  $2D$ -toestand ongeveer één dag blijft bestaan.

De stralingen die gewoonlijk in het laboratorium worden bekomen bij de spectrale analyse van de zuurstof- en stikstofatomen verschijnen tenslotte eveneens als poollichtstralingen. We zien dus dat de thermosfeer is samengesteld uit moleculen en atomen en dat haar samenstelling toch grondig verschilt van de troposfeer en de stratosfeer.

Een van de fundamentele problemen waarvoor de aëronomie geplaatst is, bestaat dus in het bepalen van de juiste verhoudingen van het aantal moleculen en atomen. De theorieën over de vorming van het poollicht zijn tot nu toe niet voldoende ontwikkeld om zulke berekeningen mogelijk te maken, te meer daar het poollicht niet beantwoordt aan normale omstandigheden van de thermosfeer, maar eerder gepaard gaat met storingen.

Die uitzendingen zijn karakteristiek zowel voor neutrale en geïoniseerde stikstof- en zuurstofmoleculen als voor de zuurstof- en stikstofatomen die de belangrijkste bestanddelen vormen van de lucht boven 100 km hoogte. Buiten die emissies bemerken we eveneens zwakke heliumstralingen en uitzendingen van atomaire waterstof in enkele poollichten.

Het is geweten dat het waterstofatoom kenmerkende  $H_{\alpha}$ -,  $H_{\beta}$ -... stralingen uitzendt die de zogenaamde reeks van Balmer vormen. Nochtans verschilt hun uitzicht in het poollicht grondig van het uitzicht dat ze in het laboratorium vertonen. Ofwel verschijnen ze verbreed, ofwel vinden we ze op een andere plaats dan die welke ze normaal in het spectrum innemen. De verklaring van dat fenomeen is de volgende : als gevolg van het dopplereffect wordt een straling, uitgezonden door atomen, in het spectrum verplaatst in verhouding met hun snelheid. De lijn wordt naar het violet verschoven als de atomen naderbij komen en naar het rood als de atomen zich verwijderen. Wat waterstof van het poollicht betreft, bereiken de protonen de rand van de atmosfeer met snelheden van niet minder dan 10.000 km per seconde. Naarmate die protonen in de thermosfeer komen, verhoogt hun aantal botsingen met de atmosferische moleculen en worden ze afgeremd. Wanneer ze een verminderde snelheid van 3000 tot 2000 km per seconde bereiken, bevinden ze zich in optimale omstandigheden om een elektron aan de atmosferische moleculen

of atomen te onttrekken en stellen aldus een waterstofatoom samen dat de  $H\alpha$ -,  $H\beta$ ..., stralingen uitzendt. Daarom worden waterstofstralingen waargenomen die in het spectrum een ongewone plaats innemen. Zo hebben we een directe waarneming die aantoont dat de oorsprong van het poollicht gelegen is in een stroom van zondeeltjes. In werkelijkheid is heel het probleem waarvoor de aëronomie geplaatst is ingewikkelder, want het gaat erom de beweging te bestuderen van geladen deeltjes die onderworpen zijn aan het aardmagnetisch veld, dat trouwens belangrijke veranderingen ondergaat bij de verschijning van de poollichten.

In het algemeen kunnen we zeggen dat de intensiteitsverdeling van de poollichtstralingen niet veel verandert. Er zijn natuurlijk typische wijzigingen van poollicht tot poollicht wat zich voor het oog manifesteert als kleurverschillen. Die kleurveranderingen uiteten zich vooral bij hoge poollichten waar rode vlekken verschijnen, veroorzaakt door atomaire zuurstof of violetstralen, veroorzaakt door geïoniseerde stikstof.

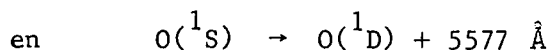
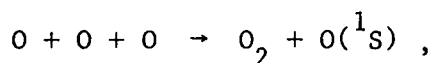
Bij gewone poollichten zijn de waterstofstralen zeer zwak en dikwijls onbestaand. Als gevolg van de spectrumanalyse en de geometrie van het poollicht werd daarentegen vastgesteld dat zuurstof- en stikstofstralingen worden veroorzaakt door elektronen die een energie bezitten van enkele kilo-elektronvolt, dat wil zeggen, die snelheden van 50.000 km per seconde hebben. Ieder elektron dat in de atmosfeer komt, produceert naast aangeslagen atomen en moleculen een groot aantal ionen en aldus secundaire elektronen die op hun beurt de atmosferische atomen en moleculen ioniseren en aanslaan. Vandaar dat we ons bijna altijd in dezelfde omstandigheden bevinden aangezien de werking van de secundaire elektronen van groot belang is en dat ze permanente eigenschappen bezitten die voortspruiten uit hun werking op de atomen en moleculen van atmosferische stikstof en zuurstof. We kunnen dus besluiten met te zeggen dat het spectrum van de poollichtstralingen over het algemeen veranderingen ondergaat vooral ten gevolge van wijzigingen in de vorming en de samenstelling van de opper-atmosfeer. Als we nochtans de allerkleinste verschillen in het poollichtspectrum willen verklaren, moeten we de aëronomische mechanismen tot in de details bestuderen.

In ieder geval, het basisprobleem van de fysica van het poollicht is de oorsprong achterhalen van de elektronen die in de atmosfeer komen. We kunnen inderdaad aantonen dat met het oog op het behouden van een poollicht met gemiddelde intensiteit in een relatief smal gebied, het nodig is een stroom te voorzien van ongeveer tien miljard elektronen per  $\text{cm}^2$  en per seconde. Die elektronen worden door de zonnwind uitgestoten en dringen op indirecte wijze de magnetosfeer binnen ofwel worden ze hierin versneld door een elektrisch veld dat voortspruit uit een storing, veroorzaakt door een verandering in de zonnwind. Het probleem van het poollicht is aldus zeer nauw verbonden met het probleem van de magnetosfeer dat wij hier niet bestuderen.

#### HET NACHTGLOREN

Het nachtgloren is niet afkomstig van het sterrenlicht, maar hoofdzakelijk van een helderheid eigen aan de atmosfeer. De spectrale analyse van het nachtgloren is moeilijker dan die van het poollicht want de intensiteit van het nachtgloren is niet alleen veel zwakker, het is daarbij afkomstig van een diffuse bron die het oog niet kan onderscheiden. Tijdens de laatste jaren is er grote vooruitgang geboekt als gevolg van de waarnemingen door middel van vliegtuigen, ballons, raketten en satellieten ; vroeger daarentegen gebeurden de spectroscopische waarnemingen gewoonlijk op de aarde.

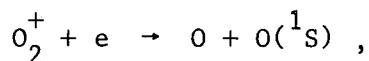
Zeggen we eerst en vooral dat we in het nachtgloren de groene en rode stralingen terugvinden van atomaire zuurstof met een golflengte van respectievelijk  $5577 \text{ \AA}$  en  $6300-6363 \text{ \AA}$ . Volgens waarnemingen wordt de groene lijn in twee verschillende lagen uitgezonden. De eerste laag bevindt zich op een hoogte van ongeveer 100 km, dat wil zeggen in een gebied waar het zuurstofatoom zijn maximale concentratie - die vrijwel  $10^{12}$  atomen per  $\text{cm}^3$  kan bedragen - bezit. De emissie is een gevolg van recombinatie van de zuurstofatomen volgens dit proces :



waar drie zuurstofatomen O in een driedubbele botsing komen die tot de vorming van een O<sub>2</sub>-molecule leidt, terwijl de energie die voortvloeit uit de vorming van O<sub>2</sub> (5,1 elektronvolt) gedeeltelijk overgaat in het aanslaan van het ander atoom. Dat atoom bevindt zich in de aangeslagen <sup>1</sup>S-toestand waarin het ongeveer 1 seconde kan blijven vooraleer het de straling met golflengte 5577 Å uitzendt door over te gaan naar de andere aangeslagen <sup>1</sup>D-toestand (zie figuur 5a). Het aangeslagen zuurstofatoom in de <sup>1</sup>S-toestand kan eveneens overgaan naar de eerste, normale <sup>3</sup>P-toestand door de ultraviolette straling met golflengte 2972 Å uit te zenden. Die overgang is echter twintig maal minder waarschijnlijk dan die van de groene lijn.

Dat uitzendingsmechanisme van de groene lijn is een duidelijk bewijs dat scheikundige reacties lichtemissies veroorzaken die karakteristiek zijn voor de elementen die we in de opper atmosfeer aantreffen. Als we zo'n chemosferische emissies analyseren, kunnen we de elementaire processen tot in de details bepalen en de fysische mechanismen binnen de hogere lagen van de atmosfeer vaststellen.

Door waarnemingen met raketten kunnen we aantonen dat de belangrijke uitzending (tot 90%) van de groene lijn van zuurstof plaats heeft op ongeveer 100 km hoogte. Bij dergelijke waarnemingen werd op grotere hoogte ('s nachts boven 250 km) ook een andere laag ontdekt. Die wordt gevormd door een ander proces, namelijk door een ionenreactie,



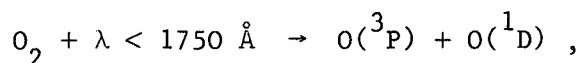
waar het moleculaire zuurstofion (O<sub>2</sub><sup>+</sup>) in aanwezigheid van het elektron e onderworpen is aan een dissociatieve recombinitie in twee neutrale zuurstofatomen ; het ene of het andere atoom kan een deel van de door het proces vrijgekomen ionisatie-energie opnemen, bijvoorbeeld in de <sup>1</sup>S-toestand die tot de uitzending van de groene lijn

leidt. Zo stellen we vast dat de ionosfeer met zijn verschillende ionen en elektronen een belangrijke rol speelt in de produktie van het nachtgloren. Omgekeerd kan de emissie van bepaalde stralingen tot een betere kennis van de ionosferische processen leiden.

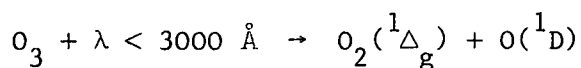
Omdat de nachtelijke omstandigheden de waarneming van het nachtgloren op het aardoppervlak mogelijk maakten, werd aan dat emissieverschijnsel eerst alle aandacht geschonken. Met behulp van raketten kan echter overdag iedere uitzending worden waargenomen boven de onderste lagen die het licht diffunderen. Onder bepaalde omstandigheden kan het hemellicht tijdens de schemering spectroscopisch worden waargenomen wanneer de zon op aarde reeds is ondergegaan maar de opperatmosfeer nog verlicht. Zo kunnen we de emissie van de groene lijn van zuurstof overdag en tijdens de schemering terugvinden net zoals 's nachts. Aangezien het aantal ionen en elektronen tijdens de dag toeneemt, vermeerdert de uitzending van de groene lijn eveneens : dank zij de waarneming door middel van raketten kan de verticale structuur van de ionisatie-effecten worden bepaald. Door waarnemingen met behulp van satellieten kunnen we ons een beeld vormen van de geografische verdeling van de uitzending. In dat verband krijgen we vooral een idee over het verband tussen de morfologie van de opperionosfeer en de poollichtovaal of zelfs de poolkap, waar een stroom van elektronen een toeneming van het aanslaan van de zuurstofatomen veroorzaakt die tot de emissie van de groene lijn leidt.

Wanneer we de waarnemingen van de dubbele rode lijn van zuurstof met golflengte 6300-6363 Å vergelijken met die van de groene lijn, stellen we vast dat er soms een verband tussen beide intensiteiten bestaat, maar soms ook totaal kan ontbreken. Op het eerste gezicht zouden de twee stralingen die van hetzelfde atoom afkomstig zijn, identieke fysische eigenschappen moeten vertonen. Nochtans merken we op dat de levensduur van het zuurstofatoom in de  $^1D$ -toestand 100 seconden bedraagt, in de  $^1S$ -toestand daarentegen slechts één seconde. Zo is de waarschijnlijkheid dat het zuurstofatoom in de  $^1D$ -toestand wordt gedesactiveerd vooraleer te kunnen uitzenden veel groter dan in de  $^1S$ -toestand. Op 100 km hoogte is de desactivering van de  $^1D$ -toestand bijgevolg zo sterk dat we de rode straling niet meer waarnemen terwijl de groene straling het sterkst wordt uitgezonden. Boven 250 km hoogte worden

de botsingen minder talrijk, neemt de desactivering af en worden de rode lijnen van zuurstof waargenomen. We zien dus dat de uitzendingen van de hemel belangrijke indicators zijn van de fysische mechanismen in de opper-atmosfeer. Aan bovenvermelde aanslagprocessen moeten we trouwens nog fotodissociatieverschijnselen toevoegen : die leveren zuurstofatomen in de  $O(^1D)$ -toestand. Ten gevolge van de zonnestraling met golflengten beneden  $1750 \text{ \AA}$ , wordt de  $O_2$ -molecule boven een hoogte van 100 km gedissociëerd volgens het mechanisme

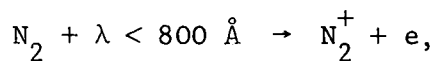


waarin een atoom zich in de aangeslagen  $^1D$ -toestand bevindt. Dat is ook het geval met de ozonmolecule die ten gevolge van de straling met golflengten beneden  $3000 \text{ \AA}$



aangeslagen zuurstofatomen  $O(^1D)$  produceert en zelfs aangeslagen zuurstofmoleculen in de  $^1\Delta_g$ -toestand tot op een hoogte van 25 km in de stratosfeer. Vandaar dat we overdag een zeer intense infrarode straling van 1,27 micron zien verschijnen ; zij komt voort uit de emissie van  $O_2$  vanaf het metastabiele niveau  $O_2(^1\Delta_g)$  dat een levensduur van een uur heeft, naar het normale niveau van de zuurstofmolecule  $O_2(^3\Sigma)$ . Talrijke proefnemingen in het laboratorium hebben aangetoond dat de aangeslagen molecule  $O_2(^1\Delta_g)$  niet zo vatbaar is voor desactivering ondanks haar lange levensduur. Vandaar komen we tot het besluit dat het gehalte van de aangeslagen  $O_2$ -molecule in de  $^1\Delta_g$ -toestand groter is dan dat van de ozonmolecule boven 60 km. Dat komt door het feit dat de ozonmolecule die aan het zonnelicht blootgesteld is iedere 100 seconden één keer wordt gefotodissociëerd en telkens een aangeslagen zuurstofmolecule en -atoom produceert. Dank zij stratosferische ballons en raketten kunnen we verscheidene emissies die in het nachtgloren ofwel zwak zijn, ofwel helemaal niet verschijnen, tot in de details waarnemen. Het meest typische geval is dat van de banden van de geïoniseerde stikstofmolecule ( $N_2^+$ ) met golflengte  $3914 \text{ \AA}$ .

De banden van  $N_2^+$  verschijnen niet in het normale spectrum van het nachtgloren en manifesteren zich slechts in de poollichtovaal of in de poolkap waar het aanslageffect van de geladen deeltjes evident is. Nochtans zijn zij goed zichtbaar in het schemerlicht van de hemel en worden ze overdag door raketten waargenomen. Het gaat hier om een dubbel effect van de zonnestraling ; in de eerste plaats wordt ten gevolge van de stralingen met een golflengte beneden  $800 \text{ \AA}$ , de stikstofmolecule geïoniseerd volgens het schema

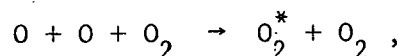


waarin de  $N_2^+$ -molecule zich ofwel in zijn normale ofwel in een aangeslagen toestand bevindt. Iedere  $N_2^+$ -molecule die in de opperatmosfera blijft bestaan kan echter in de aangeslagen toestand worden gebracht als gevolg van de absorptie van het zonnelicht en kan dan uitzenden als gevolg van fluorescentie. Zeer diepgaande studies tonen aan dat ongeveer 80% van de uitzending wordt veroorzaakt door fluorescentie en dat 20% kan worden toegeschreven aan de directe foto-ionisatie.

Dank zij de waarnemingen van het nachtgloren kunnen we hier een ander interessant verschijnsel vermelden. Die waarnemingen betreffen de foto-elektrische elektronen, dat wil zeggen elektronen met voldoende energie die door de ultraviolette zonnestraling met korte golflengten van de atomen en de moleculen van de opperatmosfera werden losgerukt. Die elektronen kunnen de atomen opnieuw ioniseren of ze in ieder geval aanslaan. Wanneer een halfmond wordt verlicht (het zuidelijke bijvoorbeeld) en het andere zich in het duister bevindt (het noordelijke bijgevolg), zien we dat de foto-elektronen die in de zuidelijke hemisfeer worden geproduceerd zich naar het noorden begeven volgens de krachtlijnen van het magnetisch veld op grote hoogte. Die foto-elektronen dringen binnen in het niet verlichte noordelijk halfmond en komen in botsing met de moleculen en de atomen die ze kunnen ioniseren of aanslaan. We kunnen zo de uitzendingen, die met dat effect gepaard gaan, waarnemen en de fysische eigenschappen van de opperatmosfera tot in de kleinste details bepalen.



Het nachtgloren vertoont nog andere uitzendingen in het ultraviolette en het infrarode gebied. De spectrale analyse betekent een bron van gegevens voor de fysische en de scheikundige studie van de opperatmosfeer. We kunnen in het ultraviolet de emissie van de Herzbergbanden van zuurstof vernoemen en in het infrarood de uitzending van de atmosferische banden met golflengte 8640 Å en 7600 Å. Zulke emissies kunnen voortkomen uit een driedubbele botsing



waarin een zuurstofmolecule een deel van de dissociatie-energie onttrekt, in een aangeslagen  $O_2^*$ -toestand wordt gebracht en vandaar banden eigen aan het systeem kan uitzenden. Alhoewel het uitzonderlijk moeilijk is absolute waarden te bekomen voor reacties die zo verscheiden zijn als de reacties waarin zuurstofatomen een rol spelen, kunnen we toch duidelijk bepalen dat zo'n uitzendingen voorkomen in de lagere thermosfeer op ongeveer 100 km hoogte.

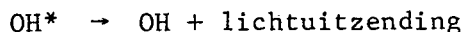
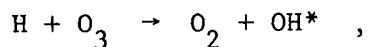
Van de andere uitzendingen die in het nachtgloren voorkomen moeten we ongetwijfeld de emissies beschrijven van metaalelementen, van het OH-radicaal en van de stikstofmonoxydemolecule (NO) zonder de atomaire uitzendingen van stikstof, helium en waterstof te vergeten.

Voor het Internationaal Geofysisch Jaar (1957-1958) was alleen natrium bestudeerd in de emissie van het nachtgloren. Dat gebeurde door zijn dubbele lijn met golflengte 5890 - 5896 Å die reeds in 1929 werd ontdekt. De dubbele lijn van geïoniseerd calcium werd waargenomen bij een schemerlichtemissie met een golflengte van 3974 Å (H-lijn) en van 3968 Å (K-lijn). Na thermonucleaire bomexplosies in 1958 werd de schemerlichtstraling van lithium met golflengte 6708 Å ontdekt. Het is inderdaad zeker dat het inbrengen van lithium in de atmosfeer bij thermonucleaire explosies een stroom van lithium veroorzaakt. Thans is het echter duidelijk dat lithium van nature uit in hetzelfde gebied als natrium verschijnt, namelijk de mesopauze, ofwel iets hoger. Tenslotte werd een ander metaalelement ontdekt in de schemerlichthemel, namelijk kalium en zijn dubbele lijn met golflengte 7566-7665 Å

waarvan de eigenschappen analoog zijn met die van natrium.

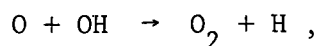
Al deze uitzendingen die in de schemerlichthemel worden waargenomen, komen voort uit het resonantie-effect ; als gevolg van het zonlicht wordt ieder absorberend atoom in zijn eerste aangeslagen toestand gebracht vanwaar het opnieuw uitzendt in de geabsorbeerde golflengte. Tot op heden hebben de waarnemingen enkel betrekking op het spectrale gebied dat vanop de aarde zichtbaar is. Daarom wordt een element als magnesium niet waargenomen in de schemerlichthemel omdat zijn resonantie-lijnen gesitueerd zijn in het ultraviolet dat vanop de grond niet kan worden waargenomen. Met behulp van de massaspectrograaf werd het in de ionosfeer in de vorm van ionen waargenomen. Zo blijken dank zij de spectroscopische waarnemingen die in schemerlicht werden uitgevoerd, lagen van alkali- en aardalkalimetalen in de opper-atmosfeer te bestaan. Als het mogelijk blijkt aan natrium en kalium een maritieme oorsprong toe te kennen, dan is het duidelijk dat de aanwezigheid van de andere elementen aantoont dat de meteoritische oorsprong ervan vaststaat ; hun overvloedige aanwezigheid en hun verticale verdeling hangen af van het gedrag van de stofdeeltjes en van de deeltjesagglomeraties die onderworpen zijn aan de verticale diffusie en aan de verscheidene bewegingen van de opper-atmosfeer.

Zowat twintig jaar geleden (1950) werd ontdekt dat de rotatie-vibratie-stralingen van het OH-radicaal aanwezig zijn in het rode en vooral in het infrarode spectrum van het nachtgloren, wat thans nog het voorwerp is van talrijke opzoekingen. Zo wordt volgens het proces van Bates-Nicolet,



een waterstofatoom (H) in contact gebracht met de ozonmolecule ( $O_3$ ) om een nieuwe zuurstofmolecule en een aangeslagen  $OH^*$ -molecule te produceren. De aanslagenergie van het OH-radicaal beantwoordt precies aan de energie van de exothermische reactie

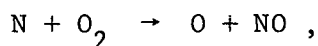
tussen atomaire waterstof en ozon. Die reactie is zo belangrijk dat ze 10.000 maal meer fotonen produceert dan het aantal fotonen dat door de groene lijn van zuurstof wordt uitgezonden. Tegenover de reactie om OH te vormen staat de reactie van zijn vernietiging ,



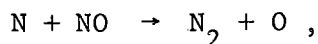
waarin een zuurstofatoom (O) dat met OH reageert, opnieuw een zuurstofmolecule ( $O_2$ ) afscheidt en het waterstofatoom (H) opnieuw produceert. We zien dus dat atomaire waterstof een katalysator is die ozon en atomaire zuurstof gebruikt om opnieuw zuurstofmoleculen te vormen door onophoudelijk aangeslagen  $OH^*$ -moleculen te produceren. Daarom moeten we een aëronomische studie ontwikkelen van reacties waarin alle samenstellingen met waterstof zijn begrepen :  $H_2$ , OH,  $HO_2$ ,  $H_2O_2$ ,  $H_2O$ . De bedoeling hiervan is te zien hoe de bestanddelen die in geringe mate voorkomen een rol kunnen spelen in de stratosfeer en in de mesosfeer. Zulke samenstellingen zijn bijvoorbeeld moleculaire waterstof ( $H_2$ ), waarvan er op een half miljard luchtmoleculen slechts één molecule voorkomt en waterdamp waarvan er in de stratosfeer op drie miljoen luchtmoleculen amper één molecule voorkomt. Dat is heel het probleem van atmosferisch ozon in een atmosfeer die bestaat uit stikstof en zuurstof, maar slechts een zeer gering gehalte waterdamp bevat.

Aan de andere kant moeten we de belangrijke rol benadrukken die een molecule als stikstofmonoxyde (NO) kan spelen. Reeds sedert meer dan 25 jaar werd het  $NO^+$ -ion ingevoerd om ionosferische eigenschappen in de mesosfeer te verklaren. Nochtans hebben we moeten wachten op de eerste raketten met aan boord massaspectrografen om het  $NO^+$ -ion op een hoogte van 100 km waar te nemen. De ultraviolette banden van de NO-molecule,  $\gamma$ -banden genaamd, werden slechts in 1966 door raketten waargenomen in de schemerlichthemel.

De produktie van de stikstofoxydemolecule vereist de voorafgaande produktie van stikstofatomen (N). Die stikstofatomen reageren als volgt :



dat wil zeggen : door een reactie met de zuurstofmolecule ( $\text{O}_2$ ) kunnen ze stikstofmonoxyde (NO) en O-atomen produceren. De stikstofmoleculen worden opnieuw gevormd door de reactie



waarin de stikstofatomen (N) opnieuw reageren met NO. Die twee reacties zijn slechts belangrijk in de thermosfeer en daaruit volgt dat stikstofmonoxyde (NO) dat zich in de mesosfeer en in de stratosfeer bevindt van de hogere regionen afkomstig is. Er bestaat een voortdurende uitwisseling tussen de thermosfeer en de mesosfeer.

Door het feit dat er in de stratosfeer verbindingen bestaan die in geringe mate voorkomen, zoals waterstof en stikstof, kunnen we besluiten dat er ook verbindingen als salpeterigzuur ( $\text{HNO}_2$ ) en salpeterzuur ( $\text{HNO}_3$ ) aanwezig zijn. Het is trouwens zeer waarschijnlijk dat salpeterzuur het middel is om stikstofdioxyde in de stratosfeer te verwijderen. We kunnen bijvoorbeeld de volgende reactie veronderstellen :



dat wil zeggen een reactie tussen stikstofdioxyde ( $\text{NO}_2$ ) en waterstofperoxyde ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) om salpeterzuur ( $\text{HNO}_3$ ) te produceren dat uit de stratosfeer wordt verwijderd doordat het naar de troposfeer afdaalt.

Bijgevolg is het logisch dat we veel belang hechten aan de fysische en chemische processen in de stratosfeer en de mesosfeer want die vormen de basis van de verschijnselen die op grotere hoogten voorkomen. Zo kunnen we ook atomaire waterstof beschouwen : ze wordt inderdaad geproduceerd in de mesopauze, doorkruist de gehele thermosfeer, ontsnapt uit de exosfeer en verdwijnt in de interplanetaire ruimte.

Waterstof werd ontdekt dank zij de waarneming door raketten van zijn belangrijke ultraviolette Lyman-alfa-straling met golflengte  $1215,7 \text{ \AA}$ . Die straling wordt verspreid door de waterstofatomen die zich in de hele opperatmosfera tot de interplanetaire ruimte bevinden. Met andere woorden, door de waarnemingen met behulp van raketten en satellieten kunnen we de verticale verdeling van waterstof tot op de grootste hoogten volgen. Hieruit volgt dat waterstof het basisbestanddeel is van geheel de corona om de aarde. Trouwens, tijdens de laatste jaren werd vanop de aardbodem in het nachtgloren de Balmer-alfa-straling van waterstof met golflengte  $6563 \text{ \AA}$  waargenomen. Die straling is zeer goed bekend in het poollichtspectrum.

Helium kunnen we slechts in de schemerlichthemel waarnemen door een infrarode straling met golflengte  $10.830 \text{ \AA}$ . Tien jaar geleden werd die straling eerst waargenomen in het spectrum van de poollichten die door de zon worden verlicht. Nog niet zo lang geleden werd ze in het schemerlicht waargenomen. Het betreft inderdaad een atoom waarvan de stralingen een relatief hoge energie vereist. Die wordt slechts bekomen wanneer de zon nog de opperatmosfera verlicht. Als gevolg van de korte ultraviolette stralingen worden foto-elektrische elektronen geproduceerd die voldoende energie bezitten om de heliumatomen in aangeslagen niveaus te brengen. Het is trouwens duidelijk dat zo'n effect zich op grote hoogte manifesteert, daar de schemerlichtuitzending van helium het sterkst blijkt te zijn op ongeveer 500 km hoogte.

In het kort : we kunnen besluiten dat de analyse van de uitzending van het hemellicht, 's nachts; bij schemerlicht en overdag, essentiële gegevens verschaft voor de ontwikkeling van de kennis van de aëronomie. Het interpreteren van de atomaire zuurstofuitzendingen is de basis voor een gedetailleerde kennis van de structuur van de thermosfeer. De aanwezigheid van metaalelementen duidt aan in welke mate de opperatmosfera afhangt van buitenaardse verschijnselen. Door de studie van de waterstofsamenstellingen kunnen we het labyrint binnendringen van moeilijke problemen die betrekking hebben op het bepalen van de omstandigheden van de onderste grenzen van geheel de opperatmosfera. Aan de andere kant leren we de atmosferische bewegingen beter kennen door de permanente aanwezigheid van stikstofmonoxyde in

de stratosfeer. Tenslotte biedt helium, doordat het een edel gas is, op merkwaaardige wijze aanwijzingen voor de atmosferische omstandigheden en dat vanaf het aardoppervlak waar het aanwezig is tot op de grens van de atmosfeer waar het ontsnapt.

## IONOSFERISCHE WAARNEMINGEN

### DE PEILING VAN DE ATMOSFEER

In 1901 bracht Marconi de eerste radio-elektrische verbinding tot stand tussen Poldhu in Cornwall en St. John op New Foundland. Het succes van die transmissie bevestigde de hypothese die tien of twintig jaar voordien was vooropgesteld. Volgens die onderstelling was het aardmagnetisch veld gedeeltelijk het gevolg van elektrische stromen in de opper-atmosfeer. Inderdaad, in 1902 stelden geomagnetische studies het bestaan van een geleidende laag voorop om de voortplanting van de elektromagnetische golven over lange afstand te verklaren. In 1912 introduceerde Eccles het ionisatie-effect dat door de zonnestraling wordt veroorzaakt en plaatste daarmee de fundamentele theorie voorop van de voortplanting van golven in een geïoniseerd milieu. Ondertussen werden proefnemingen uitgevoerd betreffende de intensiteitsveranderingen van de ontvangst met de afstand. In 1920 bleek dat de voortplanting van de lange golven kon worden uitgelegd door een wiskundige theorie wanneer het milieu wordt begrensd door twee geleidende concentrische sferen - de aarde en de atmosfeer. De mathematische theorie over de voortplanting van de golven werd uitgebreid : eerst werd gesproken over een verdund milieu met een magnetisch veld ; daarna over een gebied waar er botsingen tussen elektronen en neutrale deeltjes voorkomen. Zo werd de magneto-ionische theorie opgesteld. In 1927 bracht Appleton een algemene theorie over de voortplanting van de elektromagnetische golven in een milieu dat bestaat uit geladen en neutrale deeltjes, onderworpen aan de stootwerking, in aanwezigheid van een magnetisch veld. Die theorie was dus van toepassing op de atmosfeer.

Terwijl de wiskundige theorie zich ontwikkelde, werden de experimentele methodes voor verkenning van de ionosfeer vervolmaakt. Vooral de methode van echopeiling is aangepast aan het automatisch registreren en dient tegenwoordig voor de dagelijkse bepaling van de ionosferische kenmerken : de virtuele hoogte en de kritieke frequentie.

Die methode bestaat in een radio-elektrische peiling van de ionosfeer (figuur 6). Er worden zeer korte signalen uitgezonden en op dezelfde plaats weer opgevangen na weerkaatsing door de ionosfeer. Als we de tijd opnemen die zo'n golf nodig heeft om zijn baan heen en terug af te leggen, bekomen we de hoogte van het reflectieniveau, rekening houdend met de voortplantingssnelheid. Als we hiervoor de snelheid van het licht aannemen, zeggen we dat we de virtuele hoogte van dat reflectieniveau bepalen. Als verticale peilingen worden uitgevoerd met toenemende frequenties (golflengten die steeds kleiner worden), dan stellen we vast dat de virtuele hoogtes voor bepaalde intervalfrequenties min of meer constant zijn : zo worden verschillende atmosferische gebieden afgebakend. De overgangen van een gebied naar een ander worden gekenmerkt door plotselinge veranderingen van de virtuele hoogte. De frequenties die met zo'n wijzigingen gepaard gaan, worden kritieke frequenties genoemd. De theorie toont aan dat de kritieke frequenties overeenkomen met de maximale aantallen van geladen deeltjes (elektronen) in welbepaalde lagen. Door die methode van ionosferische peiling werd het bestaan van welbepaalde ionosferische gebieden ontdekt (figuur 7a en 7b) : de D-laag op ongeveer 80 km hoogte, de E-laag op ongeveer 100 km en de F-laag op ongeveer  $300 \pm 100$  km. Dank zij voortdurende waarnemingen op talrijke plaatsen van de wereld kunnen we het gedrag van de verschillende ionosferische gebieden volgen. Dat gedrag is onderworpen aan de verandering van de zenitsafstand van de zon (dagelijkse effecten, seizoen-effecten en geografische effecten), aan het aardmagnetisch veld (lengte-effect), aan de storingen van de zonneatmosfeer (ionosferische stormen) en in het algemeen aan de elfjarige zonneactiviteit.

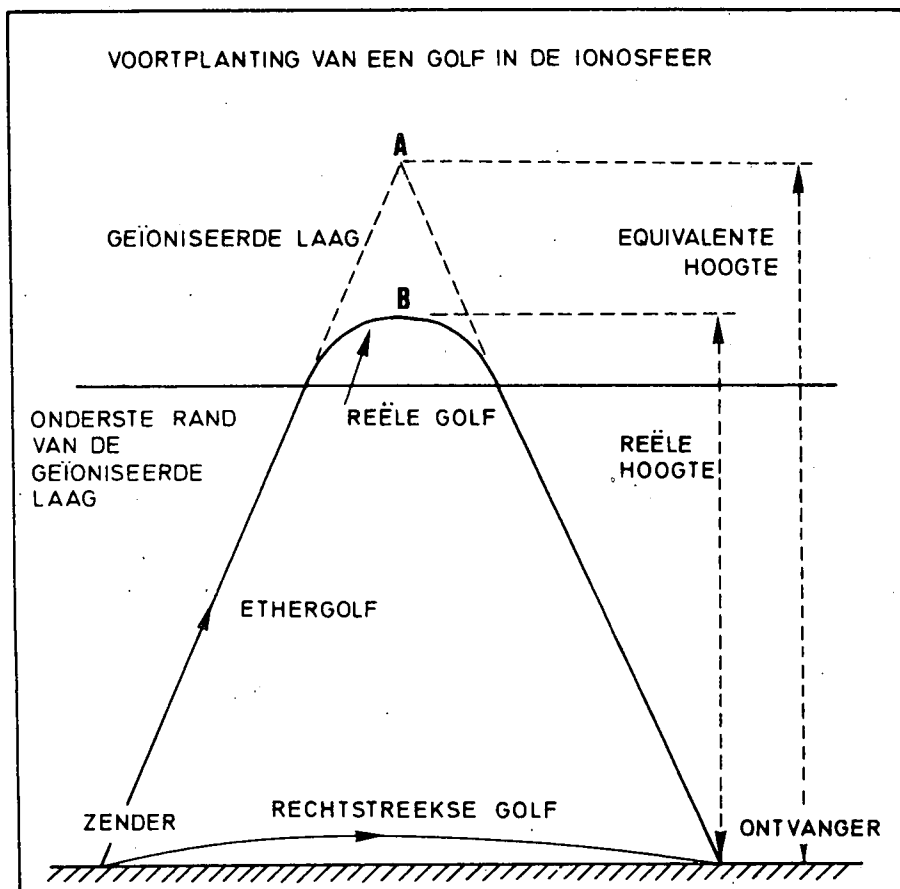


Fig. 6.- Schematische voorstelling van de voortplanting van een golf binnen de ionosfeer. De golf kan afkomstig zijn van een zender nabij de ontvanger. Die methode is eveneens van toepassing wanneer de peiler zich aan boord van een satelliet bevindt ; de golf wordt dan weerkaatst in ionosferische gebieden die vanop de aarde niet kunnen waargenomen worden.



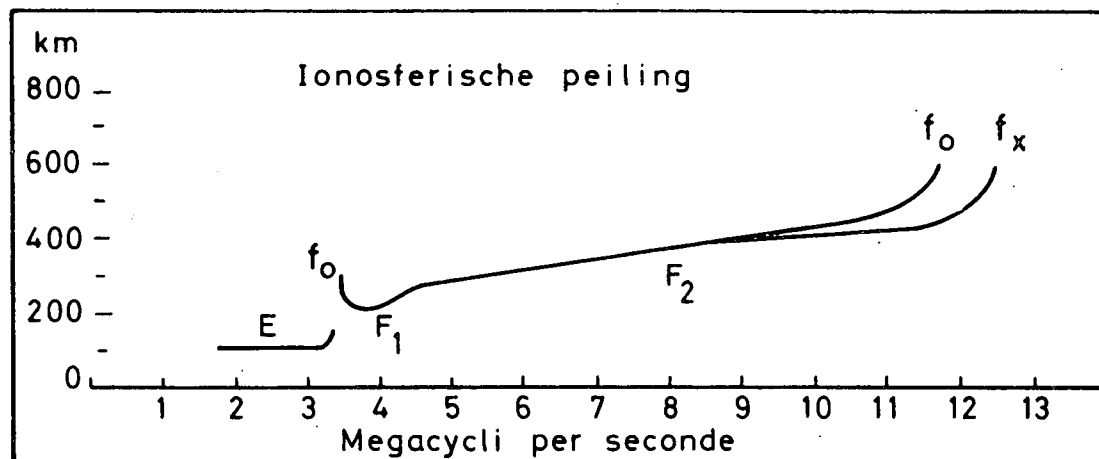


Fig. 7a.- Voorstelling van het uitzicht van een ionosferische peiling met veelvoudige frequenties. Daaruit kunnen we de indeling in E -, F<sub>1</sub> - en F<sub>2</sub>-lagen afleiden. In de F<sub>2</sub>-laag is de lijn dubbel als gevolg van het magnetisch veld, de virtuele hoogten en de kritieke frequenties stemmen overeen met de maxima van de elektronenconcentratie.

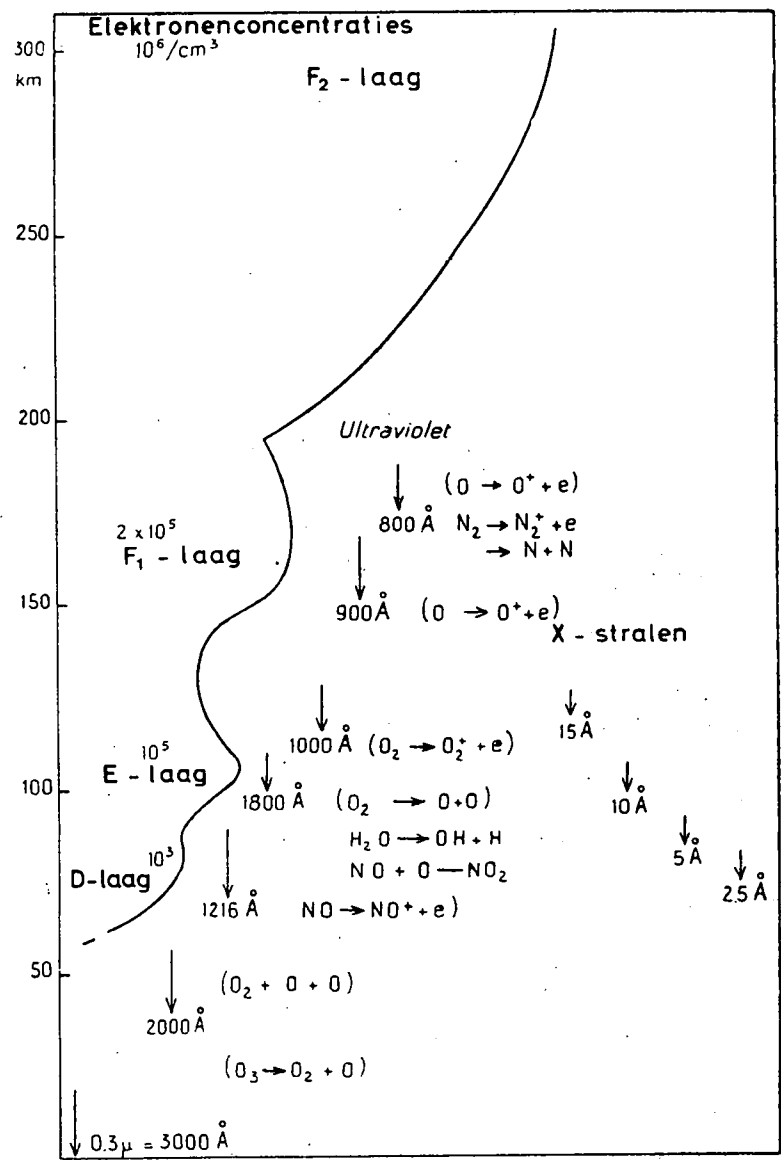


Fig. 7b.- Schema met de verticale verdeling van de elektronenconcentratie en met de doordringing van de straling in de atmosfeer. Verschillende effecten van fotodissociatie en foto-ionisatie worden aangeduid op de hoogten waar ze maximaal zijn.

## SCHEMA VAN DE IONOSFEER

De waarneming die gebaseerd is op de kilometergolven duidt aan dat er een geïoniseerde laag bestaat onder 100 km hoogte, namelijk de D-laag. De hectometergolf wordt over het algemeen weerkaatst door de E-laag. De decametergolven tenslotte bewijzen het bestaan van de F-laag die over het algemeen wordt onderverdeeld in twee lagen : de  $F_1$ -laag, gelegen op ongeveer 170 km en de  $F_2$ -laag, de laatste waarneembare laag boven 250 km hoogte.

Schematisch kunnen we de verdeling van de geïoniseerde toestand als volgt beschrijven : dicht bij de grond kunnen de kosmische of aardse bronnen enkele duizenden ionen per  $\text{cm}^3$  produceren. Naarmate we in de troposfeer en de stratosfeer komen, kan de ionenconcentratie toenemen tot op een hoogte van 16-18 km. Een echte geïoniseerde laag bestaat echter slechts boven 60 km hoogte. In de D-laag ligt de elektronenconcentratie overdag tussen 1.000 en 10.000 elektronen per  $\text{cm}^3$ . Op ongeveer 100 - 110 km is de toeneming van de ionisatie zo belangrijk dat de maximale concentratie die 's middags wordt bereikt, meer dan 100.000 elektronen per  $\text{cm}^3$  bedraagt ; dat is de E-laag. In bepaalde gevallen vinden we eveneens een laag met een wolkachtige structuur die in de omgeving van de E-laag is gelegen ; we noemen die de sporadische E-laag. Na een zeer kleine afneming neemt de ionisatie opnieuw toe en bereikt een hoge waarde die ongeveer het dubbele bedraagt van die van de E-laag ; dat is de  $F_1$ -laag, die 's nachts verdwijnt. Het belangrijkste maximum komt tenslotte voor in de  $F_2$ -laag, waar de elektronenconcentratie ongeveer 1.000.000 per  $\text{cm}^3$  bedraagt. Die verschillende ionisatiemaxima bezitten eigenschappen die essentieel verschillen en die we hier in het kort zullen onderzoeken.

### DE NORMALE E-LAAG

Het maximum van de E-laag doet zich voor als een regelmatige laag waarvan het gedrag door relatief eenvoudige wetten kan worden verklaard. De maximale elektronenconcentratie verandert synchroon met de hoogte bij zonsopgang, bereikt een

maximum rond de middag, neemt tijdens de namiddag af volgens de curve die 's voormiddags werd waargenomen en bereikt tenslotte na zonsondergang een waarde die in de buurt ligt van de waarde bij de ochtendschemering (figuur 8). Die dagelijkse waarneming toont dus aan dat er vlug een evenwicht optreedt tussen de produktie van elektronen door zonnestraling en het verdwijnen ervan als gevolg van recombinaatie tussen positieve ionen en elektronen in de atmosfeer.

De waarnemingsresultaten die in een station in de loop van eenzelfde jaar werden bekomen, tonen aan dat de waarden 's middags tijdens de zomer altijd hoger zijn dan die tijdens de winter (figuur 9). Dat kan zeer gemakkelijk worden verklaard, want de geroniseerde toestand hangt af van de werkelijke hoogte van de zon boven de horizon. Wanneer we de gegevens van stations op verschillende breedten onderling vergelijken, vinden we ook daar dezelfde wetten terug volgens dewelke de hoogte van de zon de geroniseerde toestand bepaalt.

Bij een diepgaander studie stellen we vast dat alle stations in verschillende mate schommelingen vertonen in hun gemiddelde waarden die niet aan het effect van de hoogte van de zon kunnen worden toegeschreven. Wanneer we door berekening de waarden van de elektronenconcentratie herleiden tot dezelfde hoogte van de zon, dan stellen we vast dat ze parallelle schommelingen vertonen. Die variaties worden veroorzaakt door de zonneactiviteit en worden als volgt aangetoond : als we op eenzelfde grafiek enerzijds een maatstaf van de zonneactiviteit plaatsen zoals bijvoorbeeld de oppervlakte die wordt ingenomen door de zonnefakkels en anderzijds een maatstaf met de elektronenconcentratie van verschillende stations zonder het effect van de hoogte van de zon, dan stellen we vast dat tijdens de verschillende maanden van het jaar, alle curven gelijktijdige schommelingen ondergaan. Zo is de ultraviolette zonnestraling die op de E-laag werkt, aan veranderingen onderworpen die hun weerslag doen gevoelen op de geroniseerde toestand van de atmosfeer. De elfjarige cyclus van zonneactiviteit die goed bekend is door de verandering van het aantal zonnevlekken, manifesteert zich trouwens in de evolutie van de elektronenconcentratie van de E-laag. Vanaf de eerste waarnemingen heeft men het zeer nauwe

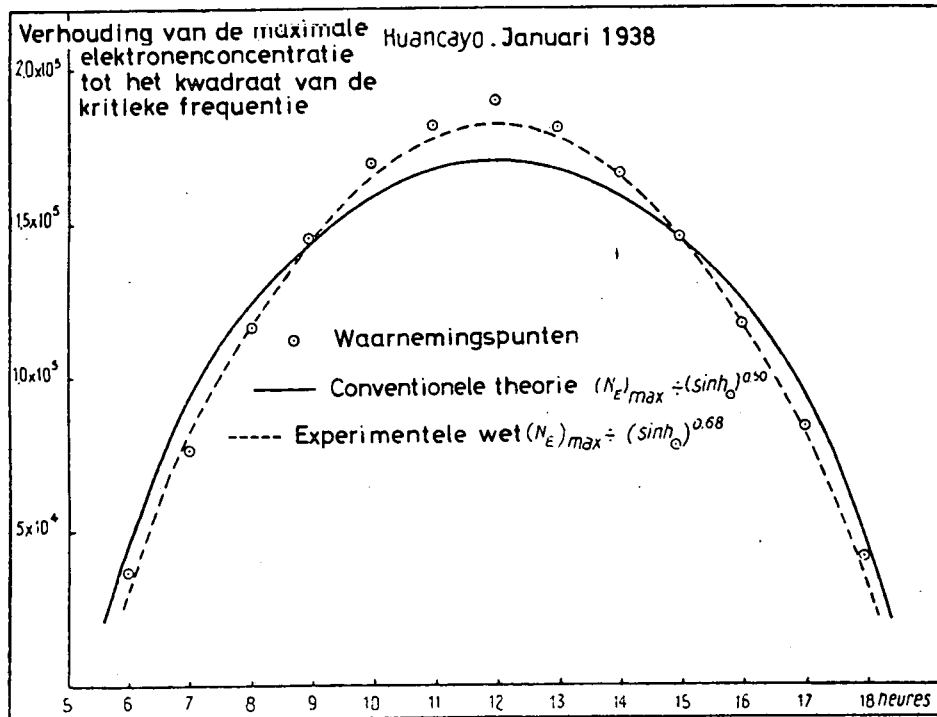


Fig. 8.- Verandering van de maximale elektronenconcentratie in de E-laag.

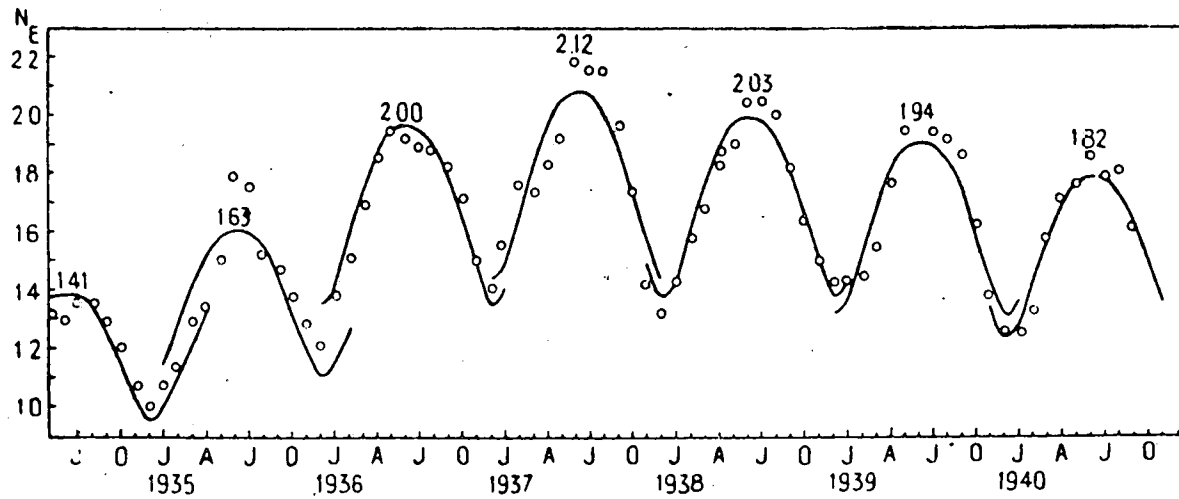


Fig. 9.- Jaarlijkse verandering van de elektronenconcentratie (Ne) en invloed van de elfjarige zonneactiviteit in de E-laag.

onderlinge verband kunnen volgen tussen enerzijds de E-laag en anderzijds de zonne-activiteit die wordt bepaald door het totale aantal vlekken.

De E-laag ondergaat eveneens bijzondere effecten die worden veroorzaakt door storingen die bij magnetische stormen voorkomen. De gevolgen zijn echter minder duidelijk dan in de andere ionosferische gebieden omdat ze zeer vlug in evenwichtstoestand worden gebracht. We moeten nochtans aanstippen dat in de poolgebieden waar de magnetische storingen zeer intens zijn, de E-laag soms een abnormale ionisatie ondergaat die wordt veroorzaakt door de aanvoer van deeltjes.

### DE F<sub>2</sub>-LAAG

De F<sub>2</sub>-laag vertoont variaties die in tegenstelling met die van de E-laag, niet door eenvoudige wetten kunnen worden verklaard. Zij is echter de belangrijkste van alle ionosferische lagen omdat de voortplanting van de korte golven over verre afstand via de F<sub>2</sub>-laag gebeurt. Het is trouwens de enige normale laag waarvan de ionisatie 's nachts voldoende intens blijft.

In dat gebied, gelegen in de opperthermosfeer waar de dichtheid van de gassen zeer klein is, kan er geen sprake meer zijn van een vlug evenwicht tussen produktie en verdwijnen van elektronen. Van dan af zal de elektronenconcentratie niet meer symmetrisch worden verdeeld ten opzichte van het plaatselijke middaguur; bij zonsondergang blijft de laag nog geïoniseerd, ondanks het feit dat er geen elektronen meer worden geproduceerd. Er zal altijd een tamelijk vlugge toeneming van het aantal elektronen zijn bij zonsopgang, over het algemeen een toeneming overdag en een afnemng 's nachts die een minimum bereikt voor zonsopgang (figuur 10).

Doordat de vernietigingsprocessen van elektronen traag verlopen, kunnen we ons gemakkelijk voorstellen dat eventuele andere, voldoende snelle atmosferische verschijnselen een welbepaalde rol zullen spelen in het gedrag van de F<sub>2</sub>-laag. Als er zich aldus inkrimpingen of uitzettingen voordoen, zullen ze zich manifesteren door verticale en horizontale verplaatsingen van de ionisatie. Daardoor zal de ver-

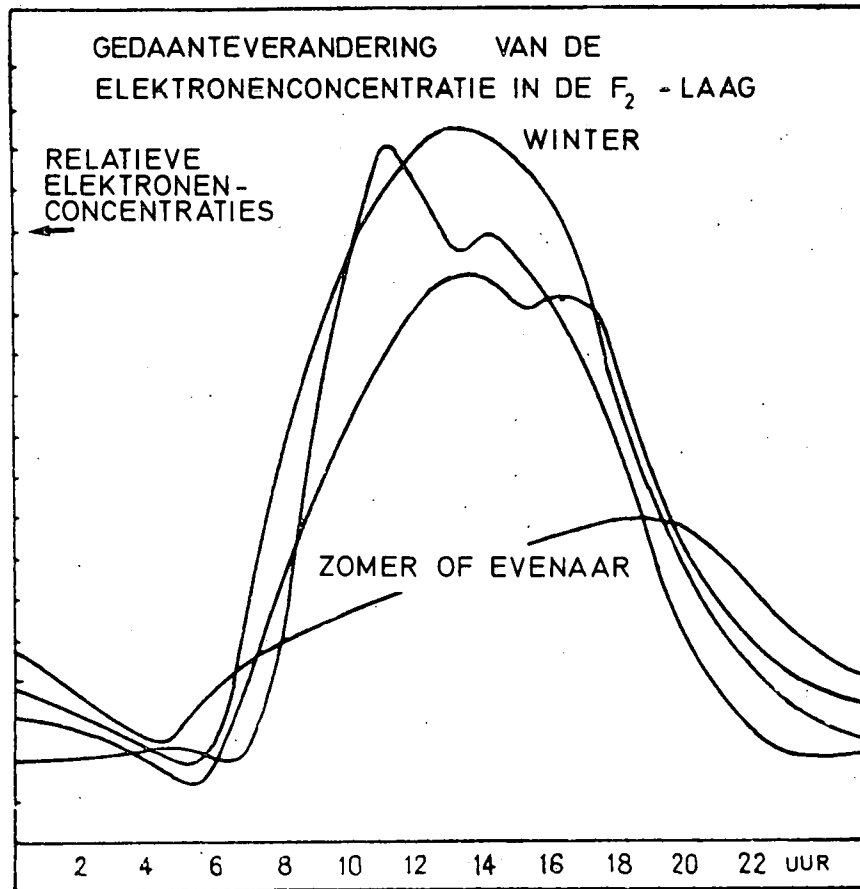


Fig. 10.- Schematische voorstelling van het dagelijks gedrag van de F<sub>2</sub>-laag.



ticale structuur van de geroniseerde laag gewijzigd worden en de waarde van de maximale elektronenconcentratie veranderen. Het uiteindelijk uitzicht van de laag zal totaal verschillend zijn van het uitzicht van een laag die alleen onderworpen is aan de directe controle door de zon zodat het gedrag van die laag zeer moeilijk te volgen is bij haar dagelijkse, geografische en seizoenveranderingen.

Wanneer we de geroniseerde toestand van de  $F_2$ -laag op wereldschaal bestuderen, zien we dat de verdeling ervan geografische onregelmatigheden vertoont. Als we de verschijnselen van de  $F_2$ -laag beschouwen dan vormt de geografische evenaar (tijdens de nachtevening) niet meer de scheidingslijn tussen de twee hemisferen zoals dat het geval is bij de E-laag. Inderdaad, we stellen vast dat de positie van de geomagnetische evenaar hier een doorslaggevende rol speelt. Door het mogelijke effect van het magnetisch veld nauwkeurig te bestuderen (geomagnetische en geografische breedtes) zien we dat de evolutie van de  $F_2$ -laag afhangt van de positie van het station ten opzichte van de lijnen met gelijke magnetische inclinatie. Die invloed van het magnetisch veld wordt gewoonlijk lengte-effect genoemd. Als we ons verdiepen in de studie van oorzaken die de geroniseerde toestand van de  $F_2$ -laag vlugger kunnen beïnvloeden, dan botsen we op talrijke moeilijkheden. De verschijnselen van de opoperatmosfeer passen niet in het kader van de kinetische gastheorie zoals die gewoonlijk wordt toegepast en we moeten ze bestuderen als bewegingen van geladen deeltjes in een magnetisch veld waar botsingen weinig talrijk zijn. Tot op heden werden er nochtans belangrijke resultaten geboekt. We stellen vast dat de diffusie in de thermosfeer een belangrijke rol speelt en verticale bewegingen van de elektronen kan veroorzaken. Die bewegingen beïnvloeden de oorspronkelijke elektronenverdeling sterk en brengen veranderingen teweeg in de maximale elektronenconcentratie (kritieke frequentie) en de hoogte ervan (virtuele hoogte). Nochtans is de wijziging van de reële hoogte minder belangrijk dan die van de virtuele hoogte en bijgevolg zijn de reële bewegingen minder belangrijk dan de schijnbare.

Als we nu een dagelijks gemiddelde van de elektronenconcentratie in de  $F_2$ -laag beschouwen om zijn gemiddeld gedrag te karakteriseren, dan kunnen we onmiddellijk zien dat de maandelijkse gegevens voor een ionosferisch station schommelingen ondergaan die analoog zijn met die van het aantal zonnevlekken. Op die wijze kunnen

we de veranderlijke perioden van de zonneactiviteit en uiteindelijk de elfjarige periode vaststellen. Die relatie tussen de verschijnselen van de ionosfeer en die van de zon is vanuit fysisch standpunt nog niet precies gedefinieerd, maar is toch reeds voldoende bekend om voorspellingen enkele maanden vooraf mogelijk te maken. De verandering van het aantal vlekken die reeds sedert ongeveer 200 jaar worden waargenomen, kan worden voorspeld door berekening (fig. 11). Als we er nu nog de ionosferische resultaten bij betrekken die sedert twintig jaar worden bekomen, dan vinden we onderlinge verbanden die voldoende sterk zijn om het toekomstig gedrag van de  $F_2$ -laag te voorzien in verband met de toekomstige zonneactiviteit (figuur 12).

De  $F_2$ -laag is zeer vatbaar voor storingen. Bij een poollichtverschijning of een storm wordt zij zo grondig vernietigd dat er een nieuwe werking van de zon nodig is om het gewone evenwicht te herstellen. Op gemiddelde breedten zijn de gevolgen van een ionosferische storm over het algemeen minder uitgesproken; nochtans, wanneer de storing sterk is, dan ondergaat de  $F_2$ -laag zo'n veranderingen dat de maximale ionisatie op een abnormaal laag niveau terugvalt en dat de laag volledig uiteenvalt. Er zijn soms twee of drie dagen nodig vooraleer de zon, door zijn ioniserende werking, de laag in zijn oorspronkelijke vorm kan terugbrengen. De zwakste storingen vertonen dikwijls een tendens tot herhaling na 27 dagen, de gemiddelde rotatieperiode van de zon. Een fakkelveld op de zon manifesteert dus haar activiteit door een verandering van de fysische toestand van de opperionosfeer.

#### DE $F_1$ -LAAG

De  $F_1$ -laag die dikwijls begrepen is in de  $F_2$ -laag, is een gebied waarvan het gedrag ongeveer overeenkomst met dat van de E-laag (figuur 13). Zij verdwijnt altijd 's nachts en vertoont overdag een verandering die bijna gelijktijdig plaatsvindt met de beweging van de zon boven de horizon. De seizoenveranderingen en de elfjarige veranderingen zijn eveneens vergelijkbaar met die van de E-laag. Nochtans moeten we aanstippen dat de  $F_1$ -laag 's winters niet voortkomt in gebieden van de aarde waar de seizoenverandering zeer uitgesproken is, in de evenaarsgebieden daarentegen wordt ze altijd waargenomen.

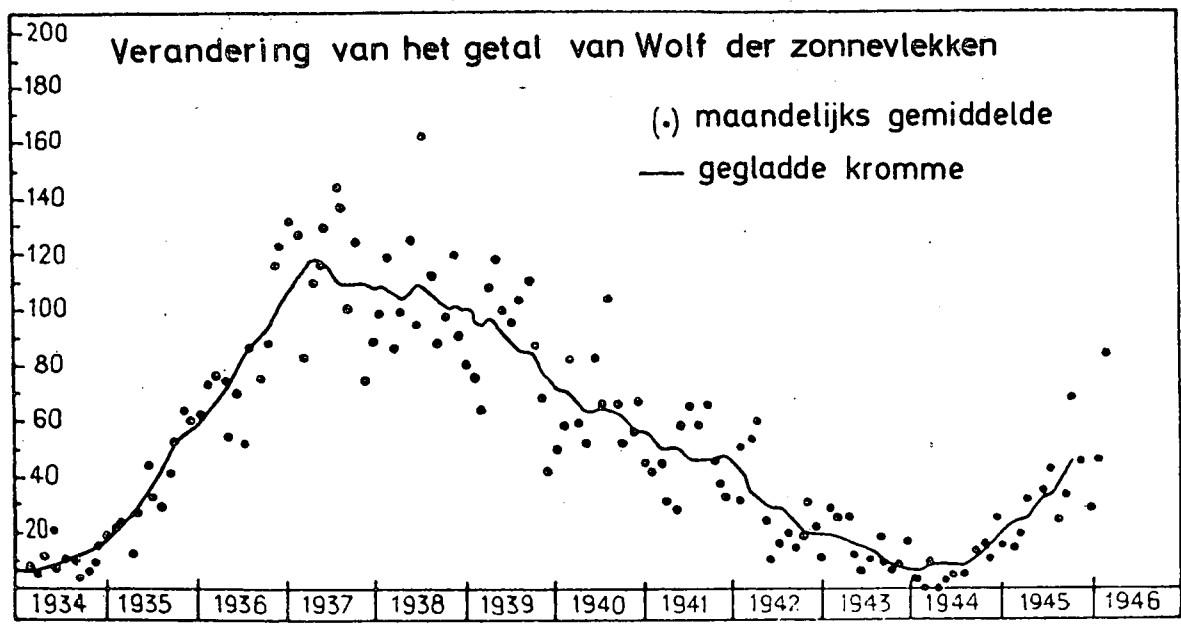


Fig. 11.- Zonneactiviteit tijdens een elfjarige cyclus.

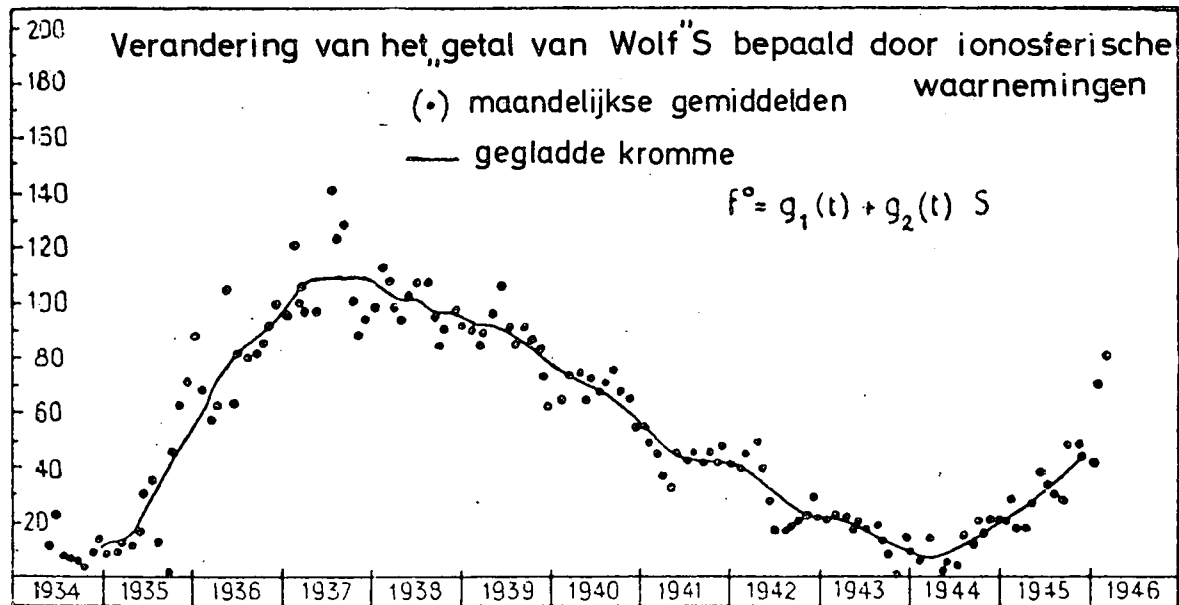


Fig. 12.- Verandering van de kritieke frequentie van de F<sub>2</sub>-laag tijdens een cyclus van zonne-activiteit.

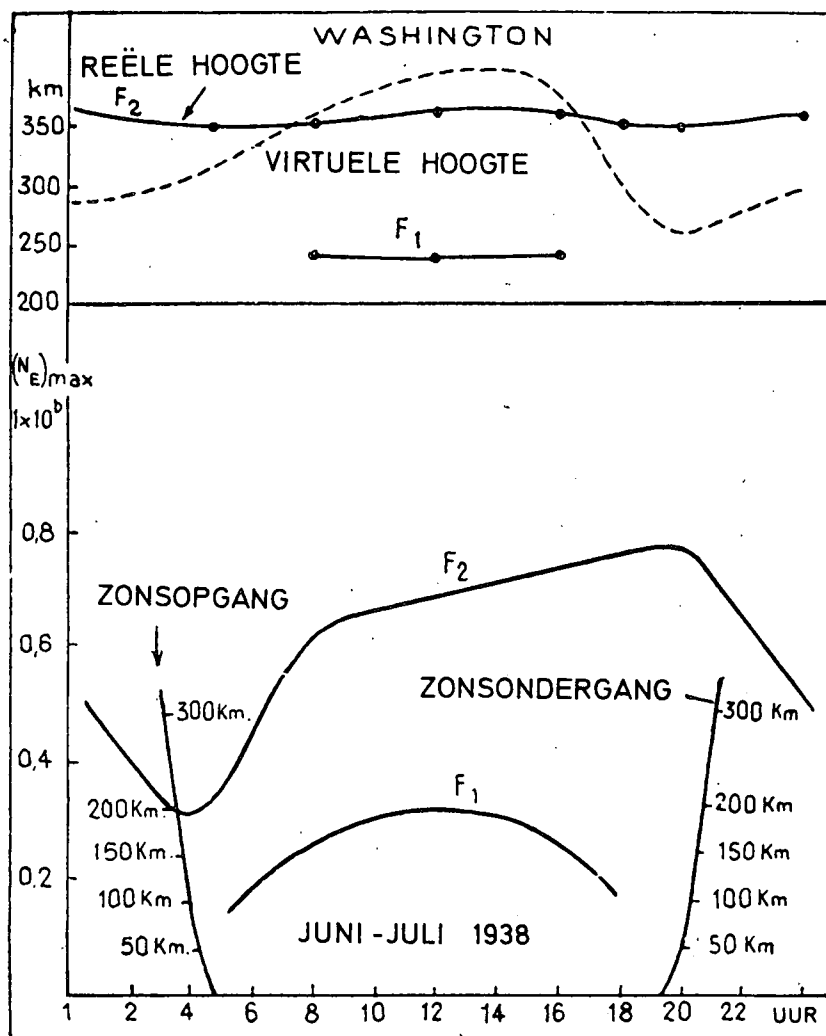


Fig. 13.- Verandering van de maximale elektronenconcentratie in de  $F_1$ -laag.

DE D-LAAG

De klassieke ionosferische peilingen verschaffen niet veel inlichtingen over de D-laag daar de korte golven gewoonlijk die laag doorkruisen. De middengolven die gewoonlijk worden gebruikt in radiouitzendingen kunnen ook niet worden gebezigd omdat ze overdag in de D-laag worden geabsorbeerd. Met de gewone methoden voor ionosferische peiling door middel van korte golven kunnen we de D-laag niet bestuderen. Daarom worden andere middelen gebruikt : de lange golven (meer dan 1 km), de waarneming van alledaagse verschijnselen zoals atmosferieten (storingen veroorzaakt door de stormen), of bijzondere verschijnselen die voortkomen uit ionosferische storingen.

Vooraleer de waarnemingsgegevens nauwkeurig te omschrijven, kunnen we toch enkele besluiten opgeven om de rol te verstaan die door de onderste ionosferische laag wordt gespeeld.

Het maximum aantal elektronen in de D-laag bedraagt enkele duizenden elektronen per  $\text{cm}^3$  tijdens de dag. Dat aantal elektronen kan geen merkbare breking van de korte golven veroorzaken, maar is voldoende voor de weerkaatsing van de lange golven. 's Nachts verdwijnt de ionisatie volledig en bereiken alle golven de hogere lagen vooraleer te worden teruggezonden.

Een van de belangrijkste kenmerken van de D-laag is dat de golven er een demping ondergaan. Die demping is des te belangrijker naarmate de frequentie van de golven lager is (figuur 14). De ionosferische elektronen worden aan het trillen gebracht als gevolg van de radio-elektrische golf en slorpen een deel van haar energie op. Aangezien het elektron tijdens zijn trilling in botsing komt met de atmosferische moleculen, gaat een deel van de trillingsenergie over in een moleculaire agitatie-energie en wordt niet teruggegeven aan de invallende golf. Het verlies zal des te groter zijn naarmate het aantal botsingen hoger is en zal zich vooral manifesteren op hoogten lager dan 100 km. Nochtans kan de golf haar reflexie ondergaan vooraleer

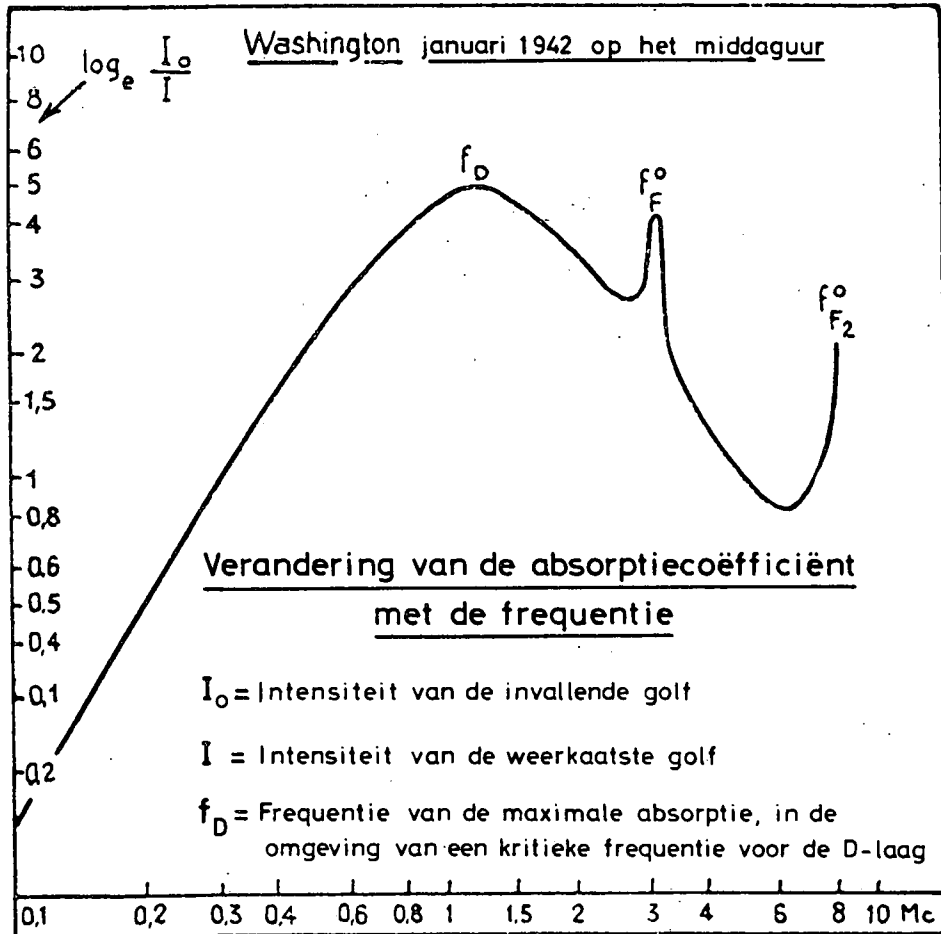


Fig. 14.- Verandering van de absorptie van een golf volgens de frequentie.

ze diep in de laag binnendringt en van dan af zal haar demping zwak zijn. Dat laatste geval komt bijna overeen met dat van de kilometergolven. Met golven van 20 km kunnen we reflexies op gemiddelde hoogten van 75 km waarnemen. De bliksem zendt golven uit in een zeer brede frequentieband. Daardoor is het mogelijk radio-elektrische waarnemingen uit te voeren van kilometergolven die eveneens worden weerkaatst op lage hoogten, beneden de 80 km. Het lijkt wel of de D-laag 's nachts helemaal verdwijnt, aangezien die verscheidene echo's van grotere hoogten (90-95 km) blijken te komen. Bij middengolven bereikt de demping haar maximum. Het is dan ook onmogelijk overdag de radiostations met uitzendingen in de middengolf op grote afstand te ontvangen. 's Nachts kan de ethergolf worden ontvangen op grote afstanden omdat de absorptie geen rol meer speelt als gevolg van het verdwijnen van de D-laag (figuur 15).

Er bestaan technische procédés waarmee we bij een ionosferische peiling de absorptie kunnen meten die de korte golven tijdens hun dubbele doortocht van de D-laag ondergaan. We kunnen gemakkelijk waarnemen dat die volledige absorptie verandert met de hoogte van de zon boven de horizon en 's nachts niet bestaat. De waarnemingsresultaten vertonen nochtans een zeer grote verscheidenheid in de verkregen gegevens en eveneens zo'n vlugge schommelingen dat we ze moeten toeschrijven aan variaties van de gëroniseerde toestand van de D-laag.

Die veranderingen van de gëroniseerde toestand kunnen worden verklaard door wijzigingen van de zonnestraling. De normale straling veroorzaakt de fundamentele ionisatie van het gebied, daarbij komt nog de veranderlijke straling die afhangt van de zonneactiviteit. Wanneer de zonneactiviteit een hoogtepunt bereikt dan doet de gëroniseerde toestand dat ook. Het resultaat daarvan is een abnormale toeneming van de botsingen tussen de elektronen en de moleculen en per slot van rekening, een zeer uitgesproken of totale demping van de korte golf. Dat is het plotselinge verdwijnen van de korte golven.

Wanneer de ontvangst van de korte golven plots ophoudt, zien we gewoonlijk een zonnevlam (figuur 16), dat is een helder en plots lichtverschijnsel, ontspringen in een actieve plaats van de zonnechromosfeer. Op hetzelfde ogenblik bemerken we



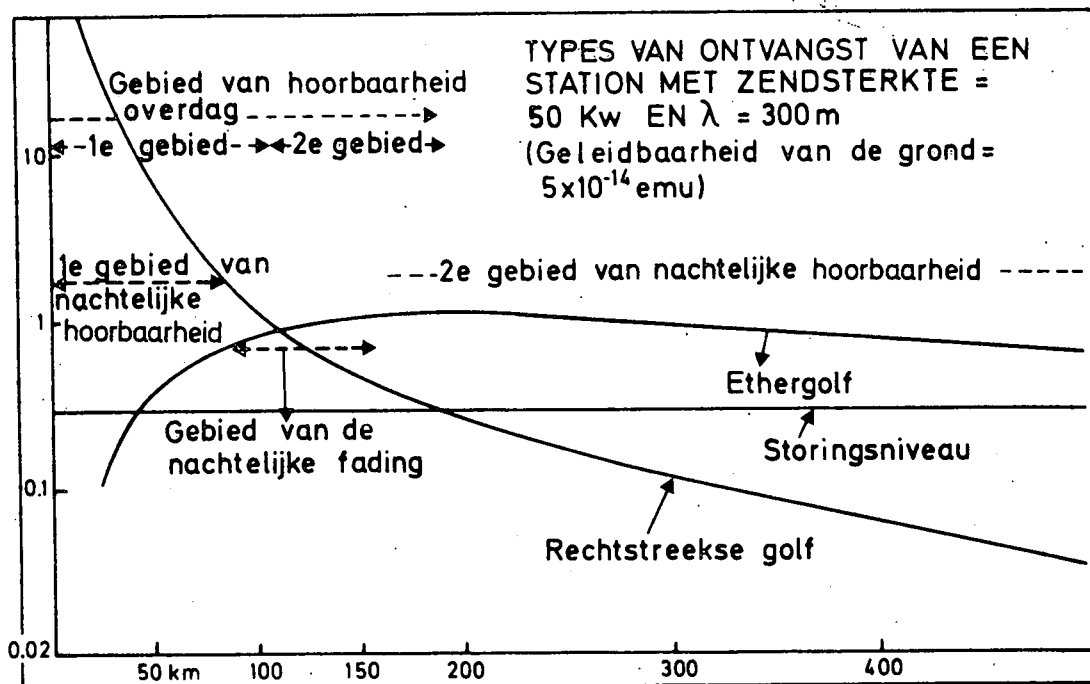


Fig. 15.- Ontvangstintensiteit van een emissie op middengolf.

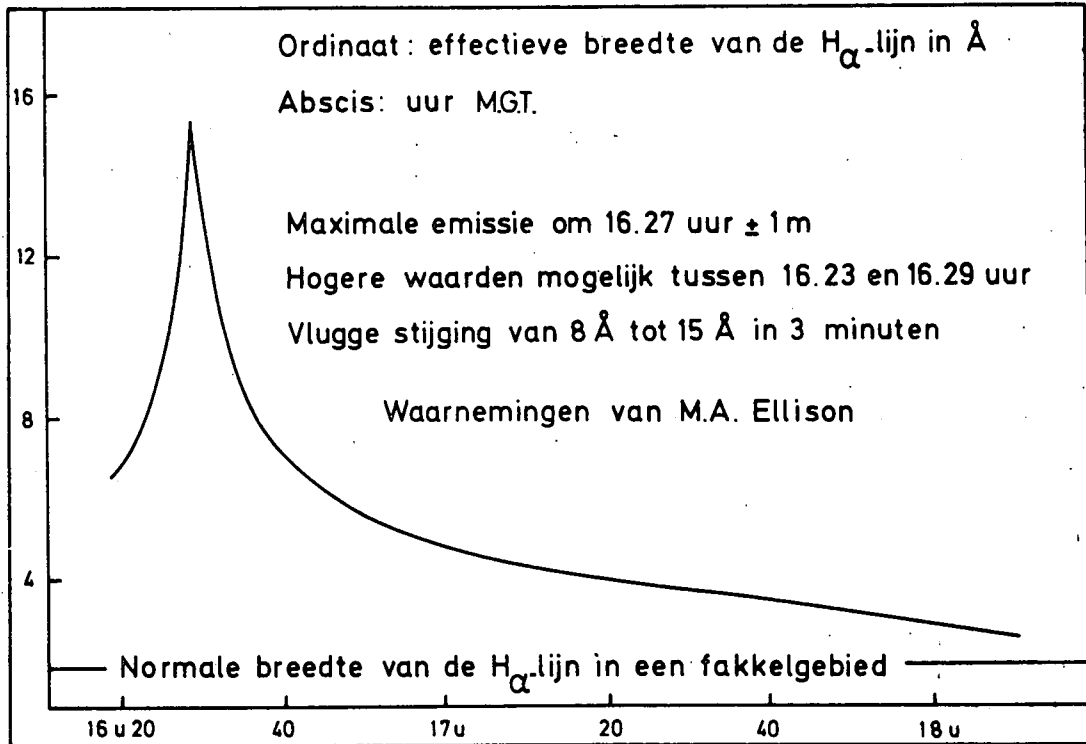


Fig. 16.- Emissie tijdens een zonnevlam.

eveneens dat de lange golven, kilometer- of myriametergolven, die worden weerkaatst op de onderkant van de D-laag, versterkt zijn. Het ionosferisch effect manifesteert zich op de golfbanen die door de zon worden verlicht en komt het duidelijkst tot uiting op de plaats waar de zon haar grootste hoogte heeft. Het aantal verdwijningen is gebonden aan de zonneactiviteit, in deze zin dat het aantal vlammen de elfjarige activiteit volgt en dat zij des te intenser zijn naarmate het oppervlak van de zon zeer actieve fakkelvelden vertoont.

Het verschijnsel van de zonnevlam en van haar aardse effecten kan in de meest typische gevallen als volgt worden omschreven. Binnen een fakkelgebied, dat gekenmerkt wordt door een groep vlekken, komt een vlam voor die beantwoordt aan een lichtemissie waarvan de helderheid soms groter is dan die van de nabijge zonneschijf. Dat buitengewone en bewegende lichtverschijnsel verwekt een ionosferische storing die zich manifesteert in de vorm van een plotselinge verdwijning van korte golven, een versterking van lange golven en een knik in de magnetische opnamen. We noteren eveneens een plotselinge toeneming in de radio-elektrische uitzendingen van de zon op de decimeter- en metergolven. De kosmische straling kent een toeneming die lichtjes is vertraagd en verplaatst op de aarde volgens de snelheid en de weg die de deeltjes hebben afgelegd (figuur 17). Ongeveer 24 uur later barst de magnetische storm los die in alle magnetische stations wordt waargenomen terwijl een poollicht 's nachts op hoge en soms gemiddelde breedtes de hemel verlicht. Op dat ogenblik treedt er eveneens een wijziging op in de kosmische straling als gevolg van de verandering in het aardmagnetisch veld. Die vertraagde effecten van de zonnevlam worden veroorzaakt door deeltjes die door de zon zijn uitgestoten als gevolg van elektrodynamische processen binnen haar atmosfeer en die de afstand van de zon naar de aarde afleggen met een snelheid die laag is vergeleken met die van het licht.

#### BOVEN DE F-LAAG

Vooraleer satellieten werden aangewend, konden we de elektronenconcentratie boven de maximale concentratie van de  $F_2$ -laag nooit bepalen. Nog niet zo heel lang geleden werd een ionosferische peiler geplaatst in een satelliet die rond de aarde

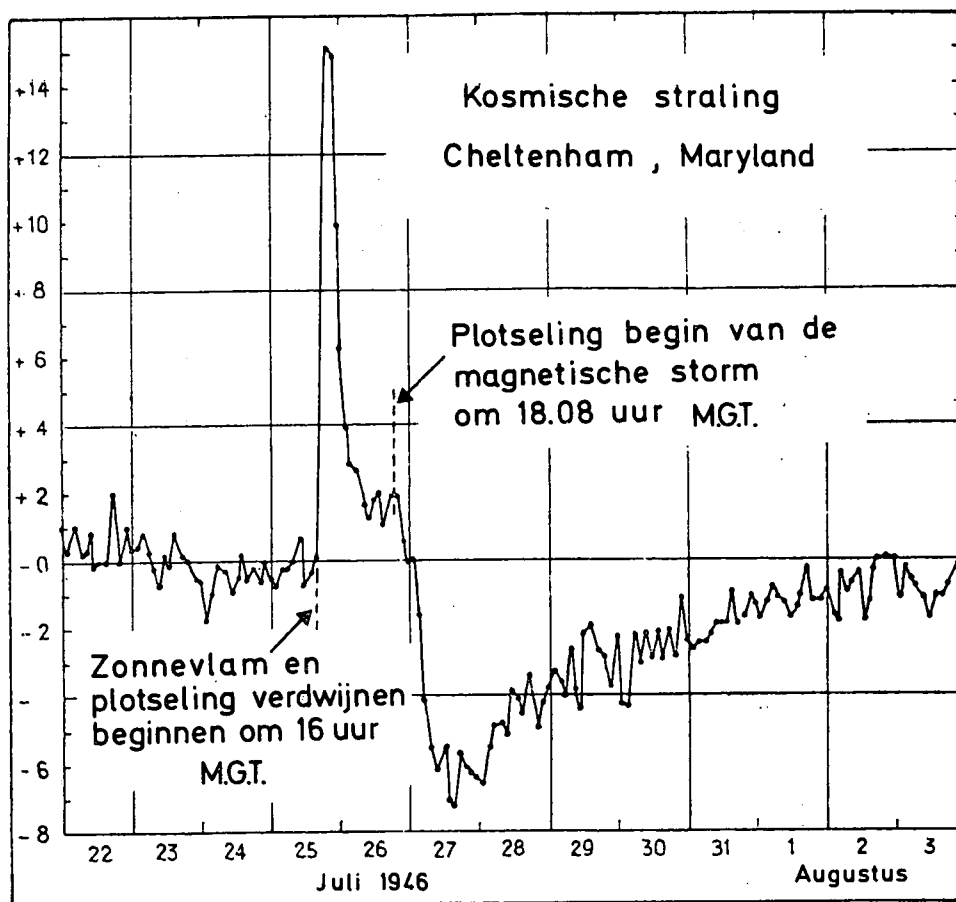


Fig. 17.- Verhouding tussen een zonnevlam en de intensiteit van de kosmische straling.

draait boven de maximale concentratie van de  $F_2$ -laag. Daardoor werd het gemakkelijk het opperste gebied van de ionosfeer te analyseren volgens hetzelfde procédé dat op de aarde werd gebruikt. Een peiler aan boord van een satelliet kan door een frequentieverandering het gehele ionosferische gebied tussen de zender en het maximum van de  $F_2$ -laag aftasten. Zo kunnen we thans met twee ionosferische peilers de verticale verdeling van de elektronenconcentratie bepalen over de gehele ionosfeer. Op die wijze bemerken we dat in de opperionosfeer de elektronenverdeling in breedte en in lengte sterk gebonden is aan de effecten van het aardmagnetisch veld. De verticale verdeling van de elektronen boven het maximum van het F-gebied richt zich in principe langs een krachtlijn van het aardmagnetisch veld.

Op een bepaalde hoogte wordt de gemiddelde vrije weglengte van de geladen deeltjes voldoende groot (meer dan 3000 km) zodat we kunnen aannemen dat we ons in de iono-exosfeer bevinden, waar de ionen en de elektronen hun eigen banen volgen die worden geleid door het magnetisch veld. Daarom kunnen de geladen deeltjes slechts uit de atmosfeer ontsnappen volgens de krachtlijnen van het magnetisch veld die aansluiten op de interplanetaire ruimte ; het contact met het uitwendig milieu wordt mogelijk gemaakt door de krachtlijnen in de poolgebieden. Aan de evenaar en op de gemiddelde breedten kunnen de deeltjes zich slechts verplaatsen van een punt van een hemisfeer tot een punt dat magnetisch verbonden is met het andere halfrond. De ionosfeer strekt zich nochtans niet uit tot aan de interplanetaire ruimte. We stellen inderdaad vast dat aan de evenaar haar eigenschappen identiek blijven tot op een afstand van over het algemeen vier aardstralen gerekend vanaf het centrum van de aarde. De elektronenconcentratie valt er plotseling terug tot zeer lage waarden. Er bestaat een zodanige breuk in het geïoniseerde milieu (ionosferisch plasma) dat we kunnen bevestigen dat de ionosfeer deel uitmaakt van de geïoniseerde atmosfeer die deelneemt aan de rotatie en dat het geïoniseerde milieu aan de breuk er niet toe behoort. Die breuk, plasmapauze genaamd, ligt aan de evenaar niet altijd op een afstand van vier aardstralen : zij strekt zich uit tot op een afstand van 5,5 stralen tijdens de periode van grote kalmte van de magnetische onrust ; tijdens de periode van magnetische storm daalt ze tot op twee of drie aardstralen. De hoogte

van de plasmapauze varieert trouwens en dat moet te wijten zijn aan het feit dat de structuur van de magnetosfeer (krachtlijnen van het magnetisch veld) wordt gewijzigd volgens de stand van de aarde ten opzichte van de zon. Als gevolg van de invloed van de zonnwind (figuur 18) worden de krachtlijnen van het magnetisch veld van de aarde die in 24 uur ronddraait, voortdurend gewijzigd als zij overgaan van de nachtzijde naar de dagzijde en omgekeerd. Daarom is de ionosfeer bovenaan steeds verbonden met de magnetosfeer.

### DE HOMOSFEER

Het is niet moeilijk de homosfeer te beschrijven als we ons beperken tot de analyse van de concentratie van haar belangrijkste elementen : moleculaire stikstof en moleculaire zuurstof (Tabel I). We moeten nochtans rekening houden met de verschijnselen die zich voordoen als gevolg van de zonnestraling en de kosmische straling. Nu is het zo dat het grootste gedeelte van de stikstof- en zuurstofmoleculen niet wordt beïnvloed door de werking van stralingen die van buiten de atmosfeer afkomstig zijn (figuur 19). De absorptie van de verschillende stralingen leidt evenwel tot bepaalde effecten van ionisatie en dissociatie.

De galactische kosmische straling veroorzaakt een permanente ionisatie in de hele stratosfeer en in de mesosfeer. We zullen later zien hoe die ionisatie aan de oorsprong ligt van de ionosferische D-laag boven 65 km hoogte. De essentiële kenmerken van die ionisatie door kosmische straling zijn de volgende : zij varieert sterk met de breedte (een minimum ionisatie aan de evenaar en een maximum in de poolkap) en zij bereikt een minimum bij sterke zonneactiviteit. De ionisatie is nochtans slechts een secundair verschijnsel in de homosfeer, in feite is de dissociatie als gevolg van de ultraviolette zonnestraling een belangrijker fenomeen.

Moleculaire zuurstof ( $O_2$ ) wordt gefotodissocieerd als gevolg van stralingen met golflengten beneden  $2410 \text{ \AA}$

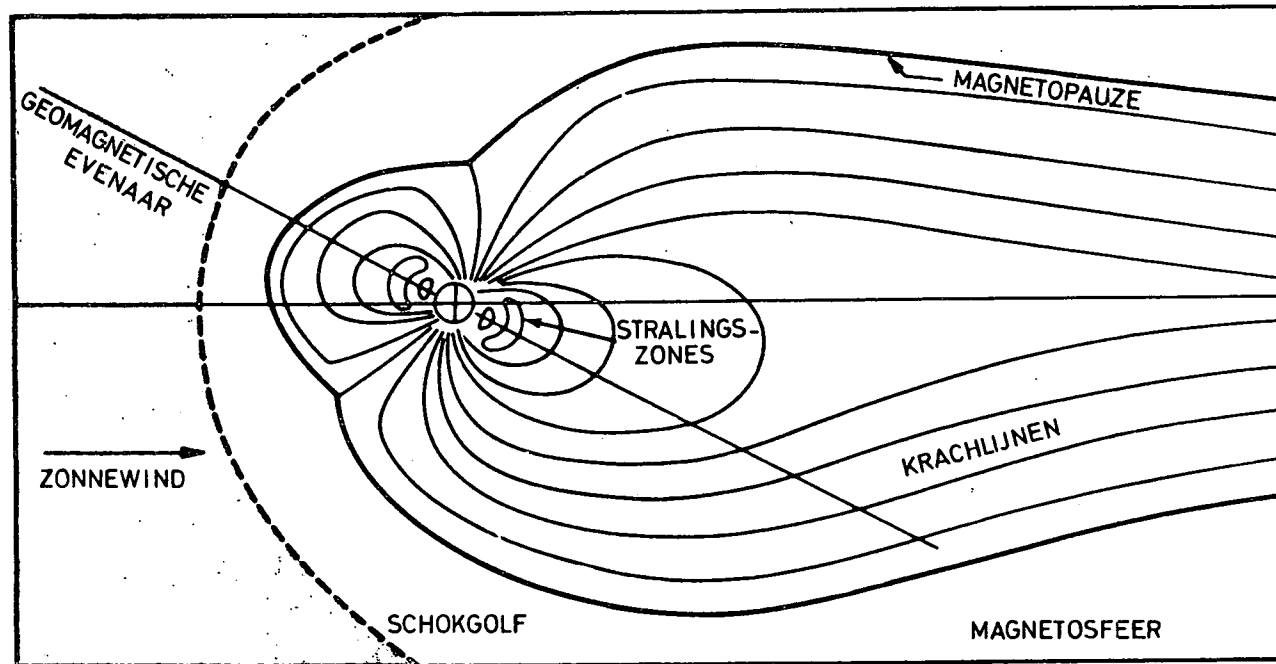


Fig. 18.- De configuratie van het algemeen aardmagnetisch veld wordt voortdurend vervormd onder invloed van de zonnwind, dat wil zeggen de deeltjes uitgezonden door de zon. De krachtlijnen worden samengeperst aan de zonnzijde en worden uitgerokken aan de tegenovergestelde zijde. Deeltjes (protonen en elektronen) worden gevangen in het gebied van de gesloten krachtlijnen. Doordat het magnetisch veld in de poolgebieden aan de tegenovergestelde zijde open is, kunnen de deeltjes ontsnappen.

TABEL I. Druk, dichtheid, concentratie en temperatuur in de homosfeer (\*)

Hoogte (km)	Temperatuur (°K)	Druk (mm Hg)	Dichtheid (g cm <sup>-3</sup> )	Concentratie (cm <sup>-3</sup> )
15	211	8,5x10 <sup>1</sup>	1,9x10 <sup>-4</sup>	3,9x10 <sup>18</sup>
20	219	3,9x10 <sup>1</sup>	8,2x10 <sup>-5</sup>	1,7x10 <sup>18</sup>
25	227	1,8x10 <sup>1</sup>	3,7x10 <sup>-5</sup>	7,7x10 <sup>17</sup>
30	235	8,6	1,7x10 <sup>-5</sup>	3,6x10 <sup>17</sup>
35	252	4,3	8,0x10 <sup>-6</sup>	1,7x10 <sup>17</sup>
40	268	2,3	3,9x10 <sup>-6</sup>	8,1x10 <sup>16</sup>
45	274	1,2	2,0x10 <sup>-6</sup>	4,3x10 <sup>16</sup>
50	274	6,6x10 <sup>-1</sup>	1,1x10 <sup>-6</sup>	2,3x10 <sup>16</sup>
55	274	3,6x10 <sup>-1</sup>	6,0x10 <sup>-7</sup>	1,3x10 <sup>16</sup>
60	253	1,9x10 <sup>-1</sup>	3,5x10 <sup>-7</sup>	7,2x10 <sup>15</sup>
65	232	9,4x10 <sup>-2</sup>	1,9x10 <sup>-7</sup>	3,9x10 <sup>15</sup>
70	211	4,4x10 <sup>-2</sup>	9,7x10 <sup>-8</sup>	2,0x10 <sup>15</sup>
75	194	1,9x10 <sup>-2</sup>	4,6x10 <sup>-8</sup>	9,6x10 <sup>14</sup>
80	177	7,9x10 <sup>-3</sup>	2,1x10 <sup>-8</sup>	4,3x10 <sup>14</sup>
85	160	2,9x10 <sup>-3</sup>	8,5x10 <sup>-9</sup>	1,8x10 <sup>14</sup>
90	177	1,5x10 <sup>-3</sup>	2,9x10 <sup>-9</sup>	7,6x10 <sup>13</sup>
95	193	4,5x10 <sup>-4</sup>	1,1x10 <sup>-9</sup>	2,2x10 <sup>13</sup>
100	209	2,0x10 <sup>-4</sup>	4,3x10 <sup>-10</sup>	1,0x10 <sup>13</sup>

(\*) De gegevens van de tabel moeten slechts als aanwijzingen worden beschouwd ; de homosfeer is aan breedte- en seizoenveranderingen onderworpen.



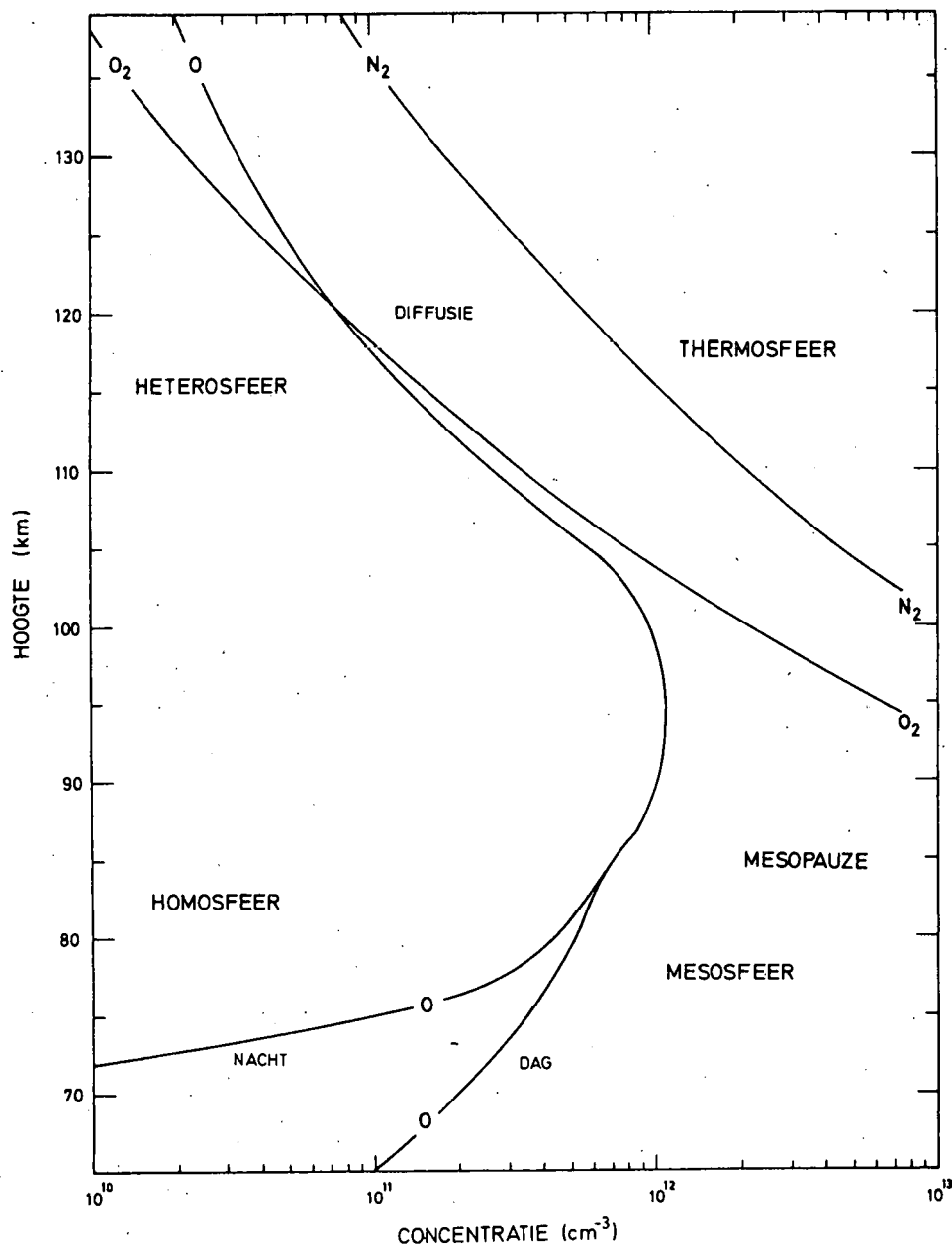
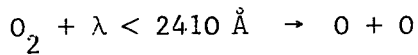
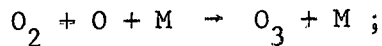


Fig. 19.- Overgangsgebied in de aardatmosfeer van de homosfeer tot de heterosfeer. De homosfeer wordt gekenmerkt door een standvastig gehalte van de belangrijkste bestanddelen, moleculaire stikstof en moleculaire zuurstof. In het overgangsgebied is atomaire zuurstof het belangrijkste bestanddeel. Het overgangsgebied wordt tenslotte gekarakteriseerd door de overgang van de mengingstoestand van de belangrijkste gassen naar de diffusietoestand.



Dat proces ligt aan de basis van geheel de fotochemie in de homosfeer. De produktie van zuurstofatomen (O) in de stratosfeer en de mesosfeer leidt onmiddellijk tot de produktie van de ozonmolecule,



door een driedubbele botsing tussen een zuurstofmolecule ( $O_2$ ), een zuurstofatoom (O) en een derde deeltje M, dat een zuurstof- of een stikstofmolecule kan zijn, wordt een ozonmolecule ( $O_3$ ) gevormd.

Zo absorberen de  $O_3$ - en  $O_2$ -moleculen in de homosfeer geheel de ultraviolette zonnestraling met golflengten van 3000 Å tot 1800 Å, ozon absorbeert vooral golflengten van 3000 Å tot 2000 Å en zuurstof die beneden 2000 Å. Daaruit volgt dat de absorptie van die ultraviolette straling door ozon de basis is voor het stijgen van de temperatuur met de hoogte in de stratosfeer ; de ultraviolette verwarming is voldoende om een maximale temperatuur te veroorzaken in de stratopauze. De absorptie door zuurstof daarentegen is in de mesosfeer te zwak en daardoor daalt de temperatuur met de hoogte tot het lage minimum dat in de mesopauze wordt bereikt.

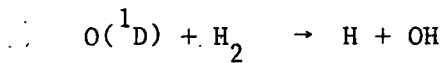
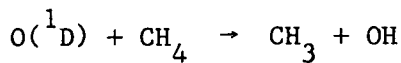
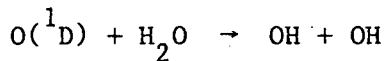
De aanwezigheid van ozon in de stratosfeer en de mesosfeer ontketent een hele reeks van chemische processen. Zo wordt ozon gefotodissocieerd als gevolg van de ultraviolette zonnestraling met golflengten beneden 3000 Å :



Het essentiële kenmerk van die dissociatie is echter dat de zuurstofmoleculen en zuurstofatomen zich in aangeslagen toestanden bevinden. Bij het onderzoek van het hemellicht hebben we het reeds gehad over de aanwezigheid van de aangeslagen zuurstofmoleculen in de  $^1\Delta_g$ -toestand, wat aanleiding geeft tot een intense infrarode emissie

in de hele stratosfeer en in geheel de mesosfeer. Van zeer groot belang is het feit dat een aangeslagen  $^1\text{D}$ -zuurstofatoom wordt geproduceerd (een aangeslagen atoom in de  $^1\text{S}$ -toestand is eveneens mogelijk).

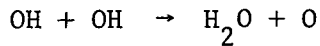
Wanneer een aangeslagen zuurstofatoom in aanwezigheid wordt gebracht van waterdamp ( $\text{H}_2\text{O}$ ), methaan ( $\text{CH}_4$ ) of waterstof ( $\text{H}_2$ ), dan treedt onmiddellijk een oxydatie op volgens deze mechanismen :



We zien dus dat wanneer waterdamp gedissocieerd is, alle waterstofsamenstellingen kunnen worden gevormd :  $\text{HO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , ... Aangezien anderzijds stikstofmonoxyde ( $\text{NO}$ ) aanwezig is, kunnen verbindingen als salpeterzuur ( $\text{HNO}_3$ ) gevormd worden. De aëronomische analyse van die reacties wordt later besproken. We hebben hier niettemin willen benadrukken hoe binnen de homosfeer, een lichte fotodissociatie van zuurstof leidt tot merkwaardige reeksen van reacties van bestanddelen die in geringe mate voorkomen en die een kapitale rol spelen in de algemene structuur van de stratosfeer en de mesosfeer.

Een van de essentiële aspecten die we in verband met de homosfeer steeds voor ogen moeten houden, is dat de lucht er altijd voldoende wordt doorengemengd om dezelfde mengverhouding van moleculaire stikstof en zuurstof te kunnen behouden. De "moleculaire diffusie" in de homosfeer, dat wil zeggen de neiging gassen met verschillende moleculaire massa te scheiden, wordt altijd in evenwicht gehouden door de "turbulente diffusie", dat wil zeggen de neiging tot een volledige menging van de voornaamste gassen. Wanneer echter bijvoorbeeld methaan en moleculaire waterstof worden geoxydeerd, dan kan de vernietiging ervan slechts gecompenseerd worden door een aanvoer van moleculen uit de troposfeer. Moleculaire en turbulente diffusie zijn

echter niet voldoende om het verlies door oxydatie te compenseren. Zo ontdekken we dat methaan en moleculaire waterstof in de stratopauze verdwijnen. Nochtans stippen we aan dat waterdamp gemakkelijk behouden blijft als gevolg van zijn recombinitie in de stratosfeer en de mesosfeer :



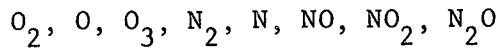
In de mesopauze wordt het dissociatie-effect van  $\text{H}_2\text{O}$  gemakkelijk gecompenseerd door de aanvoer van moleculen ten gevolge van turbulente diffusie.

Met die voorbeelden hebben we willen benadrukken hoe belangrijk de horizontale en verticale verplaatsingsmechanismen van de lucht in de stratosfeer en in de mesosfeer zijn. Een aëronomische analyse van de homosfeer is nauw verbonden met het dynamische aspect. De aëronomische vraagstukken van helium en waterstof in de heterosfeer hangen trouwens af van de verplaatsingsomstandigheden in de homosfeer. Helium wordt geproduceerd in de aardkorst, komt voor in de atmosfeer, beweegt zich verder in de homosfeer door het proces van moleculaire diffusie en bereikt tenslotte de thermosfeer waar het een belangrijke rol speelt die wij later zullen toelichten. Atomaire waterstof is het produkt van de oxydatie van waterstofbestanddelen waarvan het gedrag wordt bepaald door de eigenschappen van de homosfeer. We zullen daarop eveneens terugkomen bij de studie van de chemosfeer.

#### DE CHEMOSFEER

Wanneer we het vraagstuk aanpakken van de dissociatie van de twee bestanddelen van de lucht, moleculaire zuurstof en moleculaire stikstof, dan moeten we onmiddellijk spreken over de talloze reacties die voortvloeien uit de aanwezigheid van de zuurstof- en stikstofatomen.

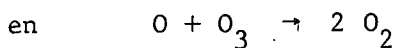
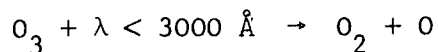
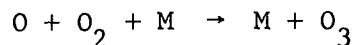
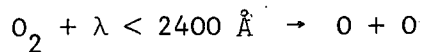
Het probleem is relatief eenvoudig in een atmosfeer bestaande uit zuurstof en stikstof ; a priori kunnen we de volgende bestanddelen in aanmerking nemen :



dat wil zeggen enerzijds moleculaire zuurstof ( $O_2$ ), het O-atoom en ozon ( $O_3$ ) (figuur 20) en anderzijds moleculaire stikstof ( $N_2$ ), het N-atoom, stikstofmonoxyde (NO), stikstofdioxyde ( $NO_2$ ) en distikstofoxyde ( $N_2O$ ).

Zolang we in de homosfeer blijven, zien we dat alleen zuurstof kan worden gefotodissocieerd door de zonnestraling met golflengten boven  $1800 \text{ \AA}$  die in de atmosfeer boven de mesopauze binnenkomt. Moleculaire stikstof is niet onderworpen aan directe dissociatie en we mogen aannemen dat de aanwezigheid van het stikstofatoom te verwaarlozen is in de stratosfeer en de mesosfeer.

In een atmosfeer die bestaat uit moleculaire zuurstof en moleculaire stikstof en die onderworpen is aan de ultraviolette zonnestraling, is er dus een zwakke gedeeltelijke fotodissociatie van  $O_2$  en wordt ozon gevormd (zie boven). We herhalen hier nog eens alle processen :



Het onderzoek van de numerieke coëfficiënten die overeenkomen met die verschillende processen toont onmiddellijk aan dat ozon in de stratosfeer meer voorkomt dan het zuurstofatoom (zie figuur 20) ; binnen de mesosfeer is het juist omgekeerd.

Dat eenvoudig uitgangspunt kunnen we echter slechts als een eerste stap aanzien in de analyse van de chemosfeer. Inderdaad, het feit dat er waterstofsamenstellingen voorkomen, zelfs in geringe mate, als gevolg van de indirecte dissociatie van waterdamp,

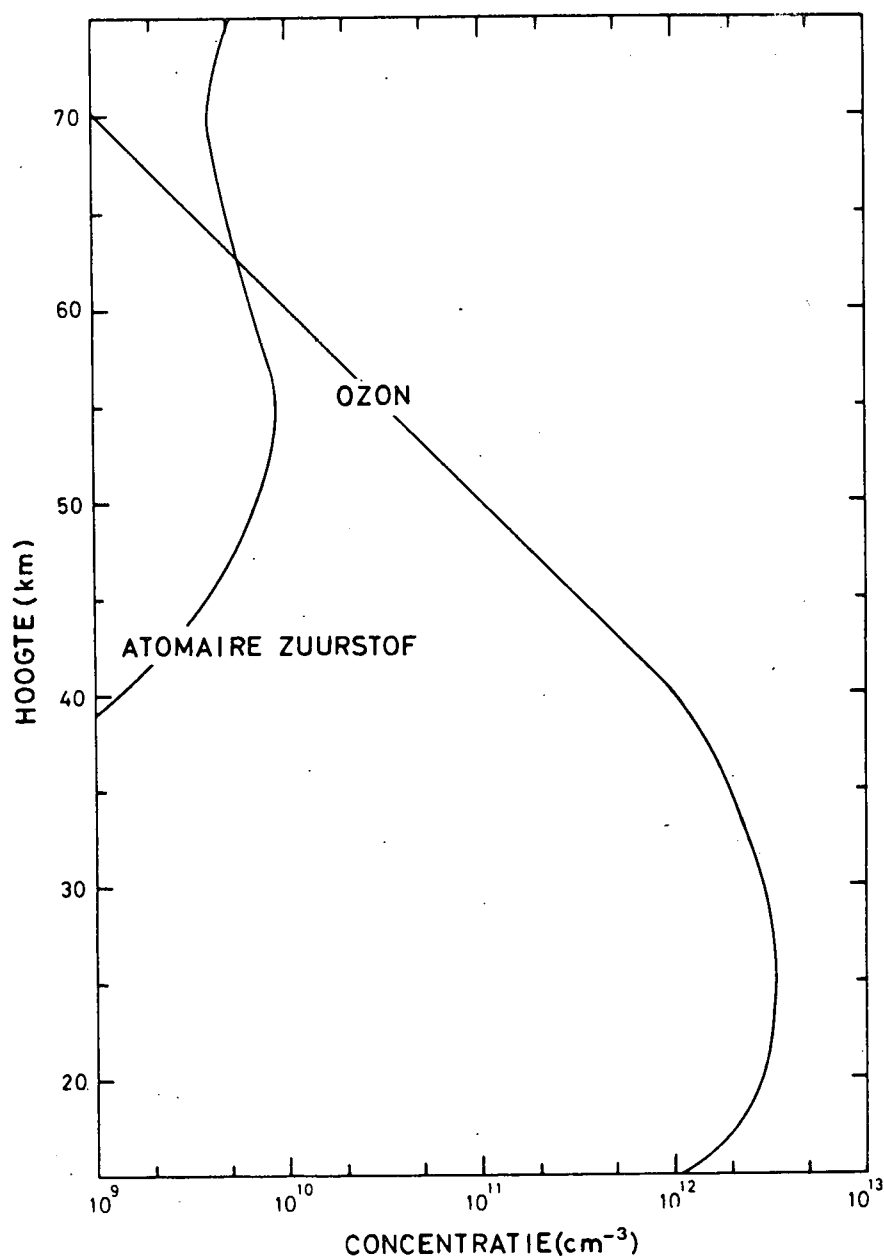
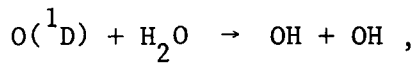
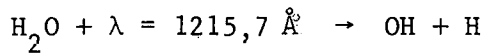


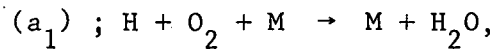
Fig. 20.- Verticale verdeling van ozon en van atomaire zuurstof in de stratosfeer en de mesosfeer. De concentratiewaarden van ozon worden gekozen om de omstandigheden overdag op de beste manier weer te geven ; die van atomaire zuurstof zijn fotochemische evenwichtswaarden.



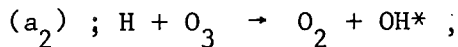
of van de directe dissociatie door de Lyman-alfa-zonnestraling met golflengte 1215,7 Å, die in de mesosfeer tot op 70 km binnendringt,



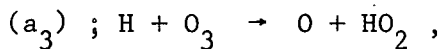
leidt tot nieuwe reacties (zie figuur 21) :



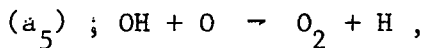
vorming van  $H_2O$  door een driedubbele botsing tussen een waterstofatoom (H) en een zuurstofmolecule ( $O_2$ ) ;



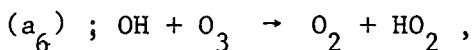
vorming van een aangeslagen  $OH^*$ -radicaal (dat aanleiding geeft tot een intense infrarode uitstraling in het nachtgloren) door een vlugge reactie tussen atomaire waterstof (H) en een ozonmolecule ( $O_3$ ) ;



eveneens een reactie tussen atomaire waterstof (H) en ozon ( $O_3$ ) die tot de vorming van  $HO_2$  leidt, maar minder vlug dan de vorige reactie ;



waarin het effect van het zuurstofatoom zich manifesteert op OH en opnieuw atomaire waterstof levert ;



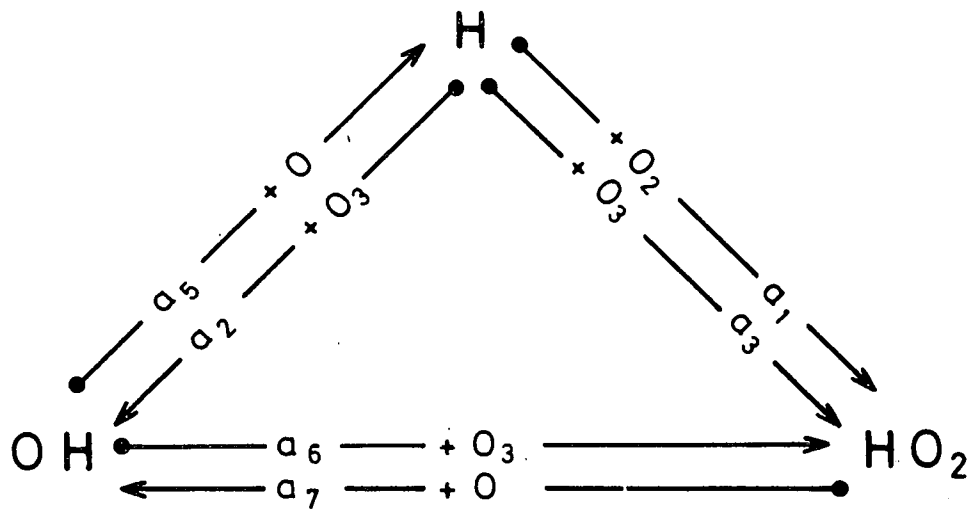
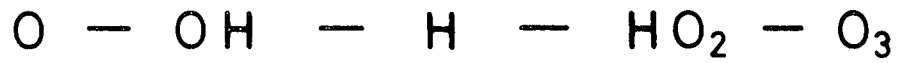
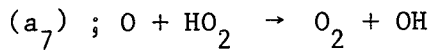


Fig. 21.- Schema met de belangrijkste reacties tussen atomaire waterstof (H), het OH-radicaal en de HO<sub>2</sub>-molecule in moleculaire zuurstof (O<sub>2</sub>) en atomaire zuurstof (O) met ozon (O<sub>3</sub>). In de opper- mesosfeer heeft atomaire waterstof (H) de overhand ; in de stratosfeer daarentegen is H te verwaarlozen ten opzichte van OH en HO<sub>2</sub>.



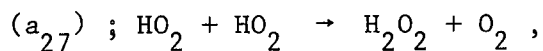
waarin het gelijktijdige effect van ozon ( $O_3$ ) op OH tot de vorming van  $HO_2$  leidt ;



waarin het effect van het zuurstofatoom op  $HO_2$  opnieuw het OH-radicaal doet afscheiden.

Door al die reacties zien we hoe het evenwicht tussen ozon en het zuurstofatoom kan worden beïnvloed door de bestanddelen die in geringe mate voorkomen zoals H, OH en  $HO_2$ . In de mesosfeer, waar het zuurstofatoom domineert, haalt atomaire waterstof het op OH en  $HO_2$  omdat de reacties  $a_5$  en  $a_7$  zo belangrijk zijn : eerst wordt  $HO_2$  er omgevormd tot OH en vervolgens OH tot H. Anderzijds zien we dat atomaire waterstof in de oppermesosfeer en daarboven kan worden behouden, omdat het de rol speelt van katalysator in de beide reacties  $a_2$  en  $a_5$  [ $H + O_3 \rightarrow OH (+ O_2) + O \rightarrow H (+ O_2)$ ] waarin ozon en atomaire zuurstof worden vernietigd. Die rol van katalysator van atomaire waterstof in de mesosfeer gaat gepaard met die van regulator van de concentratie van mesosferisch ozon. Met andere woorden, de aanwezigheid van de waterstofsamenstellingen veroorzaakt een vermindering van de ozonconcentratie in de mesosfeer.

In de stratosfeer, waar het zuurstofatoom relatief weinig voorkomt, hebben de reacties met ozon de overhand. Om die reden halen OH en  $HO_2$  het op atomaire waterstof (H) die praktisch verdwijnt. Dat zijn dan reacties die leiden tot een overvloedige aanwezigheid van  $HO_2$  en zo wordt waterstofperoxyde geproduceerd volgens het proces



waarbij twee  $HO_2$ -moleculen reageren (figuur 22).

Van zodra de  $H_2O_2$ -molecule wordt gevormd door de reactie  $a_{27}$ , kan zij een fotodissociatie ondergaan door een straling met golflengten beneden  $3650 \text{ \AA}$ ,

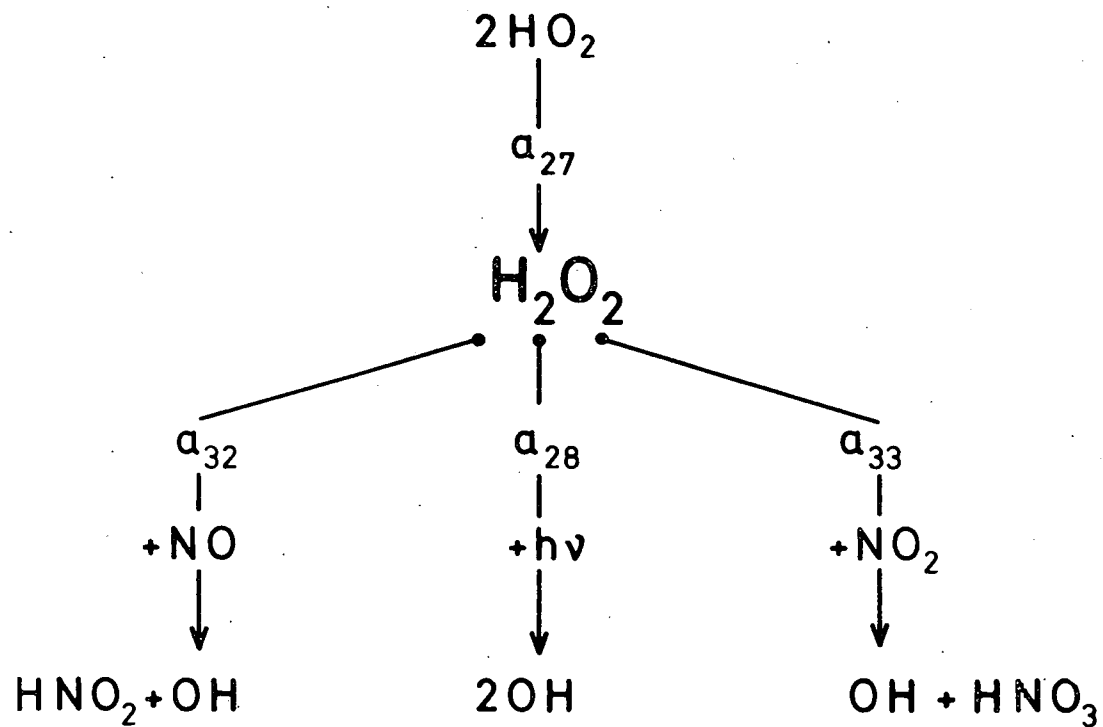
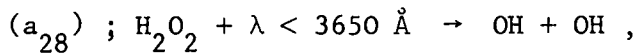
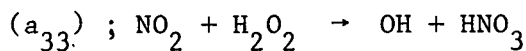
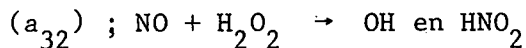


Fig. 22.- Schema met de reactie die waterstofperoxyde ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) produceert en met de belangrijkste reacties van de vernietiging ervan door fotodissociatie in OH-radicalen en met behulp van stikstofoxydes : stikstofmonoxyde ( $\text{NO}$ ) en stikstofdioxyde ( $\text{NO}_2$ ) die respectievelijk salpeterigzuur ( $\text{HNO}_2$ ) en salpeterzuur ( $\text{HNO}_3$ ) vormen.

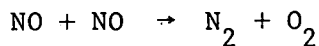


waarbij weer twee OH-radicalen worden voortgebracht. Dat dissociatieproces is echter niet het enige dat tot de dissociatie van waterstofperoxyde leidt : we kunnen aannemen dat stikstofmonoxyde (NO) en stikstofdioxyde (NO<sub>2</sub>) reageren met waterstofperoxyde (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) volgens dit schema :



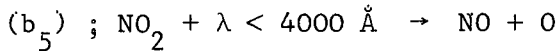
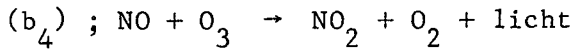
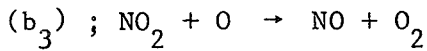
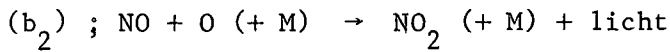
waarin OH opnieuw verschijnt en salpeterigzuur (HNO<sub>2</sub>) en salpeterzuur (HNO<sub>3</sub>) worden gevormd. Zo zou salpeterzuur de samenstelling worden die de stikstofoxyden vanuit de stratosfeer naar de troposfeer verwijdert.

De aanwezigheid van NO en NO<sub>2</sub> in de stratosfeer is het resultaat van een verplaatsing van stikstofmonoxyde vanuit de thermosfeer naar beneden. Inderdaad, NO is een molecule die stabiel is wanneer het stikstofatoom niet aanwezig is. Met andere woorden, om de NO-molecule te dissociëren moet de volgende reactie plaatsvinden :



dat wil zeggen, het stikstofatoom moet voldoende aanwezig zijn, wat niet het geval is in de mesosfeer en a fortiori in de stratosfeer. Daaruit volgt dat stikstofmonoxyde dat in de lagere thermosfeer wordt geproduceerd, door turbulente diffusie wordt verplaatst doorheen de mesosfeer en de stratosfeer zonder daarom te zijn onderworpen aan een definitieve vernietiging. Die molecule verdwijnt slechts via de omweg van een andere samenstelling zoals salpeterzuur (HNO<sub>3</sub>) dat trouwens in de stratosfeer wordt waargenomen.

De aanwezigheid van ozon (O<sub>3</sub>) en atomaire zuurstof (O) in de atmosfeer waar NO binnendringt, leidt tot de volgende reacties :



Het zuurstofatoom leidt zowel tot de produktie als tot de vernietiging van  $\text{NO}_2$ . Daarom komt stikstofmonoxyde (NO) in de mesosfeer meer voor dan stikstofdioxyde ( $\text{NO}_2$ ). In de stratosfeer echter benadert de concentratie van  $\text{NO}_2$  die van NO naarmate we de tropopauze naderen, zelfs al is de fotodissociatie van  $\text{NO}_2$  belangrijk. Overdag komt  $\text{NO}_2$  meer voor dan NO boven een hoogte van 40 km (figuur 23) ; 's nachts wordt stikstofmonoxyde omgevormd tot stikstofdioxyde omdat de zuurstofatomen verdwenen zijn.

Per slot van rekening zien we hoe zover uiteenlopende bestanddelen die in geringe mate voorkomen als de stikstofoxydes en de waterstofsamenstellingen een uiterst belangrijke aëronomische rol spelen. Om het algemeen overzicht in de vorm van een schema af te sluiten (zie figuur 24), vermelden we nog dat waterdamp, aangetast door het aangeslagen zuurstofatoom (reactie  $a_{13}^*$ ) in de stratosfeer en in de mesosfeer en door de ultraviolette zonnestraling (reactie  $a_{13}$ ) in de oppermesosfeer, leidt tot de vorming van respectievelijk twee OH-radicalen en van het waterstofatoom met eveneens een OH-radicaal. Het waterstofatoom reageert met moleculaire zuurstof (reactie  $a_1$ ) en levert de  $\text{HO}_2$ -molecule op terwijl het met ozon (reactie  $a_2$ ) OH kan vormen. De reactie tussen het zuurstofatoom en  $\text{HO}_2$  heeft de produktie van OH tot gevolg (reactie  $a_7$ ) en die tussen het zuurstofatoom en OH levert het waterstofatoom H op. Daarom leiden alle processen tot de overheersing van het waterstofatoom op de OH- en  $\text{HO}_2$ -moleculen, als de zuurstofatomen voldoende aanwezig zijn (op de grootste hoogten van de mesosfeer en in de thermosfeer).

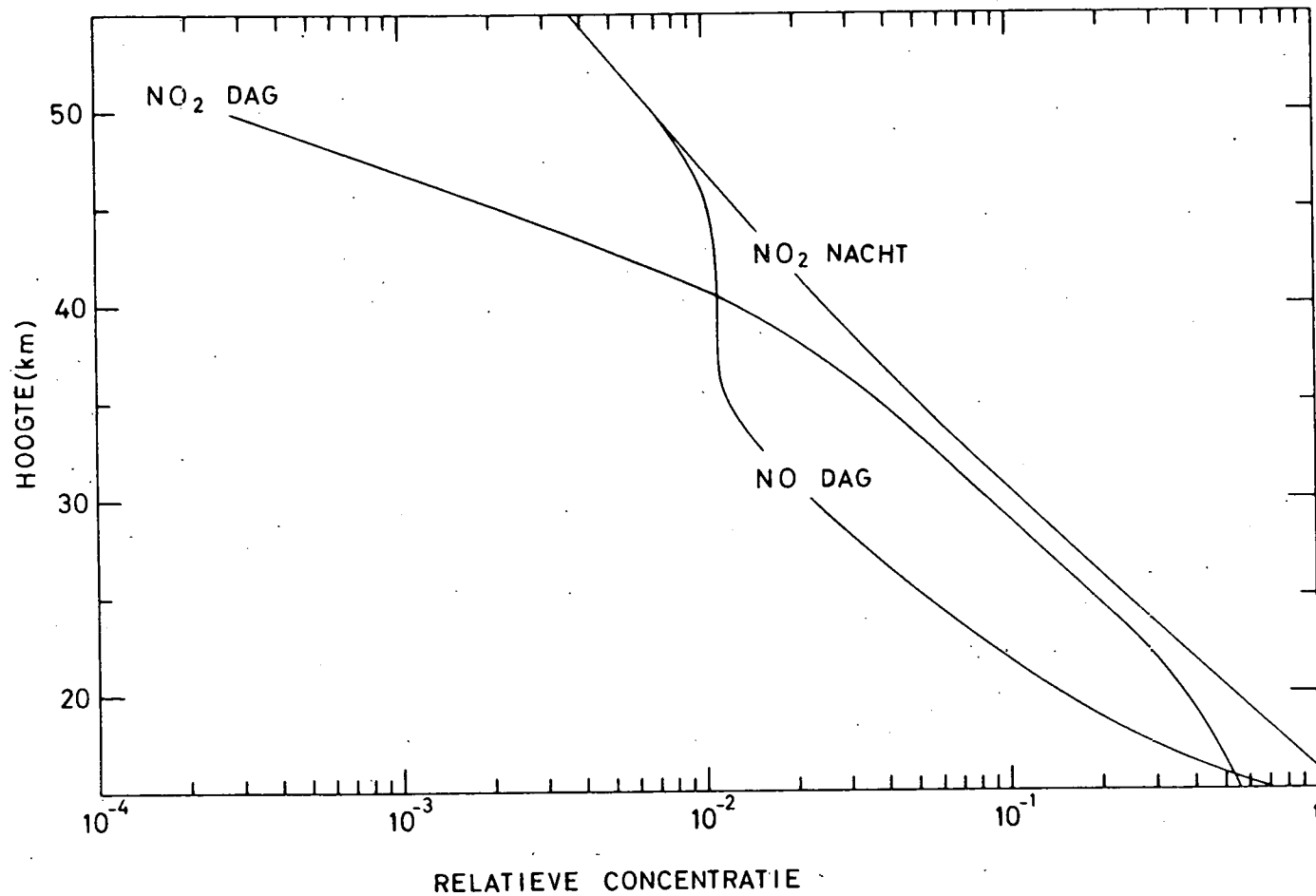


Fig. 23.- Verticale verdeling van stikstofmonoxyde (NO) en stikstofdioxyde (NO<sub>2</sub>) in de stratosfeer. Het betreft relatieve concentratiewaarden als we veronderstellen dat de verticale verdeling (NO<sub>2</sub>-kromme 's nachts) een verdeling van het mengsel is dat de verdeling van moleculaire zuurstof en moleculaire stikstof volgt. Bemerkt het belang van NO<sub>2</sub> beneden 40 km hoogte.

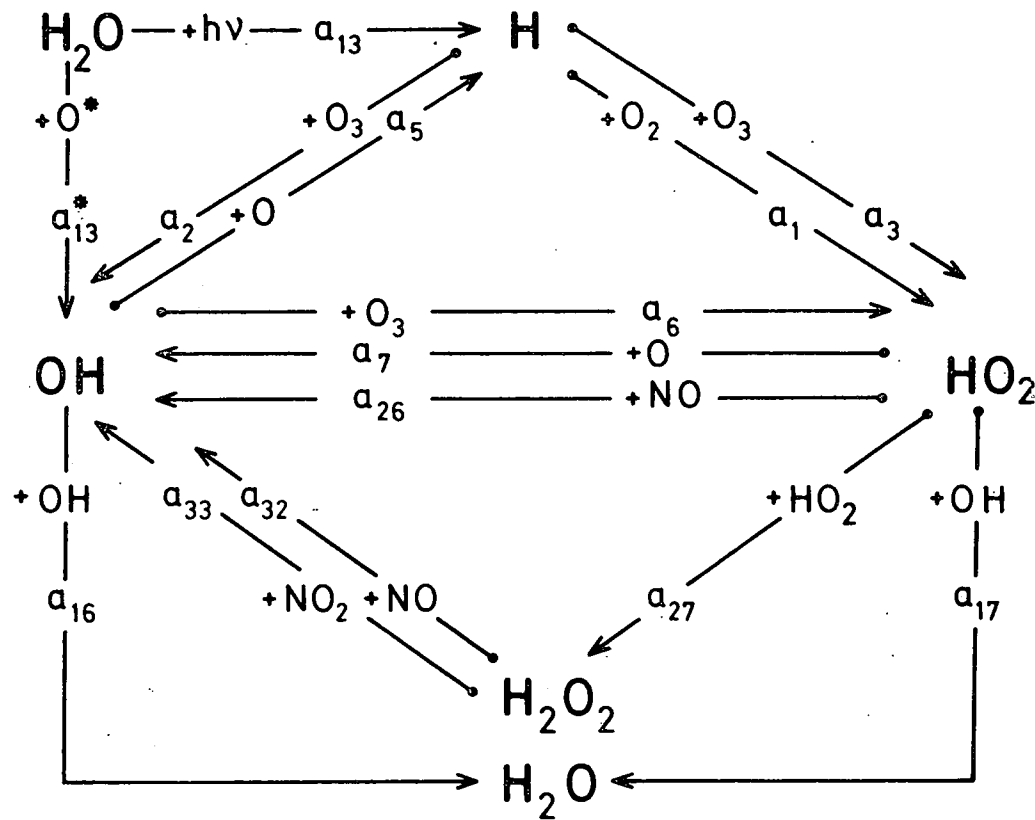
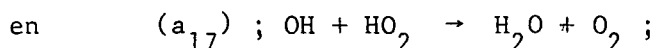
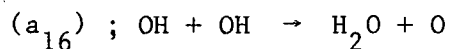
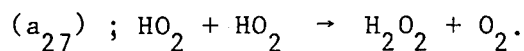


Fig. 24.- Schema met het geheel van de belangrijkste reacties die voortvloeien uit de vorming en de vernietiging van waterdamp ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Het eerste stadium is de oxydatie of de dissociatie van  $\text{H}_2\text{O}$  die leidt tot het OH-radicaal en het H-atoom. De aanwezigheid van  $\text{O}_2$  heeft de vorming van  $\text{HO}_2$  tot gevolg. Het evenwicht van H, OH en  $\text{HO}_2$  hangt af van de reacties met ozon ( $\text{O}_3$ ) en atomaire zuurstof (O). De uiteindelijke balans in de stratosfeer is gebonden aan de vernietiging van waterstofperoxyde ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) door de stikstofoxydes NO en  $\text{NO}_2$ .

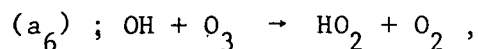
Van zodra het OH-radicaal echter voldoende belangrijk is binnen de mesosfeer zien we de waterdampmolecule ( $\text{H}_2\text{O}$ ) terug verschijnen door de volgende twee reacties :



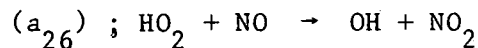
een deel ervan wordt echter omgevormd tot waterstofperoxyde door de reactie



Door een numerieke berekening stellen we vast dat er tamelijk vlug opnieuw waterdamp wordt gevormd door de reacties  $a_{16}$  en  $a_{17}$  als we aannemen dat OH en  $\text{HO}_2$  in gelijke mate aanwezig zijn. In ieder geval hangt de verhouding van die twee moleculen af van het verband tussen de reactie ( $a_6$ ) van OH met ozon ( $\text{O}_3$ ),



en de reactie ( $a_{26}$ ) van  $\text{HO}_2$  met NO,



De opeenstapeling van waterstofperoxyde wordt tenslotte geremd door de reacties  $a_{32}$  en  $a_{33}$  met stikstofmonoxyde (NO) en stikstofdioxyde ( $\text{NO}_2$ ) die het OH-radicaal reproduceren door de stikstofoxyden te elimineren als gevolg van de produktie van salpeterzuur ( $\text{HNO}_3$ ) (figuur 25). Dat zijn de essentiële elementen van de aëronomische chemie wanneer we ons beperken tot de belangrijkste reacties die in de stratosfeer en de mesosfeer kunnen voorkomen.

# SALPETERZUUR

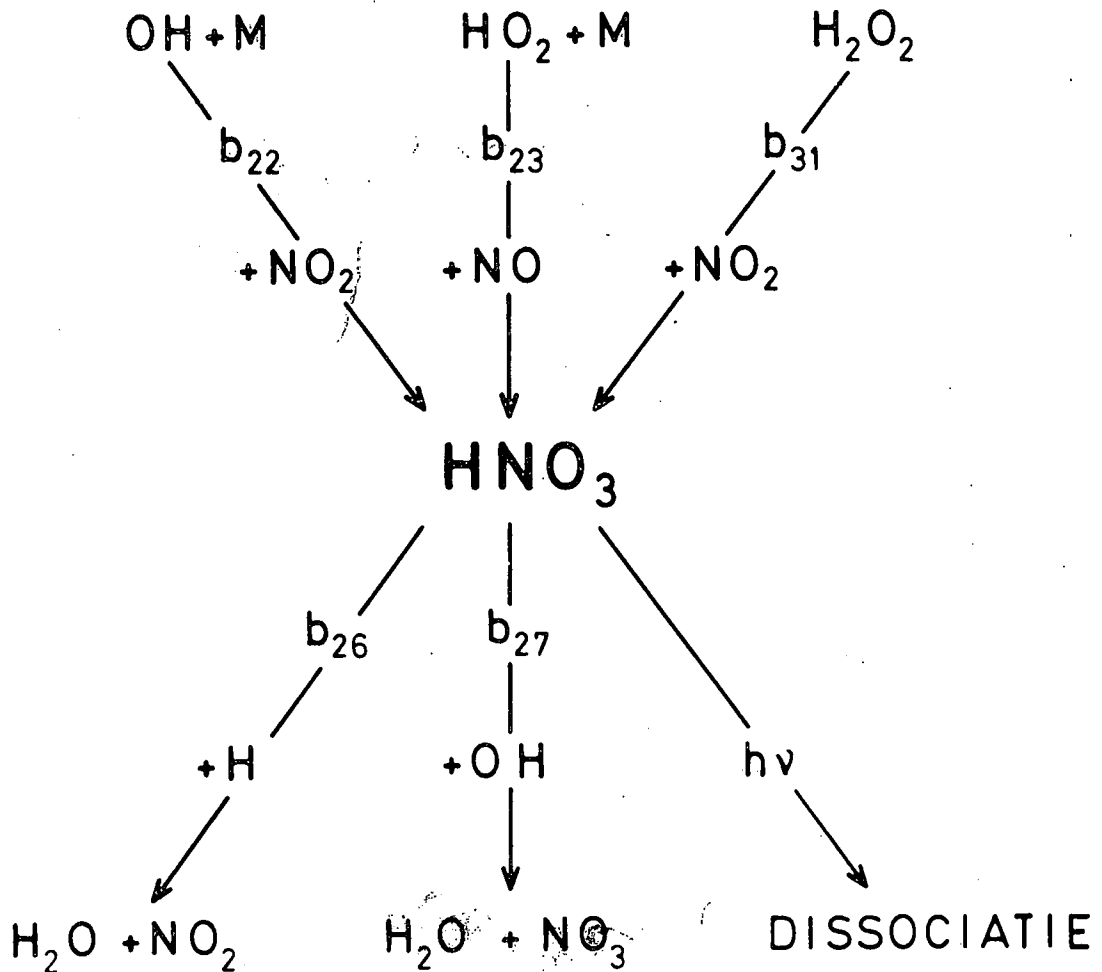


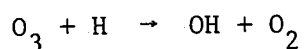
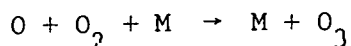
Fig. 25.- Schema met het geheel van de reacties die kunnen leiden tot de vorming en de vernietiging van salpeterzuur (HNO<sub>3</sub>). Stikstofmonoxyde (NO) dat reageert met HO<sub>2</sub> en stikstofdioxyde (NO<sub>2</sub>) dat reageert met OH en H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> liggen aan de oorsprong van HNO<sub>3</sub>. De drie vernietigingsprocessen met H, OH en de fotodissociatie zijn misschien niet zeer belangrijk, salpeterzuur zou in de troposfeer kunnen worden verplaatst.

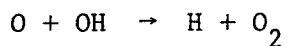


## DE HETEROSFEER

Van zodra we in de lagere thermosfeer komen, verandert de samenstelling en stijgt ook de temperatuur. Het zuurstofatoom speelt op 100 km hoogte een belangrijke rol bij de bepaling van de gemiddelde moleculaire massa : naast de massa van de  $O_2$ -molecule en van de  $N_2$ -molecule, respectievelijk 32 en 28, is er nog de massa van het zuurstofatoom (O) die 16 bedraagt. Die vermindering van de gemiddelde moleculaire massa wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door fotodissociatie van de zuurstofmolecule als gevolg van de ultraviolette zonnestraling met golflengten beneden  $1750 \text{ \AA}$ .

Wanneer we nagaan onder welke voorwaarden de dissociatietoestand van de zuurstofmolecule zich voordoet, merken we vlug op dat het evenwicht tussen dissociatie en hereniging van de zuurstofmolecule niet mogelijk is. Met andere woorden, het aantal processen dat aanleiding geeft tot dissociatie van de zuurstofmolecule en het aantal processen dat de recombinitie van de zuurstofatomen veroorzaakt, kan nooit volledig gelijk zijn voor de aëronomische omstandigheden die op deze hoogte heersen. De molecule kan op 100 km hoogte gedurende meer dan tien dagen blijven bestaan zonder te worden gefotodissocieerd ; om die reden hangt de verticale verdeling veel meer af van de verplaatsingsvoorwaarden dan van de vormings- of vernietigingsvoorwaarden. Er doet zich in feite een verbreking voor van de evenwichtsvoorwaarden van de dissociatie om over te gaan naar de evenwichtsvoorwaarden van de diffusie. Daarom kunnen we binnen de opperthermosfeer volgende mechanismen waarnemen : in de eerste plaats ontstaan er twee zuurstofatomen wanneer een zuurstofmolecule door de zonnestraling gefotodissocieerd wordt. Die atomen recombineren niet op de hoogte waar ze geproduceerd worden, maar zijn onderworpen aan een diffusiestroom die afdaalt tot op de hoogte waar de atmosferische concentratie voldoende is om de zuurstofmolecule te doen verdwijnen. Processen zoals





spelen natuurlijk een belangrijke rol. Daarna wordt de gedissocieerde molecule vervangen door een molecule die van beneden komt want  $O_2$  blijft voldoende lang bestaan wanneer ze blootgesteld is aan het zonnelicht om naar omhoog te worden verplaatst door moleculaire of turbulente diffusie.

In het kort, de dissociatietoestand van zuurstof in de lagere thermosfeer doet zich voor als een verbreking van het fotodissociatie-evenwicht : de zware  $O_2$ -moleculen stijgen, de lichte zuurstofatomen daarentegen moeten dalen vooraleer te kunnen recombineren.

In het gebied waar zuurstof onderworpen is aan de verticale verplaatsingsvoorwaarden ondergaan de andere bestanddelen trouwens alle gevolgen van de verplaatsingsprocessen (figuur 26 en figuur 27). Van 100 tot 120 km hoogte begint de turbulente diffusie haar overwicht op de moleculaire diffusie te verliezen. Dat komt door het feit dat de coëfficiënt van de moleculaire diffusie omgekeerd evenredig is met de dichtheid. Aangezien de dichtheid met een factor van tenminste 1 miljard is afgenomen vanaf het aardoppervlak tot op een hoogte van 100 km, is de intensiteit van de moleculaire diffusie met dezelfde factor vermeerderd. Vanaf een hoogte van 120 km heeft de moleculaire diffusie de overhand genomen omdat de turbulente diffusie op 100 km hoogte van minder belang is. Daardoor hebben alle atmosferische bestanddelen waarvan het reactievermogen niet te sterk is, voldoende tijd om zich volgens hun eigen massa in het zwaartekrachtsveld te verdelen. In de eerste plaats (zie figuur 19), komt stikstof met massa 28, het meest voor op 100 km hoogte (10 triljoen moleculen per  $cm^3$  of  $10^{13} cm^{-3}$ ) : het volgt bijna een verticale verdeling van de normale lucht waarvan de gemiddelde moleculaire massa 29 bedraagt. Vervolgens neemt moleculaire zuurstof met massa 32 vlugger af met de hoogte dan moleculaire stikstof (zie tabel II). Daarenboven neemt atomaire zuurstof met massa 16 relatief toe met de hoogte ten opzichte van de  $O_2$ - en  $N_2$ -moleculen ; in het algemeen komt atomaire zuurstof meer voor dan  $O_2$  boven 125 km hoogte en zelfs meer dan  $N_2$  boven 250 km (figuur 28). Daarom wordt de heterosfeer gekenmerkt door een belangrijke gordel van atomaire zuurstof die zich over verscheidene honderden km uitstrekt.

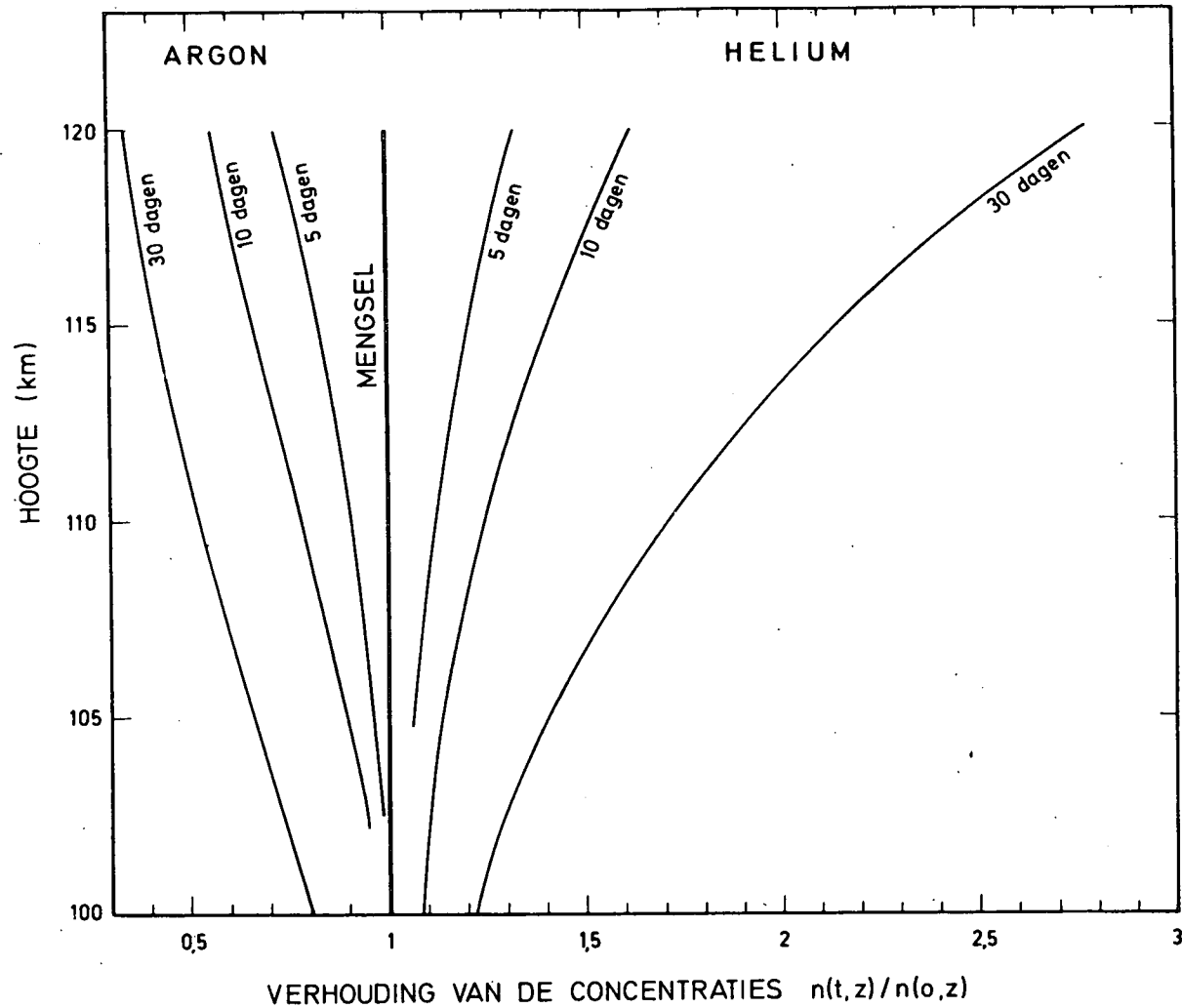


Fig. 26.- Effect van de moleculaire diffusie op de verticale verdeling van helium en argon. Er wordt verondersteld dat in de onderste regionen van de heterosfeer een perfect mengsel aanwezig is waar de concentratieverhouding  $n(t,z)/n(o,z) = 1$ , aangezien de tijd  $t = 0$  op iedere hoogte  $z$ . We stellen vast dat de afwijking zich manifesteert door een toeneming van de concentratieverhouding van helium die in een maand een factor 3 bereikt ; de concentratieverhouding van argon daarentegen vermindert tot 0,7 na 30 dagen.

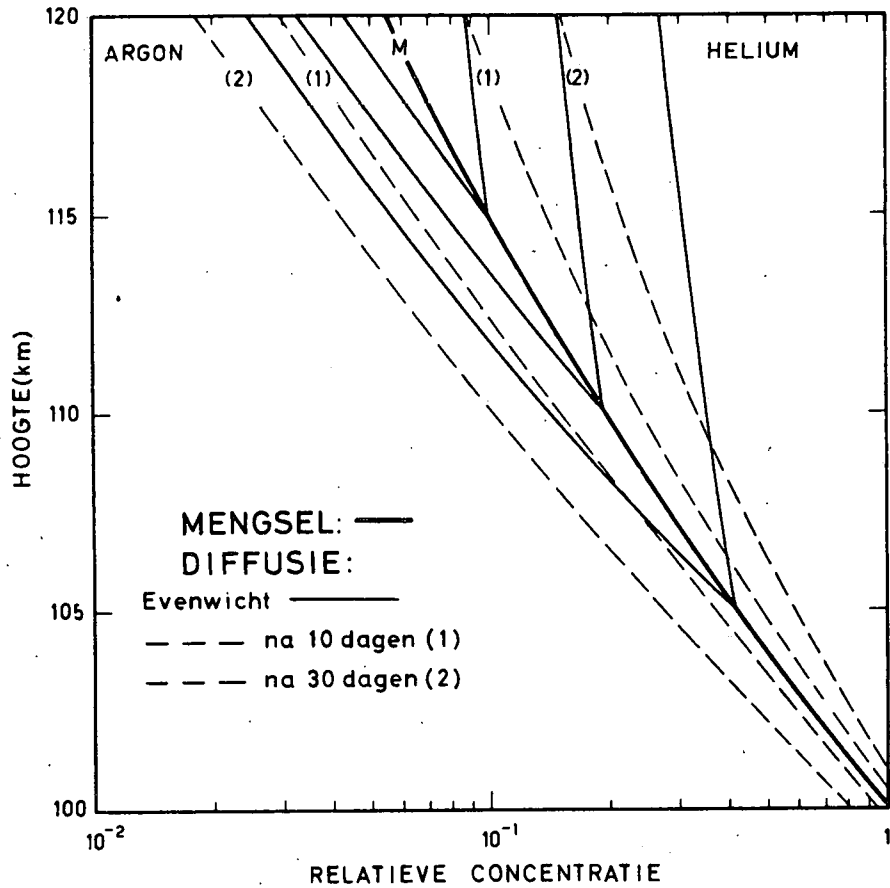


Fig. 27.- Evolutie van de verticale verdeling van argon en helium onder invloed van de moleculaire diffusie. De mengingskromme (M) toont dat na tien en dertig dagen, de diffusieverdeling van helium bijvoorbeeld gelijk is aan een diffusie-evenwicht dat plots optreedt vanaf respectievelijk 115 km en 110 km hoogte.

TABEL II. Concentraties (atomen per  $\text{cm}^3$ ) van de verschillende elementen in de heterosfeer voor temperaturen in de thermopauze van  $750^\circ\text{K}$ ,  $1000^\circ\text{K}$  en  $1500^\circ\text{K}$ .

Hoogte (km)	Temperatuur ( $^\circ\text{K}$ )	Moleculaire stikstof	Moleculaire zuurstof	Atomaire zuurstof	Helium	Atomaire waterstof
120	324	$4,0 \times 10^{11}$	$4,0 \times 10^{10}$	$1,0 \times 10^{11}$	$2,0 \times 10^7$	$5,7 \times 10^6$
	324	$4,0 \times 10^{11}$	$4,0 \times 10^{10}$	$1,0 \times 10^{11}$	$2,0 \times 10^7$	$5,7 \times 10^6$
	324	$4,0 \times 10^{11}$	$4,0 \times 10^{10}$	$1,0 \times 10^{11}$	$2,0 \times 10^7$	$5,7 \times 10^6$
150	573	$2,7 \times 10^{10}$	$2,0 \times 10^9$	$1,7 \times 10^{10}$	$1,0 \times 10^7$	$2,6 \times 10^6$
	693	$2,8 \times 10^{10}$	$2,2 \times 10^9$	$1,6 \times 10^{10}$	$9,5 \times 10^6$	$7,2 \times 10^5$
	845	$2,9 \times 10^9$	$2,2 \times 10^8$	$1,5 \times 10^9$	$8,7 \times 10^6$	$4,9 \times 10^6$
200	716	$2,0 \times 10^9$	$1,1 \times 10^8$	$3,5 \times 10^9$	$6,4 \times 10^6$	$1,9 \times 10^5$
	916	$3,2 \times 10^9$	$1,9 \times 10^8$	$4,1 \times 10^9$	$6,1 \times 10^6$	$3,3 \times 10^5$
	1238	$4,5 \times 10^9$	$2,8 \times 10^8$	$4,3 \times 10^9$	$5,5 \times 10^6$	$1,5 \times 10^6$
250	742	$2,4 \times 10^8$	$9,3 \times 10^6$	$1,0 \times 10^9$	$4,7 \times 10^6$	$1,7 \times 10^5$
	974	$6,0 \times 10^8$	$2,8 \times 10^7$	$1,5 \times 10^9$	$4,7 \times 10^6$	$2,5 \times 10^5$
	1386	$1,2 \times 10^9$	$6,7 \times 10^7$	$2,0 \times 10^9$	$4,4 \times 10^6$	$7,5 \times 10^4$
300	748	$3,1 \times 10^7$	$9,0 \times 10^5$	$3,1 \times 10^8$	$3,5 \times 10^6$	$1,6 \times 10^6$
	991	$1,3 \times 10^8$	$4,7 \times 10^6$	$6,2 \times 10^8$	$3,7 \times 10^6$	$2,2 \times 10^5$
	1448	$4,1 \times 10^8$	$1,9 \times 10^7$	$1,0 \times 10^9$	$3,7 \times 10^6$	$4,6 \times 10^4$
400	750	$5,9 \times 10^5$	$9,8 \times 10^3$	$3,2 \times 10^8$	$2,0 \times 10^6$	$1,4 \times 10^6$
	999	$6,4 \times 10^6$	$1,5 \times 10^5$	$1,1 \times 10^8$	$2,4 \times 10^6$	$1,9 \times 10^5$
	1489	$5,3 \times 10^7$	$1,9 \times 10^6$	$3,2 \times 10^8$	$2,7 \times 10^6$	$2,8 \times 10^4$
500	750	$1,3 \times 10^4$	$1,2 \times 10^2$	$3,6 \times 10^6$	$1,1 \times 10^6$	$1,2 \times 10^6$
	1000	$3,6 \times 10^5$	$5,7 \times 10^3$	$2,2 \times 10^7$	$1,6 \times 10^6$	$1,7 \times 10^5$
	1500	$7,7 \times 10^6$	$2,0 \times 10^5$	$1,1 \times 10^8$	$2,0 \times 10^6$	$2,2 \times 10^4$
750	750	1,4		$2,0 \times 10^4$	$3,1 \times 10^5$	$8,5 \times 10^5$
	1000	$3,8 \times 10^2$	2,3	$4,3 \times 10^5$	$6,0 \times 10^5$	$1,3 \times 10^5$
	1500	$8,1 \times 10^4$	$1,1 \times 10^3$	$7,7 \times 10^6$	$1,1 \times 10^6$	$1,7 \times 10^5$
1000	750			$1,5 \times 10^2$	$9,1 \times 10^4$	$6,2 \times 10^5$
	1000			$1,1 \times 10^4$	$2,4 \times 10^5$	$1,1 \times 10^5$
	1500	$1,1 \times 10^3$	8,7	$6,9 \times 10^5$	$5,8 \times 10^5$	$1,4 \times 10^4$
1500	750				$1,0 \times 10^4$	$3,6 \times 10^5$
	1000			$1,5 \times 10^1$	$4,6 \times 10^5$	$7,0 \times 10^4$
	1500			$8,6 \times 10^3$	$1,9 \times 10^3$	$1,1 \times 10^4$
2000	750				$1,5 \times 10^4$	$2,2 \times 10^4$
	1000				$1,1 \times 10^4$	$4,9 \times 10^3$
	1500			$1,8 \times 10^2$	$7,3 \times 10^2$	$8,5 \times 10^5$
2500	750				$2,6 \times 10^3$	$1,4 \times 10^4$
	1000				$3,0 \times 10^4$	$3,5 \times 10^3$
	1500			5,9	$3,1 \times 10^4$	$6,8 \times 10^4$
3000	750				$5,6 \times 10^1$	$9,7 \times 10^4$
	1000				$9,4 \times 10^2$	$2,6 \times 10^4$
	1500				$1,5 \times 10^4$	$5,6 \times 10^3$

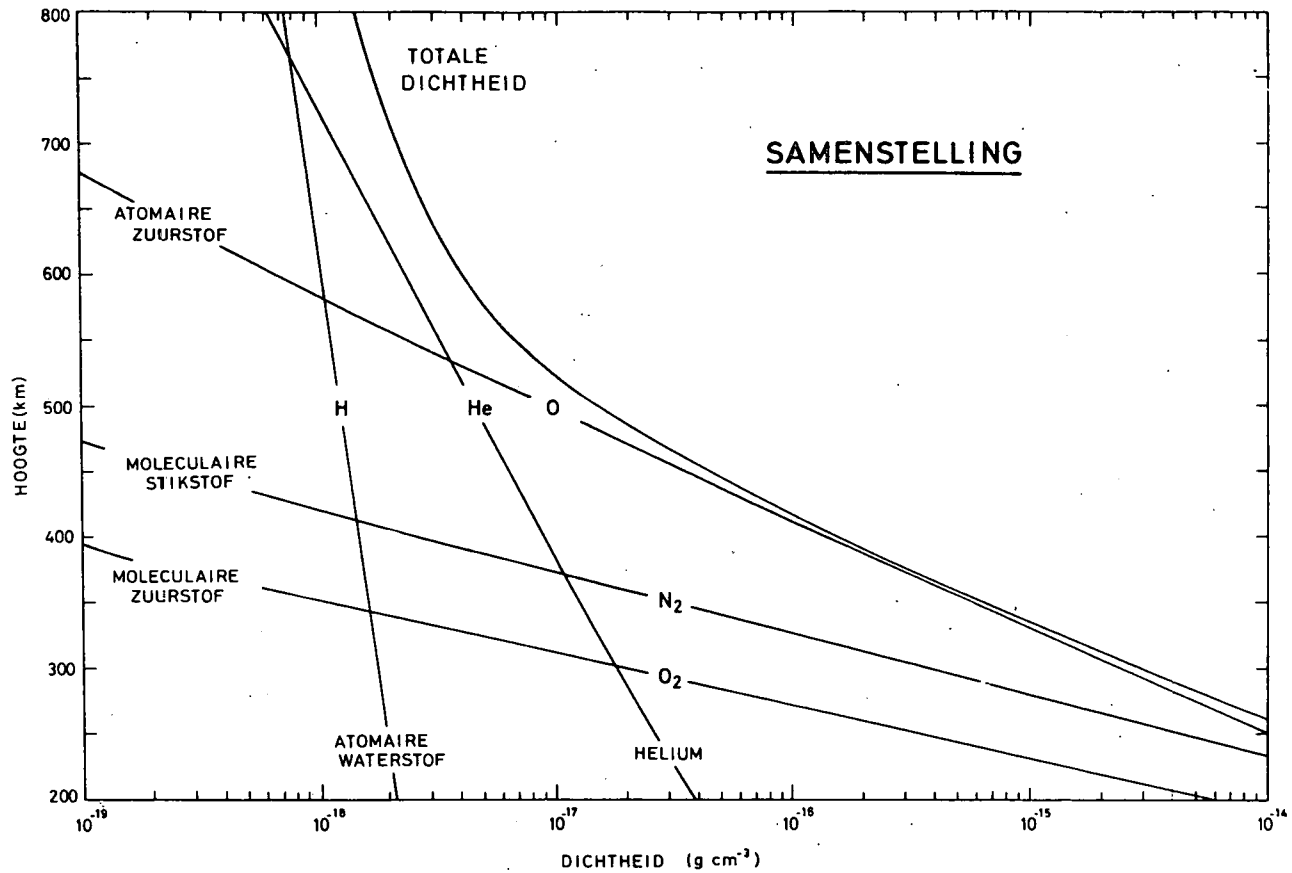


Fig. 28.- Dichtheid van de verschillende bestanddelen in diffusie-evenwicht in een heterosfeer bij 600°K. Wanneer ieder element zijn eigen verticale verdelingswet volgt in functie van zijn eigen massa, worden helium en waterstof belangrijke elementen op grotere hoogten.

Tenslotte worden edele gassen zoals helium en atomaire waterstof, waarvan het gehalte op 100 km hoogte een miljoenste bedraagt, aan het diffusie-effect onderworpen ; door hun geringe massa's, respectievelijk 4 en 1, kunnen ze overheersende elementen worden. Sedert 1961 kunnen we aantonen dat er een heliumgordel bestaat in de operatmosfeer boven de atomaire zuurstoflaag (figuur 29). Atomaire waterstof vormt uiteindelijk de corona van de aardatmosfeer. Een voorbeeld van alle verticale verdelingen van atomaire waterstof, helium, atomaire zuurstof, moleculaire stikstof en moleculaire zuurstof vindt u op de figuur 28 ; de dichtheid wordt er aangeduid voor ieder bestanddeel bij een relatief lage temperatuur van 600°K.

Wanneer we nog eens de gegevens bestuderen die sedert 1957 over de atmosferische dichtheid werden verkregen, dat wil zeggen de gegevens bekomen door het afremmen van de kunstmanen (figuur 30), dan zien we dat de dichtheid van de heterosfeer aanzienlijke variaties ondergaat. Bij de sterke zonneactiviteit van 1958 was de dichtheid uitzonderlijk hoog, bij de geringe zonneactiviteit van 1964 daarentegen bereikte zij een zeer lage waarde. Bij het zoeken naar een nauw verband met de zonneactiviteit zien we dat dit verband bestaat met sommige verschijnselen die als maatstaf voor de zonneactiviteit gelden (figuur 31) zoals bijvoorbeeld de radio-elektrische flux die door de zon in het gamma van decimetergolven, vooral die van 10 cm, uitgezonden wordt. Die radio-elektrische flux is afkomstig van zonnelagen die overeenstemmen met de hogere chromosfeer en met de lagere corona waar ultraviolette stralingen worden uitgezonden. Ze dringen in de heterosfeer binnen en worden er geabsorbeerd. Anderzijds ondergaan die ultraviolette stralingen variaties die nauw verbonden zijn met de activiteit van de zon die de radio-elektrische flux gemakkelijk kan weergeven op het aardoppervlak door middel van de radiotelescoop. Op die manier kunnen we met behulp van de radio-elektrische flux de verandering van de atmosferische druk in verband brengen met het effect van de wijziging van de geabsorbeerde ultraviolette stralingen. Als voorbeeld geven we op figuur 32 de waarnemingsomstandigheden van de satelliet Vanguard II die in 1959 rond de aarde draaide op een hoogte van 560 km. We zien dat de verandering van de rotatieperiode van de satelliet die verband houdt met de druk of de dichtheid van de atmosfeer in de buurt van het perigeum, maxima en minima vertoont die aan deze van de radio-

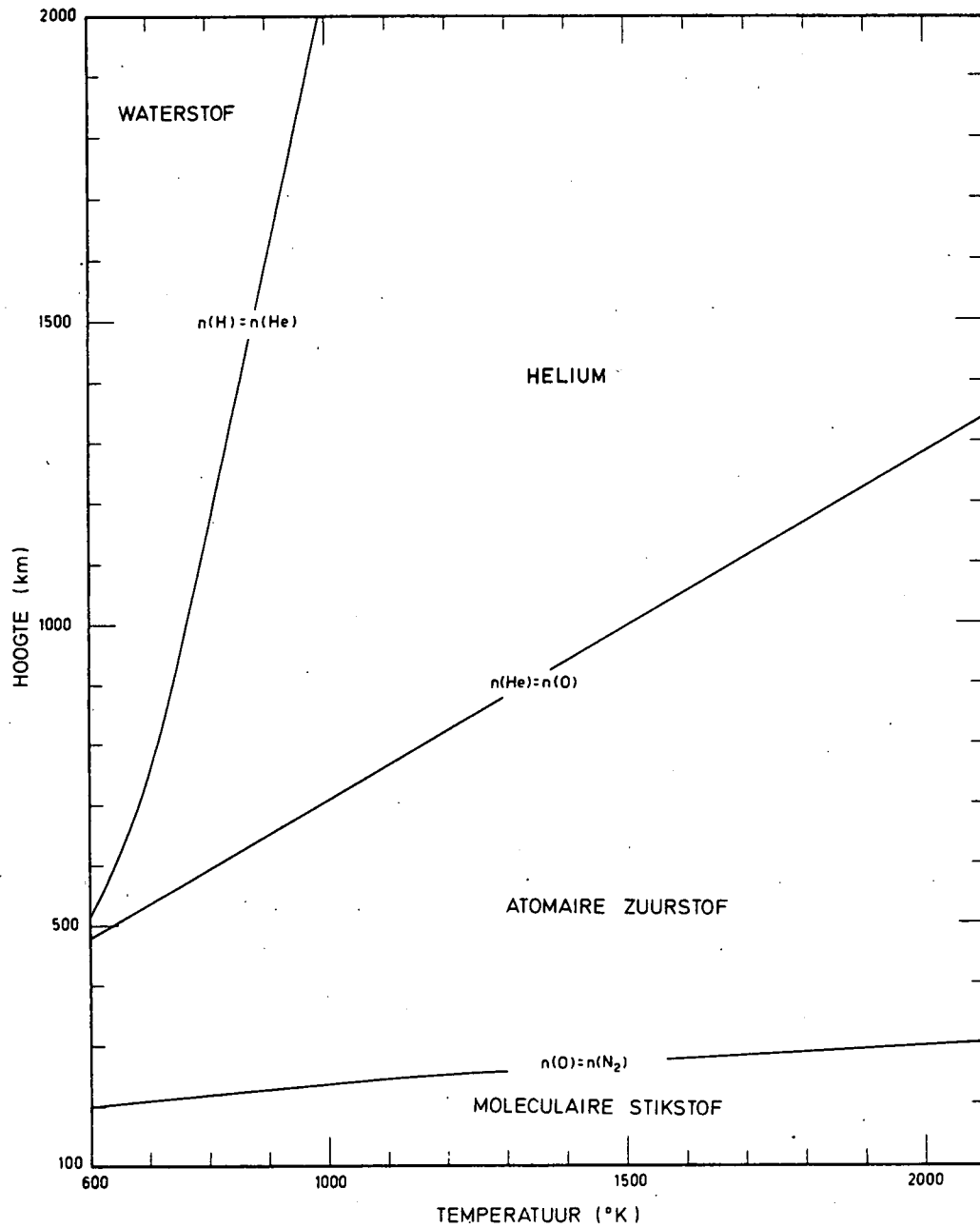


Fig. 29.- Gordels van atomaire zuurstof, helium en atomaire waterstof. De breedte van de gordels is afhankelijk van de temperatuur. De heliumgordel komt het best tot uiting bij sterke zonneactiviteit wanneer de temperatuur het hoogst is. Atomaire waterstof daarentegen is belangrijk wanneer de temperatuur het laagst is. De scheidingslijnen stellen identieke concentraties voor; bijvoorbeeld,  $n(He) = n(O)$ , identieke concentraties van helium en atomaire zuurstof.



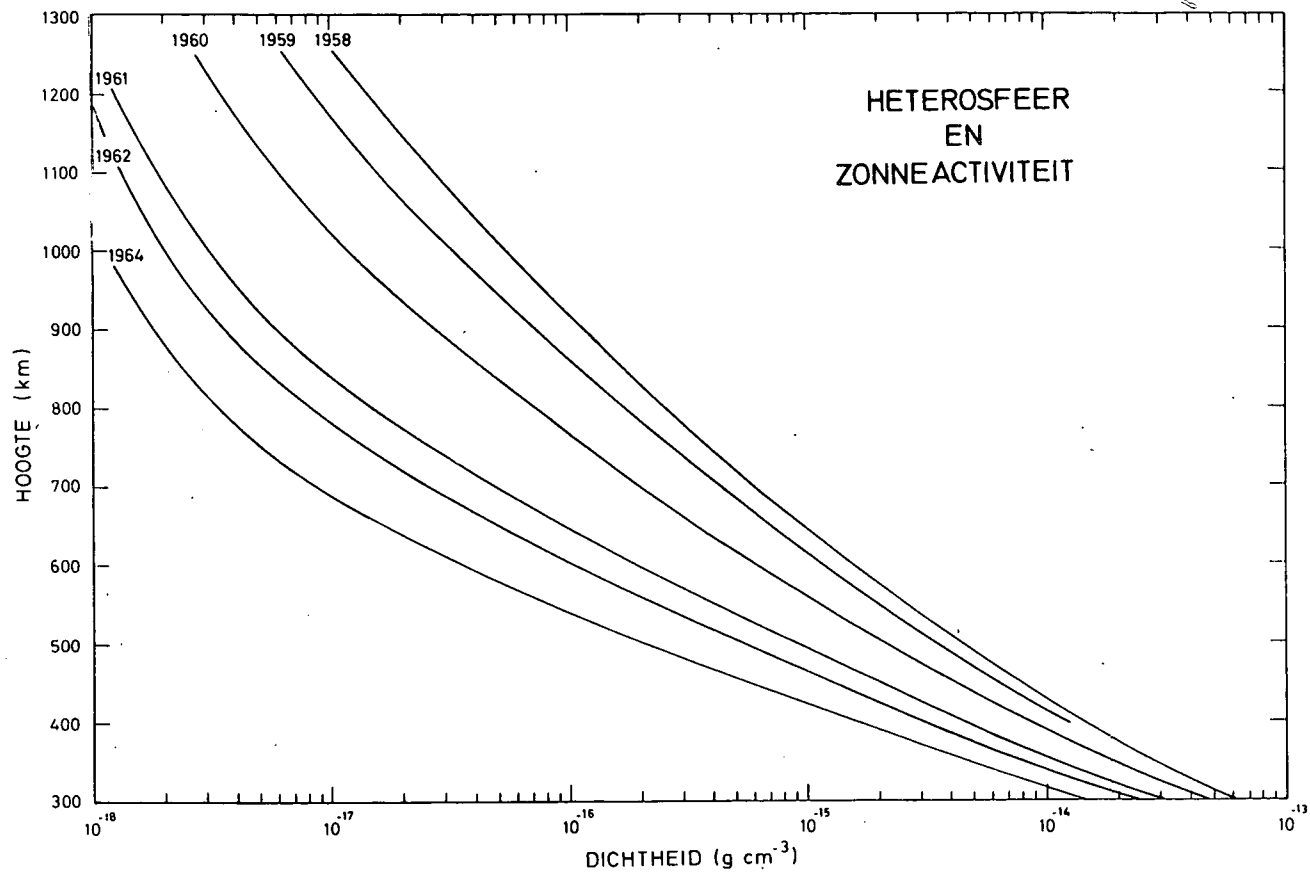


Fig. 30.- Gemiddelde dichtheid in de heterosfeer van 1958 tot 1964 die een periode van een elfjarige zonnecyclus vertegenwoordigt. Tijdens de zeer uitgesproken sterke zonneactiviteit van 1958 heeft de dichtheid van de heterosfeer buitengewone hoge waarden bereikt ; op een hoogte van 1000 km heeft zij 50 maal de waarde bereikt die werd waargenomen in 1964, het jaar van de geringe zonneactiviteit.

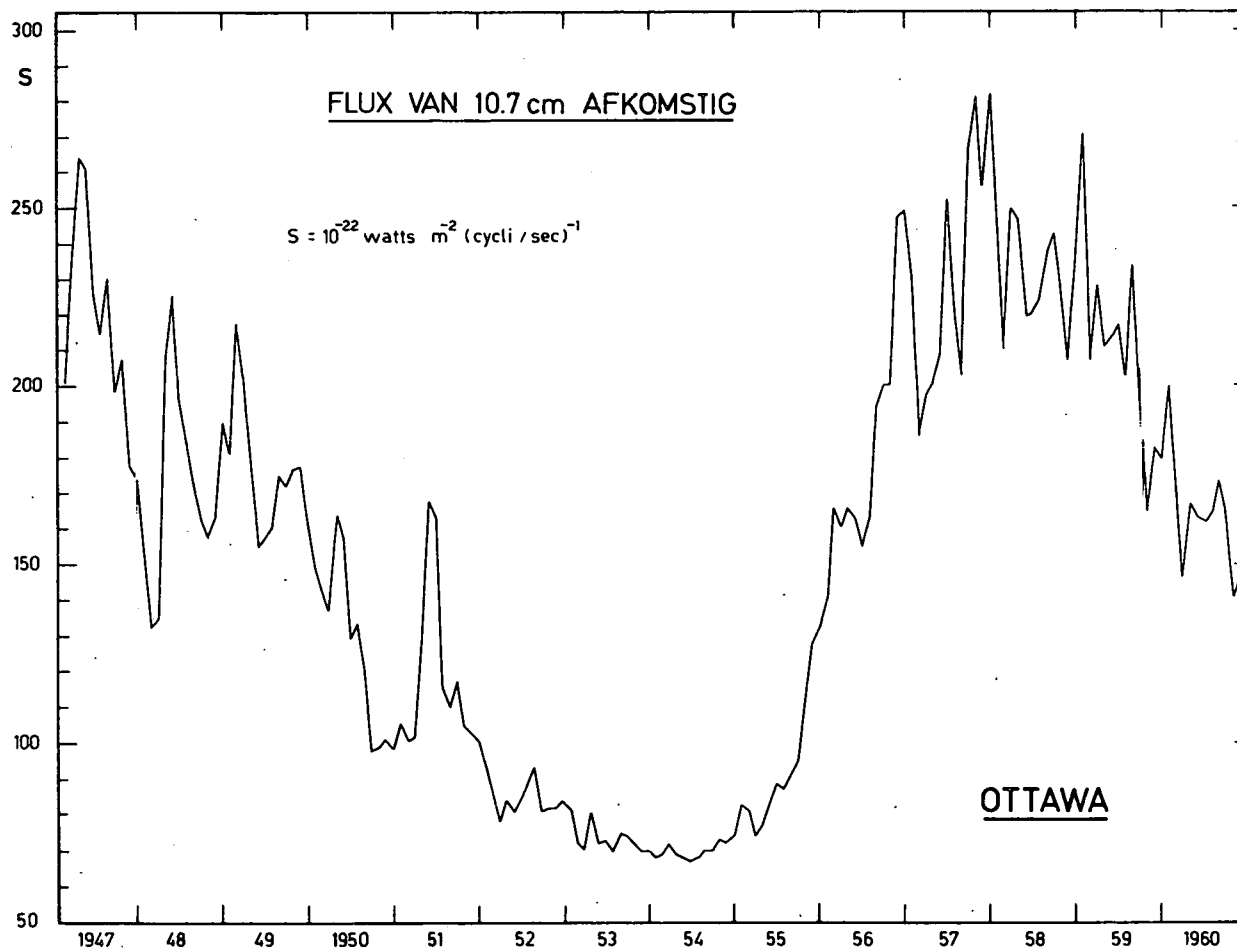


Fig. 31.- Radio-elektrische flux van de zon op 10,7 cm in Ottawa. De gemiddelde maandelijkske waarden van de flux die worden weergegeven van 1947 tot 1960 maken het mogelijk de evolutie van de zonneactiviteit te volgen door middel van een zeer nauwkeurige maatstaf van activiteit. De schommelingen die in de kromme voorkomen geven de veranderingen van de zonneactiviteit weer die gebonden zijn aan de rotatieperiode van de zon (27 dagen).

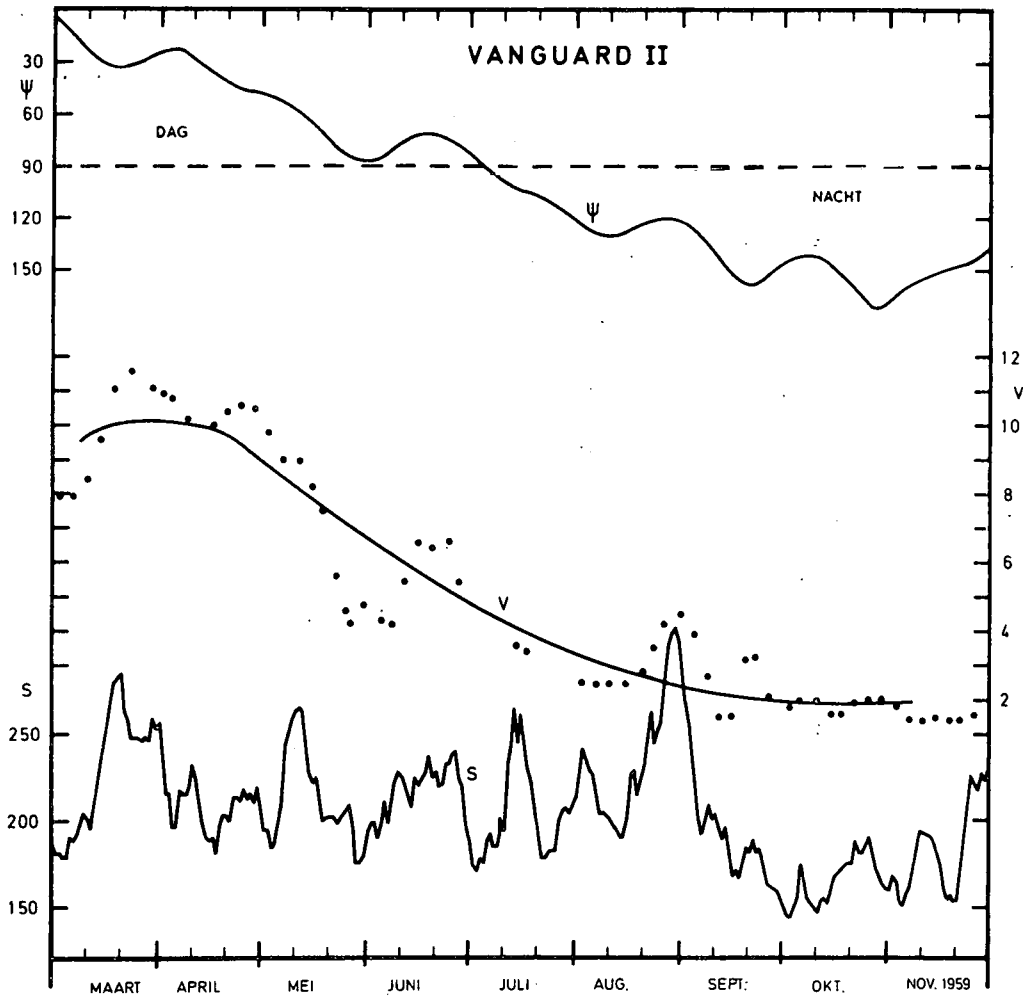


Fig. 32.- Verandering van de dichtheid in de heterosfeer op een hoogte van 560 km, weergegeven door de wijziging van de rotatieperiode van de satelliet Vanguard II. De punten duiden de waarnemingen aan van de verandering van de periode ( $V$ ), bovenaan de figuur wordt de hoek van de zon ( $\psi$ ) aangeduid; daarmee wordt aangetoond dat het perigeum van de satelliet waar de afremming vooral plaatsvindt, zich in het verlichte deel (dag) of niet verlichte deel (nacht) van de heterosfeer bevindt. De schommelingen die we waarnemen in de waarden van de periode stemmen goed overeen met de wijzigingen van de zonneactiviteit (onderste kromme,  $S$ ).

elektrische flux zijn gekoppeld. Meer nog, we stellen een trapsgewijze vermindering vast van maart tot oktober wanneer de zonnehoek verkleint ; die vermindering is vooral het duidelijkst wanneer het perigeum van de satelliet zich in de niet verlichte atmosfeer bevindt. Aan de hand van dat voorbeeld, naast zovele andere, kunnen we zeggen dat ten eerste de dichtheid overdag en 's nachts verschilt en dat vervolgens de veranderingen die zich manifesteren door een periode van 27 dagen in de zonneflux, eveneens voorkomen in de waarden van de dichtheid.

Als we die dichtheidswijzigingen in de thermosfeer willen verklaren, moeten we onmiddellijk ermee rekening houden dat het thermosferisch gas aan sterke variaties van de temperatuur is onderworpen. Bij het opmaken van de thermische balans nemen we aan dat er naast de ultraviolette verwarming een vlugge afkoeling gebeurt. De thermische voorwaarden in de heterosfeer zijn natuurlijk anders dan die van de homosfeer. In het lagere gebied van de homosfeer (de troposfeer in contact met het aardoppervlak), is de grond die de zonnestrallen heeft geabsorbeerd, veruit de belangrijkste warmtebron en is convectie het aangewezen middel om de warmte te verspreiden. In de stratosfeer en de mesosfeer bestrijden de convectie en de infrarode straling samen de ultraviolette verwarming. In de thermosfeer echter heeft het derde transportmiddel van de warmte, geleiding, duidelijk de overhand op de andere middelen ; straling en vooral convectie. Daarom zijn de voorwaarden voor de thermische balans overdag en 's nachts zeer verschillend. Tijdens de dag wordt de afkoeling door geleiding gecompenseerd door een ultraviolette zonnestraling, 's nachts daarentegen wordt het warmteverlies door verticale geleiding niet gecompenseerd door een horizontale verplaatsing. Er is dus een zeer belangrijke dagelijkse temperatuurwijziging in de thermosfeer die zich voor de waarnemer manifesteert door een verandering van de atmosferische dichtheid.

Daarenboven moet het feit dat we in de wijzigingen van de atmosferische dichtheid perioden van 27 dagen ontdekken, geïnterpreteerd worden in het kader van de zonnerotatie. Bij een volledig kalme zon manifesteert de ultraviolette straling zich over de gehele schijf ; de schitterende fakkelvelden, gekenmerkt door zonnevlekken, zenden echter een veel belangrijkere ultraviolette straling uit. Vandaar is een toeneming van zonneactiviteit in de zichtbare hemisfeer voor de aarde een

maatstaf voor de toegenomen ultraviolette verwarming. Daarom verandert de thermische balans volgens de hoeveelheid ultraviolette warmte die door geleiding wordt afgekoeld.

Als we rekening houden met de verandering tijdens een cyclus van zonneactiviteit, kunnen we voor een lange periode voorzien welke de temperatuur van de thermosfeer zal zijn. Op figuur 33 wordt de uiterste verandering van de temperatuur 's middags aangeduid ; zij varieert van  $800^{\circ}\text{K}$  bij geringe zonneactiviteit tot  $2000^{\circ}\text{K}$ .

De samenstelling van de heterosfeer verandert natuurlijk in functie van de temperatuur (zie tabel II) en de verticale verdeling van de atmosferische bestanddelen is dan ook zeer veranderlijk. Op figuur 29 wordt aangeduid hoe de identieke concentraties van de bestanddelen over de hoogte verdeeld zijn in functie van de temperatuur : we stellen er vast dat de heliumgordel tot volle ontplooiing komt bij de hoogste temperaturen, waterstof daarentegen komt het verst voor in de heterosfeer wanneer de temperatuur het minst hoog is. De problemen waarvoor de aëronomie geplaatst is, in verband met helium en atomaire zuurstof, verschillen trouwens in belangrijke mate van de problemen in verband met andere elementen. Het voortdurend inbrengen van helium in de atmosfeer met een gemiddeld gehalte van twee tot drie miljoen atomen per  $\text{cm}^2$  en per seconde - wat het gevolg is van het feit dat helium in de aarde wordt gevormd door de afbraak van thorium en uranium - leidt in de loop van een miljoen jaar tot een getal gelijk aan de totale hoeveelheid helium die in de atmosfeer bestaat. Sedert de aarde ongeveer vijf miljard jaar geleden werd gevormd, moet er, om opeenstapeling te vermijden, evenveel helium ontsnappen als er wordt geproduceerd. Helium kan slechts aan de rand van de atmosfeer ontsnappen door een verplaatsing die zich in de homosfeer en de heterosfeer voordoet. Door het toepassen van de diffusievergelijkingen zien we dat de flux van heliumatomen, die twee tot drie miljoen atomen per  $\text{cm}^2$  en per seconde bedraagt, mogelijk is door de verdeling van helium op een peil te houden dat de evenwichtstocstand in de diffusie benadert. Bij waterstof echter, waar een flux van ongeveer 100 miljoen atomen voorkomt, zijn we aan de limiet van wat de diffusie kan verdragen.

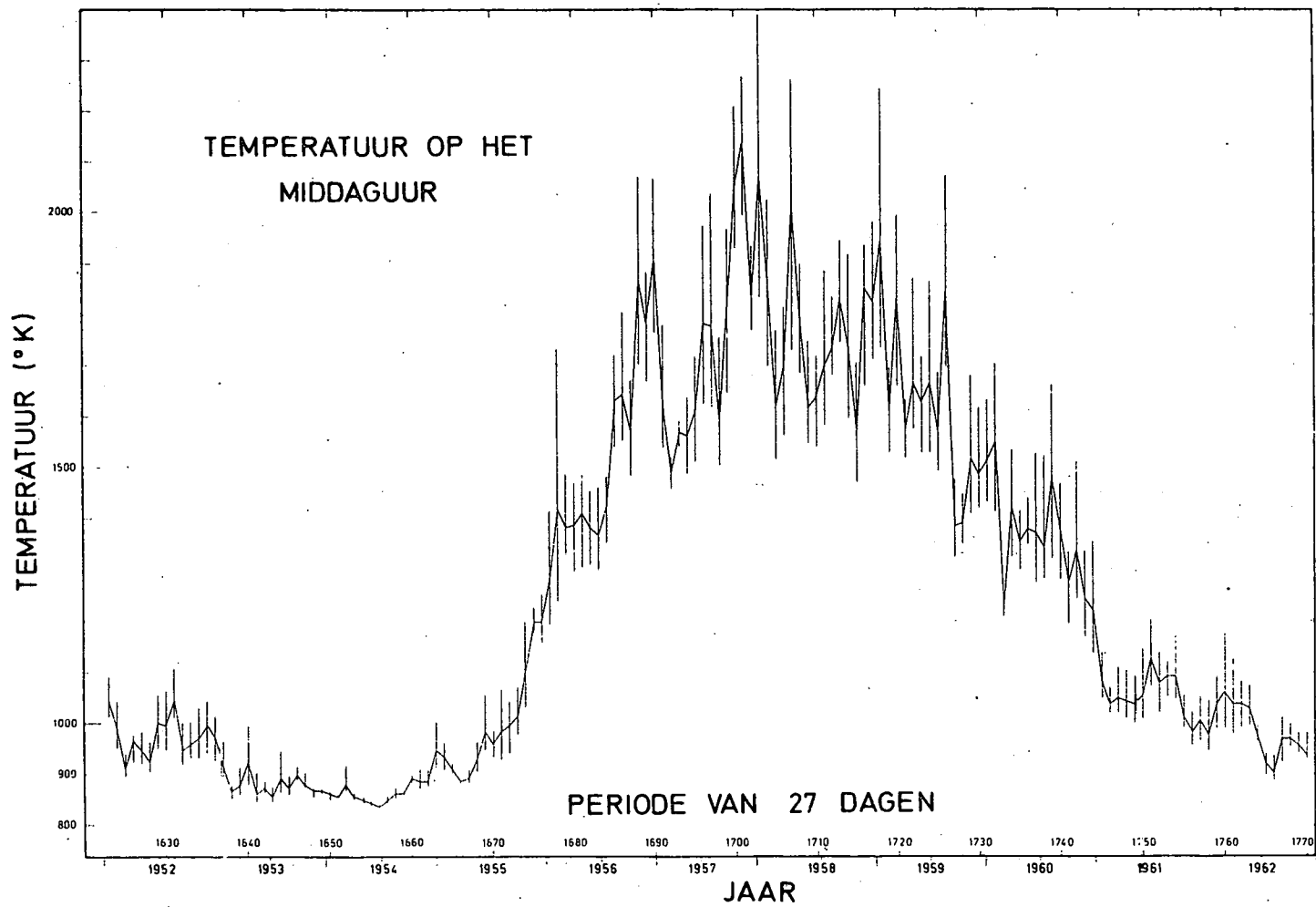


Fig. 33.- Gemiddelde temperatuur overdag van de heterosfeer in de thermopauze voor een periode van 27 dagen tijdens de elfjarige cyclus 1952-62. De maxima en de minima van de verticale lijnen stemmen overeen met respectievelijk de maximum en minimum temperaturen tijdens de periode van 27 dagen.

Daarom stemt de verticale verdeling van waterstof niet overeen met die van een diffusie-evenwicht (figuur 34). In werkelijkheid hangt de verticale verdeling af van een verplaatsingstoestand waarin het aantal atomen dat aan de basis van de heterosfeer vertrekt, gelijk is aan het aantal dat er zich uit verwijderd. In dat geval komen we tot de conclusie (zie figuur 35) dat er in de thermosfeer meer waterstofatomen zijn bij een lage dan bij een hoge temperatuur. Tenslotte begrijpen we (zie tabel II) waarom de rol van waterstof in de thermosfeer zich vooral manifesteert bij geringe zonneactiviteit. Per slot van rekening kunnen we zeggen dat de totale massa van de waterstofatomen die overgaat van de aardatmosfeer naar de interplanetaire ruimte verscheidene honderden gram per seconde bedraagt.

In verband met de heterosfeer zouden we nog kunnen handelen over storingen als de magnetische stormen. Het is duidelijk dat de toevoer van energie die door deeltjes wordt veroorzaakt, een algemene verwarming kan teweegbrengen als de energie door de krachtlijnen van het aardmagnetisch veld kan dringen. De verwarming kan lokaal plaatsvinden zoals in de poollichtovaal waar er een directe neerslag is van deeltjes. Er werd aangetoond dat de dichtheid van het thermosferisch gas varieert met het geomagnetisch kengetal wat kan worden verklaard door een temperatuurverandering. Zulke processen vereisen niettemin een ingewikkelde uitleg en we zullen de beschrijving van de heterosfeer hier beëindigen.

## DE IONOSFEER

Zolang de studie van de ionosfeer was gesteund op de analyse van ionosferische peilingen, baseerde men zich enkel op het onderzoek van de verticale verdeling van de elektronenconcentratie en de verschillende variaties ervan. De voortplanting van elektromagnetische golven hangt inderdaad hoofdzakelijk af van het elektron en niet van het ion, waarvan de massa te groot is ten opzichte van die van het elektron.

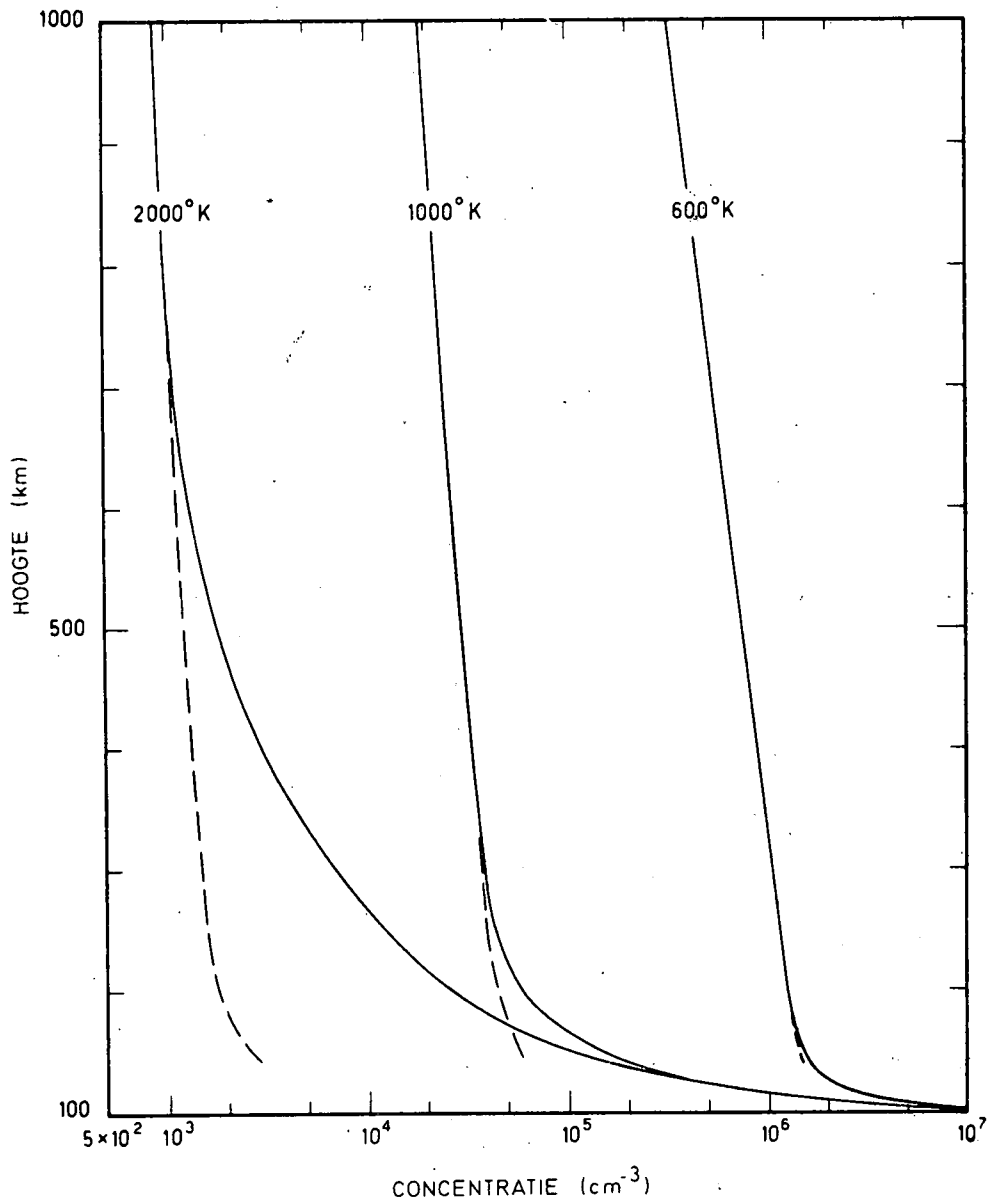


Fig. 34.- Verticale verdeling van atomaire waterstof in de heterosfeer. We stellen vast dat de echte verdeling (volle lijn) niet wordt bepaald door een verdeling in diffusie-evenwicht (stippellijn). De concentratie is groter bij lage temperaturen dan bij hoge temperaturen.



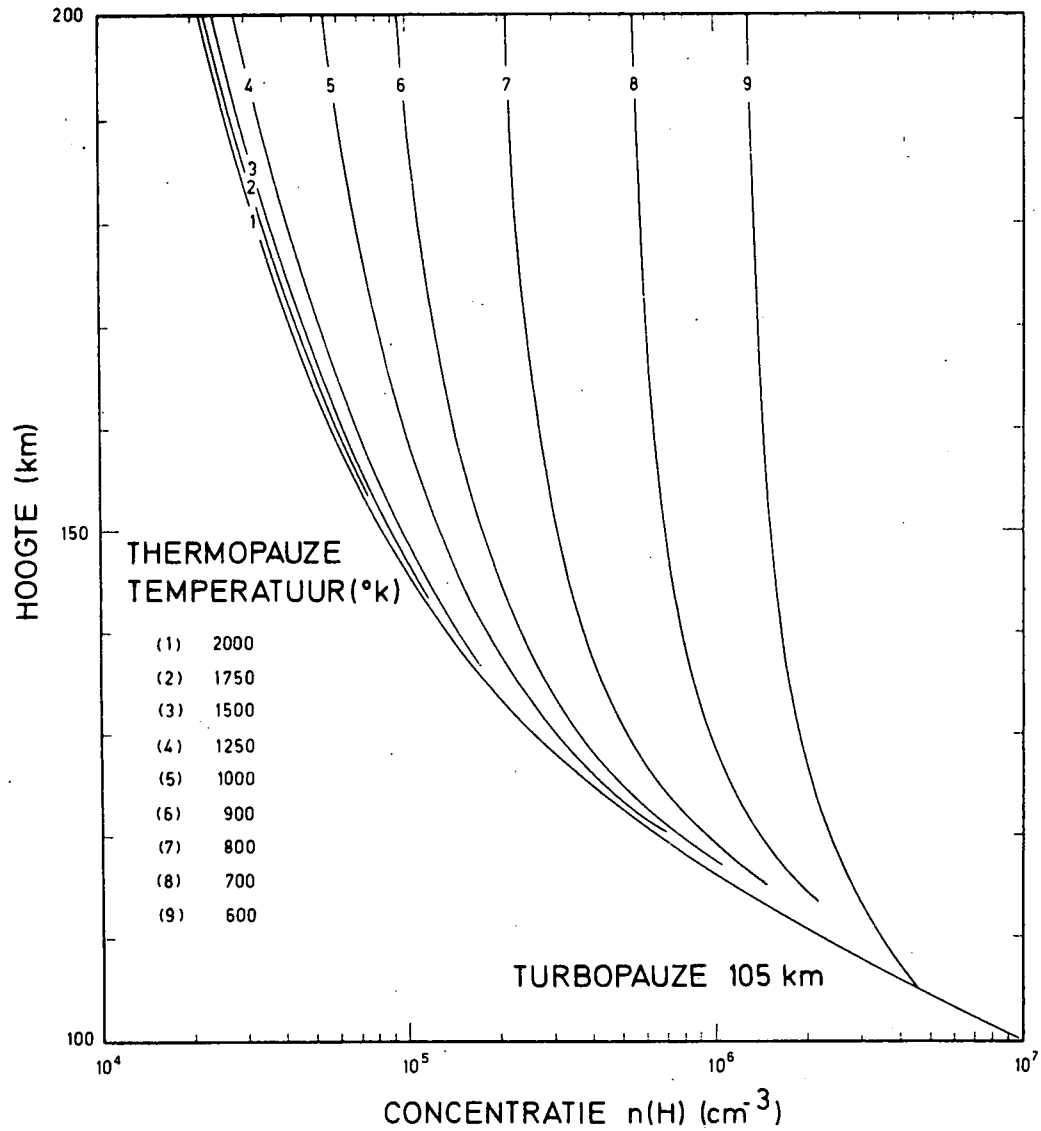


Fig. 35.- Verticale verdeling van de concentratie van het waterstofatoom in de heterosfeer bij temperaturen in de thermopauze begrepen tussën 600°K en 2000°K. We stellen vast dat de concentratie op 100 km hoogte met een factor 100 varieert tijdens een cyclus van zonneactiviteit.

In de eerste plaats vroeg men zich af onder welke omstandigheden een geroniseerde laag kan worden gevormd, dat wil zeggen onder welke omstandigheden zich een maximale elektronconcentratie kan voordoen. Dat maximum moet zowel voortspruiten uit een combinatie van de verticale verdelingen van de elektronenproductie als uit de recombinitie ervan. Als die recombinitie onafhankelijk is van de hoogte, dan bepaalt de elektronenproductie rechtstreeks de eigenschappen van het geroniseerde gebied. Het volstaat dus dat de ionisatie die door de zonnestraling wordt veroorzaakt, op een bepaalde hoogte een maximum bereikt opdat de geroniseerde laag haar maximale elektronconcentratie zou bezitten. Die vorm van een conventioneel geroniseerde laag kan zich voordoen in E-laag en de  $F_1$ -laag die wij vroeger hebben beschreven.

Indien de recombinitie van de elektronen met de hoogte varieert, kan het gebeuren dat het maximum van de geroniseerde laag niet voorkomt op het niveau van de maximale elektronenproductie. Dat is het geval met de  $F_2$ -laag, waar de maximale concentratie voorkomt op een hoogte die duidelijk groter is dan ieder mogelijk maximum van de elektronenproductie.

In alle gevallen moeten we de redenen achterhalen van die verticale elektronenverdeling vanaf het onderste gebied van de D-laag tot boven de  $F_2$ -laag. Eerste en vooral is het duidelijk dat de zonnestraling met korte golflengten verantwoordelijk is voor die ionisatie van de hoge atmosfeer; de omstandigheden overdag en 's nachts tonen het fotodissociatie-effect van de zonnestralingen aan.

Als we de mogelijkheden van elektronenproductie in de operatmosfeer van dichtbij onderzoeken (figuur 36), dan moeten we het volgende onthouden: de heterosfeer is in de eerste plaats samengesteld uit stikstof en zuurstof; helium en atomaire zuurstof zijn bestanddelen die een rol spelen in de atmosferische dichtheid op de grootste hoogten van de heterosfeer en stikstofmonoxyde (NO) kan in de thermosfeer worden geproduceerd en in de mesosfeer voorkomen. De absorptievoorwaarden van de zonnestraling worden vastgelegd door de samenstellingsvoorwaarden. Zo kan stikstofmonoxyde, dat de zwakste ionisatie-potentiaal heeft, reeds gefoto-ioniseerd worden door stralingen met golflengten beneden  $1340 \text{ \AA}$ . De zuurstofmolecule wordt nog

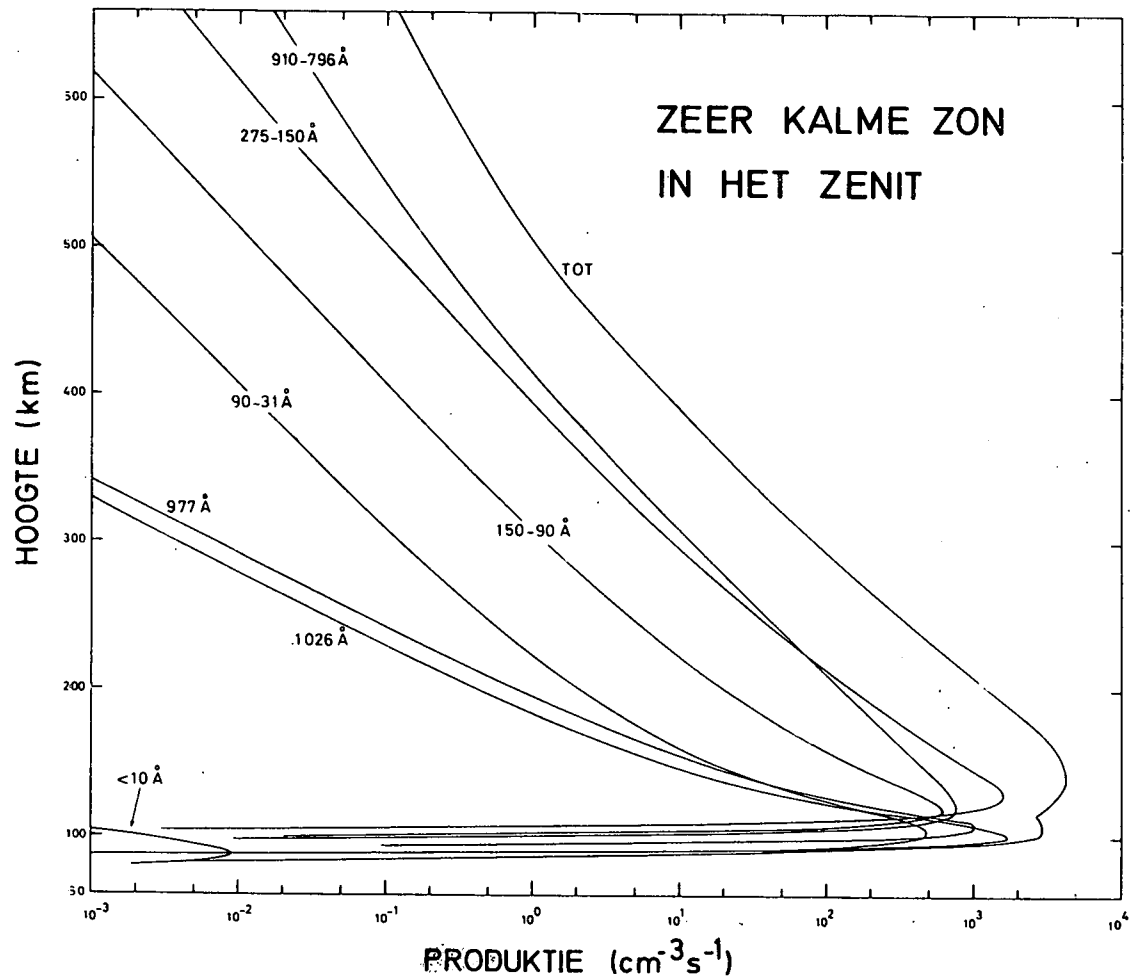


Fig. 36.- Ionenproduktie indien de zon in zenit staat. De berekening werd gemaakt voor omstandigheden van geringe zonneactiviteit - zeer kalme zon- en atmosferische voorwaarden die overeenstemmen met een temperatuur in de thermopauze van 750°K (zie tabel II). Het moleculaire zuurstofion is het belangrijkste ion in de E-laag op een hoogte van 100 km, moleculaire stikstofionen die de belangrijkste ionen zijn in de F<sub>1</sub>-laag worden volledig omgezet in zuurstofionen (O<sup>+</sup> en O<sub>2</sub><sup>+</sup>) en in stikstofmonoxyde-ionen (NO<sup>+</sup>).

geroniseerd door straling met golflengten boven  $1000 \text{ \AA}$  ( $< 1028 \text{ \AA}$ ) ; moleculaire stikstof daarentegen heeft een straling nodig met golflengten beneden  $796 \text{ \AA}$ . Atomaire zuurstof wordt geroniseerd als gevolg van stralingen met golflengten beneden  $910 \text{ \AA}$ , zeer dicht bij de stralingen die waterstof kunnen ioniseren ( $911 \text{ \AA}$ ). Helium vereist relatief korte golflengten ( $504 \text{ \AA}$ ) om gefoto-ioniseerd te worden. We zien dus dat iedere straling met golflengten beneden  $800 \text{ \AA}$  zowel door zuurstof als stikstof wordt geabsorbeerd. Dat is dus de straling die het sterkst zal worden geabsorbeerd. Na nauwkeurige overwegingen, die rekening houden met de absorptie-coëfficiënten van moleculaire en atomaire zuurstof en van moleculaire stikstof, merken we in feite op dat de maximale absorptie in de  $F_1$ -laag gebeurt ; zo kunnen we bevestigen dat de zonnestraling met golflengten beneden  $800 \text{ \AA}$  verantwoordelijk is voor de vorming van de ionosferische F-laag door de ionisatie van atomaire zuurstof en moleculaire stikstof te veroorzaken (zie figuur 36).

De zonnestralingen tussen  $1028 \text{ \AA}$  en  $910 \text{ \AA}$  worden bijna enkel geabsorbeerd door moleculaire zuurstof en daardoor vindt hun absorptie plaats beneden de F-laag. We zien inderdaad dat ze plaats heeft op  $100 \text{ km}$  hoogte en is dus een factor die zeker een rol speelt in de vorming van de E-laag (figuur 36). Stikstofmonoxyde ( $\text{NO}$ ) is in het spectrale gebied zeer goed geplaatst om de zonnestraling met golflengten boven  $1100 \text{ \AA}$  te absorberen. Als we het absorptiespectrum van de zuurstofmolecule onderzoeken, dan stellen we vast dat in dat spectrum een bepaald aantal zwakke punten in de absorptie voorkomen. Meer bepaald, bij een golflengte van  $1216 \text{ \AA}$  doet zich een "venster" voor dat overeenstemt met de merkwaardige Lyman-alfa-straling van waterstof in de chromosfeer van de zon ; door dat venster dringt, beneden de mesopauze, de straling binnen die de  $\text{NO}$ -molecule foto-ioniseert en zo vinden we de belangrijkste oorzaak van elektronenproductie in de D-laag. Als we echter rekening houden met het feit dat de zon niet alleen zonnestralingen, maar ook X-stralen uitzendt, dan stellen we vast dat we die X-stralen van de zon als een onderdeel van elektronenproductie moeten beschouwen. Trouwens, aangezien de X-stralen minder geabsorbeerd worden door stikstof en zuurstof dan de ultraviolette stralen, hebben ze een groter doordringingsvermogen in de atmosfeer. In feite kunnen we gemakkelijk vaststellen dat de X-stralen met golflengten begrepen tussen  $100 \text{ \AA}$  en  $10 \text{ \AA}$  geabsorbeerd worden in het gebied van de E-laag. We kunnen dus

besluiten dat de E-laag wordt gevormd als gevolg van de rechtstreekse foto-ionisatie van de zuurstofmoleculen door de ultraviolette zonnestraling en de directe foto-ionisatie van de stikstof- en zuurstofmoleculen door de X-stralen met golflengten boven  $10 \text{ \AA}$ .

De X-stralen met golflengten begrepen tussen  $10 \text{ \AA}$  en  $1 \text{ \AA}$  worden geabsorbeerd in de D-laag ; zo nemen zij deel aan de elektronenproductie van deze laag.

Tenslotte moeten we bij al die middelen tot elektronenproductie de ionisatie voegen die het gevolg is van de permanente galactische kosmische straling. De effecten van die straling komen het best tot uiting onderaan in de D-laag waar de elektronenproductie die het gevolg is van de ionisatie van NO, onvoldoende wordt.

Aangezien de aëronomische omstandigheden van de geïoniseerde toestand zowel afhangen van de verticale verdeling van de neutrale elementen (stikstof en zuurstof) als van de spectrale verdeling van de zonnestraling en haar absorptie, kunnen we gemakkelijk besluiten dat de ionosfeer nauw verbonden is met de zonneactiviteit. De dagelijkse verandering, de seizoenverandering, de periodieke verandering en de elfjarige verandering van de ionosfeer hangen allemaal af van de omstandigheden van de zon ; de spectrale analyse ervan kan slechts volledig zijn bij een ononderbroken waarneming van het zonnenspectrum.

De zonnestraling met golflengten beneden  $3000 \text{ \AA}$  werd slechts waargenomen na het aanwenden van raketten. Het stratosferisch ozon beperkt in de stratosfeer de doordringing van de zonnestraling met golflengten begrepen tussen  $3000 \text{ \AA}$  en  $2000 \text{ \AA}$ . Dat zonnenspectrum werd slechts na 1950 ontdekt, wanneer een raket met aan boord een spectrograaf de mesopauze bereikte. Vervolgens werd het golflengtengebied beneden  $1000 \text{ \AA}$  slechts later waargenomen, wanneer de X-stralen werden ontdekt. Dank zij een hele reeks raketten die de hoogte van 200 km bereikten of overschreden kregen we uiteindelijk een inzicht in het volledige zonnenspectrum, toen satellieten konden worden gebruikt om de zon permanent waar te nemen. Zo konden we ons verlaten op betrouwbare gegevens over de zonnestraling voor de studie van de vorming van de ionosfeer.

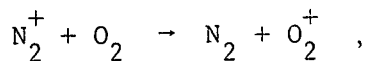
We moeten nog vermelden dat de ionisatie van de atmosfeer, vooral in de gebieden met hoge breedte, eveneens afhangt van de neerslag van de geladen deeltjes (elektronen en protonen) die uit de magnetosfeer de heterosfeer binnendringen. Zo krijgen we een hele reeks processen die zich manifesteren in een atmosferisch gebied waar de invloed van het magnetisch veld op een zeer karakteristieke manier tot uiting komt.

De atmosfeer die in 24 uur ronddraait voert met zich het aardmagnetisch veld mee dat onderworpen is aan het effect van de zonnwind. De gehele ionosfeer, die met de aarde meedraait, ondergaat ondertussen een zeer uitgesproken vervorming, vooral in de poolgebieden waar de krachtlijnen door de zonnwind worden vervormd. De verticale verdeling van de elektronenconcentratie hangt af van werkingen zowel van de zwaartekracht als van die van het magnetisch veld en zal daardoor langs de krachtlijnen van het veld worden geleid. In de poolgebieden, waar de krachtlijnen ver tot in de staart van de magnetosfeer reiken tot in de interplanetaire ruimte toe, stellen we daarom vast dat tijdens de dagelijkse omwenteling van de ionosfeer, de lichte atomen een minder benepen ruimte kunnen innemen. De elektronen en de lichtste atomen zullen dus naar buiten ontsnappen. Dat is een ander aspect van de ionosfeer dat het gevolg is van de eigenschappen van geladen deeltjes in een magnetisch veld. De wisselwerking, die onder verschillende vormen gebeurt, tussen de magnetosfeer, de ionosfeer en de heterosfeer is trouwens een van de moeilijkste problemen dat slechts volledig kan worden opgelost na talrijke waarnemingen in de ruimte.

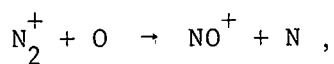
Het probleem van de ionosfeer, waarvoor de aëronomie geplaatst is, kunnen we niet oplossen door alleen rekening te houden met de verdeling van de elektronenconcentratie, zelfs als we de verschillende dynamische aspecten te wijten aan het aardmagnetisch veld in aanmerking nemen. Als gevolg van de verschillende ionisatieprocessen moeten we inderdaad rekening houden met de reacties tussen de ionen en de neutrale deeltjes en daarbij de processen van verdwijning van elektronen en ionen in aanmerking nemen.

Wanneer door een ioniserende straling een elektron uit een atoom of een welbepaalde molecule gestoten wordt, dan ontstaat er een foto-elektron dat een bepaalde kinetische energie bezit ; die komt overeen met het verschil tussen de energie van de zonnestraling en de energie die vereist is voor de ionisatie. Dat foto-elektron kan een deel van zijn energie verliezen door een ander atoom te ioniseren als de energie van het foto-elektron voldoende groot is. Dat is vooral het geval met energierijke elektronen die door de X-stralen worden veroorzaakt. In het algemeen verliest ieder foto-elektron een deel van zijn energie door het aanslaan van de meest voorkomende atomen en moleculen ; doordat het foto-elektron in de opperionosfeer vooral in botsing komt met de andere elektronen veroorzaakt het nochtans een algemene verwarming van het elektronengas.

Het foto-ion kan met het elektron in botsing komen en in dat geval is het mogelijk dat ze de neutrale elementen opnieuw samenstellen. Het is echter waarschijnlijker dat het foto-ion in botsing komt met een atoom of een molecule van een ander soort om zijn lading uit te wisselen en naar de neutrale toestand terug te keren. Dat is heel het probleem van de ionosfeer. Een voorbeeld : de stikstofmolecule, het meest voorkomende element, zowel onderaan als in het midden van de ionosfeer, zou het meest voorkomende ion moeten leveren. In werkelijkheid komt het foto-ion van moleculaire stikstof zeer vlug in contact met de zuurstofmolecule of met het zuurstofatoom (figuur 37). In het eerste geval betreft het een ladingsoverdracht,



dat wil zeggen een uitwisseling van het periferisch elektron van de zuurstofmolecule ( $\text{O}_2$ ) naar het stikstofion ( $\text{N}_2^+$ ) waardoor de normale  $\text{N}_2$ -molecule opnieuw ontstaat en het moleculaire  $\text{O}_2^+$ -ion vormt. In het tweede geval is er een verwisseling van atoom en van ion,



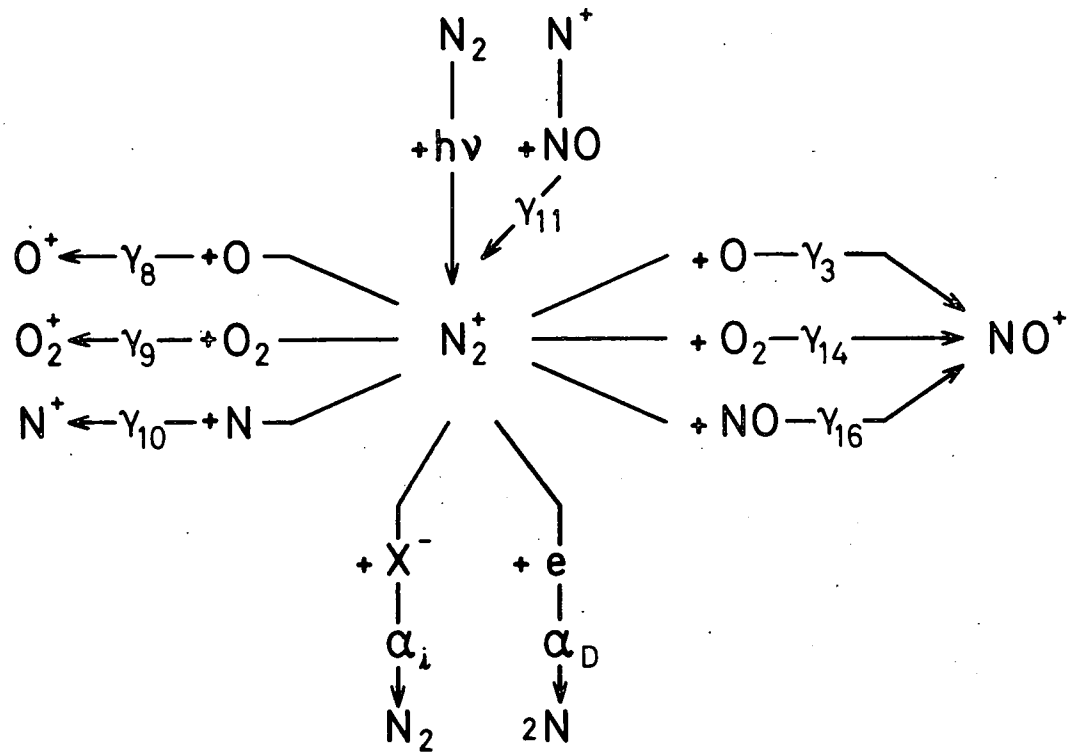


Fig. 37.- Schema met de reacties van het moleculaire stikstofion. De verdwijning van het  $\text{N}_2^+$ -ion is hoofdzakelijk het gevolg van de twee reactieprocessen met moleculaire zuurstof ( $\text{O}_2$ ) en atomaire zuurstof (O). De recombinatie heeft slechts een effectieve werking op grote hoogte.



waar het moleculaire stikstofion ( $N_2^+$ ) dat in botsing komt met het zuurstofatoom gedissocieerd wordt : het vormt het stikstofmonoxyde-ion ( $NO^+$ ) en een stikstofatoom (N). Op die wijze is er in het tweede geval een  $NO^+$ -ion dat niet rechtstreeks geproduceerd werd als gevolg van de zonnestraling. In de aëronomische studie van de ionosfeer kunnen we zulke omwegen verwachten ; in feite bepalen ze de echte fysische omstandigheden van de ionosfeer.

Op enkele bladzijden kunnen we alle aëronomische omstandigheden, waartoe we willen komen in een analyse van de verschillende ionosferische gebieden, niet opnieuw behandelen. We zullen nochtans in de volgende regels enkele aspecten van het uiterst ingewikkelde probleem in verband met ionenreacties in de ionosfeer schetsen.

Nemen we bijvoorbeeld opnieuw het probleem van het moleculaire stikstofion ( $N_2^+$ ). We hebben hierboven gezegd dat het door een reactie met het zuurstofatoom wordt omgevormd tot een  $NO^+$ -ion of dat het zijn lading verliest door ze over te dragen op de zuurstofmolecule door middel van eenvoudige uitwisseling. Die processen doen zich natuurlijk voor omdat ze tot stand komen door een exothermische reactie, dat wil zeggen met een positieve energiebalans. De ionisatie-energie van de stikstofmolecule is bijvoorbeeld groter dan die van de zuurstofmolecule. Bij de twee zojuist vermelde processen, moeten we nog de recombinitie voegen



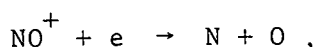
waarin het  $N_2^+$ -ion dat een elektron ontmoet, onderworpen wordt aan wat een dissociatieve recombinitie wordt genoemd en op die wijze twee stikstofatomen oplevert. Zo kunnen we zeggen, rekening houdend met de numerieke waarden die toepasselijk zijn op de drie processen waarin  $N_2^+$  verdwijnt, dat in de lagere ionosferische gebieden het eerste proces het belangrijkste is omdat de concentratie van de zuurstofmolecule ( $O_2$ ) groot is. In het midden van de ionosfeer, waar het zuurstofatoom meer voorkomt dan de zuurstofmolecule, is de produktie van  $NO^+$  belangrijk. Tenslotte is in de opperionosfeer het derde proces, de recombinitie, het belangrijkste want de elektronenconcentratie bereikt haar maximum in de  $F_2$ -laag, waar de concentratie van zuurstof-

atomen reeds voldoende verminderd is. Deze korte analyse van de eigenschappen van het moleculaire  $N_2^+$ -ion leidt tot volgend besluit : in de D-laag kan het moleculaire  $N_2^+$ -ion niet blijven bestaan, in de E-laag is het van weinig of geen belang en het kan zich slechts in de F-laag echt manifesteren. Dat wordt aan het licht gebracht dank zij de talrijke waarnemingen door middel van massaspectrografen aan boord van raketten of satellieten.

De dissociatieve recombinitie manifesteert zich natuurlijk voor alle moleculaire ionen ; om die reden vormt het moleculaire zuurstofion (figuur 38),



door botsing met een elektron, twee zuurstofatomen zoals trouwens het stikstofmonoxyde-ion,



door zijn verdwijning een stikstofatoom (N) en een zuurstofatoom (O) produceert. Het belangrijkste kenmerk van die verschillende dissociatieve recombinities is dat zij zuurstof- of stikstofatomen kunnen vormen die in normale toestand en in aangeslagen toestand aangetroffen worden. De verschillende aangeslagen toestanden zijn die welke overeenstemmen met de twee metastabiele toestanden die de uitzending van de verboden overgangen van zuurstof en atomaire stikstof in het nachtgloren en in het poollicht mogelijk maken. Het betreft de groene en rode lijnen van zuurstof (met golflengten van respectievelijk 5577 Å en 6300-6363 Å) en de groene en ultraviolette lijnen van stikstof (met golflengten van respectievelijk 5200 Å en 3465 Å). We zien dus hoe de recombinities van elektronen binnen de ionosfeer overdag, tijdens de schemering en 's nachts karakteristieke uitzendingen veroorzaken waarvan de eigenschappen nauw verbonden zijn met de aëronomische omstandigheden. We kunnen in verband hiermee de figuren 5a en 5b nog eens bekijken en ook de bespreking van het nachtgloren.

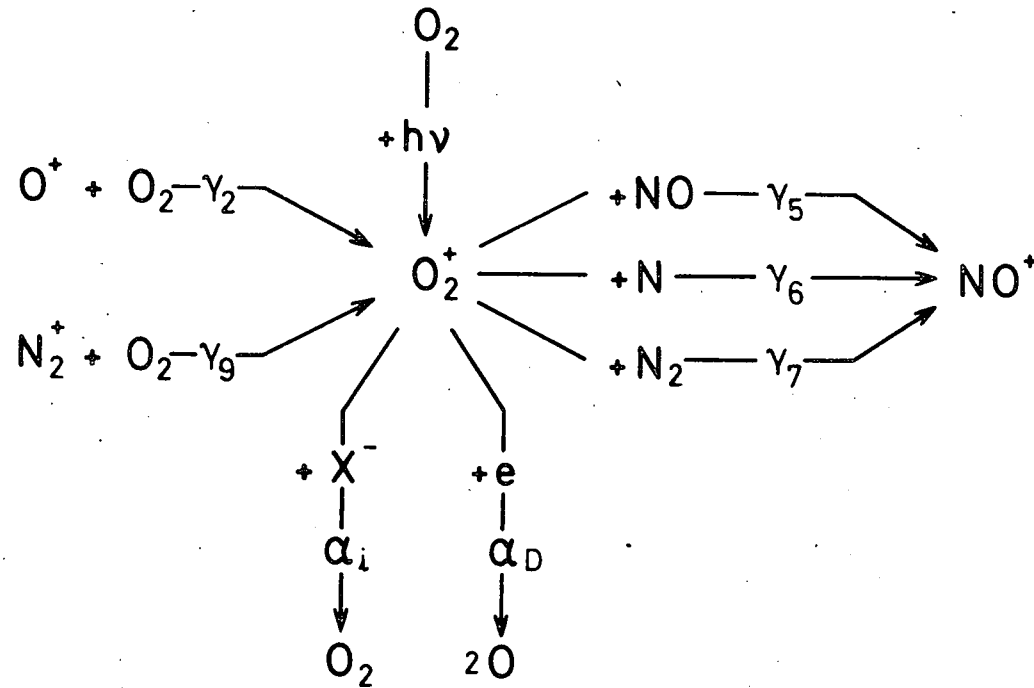
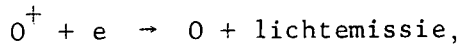
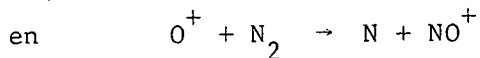
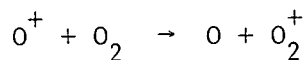


Fig. 38.- Schema met de reacties van het moleculaire zuurstofion. Bij de produktie van  $O_2^+$  door foto-ionisatie moeten we de reacties voegen tussen  $O^+$  en  $N_2^+$  met moleculaire zuurstof. Het verdwijnen van het  $O_2^+$ -ion is vooral het resultaat van recombinitie.

De stralingsrecombinatie van het atomaire zuurstofion ( $O^+$ ),



gebeurt uiterst langzaam; honderdduizend keer trager dan de dissociatieve re-combinatie van  $N_2^+$ ,  $O_2^+$  en  $NO^+$ . Daarom hangt het belangrijkste proces van verdwijning van het  $O^+$ -ion (figuur 39) af van een uitwisseling met de zuurstofmoleculen ( $O_2$ ) en de stikstofmoleculen ( $N_2$ ),



dat wil zeggen de produktie van twee moleculaire ionen, respectievelijk  $O_2^+$  en  $NO^+$ . We bemerken dus dat de ionenproduktie afkomstig van de  $N_2$ -molecule en het zuurstofatoom (O) door reactie met de neutrale bestanddelen omgevormd wordt tot moleculaire zuurstofionen ( $O_2^+$ ) en tot stikstofmonoxyde-ionen ( $NO^+$ ) zelfs als er geen neutrale NO-moleculen bestaan (figuur 40). Door de dissociatieve recombinate van  $O_2^+$  en  $NO^+$  worden atomen geproduceerd. Vooral de stikstofatomen reageren met moleculaire zuurstof en vormen stikstofmonoxyde (NO) (zie de chemosfeer).

De transformaties tussen ionen en neutrale deeltjes vertonen natuurlijk de neiging met de hoogte af te nemen als gevolg van de geleidelijke vermindering van de neutrale bestanddelen, zuurstof en stikstof. Daarom blijft het moleculaire stikstofion ( $N_2^+$ ) trouwens bestaan en is het atomaire zuurstofion ( $O^+$ ) het dominerende ion in de ionosferische  $F_2$ -laag.

Op de grootste hoogten, boven het maximum van de  $F_2$ -laag, komt ook het heliumion ( $He^+$ ) en het atomaire waterstofion ( $H^+$ ) voor. Dat wordt natuurlijk verklaard door de steeds belangrijkere aanwezigheid van die twee bestanddelen ten opzichte van zuurstof en stikstof naarmate we een grotere hoogte in de heterosfeer bereiken. Nochtans moeten we erop wijzen dat het gehalte van de  $He^+$  - en  $H^+$ -ionen niet gelijk aan dat van de neutrale helium- en waterstofatomen die gefoto-ioniseerd worden.

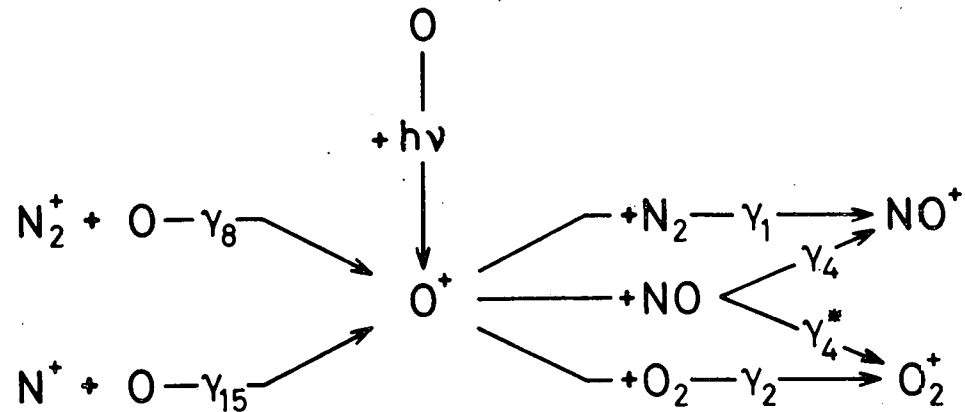


Fig. 39.- Schema met de reacties van het atomaire zuurstofion. Bij de productie van  $\text{O}^+$  door foto-ionisatie moeten we de reactie voegen tussen atomaire zuurstof en het moleculaire stikstofion ( $\text{N}_2^+$ ). Het  $\text{O}^+$ -ion verdwijnt doordat het in  $\text{NO}^+$  of  $\text{O}_2^+$  wordt omgezet, door een reactie met respectievelijk moleculaire stikstof ( $\text{N}_2$ ) en moleculaire zuurstof ( $\text{O}_2$ ).

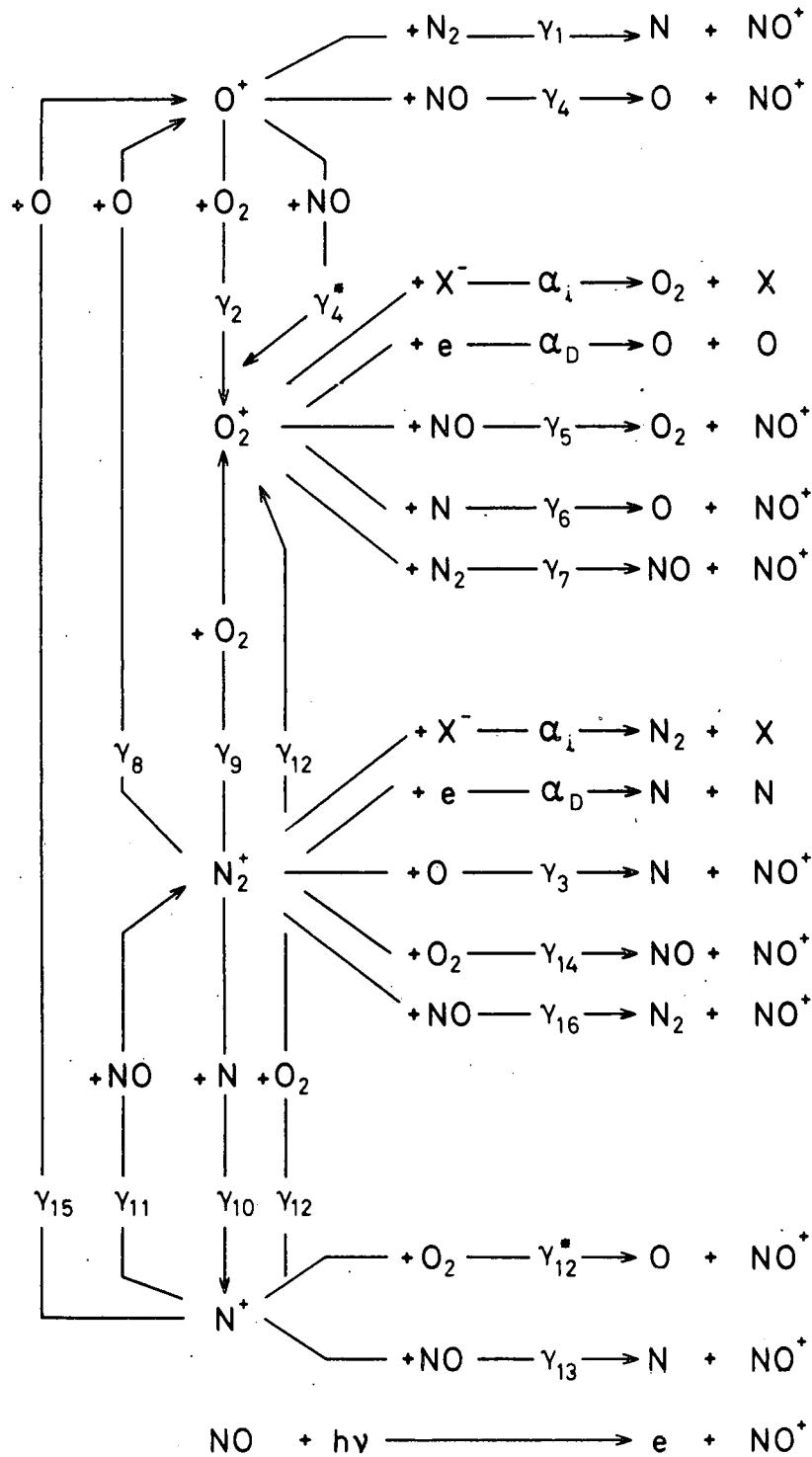
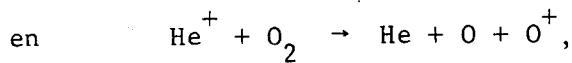
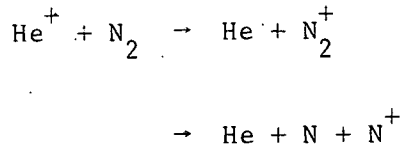


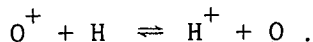
Fig. 40.- Algemeen schema van de ionenreacties die voorkomen in een atmosfeer bestaande uit zuurstof en stikstof. We stellen vast dat het geheel van de reacties uiteindelijk leidt tot de produktie van het stikstofmonoxyde-ion ( $\text{NO}^+$ ). Alleen de twee dissociatieve recombinitaties van  $\text{O}_2^+$  en  $\text{N}_2^+$  leiden tot een ander resultaat.

Helium, dat gefoto-ioniseerd wordt door straling met golflengten beneden  $504 \text{ \AA}$ , wordt in zijn ionenvorm onderworpen aan een reactie met moleculaire stikstof en moleculaire zuurstof,



waarin het  $\text{He}^+$ -ion verdwijnt en opnieuw een neutraal heliumatoom (He) wordt, terwijl  $\text{N}_2$  en  $\text{O}_2$  respectievelijk in een  $\text{N}_2^+$ - of  $\text{N}^+$ - en  $\text{O}^+$ -ion worden veranderd. Het heliumion blijft slechts op zeer grote hoogten bestaan. In werkelijkheid bedraagt de produktie van heliumionen die aan de reactie met stikstof en zuurstof ontsnapt, enkele miljoenen foto-ionen per  $\text{cm}^2$  en per seconde. Het zijn in feite deze ionen die kunnen ontsnappen langs de krachtlijnen van het magnetisch poolveld dat in de nachtelijke magnetosfeer open is.

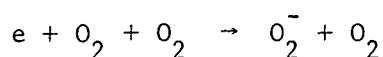
Alhoewel atomaire waterstof gefoto-ioniseerd wordt door de zonnestraling met golflengten beneden  $910 \text{ \AA}$ , heeft atomaire waterstof een geïoniseerde toestand die in de eerste plaats bepaald wordt door haar reactie met atomaire zuurstof. Het betreft een evenwichtstoestand van ladingsuitwisseling



waarin een atomair zuurstofion ( $\text{O}^+$ ) en het neutrale waterstofatoom (H) een neutraal zuurstofatoom (O) en een atomaire waterstofion ( $\text{H}^+$ ) vormen en omgekeerd. Dat evenwichtsproces doet zich voor omdat de ionisatie-energie van de twee atomen min of meer gelijk is en, als de concentraties voldoende zijn, is het niet moeilijk van de ene toestand naar de andere over te gaan, volgens het gehalte van de twee bestanddelen H en O in neutrale toestand. We kunnen echter gemakkelijk waarnemen dat die evenwichtstoestand van ionisatie tussen atomaire zuurstof en atomaire waterstof op de grootste hoogten niet kan worden behouden. Inderdaad, het mechanisme van ladings-

uitwisseling hangt af van de frequentie van botsingen tussen ionen en neutrale atomen, waarvan de concentratie met de hoogte afneemt. Wanneer de uitwisselingen te traag verlopen, manifesteert zich daarom het verschijnsel van diffusie van de ionen in het zwaartekrachtveld. Het waterstofion ( $H^+$ ), dat 16 keer lichter is dan het zuurstofion ( $O^+$ ), zal de neiging vertonen zich langs een krachtlijn van het magnetisch veld te verdelen volgens zijn eigen massa en te ontsnappen aan de reactie met het neutrale zuurstofatoom. Het zal dus een veel belangrijker ion worden dan dat van het atomaire zuurstofatoom.

In de lagere ionosfeer verdwijnen alle atomaire ionen vlug en blijven er dus slechts moleculaire ionen over. Meer nog, ten gevolge van relatief hoge drukomstandigheden kunnen de biatomaire ionen zoals  $NO^+$  en  $O_2^+$  in polyatomaire ionencomplexen verdwijnen.  $NO^+$  en  $O_2^+$  worden in de D-laag van de ionosfeer geproduceerd :  $NO^+$  door ionisatie van NO als gevolg van de Lyman- $\alpha$ -straling met een golflengte van 1215 Å en  $O_2^+$  door X-stralen met golflengten beneden 10 Å. Wij zullen dat zeer ingewikkeld aëronomisch probleem hier niet bespreken, maar we merken op dat negatieve ionen op het niveau van de D-laag voorkomen. De zuurstofmolecule ( $O_2$ ) ontleent gemakkelijk een elektron door het mechanisme van een driedvoudige botsing (figuur 41),



dat zo het negatieve moleculaire zuurstofion ( $O_2^-$ ) doet ontstaan. Van zodra dat proces tot stand is gekomen (figuur 42), hebben enkele reacties plaats met ozon ( $O_3$ ), koolstofdioxyde ( $CO_2$ ), distikstofoxyde ( $NO_2$ ), enz., en produceren die reacties achtereenvolgens negatieve ionen zoals  $O_3^-$ ,  $CO_2^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $CO_3^-$ ,  $NO_3^-$  (figuur 43)... Nog eens, deze studie wordt ten zeerste bemoeilijkt door het grote aantal reacties waarin zich misschien complexen vormen waarin waterdamp een rol speelt, zoals dat het geval is bij positieve ionen. In dat gebied met relatief grote dichtheid is het inderdaad zeer moeilijk de studie van de negatieve ionen aan te vatten met behulp van massaspectrografen die zich aan boord van raketten bevinden.



## NEGATIEF MOLECULAIR ZUURSTOFION

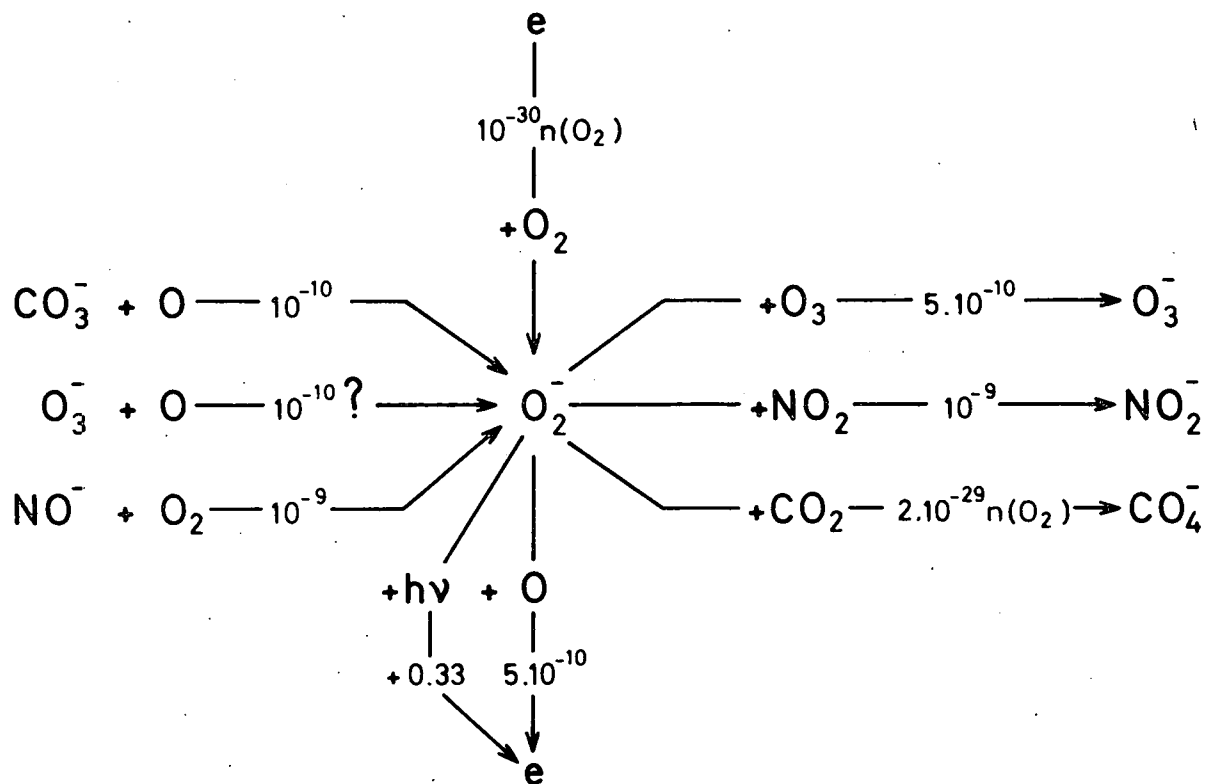


Fig. 41.- Schema met de reacties van het negatieve moleculaire zuurstofion. Dat ion wordt gevormd als gevolg van een drievoudige botsing tussen een elektron en twee zuurstofmoleculen ( $O_2$ ), het kan zeer vlug verdwijnen door fotodissociatie of door een reactie met het zuurstofatoom ( $O$ ). Wanneer die laatste twee processen niet voorkomen ('s nachts) verdwijnt het negatieve moleculaire zuurstofion door de reactie met ozon ( $O_3$ ). De numerieke waarden stemmen overeen met de reactiecoëfficiënten ; ( $10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$ ).

## NEGATIEF OZONION

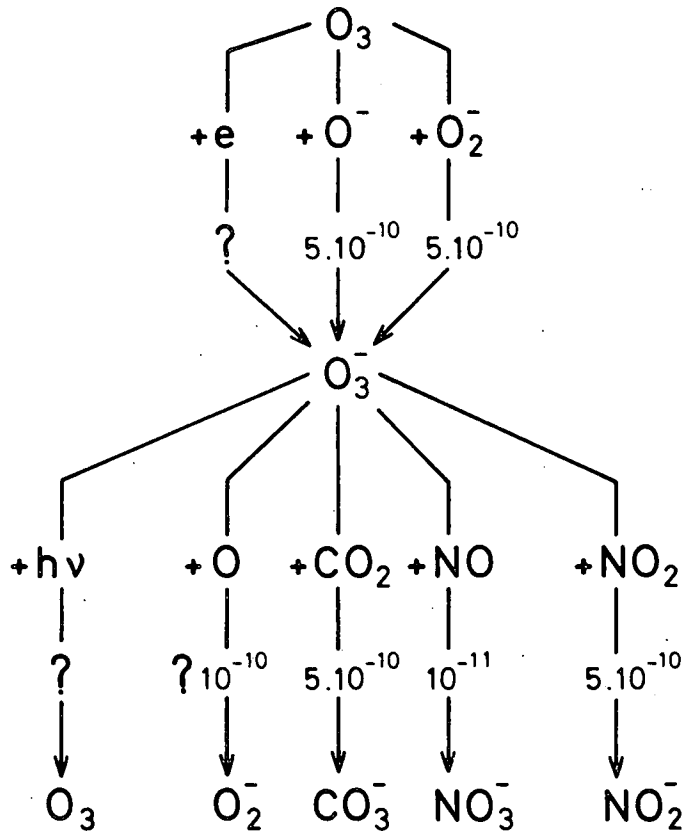


Fig. 42.- Schema met de reacties van het negatieve ozonion. Doordat de processen die tot de vorming en de vernietiging van  $O_3^-$  leiden, zeer vlug plaatsvinden, komt dat negatief ion tenslotte weinig voor in de D-laag.

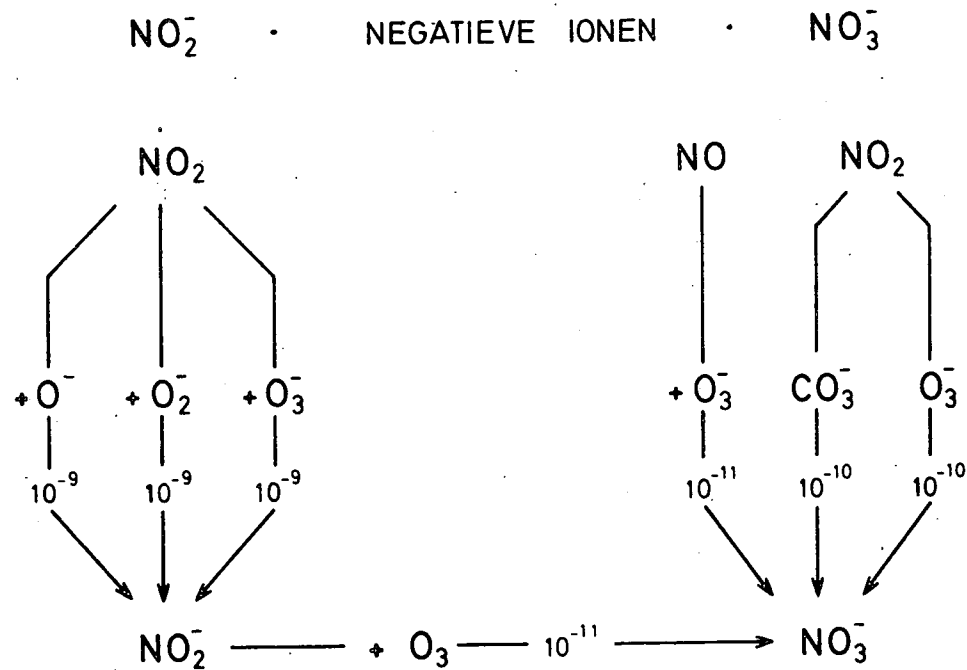


Fig. 43.- Schema met de reacties van de negatieve  $\text{NO}_2^-$  - en  $\text{NO}_3^-$ -ionen. Vanuit de verschillende mogelijke ionen  $\text{O}^-$ ,  $\text{O}_2^-$ ,  $\text{O}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^-$  ... kan het negatieve  $\text{NO}_3^-$  - ion ongetwijfeld worden gevormd wanneer de stikstofoxydes  $\text{NO}$  of  $\text{NO}_2$  aanwezig zijn.

Het is in ieder geval duidelijk dat, wanneer de opperatmosfeer onderworpen wordt aan een aëronomische analyse, dat wil zeggen een analyse van haar fysische samenstelling waarin de elektronen, ionen en neutrale atomen gelijktijdig een rol spelen, we de verschillende types van reacties tot in de details moeten bestuderen en hun juiste natuur vaststellen. In de eerste plaats moeten we onthouden dat de wisselwerking tussen twee elektronen veel meer uitgesproken is dan die tussen een ion en een elektron. Vervolgens is de wisselwerking tussen een elektron en een neutraal atoom veel zwakker dan die tussen een ion en een elektron. Al die wisselwerkingen kunnen verschillende vormen aannemen die gaan van elastische botsingen tot uitwisselingen van lading of energie. Tenslotte hebben al die processen tot gevolg dat de elektronen hun eigen temperatuur kunnen hebben ; het volstaat dat de wisselwerking tussen elektronen de overhand heeft op de andere wisselwerkingen als gevolg van een voldoende overwicht van de elektronen ten opzichte van de neutrale deeltjes. Trouwens, wanneer bij de wisselwerking tussen ionen en neutrale deeltjes, de tijd vereist voor de uitwisselingen van energie relatief lang is, kunnen de ionen en de neutrale atomen op verschillende temperaturen behouden worden.

Het probleem van de temperatuur van het neutrale, ionengas of elektronengas kan als volgt worden beschreven. Stellen we ons een foto-elektron voor dat als gevolg van de zonnestraling uit een neutraal zuurstofatoom wordt uitgestoten ; dat elektron bezit een bepaalde kinetische energie die duidelijk groter is dan de energie van de elektronen die reeds op dezelfde hoogte aanwezig zijn. In de onderste gebieden van de ionosfeer (beneden 120 km hoogte), zal dat foto-elektron in botsing komen met de neutrale moleculen die relatief talrijk zijn en zal het vlug zijn overvloed aan energie verliezen aan die moleculen en de temperatuur van neutraal gas bereiken. In de middenste gebieden van de ionosfeer (150-200 km) zal datzelfde foto-elektron vooral in contact komen met de elektronen die reeds aanwezig zijn en de overvloedige energie van het foto-elektron zal in de eerste plaats dienen om de totale energie van de elektronen te vergroten ; daaruit volgt een verhoging van de algemene temperatuur van de elektronen ten opzichte van de ionen en die van de neutrale atomen. In de hogere lagen zijn er nog foto-elektronen met een grote energie die in de eerste

plaats in contact komen met de andere elektronen die botsingen met de ionen ondergaan. Ook daar zullen die foto-elektronen een stijging veroorzaken van de temperatuur van de elektronen en op een niet rechtstreekse wijze die van de ionen, maar net zoals in de neutrale atmosfeer, moeten we rekening houden met de geleiding van de warmte binnen het elektronengas dat een temperatuursgradiënt vertoont. Op de grootste hoogten zal er dus een neiging zijn tot temperatuurseenvormigheid, als gevolg van de vlugge warmteuitwisseling die leidt tot uniformiteit van de temperatuur. Zo zien we hoe de fysische toestand van de neutrale atomen, de ionen en de elektronen in de operatmosfeer helemaal anders is dan die in het laboratorium kan worden bekomen. In feite maakt de experimentele aëronomie het mogelijk, met behulp van adequate instrumenten aan boord van raketten of satellieten, bepaalde chemische of fysische processen te verwezenlijken die van de operatmosfeer een nieuw type van laboratorium maken. Trouwens, daar de omstandigheden bijna altijd anders zijn als gevolg van de dagelijkse; geografische en geomagnetische veranderingen en van gewijzigde seizoen- en zonneomstandigheden, is het aantal verschijnselen dat we vanuit een nieuwe gezichtshoek moeten bestuderen, aanzienlijk.

#### DE EXOSFEER

Alhoewel we veronderstellen dat alle elementaire fysische processen zich zonder beperking in de heterosfeer kunnen voordoen, toch nemen we aan dat de veranderingen van samenstelling en vorming door een gewoon hydrostatisch evenwicht kunnen worden verklaard. Er moet een voldoende aantal botsingen zijn om een volledige snelheidsverdeling van de deeltjes tot stand te brengen zoals die bepaald is in de kinetische gastheorie. Dat is een maxwellverdeling die leidt tot een gemiddelde kinetische energie van de deeltjes met een welbepaalde temperatuur. Alle bestanddelen van de maxwellsnelheidsverdeling komen voor in een hydrostatische verdeling. Naarmate we echter boven de thermopauze komen, vergroot de gemiddelde vrije weglengte tussen de atomen geleidelijk. Boven een bepaald niveau is die gemiddelde vrije weglengte zodanig groot dat de botsingen tussen de atomen niet talrijk genoeg meer zijn om de eenvormigheid van het atmosferisch gas te behouden.

We kunnen ons gemakkelijk voorstellen dat de deeltjes (atomen, ionen en elektronen) lange afstanden kunnen afleggen wanneer ze alleen aan het zwaartekrachtveld onderworpen zijn als het neutrale deeltjes betreft, en bovendien aan het magnetisch en het elektrisch veld, wanneer het geladen deeltjes betreft.

De heterosfeer, waarin de botsingen nog een rol spelen is op die wijze gescheiden van de exosfeer, waarin we de botsingen kunnen verwaarlozen, door een kritieke zone. In die kritieke zone zien we een geleidelijke evolutie : onderaan zijn de botsingen belangrijk, bovenaan daarentegen spelen ze weinig of geen rol.

Het meest aangewezen middel om de kritieke zone te bepalen is een niveau te zoeken waarin de aëronomische omstandigheden voor ieder neutraal of geïoniseerd element kunnen worden omschreven. We kunnen bijvoorbeeld de gemiddelde vrije weglengte voor ieder element opzoeken. Als we berekenen met welke waarschijnlijkheid (bijvoorbeeld één geval op twee) een deeltje dat op een welbepaald niveau voorkomt, kan ontsnappen zonder een botsing te ondergaan, dan bepalen we op die wijze de gemiddelde vrije weglengte die kenmerkend is voor een kritiek niveau, het begin van de exosfeer.

Volgens berekeningen ligt het kritiek niveau voor de neutrale atomen en voor temperaturen gaande van 500°C tot 1750°C respectievelijk tussen 400 en 800 km hoogte. Met andere woorden, de neutrale exosfeer, beschouwd als het gebied waar de botsingen tussen de neutrale atomen zo weinig talrijk zijn dat atomen met een voldoende snelheid (11 km per seconde) kunnen ontsnappen, begint op 400 km hoogte bij geringe zonneactiviteit (500°C) en bereikt 800 km bij sterke zonneactiviteit (1750°C). 2000 tot 3000 km boven de neutrale exosfeer begint de iono-exosfeer, want de botsingen tussen geladen deeltjes zijn altijd talrijker, daar de werkzame doorsnede van de botsingen tussen geladen deeltjes heel wat groter is dan voor botsingen tussen neutrale deeltjes. Anderzijds moet de iono-exosfeer anders behandeld worden dan de neutrale exosfeer, want bij het zwaartekrachtveld dat de banen van de deeltjes in de neutrale exosfeer regelt moeten we voor de iono-exosfeer nog de volgende twee velden voegen : het geomagnetisch veld, dat de geladen deeltjes leidt en het elektrostatisch veld dat bestaat tussen het zware ion en het elektron

en dat de snelheid bepaalt.

In ieder geval kan een welbepaald volume van de exosfeer een bepaald aantal deeltjes a priori op de volgende banen bevatten (figuur 44) :

- (I), deeltjes die afkomstig zijn van het kritiek niveau en ernaar terugkeren,
- (II), deeltjes die noch van het kritiek niveau noch van buitenuit afkomstig zijn,
- (III), deeltjes die afkomstig zijn van het kritiek niveau en naar buitenuit gaan of vice-versa,
- (IV), deeltjes die van buitenuit afkomstig zijn en ernaar terugkeren.

Die vier groepen deeltjes bevatten alle mogelijkheden ; we kunnen dus zeggen dat op iedere hoogte de genormeerde dichtheid  $\rho$  van een welbepaald element uit vier dichtheden is samengesteld

$$\rho = \rho_I + \rho_{II} + \rho_{III} + \rho_{IV} = 1$$

De eerste groep (figuur 45) betreft ballistische banen : het deeltje verlaat, onder een bepaalde hoek en met een bepaalde snelheid, het kritiek niveau en keert ernaar terug na zijn uiterste hoogte binnen de exosfeer te hebben bereikt. De kinetische energie is bij het verlaten van het kritiek niveau kleiner dan die welke vereist is om de aantrekkingskracht van de aarde te overwinnen. Dat is het geval voor het neutrale deeltje waarvan de baan door het zwaartekrachtveld wordt bepaald ; geladen deeltjes daarentegen worden door de krachtlijnen van het geomagnetisch veld geleid. Daarom maakt een volledig gesloten krachtlijn de ontsnapping van een ion of van een elektron onmogelijk, welke ook de snelheid is.

De tweede groep deeltjes (figuur 45) zijn gevangen deeltjes omdat ze het kritiek niveau niet bereiken of niet met buitenuit in contact staan. Dat zijn gesatelliseerde neutrale atomen of ionen die onderworpen zijn aan de heen- en - weer- bewegingen langs een krachtlijn van het magnetisch veld. We kunnen aantonen dat de

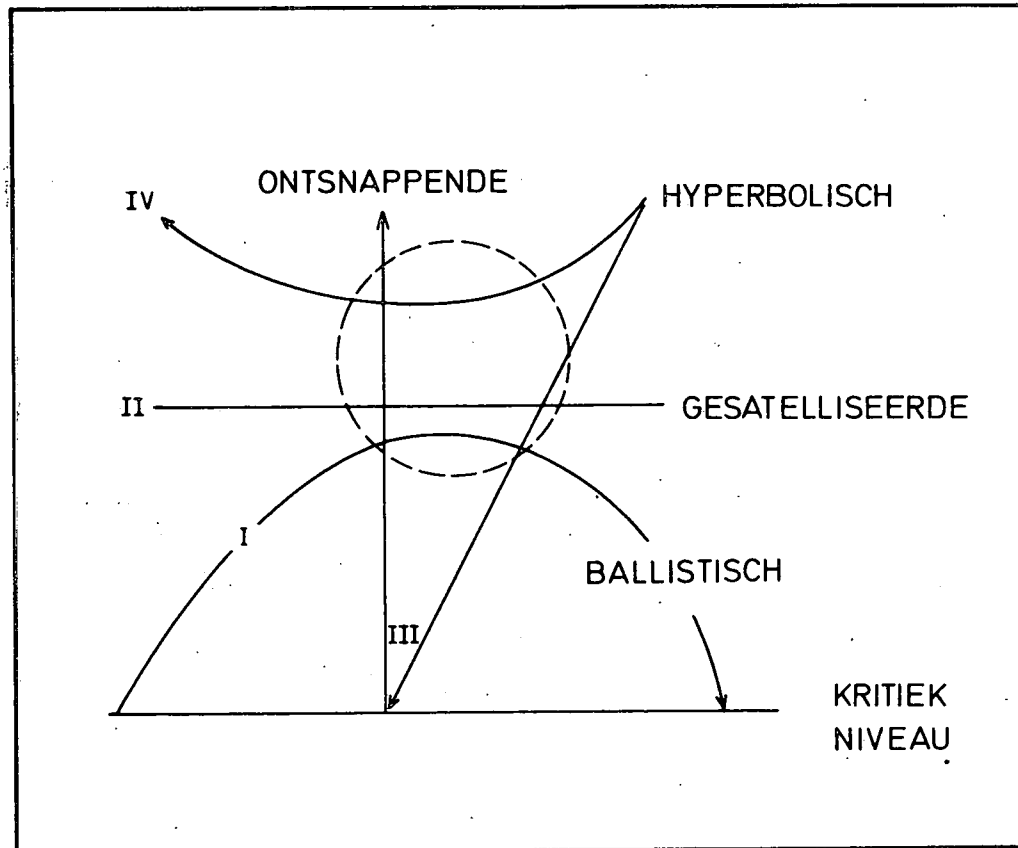


Fig. 44.- Mogelijke componenten binnen de exosfeer. Het geheel van de weergegeven componenten stelt een maxwellsnelheidsverdeling voor. De deeltjes die een essentiële rol spelen zijn de deeltjes I met ballistische banen ; de ontsnappende deeltjes III zijn belangrijk voor de lichte atomen of ionen, waterstof en helium. De deeltjes met gesatelliseerde of uitwendige hyperbolische banen kunnen verwaarloosd worden.



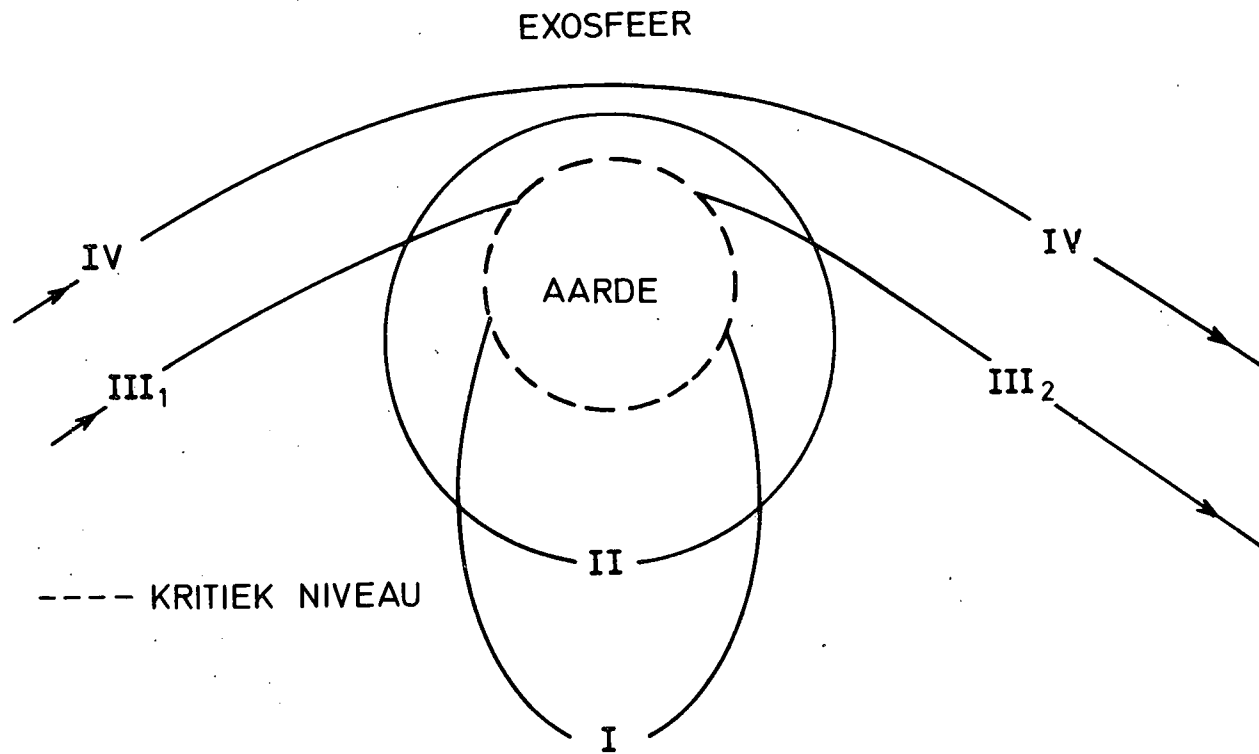


Fig. 45.- Banen van de deeltjes in de exosfeer. Nabij het kritiek niveau zijn de ballistische banen het talrijkst, op grotere afstanden daarentegen kunnen hyperbolische banen verschijnen.

voorwaarden waaraan moet worden voldaan om de thermische deeltjes op ellipsvormige banen te behouden moeilijk kunnen worden verwezenlijkt. In het algemeen kunnen we de aanwezigheid van gesatelliseerde of gevangen deeltjes in de exosferische verdeling verwaarlozen. We zullen dus geen rekening houden met de dichtheid  $\rho_{II}$  van de exosferische deeltjes die zich op ellipsvormige banen bevinden naast de deeltjes met dichtheid  $\rho_I$  die zich op ballistische banen bevinden.

De derde groep deeltjes moet in twee subgroepen worden onderverdeeld naargelang de deeltjes het kritiek niveau verlaten en naar buitenuit ontsnappen of van buitenuit naar het kritiek niveau komen. Over het algemeen wordt weinig belang gehecht aan deeltjes die de vereiste snelheid hebben om uit de interplanetaire ruimte te komen. Er wordt echter wel veel belang gesteld in de atomen die in het kritiek niveau snelheden kunnen bereiken die groter zijn dan de ontsnappings-snelheid van 11 km per seconde (figuur 46). Dat is zeker het geval met het waterstofatoom en soms met het heliumatoom wanneer de temperatuur van de heterosfeer voldoende hoog is. In de iono-exosfeer moeten de krachtlijnen van het geomagnetische veld natuurlijk naar buiten toe open zijn. Aangezien een krachtlijn van het geomagnetisch veld het ene halfrond met het andere verbindt, wordt doorgaans geen rekening gehouden met de ontsnapping van de geladen deeltjes uit de iono-exosfeer. De geladen deeltjes (ion en elektron) kunnen slechts ontsnappen via de poolkappen waar de krachtlijnen van het geomagnetische veld (zie figuur 18) naar de nachtelijke magnetosfeer open zijn. We stellen vast dat dit vooral het geval is voor de waterstofionen en de heliumionen die gemakkelijk vanuit de polaire iono-exosfeer kunnen ontsnappen.

We kunnen ons tenslotte voorstellen dat deeltjes die met een grote snelheid van buiten de exosfeer komen naar buiten terugkeren zonder het kritiek niveau te bereiken. Dat zouden de atomen zijn die tot de vierde groep behoren. Zulke deeltjes zijn natuurlijk niet zo belangrijk in de exosfeer, want ze bereiken nooit een voldoende concentratie.

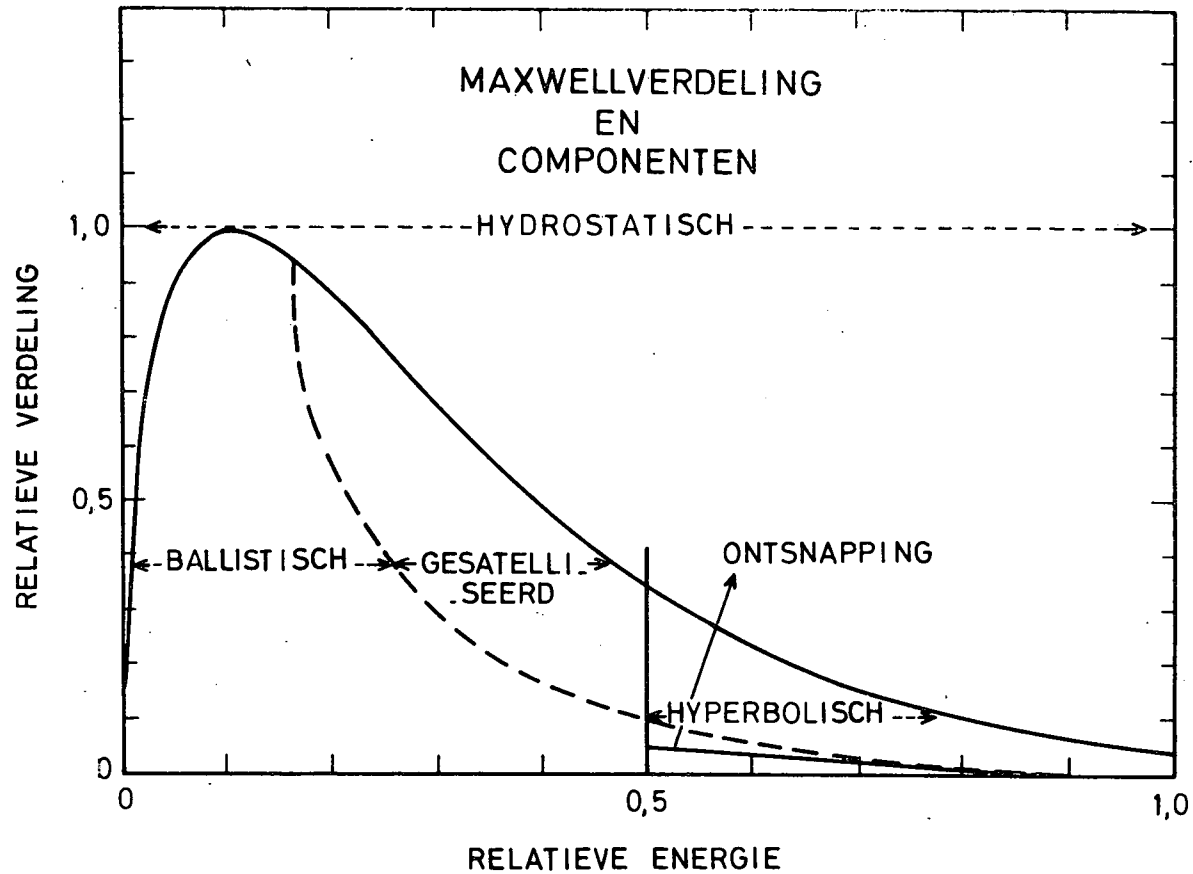


Fig. 46.- Verdeling van de componenten van de exosfeer ten opzichte van een hydrostatische verdeling in de heterosfeer. De verdeling van de energie of van de snelheden in de heterosfeer stemt overeen met een maxwellverdeling. In het voorbeeld geïllustreerd in deze figuur worden de ordinaten bepaald door de relatieve maximum frequentie 1 bereikt voor de waarde 1/10 van de relatieve energie 1 ; de hyperbolische componenten treden op vanaf de waarde 1/2 van de relatieve energie 1. De deeltjes met ballistische banen hebben natuurlijk de kleinste snelheden en die met hyperbolische banen bezitten de grootste snelheden.

De verdeling van de verschillende componenten binnen de exosfeer vertoont diverse aspecten ; om die concreet voor te stellen hebben we op figuur 47 de verschillende fracties weergegeven die de ballistische en ontsnappende componenten nemen ten opzichte van de elliptische en hyperbolische fracties. Zolang we voldoende dicht bij het kritiek niveau blijven, zijn de deeltjes die het kritiek niveau volgens ballistische banen verlaten, de belangrijkste componenten. We stellen vast dat in het gegeven voorbeeld (waterstof bij een temperatuur van  $1700^{\circ}\text{K}$ ) er een neiging is de gevangen deeltjes en de deeltjes van buitenuit in de hoogste regionen van de exosfeer te verwaarlozen. Figuren 48 en 49 zijn van toepassing op twee extreme gevallen waarvoor de temperatuur aan het kritiek niveau respectievelijk  $2000^{\circ}\text{K}$  en  $750^{\circ}\text{K}$  bedraagt. De verdeling van helium is in de twee gevallen helemaal anders, want het effect van de temperatuur is zeer aanzienlijk. We noteren nog hoe de exosferische concentratie, die slechts de deeltjes omvat die het kritiek niveau verlaten, op de grootste hoogten verschillend is van de concentratie in geval van hydrostatisch evenwicht dat daarenboven de gevangen deeltjes en de buitenste hyperbolische deeltjes moet in acht nemen.

Om te resumeren, de neutrale exosfeer en de iono-exosfeer is bijna uitsluitend samengesteld uit deeltjes die van het kritiek niveau afkomstig zijn. In feite stemmen voor elementen als atomaire zuurstof de ballistische banen overeen met de praktische verticale verdelingsvoorwaarden ; de ballistische banen verschillen trouwens niet veel van de banen van het hydrostatisch evenwicht, want de andere bestanddelen zijn niet zo belangrijk. Het geval van neutraal helium is sterk afhankelijk van de temperatuur. In het geval van neutrale waterstof echter, nemen op zeer grote hoogte de banen die overeenstemmen met voortdurend ontsnappende atomen uit de aardatmosfeer naar de interplanetaire ruimte, een bijna even belangrijke plaats in als de ballistische banen. Wat de ionen betreft, kunnen we eveneens zeggen dat de iono-exosfeer samengesteld is uit elementen afkomstig van het kritiek niveau. Het te zware zuurstofion ontsnapt niet, de waterstofionen en heliumionen daarentegen ontsnappen uit de polaire exosfeer.

Zodoende bevat de atmosfeer van de aarde, begrensd door haar neutrale exosfeer of iono-exosfeer in haar uiterste begrenzing neutrale en geïoniseerde

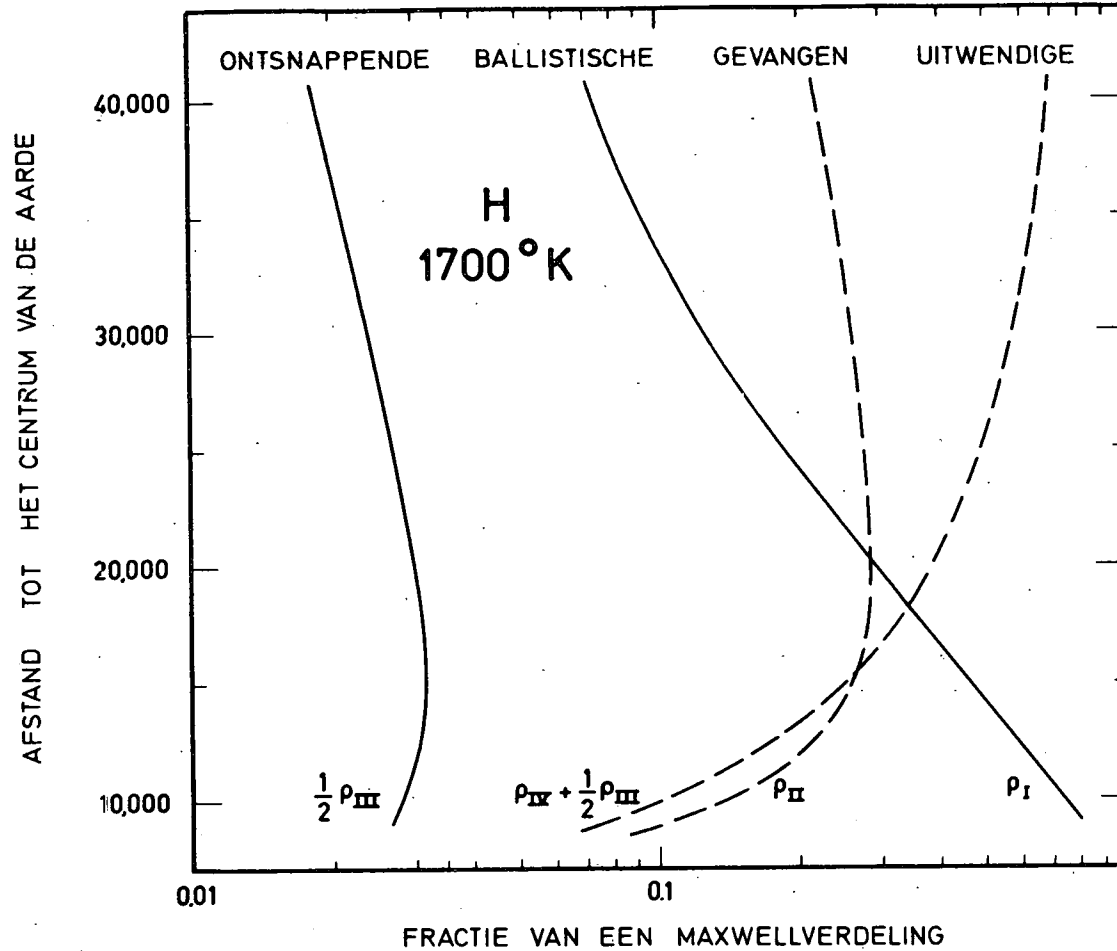


Fig. 47.- Exosferische verdeling van de verschillende componenten van een maxwellverdeling van waterstof bij  $1700^{\circ}K$ . We stellen vast dat de ballistische component de belangrijkste is tot 10.000 km hoogte. De componenten van de gevangen deeltjes (gesatelliseerde banen) en de uitwendige deeltjes (hyperbolische banen) zouden zeer belangrijk zijn boven 20.000 km hoogte indien ze bestonden. De fractie van ontsnappende deeltjes blijft praktisch constant.

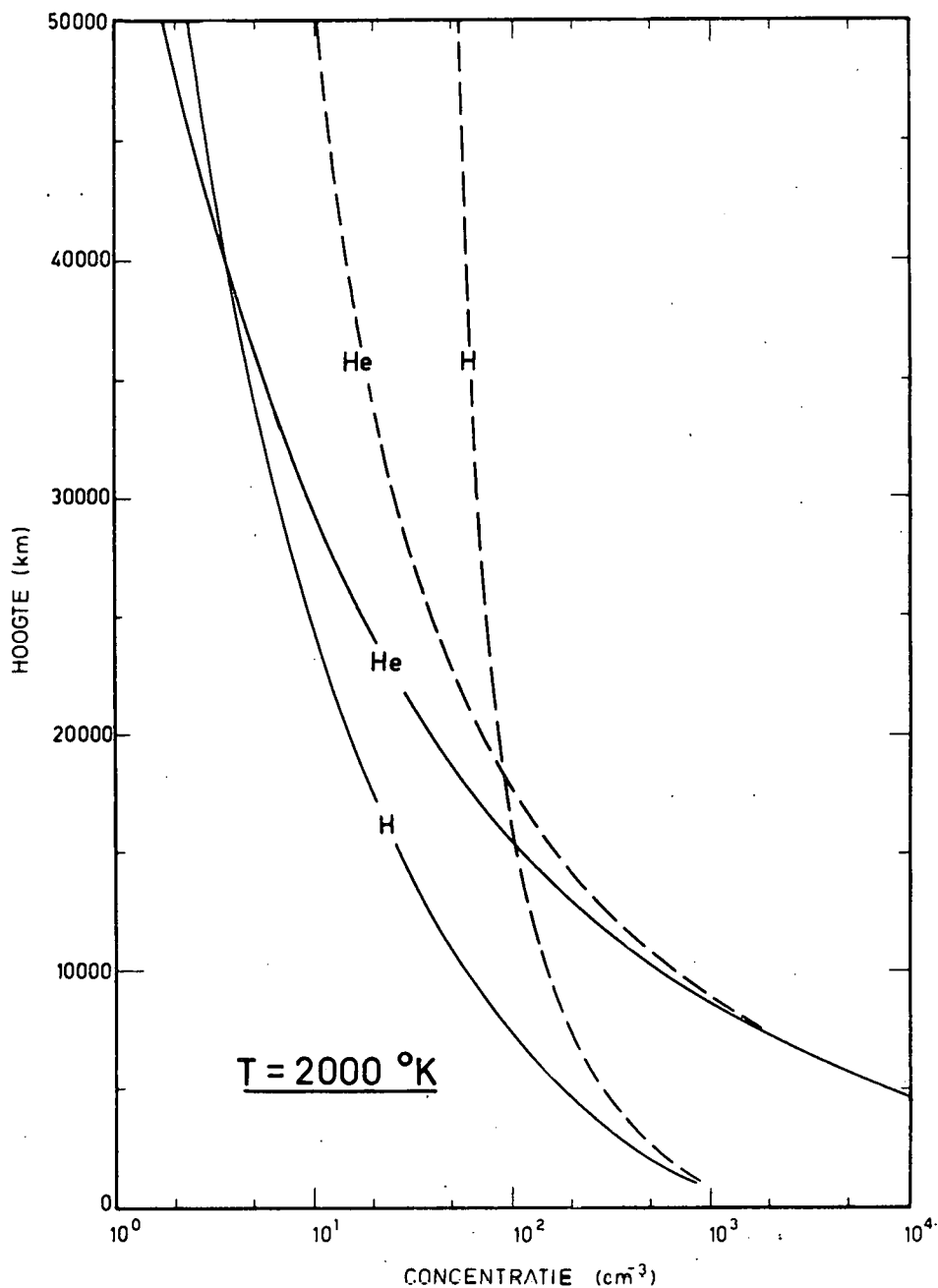


Fig. 48.- Vergelijking tussen een hydrostatische verdeling en een exosferische verdeling van waterstof en helium bij een temperatuur van 2000°K. Alhoewel de hydrostatische verdelingen relatief hoge concentraties zouden behouden, zelfs op 50.000 km hoogte (stippellijn), zijn ze zowel voor helium als voor waterstof, in de reële exosfeer in feite afgenomen tot ongeveer 2 atomen per cm<sup>3</sup> (kromme in volle lijn).

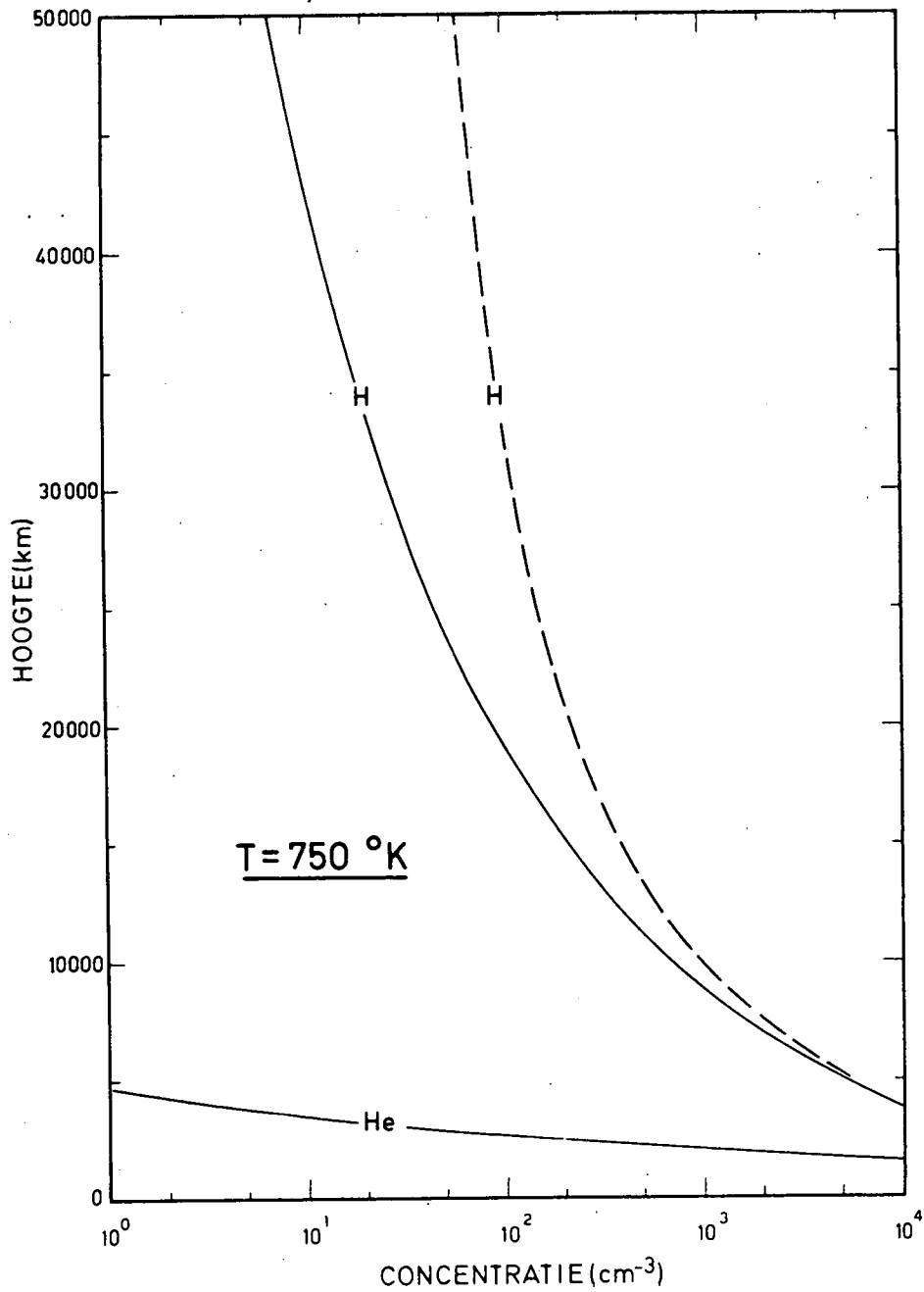


Fig. 49.- Vergelijking tussen een hydrostatische verdeling en een exosferische verdeling van waterstof en helium bij een temperatuur van  $750^\circ\text{K}$ . In dit geval (vergelijk met fig. 47) is het verschil tussen waterstof en helium enorm. De reële exosferische verdeling (volle lijn) is totaal anders dan een hypothetische hydrostatische verdeling (stippellijn).

waterstofionen. In feit bevat de exosfeer bij temperaturen lager dan  $1000^{\circ}\text{C}$  meer waterstofatomen dan de heterosfeer. Dat zal ook het geval zijn voor de andere planeten.



## P R E F A C E

Je voudrais exprimer ma très vive et sincère reconnaissance envers mes parents, tous mes amis et amies, la direction de la Katholieke Vlaamse Hogeschool et tous les professeurs qui m'ont guidé pendant ma vie.

Comment pourrai-je jamais témoigner ma gratitude à Monsieur R. SINJAN qui a bien voulu accepter de diriger ce mémoire et qui n'a cessé de m'assister.

Je dois à l'obligeance de Monsieur M. NICOLET, directeur de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique, la permission de traduire son ouvrage et de faire reproduire mon texte par les services de son Institut.

Je ne sais comment remercier Monsieur E. AERTS, chef de section à l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique, qui a revu mon travail et proposé les retouches finales.

Je voudrais remercier particulièrement Monsieur G. BODIFEE de ses conseils et de son aide effective.

Je tiens également à dire merci à Monsieur A. DE ROOVER qui a dactylographié le texte du tome I et au personnel de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique qui a réalisé la reproduction du tome II.

Qu'il me soit permis de dédier mon mémoire à tous ceux qui sont mentionnés ici.

N.C.

## TABE DES MATIERES

---

	p.
INTRODUCTION	2.
§ 1. L'aéronomie : qu'est-ce que c'est?	2.
§ 2. Bref aperçu historique de l'aéronomie	2.
§ 3. Relation entre la géophysique, la météorologie et l'aéronomie.	5.
§ 4. Sydney Chapman et Marcel Nicolet	10.
§ 5. L'Année géophysique internationale	14.
CHOIX DU SUJET	16.
METHODE DE TRAVAIL	17.
NOTES CRITIQUES	18.
BIBLIOGRAPHIE	35.

## I N T R O D U C T I O N

### § 1. L'aéronomie : qu'est-ce que c'est? =====

Créé par S. CHAPMAN (1), le mot "aéronomie" a été adopté officiellement en 1954. Cette année-là, l'Union internationale de Géodésie et de Géophysique désignait ainsi la science des régions supérieures de l'atmosphère, où les phénomènes de dissociation et d'ionisation sont importants.

### § 2. Bref aperçu historique de l'aéronomie (2) =====

La première étude scientifique de l'atmosphère était celle de Torricelli qui, en 1643, démontrait la présence de la pression atmosphérique. La loi de la hauteur barométrique (1646, Pascal) signifiait un autre progrès important dans la connaissance de l'espace.

Un siècle après, en 1749, Benjamin Franklin découvrait la nature électrique de la foudre. L'aéronomie se déployait avec l'invention du ballon (aérostat) en 1783, puisqu'on pouvait dès lors faire des expériences "in situ". Le savant Gay-Lussac a bien utilisé les possibilités qu'offrait cette nouvelle invention : en effet, avec Biot il a examiné des prises d'air à des altitudes diverses. Il a mesuré également la température, la pression et la teneur en humidité.

-----

(1) Vous trouverez un portrait de S. Chapman, fondateur de l'aéronomie, sous le § 4.

(2) Cet aperçu est basé sur deux articles :

1. AERTS E., Historiek van het ruimte-onderzoek, p. 9-11 dans "Tien jaar ruimtevaart en ruimteverkenning", Aëronomica Acta F - nr. 10, Brussel, 1967.

2. NICOLET M., De l'aéronomie d'hier à l'expérience spatiale de demain, extrait de "Ciel et Terre", volume 87, numéro 1, 1971.

Au 19<sup>ème</sup> siècle, l'étude atmosphérique était limitée à quelques observations météorologiques. On n'était pas encore arrivé à interpréter les traînées d'étoiles filantes comme une destruction au sein de la haute atmosphère. La photographie des aurores était encore dans les langes.

Ce n'est qu'à la suite de la découverte de l'électron que Birkeland a lancé l'idée de la formation de la lumière aurorale par des électrons émis par le soleil et entrant en collision avec les molécules terrestres. Ainsi était introduit l'effet du champ magnétique terrestre, qui influence la trajectoire d'une particule électriquement chargée comme l'électron et la dévie vers les régions polaires. Grâce à la spectroscopie, on avait déjà détecté des radiations dans les aurores, mais on ne pouvait pas encore obtenir des idées claires sur la constitution de l'atmosphère supérieure, car la spectroscopie n'était pas encore tout à fait développée. En 1890, le Français Teisserenc de Bort a effectué les premiers sondages par ballons non habités, grâce auxquels il a pu prouver l'existence de la stratosphère.

A la fin du siècle précédent, la théorie cinétique des gaz était suffisamment développée - grâce à Boltzmann et Maxwell - pour l'appliquer aux atmosphères planétaires.

Tout au début de ce siècle, Marconi réussissait à relier Saint-Jean de Terre-Neuve et Poldhu en Cornuailles par radio. Kennely et Heaviside en déduisaient l'existence d'une couche conductrice dans la haute atmosphère. Cette couche réfléchissant l'onde radioélectrique devait être constituée de particules chargées négativement (électrons) produites par la radiation solaire qui ionise les molécules de l'atmosphère. En 1911, l'Autrichien Hess découvrait les radiations cosmiques.

Après la première guerre mondiale, le spectroscope a permis l'interprétation des radiations caractéristiques des principaux éléments de l'atmosphère, l'azote et l'oxygène (déjà connus au 18<sup>ème</sup> siècle, tandis que les gaz nobles de l'atmosphère n'ont

été détectés qu'à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle). On pouvait ainsi conclure 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.

Quelques découvertes dans la période entre les deux guerres contribueraient au développement de l'étude de l'ionosphère : la propagation à longue distance des ondes courtes (1921-1925), la théorie de la réfraction électronique (1924, Larmor), l'étude des échos d'ondes courtes (1926, Breit et Tuve) et l'analyse de la propagation radioélectrique dans le cadre de la théorie magnéto-ionique (1932, Appleton). Enfin, la lumière du ciel nocturne pouvait être analysée grâce au développement de spectrographes de plus en plus lumineux.

Au cours de la seconde guerre mondiale, le rayonnement ultraviolet du soleil et la variation de son activité lors de son cycle undécennal, deux phénomènes auxquels l'ionosphère est soumise, étaient étudiés à la suite de l'utilisation intensive des radio-communications. Le radar était à la base de la découverte d'émissions solaires dans le domaine des ondes ultracourtes, ce qui a conduit à l'étude des relations entre les phénomènes solaires et terrestres. Enfin, depuis 30 ans environ, l'aéronomie est également devenue une science expérimentale. Les premières fusées scientifiques étaient à l'origine d'une ère nouvelle qui nous amenait vers le lancement du premier satellite artificiel en 1957, au cours de l'Année géophysique internationale (1). Depuis lors, les recherches scientifiques ont conduit à des conquêtes vraiment historiques; l'espace interplanétaire était soumis à une prospection intensive tandis que la lune et nos planètes voisines, Mars et Vénus, devenaient l'objet de missions spatiales.

C'est ainsi que, depuis quelques années, la composition chimique et la constitution physique de l'atmosphère de la Terre et

-----  
(1) Voir § 5.

des principales planètes du système solaire nous sont révélées complètement.

### § 3. Relation entre la géophysique, la météorologie et l'aéronomie(1)

=====

Afin d'obtenir une idée claire des relations entre ces trois domaines scientifiques, il serait peut-être intéressant d'en donner une description détaillée.

#### 3.1. LA GEOPHYSIQUE

##### 3.1.1. Définition

Etude des phénomènes et des lois de la physique quand on les considère comme s'appliquant aux divers milieux qui constituent le globe terrestre, y compris son environnement spatial direct. (On dit aussi physique du Globe, les deux termes étant, en principe, équivalents; mais ils sont souvent utilisés avec des sens arbitrairement élargis ou restreints.)

##### 3.1.2. Branches principales de la géophysique

La géophysique peut être divisée en trois branches principales.

1. La géophysique interne s'intéresse à l'intérieur même de la Terre (écorce, manteau, noyau), dont elle étudie la nature générale et le comportement à l'égard des phénomènes mécaniques (sismologie, gravimétrie, marées terrestres), thermiques (géothermie),

-----  
 (1) Les articles 3.1, 3.2 et 3.3 sont intégralement empruntés aux ouvrages suivants :

3.1 : La Grande Encyclopédie, n° 26. Paris, Larousse, 1973, p. 5392;

3.2 : Bordas Encyclopédie, n° 52. Paris, Bordas, 1968, p. 59-60;

3.3 : La Grande Encyclopédie, n° 1. Paris, Larousse, 1971, p. 192.

Nous y avons cependant ajouté une classification.

radio-actifs, magnétiques et électromagnétiques (origine du champ magnétique terrestre et de ses variations, archéomagnétisme, paléomagnétisme), auxquels il convient d'ajouter ceux, plus complexes, qui sont rencontrés dans l'étude des volcans (volcanologie) et des fonds des océans (géophysique marine).

2. La géophysique externe étudie l'atmosphère, l'aéronomie, l'ionosphère, la magnétosphère ainsi que les phénomènes d'interaction qui se produisent en permanence entre les milieux précédents et l'espace interplanétaire, nous transmettant les divers rayonnements énergétiques qui maintiennent notre planète sous une étroite dépendance solaire, aménagée toutefois dans une certaine mesure par son champ magnétique externe.
3. La géophysique de surface s'intéresse aux milieux (eau, neige, glace, sols superficiels) présents à la surface du Globe (hydrosphère) ainsi qu'aux phénomènes de transitions et d'échanges qui se produisent de part et d'autre du sol.

### 3.1.2. Rapports entre la géophysique et la géologie, la météorologie et l'astronomie.

Les données ci-dessus sont cependant insuffisantes pour déterminer sans ambiguïté la nature propre de la géophysique, et il convient de préciser ce qui la rapproche et ce qui la distingue des autres sciences de la Terre.

1. Avec LA GEOLOGIE, LA GEOPHYSIQUE INTERNE a beaucoup d'intérêts communs, surtout à l'échelle de la géophysique appliquée, laquelle - mettant au service de la recherche du pétrole et des minerais des méthodes physiques (prospections sismique, gravimétrique, magnétique, magnéto-tellurique) - pourrait être considérée comme une des techniques de la géologie appliquée. A part cela, la géophysique se distingue

de la géologie par la nature plus générale des problèmes auxquels elle s'attaque, qui sont ainsi envisagés, même s'ils sont abordés en une région déterminée, dans leur contexte mondial.

2. D'une façon analogue, LA GEOPHYSIQUE EXTERNE - à quoi, logiquement, pourrait être rattachée LA METEOROLOGIE - a été maintenue distincte de celle-ci, répondant à ce même souci de ne pas s'engager dans l'observation, l'étude ou l'application de phénomènes régionaux ou locaux.
3. Une distinction plus claire est celle entre LA GEOPHYSIQUE EXTERNE et L'ASTRONOMIE, car, bien que la géophysique externe doive s'intéresser à la physique des relations Soleil-Terre, elle fait confiance à l'astronomie solaire pour lui fournir régulièrement les données relatives aux paramètres intervenant dans ces relations (notamment ceux qui concernent les éruptions et les rayons cosmiques solaires, le vent solaire, etc.), ne faisant pas de la détermination de ces paramètres des sujets d'étude qui lui soient propres.

### 3.2. LA METEOROLOGIE

#### 3.2.1. Définition

La météorologie étudie l'ensemble des phénomènes qui se produisent dans les milieux aériens entourant la Terre. On distingue:

- a) La météorologie d'observation, qui observe d'une façon distincte les différentes caractéristiques de l'atmosphère et du temps: température, hygrométrie, etc.;
- b) La météorologie dynamique, qui recherche les lois des phénomènes atmosphériques et leur rapport avec le temps.

A partir de l'ensemble de ces observations et de ces lois, et en examinant l'état du temps à un instant donné, on peut envisager de prévoir l'évolution du temps.



### 3.2.2. Intérêt de la météorologie

La prévision du temps n'est ni un jeu scientifique stérile, ni une entreprise destinée à conseiller à M. ou Mme X d'emporter leur parapluie s'ils partent en promenade. La connaissance de la "météo" à courte échéance (par exemple à 24 heures de distance) est indispensable à la navigation maritime et aérienne. En raison, notamment, de la rapidité des transports aériens, l'assistance météorologique à l'aéronautique est, on s'en doute, capitale. Des cartes météorologiques aéronautiques sont établies ainsi toutes les trois heures et diffusées par des services spécialisés à des stations de renseignements locales. Les renseignements sont transmis aux intéressés avant le départ, en vol et au moment de l'atterrissage.

L'ensemble des renseignements quantitatifs et des cartes qui sont ainsi fournis régulièrement est impressionnant. Contrairement à ce que croit, trop souvent, l'opinion publique sceptique, les informations météorologiques quantitatives sont suffisamment certaines pour permettre la prise de décisions importantes. Pour fixer les idées, on peut signaler que la méthode de détermination des routes aériennes à temps de vol minimum, mise en application sur l'Atlantique nord en 1953, permet aux compagnies aériennes organisant des vols "long courrier" des économies annuelles de plusieurs millions de dollars.

### 3.3. L'AERONOMIE

Science des phénomènes physiques et physico-chimiques qui conditionnent les propriétés de la haute atmosphère terrestre, cela à partir d'une altitude que l'on peut estimer comme devant être supérieure à une cinquantaine de kilomètres.

On ne donne pas de limite numérique à l'extension vers le haut de l'espace concerné par cette science, mais on précise, cependant, qu'il doit pouvoir être considéré comme appartenant au domaine proprement terrestre.

Sous une telle définition peuvent se ranger, logiquement, certaines sciences ayant déjà leurs vocations propres ou faisant partie de disciplines aux normes bien connues :

- la météorologie, quand elle fait intervenir la mécanique physique des hautes couches de l'atmosphère, la distribution en altitude des températures ou celle de l'ozone, la transmission des phénomènes d'ionisation, etc.;
- la radiotélégraphie, par l'étude de la propagation des ondes électromagnétiques et celle, concomitante, de l'ionosphère;
- le magnétisme terrestre, par l'étude de son champ externe;
- la physique des relations Soleil-Terre, par l'étude qu'elle nécessite des propriétés de la magnétosphère terrestre.

En fait, on utilise le mot aéronomie dans le langage scientifique soit pour désigner d'une manière volontairement vague l'ensemble de ces sciences (météorologie exceptée), soit - et alors d'une façon beaucoup plus restreinte - pour préciser des études particulières qui se sont développées récemment entre les disciplines bien reconnues.

C'est ainsi qu'appartiennent plus spécifiquement à l'aéronomie les sujets de recherche et les techniques suivantes:

- la photochimie propre à la haute atmosphère (réactions de photosynthèses, de photo-ionisations, de photo-associations - ou dissociations - des ions, etc.), ainsi que toutes les interactions entre particules neutres ou ionisées, ce qui conduit à une meilleure connaissance de la composition particulière de la haute atmosphère;
- les études sur les mouvements des hautes couches de l'atmosphère et sur la répartition de leurs températures, dès qu'elles mettent en jeu des techniques ne rentrant qu'imparfaitement dans le cadre de la météorologie classique. On peut citer comme exemple la vaporisation de nuages de sodium ou l'injection d'autres "marqueurs" (par fusée ou par satellite) dans les couches à très haute altitude que l'on désire étudier et dont on suit à partir du sol le comportement dynamique et physique au moyen d'observations appropriées (notamment spectroscopiques).

On ne s'étonnera pas de la complexité du domaine concerné par l'aéronomie, si l'on se réfère à l'étroit enchevêtrement du développement actuel de la plupart des sciences touchant à l'espace et - plus particulièrement - à l'environnement terrestre.

#### § 4. Sydney Chapman et Marcel Nicolet (1)

=====

Lors d'un congrès scientifique au Japon, au début des années '70, un orateur disait : "L'empereur de l'aéronomie n'est plus des nôtres, mais nous sommes très honorés d'avoir son dauphin parmi nous."

Il faisait allusion à respectivement Sydney Chapman et Marcel Nicolet. Dans ce chapitre, nous voudrions esquisser un portrait de ces deux grands fondateurs de l'aéronomie.

-----

(1) Le texte concernant S. Chapman est un résumé de NICOLET M., Portrait de Sydney Chapman, ICSU Review vol. 3, 1961, p. 45-48; Les données sur M. Nicolet nous ont été procurées par Monsieur E. Aerts.

#### 4.1. SYDNEY CHAPMAN

##### 4.1.1. Sa vie

Sydney Chapman est né à Manchester (Angleterre) en 1888. En 1910, S. Chapman était "wrangler" (1) en mathématiques, après deux ans d'études au Trinity College à Cambridge. L'année suivante, il devenait assistant-chef de l'Observatoire de Greenwich. En 1919, il était élu à la Royal Society et nommé professeur de mathématiques à l'Université de Manchester. En 1924, il prenait la tête du département de mathématiques de l'Imperial College à Londres, et en 1946 il était nommé professeur au Queen's College à Oxford. Chapman, qui avait déjà été président de diverses sociétés savantes en Angleterre, était entretemps devenu président de l'Association Internationale de Météorologie et président de l'Association Internationale de Magnétisme et d'Electricité terrestres. En 1951, il était élu président de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale et en 1953, il était proclamé président du Comité Spécial de l'Année géophysique internationale.

Sydney Chapman est décédé des suites d'une crise cardiaque le 16 juin 1970, à Boulder, Etats-Unis, où il résidait depuis 1955.

##### 4.1.2. Ses principaux ouvrages

En se basant sur les équations de transport de Maxwell, S. Chapman a commencé ses recherches scientifiques par l'étude de la théorie cinétique des gaz (1911-1916). On retrouve les résultats de la première approximation du problème dans son premier mémoire,

-----  
 (1) "wrangler" : étudiant sorti dans la première classe à l'examen de mathématiques (à l'université de Cambridge) (Dictionnaire Bordas, Anglais-Français).

publié dans la revue "Philosophical Transactions of The Royal Society". Dans "Mathematical Theory of Non-Uniform Gases" (1939), écrit en collaboration avec T.G. Cowling, S. Chapman a donné une analyse de la théorie cinétique de la viscosité, de la diffusion et de la conduction thermique dans les gaz.

"Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity" (1931-33), écrit en collaboration avec V.C.A. Ferraro, est une synthèse de ses recherches d'une explication des orages magnétiques. Cette oeuvre constitue la base d'une théorie sur les aurores, qu'il avait élaborée avec son élève et collègue Akasofu. Cette théorie "est basée sur le fait qu'au cours de perturbations, des champs magnétiques renforcés peuvent exister ou que des champs supplémentaires peuvent être introduits par suite de l'existence de courants électriques à des distances de plusieurs rayons terrestres. De là, des lignes neutres peuvent apparaître et déterminer par leur position, leur forme et leur déplacement la localisation, la nature et le mouvement des aurores." (1)

"Geomagnetism" (1940), un ouvrage volumineux écrit en collaboration avec J. Bartels (2), traite l'analyse du champ magnétique et de ses perturbations.

S. Chapman a été un véritable pionnier dans les investigations sur l'atmosphère terrestre. L'aéronomie doit beaucoup à ce grand savant qui en plus, a examiné les marées atmosphériques, la composition de l'atmosphère, l'ozone atmosphérique, l'émission de la lueur nocturne et l'ionosphère.

-----  
 (1) NICOLET M., o.c. page 47.

(2) Pour nous informer sur le sujet de l'aéronomie, nous avons entre autres lu "Geophysik" de J. Bartels, traduit en néerlandais par P.I.F. van Leeuwen (voir Méthode de travail, Notes critiques et Bibliographie).

#### 4.2. MARCEL NICOLET

---

Marcel Nicolet est né en 1912 et a été nommé assistant à l'Institut Royal Météorologique de Belgique en 1935, après de brillantes études à l'université de Liège. En 1946, il a été promu météorologiste, chef du Service du Rayonnement. En 1951, l'université d'Etat de Pensylvanie lui offrait la chaire de professeur directeur de recherches dans sa section de physique. Sa collaboration avec S. Chapman date de 1955. En 1960, il a été nommé professeur chargé de cours à l'université de Bruxelles. A ce moment, il était déjà Secrétaire Général du Comité Spécial de l'Année géophysique Internationale, dont S. Chapman était président. En 1965, M. Nicolet devenait le premier directeur de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique, nouvellement créé par arrêté royal.

M. Nicolet a publié plus de 150 travaux originaux concernant l'astrophysique, la météorologie, l'aéronomie et la structure de la haute atmosphère et a accompli de nombreuses et importantes missions scientifiques. On lui a accordé de multiples titres scientifiques. En 1963, on lui a attribué le Prix International d'Astronautique Daniel et Florence Guggenheim pour ses contributions remarquables dans le domaine de l'astronautique. Deux années plus tard, il a reçu la médaille d'or et le prix de la Smithsonian Institution (Etats-Unis) pour ses apports exceptionnels concernant la connaissance des propriétés de l'atmosphère.

M. Nicolet a acquis une réputation internationale grâce à ses recherches. Nous avons même constaté que Le Grand Robert lui a emprunté les définitions de la troposphère et de la stratosphère (voir texte français à la page 3).

§ 5. L'Année géophysique internationale. (1)

=====

Dans l'ouvrage que nous avons traduit, M. Nicolet parle souvent de l'Année géophysique internationale (page 2, 13, 18, 32). De quoi s'agit-il?

L'Année géophysique internationale était une période de 18 mois (1 juillet 1957-31 décembre 1958) pendant laquelle un ensemble de recherches géophysiques ont été faites dans le monde entier. 70 pays, plus de 2500 stations d'observation, situées entre le pôle arctique et le pôle antarctique, et des dizaines de milliers de savants et d'observateurs ont collaboré à cette immense entreprise internationale.

L'organisation était dirigée par le Comité Spécial de l'Année géophysique internationale qui avait été fondé par le Conseil International des Unions Scientifiques. S. Chapman était président du comité, les membres étaient des représentants des Unions Internationales, c'est-à-dire l'Union de Géodésie et de Géophysique, l'Union Radio-Scientifique Internationale, l'Union Astronomique et l'Organisation Météorologique Mondiale.

Les observations, les mesures et les sondages effectués au cours de l'Année géophysique internationale peuvent être divisés en trois catégories :

1. la physique de la haute atmosphère, comprenant entre autres l'activité solaire, les particules et les radiations solaires, l'espace interplanétaire, les aurores polaires, la lueur nocturne, l'ionosphère et les radiations cosmiques;

-----

(1) Cet article est basé sur les chapitres concernant l'Année géophysique internationale que vous trouvez dans:

- Britannica, 2, p. 514 B - 518, 1964
- van Leeuwen, p. II5-II6
- Veldkamp, p. 374-386
- Winkel & Prins, 8, p. 218

(Indications plus précises dans "Notes critiques"  
Voir aussi "Bibliographie".)

Nous n'avons pas trouvé d'informations sur ce sujet dans les encyclopédies françaises.

2. la surface du Globe, comprenant la météorologie, l'océanographie et la glaciologie;
3. l'intérieur de la surface terrestre et la structure terrestre, comprenant la gravimétrie, la sismologie et la détermination des latitudes et longitudes géophysiques.

L'Année géophysique internationale avait été précédée de deux années polaires : 1882 - 1883 et 1932 - 1933. On peut se faire une idée de l'immensité du projet quand on sait que les frais de l'Année géophysique internationale sont estimés à 500 millions de dollars!



## CHOIX DU SUJET

Pourquoi une traduction de texte scientifique dans un domaine qui nous était totalement inconnu?

Nous avons choisi:

- 1) une traduction;  
parce que notre formation consiste principalement à faire des traductions.
- 2) une traduction de texte scientifique;  
parce que les possibilités professionnelles sont plus grandes dans le domaine de la traduction de textes "bêta".
- 3) une traduction de texte scientifique dans un domaine qui nous était totalement inconnu; parce que le monde industriel et scientifique demande dans beaucoup de cas des traducteurs qui aient l'intention de se spécialiser dans une certaine branche. Nous avons voulu nous faire une idée de ce qui nous attend. Quand le traducteur est confronté avec un domaine qui lui est tout à fait inconnu, il doit commencer par un travail d'exploration et de documentation, c'est-à-dire tâcher d'acquérir une connaissance passive du sujet, ce qui rendra le texte plus accessible. Par ce travail préparatoire, le traducteur peut aussi obtenir une connaissance de base du lexique spécialisé, qui lui sera indispensable pendant la traduction proprement dite.

La décision de traduire "L'aéronomie" de Monsieur M. Nicolet a été le résultat de nos contacts avec l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique, où nous étions allés nous documenter en vue de la traduction de deux textes traitant des télécommunications et des satellites.

Le fait que notre traduction pouvait être utile pour les calculateurs néerlandophones de l'Institut cité plus haut et que nous pourrions donc faire un travail qui ne disparaîtrait pas dans les archives de la bibliothèque; la coopération qui nous était promise par Messieurs M. Nicolet et E. Aerts nous a bien encouragé à entamer ce mémoire.

## METHODE DE TRAVAIL

---

### A. Chercher de la documentation

Il n'existe pas d'ouvrage en néerlandais uniquement consacré à l'aéronomie. On peut s'informer sur ce sujet dans les livres qui traitent la géophysique et dans les articles concernant l'atmosphère, qu'on retrouve dans les encyclopédies et dans les revues scientifiques traitant le plus souvent un certain aspect de l'aéronomie.

Afin d'acquérir une connaissance passive du texte que nous allions traduire et de constituer un lexique de base, nous avons puisé dans les sources citées plus haut.

### B. Le contact avec les spécialistes

Lors de la traduction, il nous était parfois impossible de trouver le terme correct en néerlandais. C'était

le cas notamment quand les dictionnaires ne fournissaient pas d'information et quand nous ne trouvions pas de terme correspondant au terme français dans les ouvrages en néerlandais. Il nous est aussi arrivé d'hésiter entre plusieurs traductions qui nous semblaient plausibles.

Dans cette situation, la meilleure solution consiste à faire appel aux spécialistes. Nous avons eu le grand avantage de pouvoir consulter d'éminents spécialistes, qui en plus, se sont montrés de choisir le terme correct à tout point de vue.



G.R.	Le Grand Robert
M.N.	Marcel Nicolet, L'aéronomie
O.H.	Het Oneindige Heelal
S.T.W.	Standaard Technisch Woordenboek
T.B.	Ten Bosch
V.D.	van Dale
V.K.	Veldkamp, Geofysica
V.L.	van Leeuwen, Geofysica
W.P.	Grote WinklerPrins

(note : indications plus précises dans la Bibliographie)

bn.	bijvoeglijk naamwoord
bw.	bijwoord
m.	mannelijk
n.f.	nom féminin
n̄.f.pl.	nom féminin pluriel
n.m.	nom masculin
n.m.pl.	nom masculin pluriel
v.	vrouwelijk

Pour la facilité, nous avons numéroté les notes critiques. Le lecteur retrouvera ces numéros dans le texte français aussi bien que dans la traduction, dans la marge de droite. Quand une difficulté se représente dans un chapitre suivant, nous avons mis le même numéro dans la marge (en bleu). Il aurait été plus facile encore de mettre les notes au bas de la page, mais cela n'aurait guère intéressé le personnel de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique. Par contre, nous espérons que ces notes se trouvant dans un autre volume, le lecteur pourra les mettre à côté des textes.

- (1) la haute atmosphère (n.f.) ) → de opperatmosfeer  
 l'atmosphère (n.f.) supérieure )  
 l'ionosphère (n.f.) supérieure → de opperionosfeer  
 la mésosphère (n.f.) supérieure → de oppermesosfeer  
 la thermosphère (n.f.) supérieure → de opperthermosfeer  
 (E. Aerts)

- (2) les nuages (n.m.pl.) lumineux nocturnes → lichtende  
 nachtwolken

"Lichtende nachtwolken, ook lichtgevende nachtwolken of noctilucēt clouds (NLC) genaamd, zijn heldere wolken die gedurende het zomerhalfjaar zichtbaar worden tegen een donkere hemel, 15 à 35 minuten na zonsondergang." (W.P., 12, p. 37)

"... il existe également à des altitudes supérieures, au niveau de la mésopause, des nuages que l'on appelle nuages lumineux nocturnes. Ceux-ci sont en général observés dans un domaine de latitudes s'étendant de 45° à 60°. Lorsque le Soleil est couché depuis quelque temps et se trouve sous l'horizon, des nuages peuvent apparaître dans le cercle crépusculaire existant au cours des nuits d'été." (M.N., p. 18)

- (3) aurore (n.f.) polaire → poollicht

"aurore (n.f.) : dageraad  
 aurore (n.f.) australe: zuiderlicht  
 aurore (n.f.) boréale: noorderlicht  
 aurore (n.f.) polaire: poollicht " (T.B.)

"aurore : dageraad  
 aurore australe : zuiderlicht, zuider poollicht  
 aurore boréale : noorderlicht, noorder poollicht" (S.T.W.)

"Op het noordelijk halfrond wordt het verschijnsel gewoonlijk aan de noordelijke helft van de hemel gezien, vandaar de naam noorderlicht (aurora boréalis). Maar op het zuidelijk halfrond ziet men iets dergelijks in zuidelijke richting, men zou daar dus van zuiderlicht (aurora australis) kunnen spreken. Dichtbij de polen worden deze lichtverschijnselen even vaak in het oosten en westen, als in het noorden of zuiden gezien. Daarom is het beter de algemene naam poollicht te gebruiken." (V.K. p. 273)

poollicht voir aussi V.K. (p. 98, 273, 366)  
 V.L. (p. 7, 34, 115, 129, 171, 191, 206)

Note 1 : Dans le texte français, l'auteur écrit souvent les aurores, la forme elliptique pour les aurores polaires.

Note 2 : van Dale ne donne pas la forme du pluriel de poollicht. Cependant, nous croyons que nous pouvons considérer poollicht comme nom d'espèce et donc employer la forme du pluriel.

(4) la lumière émise par les aurores → poollichtemissies  
(E. Aerts)

On peut aussi traduire par le terme général het poollicht.

(5) la lueur du ciel nocturne )  
la lueur nocturne ) → het nachtgloren (E. Aerts)

(6) une analyse spectrale → ontleding van het spectrum  
(E. Aerts et G. Bodifée)

"analyse (n.f.) spectrale : spektrumanalyse" (T.B.)

"analyse spectrale : spectrale analyse, spectraal-analyse, spektrumanalyse"  
(S.T.W.)

Spectraalanalyse est un germanisme (V.D.), comme spectraal-lijn. Dans ce dernier cas, van Dale conseille d'employer spectrale lijn ou spectrumlijn.

Par analogie avec ces deux possibilités suggérées, on peut donc traduire analyse spectrale par spectrale analyse ou par spektrumanalyse.

Ici nous avons préféré cependant ontleding van het spectrum pour des raisons stylistiques (deux fois "analyse" et une fois "analyser" dans le premier paragraphe)

(7) des satellites artificiels → kunstsatellieten

"satellite (n.m.) artificiel : kunstmatige satelliet, kunstmaan, bijplaneet" (S.T.W.)

"kunstmaan of (kunstmatige) satelliet is een door de mens vervaardigd voorwerp dat in een baan rond de aardbol of een ander hemellichaam is gebracht." (W.P., vol. 11, p. 456)

"kunstsatelliet, (m.) : kunstmaan" (V.D.)

"kunstmaan, V.(m.) : 1. kunstmatige satelliet  
2. sterke lamp voor bij nacht verricht buitenwerk" (V.D.)

Nous avons rencontré kunstsatelliet, kunstmatige satelliet et kunstmaan pêle-mêle dans les textes que nous avons lus. Cependant, nous n'avons jamais vu le mot bijplaneet.

(8) latitude (n.f.) moyenne → gemiddelde breedte (S.T.?)

Les textes sur lesquels nous nous sommes basé emploient plus gematigde breedte que gemiddelde breedte. Gematigde breedte est peut-être formé par analogie avec gematigde luchtstreek (= latitude tempérée). C'est pourquoi nous préférons gemiddelde breedte.

(9) stratosphère (stratum, couche) → stratosfeer (stratum, het uitgespreide )

- 1 a. "stratosphère, n.f. (1898 Teisserenc de Bort; mot savant formé d'après le lat. stratum (V. Strate), et sphère)." (G.R.)
- b. "De 15 à 30 km. s'étend la stratosphère (du grec stratos, étendue)." (B.E., vol. 52, p. 120)
- c. "stratosphère, 1898, Comp. du lat. stratus, étendu et de sphère." (D.E.)
- d. "Stratosfeer. De naam van deze laag is afgeleid van het Latijnse stratum, dat het uitgespreide betekent." (W.P., vol. 2, p. 618)
- 2 a. "strate, n.f. (1805; 1765 ENCYCL., sous la forme lat. plur. strata; empr. lat. stratum, chose étendue, neutre du p.p. de sternere, étendre. Géol. Chacune des couches de matériaux qui constituent un terrain, spécialt. un terrain sédimentaire. V. Assise, banc, couche, lit." (G.R.)
- b. "Strate, terme de géol., 1805. Empr. du lat. stratum chose étendue, part. passé substantivé de sternere" (D.E.)
- 3 a. "sternere, stravi, stratum : op de grond uitspreiden" (Latijns-Nederlands Woordenboek, Utrecht/Antwerpen, 1962, Aula nr. 24)
- b. "sternere, stravi, stratum : op de grond uitspreiden, uitstrekken, (Latijns-Nederlands Woordenboek, Wolters)  
(Voir sous sterno)
4. "stratos : armée" (Grieks-Nederlands Woordenboek, Wolters)  
(Voir G.R. sous "stratège")

Notre conclusion :

- 1) Le mot stratosphère est emprunté au latin stratum ( l a, l c, l d) et pas au grec stratos (d'après l b), qui signifie armée (4).
- 2) Reste la question : Est-ce que stratum signifie
  - l'étendue ( l a, l c, l d, 2 a, 2 b)
  - couche (M.N.)

Nous avons choisi l'étendue, ou'on peut traduire ici par het uitgespreide (voir dictionnaires Latins et W.P.) parce que Tesserenc de Bort pourrait avoir pensé que la stratosphère était infiniment étendue. On n'avait en effet, découvert que la troposphère et la stratosphère. Pour cet argument, nous nous basons sur le texte suivant : "Immediately above the tropopause is a nearly isothermal (constant temperature) region followed by a region of temperature increase called the stratosphere. For some time after the early observations of de Bort, whose balloons penetrated into the stratosphere, it was thought that the isothermal region might extend upward indefinitely, and so in much of the early literature the word stratosphere was used loosely to refer to everything between the troposphere and the ionosphere. This definition is no longer used, and it is recognized that the isothermal region does not extend very far and is usually absent in the tropics (Brittanica, vol. 2, p. 701, 1971)

(10) lors )  
 au cours ) du minimum d'activité solaire → bij geringe  
 zonneactiviteit (E. Aerts)

lors )  
 au cours ) du maximum d'activité solaire → bij sterke  
 zonneactiviteit (E. Aerts)

(11) niveau (n.m.) critique → kritiek niveau

Elsevier donne une masse de compositions NOM + CRITIQUE. D'après les traductions suggérées, on peut toujours traduire critique par kritiek ou par kritisch. Nous avons choisi kritiek niveau parce que : "Als er afleidingen op -iek en -isch naast elkaar voorkomen, geeft het Nederlands in het algemeen de voorkeur aan de Romaanse formatie." (C.T.T., p. XXIII)

Pour cette raison, nous avons traduit fréquence critique par kritiek niveau, le terme qu'on retrouve aussi chez V.K. (p. 300, 302, 313, 322).



- (I2) l'azote et l'oxygène moléculaire → moleculaire stikstof en moleculaire zuurstof

L'auteur dit aussi bien azote et oxygène moléculaire que azote et oxygène moléculaires. Il est évident que l'azote et l'oxygène se trouvent tous les deux sous forme moléculaire. "L'air que nous respirons a une composition chimique bien définie. Il est constitué d'azote moléculaire  $N_2$  (78,1 % en volume), d'oxygène moléculaire  $O_2$  (21 %), ..." (M.N., p. 8).

Chaque fois, nous avons traduit azote et oxygène moléculaire par moleculaire stikstof en moleculaire zuurstof.

- (I3) ... l'atmosphère neutre )  
impose ses conditions à ) → ... legt de neutrale at-  
l'ionosphère ) mosfeer haar wetten op  
aan de ionosfeer  
(E. Aerts et G. Bodifée)
- (I4) l'ionosphère a ses con- )  
ditions propres ) → neemt de ionosfeer haar  
eigen natuur aan (E. Aerts)
- (I5) zone (n.f.) aurorale → poollichtzone  
ovale (n.m.) aurorale → poollichtovaal  
calotte (n.f.) polaire → poolkap

#### "De poolstreken

De verschillende magnetoſferische gebieden kunnen, dank zij hun begrenzing door krachtlijnen, worden geprojecteerd op het aardoppervlak, waar men aldus bepaalde gebieden kan herkennen. In de poolstreken onderscheidt men de volgende zones:

##### a. poollichtovaal

Men vermoedt dat dit ovaal de projectie is van de gebieden waarin de pseudogebonden deeltjes aanwezig zijn. Dit gebied maakt deel uit van de inwendige magnetosfeer. Uit gelijktijdige waarnemingen van vergelijkbare vormen van poollicht in verwante punten moet afgeleid worden dat dit zich voordoet langs gesloten geomagnetische veldlijnen. Deze verwantschap komt nog tot uiting voor  $L = 10$ . Lange tijd was men er evenwel van overtuigd dat de poollichtverschijnselen plaats hadden volgens open veldlijnen. Verder is gebleken dat dagelijks het leeuwenaandeel van de korpuskulaire neerslag en van het poollicht zich voordoet in dit ovaal. Mogelijk kan men het nog onderverdelen in kleinere zones ieder gekenmerkt door welbepaalde deeltjes.

b. de poollichtzone

Het poollichtovaal heeft geen vaste plaats. Het verandert voortdurend onder invloed van de magnetische onrust. Het beschrijft aldus een oppervlak dat men de poollichtzone genoemd heeft en waarvan de grenzen bepaald worden door de veldlijnen waarvoor  $L = 5$  en  $L = 17$ . Het is in deze zone dat het poollicht hoofdzakelijk waargenomen wordt.

c. de poolkap

De uitwendige magnetosfeer wordt geprojecteerd in de poolkap die volledig omgeven is van de poollichtzone. Binnen deze poolkap treedt zelden poollicht op."

(AERTS E., Roentgenstraling in de poolstreken. Hemel en Dampkring, 69e jg. nr. 3, 1971, p. 49-60).

(I6) molécules (n.f.) minoritaires → moleculen die in geringe mate voorkomen  
(E. Aerts et G. Bodifée)

constituants (n.m.) minoritaires → bestanddelen die in geringe mate voorkomen  
(E. Aerts et G. Bodifée)

(I7)  $(10^{-3} \text{ gm cm}^{-3}) \rightarrow (10^{-3} \text{ g cm}^{-3})$

Dans le texte français  $10^{-3} \text{ gm cm}^{-3}$  doit être remplacé par  $10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$ . L'abréviation officielle de gramme est en effet g (selon le Système International d'Unités).

(I8) 10-15 fois →  $10^{-15}$  keer

10-15 fois doit être  $10^{-15}$  fois (erreur typographique).  
(E. Aerts)

(I9) ce qui définit une ) → wat aanleiding geeft tot een  
température unique ) welbepaalde temperatuur (E. Aerts)

(20) leur trajectoire (n.f.) dynamique → hun kinetische baan  
dynamique doit être remplacé par cinétique (E. Aerts)

(21) des débris de météorites) → meteorostenen (E. Aerts)  
des débris météoriques )

"météorite (n.m.) : meteoriet (T.B.)  
: meteoriet, meteorsteen " (S.T.W.)

"météorolithe (n.m.) : aëroliet, meteorsteen " (S.T.W.)

"meteorsteen : météorite, pierre météorique, météorolithe,  
aërolithe " (S.T.W.)

"meteoriet : météorite " (S.T.W.)

"meteorsteen, m. : in vakt. ben. voor hoofdz. uit sili-  
caten bestaande meteorieten (aërolie-  
ten); in de alg. taal voor meteoriet  
in het alg." (V.D.)

"meteoriet, m. : ben. voor lichamen die uit de hemelruimte  
op de aarde neervallen, meteorostenen"  
(V.D.)

"meteoroliet, m. : meteorsteen" (V.D.)

"aëroliet, m. : lucht-, meteorsteen" (V.D.)

(22) par un procédé de triangulation → door triangulatie  
(E. Aerts)

(23) arcs calmes (n.m.) → homogene bogen

Le symbole pour cette forme d'aurore est HA (homogenous  
arc). (voir V.L. p. 195)

La traduction d'arc calme est homogene boog. (V.L. p. 195;  
V.K. p. 274)

(24) de couleur verte → groenachtig

"In de poolgebieden is de klaur van het lichten meestal  
witachtig - groenachtig - geelachtig." (V.L. 191)

"Bekijkt men het poollicht door een spectroscop, dan is  
een groene lijn (met golflengte 5577 Å) het meest opval-  
lend. Ook in ons land is deze lijn in een zakspectro-  
scoopje, zelfs bij zwak poollicht, gemakkelijk waar te  
nemen. Door de grote intensiteit van deze lijn is het  
poollicht gewoonlijk wit-groenachtig of bleekgroen van  
tint." (V.K. p. 284)

Nous avons préféré le terme groenachtig à cause des dif-  
férentes nuances que les aurores polaires peuvent prendre.

(25) ressemble à des draperies (n.f.) mouvantes → gelijk op bewegende gordijnen.

"... wanneer de stralen zeer lang zijn, ontstaat het beeld van een gordijn met golvende plooien (draperie)."  
(V.L. p. 195)

"Draperie : worden de stralen lang, dan lijkt de band op een lichtend gordijn. Door de intensiteitswisselingen van het licht lijkt het alsof de plooien van het gordijn golvende bewegingen maken." (V.K. p. 275)

Nous avons traduit ici draperie par gordijn pour conserver l'image. Un peu plus loin, nous traduirons draperies par draperieën, le terme que V.L. et V.K. emploient aussi.

(26) minimum d'activité (n.f.) → geringe magnetische onrust  
magnétique (E. Aerts)

maximum d'activité (n.f.) → sterke magnetische onrust  
magnétique (E. Aerts)

orages (n.m.) magnétiques → magnetische stormen

perturbations (n.f.) magnétiques — magnetische storingen

"Magnetische storingen is de verzamelnaam voor onregelmatige fluctuaties van verschillende aard (in Duitsland en naburige landen, in de avonduren sterker dan 's morgens), tot de zgn. aardmagnetische stormen toe, met veranderingen van de veldsterkte van 3000 γ en uitwijkingen van de kompasnaald met verschillende graden. Weliswaar mag de aanduiding "aardmagnetische stormen" ons niet doen vergeten dat deze magnetische onrust in generlei verband staat met het weer; dit blijkt reeds uit het feit dat de onrust steeds op de gehele aarde gelijkmatig verandert. Bij duisternis gaan magnetische stormen evenwel vaak gepaard met poollicht; dit verband werd reeds 200 jaar geleden door Celsius in Upsula geconstateerd." (V.L. p. 171)

(27) cirro-stratus (n.m.) → cirro-stratus

S.T.W. écrit cirrostratus (donc en un mot), aussi bien en français qu'en néerlandais. Cependant, G.R. (suppl.) et V.D. l'écrivent avec trait d'union.

(28) luminosité (n.f.) → helderheid

"luminosité : helderheid, lichtsterkte (S.T.W.)  
: lichthoeveelheid; helderheid, lichtsterkte"  
(T.B.)

"luminosity, subjective brightness : brillance subjective,  
luminosité.  
: helderheid"  
(Els. n° I866 et 3066)

"helderheid : luminance, luminosité, brillance" (S.T.W.)

"Lichtsterkte : zie "lichtkracht" : intensité lumineuse,  
énergie lumineuse, lu-  
minosité, pouvoir  
éclairant" (S.T.W.)

"Lichtsterkte : intensité lumineuse " (Els. n° I873)

⇒ helderheid (E. Aerts)

(29) le doublet rouge → de dubbele rode lijn (E. Aerts)

(30) l'effet Doppler (n.m.) → het dopplereffect

Nous avons trouvé trois graphies pour dopplereffect.  
doppler-effect (V.K. p. 288, 309)  
Doppler-effect (V.L. p. I06, I38) (O.H. p. II4, II6)  
dopplereffect (V.L. p. I93)

Nous avons préféré écrire dopplereffect (avec miniscule et en un mot), selon les prescriptions du C.T.T. (voir page XXI)

(31) électronvolt (n.m.) → elektronvolt

G.R., S.T.W. et T.B. écrivent électron-volt. En néerlandais, S.T.W. emploie aussi le trait d'union, tandis que V.D. et T.B. l'écrivent en un mot.

(32) Ces électrons sont soit éjectés par un moyen détourné à partir du vent solaire ou bien sont accélérés au sein de la magnétosphère par la création d'un champ électrique résultant d'une perturbation provoquée par une variation dans le vent solaire.

— Die elektronen worden door de zonnwind uitgestoten en dringen op indirecte wijze de magnetosfeer binnen ofwel worden ze hierin versneld door een elektrisch veld dat voort-

spruit uit een storing, veroorzaakt door een verandering in de zonnwind. (E. Aerts)

- (33) diffusant la lumière → die het licht diffunderen (E. Aerts)  
 V.D. ne donne cependant pas d'exemple de cet emploi transitif:  
 "diffunderen : zich vermengen, in elkaar doordringen: vloeistoffen diffunderen door een dierlijk vlies heen." (V.D.)
- (34) des processus de photodissociation → fotodissociatieverschijnselen (E. Aerts)
- (35) soumise au champ de radiation solaire → die aan het zonnelicht blootgesteld is (E. Aerts)
- (36) métaux (n.m.) alcalins et alcalinoterreux → alkali- en aardalkalimetalen  
 G.R. (voir sous alcalin), S.T.W. et T.B. écrivent alcalinoterreux. (*avec trait d'union*)
- (37) agrégats (n.m.) de particules → deeltjesagglomeraties (E. Aerts)
- (38) la méthode des échos → de methode van echopeiling  
 "Methoden van Onderzoek der Ionosfeer.  
 Hier zullen alleen de omvangrijke en bijna ononderbroken inlichtingen over de elektrische toestand van de ionosfeer worden behandeld, die door middel van elektrische echopeiling worden verkregen. Deze methode maakt gebruik van het feit dat elektrische golven van een bepaalde frequentie aan de ionosfeer gereflecteerd (weerkatst) worden."  
 (V.L. p. 123)
- (39) Megacycli per seconde = M Hz (E. Aerts)
- (40) onde (n.f.) du sol → rechtstreekse golf (M. Scherer)  
 onde (n.f.) du ciel → ethergolf (E. Aerts)
- (41) état (n.m.) d'ionisation → geïoniseerde toestand (E. Aerts)

(42) la région E sporadique → de sporadische E-laag

"Tenslotte moet nog de reeds eerder genoemde abnormale Es-laag worden genoemd, als afwijking van de normale ionosfeer. De Es-laag of sporadische E-laag kan als een dunne laag met een wolkachtige structuur ter hoogte van de normale E - laag verschijnen." (V.K. p. 324)

(43) Types (n.m.) de variation → gedaanteverandering (E. Aerts)

(44) la marche → de evolutie ou de verplaatsing (E. Aerts)

(45) Une plage du Soleil → Een fakkelveld op de zon (E. Aerts)

(46) courbe (n.f.) adoucie → gegladde kromme (E. Aerts)

(47) de phénomènes habituels van gewone alledaagse ver-  
comme les atmosphériques → schijnselen zoals atmosferie-  
(n.f.pl.) ten (E. Aerts)

parasites (n.m.pl.) → storingen (E. Aerts et  
G. Bodifée)

G.R. (sous "atmosphérique") ne parle du mot atmosphérique qu'en tant adjectif. Sous "parasite", on trouve que atmosphérique peut être substantivé.

"Bruits parasites, et substant. Parasites, Perturbations apportées dans la réception des signaux radio-électriques par les variations de l'état électrique de l'atmosphère (parasites atmosphériques, ou substant. atmosphériques) ou la présence d'appareils électriques (parasites industriels). Crépitement des parasites. Parasites qui empêchent d'écouter une émission. Antenne, cadre antiparasite" (G.R.)

"atmosphériques (n.f.pl.) : luchtstoringen" (T.B.)

"parasites (n.m.pl.) : storingen" (T.B.)

"parasite : storing, parasiet  
parasite atmosphérique : luchtstoring" (S.T.W.)

Monsieur E. Aerts a proposé les traductions atmosferieten et storingen pour des raisons stylistiques.

- (48) l'évanouissement (n.m.) d'une onde → het verdwijnen van een golf (E. Aerts)
- (49) éruption (n.f.) solaire → zonnevlam (E. Aerts)
- (50) Types de réception d'une station → Ontvangstpatronen van een zender (E. Aerts)
- (51) emu = electrostatic magnetic units (M. Scherer)
- (52) audition (n.f.) → hoorbaarheid (E. Aerts)
- (53) T.M.G. = temps moyen de Greenwich (G.R. sous "temps", cit. 46)  
 temps : (voir aussi "heure") : tijd, weder, duur (S.T.W.)  
 heure moyenne de Greenwich : gemiddelde Geenwich-tijd,  
 middelbare Greenwich-tijd (S.T.W.)
- Nous avons choisi l'abréviation M.G.T. (middelbare Greenwich-tijd) parce que V.D. mentionne middelbare tijd:
- "middelbaar, bn. bw. 2. gemiddeld: middelbare afstand; middelbare rivierstand; middelbare tijd, tijd geregeld naar de gemiddelde duur der zonedagen"(V.D.)
- (54) l'exosphère (n.f.) ionique → iono-exosfeer
- Le mot ionenexosfeer est aussi couramment employé par les spécialistes. En anglais, on peut aussi bien dire iono-exosphere que ionexosphere (M. Scherer)
- (55) la position de nuit → de nachtzijde  
 la position de jour → de dagzijde (E. Aerts et G. Bodifée)
- (56) est doublé par celui de régulateur → gaat gepaard met die van regulator (E. Aerts)
- (57) Veuillez lire dans le texte français:  $N_2 + O_2$  au lieu de  $N_2 + O$   
 (E. Aerts)
- (58) attaquée → aangetast (E. Aerts)



- (59) les plages brillantes visualisées par les taches solaires → de schitterende fakkelvelden, gekenmerkt door zonnevlekken (E. Aerts)
- (60) Flux (n.m.) à 10,7 cm → Flux van 10,7 cm afkomstig (E. Aerts)
- (61) désintégration → afbraak (E. Aerts)
- "désintégration (n.f.) : het (doen) uiteenvallen (splitsen; splijten; breken; uiteenscheuren); het splijten, splijting; het afbreken, afbraak." (T.B.)
- "désintégration (n.f.) : desintegratie, uiteenvallen, afbreking, breking, sloping." (S.T.W.)
- (62) une équivalence à → een getal gelijk aan (E. Aerts)
- (63) le sommet de l'atmosphère → de rand van de atmosfeer (E. Aerts)
- (64) l'indice (n.f.) géomagnétique → geomagnetisch kengetal (E. Aerts)
- (65) et constitue donc un élément certain de constitution de la région E → en is dus een factor die zeker een rol speelt in de vorming van de E-laag (E. Aerts)
- Le mot "factor" est ici employé pour éviter toute confusion avec "element" que nous avons employé pour indiquer l'oxygène, l'azote, helium, hydrogène etc.
- (66) pouvoir de pénétration → doordringingsvermogen (E. Aerts)
- "pouvoir (n.m.) de pénétration : doordringend vermogen, doordringingsvermogen" (T.B.)
- "pouvoir de pénétration : doordringingsvermogen, indringingsvermogen" (S.T.W.)
- (67) dans la queue de la magnétosphère → ver tot in de staart van de magnetosfeer (E. Aerts)
- (68) des électrons (n.m.) fortement énergétiques → energierijke elektronen (E. Aerts)

(69) transfert (n.m.) de charge → ladingsoverdracht (E. Aerts)

(70) une distribution maxwellienne → een maxwellverdeling

par analogie avec

"diable (n.m.) de Maxwell : maxwellduiveltje" (Els. n° 1972)

"équations (n.f.pl.) de Maxwell : maxwellvergelijkingen"  
(Els. n° 1973)

"relations (n.f.pl.) de Maxwell : maxwellrelaties, verhoudin-  
gen van Maxwell" (Els. n° 1974)

"fluide (n.m.) maxwellien : maxwellvloeistof" (Els. n° 1975)

La graphie de maxwellverdeling correspond ainsi aux prescrip-  
tions du C.T.T. (voir aussi dopplereffect, notes critiques n° 30)

(71) composantes → componenten

Nous avons employé componenten pour ne pas confondre avec  
bestanddeel, le mot que nous avons utilisé pour les éléments  
chimiques qui se trouvent dans l'air.

Note : G.R. ne donne pas de genre pour cet emploi substantivé  
de composant, -ante.

(72) la section efficace → de werkzame doorsnede (M. Scherer)

(73) la densité  $\rho$  d'un élément déterminé) de genormeerde dicht-  
normalisée à l'unité ) → heid  $\rho$  van een welbe-  
paald element (M. Scherer)

(74) l'ionosphère neutre → de neutrale atmosfeer

Il faut lire atmosphère neutre au lieu de ionosphère neutre  
(E. Aerts)

(75) la libération d'un ion → de ontsnapping van een ion

Libération et échappement sont synonymes. En néerlandais, on  
parle plutôt de ontsnapping que de vrijmaking. (M. Scherer)

Par analogie:

la vitesse de libération → de ontsnappingsnelheid

(76) Dans l'exemple de cette figure, les ordonnées sont fixées par la fréquence maximum relative  $1$  à la valeur  $1/10$  de l'énergie relative  $1$ ; les composantes hyperboliques apparaissent à la valeur  $1/2$  de l'énergie relative  $1$ .

→ In het voorbeeld geïllustreerd in deze figuur worden de ordinaten bepaald door de relatieve maximum frequentie  $1$  bereikt voor de waarde  $1/10$  van de relatieve energie  $1$ ; de hyperbolische componenten treden op vanaf de waarde  $1/2$  van de relatieve energie  $1$ . (M. Scherer)

## B I B L I O G R A F I E

## A) Dictionnaires

BOERENBACH Dr. B.M. & CAUBERGHE J.R.S., Standard Nieuw Nederlands-Frans, Frans-Nederlands Woordenboek. 7e geheel herziene druk. Antwerpen/Utrecht, Standard, 1969.

BLOCH O., Dictionnaire Etymologique de la Langue Française. Cinquième édition revue et augmentée par Walther Von Wartburg. Paris, Presses Universitaires de France, 1968.

CENTRALE TAALCOMMISSIE VOOR DE TECHNIEK, Technische Woorden. 's Gravenhage, 1958.

CLASON W.E., Dictionary of General Physics in six languages. Amsterdam/New York, Elsevier Publishing Company, 1969.

GILBERT G., Dictionnaire des Mots Nouveaux. Paris, Hachette-Tchou, 1971.

HERCKENRATH C.R.C. & DORY A., Frans Woordenboek, Frans-Nederlands. 15e druk herzien door Drs. Verrijn Stuart-Alma. Groningen, Wolters-Noordhoff N.V., 1972.

HERCKENRATH C.R.C. & DORY A., Frans Woordenboek, Nederlands-Frans. 12e druk bewerkt door Dr. H.R. Boulan. Groningen, Wolters-Noordhoff N.V., 1972.

KRUYSKAMP Dr. C., van Dale Groot Woordenboek der Nederlandse Taal met een uitvoerig supplement. Negende druk. 's Gravenhage, Martinus Nijhoff, 1970.

OBBERG Ir. E.L., Ten Bosch' Frans-Nederlands Technisch Woordenboek. Vierde Druk. Deventer, Kluwer, 1966.

WELY Dr. F.P. H. Prick Van, Frans Handwoordenboek, 1e deel, Frans-Nederlands. Vierde geheel herziene druk bewerkt door Prof. Dr. L. Kukenheim Ezn. Den Haag, Van Goor Zonen, 1963.

WELY Dr. F.P.H. Prick Van, Frans Handwoordenboek, 2e deel Nederlands-Frans. Vierde geheel herziene druk bewerkt door Prof. Dr. L. Kukenheim Ezn. Den Haag, Van Goor Zonen, 1964.

ROBERT P., Dictionnaire Alphabétique et Analogique de la Langue Française. Les mots et les associations d'idées. Paris, Société du Nouveau Littré, 1972.

VISSER Dr. H.A., Lexicon voor Fysische Geografie. Utrecht/Antwerpen, Het Spectrum N.V., 1972 (Aula nr. 477).

VOUTQUENNE C. & SLIGTE V.D.I. Ir. J.G., Standaard Technisch Woordenboek Frans-Nederlands. Antwerpen/Utrecht, Standaard, 1968.

VOUTQUENNE C. & SLIGTE V.D.E. Ir. J.G., Standaard Technisch Woordenboek Nederlands-Frans. Antwerpen/Utrecht, Standaard, 1972.

## B) Encyclopédies

Bordas Encyclopédie. 23 volumes. Paris, Bordas, 1968-.

Encyclopaedia Britannica. 23 volumes + index. London - Chicago - Geneva - Sydney - Toronto, William Benton, 1964.

Encyclopaedia Britannica. London - Chicago - Geneva - Sydney - Toronto, William Benton, 1971.

Encyclopédie Internationale des Sciences et des Techniques. 10 volumes plus un index. s.l., Groupe des Presses de la Cité, 1969-1973.

Grand Larousse Encyclopédique en dix volumes. Paris, Larousse, 1960-1964.

Grote Nederlandse Larousse Encyclopedie in vijftwintig delen. Hasselt, HeideLand-Orbis N.V., 1971-.

Grote Winkler Prins. Encyclopedie in twintig delen. Amsterdam/Utrecht, Elsevier, 1966-.

La Grande Encyclopédie. Paris, Larousse, 1971-.

Standaard Encyclopedie. Panorama der wereld in kleur. Antwerpen/Utrecht, Het Spectrum N.V., 1970-.

## C) Ouvrages sur le sujet

AERTS E., De Magnetosfeer der Aarde. Brussel, Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie, 1966 (Aëronomica Acta A nr. 44).

AERTS E., Roentgenstraling in de Poolstreken. Hemel en Dampkring, 69e jg. nr. 3, 1971, p. 49-60.

AERTS E., Tien Jaar Ruimtevaart en -verkenning. Brussel, Belgisch Instituut voor Ruimte Aëronomie, 1967. (Aëronomica Acta F nr. 10).

BARTELS Prof. Dr. J., Geofysica. Uit het Duits vertaald door P.I.F. van Leeuwen. Antwerpen/Utrecht, Standaard, 1968.

DEMPSEY K. & Pick J., Het Oneindige Heelal. Grondslagen der astronomie. Uit het Engels vertaald. Rotterdam, De Nationale Uitgeverij, S.D.

HUXLEY sir Julian (ed.), Inforama. Deel I7 : warmte, licht en geluid. Uit het Engels vertaald door ir. K.J. Hondius. Utrecht/Antwerpen, Het Spectrum N.V., 1973.

KOOL A. de, Ionosfeeronderzoek met sondeerraketten. Natuur en Techniek, 37e jg. nr. 9, 1969, p. 328-334.

NICOLET M., l'Aéronomie. Bruxelles, Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique, 1969 (Aeronomica Acta A n° 67).

NICOLET M., De l'aéronomie d'hier à l'expérience spatiale de demain. Extrait de "Ciel et Terre", vol. 87, n° 1, 1971.

NICOLET M., Portrait de Sydney Chapman. ICSU Review, 3, 1961, p. 45-48.

VELDKAMP Prof. Dr. J., Geofysica. Utrecht/Antwerpen, Het Spectrum N.V., 1965 (Aula nr. 219).