

G **ROUPE DE**
R **ECHERCHES**
I **IONOSPHERIQUES**

GRI/NTP/59

QUELQUES RESULTATS EXPERIMENTAUX
DE L'IONOSPHERE EQUATORIALE AFRICAINE
EN CONTRE-HAUT

par

A. LAPOUILLE

Le GROUPE de RECHERCHES IONOSPHERIQUES a été formé avec la participation : du CENTRE NATIONAL D'ETUDES DES TELECOMMUNICATIONS, du CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE et de L'INSTITUT de PHYSIQUE du GLOBE.

CENTRE NATIONAL D'ETUDES DES TELECOMMUNICATIONS
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE

GROUPE DE RECHERCHES IONOSPHERIQUES
NOTE TECHNIQUE GRI/NTP/59

QUELQUES RESULTATS EXPERIMENTAUX
DE L'IONOSPHERE EQUATORIALE AFRICAINE
EN CONTRE-HAUT

par

A. LAPOUILLE

Vu : Le Chef du Groupe de
Recherches Ionosphériques

Issy-les-Moulineaux, le
12 janvier 1970

J. HIEBLLOT

I - INTRODUCTION

L'ionosphère équatoriale a été le sujet de nombreuses études depuis une vingtaine d'années. Elle présente en effet dans sa partie supérieure (région F) une distribution électronique caractéristique que l'on a reconnue très vite en relation avec la principale cause de l'anisotropie du plasma ionosphérique, la présence du champ magnétique terrestre.

Ces études ont été menées jusqu'en 1962 uniquement au moyen de sondages ionosphériques à partir du sol qui permettent de connaître la distribution des particules électrisées jusqu'à l'altitude du maximum d'ionisation ("pic de la région F2") vers 300 km. Cette distribution est déduite des ionogrammes (J.O. THOMAS, 1959) en utilisant la théorie de la propagation des ondes radio dans un milieu magnétoionique (théorie d'APPLETON-HARTREE). Mais le maximum d'ionisation NmF2 de la région F2 joue un rôle d'écran pour l'ionosphère supérieure qui nous restait alors inconnue.

A partir de 1962 un sondeur radio-électrique placé à bord du satellite canadien "Alouette I" permet d'étudier la partie de l'ionosphère située entre l'altitude du satellite et l'altitude du pic de F2, grâce à des sondages par le haut (NELMS, 1964 ; KING et al. 1964). Ainsi en utilisant simultanément des sondages par le bas et par le haut, on a la possibilité de "Voir" l'ionosphère dans son ensemble, les deux méthodes étant complémentaires l'une de l'autre.

Mais alors que le sondeur fixé au sol permet une observation de l'ionosphère inférieure en un lieu déterminé en fonction du temps (par sondage continu), fournissant des "profils" de la densité électronique jusqu'au pic de F2 toutes les 20 secondes environ, le sondeur embarqué à bord d'un satellite, donc mobile, permet une observation de l'ionosphère supérieure dans l'espace et le temps, fournissant une "coupe" presque instantanée d'une partie de l'ionosphère en fonction de l'altitude et d'une abscisse (la latitude,
.../...

par exemple, si la trajectoire du satellite est polaire). Cette vue dans l'espace avec une seule ionosonde permet donc des études plus poussées de l'ionosphère supérieure, alors que pour obtenir le même résultat pour l'ionosphère inférieure, il est nécessaire de posséder une "chaîne" de sondes placés à intervalles réguliers, ou de faire des sondages à partir d'un avion en vol.

Un tel progrès technique a augmenté très vite la connaissance de la morphologie de l'ionosphère dans son ensemble dont on observe le comportement en fonction de la latitude, de la longitude (ou du temps) et de l'altitude, permettant une généralisation de l'étude commencée avec les sondages au sol. Cette observation a permis, en particulier, de préciser la structure et le comportement de l'"anomalie équatoriale" mise en évidence pour la première fois par MAEDA et APPLETON il y a vingt cinq ans, et au sujet de laquelle il existe aujourd'hui une abondante littérature contenant de nombreux résultats. Cependant les descriptions détaillées et précises sont encore très limitées dans le temps et l'espace, et ne sont pas raccordées entre elles.

Notre étude a pour but de présenter quelques résultats à partir d'ionogrammes en contre-haut reçus à la station de OUAGADOUGOU, dans le secteur africain.

II - MOYENS ET PRINCIPES EXPERIMENTAUX

Le satellite Alouette I, qui a fourni l'ensemble des résultats expérimentaux nécessaires à cette étude, tourne sur une orbite à peu près circulaire située à une altitude d'environ 1000 km ; le plan de l'orbite, qui tourne de 2 degrés par jour par rapport à la ligne Soleil-Terre, est incliné de 80 degrés sur le plan de l'équateur terrestre ; sa durée de révolution est de 105 minutes.

.../...

L'ionosonde, télécommandée à partir de stations réparties sur le globe terrestre, agit par émission d'un signal radio-électrique dont la fréquence varie de 0,4 Mhz à 12 Mhz en 12 secondes pendant lesquelles le satellite parcourt environ 80 km ; cet intervalle de temps correspond donc à un ionogramme. On supposera le sondage effectué en un point correspondant à la position du satellite au milieu de l'intervalle de 12 secondes ; de ce fait on admet que la variation horizontale de l'ionisation sur la distance de 80 km est négligeable. Les sondages sont répétés toutes les 18 secondes, c'est-à-dire à intervalles d'environ 120 km le long de l'orbite, ce qui donne un pouvoir de résolution fin.

Les traces visibles sur les ionogrammes (fig. 1) ne sont pas directement interprétables en profils de densité électronique. En effet, elles représentent suivant l'axe vertical l'altitude "virtuelle" de réflexion d'une fréquence variable suivant l'axe horizontal. Par altitude "virtuelle" on entend l'altitude de réflexion pour une onde qui se propage à la vitesse de la lumière. Or l'onde se propage à une vitesse qui dépend de la densité électronique et du champ magnétique ; il faut donc effectuer un calcul assez complexe pour passer d'une trace virtuelle à un profil de densité électronique (FELDSTEIN et VASSEUR ; DOUPNIK et SCHMERLING). La précision de la mesure de densité électronique est de l'ordre de quelques pour cent ; il est difficile de chiffrer l'erreur commise sur l'altitude du profil (J.E. JACKSON), mais lorsque la trace est normale (pas de propagation oblique) cette erreur varie entre ± 15 et ± 30 Km.

La station de OUAGADOUGOU, située à environ 12° N géographique, soit 3° N magnétique, peut télécommander la mise en marche du sondeur dès que le satellite, sortant de l'horizon, atteint un site de 15° . Lorsque le satellite passe par le zénith de la station, l'intervalle de latitude balayé s'étend de 5° S à 25° N environ.

.../...

On obtient donc des coupes sur une trentaine de degrés en latitude. Au cours d'un passage du satellite, à cause de sa trajectoire à peu près polaire, on considère que la longitude est constante et qu'on obtient une coupe méridienne ; en réalité la longitude varie de 5° au cours d'un balayage en latitude de 30° dans la région équatoriale.

Les sondages nous donnant la densité électronique en fonction de l'altitude et de la latitude à un instant déterminé, donc en fonction de deux variables, nous présentons les résultats sous les deux formes graphiques possibles :

- a) la variation de la densité en fonction de la latitude pour différentes altitudes fixes, avec indication de la densité maxima NmF2 à chaque latitude ;
- b) la variation de l'altitude des courbes de densité fixe (iso-ioniques) en fonction de la latitude, avec indication de l'altitude de la densité maxima hmF2 à chaque latitude.

Les deux genres de graphiques sont représentés avec en abscisse la latitude géographique et en ordonnée soit la densité ionique (exprimée en 10^4 cm^3) de différentes altitudes fixes dont la valeur est indiquée sur chaque courbe (cas a), soit l'altitude des courbes de même densité ionique (exprimée en $10^5/\text{cm}^3$) dont la valeur est également indiquée sur chaque courbe (cas b). Sur chaque graphique est tracé en pointillé soit la densité maxima NmF2 (cas a), soit la hauteur de cette densité maxima hmF2 (cas b), en fonction de la latitude ; nous y traçons aussi, en traits interrompus, une ou plusieurs lignes de forces du champ magnétique terrestre. Enfin nous donnons (fig. 34) un tableau des indices magnétiques trihoraires Kp des mois de Juin-Juillet 1966 et Novembre-Décembre 1967, périodes sur lesquelles porte principalement notre étude.

.../...

La comparaison entre nos coupes de l'ionosphère supérieure et celles de l'ionosphère inférieure, faites à la même époque (Juin-Juillet 1966) à partir d'une "chaîne" africaine d'ionosondes au sol, montre que les résultats expérimentaux ne concordent pas toujours : bien souvent les ionogrammes obtenus à partir de sondages par le haut et ceux obtenus à partir de sondages par le bas, ne donnent pas la même altitude du maximum de densité hmF2 et la même valeur de cette densité maxima NmF2. L'altitude de hmF2 donnée par le haut est inférieure à celle donnée par le bas. Cela est dû à une propagation oblique du signal radio-électrique le long des lignes de forces du champ magnétique terrestre ou le long d'irrégularités ionosphériques, cas sans doute fréquent près du maximum de densité ; cette propagation oblique augmente le parcours du signal et par suite le temps de réflexion ; comme l'altitude de hmF2 est déduite du temps aller et retour du signal supposé se propager verticalement, l'augmentation de ce temps entraîne une augmentation de la distance du maximum de densité, et on trouve des différences allant jusqu'à 30 ou 40 km dans l'altitude de hmF2, soit une erreur de l'ordre de 10 pour cent. Parfois les sondages par le haut ne peuvent donner hmF2 ou NmF2. Ce cas, fréquent, est dû à une absorption par l'ionosphère du signal radio-électrique vers les plus grandes fréquences (manque de puissance de l'émetteur). Les ionogrammes de Novembre-Décembre 1967 (période durant laquelle l'ionisation est très grande) présentent un troisième type de défaut : la fréquence de plasma vers NmF2 est supérieure à la fréquence maxima 12 Mhz du signal de sondage ; on ne peut donc pas atteindre NmF2 et hmF2.

.../...

III - STRUCTURE ET COMPORTEMENT DE L'IONOSPHERE EQUATORIALE

On sait depuis un plus de vingt ans que l'ionosphère équatoriale de jour présente généralement un minimum de densité électronique ("gouttière") au-dessus de l'équateur magnétique, entouré de deux maxima de densité ("crêtes") situés symétriquement l'un de l'autre à une latitude, variable avec le moment de la journée, qui atteint 10° à 15° de part et d'autre de l'équateur magnétique au moment où l'anomalie est la plus développée ; en même temps que cette répartition en latitude de la densité, on observe une augmentation de l'altitude du maximum d'ionisation hmF2 centrée sur l'équateur magnétique, la valeur de hmF2 étant d'environ 200 km supérieure à ce qu'elle est aux moyennes latitudes (figures 2 et 3, 4 et 5).

Cette structure est observée de jour ; le comportement durant les heures de nuit est beaucoup moins bien connu, les rares observations de nuit étant difficilement interprétables à cause de nombreux échos de diffusion sur des irrégularités de la densité (CALVERT et SCHMID). Durant la période de maximum d'activité solaire, la structure générale de jour persiste la nuit, mais son évolution précise est mal connue. La structure caractéristique de jour est remplacée, durant les premières heures du matin et les dernières heures de la soirée, soit par un maximum unique situé sur l'équateur magnétique, soit par deux crêtes presque confondues sur l'équateur magnétique (fig. 6 et 7, 8 et 9). Ces observations de la structure de l'ionosphère équatoriale supérieure confirment celles qui ont été faites à partir du sol depuis MAEDA et APPLETON, durant les années 1942 à 1946, et poursuivies depuis.

.../...

Le fait le plus frappant de cette structure est évidemment le contrôle par le champ magnétique terrestre : la distribution électronique est symétrique en latitude par rapport à l'équateur magnétique (et non par rapport à l'équateur géographique, comme pourrait le faire penser une théorie ionosphérique simplifiée), ce qui lui vaut aussi le nom d'"anomalie géomagnétique équatoriale". Ce contrôle géomagnétique, différent de celui qui s'exerce aux moyennes latitudes, où l'ionosphère est stratifiée presque horizontalement, est du à la faible inclinaison des lignes de forces du champ magnétique dans la région équatoriale.

Les crêtes de maximum de densité à chaque altitude sont alignées le long d'une ligne de champ magnétique, suggérant un transport de l'ionisation le long de cette ligne ou arche qui sépare l'espace en deux parties distinctes : à l'intérieur de l'arche, c'est-à-dire aux altitudes les plus basses, la densité électronique à altitude constante diminue vers l'équateur magnétique, tandis qu'à l'extérieur de cette ligne caractéristique, aux altitudes les plus grandes, la densité électronique augmente pour former au-dessus de l'équateur un dôme qui s'atténue de plus en plus avec l'altitude et finit par disparaître vers 1000 à 1500 km, où l'ionosphère tend vers la disparition de l'anomalie.

Des coupes de l'ionosphère équatoriale, faites à différentes époques du jour, de l'année ou du cycle solaire, montrent une variation de l'anomalie en amplitude (amplitude dans l'espace et densité électronique) en fonction du temps : il y a des variations régulières (variation diurne, annuelle, undécennale) et des variations irrégulières liées à l'agitation du champ magnétique terrestre.

.../...

Aux premières heures de la journée, à partir de 6 heures TL, les sondages par le haut semblent montrer un renforcement de l'ionisation au-dessus de l'équateur magnétique jusqu'aux environs de 9 heures TL (fig. 6 et 7, 8 et 9), bien qu'une étude détaillée de la variation diurne de l'ionosphère équatoriale africaine par des sondages par le bas n'ait jamais montré ce renforcement central (VILA : étude de la variation diurne durant 60 jours en 1965-1966) ; en période de maximum d'activité solaire ce maximum pourrait naître très tôt ou être le prolongement d'un renforcement de l'ionisation existant même pendant la nuit au-dessus de l'équateur magnétique (fig. 10 et 11, 12 et 13).

Ce renforcement de l'ionisation se poursuit en s'amplifiant entre 9 heures et 10 heures TL (fig. 14 et 15, 16 et 17, 18 et 19, 20 et 21, 22 et 23) pour donner naissance à l'anomalie propre aux heures de jour : le maximum observé durant les premières heures du jour tend à laisser la place à deux maxima distincts. La dissymétrie dans l'ionisation des deux crêtes, caractéristique de la période solstice (paragraphe V), apparaît déjà durant cette phase de formation : le maximum unique des heures matinales se trouve bien souvent décalé par rapport à l'équateur magnétique, préfigurant la plus ionisée des deux crêtes. Les deux maxima de densité s'éloignent alors progressivement de l'équateur magnétique en même temps que l'ionisation globale augmente avec la diminution de l'angle zénithal solaire ; les maxima de densité de chaque altitude tendent à s'aligner à tout moment en une arche sur une même ligne de champ magnétique, cette ligne changeant à chaque instant au fur et à mesure du développement de l'anomalie en amplitude (en altitude et en latitude) et en densité.

.../...

Le développement de l'anomalie, rapide entre 9 heures et 12 heures (fig. 24 et 25) durant lesquelles la hauteur du maximum absolu d'ionisation passe d'environ 250 km à plus de 400 km, tandis que la densité de ce maximum double (passant de 75 à $150 \cdot 10^4 / \text{cm}^3$), atteint son maximum d'amplitude dans l'après-midi, vers 16 heures TL sur le secteur africain. A ce moment les crêtes de maximum de densité se trouvent à environ 15° de part et d'autre de l'équateur magnétique, et l'arche de maximum d'ionisation est centrée sur la ligne d'apex 700 km environ (fig. 2 et 3, 4 et 5) pour la moyenne des jours considérés ; néanmoins elle peut atteindre la ligne d'apex 1000 km. D'après les sondages effectués en Amérique et en Asie, il semble qu'il y ait une différence dans le comportement de l'ionosphère équatoriale et la formation de l'anomalie selon la longitude à heure locale identique (cet effet pourrait être dû à la déclinaison du champ magnétique qui varie avec la longitude) : d'après ECCLES et KING, le maximum de développement, atteint vers 15 heures TL en Asie (comme en Afrique à peu près), atteindrait 20 heures TL pour se manifester en Amérique (résultats de la fin 1962 et du début de 1963).

Après avoir atteint son développement maximum (qui peut durer plusieurs heures, jusque 22 heures en période de plus forte activité solaire), l'anomalie décroît en amplitude : les maxima d'ionisation se rapprochent de l'équateur magnétique (donc l'arche des maxima d'ionisation diminue en altitude et en latitude) en même temps que la densité ionique diminue ; mais cette phase n'a pas été entièrement établie ni par les sondages par le haut, ni par les sondages du sol.

.../...

Le contrôle du rayonnement électromagnétique solaire, ionisant des constituants de l'atmosphère, se fait sentir non seulement par la variation diurne, mais encore par une variation annuelle, selon les saisons. Le maximum d'ionisation globale et de développement de l'anomalie semble se produire au moment où le point subsolaire se trouve aux environs de l'équateur magnétique.

Nos dépouillements de l'été 1966 et de l'hiver 1967-68, présentent à la même heure, 11 heures TL, un développement plus fort de l'anomalie équatoriale durant la période de l'hiver 1967-68. Cet effet doit être dû à l'activité solaire qui augmentait à cette époque et qui est le troisième facteur influençant la production ionique, donc la structure et la densité ionosphérique.

Ces trois types de variations montrent que la structure caractéristique de l'ionosphère équatoriale de jour est d'autant plus prononcée que l'ionisation, c'est-à-dire l'alimentation en particules électrisées des courants propres à l'ionosphère équatoriale, est plus grande ; cependant cette structure n'est pas en liaison directe avec la production ionique, car c'est le soir, alors qu'il y a diminution de l'ionisation globale, que les crêtes de plus grande amplitude apparaissent.

IV - THEORIE DE L'ANOMALIE IONOSPHERIQUE EQUATORIALE

Les deux principaux facteurs responsables de l'anomalie ionosphérique équatoriale sont le rayonnement solaire ionisant et le champ magnétique terrestre.

.../...

Ces deux facteurs agissent d'une manière différente de celle dont ils agissent aux moyennes latitudes à cause de la position particulière de la région équatoriale :

- a) par rapport au soleil, l'angle zénithal solaire est plus faible qu'aux plus hautes latitudes ;
- b) par rapport au champ magnétique, dont les lignes de forces sont horizontales ou faiblement inclinées dans cette région.

La densité électronique de la région équatoriale est due à la photo-ionisation de l'oxygène atomique, élément prépondérant au-dessus du maximum de la couche F2, par le rayonnement électromagnétique de longueurs d'onde inférieures à 910 Å . Cette production est équilibrée par le processus de destruction de l'ionisation consistant en la recombinaison des ions O⁺ avec les électrons libres. La photo-ionisation domine le matin tandis que la recombinaison domine le soir et la nuit. La variation électronique ou ionique en fonction du temps s'écrirait : $\frac{dN}{dt} = q - L$, où q et L sont respectivement le taux de production par photo-ionisation et la perte par recombinaison, si le champ magnétique terrestre n'agissait par des termes supplémentaires de transport des particules chargées, qui conduisent à la structure caractéristique de l'ionosphère équatoriale.

Dès 1946, MITRA propose de tenir compte du transport horizontal des électrons de l'équateur magnétique vers les régions de plus haute latitude par une diffusion le long des lignes de champ magnétique, horizontales à cet endroit. Les électrons vont ainsi s'accumuler au voisinage des maxima observés. Les électrons qui atteignent une altitude plus basse en même temps qu'une latitude plus élevée, toujours le long des lignes de forces magnétiques, ont davantage de chance de se recombiner.

.../...

Mais la résolution de l'équation de continuité (à l'équilibre) $q - I - \text{div} (N\vec{v}) = 0$, où N est la densité électronique et \vec{v} la vitesse des électrons le long des lignes de forces, montre que le taux de production électronique est trop faible à l'altitude de la région F2, à cause de la faible densité d'éléments ionisables, pour satisfaire les ordres de grandeur de la densité observée sur les crêtes. MARTYN (1955) puis DUNCAN (1960) proposent un second mouvement de l'ionisation dû à la présence d'un champ électrostatique horizontal Ouest-Est dans la région F et issu de la région E (SPREITER et BRIGGS) où il est produit par l'"effet dynamo". Ce champ électrostatique provoque une montée électrodynamique de l'ionisation de la basse ionosphère vers la région F2 au travers des lignes de champ magnétique avec une vitesse $\vec{v} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{|\vec{B}|^2}$ (vitesse de dérive de HALL), où \vec{E} et \vec{B} sont respectivement les champs électrique et magnétique. On a alors un "effet de fontaine" qui consiste en une ascension de l'ionisation aux basses latitudes, puis à son transport aux plus hautes latitudes le long des lignes de champ magnétique. BRAMLEY et PEART (1964) montrent numériquement qu'une dérive de quelques mètres par seconde suffit à satisfaire l'hypothèse de MARTYN.

La montée électrodynamique est nécessaire pour expliquer une structure de l'ionosphère en dôme telle que celle que nous observons le matin (un seul maximum centré sur l'équateur magnétique). L'altitude de ce maximum est d'environ 300 km, valeur inférieure à l'altitude du minimum qui prend sa place dans la journée : les électrons produits, peu nombreux le matin à cause du faible taux d'ionisation, diffusent le long des lignes de champ magnétique et descendent alors trop bas pour avoir une longue durée de vie, ce qui empêche la formation des accumulations visibles au milieu de la journée quand ils diffuseront à partir d'une altitude plus élevée.

.../...

La décroissance du soir peut être due soit à une baisse de l'alimentation du processus de fontaine (arrêt de la photo-ionisation), soit à un changement de sens des champs électriques, dirigés alors vers l'Ouest et provoquant une vitesse de dérive vers le bas ; ce processus de fontaine inverse comporterait une diffusion électronique et ionique le long des lignes de champ magnétique depuis les crêtes vers l'équateur magnétique, aboutissant à la formation d'un renforcement de l'ionisation au voisinage de l'équateur magnétique. On doit donc pouvoir attribuer les changements diurnes de la structure ionosphérique équatoriale à des variations de la vitesse de dérive calculée d'après la théorie dynamo.

Malheureusement les champs électriques de la région F sont très mal connus. On peut supposer cependant que le champ électrique provient de la région E et que son influence se fait sentir sur une étendue d'au moins 10° en latitude. Cela suggère aussi le rôle important de l'électrojet équatorial, par l'intermédiaire du champ électrique créé par lui, dans le comportement de l'ionosphère supérieure.

Quoi qu'il en soit, la formation et le maintien des crêtes vers les tropiques, ne peut avoir lieu que quand NmF_2 et hmF_2 à l'équateur magnétique sont suffisamment élevés (sous l'action de la photo-ionisation) pour que les électrons diffusés à partir de l'équateur et redescendant vers le bas le long des lignes de champ magnétique aient la chance de rencontrer une atmosphère peu dense, faute de quoi ils sont recombinaisonnés et il ne peut y avoir accumulation électronique donc existence de crêtes.

.../...

BRAMLEY et PEART (1964, 1965) montrent numériquement que les quatre processus : de production électronique par photo-ionisation, de perte par recombinaison, de diffusion le long des lignes de champ magnétique et de dérive électrodynamique vers le haut, sont suffisants pour expliquer les principales caractéristiques de la distribution électronique de jour aux périodes de l'année où l'on obtient une symétrie approximative par rapport à l'équateur magnétique.

Divers auteurs (BRAMLEY, PEART, YOUNG) ont étudié d'une façon théorique l'anomalie ionosphérique (développement et amplitude) en fonction d'une vitesse de dérive variable : ils trouvent qu'une vitesse de l'ordre de la dizaine de mètres par seconde donne des résultats en accord avec ceux observés.

V - DISSYMETRIE DES CRETES

Malgré la symétrie "qualitative" de l'ionosphère équatoriale de jour (un minimum d'ionisation entouré de deux maxima, le tout centré sur l'équateur magnétique), il apparaît le plus souvent une dissymétrie dans l'intensité d'ionisation des deux crêtes et dans leur altitude, surtout en période de solstice. On constate en effet que la crête située du côté de l'hémisphère d'hiver par rapport à l'équateur magnétique est la plus ionisée et la plus basse en altitude, d'après les coupes de l'été 1966 (maximum renforcé du côté Sud : fig. 26 et 27, 28 et 29) et de l'hiver 1967-68 (maximum renforcé du côté Nord : fig. 2 et 3, 4 et 5, 30 et 31).

.../...

La crête la plus dense est d'ailleurs bien souvent la seule qui subsiste par temps de forte agitation magnétique, descendant très bas en altitude (paragraphe VI) ; en outre elle est la première qui soit visible durant la phase de formation de l'anomalie, entre 9 et 10 heures (fig. 14 et 15, 16 et 17, 18 et 19, 20 et 21).

Cependant certains auteurs (KING, SMITH, ECCLES), qui ont étudié les secteurs américain et asiatique, trouvent l'effet inverse, la crête située du côté de l'hémisphère d'été présentant, d'après eux, un renforcement de l'ionisation. Ce fait peut être dû à de mauvaises conditions d'observation, les sondages d'Alouette I ne couvrant que rarement toute l'anomalie équatoriale à Singapour.

Ce renforcement de l'ionisation de la crête située du côté de l'hémisphère d'hiver que nous observons doit être rapproché de l'observation d'une "anomalie d'hiver" existant aux moyennes et hautes latitudes (sauf dans les régions polaires) où les densités électroniques sont systématiquement plus élevées durant les mois d'hiver que durant les mois d'été (NmF2 a été observé 4 fois plus grand en hiver qu'en été en Alaska) et d'une "anomalie de Décembre", période pendant laquelle on observe une augmentation de la densité ionique (peut-être due au fait que la distance Terre-Soleil est minima en Décembre tandis qu'elle est maxima en Juin, entraînant une différence d'intensité de rayonnement électromagnétique solaire de 7 pour cent).

Malgré ce renforcement de l'ionisation du côté hiver, la densité électronique à certaines altitudes constantes est plus grande du côté été que du côté hiver ; mais on observe en même temps le déplacement du minimum de NmF2 (et maximum de hmF2) du côté de l'hémisphère d'été, détruisant ainsi même la symétrie en latitude (fig. 26 et 27, 28 et 29, 30 et 31).

.../...

Ce phénomène de dissymétrie, généralisé en période de solstice (Juin-Juillet 1966 et Novembre-Décembre 1967), ne peut s'expliquer ni par une théorie de l'ionosphère soumise d'une façon simple au rayonnement solaire (à cause de la position de la crête la plus dense du côté de l'hémisphère d'hiver où la production ionique est la plus faible, et à cause de son altitude plus basse où la recombinaison ionique est la plus grande), ni par la structure du champ magnétique (parce qu'il présente, en Afrique, une assez bonne symétrie par rapport à l'équateur magnétique).

En période de solstice, le taux de production électronique par photo-ionisation est différent dans chacune des deux crêtes à cause de la déclinaison solaire qui atteint $23^{\circ}5$ (21 Juin, 21 Décembre) : les densités électroniques produites doivent donc être plus grandes du côté de l'hémisphère d'été, surtout aux plus basses altitudes (près du maximum de production ionique). VILA fait intervenir un effet de température : les photo-électrons produits dans l'hémisphère d'été ont une énergie suffisante (par le rayonnement solaire) pour diffuser le long des lignes de champ magnétique vers l'équateur magnétique (donc en sens inverse du mouvement créant les maxima de densité) puis vers la crête de l'hémisphère d'hiver où ils produisent un gradient de pression électronique décroissant vers le bas ; ainsi ils renforcent la diffusion des électrons issus de la dérive électrodynamique ; mais des calculs ou des expériences restent nécessaires pour évaluer l'énergie des photo-électrons ainsi produits.

Quant au fait que l'on trouve aux grandes altitudes des densités électroniques supérieures du côté été, on peut l'interpréter simplement comme du à la production plus grande sur l'hémisphère d'été.

.../...

BRAMLEY et YOUNG ont pris en considération l'effet de conditions atmosphériques différentes aux latitudes des deux crêtes, par exemple par la température du gaz neutre ; mais il semble que le chauffage possible de l'aire neutre ne puisse produire que des effets insignifiants.

On peut espérer rendre compte de l'asymétrie des crêtes par l'existence d'un vent neutre transéquatorial soufflant des régions chaudes vers les régions froides de la haute atmosphère et transportant l'ionisation (BRAMLEY, YOUNG, VILA). Ce vent neutre devrait alors ne pas être propre aux périodes de solstice, mais permanent, et détruire la symétrie même en période d'équinoxe (à cause du décalage entre les équateurs géographique et magnétique), excepté lorsque le point subsolaire se trouve sur l'équateur magnétique. Cette dissymétrie a été en effet observée en périodes d'équinoxe (Mars 1965) par VILA.

L'existence de ce vent neutre doit être due à des assymétries dans les conditions atmosphériques. Des études de ces conditions, obtenues par la déformation des orbites des satellites, indiquent une augmentation de la température et de la pression atmosphérique du côté éclairé de la Terre aux altitudes de la région F2. Ces hétérogénéités peuvent produire des vents de 100 m/sec. soufflant à partir du centre de hautes pressions (GEISLER, 1966 ; KOHL et KING, 1967). JACCHIA (1965) pense que ce centre est situé près du point subsolaire, c'est-à-dire dans l'hémisphère d'été. Ainsi pendant l'équinoxe de Mars 1965, le noyau de hautes pressions neutres est situé à peu près sur l'équateur géographique ; le vent, soufflant vers le Nord dans l'hémisphère Nord, transporte l'ionisation de la crête Sud vers la crête Nord (toutes deux situées dans l'hémisphère Nord) et provoque le renforcement observé de la crête Nord.

.../...

La symétrie générale doit s'observer seulement lorsque le point subsolaire se trouve sur l'équateur magnétique, durant les premiers jours de Mai (les jours précis variant suivant les années selon les conditions du chauffage dans toute la thermosphère).

D'après le modèle théorique de RISHBETH (1967), une distribution asymétrique, telle que celle de solstice, tendrait à revenir à une distribution symétrique par diffusion le long des lignes de champ magnétique avec une vitesse d'environ 40 m/sec. Il suffit donc d'un vent de même grandeur, soufflant en sens opposé, pour maintenir la structure asymétrique observée.

Le modèle théorique de BRAMLEY et YOUNG (1967), tenant compte d'un tel vent neutre, montre que si les maxima de chaque altitude sont encore alignés sur une ligne de champ magnétique dans chacun des hémisphères, cette ligne n'est pas la même des deux côtés ; mais ce vent peut produire la distribution électronique observée dans la région F (fig. 30 et 31, 32 et 33).

VI - AGITATION MAGNETIQUE

La forte interaction du plasma ionosphérique avec le champ magnétique terrestre est prouvée par les faits précédemment décrits : symétrie à peu près réalisée de la structure ionosphérique par rapport à l'équateur magnétique et alignement des maxima de chaque altitude sur une même ligne de force du champ magnétique. A cause de cette relation entre plasma et champ magnétique, on doit s'attendre à ce que l'édifice, aligné suivant le champ magnétique, soit troublé, voire détruit, en cas de perturbation du champ.

.../...

On observe effectivement une relation entre la régularité de la structure ionosphérique et les indices magnétiques Kp des heures et même des jours précédant le sondage (tableau des indices , fig. 34) : l'ionosphère peut en effet rester perturbée plusieurs jours après une agitation magnétique importante, comme si elle présentait une grande inertie ou était soumise à des forces de frottement ou de viscosité très grandes.

D'une façon générale une situation magnétique perturbée tend à rapprocher les crêtes de maximum d'ionisation vers l'équateur magnétique, paraissant ainsi augmenter l'ionisation au-dessus de l'équateur magnétique et la diminuer à la latitude habituelle des crêtes ; ces effets sont d'ailleurs beaucoup plus prononcés aux plus basses altitudes. Cette perturbation de la structure ionosphérique peut aller jusqu'à la disparition du minimum équatorial et le maintien d'une seule crête (fig. 35 et 36, 37 et 38, 39 et 40, 41 et 42). Cette crête unique n'est pas forcément centrée sur l'équateur magnétique "conventionnel" car il peut y avoir déplacement de l'équateur magnétique vrai par temps magnétiquement très agité ; elle peut aussi être la subsistance d'une seule des deux crêtes habituelles, soit la crête Sud (fig. 39 et 40, 41 et 42), soit la crête Nord (fig. 35 et 36, 37 et 38), tandis que l'autre crête disparaît pour alimenter le creux équatorial qui lui-même se déplace : tout se passe comme si l'agitation magnétique et le vent neutre conjuguèrent leurs effets pour augmenter la dissymétrie. En effet, par une étude détaillée, en période de minimum d'activité solaire, VILA montre que l'effet du vent neutre est plus intense par temps magnétiquement agité et peut persister 60 heures après une forte agitation magnétique, expliquant le renforcement de la dissymétrie observée et même la disparition complète de la plus petite des deux crêtes pendant la matinée.

.../...

Les effets des perturbations magnétiques sur l'ionosphère peuvent se comprendre par le fait que les charges électriques sont moins bien guidées dans leur diffusion le long des lignes de champ magnétique à cause des variations désordonnées de ces dernières dans le temps. Il est possible aussi qu'une perturbation du champ magnétique entraîne une perturbation du champ électrique et par suite une dérive électrodynamique vers le bas, créant ainsi une structure ionosphérique identique à celle rencontrée le soir (rapprochement des crêtes vers l'équateur magnétique). DUNFORD a trouvé une relation entre les variations des champs électrique et magnétique et la densité ionique de la région E à HUANCAYO (Pérou) : $\Delta E = \frac{\Delta H}{f_oE^2}$, où ΔE et ΔH sont respectivement les variations des champs électrique et magnétique (les ΔH étant prises par rapport aux valeurs de nuit) et f_oE la fréquence de plasma du maximum de la région E. Cette corrélation indique le rôle important du champ électrique dans les changements de comportement de la région F aux basses latitudes et prouve la justesse de la théorie invoquant les dérives électromagnétiques.

CONCLUSION

Nous avons passé en revue l'ensemble des phénomènes principaux et caractéristiques de l'ionosphère supérieure équatoriale :

1°) la structure de jour par temps magnétiquement calme, constituée de deux maxima de densité situés de 8 à 12° de part et d'autre d'un minimum centré sur l'équateur magnétique, et l'élévation régulière de l'altitude h_mF_2 du maximum de densité jusqu'à près de 500 km à l'équateur magnétique durant l'hiver 1967-68 au lieu de 300 km des moyennes latitudes ;

.../...

2°) la dissymétrie dans la densité et l'altitude des deux crêtes avec, paradoxalement, la crête du côté hiver la plus ionisée et la plus basse en altitude ;

3°) le comportement par temps magnétiquement agité qui tend à resserrer l'anomalie vers l'équateur magnétique.

Le développement des connaissances et une compréhension plus précise de ces phénomènes exige la poursuite des mesures expérimentales et théoriques :

a) par des mesures de la densité électronique simultanément sur plusieurs méridiens pour connaître l'effet de variation de longitude et temps, par des chaînes d'ionosondes au sol et par des satellites ("Alouette II", "Ariel III") ;

b) par la comparaison entre des modèles théoriques faisant varier chacun des paramètres en jeu et les observations expérimentales qu'il faut préciser surtout durant les phases de formation et de décroissance de l'anomalie ; il serait intéressant de préciser si l'équilibre diffusif le long des lignes de champ magnétique est réalisé ou non ; enfin il faut étudier la corrélation entre la structure de l'ionosphère et les variations du champ magnétique terrestre ;

c) par des mesures physiques directes : la vitesse du vent neutre, par la mesure de la vitesse de déplacement des irrégularités ionosphériques, doit permettre d'expliquer la dissymétrie existant entre les crêtes ; des mesures de la température électronique ou ionique par le sondeur à diffusion incohérente ("Thomson Scatter") doivent donner des renseignements sur l'énergie et la masse des particules ionosphériques ; les masses ioniques peuvent aussi être déduites de mesures par spectromètre de masse ; le taux de production ionique doit être précisé par des mesures de photométrie ; enfin les satellites doivent poursuivre leurs mesures des conditions et des constituants aéronomiques.

.../...

Un des principaux facteurs responsables de l'anomalie ionosphérique, le champ électrique, mériterait d'être précisé, mais sa mesure directe, par électromètre, présente de grandes difficultés.

R E M E R C I E M E N T S

Je remercie Monsieur HIEBLOT qui a bien voulu m'accueillir dans son laboratoire. Je remercie également le personnel du GRI-CNET pour son aide, et tout particulièrement Messieurs C. TAIEB et P. VILA qui ont bien voulu diriger mon travail.

R E F E R E N C E S

E.V. APPLETON, "Two anomalies in the ionosphere", *Nature*, Vol. 157, p. 691, May 1946.

E.N. BRAMLEY and M. PEART, "Diffusion and electromagnetic drift in the equatorial F2 region", *J. Geophys. Res.*, vol. 69, p. 4609-4616, 1964.

E.N. BRAMLEY and P. PEART, "Diffusion and electromagnetic drifts in the equatorial F2 region", *J. Atmosph. Terrest. Phys.* vol. 27, n° 11-12, p. 1201-1211, 1965.

E.N. BRAMLEY and M. YOUNG "Winds and electromagnetic drifts in the equatorial F2 region", *J. Atmosph. Terrest. Phys.*, Vol. 30, n° 1, p. 99-111, 1968.

W. CALVERT and C.W. SCHMID, "Spread-F observations by the Alouette topside sounder satellite", *J. Geophys. Res.*, vol. 69, p. 1839-1852, May 1964.

J.R. DOUPNIK, E.R. SCHMERLING, "The reduction of ionograms from the bottomside and topside", *Penn. St. Un. Scient. Rep.* n° 230, 1965.

R.A. DUNCAN, "The equatorial F region of the ionosphere", *J. Atmosph. Terrest. Phys.*, vol. 18, p. 89-100, 1960.

E. DUNFORD, "The relationship between the ionospheric equatorial anomaly and the E-region current system", *J. Atmosph. Terrest. Phys.*, vol. 29, n° 12, p. 1489-1498, 1967.

E. DUNFORD, "Electric fields and F₂ region electron densities over Peru". 3ème Symposium d'Aéronomie équatoriale, Ahmedabad, Février 1969.

.../...

D.ECCLES and J.W. KING, "A review of topside sounder studies of the equatorial ionosphere", Proceedings of the IEEE, Vol. 57, n° 6, June 1969, p. 1012 à 1018.

FELDSSTEIN et G. VASSEUR, " Calcul de profils d'ionisation à partir de sondages ionosphériques en contrehaut et en contrebas", Annales des Télécommunications 2.3.183 (1968).

J.G. GEISLER, "Atmospheric winds in the middle latitude F region", J. Atmosph. Terrest. Phys., vol. 28, n° 8, p. 703-720, 1966.

L.G. JACCHIA, Space Research V, p. 1152, North-Holland, Amsterdam, 1965.

J.E. JACKSON, "Comparisons between topside and ground based soundings ", Proc. of the IEEE 57, n° 6, June 1969.

H. KOHL and J.W. KING, "Atmospheric winds between 180 and 700 km and their effects on the ionosphere", J. Atmosph. Terrest. Phys., vol. 29, n° 9, p. 1045-1062, 1967.

J.W. KING, P.A. SMITH, D. ECCLES, G.F. FOOKS and H. HELM, "Preliminary investigation of the structure of the upper ionosphere as observed by the topside sounder satellite, Alouette" Proc. Roy. Soc. London, sec.A, vol. 281, p. 464-487, October 1964.

K. MAEDA, H. UYEDA and H. SHINKAWA, "Differences of ionospheric conditions in the F2 region between two points lying in the same latitude but having different longitudes", Rept. Phys. Ins. Radio Waves (TOKYO), n° 2, 1942.

.../...

D.F. MARTYN, "Theory of height and ionization density changes at the maximum of a Chapman like region, taking account of ion production, decay, diffusion, and tidal drift", Physics of the ionosphere, Phys. Soc., London, p. 254-259, 1955.

S.K. MITRA, "Geomagnetic control of region F2 of the ionosphere", Nature, vol. 158, p. 668-669, 1946.

G.L. NELMS, "Ionospheric results from the topside sounder satellite Alouette", Space Research IV, North Holland Publishing company, Amsterdam, p. 437-448, 1964.

H. RISHBETH, "Transéquatorial diffusion in the topside ionosphere", Planetary Space Sci., vol. 15, p. 1261-1265, 1967.

J.R. SPREITER and B.R. BRIGGS, "Theory of electrostatic fields in the ionosphere at equatorial latitudes", J. Geophys. Res., vol. 66, p. 2345-2354, 1961.

J.O. THOMAS, "The electron density distribution in the F region in the ionosphere", Proc. IRE, vol. 47, p. 162-175, 1959.

P. VILA, "Diurnal variation of the quiet F2 maximum ionization along the Niamey meridian, in March-April and June-July 1965", Report on equatorial Aeronomy, Sao Jose dos Campos, p. 108-109 (édit. F. de Mendonça, Brésil), 1965.

P. VILA, C.R. Acad. Sci. Paris, t-266 B, 748-750, 11 mars 1968.

P. VILA, "Etude expérimentale de l'anomalie ionosphérique équatoriale en Afrique en période de minimum solaire", Ann. Géoph. 22/3, p. 396-404, 1966.

LEGENDE DES FIGURES

Figure 1 - Un ionogramme en contre-haut du 25 décembre 1967 à 11.46 T.U. enregistré à Ouagadougou.

Figure 2 - Densité électronique à altitude constante en fonction de la latitude géographique. La courbe en petits traits représente la ligne de maximum de densité électronique de la région. La courbe en traits plus long représente la ligne de force du champ magnétique. La flèche indique la latitude de l'équateur magnétique. Les points expérimentaux fournis par les ionogrammes sont représentés.

Figure 3 - Altitude des lignes d'égale densité électronique en fonction de la latitude. Les chiffres caractérisant chaque courbe sont à multiplier par 10^5 . Les points expérimentaux fournis par les ionogrammes sont représentés.

Toutes les autres courbes ont pour légende celle de la figure 2 ou 3 à l'exception de :

Figure 24 - Densité électronique maximum de la région F2 en fonction du Temps Local

Figure 25 - Variation de l'altitude du maximum d'ionisation en fonction du temps local

Figure 34 - Tableau des indices géomagnétiques trihoraires K_p .

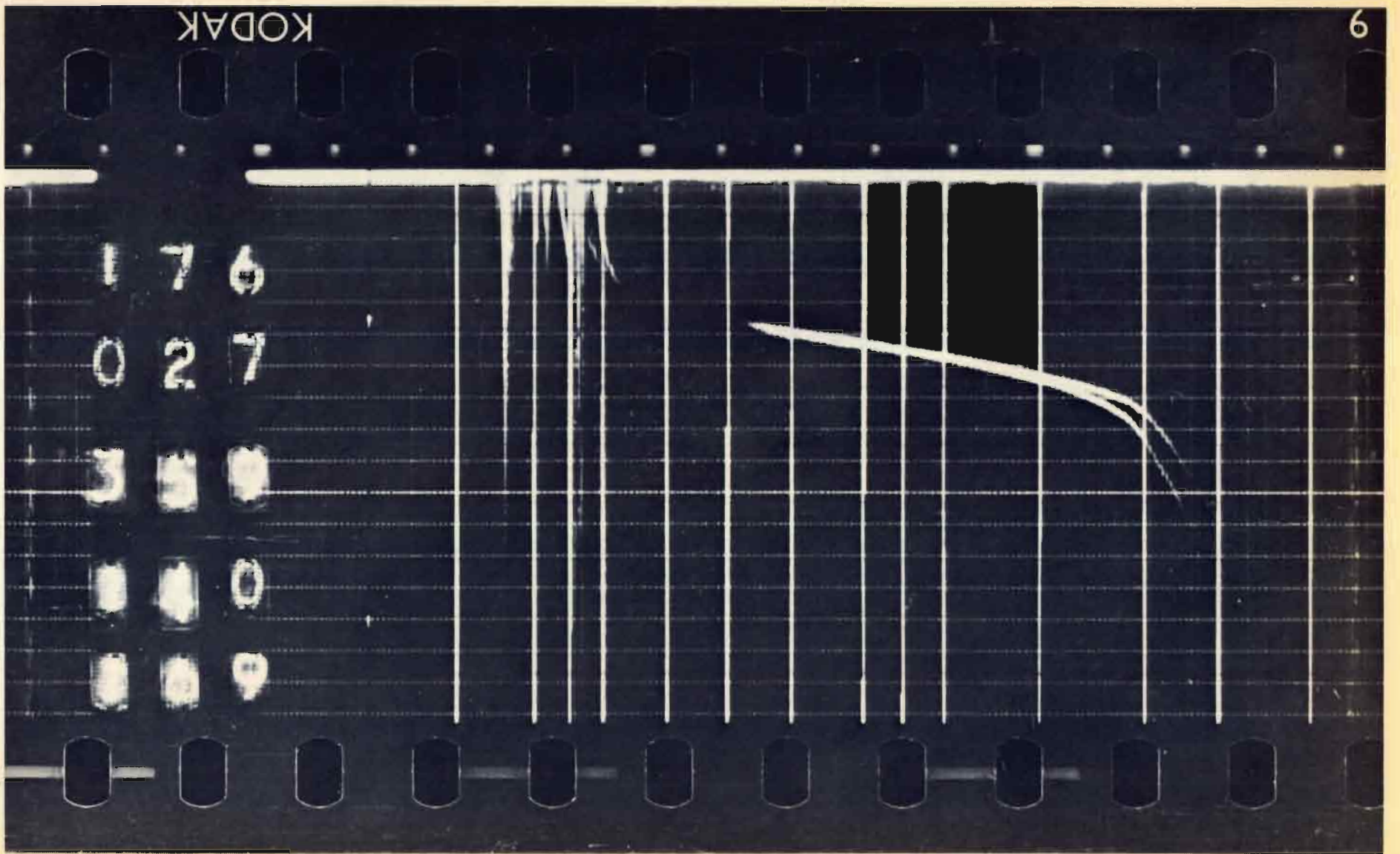


fig. 1

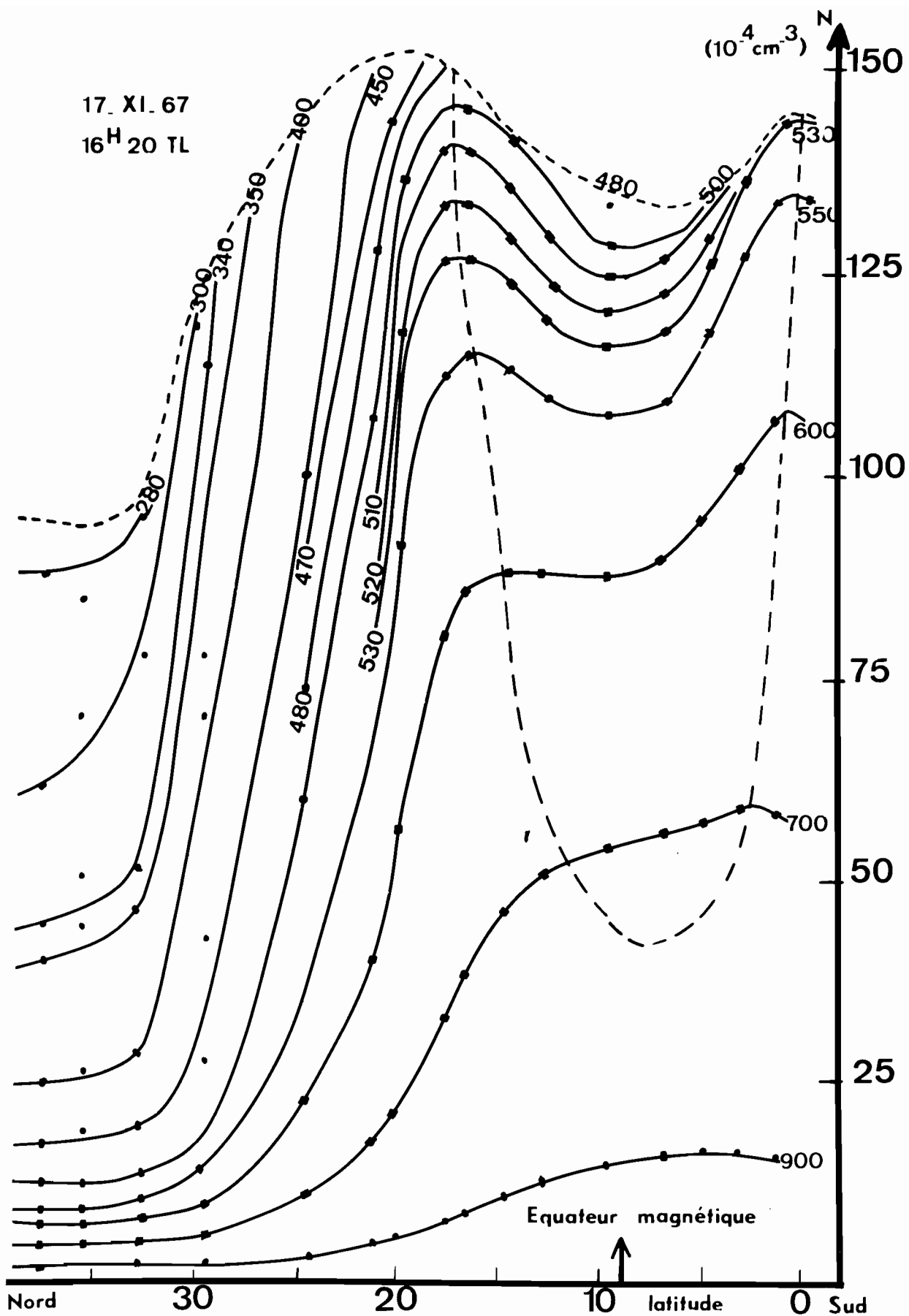


fig.2 Densité à altitude constante

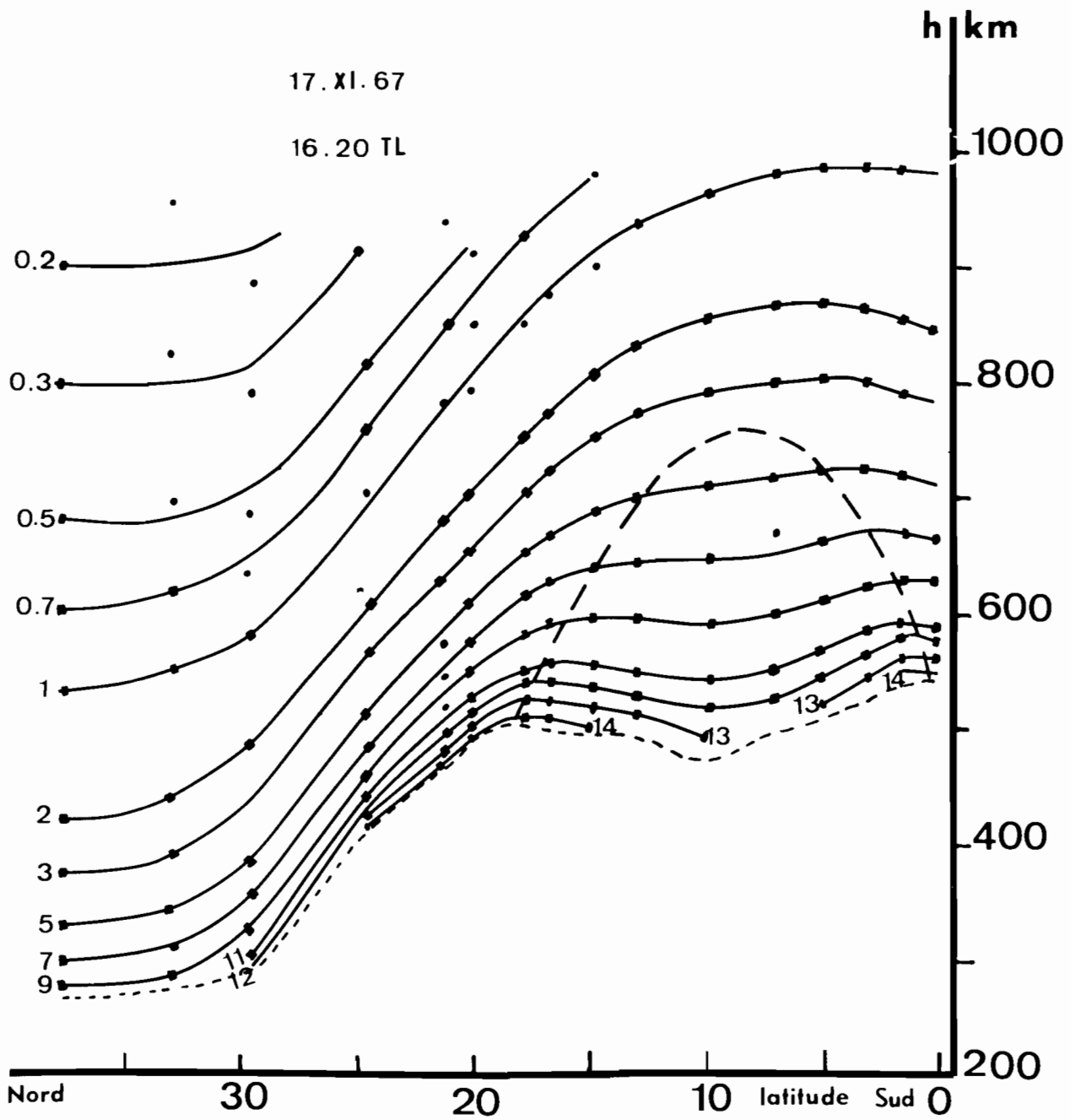


fig.3 Altitude des isoioniques (en 10^5 cm^{-3})

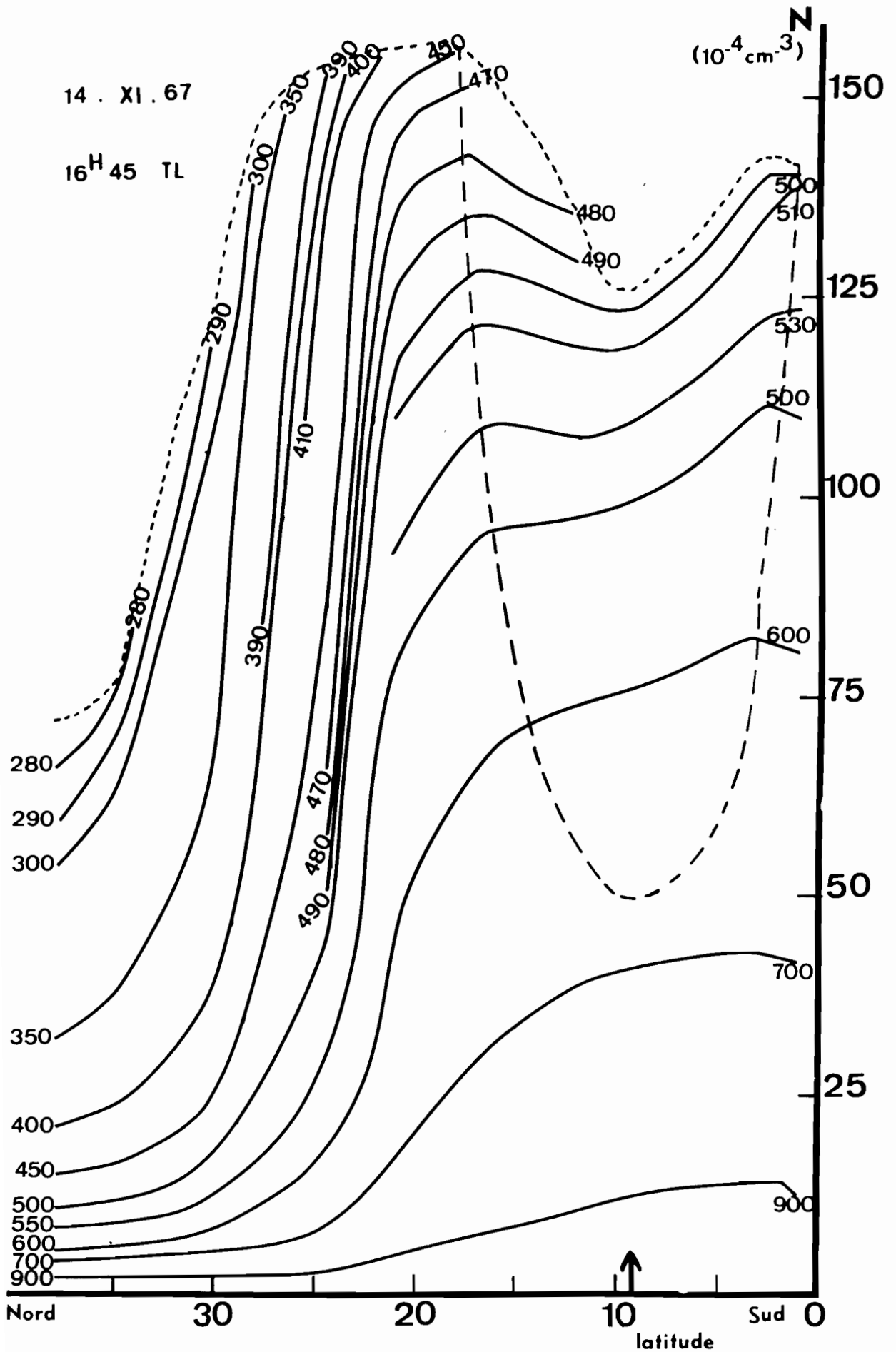


fig.4 Densité à altitude constante

14 . XI . 67

16^H45 TL

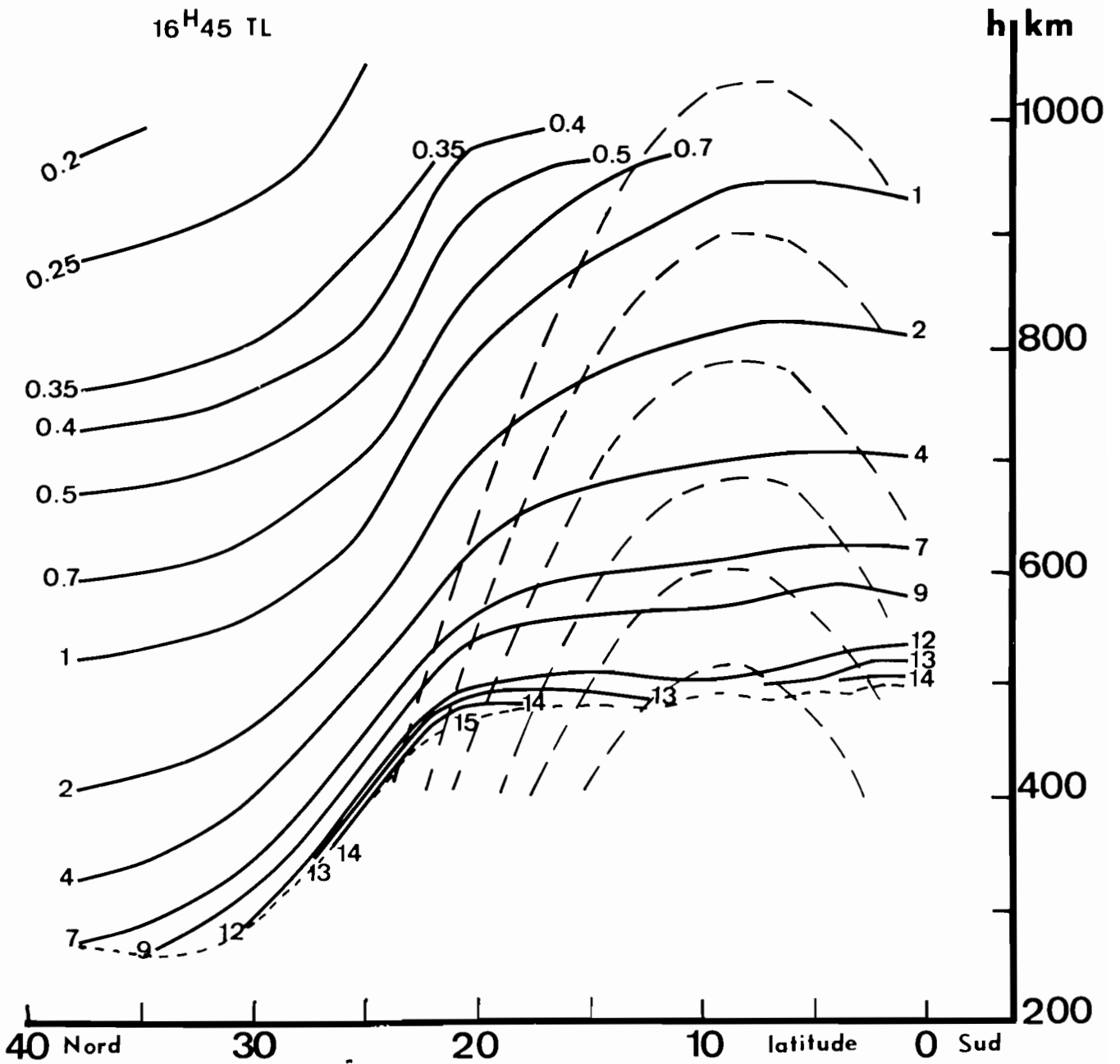


fig.5 Altitude des isoïoniques (en 10^{-5} cm^{-3})

27. I . 68
06^H50 TL

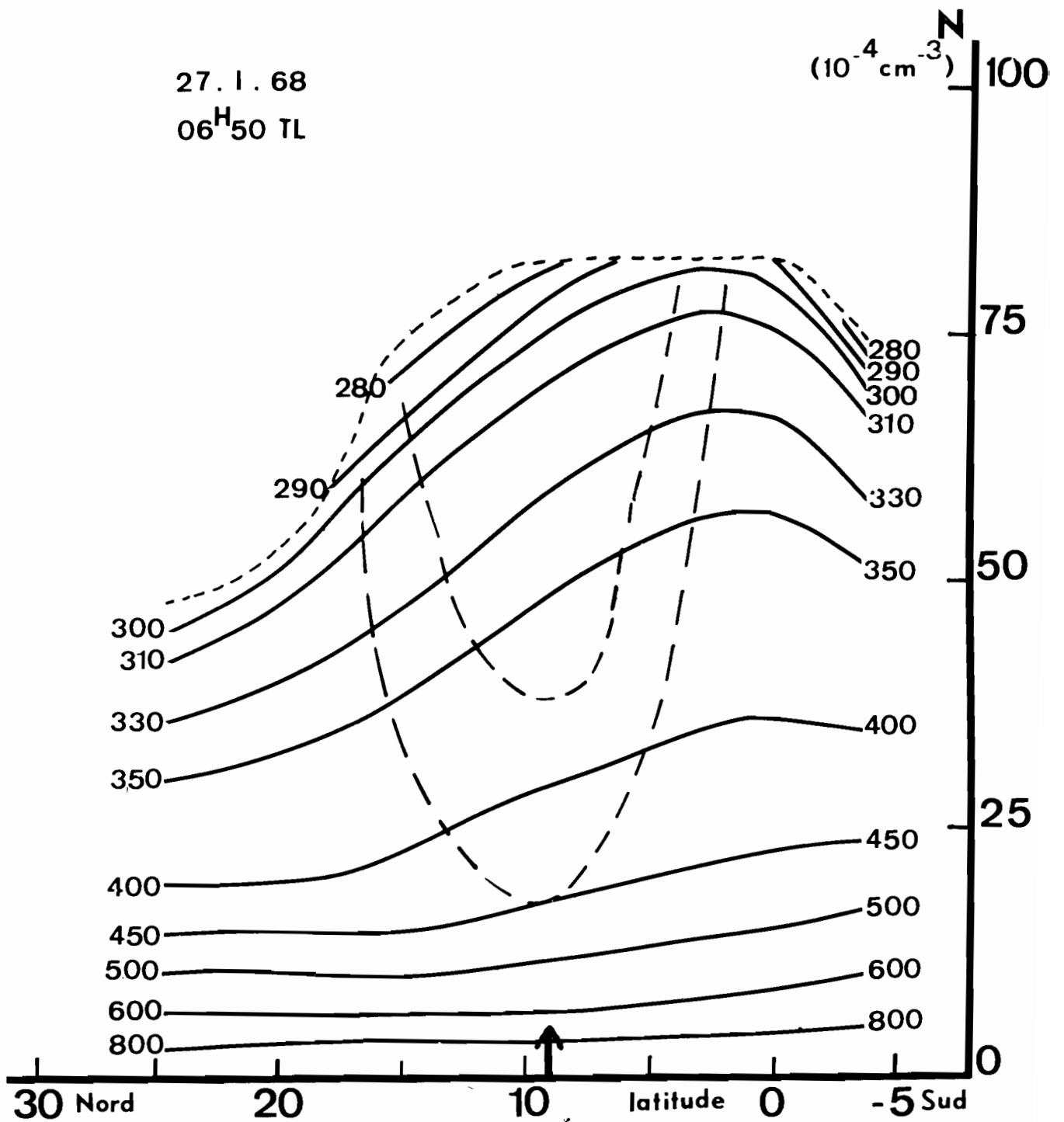


fig.6 Densité ionique à altitude constante

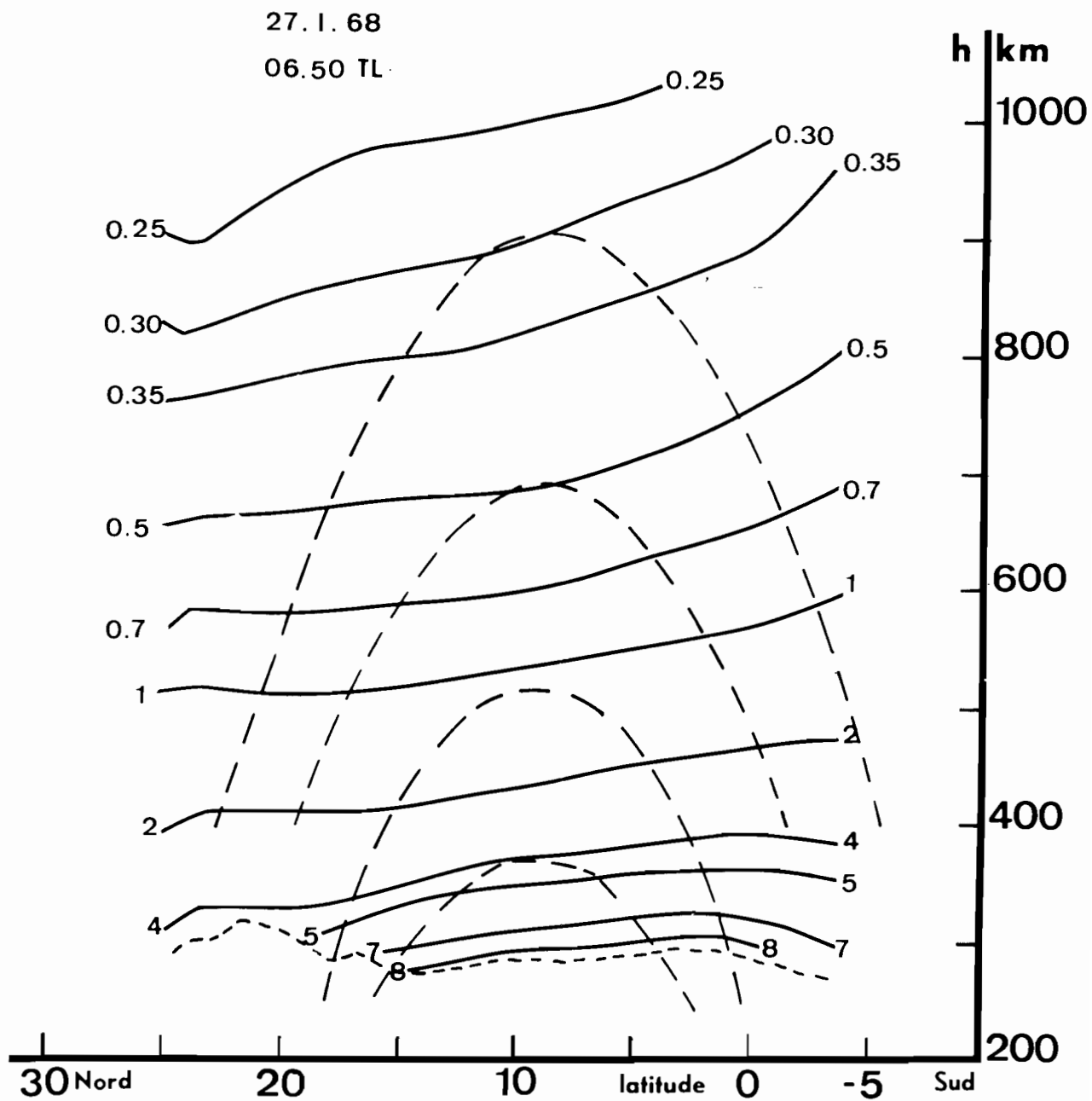


fig.7 Altitude des isoioniques (en 10^5 cm^{-3})

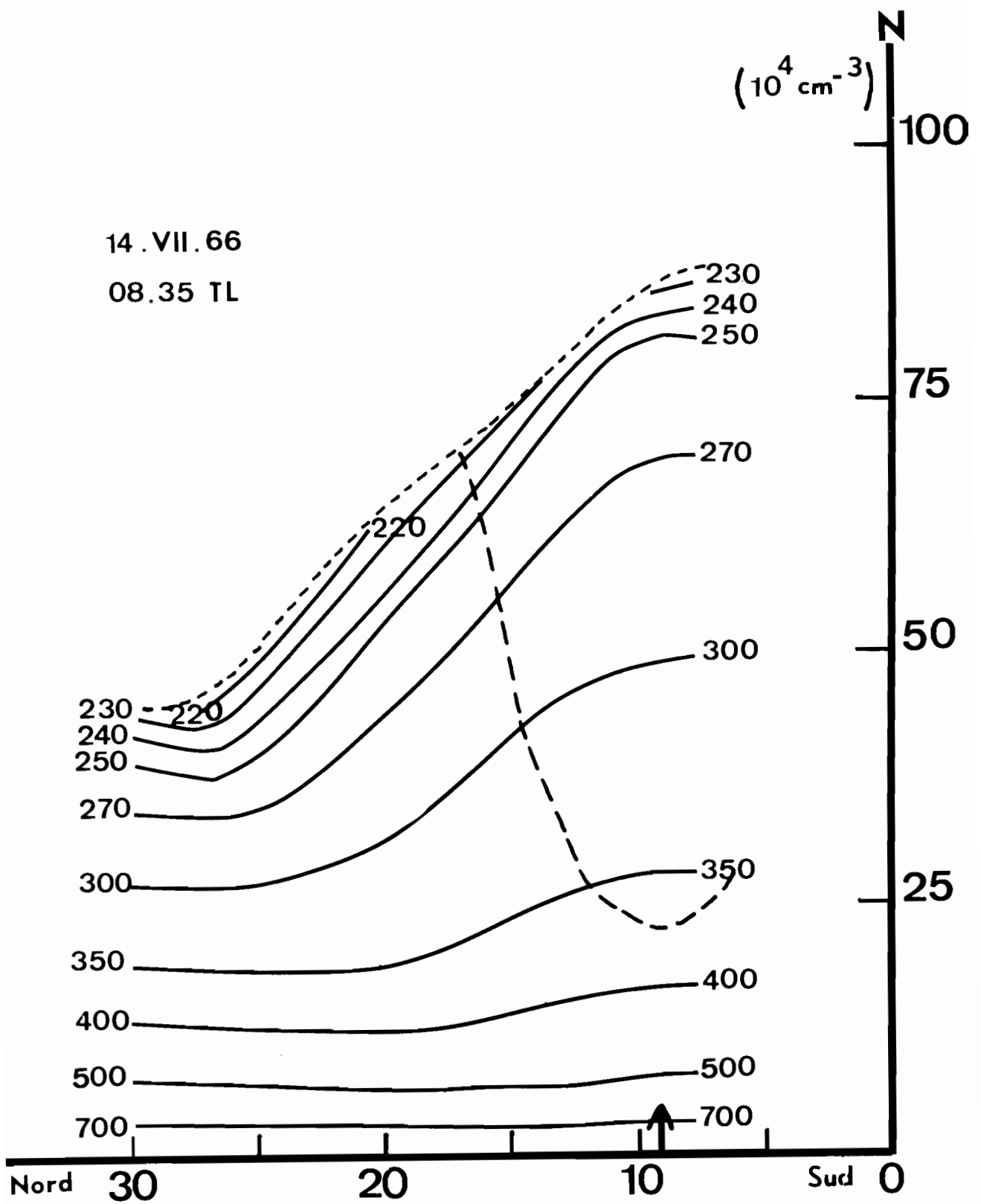


fig.8 Densité ionique à altitude constante

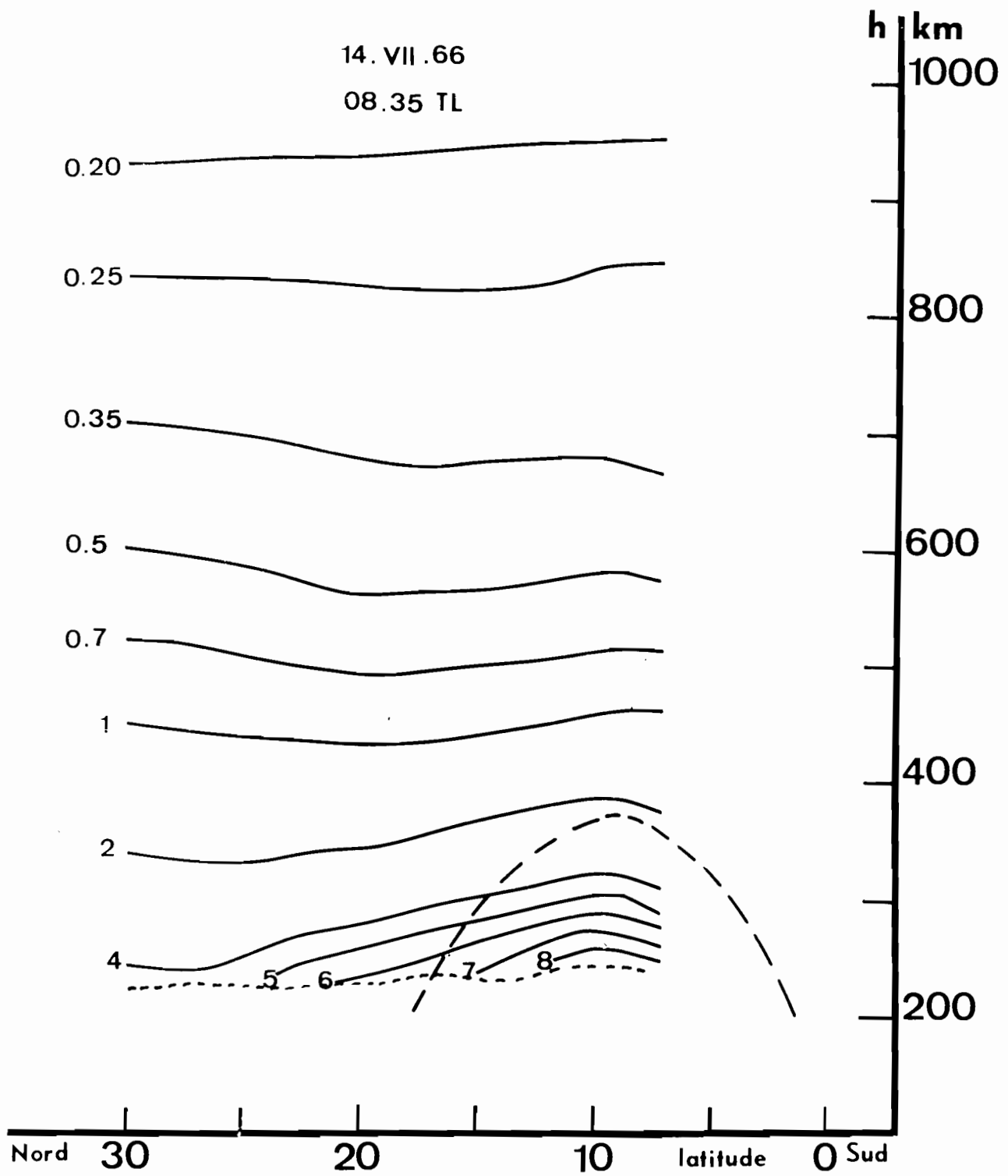


fig.9 Altitude des isoïoniques (en 10^4 cm^{-3})

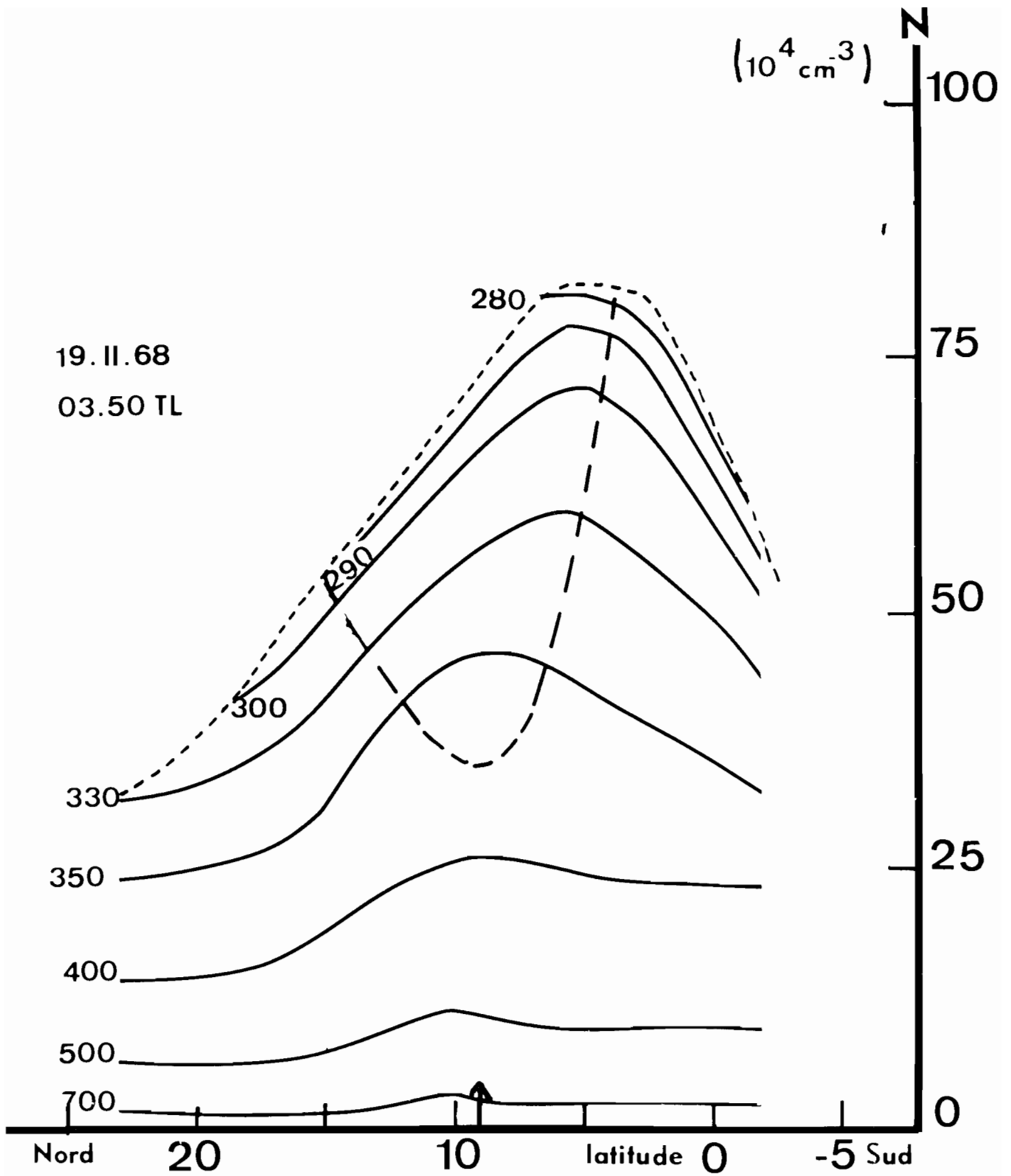


fig.10 Densité ionique à altitude constante

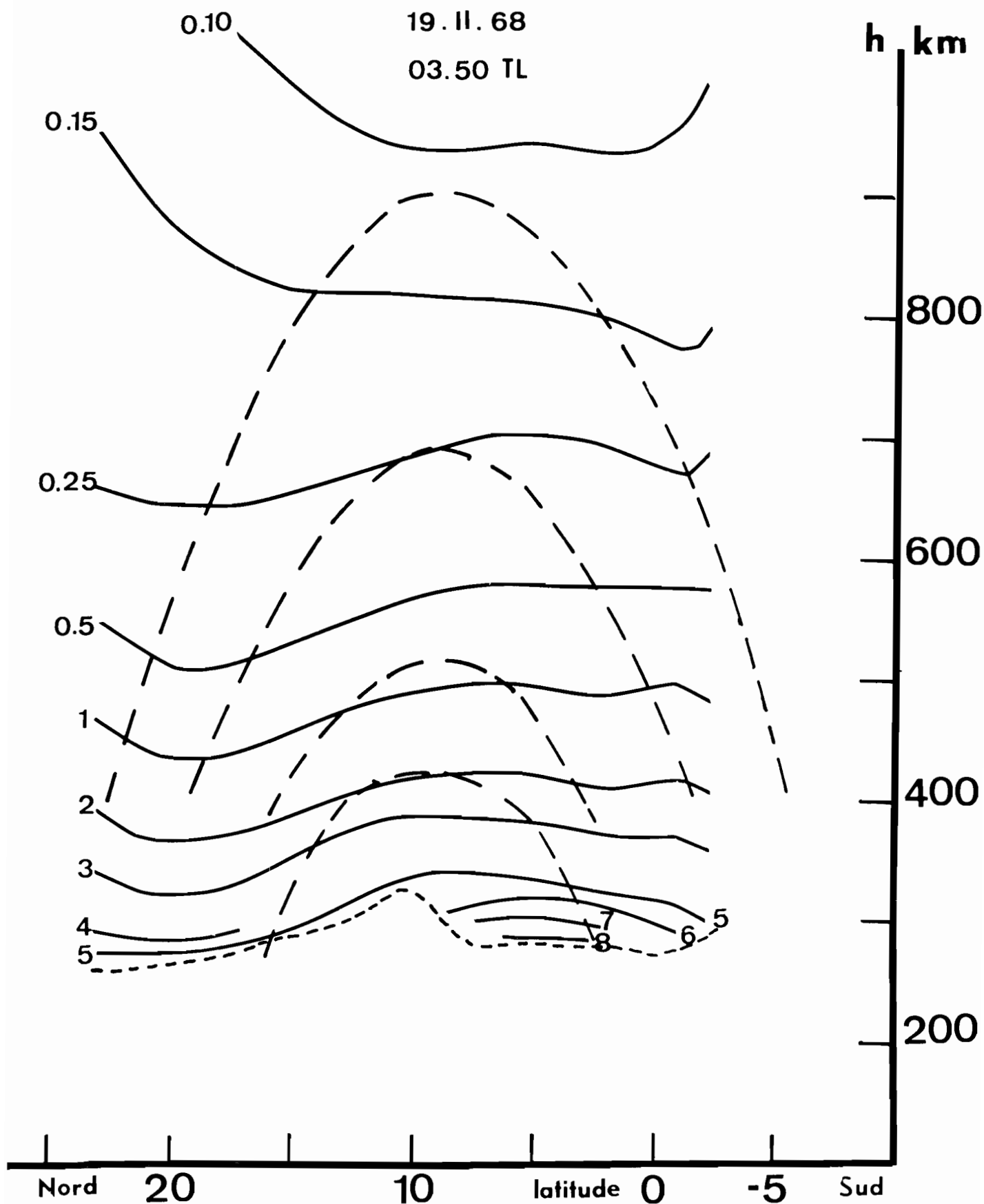


fig.11 Altitude des isoïoniques (en 10^5 cm^{-3})

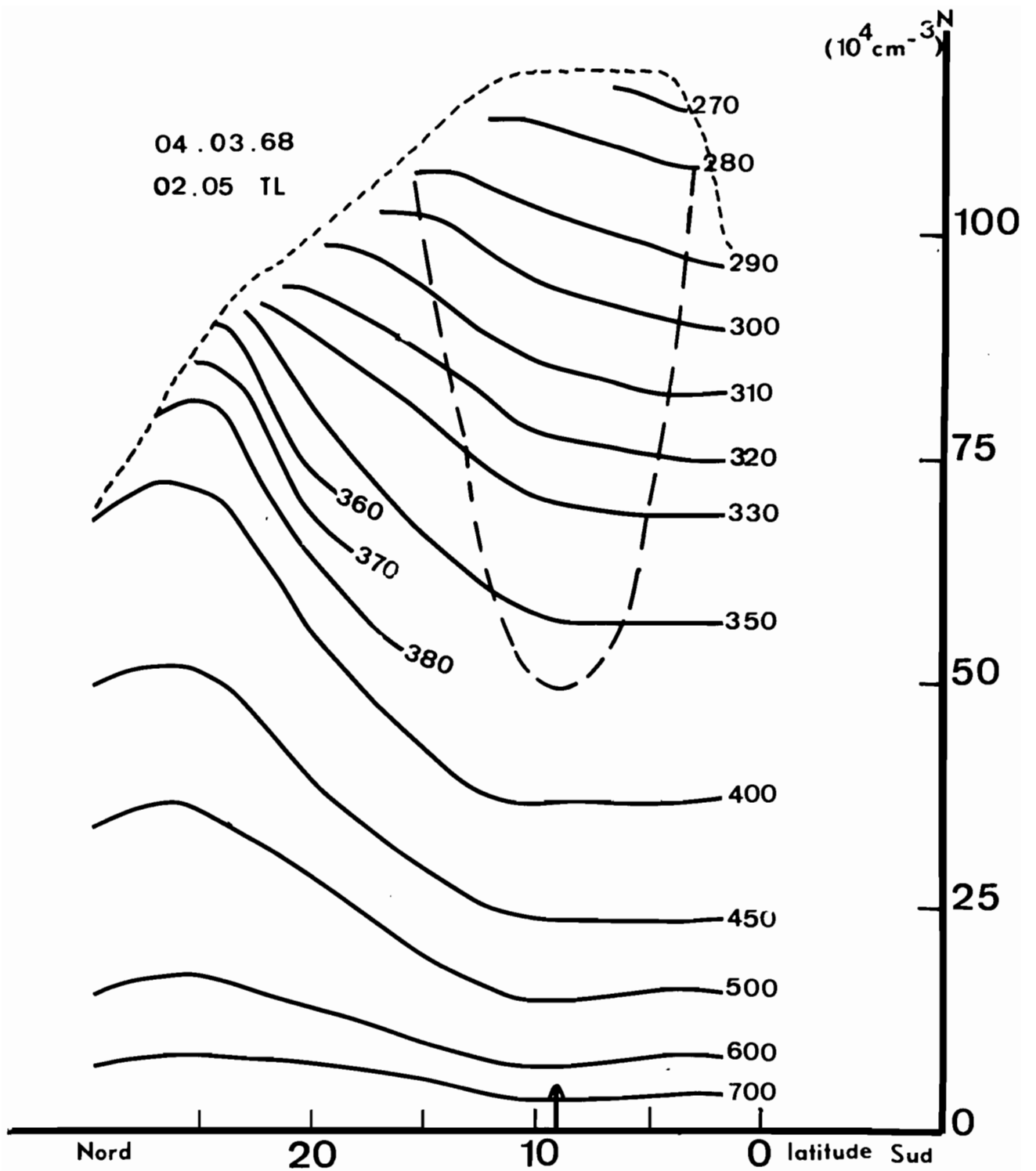


fig.12 Densité ionique à altitude constante

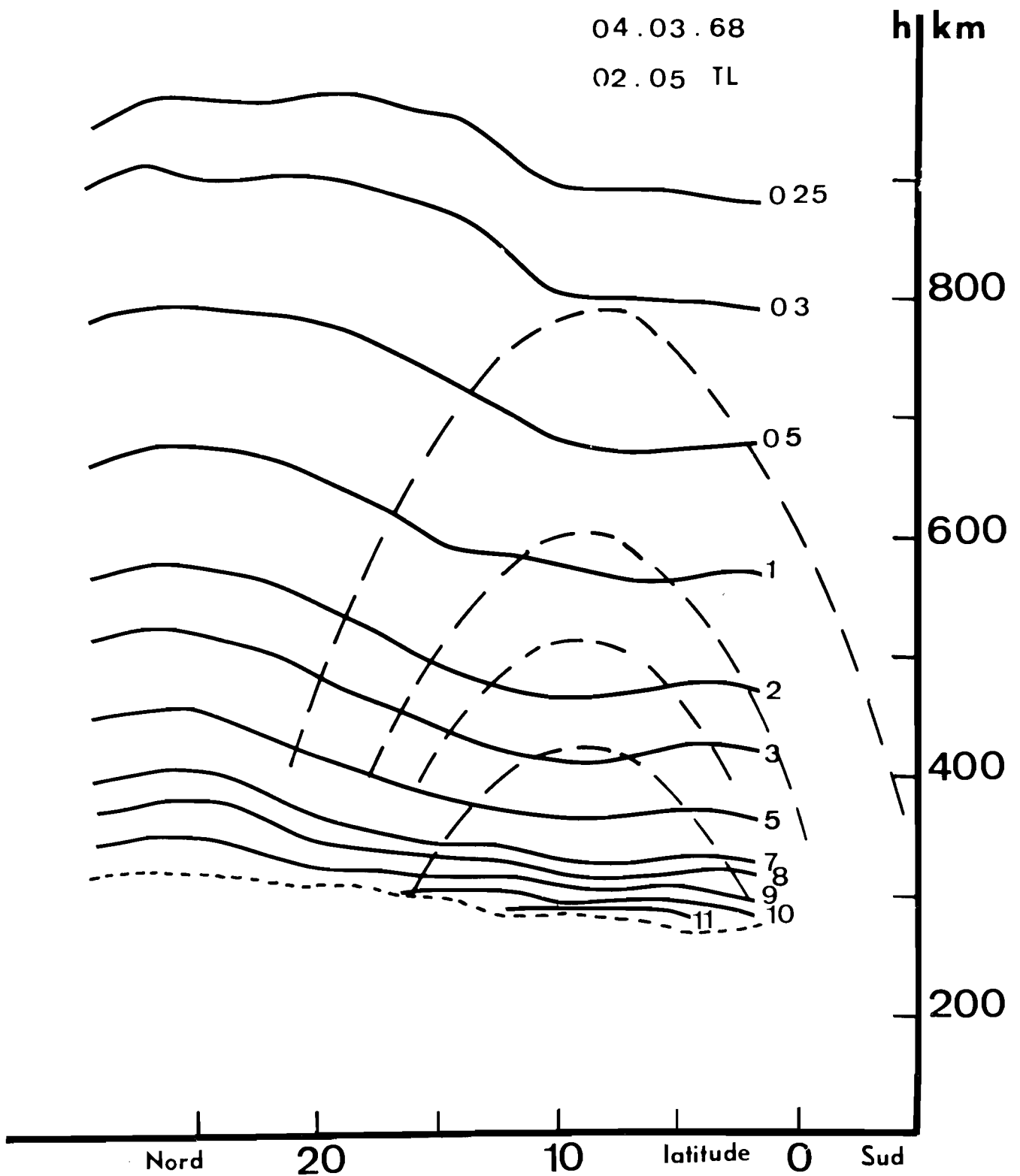


fig.13 Altitude des isoioniques (10^5 cm^{-3})

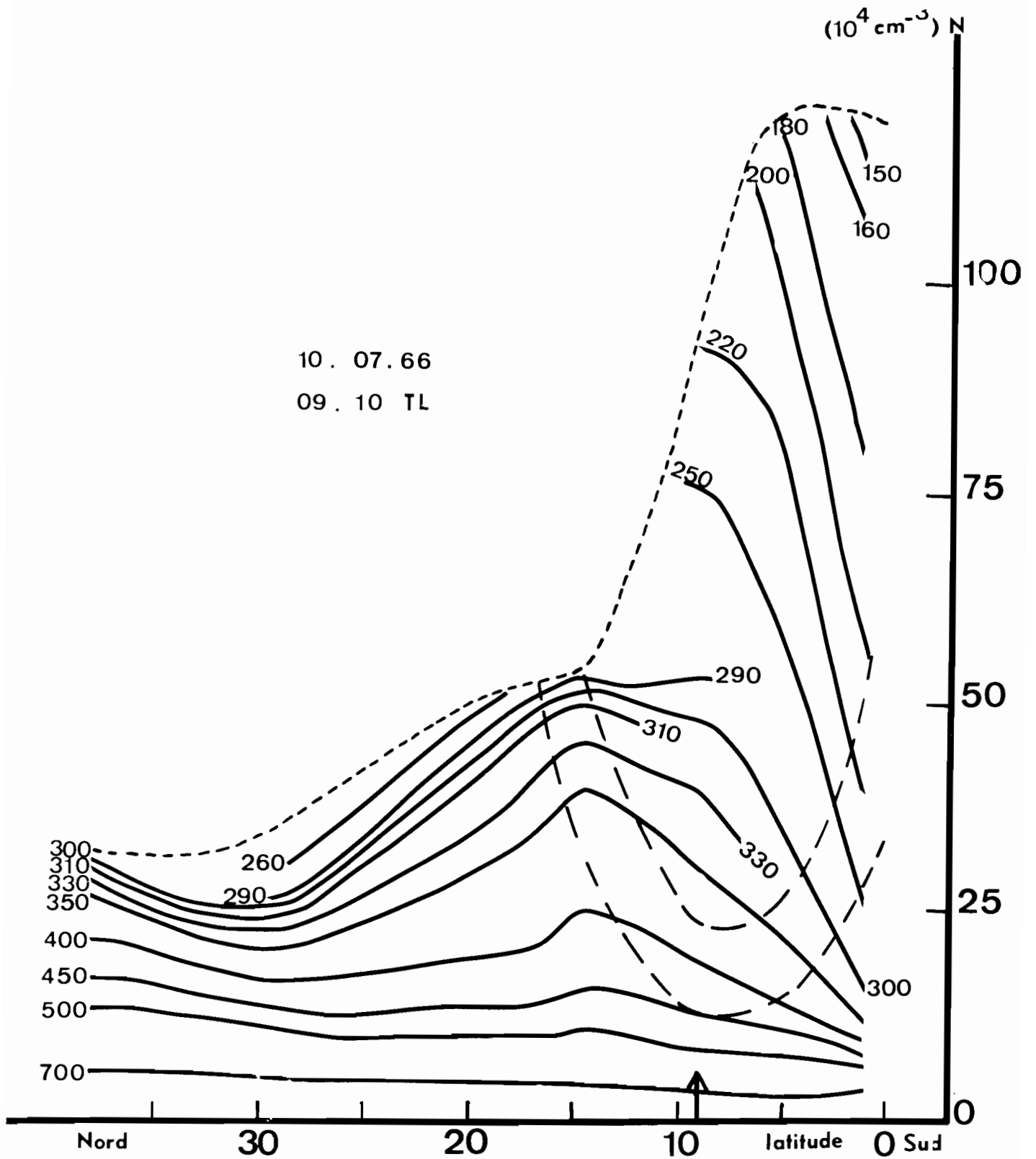


fig.14 Densité ionique à altitude constante

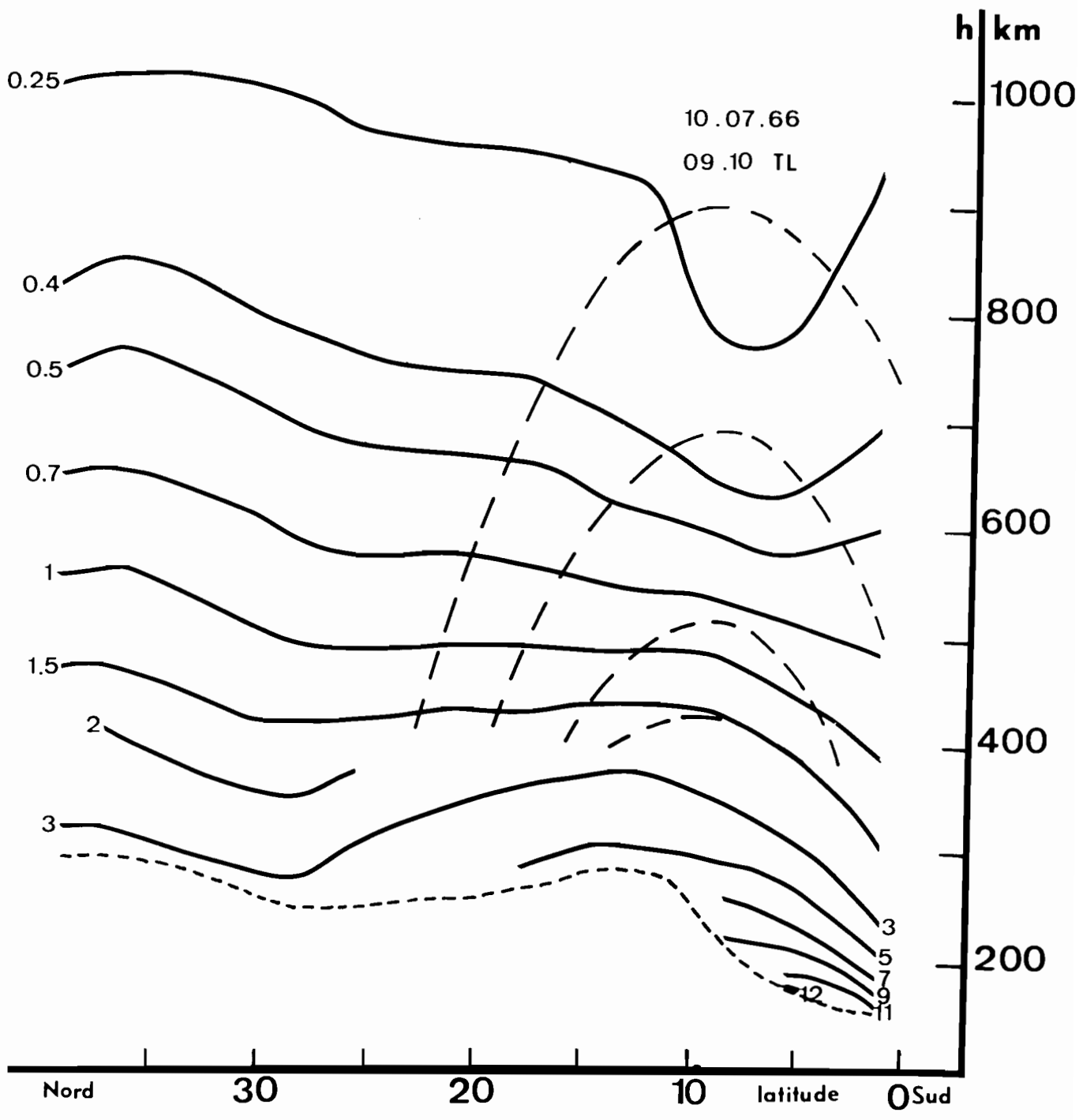


fig.15 Altitude des isoïoniques (en 10^5 cm^{-3})

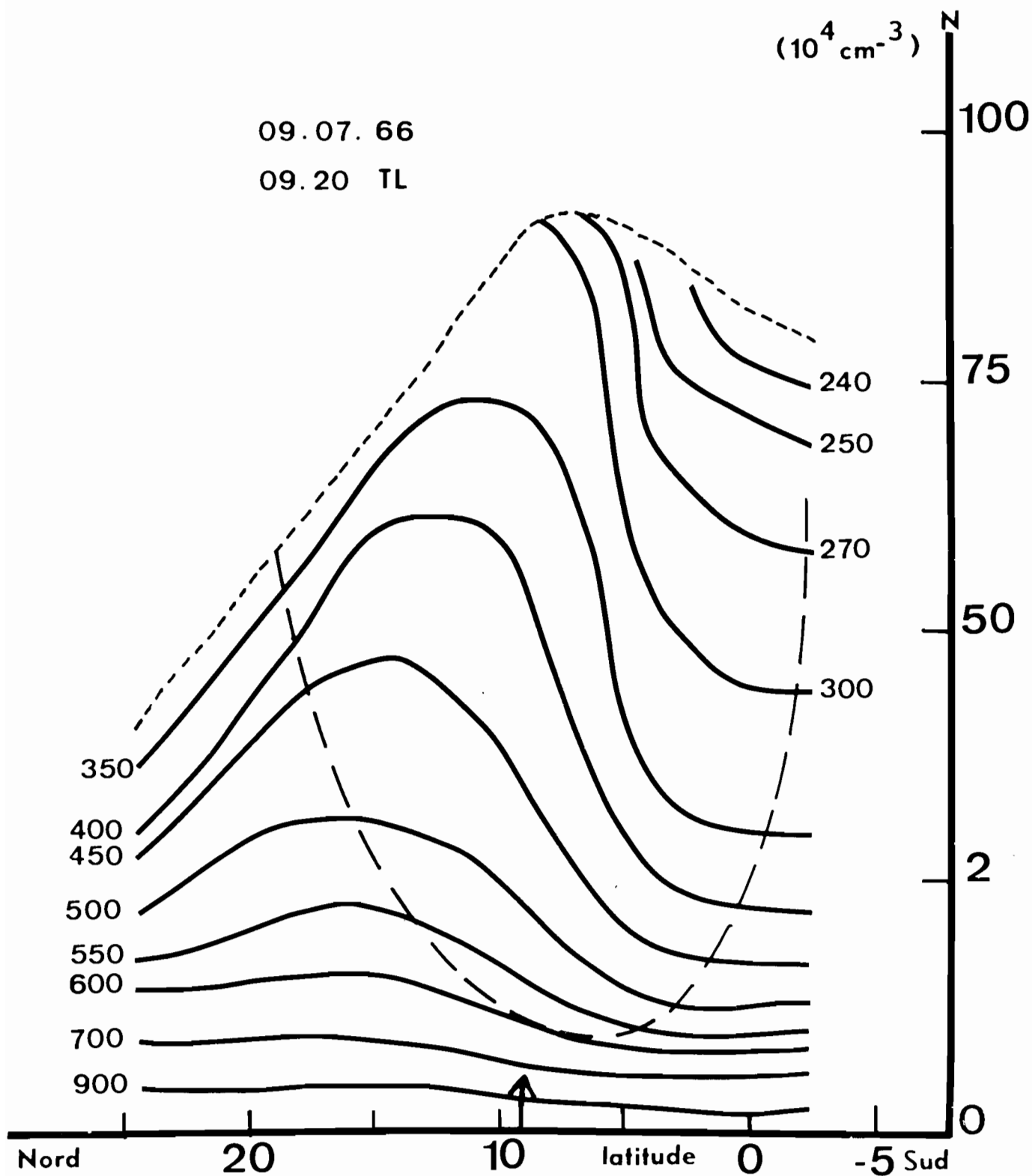


fig.16 Densité ionique à altitude constante

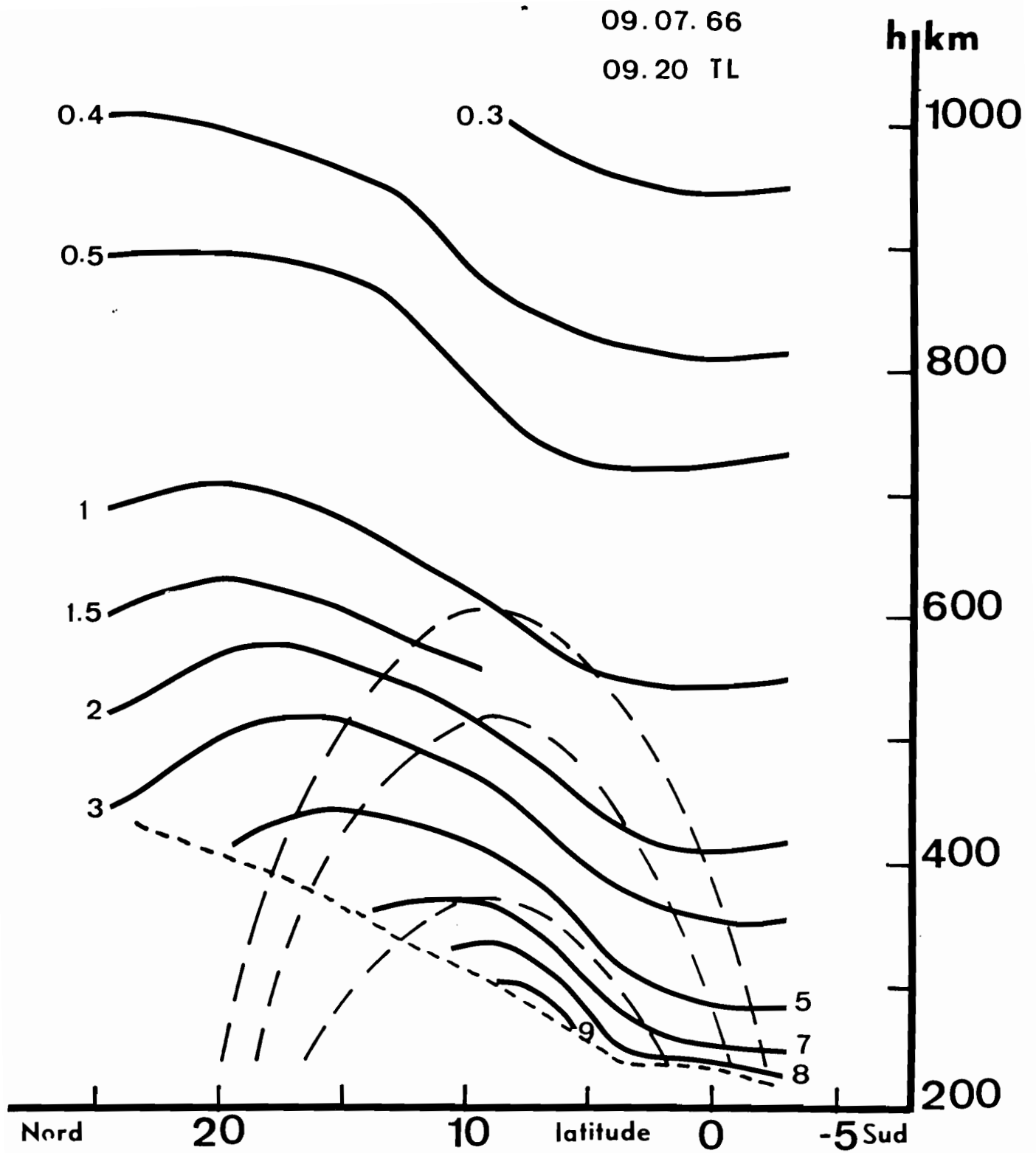


fig.17 Altitude des isoioniques (10^5 cm^{-3})

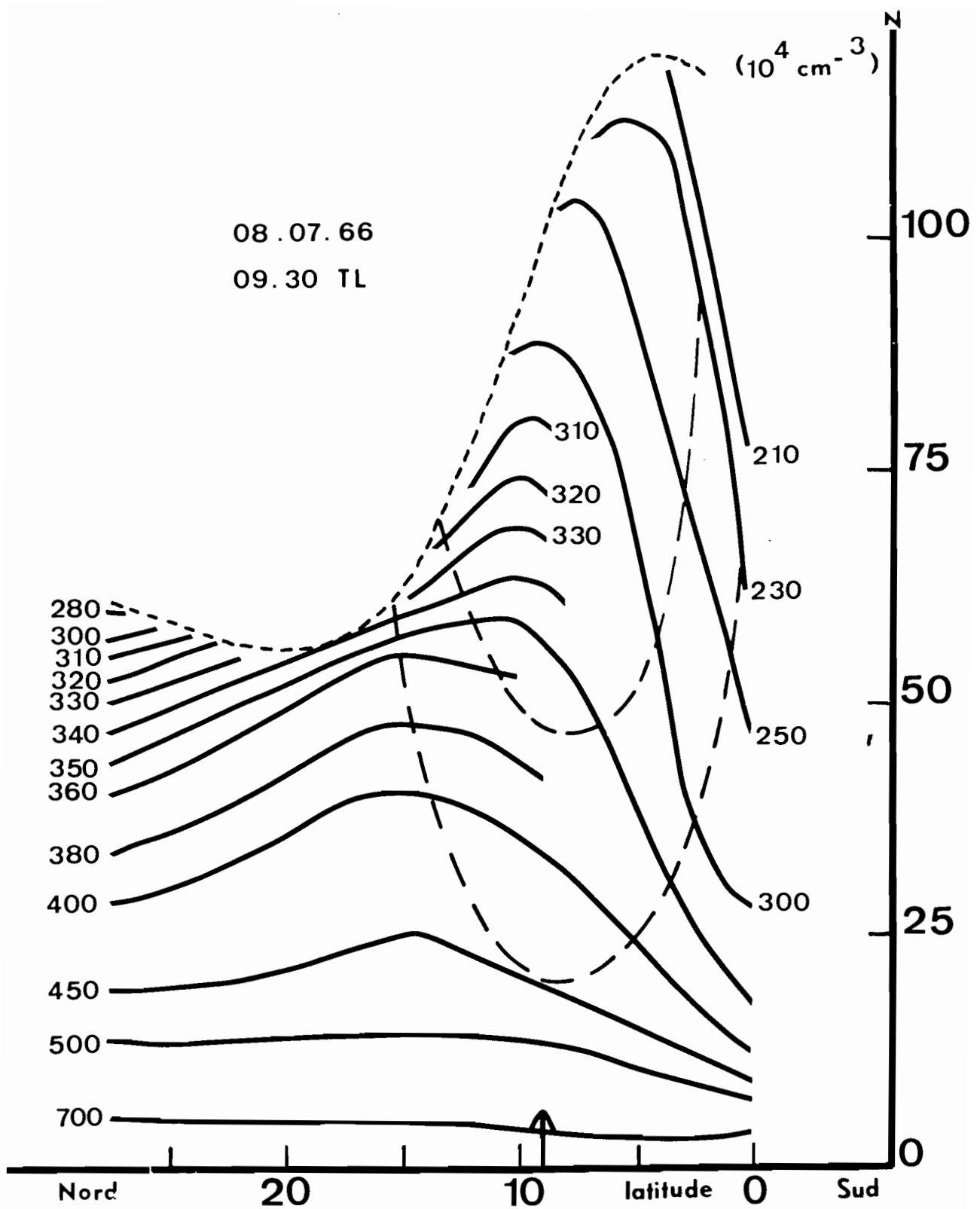


fig.18 Densité ionique à altitude constante

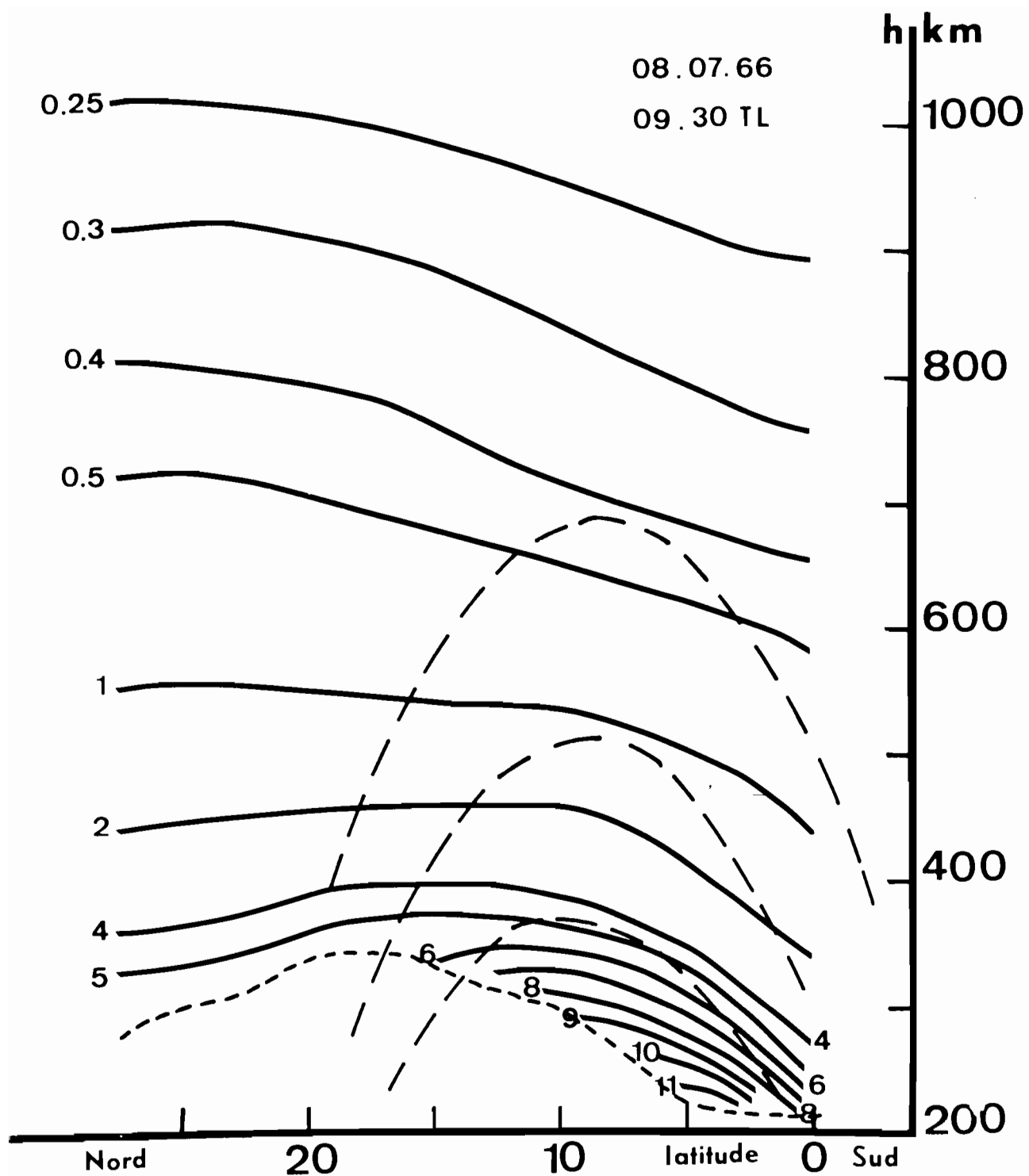


fig.19 Altitude des isoioniques (10^5 cm^{-3})

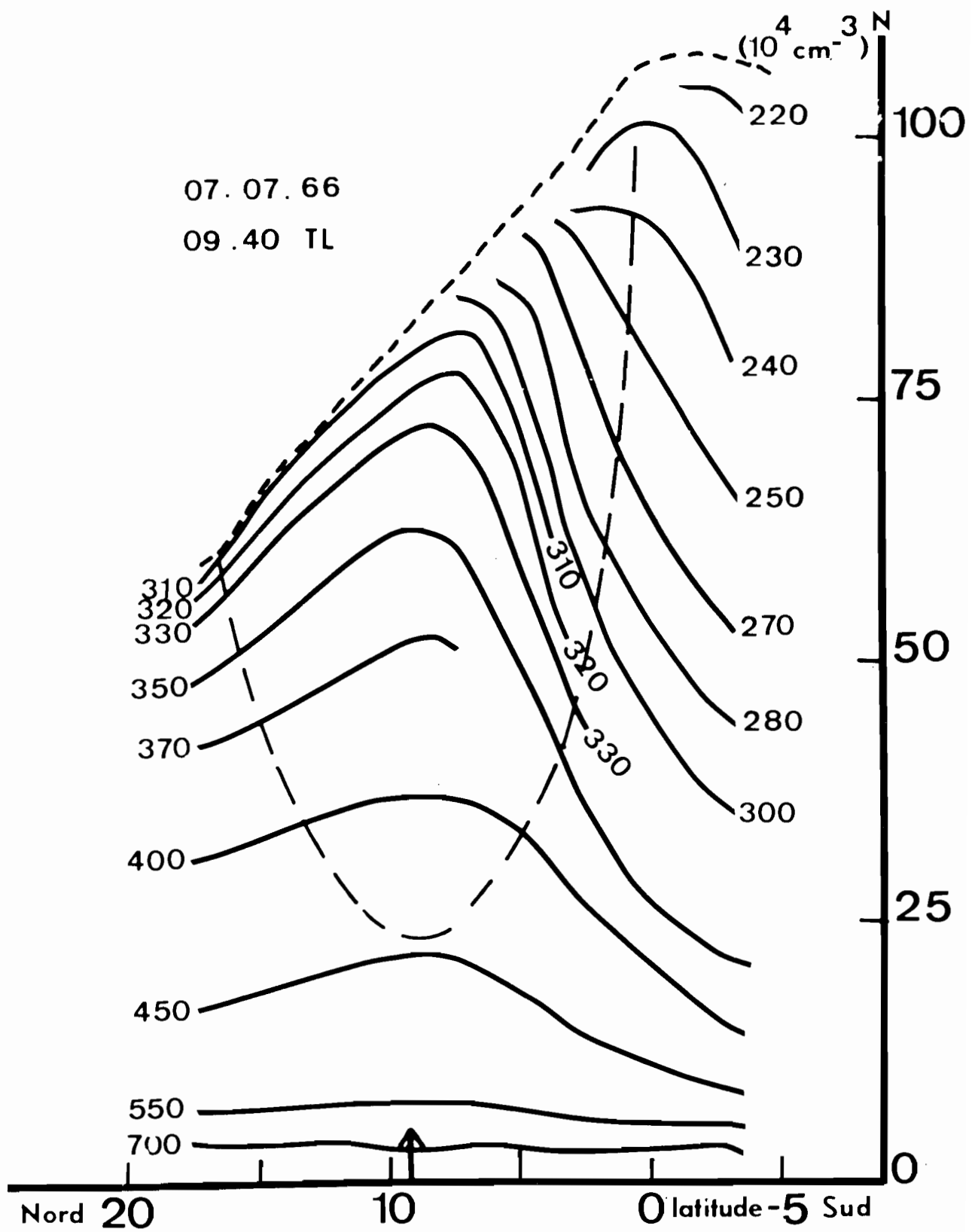


fig.20 Densité ionique à altitude constante

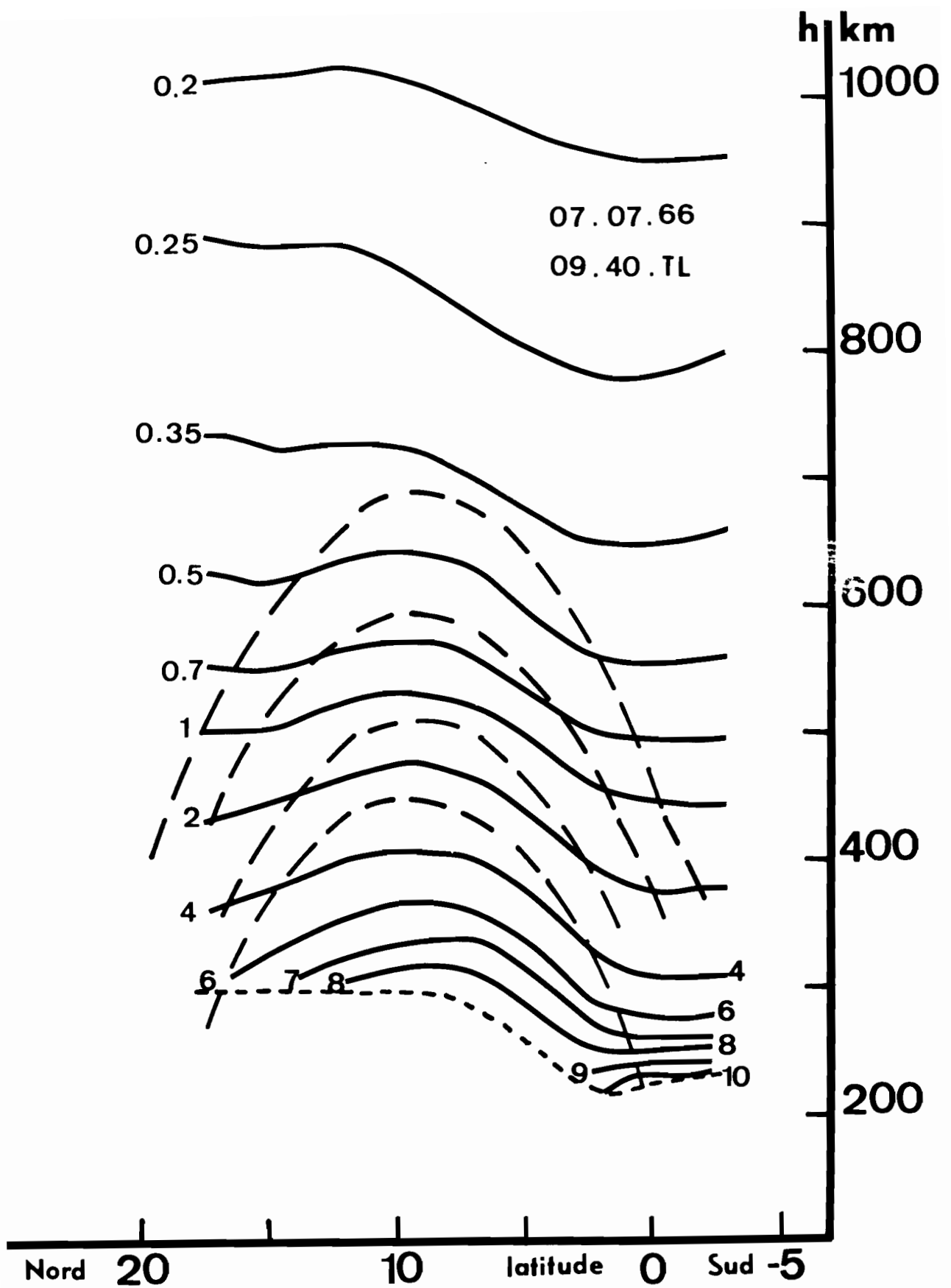


fig.21 Altitude des isoïoniques (10^5 cm^{-3})

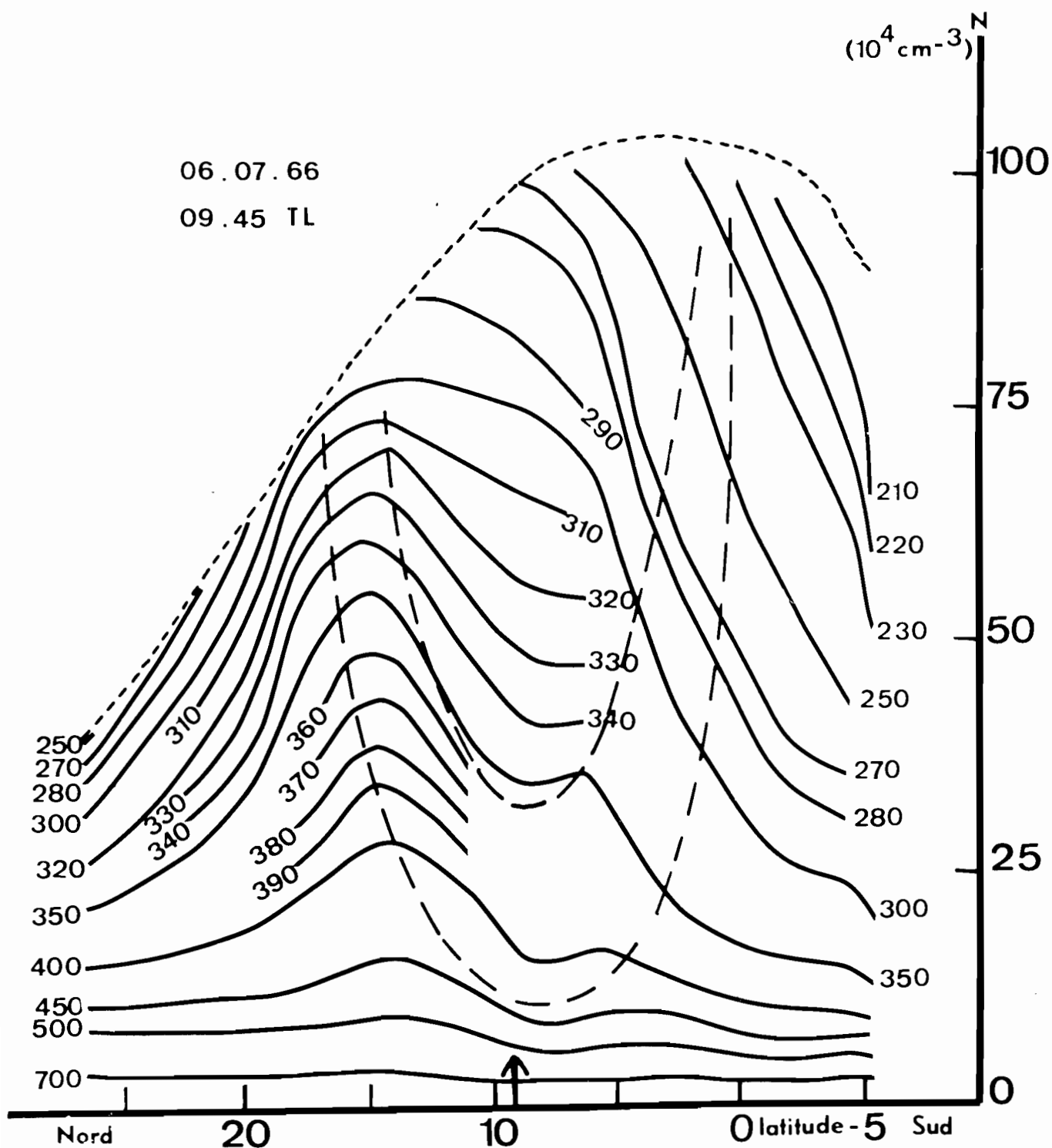


fig.22 Densité ionique à altitude constante

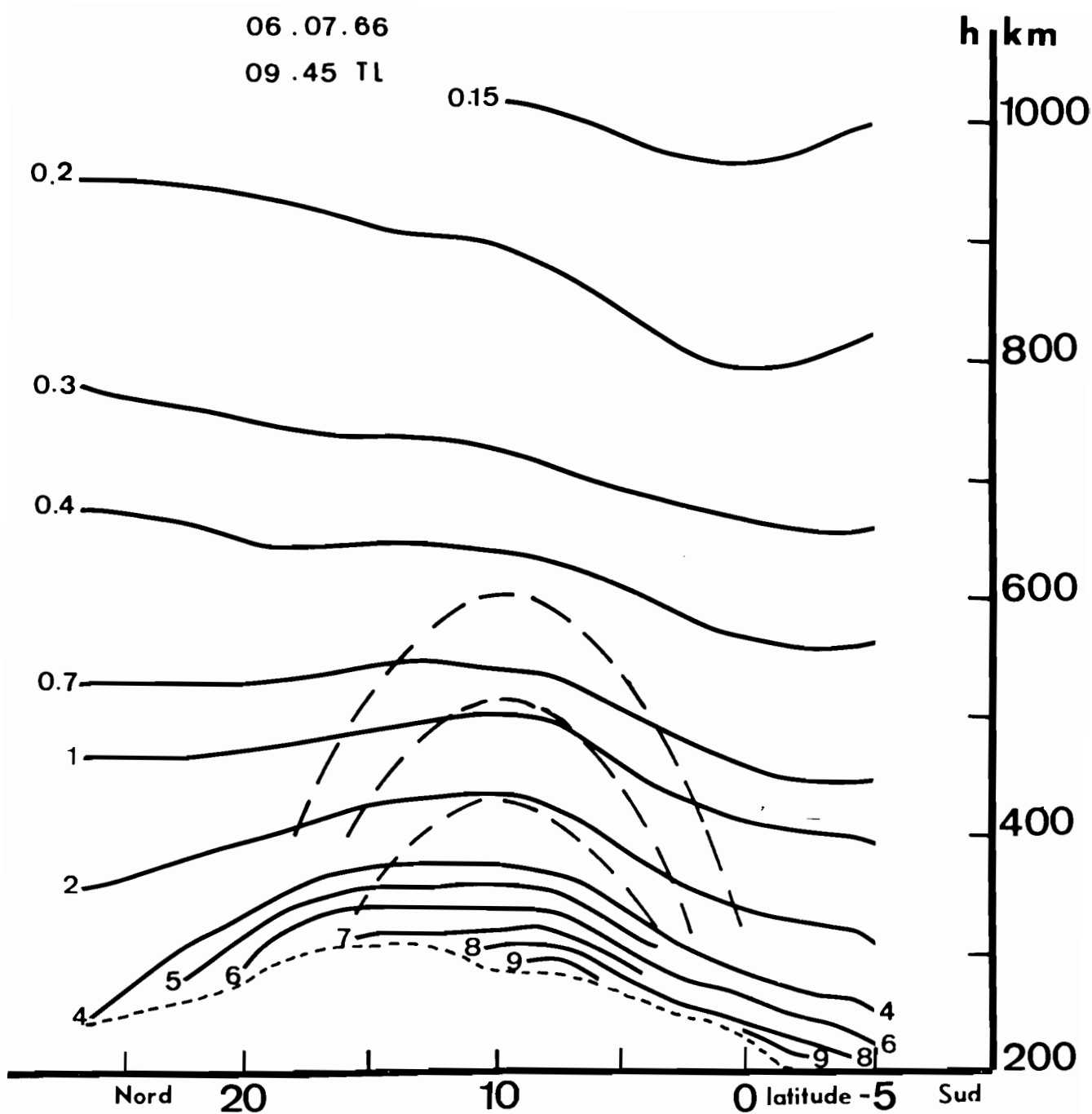


fig.23 Altitude des isoioniques (10^5 cm^{-3})

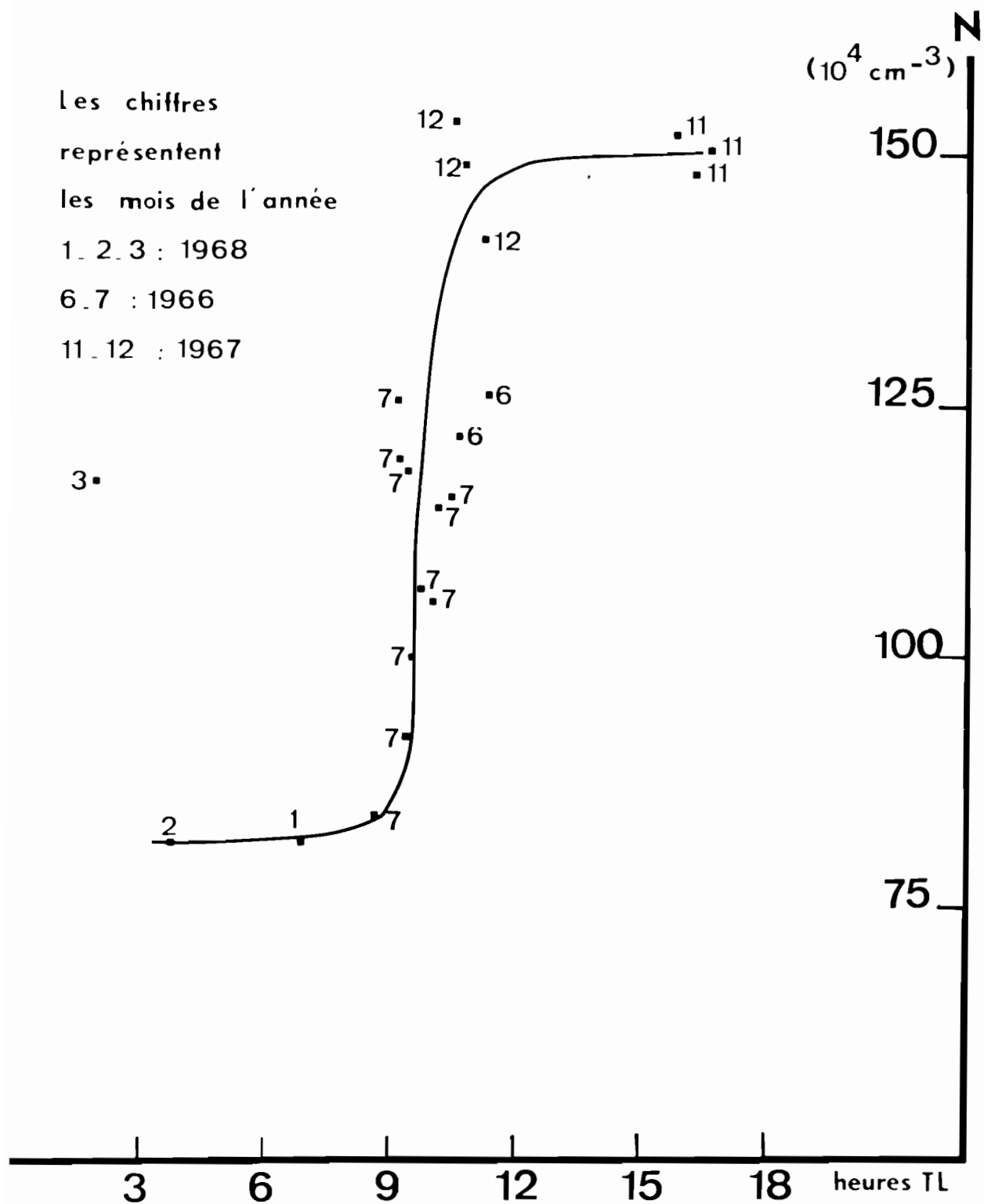


fig.24 Densité maxima NmF^2 en fonction du temps

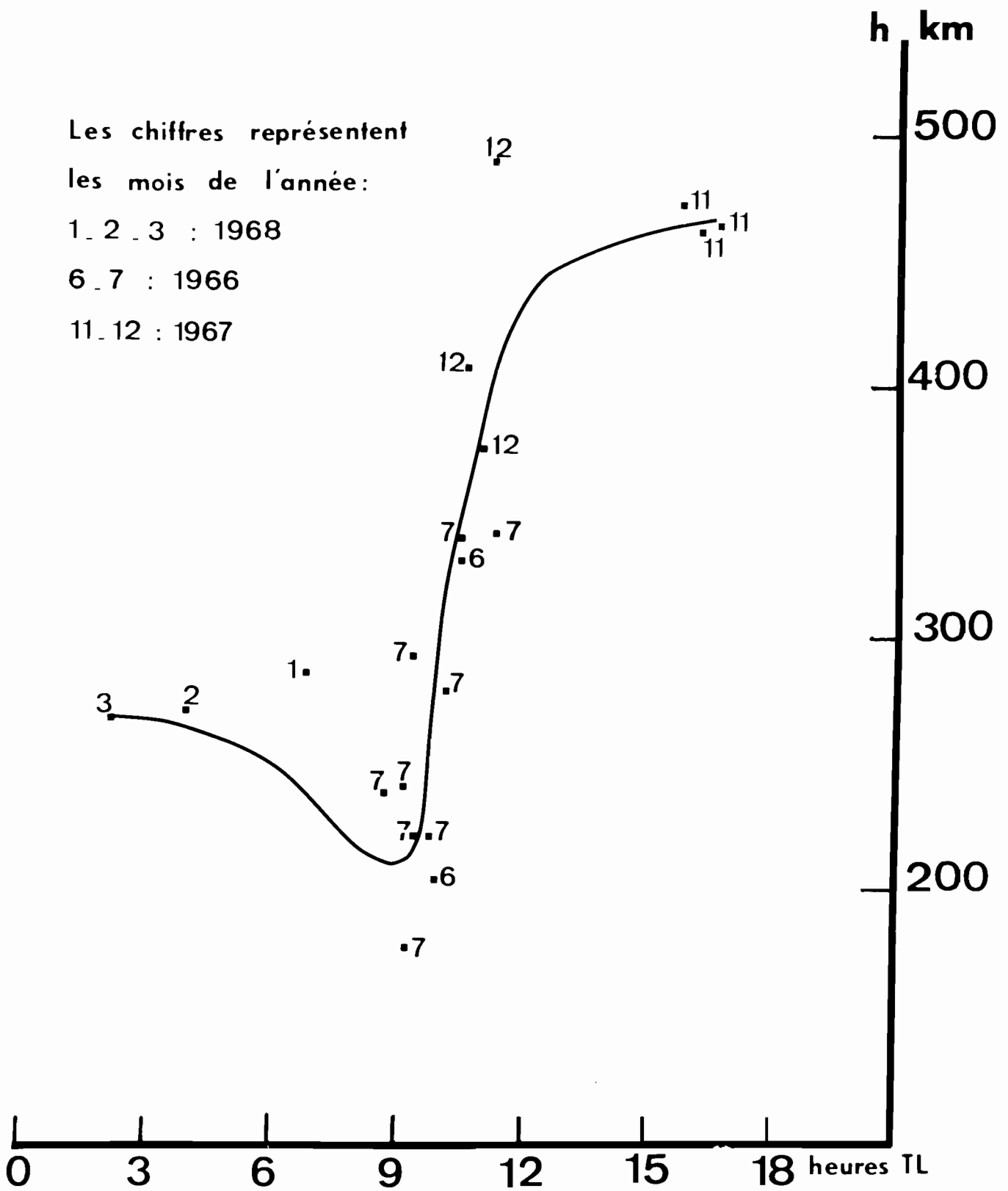


fig.25 Altitude du maximum d'ionisation $h_m F^2$ en fonction du temps

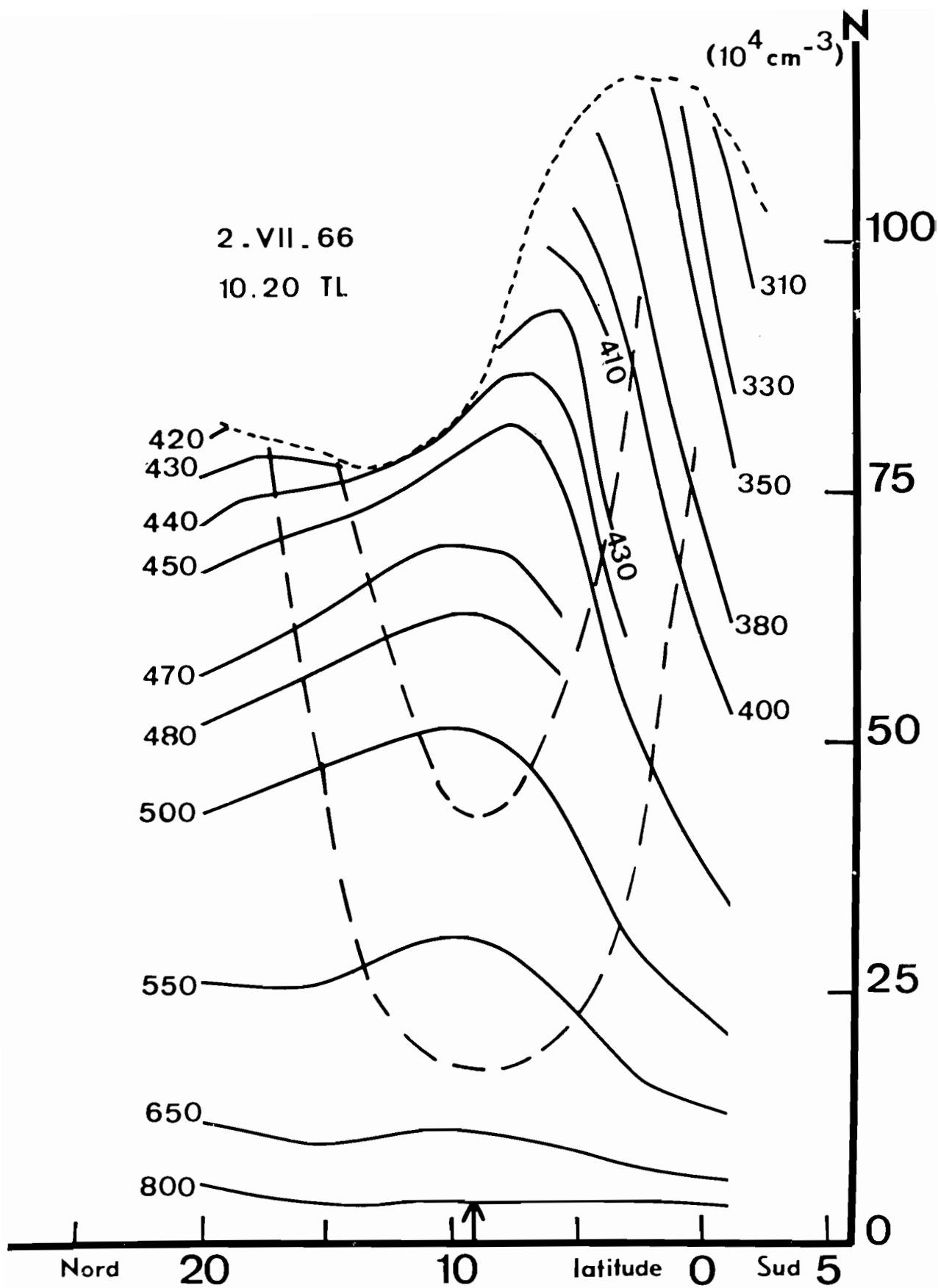


fig. 26 Densité ionique à altitude constante

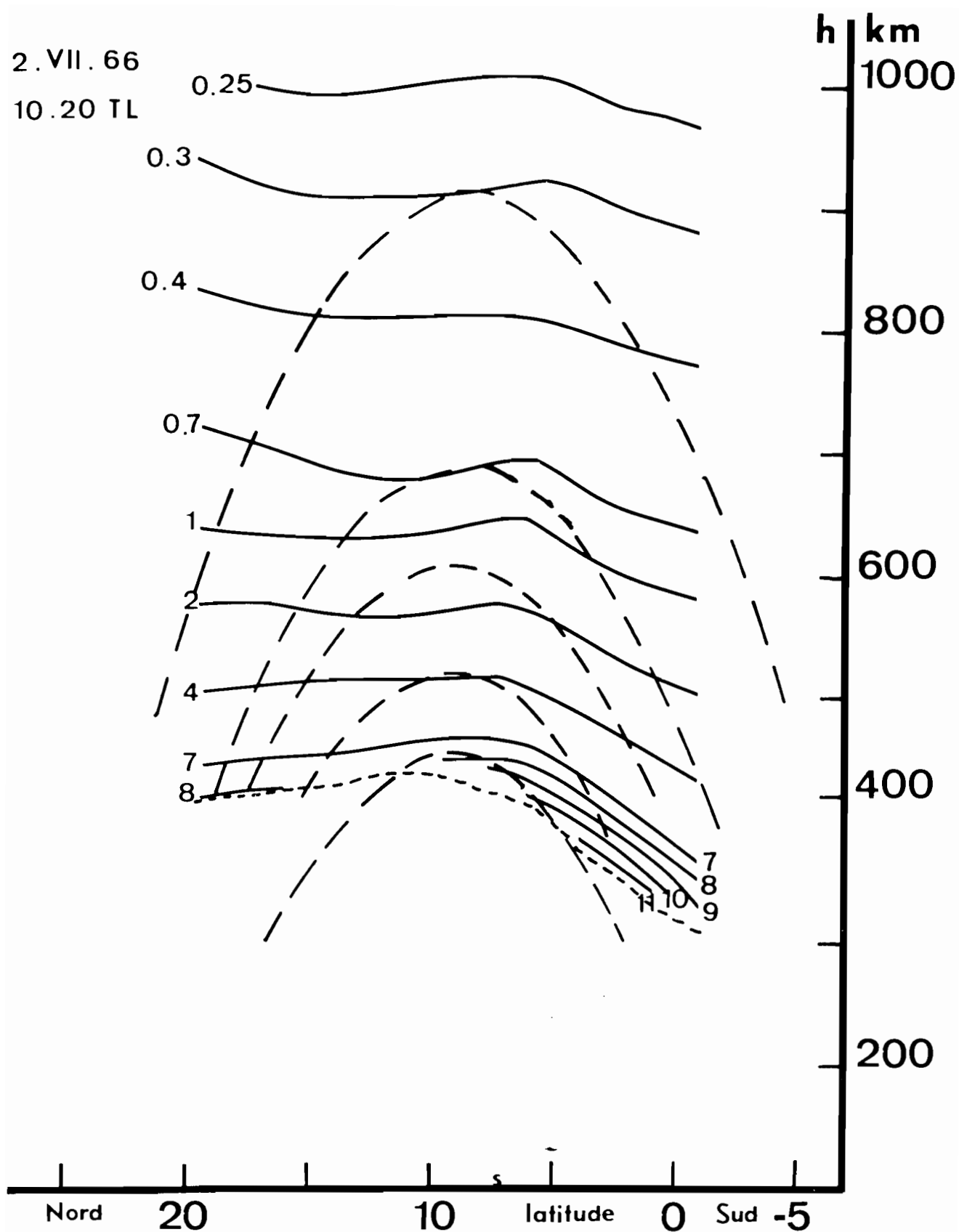


fig.27 Altitude des isoioniques (en 10^5 cm^{-3})

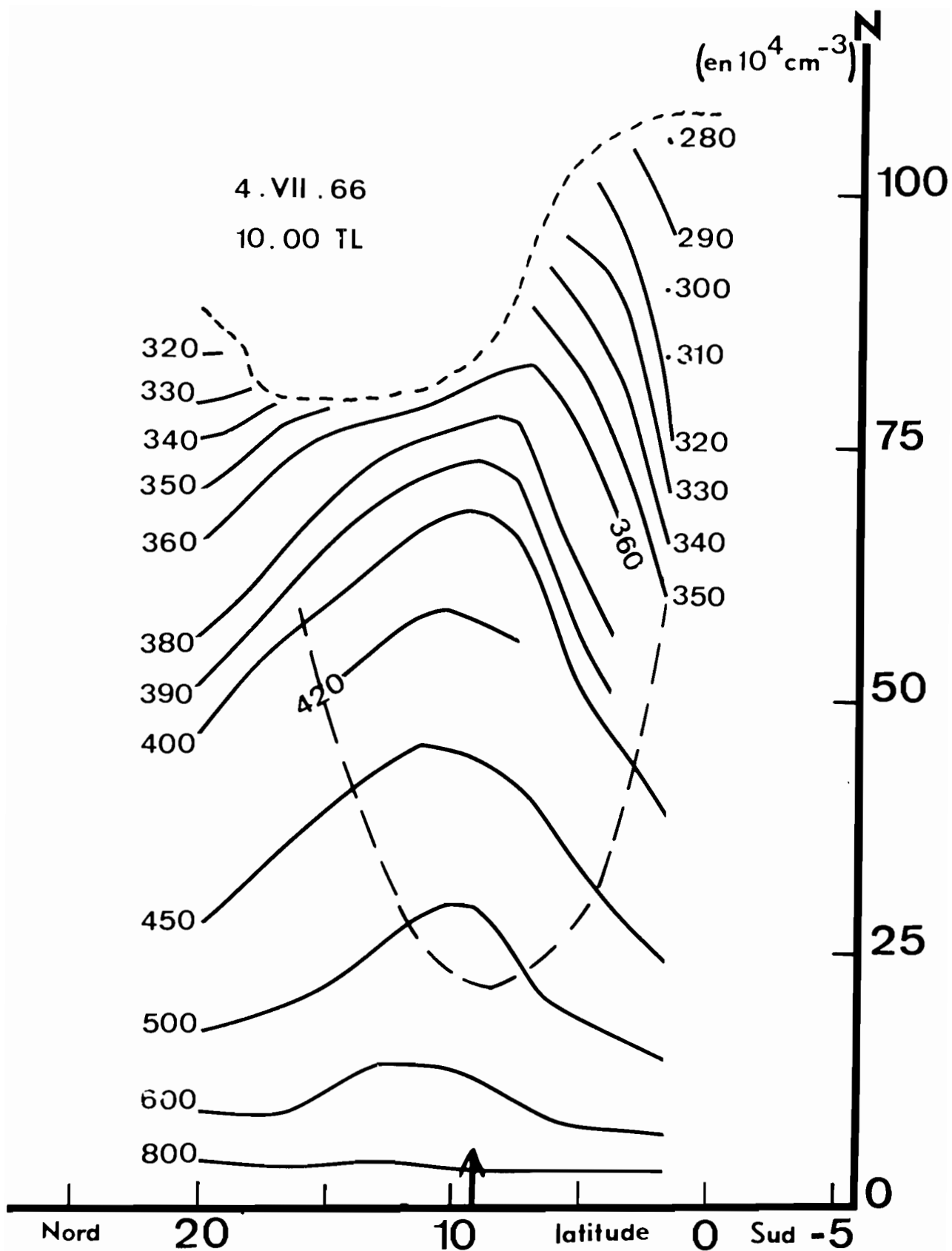


fig.28 Densité ionique à altitude constante

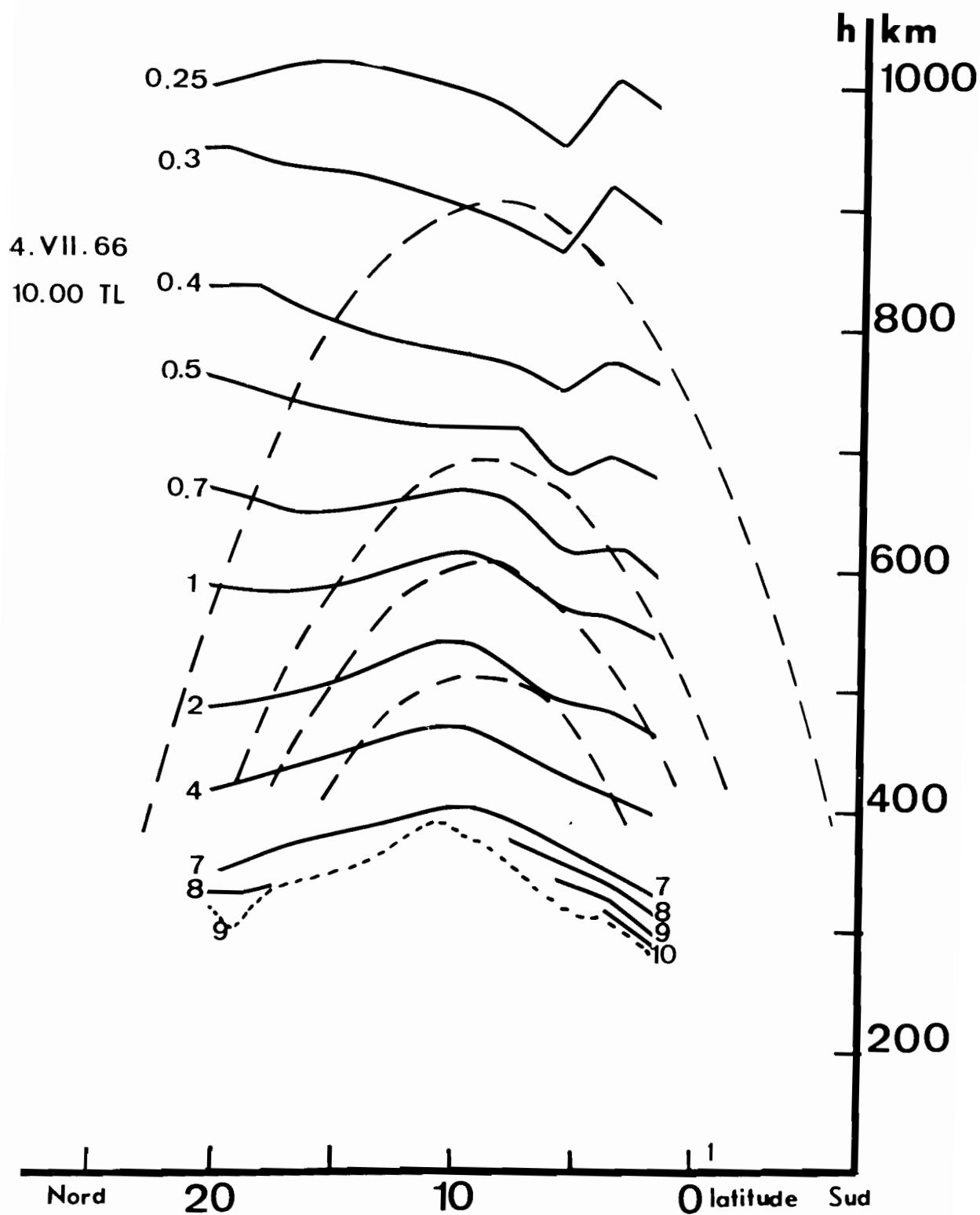


fig.29 Altitude des isoioniques en 10^5 cm^{-3}

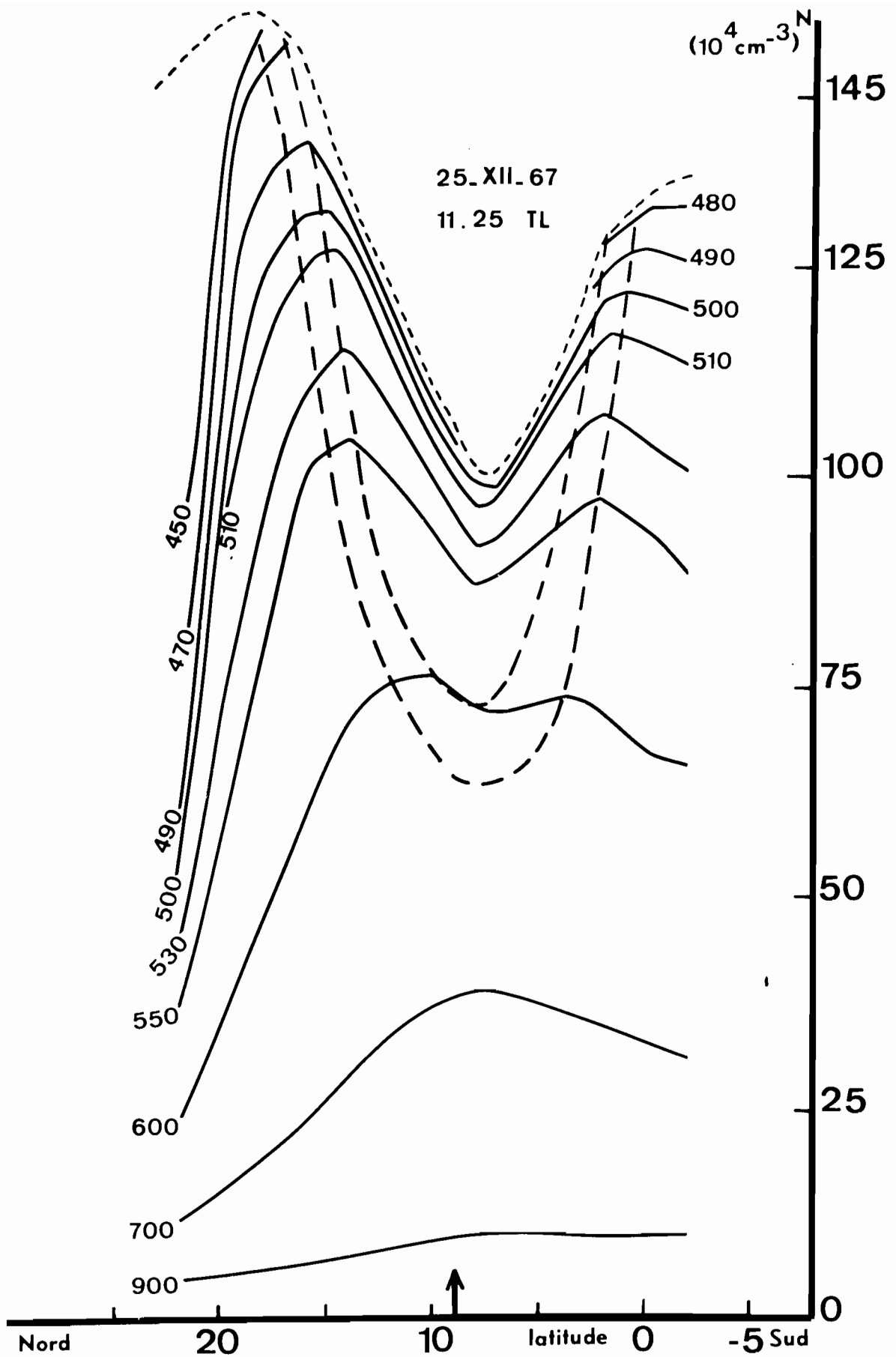


fig.30 Densité ionique à altitude constante

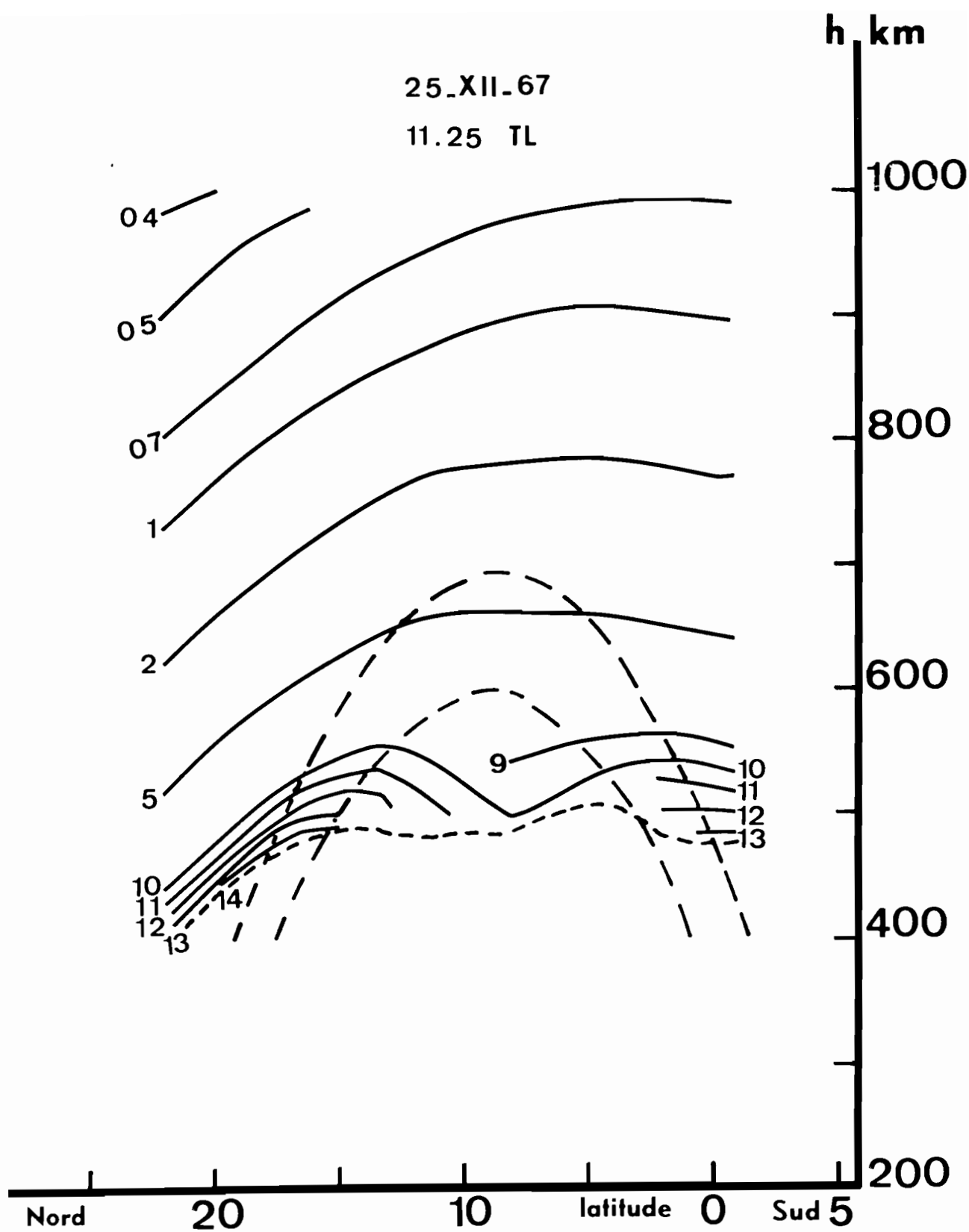


fig.31 Altitude des isoïoniques (en 10^5 cm^{-3})

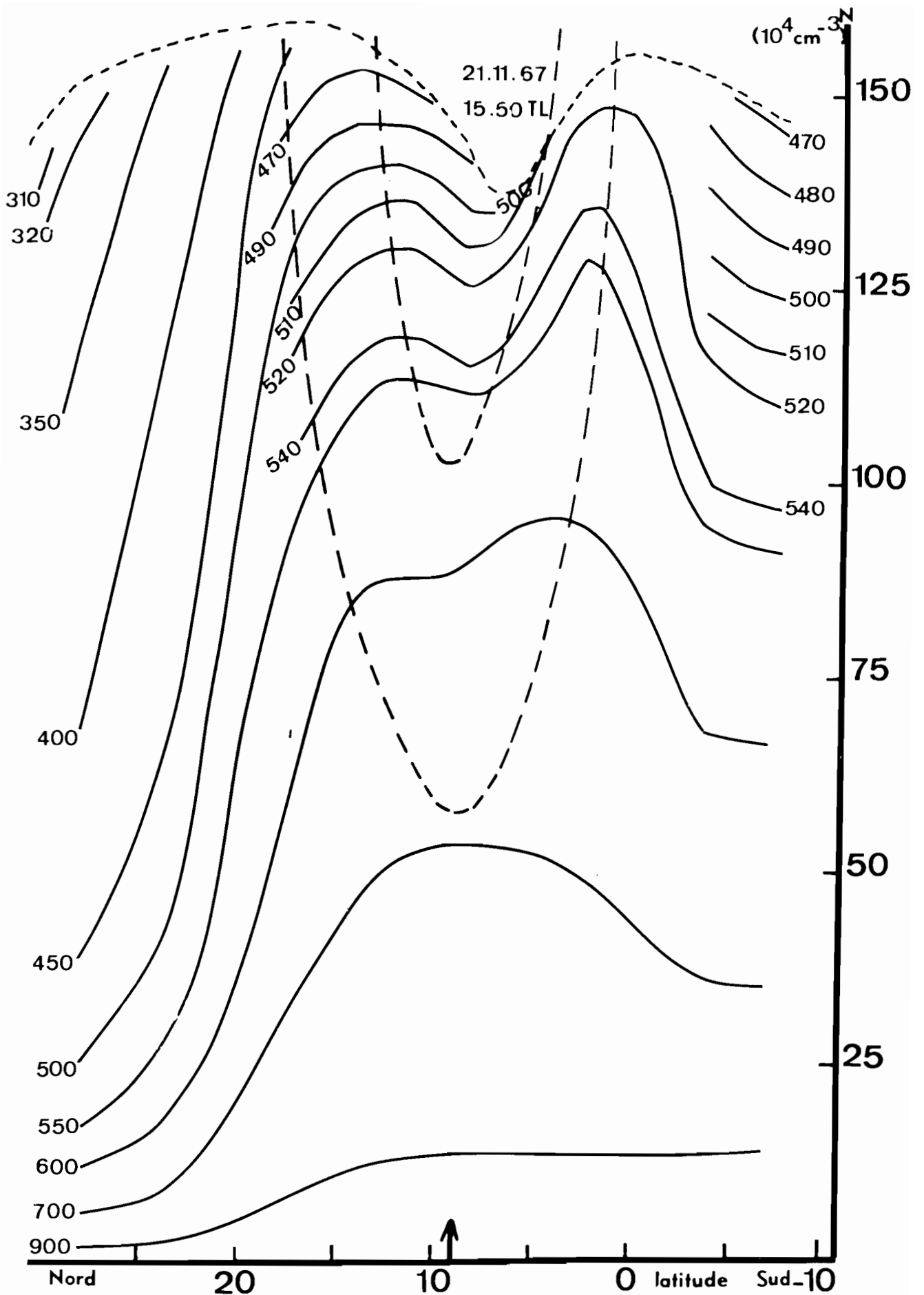


fig.32 Densité à altitude constante

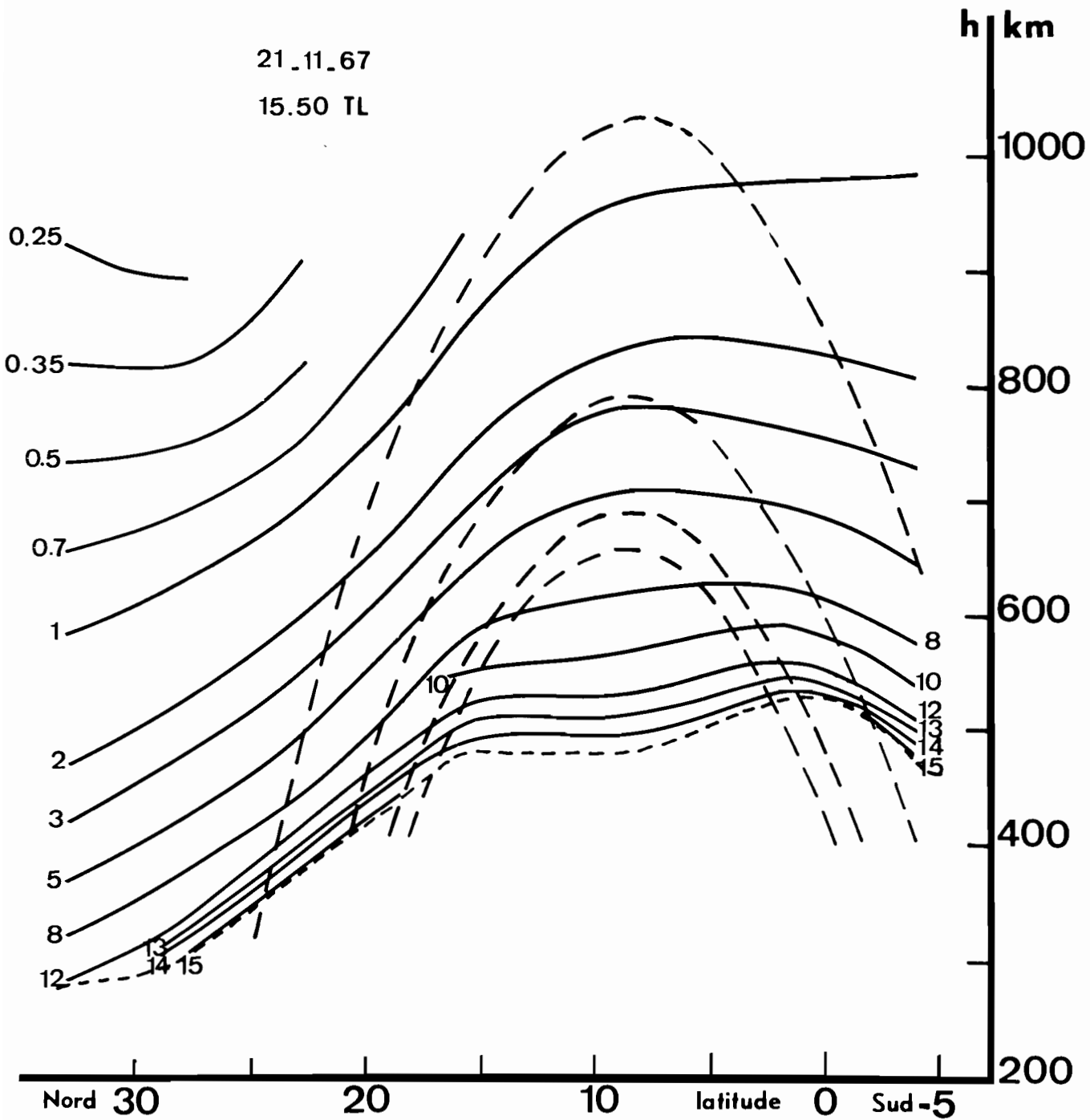


fig.33 Altitude des isoioniques (en 10^5 cm^{-3})

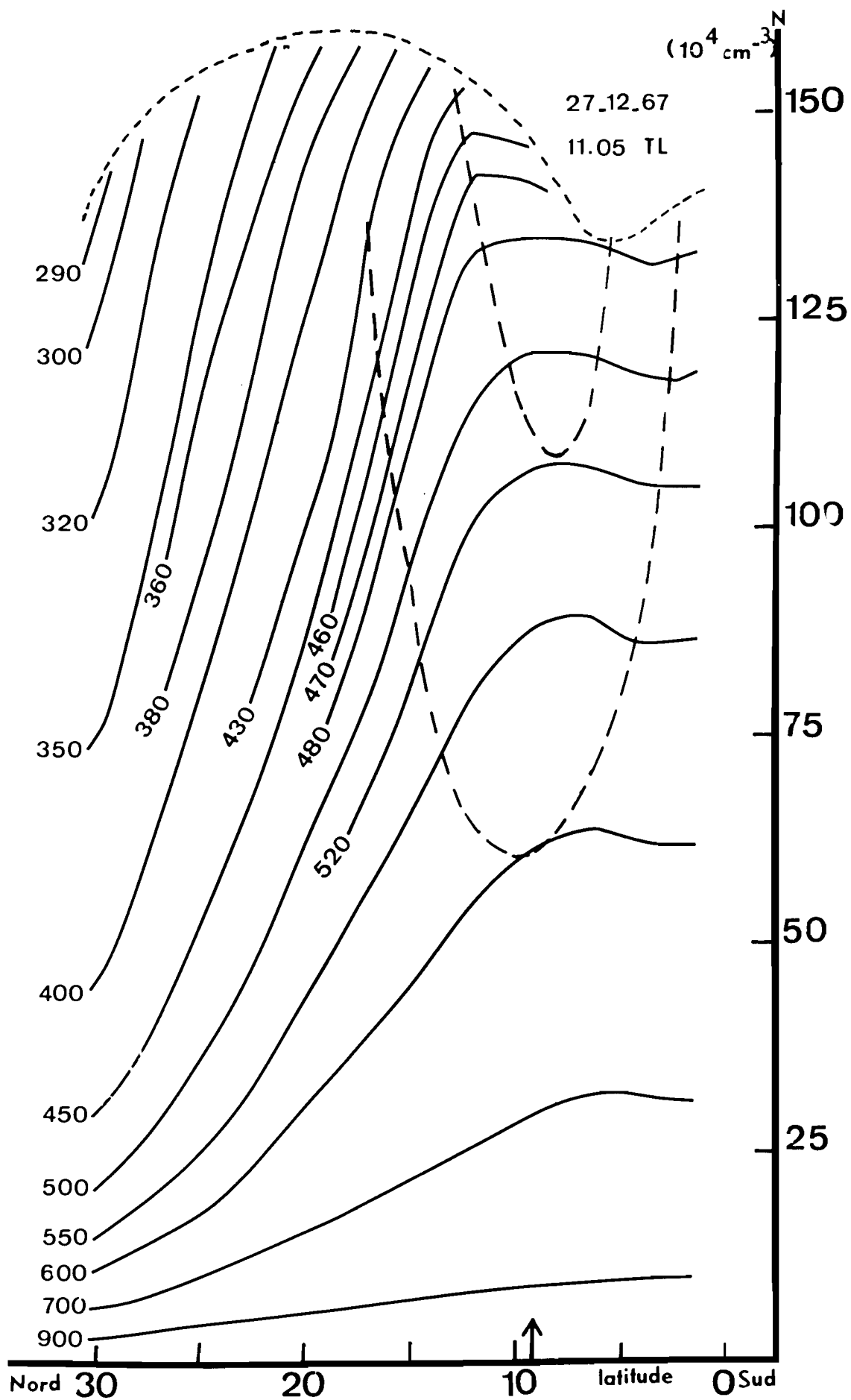


fig.35 Densité à altitude constante

27. 12 . 67

11. 05 TL

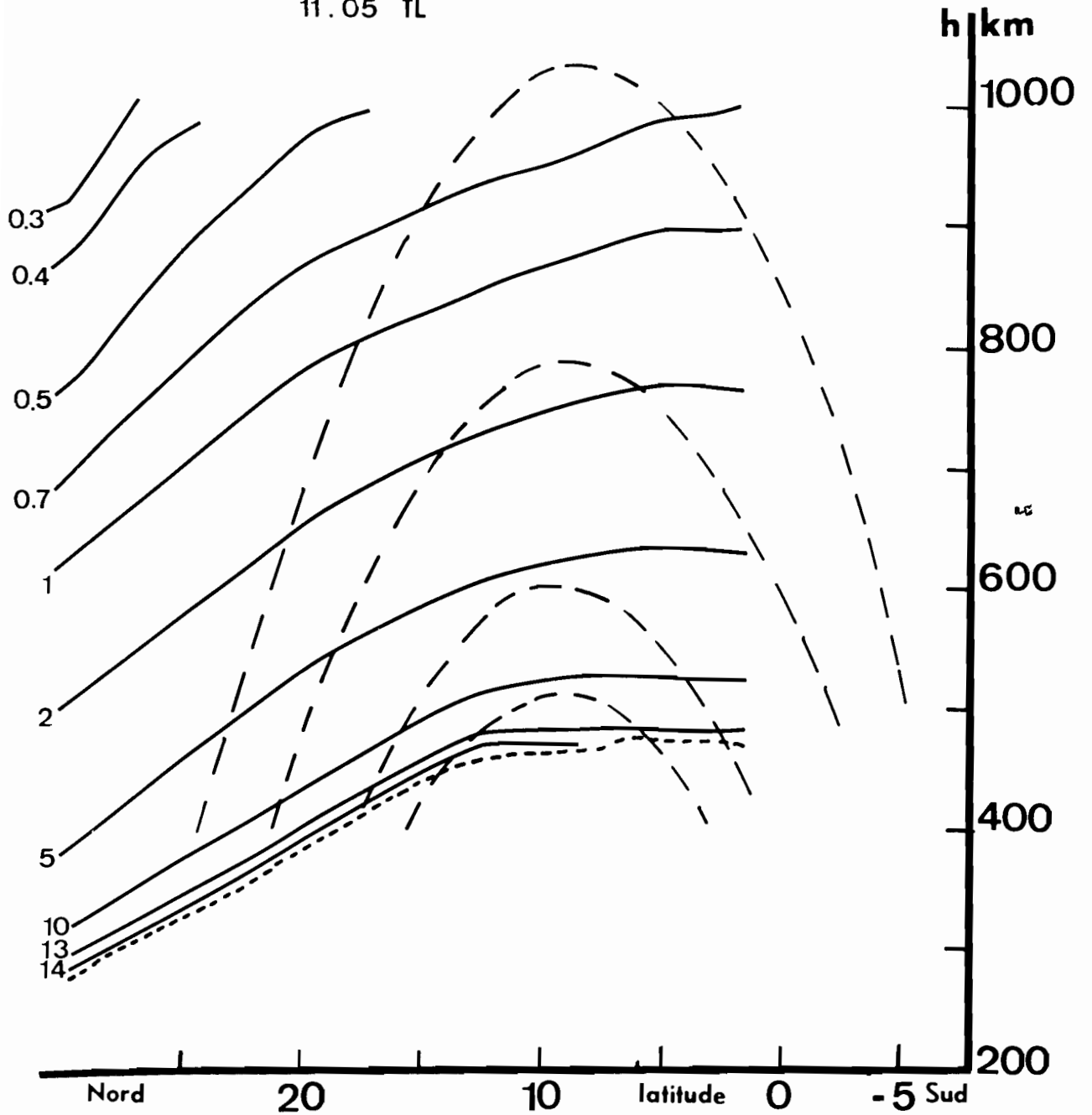


fig. 36 Altitude des isoïoniques (en 10^5 cm^{-3})

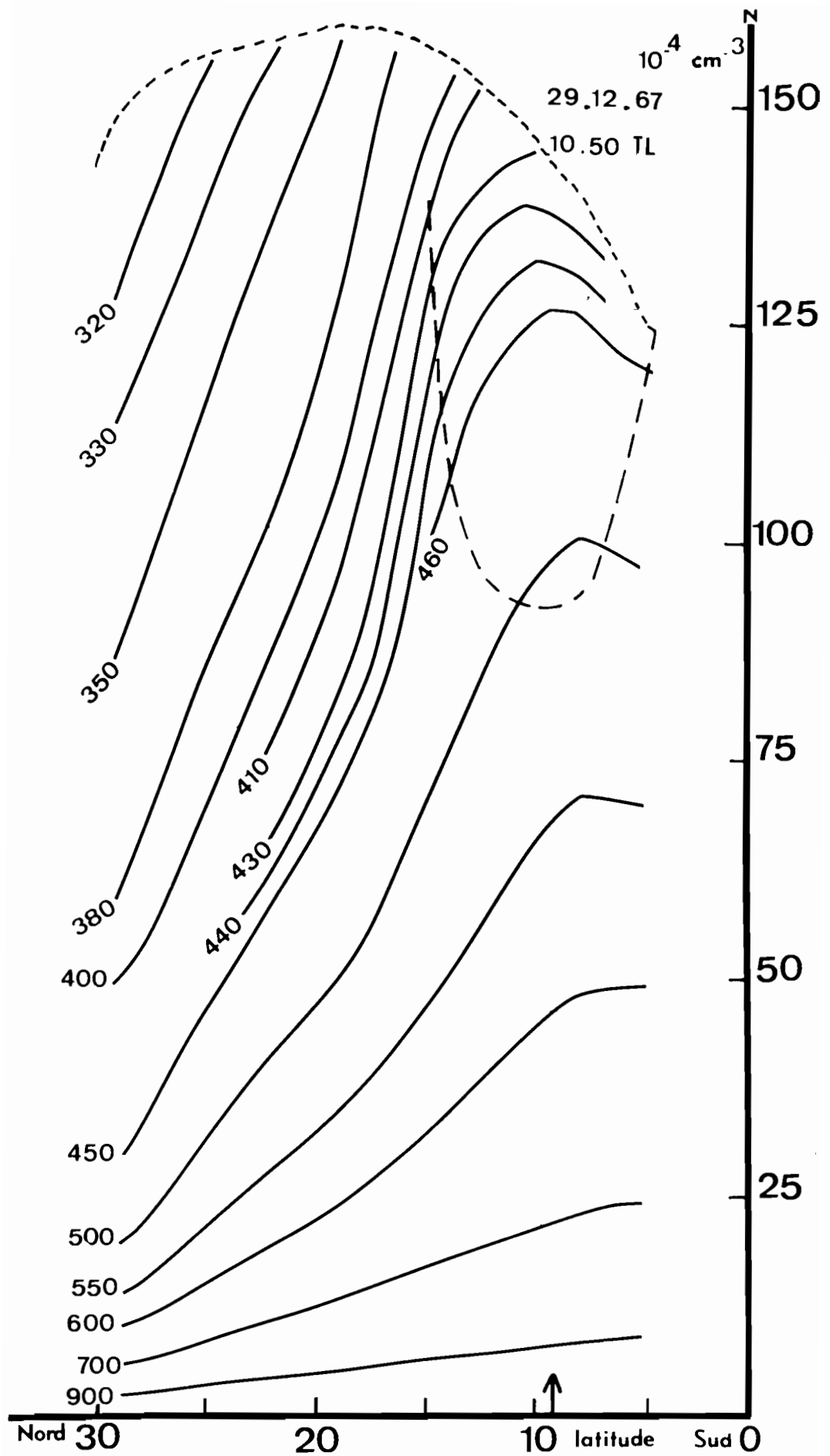


fig.37 Densité à altitude constante

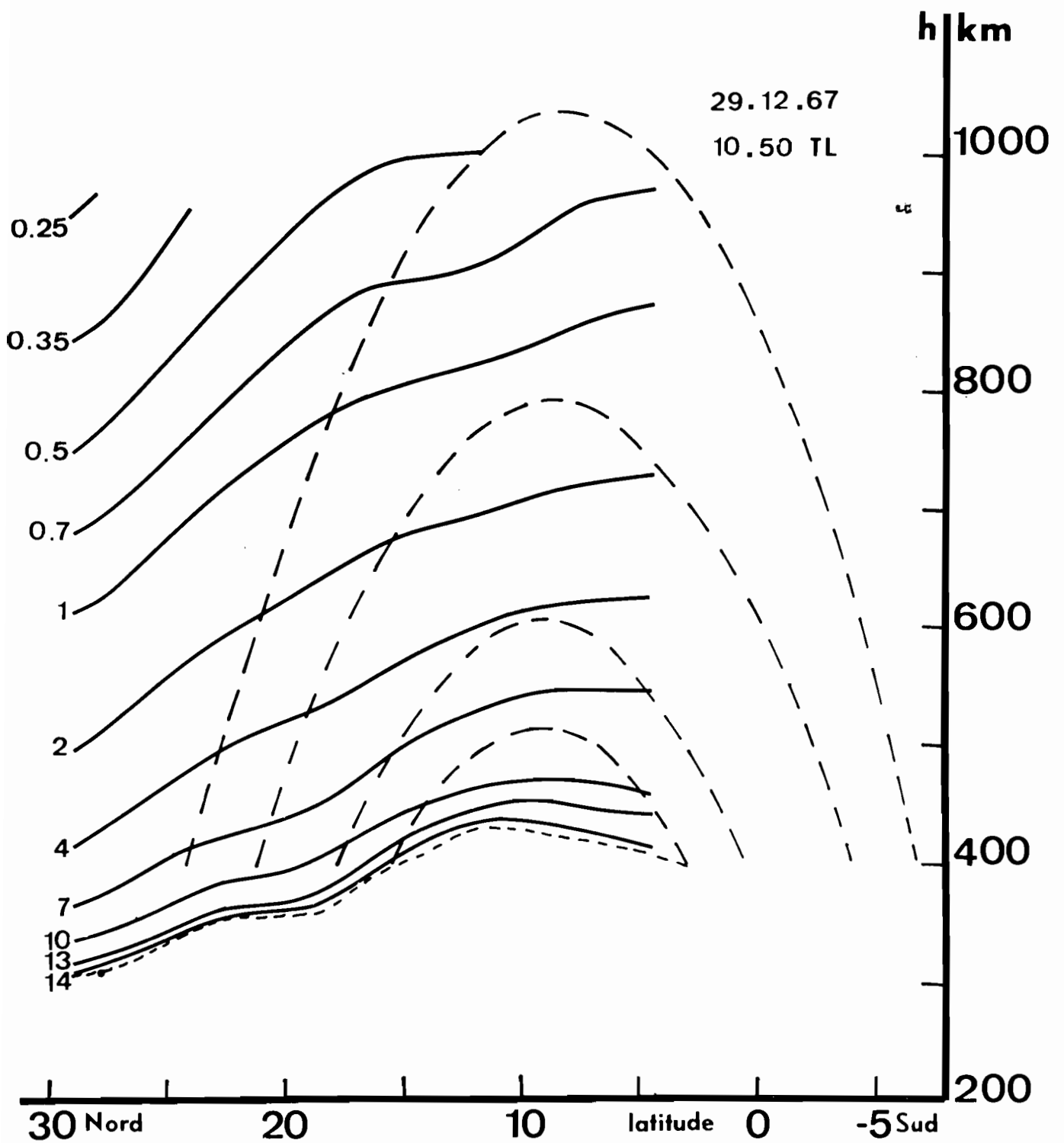


fig.38 Altitude des isoïoniques (en 10^5 cm^{-3})

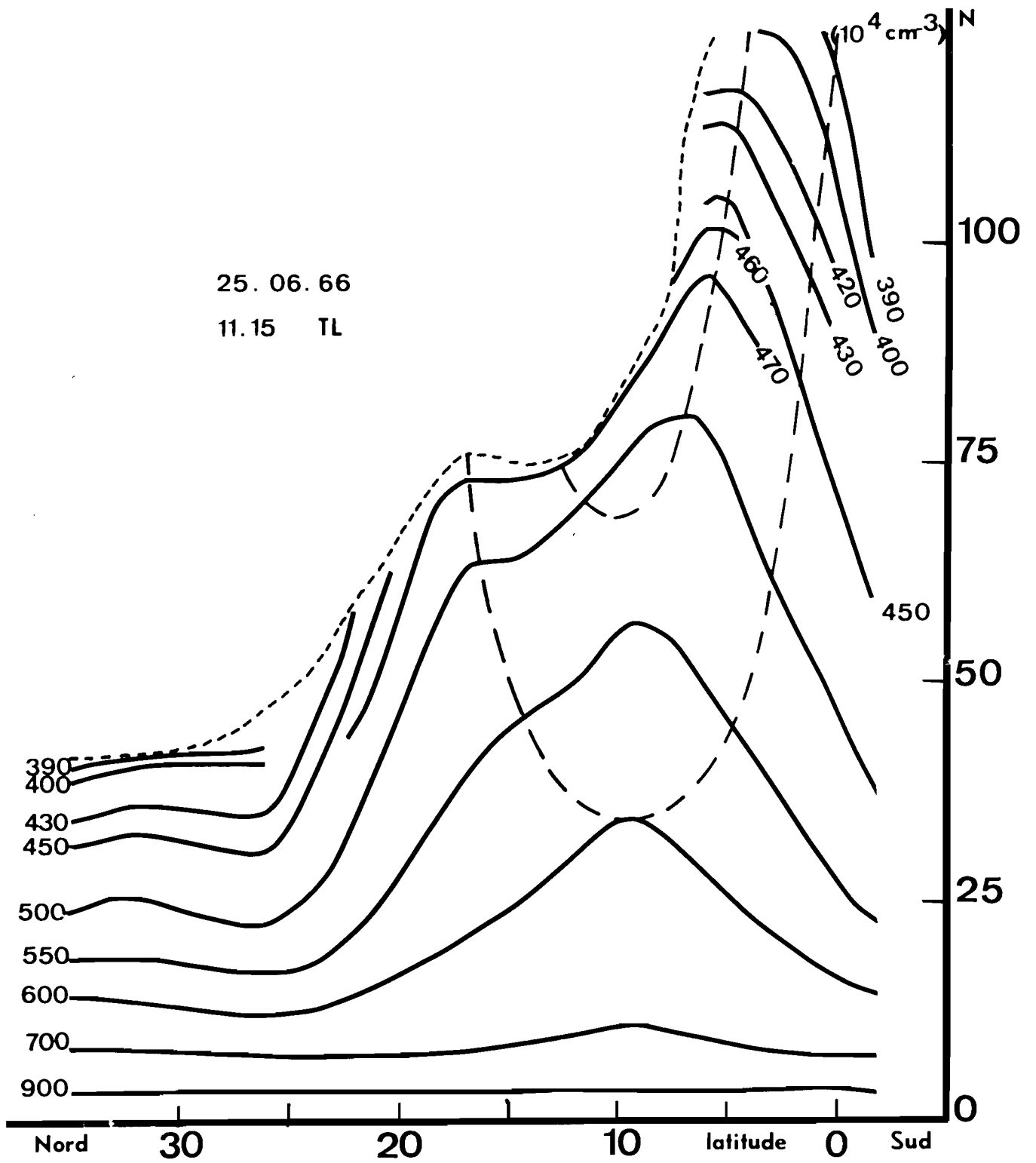


fig.39 Densité ionique à altitude constante

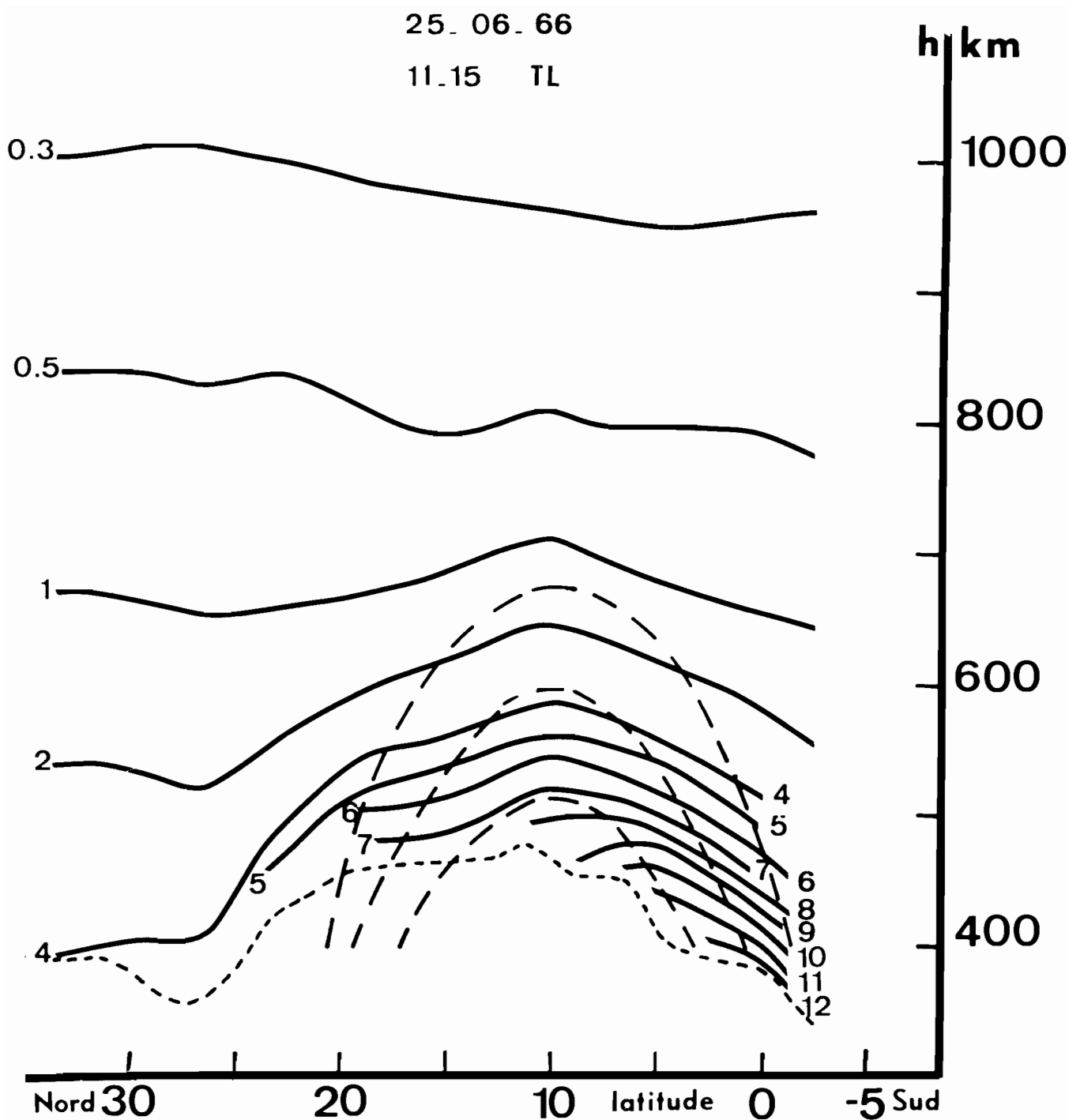


fig.40 Altitude des isoioniques (en 10^5 cm^{-3})

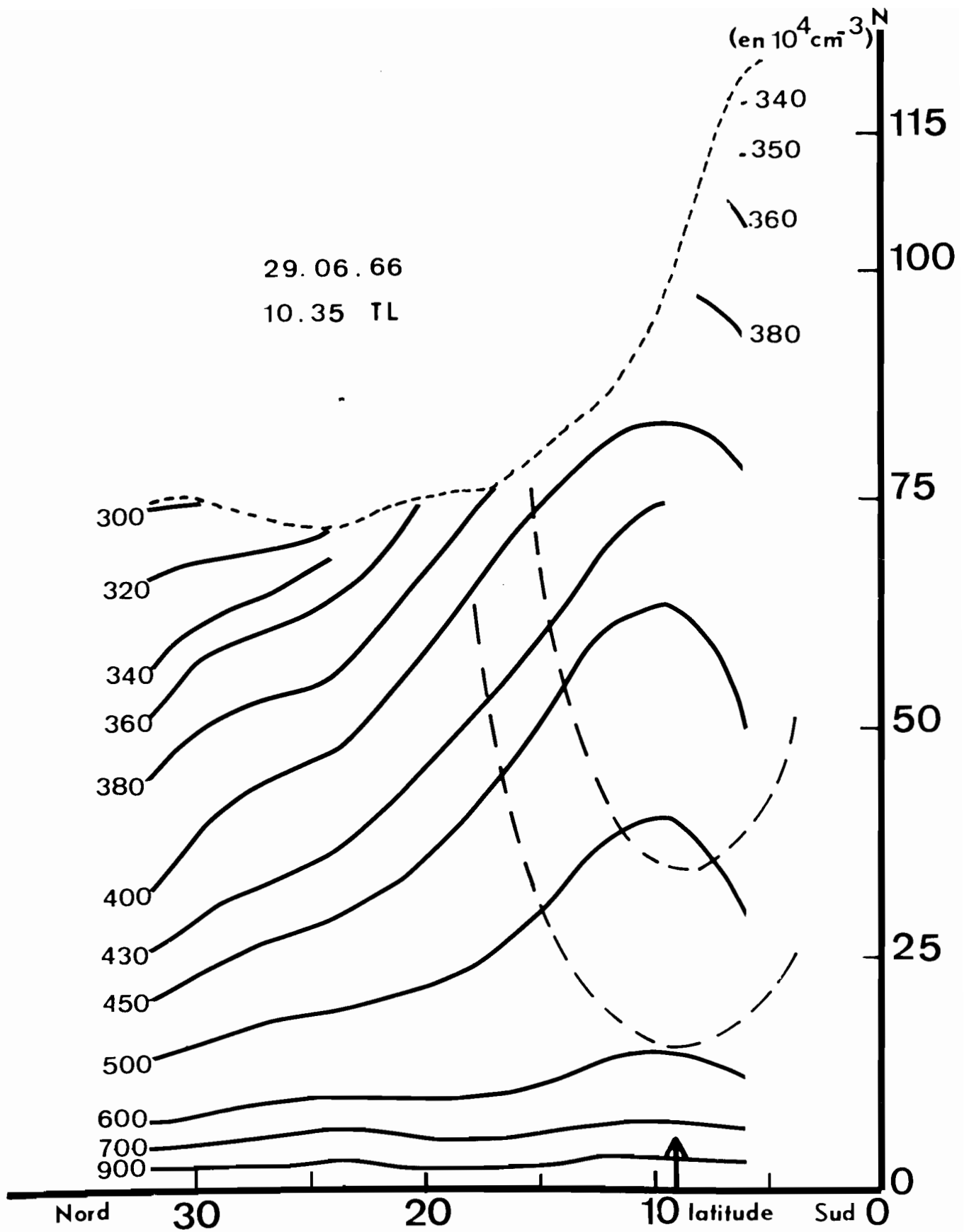


fig.41 Densité ionique à altitude constante

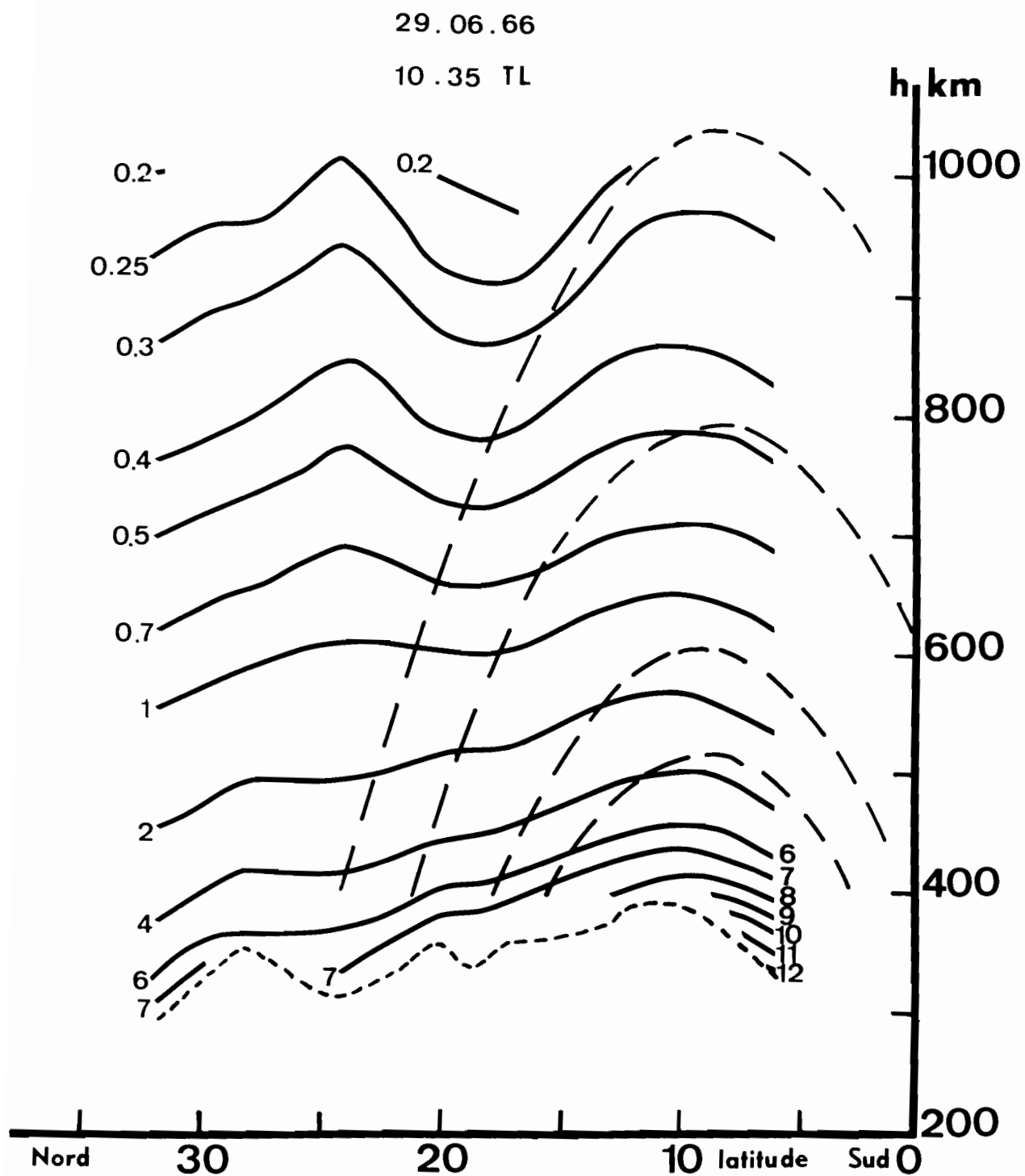


fig.42 Altitude des isoïoniques (en 10^5 cm^{-3})