

29/85

وزارة التعليم و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

## ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT **D'ÉLECTRONIQUE**

# PROJET DE FIN D'ETUDES

### S U J E T

**Etude Comparative des Méthodes  
de Prévisions Ionosphériques  
à l'Echelle Globale  
et d'un Modèle Local établi  
Au Niveau de TAMANRASSET**

Proposé par :

AKSAS Rabia

Etudié par :

HADJ SADOK M'Hamed  
NOUAS Ahmed

Dirigé par :

الجامعة الوطنية للعلوم والتقنية

المكنة

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

BIBLIOTHÈQUE

PROMOTION :

JANVIER 1985

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

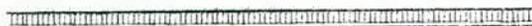
صَبَّحَانَكَ لَا إِلَهَ إِلَّا مَا

عَلَّمْتَنَا

إِيَّاكَ أَنْتَ الْعَلِيمُ الْحَكِيمُ

صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمُ

----- D E D I C A C E S -----



A mes chers parents pour tous leurs sacrifices.

A la mémoire de mes grands parents

M'hamed

A mes chers parents

Ahmed

oooooooooooo00000oooooooooooo

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

-----

Nos sincères remerciements vont à Monsieur A K S A S Rabéa, professeur à l'.E.N.P.A., pour nous avoir accepté dans sa division, nous permettant ainsi de bien mener ce projet de fin d'études.

Nous remercions également Monsieur OUHADJ Mahieddine, directeur du Service Planification des fréquences au niveau du Ministère des P.T.T. pour son accueil chaleureux et la facilité avec laquelle il a mis à notre disposition les valeurs futures des paramètres ionosphériques.

Il nous est agréable de pouvoir exprimer notre gratitude à Messieurs BOUDRAA et SAADOUN pour l'aide qu'ils nous ont apporté et qui a été précieuse pour notre initiation à la programmation Informatique.

Nous ne passons pas sans témoigner de notre profonde reconnaissance envers Monsieur F A I D Abdelkader, Directeur de la Bibliothèque Universitaire de BLIDA, ainsi que tous les membres de son équipe, pour l'aide qu'ils n'ont cessé de nous apporter durant notre formation.

Que tous ce qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce projet trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

oooooooooooo00oooooooooooo

S O M M A I R E

TABLE DES MATIERES

I N T R O D U C T I O N ..... P. 1

C H A P I T R E I. - G E N E R A L I T E S .....3

- Théorie de CHAPMAN ( Production d'électrons)
- Perte d'électron
- Formation et évolution des couches
- Les différentes couches et leurs influences sur les liaisons radio.
- Phénomènes ionosphériques spéciaux.

C H A P I T R E II.- Dépouillement et caractéristiques ionosphériques ..... 16

- Généralités
- Caractéristiques principales
- Caractéristiques mesurées
- Précision des mesures
- Médianes mensuelles

C H A P I T R E III. Méthodes de prévisions ionosphériques à l'échelle globale.

- Généralités
- Prévision de  $f_oE$
- Prévision de  $f_oE$  à TAMANRASSET
- Prévision de  $f_oF1$
- Prévision de  $f_oF1$  à TAMANRASSET

C H A P I T R E IV.- Station ionosphérique de TAMANRASSET - Bilan des mesures natérieures.... 32

C H A P I T R E V.- Modèle de prévisions des paramètres ionosphériques au niveau de TAMANRASSET ..... 35

\* Généralité

.../...

S O M M A I R E ( Suite )

---

\* Variations des fréquences critiques

- Champs de dispersion
- Variations diurnes
- Variations saisonnières
- Influence du soleil
- Résultats déduits et comparaisons
- Modèle de distribution verticale de la densité électronique dans les régions E et F.
- Variations de M (3000) F2
- Evolutions des hauteurs virtuelles des couches.

C O N C L U S I O N ..... 61

oooooooooooo000oooooooooooo

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

L'ionosphère joue un rôle essentiel dans la propagation des ondes radioélectriques, elle ne se comporte pas comme un milieu homogène à leur égard. La non homogénéité de l'atmosphère est liée à l'existence, dans les parties supérieures de la stratosphère (entre 60 et 2000 Km d'altitude) de régions où les gaz <sup>très</sup> raréfiés sont en même temps ionisés. A l'ensemble de ces régions, on donne le nom d'IONOSPHERE.

L'ionosphère est constituée de couches successives dont les principales sont désignées par les lettres D, E et F par ordre croissant d'altitude et d'intensité d'ionisation.

L'ionisation de l'ionosphère est en grande partie due au rayonnement électromagnétique du soleil dans la partie du spectre couvrant l'UV et les rayons X. Ce rayonnement présente des variations journalières, saisonnières et annuelles importantes qui influencent à des degrés divers l'ionisation des différentes couches. De ce fait on dira que l'ionosphère présente des caractéristiques instables liées à l'activité solaire.

Pour ce qui est de la propagation des ondes radioélectriques dans la gamme décamétrique, les couches E et F jouent surtout un rôle de réflecteur et permettent la transmission entre 2 points de la terre très éloignés l'un de l'autre. La couche D où l'atmosphère est encore dense est surtout surtout un milieu absorbant, les ondes radio plus longues sont réfléchies à des altitudes situées dans cette région. Les petites ondes pénètrent plus loin dans l'ionosphère avant de revenir vers le sol. Par suite, elles sont plus fortement absorbées et leur propagation est plus sensible aux variations de l'ionosphère.

En propagation ionosphérique, le choix de la fréquence est l'élément le plus important dans l'établissement d'une liaison ; aussi cherche t-on à prévoir , un certain temps à l'avance, l'état de l'ionosphère. Dans de nombreux pays, des services de prévisions

.../...

ionosphériques sont chargés de déterminer l'état de l'ionosphère au point de vue radioélectrique, deux ou trois mois à l'avance. Ces prévisions sont basées sur l'évolution des années antérieures, sur l'étude de l'activité solaire et sur les sondages ionosphériques. Pour une liaison déterminée, la fréquence optimale de trafic varie continuellement au rythme de l'ionisation.

Notre but, dans ce projet, est d'étudier dans une première étape la formation et l'évolution des différentes couches ionosphériques suivant les hypothèses de CHAPMAN puis de voir leurs influences sur les liaisons radio-électriques dans la gamme décimétrique.

La deuxième étape sera consacrée à l'étude des caractéristiques ionosphériques au niveau de TAMANRASSET. Pour cela on dispose des données de cette station durant la période de 1956 à 1970.

Cette étude nous permettra de dégager des modèles mathématiques permettant la précision du comportement futur de l'ionosphère ( au moins un mois à l'avance) et donc celle des liaisons radio-électriques dans la gamme décimétrique.

Nos modèles seront comparés à ceux du CCIR et aux résultats réels au niveau de cette station. On dégagera la précision de ces modèles locaux.

Le traitement des données est entièrement effectué sur micro-ordinateur "APPEL II", traces inclus.

C H A P I T R E I

1.- G E N E R A L I T E

Le phénomène de propagation à très grandes distances (plusieurs milliers de Km ) des ondes décamétriques, malgré les obstacles représentés par les montagnes et la courbure terrestre, conduit à l'hypothèse de l'existence dans la haute atmosphère d'une ou plusieurs couches ionisées qui jouent le rôle de réflecteur pour ces ondes. A l'ensemble de ces couches on donne le nom d'IONOSPHERE .

L'ionosphère est donc la région ionisée de l'atmosphère neutre, elle s'étend environ de 50 à 2000 Km.

1 - 1 - DETERMINATION EXPERIMENTALE DE LA CONSTITUTION DE L'IONOSPHERE .

Parmi de nombreuses méthodes, on se borne à celle, fondamentale, de BRET et TUVE par laquelle se font les sondages ionosphériques verticaux ( Fig. I -1) pratiqués quotidiennement ( par exemple de quart d'heure en quart d'heure) à la plupart des stations ionosphériques. Ces auteurs firent appel à une technique alors nouvelle: émission (suivant la verticale) de trains pulsés à front raide et de courte durée (environ 1/10000 s) constitués par une onde porteuse de fréquence convenable ( 0,5 à 10 MHz ). La réception, au voisinage de la station d'émission, de l'écho du train pulsé ainsi émis, permet, par la durée mesurée du trajet aller et retour, de calculer une " hauteur virtuelle " correspondant à la réflexion. Cette hauteur virtuelle diffère de la hauteur vraie du fait que l'on suppose que toute la propagation s'est faite à la vitesse de la lumière dans le vide, alors qu'elle devient plus faible pour les trajets dans l'ionosphère. Les conditions de la réflexion sont celles d'une interaction entre le champ électrique de l'onde montante et des électrons libres provenant de l'ionisation des couches considérées. Quant aux ions - positifs pour la plupart - ils n'entrent pas directement dans ce mécanisme, étant trop lourds.

.../...

L'ensemble des électrons se comporte comme un milieu optique d'indice  $n$  donné par : 
$$n^2 = 1 - \left( \frac{1}{\epsilon_0} - \frac{Ne^2}{m\omega^2} \right)$$

- $\epsilon_0$  : étant la constante diélectrique du vide.
- $N$  : la densité cubique des électrons libres
- $e, m$  : charge et masse des électrons
- $\omega$  : la pulsation de l'onde porteuse.

Dans ce cas l'onde montante se réfléchit (vers le bas) quand  $n$  s'annule, ce qui détermine la valeur de  $N$  ainsi atteinte en fonction de la fréquence de l'onde envoyée et de la hauteur virtuelle correspondante. Une telle mesure appliquée à un émetteur muni d'un balayage automatique en fréquence ( $\omega$  devenant ainsi un paramètre d'exploration), donne un ionogramme mettant en évidence les différentes couches constituant l'ionosphère à ce moment. Les sondages successifs en fourniront l'évolution.

A chaque fois que par augmentation progressive de " $\omega$ " on atteint une densité  $N$  qui dépasse celle de la concentration maximale existant dans la couche correspondante, l'onde traverse cette couche pour aller se réfléchir sur une couche supérieure si une concentration  $N$  suffisante y est trouvée ( Fig. I -2 ).

On appelle fréquence critique la fréquence pour laquelle une onde cesse d'être réfléchi par une couche déterminée.

L'expérience précédente nous amène aux conclusions suivantes:

- L'ionosphère est constituée de couches successives dont les principales sont désignées par les lettres D, E et F.
- Ces couches sont classées par ordre croissant d'altitude.
- La densité électronique et la fréquence critique correspondantes augmentent en même temps que l'altitude.

#### 1 -2 SOURCES D'IONISATION DE L'IONOSPHERE

L'ionisation de l'ionosphère demande des causes permanentes, car la recombinaison des électrons et d'ions positifs à la suite de collisions et, par attachement des électrons à des atomes ou des molécules de gaz neutres, la feraient disparaître.

.../...

La principale cause est le rayonnement électromagnétique du soleil. En effet, l'ionisation augmente en général, pendant le jour. Cependant comme elle ne disparaît pas totalement la nuit, il existe d'autres causes, probablement des particules solides venant du soleil, des météorites, des rayons cosmiques, etc...

Le pouvoir ionisant résiduel du rayonnement solaire dépend de la longueur de son trajet dans l'atmosphère, donc de la distance zénitale du soleil (noté :  $X$  ) ; le taux de production d'ionisation est maximal quand le soleil est au zénit (  $X = 0$  ); mais la densité électronique présente des variations géographiques, diurnes et saisonnières appréciables.

## 2.- T H E O R I E D E C H A P M A N - P R O D U C T I O N D E S E L E C T R O N S

Cette théorie a été exposée en 1931, elle simplifie le problème mais explique assez bien la formation et l'évolution des couches normales E et F1 . Par contre l'ionisation au niveau de la couche F2 subit des mouvements de transport et de dérives électromagnétiques, cette couche se prête mal au modèle de CHAPMAN.

Si je note par  $P(Z)$  le taux de production des électrons et par  $D$  celui de leur disparition , on dit qu'une couche est en équilibre lorsque les vitesses des deux processus ( production et perte sont égales : donc  $P(Z) = D$  .

L'évolution d'une couche est régie par l'équation de continuité:

$$\frac{dN}{dt} = P(Z) - D - \text{div } N\vec{V} \quad (I-1)$$

-  $\vec{V}$  : vitesse moyenne des électrons

-  $N$  : densité électronique

-  $\text{div}(N\vec{V})$  : divergence du flux, tenant compte du terme de transport.

### 2.1 - HYPOTHE DE CHAPMAN

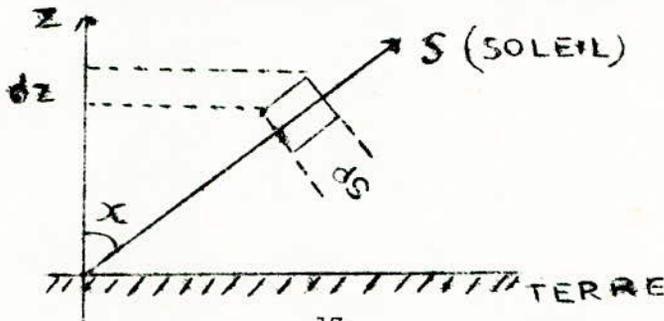
Le calcul de  $P(Z)$  est compliqué vu que l'on doit tenir compte de toutes les radiations du spectre solaire et de tous les constituants atmosphériques. CHAPMAN a fait les

.../...

hypothèses simplificatrices suivantes:

- Le rayonnement ionisant est monocromatique.
- L'atmosphère contient un seul gaz ionisant, de densité  $n(Z)$  et de section efficace d'absorption et de photoionisation  $\sigma$  et  $\sigma'$
- L'atmosphère est isotherme et la densité particulaire suit la loi de l'équilibre :  $n(Z) = n_0 \text{ EXP } ( -Z / H )$  ( I-2 )
  - $n_0$  : densité particulaire au sol (  $Z = 0$  )
  - $H = \frac{K T}{m g}$  : échelle de hauteur.
  - $m$  : masse moyenne particulaire
  - $T$  : température absolue
  - $g$  : champ de gravité

2.2 - CALCUL DU FLUX RESIDUEL A UNE ALTITUDE Z :



Sur un trajet  $dS = \frac{dz}{\cos \alpha}$ ; le nombre  $d\Phi$  de photons absorbé est:

$$d\Phi = - \frac{\sigma n(Z) \cdot \Phi(Z) dz}{\cos \alpha} \quad ( I - 3 )$$

On aura, en intégrant de Z à l'infini.

$$\Phi ( Z ) = \Phi_{\infty} \text{ EXP } ( - \frac{\sigma}{\cos \alpha} \int_Z^{\infty} n(Z) \cdot dZ ) \quad ( I - 4 )$$

$\Phi_{\infty}$  étant le flux de photons solaires au sommet de l'atmosphère.

En posant  $N(Z) = \frac{1}{\cos \alpha} \int_Z^{\infty} n(z) dz$  (I-5)

On aura :

$$\Phi ( Z ) = \Phi_{\infty} \text{ EXP } ( - \sigma N(Z) ) \quad ( I - 6 )$$

$N(Z)$  : représente le nombre de particules contenues dans le cylindre oblique de section droite unité, et au dessus de l'altitude Z.

En tenant compte de l'expression (I-2), l'expression (I-5) s'écrit :

$$N(Z) = \frac{n_0 H}{\cos \alpha} \text{ EXP } ( - Z/H ) \quad ( I - 7 )$$

.../...

2.3 - CALCUL DE P(Z)

Le nombre d'électrons produits par seconde et par unité de volume est égal à la diminution du flux de photons ( par ionisation ) sur un trajet unité:

$$P(Z) = \sigma' n(Z) \Phi(Z) \quad (I-8)$$

Compte tenu des expressions (I-6) et ( I-7 ) ; l'expression (I-8) s'écrira :

$$P(Z) = \sigma' n_0 \Phi_{\infty} \text{EXP} \left( - Z/H - \frac{\sigma' n_0 H}{\text{COS } \chi} \text{EXP}(-Z/H) \right) \quad (I-9)$$

2.3.1 - MAXIMUM DE PRODUCTION ELECTRONIQUE:

En égalisant la dérivée de l'expression (I-9) à zéro on aura :

$$\text{EXP}(Z m/H) = \sigma' H n_0 / \text{COS } \chi \quad (I-10)$$

L'expression du taux de production maximum s'écrit :

$$P_m = P(Z_m) = \frac{\sigma' \Phi_{\infty}}{\sigma' H e} \text{COS } \chi \quad (I-11)$$

( e = 2,718 )

Les expressions ( I-10 ) et ( I-11 ) montrent que lorsque le soleil s'approche du zénith (  $\chi$  diminue ) , le taux de production augmente tandis que l'altitude  $Z_m$  du maximum s'abaisse.

En utilisant l'altitude réduite  $\xi_0 = \frac{Z - Z_m}{H}$

$Z_m$  : Valeur de  $Z_m$  pour ( $\chi = 0$  ).

Lorsque  $\chi = 0$  ; c'est à dire le soleil est au zénith, le taux de production maximum s'écrira :  $P_{om} = \frac{\sigma' \Phi_{\infty}}{\sigma' H e}$

L'expression ( I-9 ) en fonction de  $\xi_0$  s'écrit:

$$P(Z) = P_{om} \text{EXP} \left( 1 - \xi_0 - \frac{\text{EXP}(-\xi_0)}{\text{COS } \chi} \right) \quad (I-12)$$

La figure (I-13) représente les courbes de production électronique en fonction de la hauteur réduite conformément à l'expression (I-12)

On utilise souvent l'altitude réduite  $\xi = \frac{Z-Z_m}{H}$  , on aura à partir de l'expression (I-12)  $P(Z)$

$$P(Z) = P_{om} \text{COS } \chi \text{EXP} \left( 1 - \xi - \text{EXP}(-\xi) \right) \quad (I-13)$$

.../...

### 3.- PERTE D'ELECTRONS

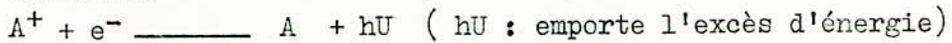
Cette perte se produit lors d'une fixation sur les particules neutres ( O<sub>2</sub> ; O ; N<sub>2</sub> ; N ) ou sur les ions positifs existant dans l'atmosphère. On désigne par :

- n(e) : le nombre d'électrons
- n (A<sup>+</sup>) : le nombre d'ions positifs A<sup>+</sup>
- n (a) : le nombre de particules neutres ~~de~~ a .

La recombinaison se fait de deux façons :

- Par recombinaison radiative avec A<sup>+</sup>

~~XXXXXXXXXX~~



La vitesse de ce processus est:

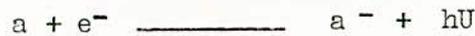
$$D_1 = - \alpha n(e) \cdot n (A^+)$$

Compte tenu de la neutralité du milieu , c'est à dire N(e) = n(A<sup>+</sup>)

$$D_1 = - \alpha N^2 (e) \quad (I-14)$$

$\alpha$  : Coefficient de recombinaison de l'ordre de: 10<sup>-14</sup> m<sup>3</sup>/s dans la couche E.

- Par attachement sur particule neutre (a)



La vitesse du processus est

$$D_2 = - b N(e) n (a) = - \beta N(e) \quad (I-15)$$

Car n(a) est pratiquement constant, puisque grand devant n(e)

$\beta$  : coefficient d'attachement , variable avec l'altitude.

### 4.- FORMATION ET EVOLUTION DES COUCHES

#### 4.1 - Couches de CHAPMAN :

La production d'électrons se fait le jour avec une vitesse donnée par la théorie élémentaire de CHAPMAN (expression I-13) L'équation différentiel qui donne la densité d'électrons à une altitude donnée est :

$$\frac{d n(e)}{dt} = P (Z) - D \quad (I-16)$$

Avec P(Z) donné par l'expression (I-13) et D par (I-14), l'équation (I-16) ne tient pas compte du terme de transport( div N∇ ) qui contribue pourtant à la formation de la couche F<sub>2</sub> . L'équilibre de la couche permet d'écrire : P(Z) = D ce qui donne :

$$N_{\alpha}(e) = \left( \frac{Pom}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \cos^{\frac{1}{2}} \chi \exp^{\frac{1}{2}} (1 - \xi - \exp(-\xi)) \quad (I-17)$$

$$\text{ou } N_{\beta}(e) = \left( \frac{Pom}{\beta} \right) \cos \chi \exp (1 - \xi - \exp(-\xi)) \quad (I-18)$$

Les densités maximales obtenues par sondage vertical sont:

$$N_m(e) = \left( \frac{Pom}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \cos^{\frac{1}{2}} \chi \quad (\text{couche } \alpha \text{ CHAPMAN}) \quad (I-19)$$

$$\text{ou } N_m(e) = \left( \frac{Pom}{\beta} \right) \cos \chi \quad (\text{couche } \beta \text{ CHAPMAN}) \quad (I-20)$$

Comme le carré de la fréquence critique  $f_0$  d'une couche ionosphérique est proportionnel à la densité maximale

$$(f_0^2 = \frac{e^2}{4\pi^2(me \epsilon_0)} N_m(e))$$

Les relations caractéristiques pour les couches de CHAPMAN et sont:

$$f_{0\alpha} = K \cos^{1/4} \chi \quad (I-21)$$

$$\text{ou } f_{0\beta} = K' \cos^{1/2} \chi \quad (I-22)$$

#### 4.2 - EVOLUTION DES COUCHES PENDANT LA NUIT.

En absence de production d'électrons, l'équation (I-16) devient:

$$\frac{d(N(e))}{dt} = -\alpha N_2(e) \quad (I-23)$$

$$\text{ou } \frac{d(N(e))}{dt} = -\beta N(e) \quad (I-24)$$

Si  $N_0(e)$  représente la densité avant l'occultation, les équations (I-23) et (I-24) donnent l'évolution des couches:

$$N_{\alpha}(e) = \frac{N_0(e)}{1 + \alpha N_0(e)t} \quad (I-25)$$

$$N_{\beta}(e) = N_0(e) \cdot \exp(-\beta t) \quad (I-26)$$

#### INFLUENCE DE L'IONOSPHERE SUR LA PROPAGATION DES ONDES

On peut montrer que l'influence de l'ionosphère est double. D'une part, en raison des courants créés par le déplacement des électrons, elle modifie la constante diélectrique et, par suite, l'indice de réfraction du milieu, d'autre part, en raison des chocs entre les électrons et les molécules neutres, elle crée une certaine

.../...

absorption des ondes. L'absorption est d'autant plus importante que la fréquence est faible et que la pression résiduelle de l'air est plus grande, c'est à dire que l'altitude est plus basse.

La fréquence critique dépend de la couche ionosphérique considérée et, en outre, elle varie en fonction de la saison, de l'heure et du cycle d'activité solaire. Si une onde de fréquence  $f$  atteint une couche ionisée de fréquence critique  $f_c$  sous un angle  $\theta$  deux cas peuvent se présenter :

$$\begin{aligned} - f < \frac{f_c}{\sin \theta} & : \text{l'onde est réfléchiée vers le bas} \\ - f > \frac{f_c}{\sin \theta} & : \text{l'onde traverse la couche ionisée.} \end{aligned}$$

#### LES DIFFERENTES COUCHES ET LEURS INFLUENCES SUR LES LIAISONS RADIO

##### 1.- COUCHE D :

Elle s'étend entre 55 et 95 Km d'altitude. Sa densité électronique est faible ( entre  $10^8$  et  $10^9$  électrons/m<sup>3</sup>); donc il en est de même pour sa fréquence critique (0,5 MHz au maximum) . On notera aussi que c'est une couche diurne (absence durant les heures nocturnes).

Il y a une forte absorption au niveau de cette couche des ondes radioélectriques, donc une grande opposition à la propagation de celle-ci, dans les bandes des moyennes longueurs d'onde, pendant le jour. La nuit, pour ces mêmes ondes, les transmissions sont beaucoup plus intenses. Pour de telles ondes, la couche D se comporte comme un "rideau opaque" tiré de jour au dessous de la couche E.

On notera aussi que la couche D apparaît après les couches E et F<sub>1</sub> et disparaît avant, d'autre part, étant la plus basse, elle cesse la première d'être éclairée; et, étant située dans une région de plus grande pression les rencontres entre particules y sont plus fréquentes et les recombinaisons plus rapides.

##### 2.- COUCHE E :

Elle s'étend entre l'altitude 95 Km et l'altitude 150 Km environ. C'est une couche régulière, elle se prête bien au

.../...

modèle de CHAPMAN. On l'appelle souvent couche de KENNELLY-HEAVISIDE. Sa concentration électronique dépend étroitement de la distance zénithale solaire avec un maximum diurne vers midi local et un maximum saisonnier en été sa fréquence critique  $f_{0E}$  présente des variations latitudinales (maximum aux équateurs) et augmente avec l'activité solaire. Elle réfléchit les ondes relativement longues. Elle est surtout remarquable par la très forte variation diurne de sa densité ionique. Il existe une faible absorption des ondes au niveau de cette couche.

### 3.- COUCHE F :

Elle commence à une altitude d'environ 150 Km On a remarqué qu'il y a une grande différence entre le comportement de sa partie inférieure et celui de sa partie supérieure, d'où l'idée de la subdiviser en deux couches  $F_1$  et  $F_2$ .

#### a) COUCHE $F_1$ :

Située entre 150 et 200 Km d'altitude, elle présente une grande variation diurne avec un maximum aux environs de midi local et un maximum saisonnier en été; sa densité électronique de l'ordre de  $10^{11}$  électrons par  $m^3$  donc une fréquence critique de l'ordre de 7 MHz au maximum, elle est assez conforme au modèle de CHAPMAN.

#### b) COUCHE $F_2$ :

Cette couche permet des liaisons radio-électriques à longues distances avec des fréquences élevées dans la gamme décimétrique car c'est la plus ionisée des couches ionosphériques ( $10^{12}$  électrons/ $m^3$ ). Son ionisation n'est pas liée uniquement au processus de production et de recombinaison des ions; des mouvements de transport et de dérives électrodynamiques de cette ionisation ont également lieu. La couche  $F_2$  se prête mal à une représentation par le modèle de CHAPMAN.

L'ionisation de cette couche est due essentiellement aux rayonnements U.V. du soleil. Le maximum d'ionisation est du au processus de diffusion vers le haut des électrons produits au niveau de la couche  $F_1$  en présence d'un ralentissement du

mécanisme de disparition lorsque l'altitude augmente et que la fréquence des collisions diminue ( atmosphère peu dense). Ce maximum apparait aux environs de 350 Km d'altitude le jour et vers 400 Km la nuit.

#### PHENOMENES IONOSPHERIQUES SPECIAUX

L'ionosphère est aussi le siège de quelques phénomènes plus ou moins fréquents qui agissent sur la propagation.

##### 1.- PERTURBATION IONOSPHERIQUE A DEBUT BRUSQUE (PIDE)

Il arrive parfois que, subitement, toutes les liaisons sur ondes décamétriques soient interrompues, les liaisons sur ondes hectométriques n'étant pas affectées et celles sur ondes kilométriques étant plutôt renforcées. Ensuite, la situation redevient normale en une demi-heure environ. Ce phénomène se produit uniquement pour des liaisons dont le trajet se trouve dans la portion de terre éclairée par le soleil. Il est attribué à une brusque augmentation de l'ionisation à des altitudes faibles où la pression est assez grande et où les chocs entre électrons et molécules sont donc plus nombreux et, par suite, l'absorption plus forte.

##### 2.- ORAGES MAGNETIQUES

Les taches solaires importantes peuvent provoquer un bouleversement assez important de l'ionosphère par émission de lumière ultra-violette et de particules électrisées. Ces perturbations sont associées aux aurores polaires et aux variations du magnétisme terrestre. Au point de vue radio-électrique, les fréquences critiques sont abaissées et l'absorption augmente sensiblement.

##### 3.- ECLIPSE DE SOLEIL.

L'ionosphère passe brusquement des conditions de jour aux conditions de nuit, ce qui montre que l'ionisation suit sans retard l'influence solaire.

U?CHR#827): "6"; CHR#89); "62"

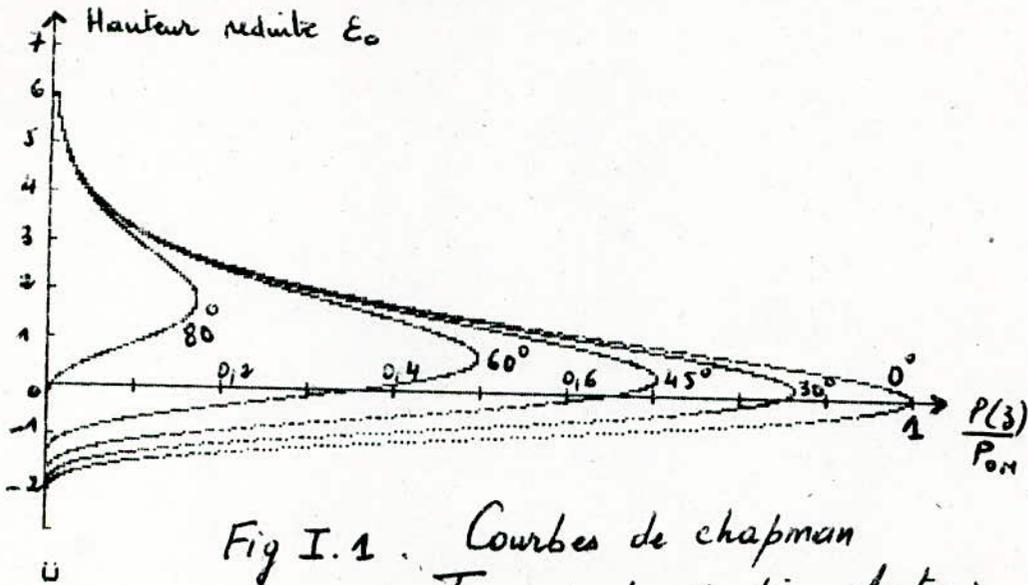
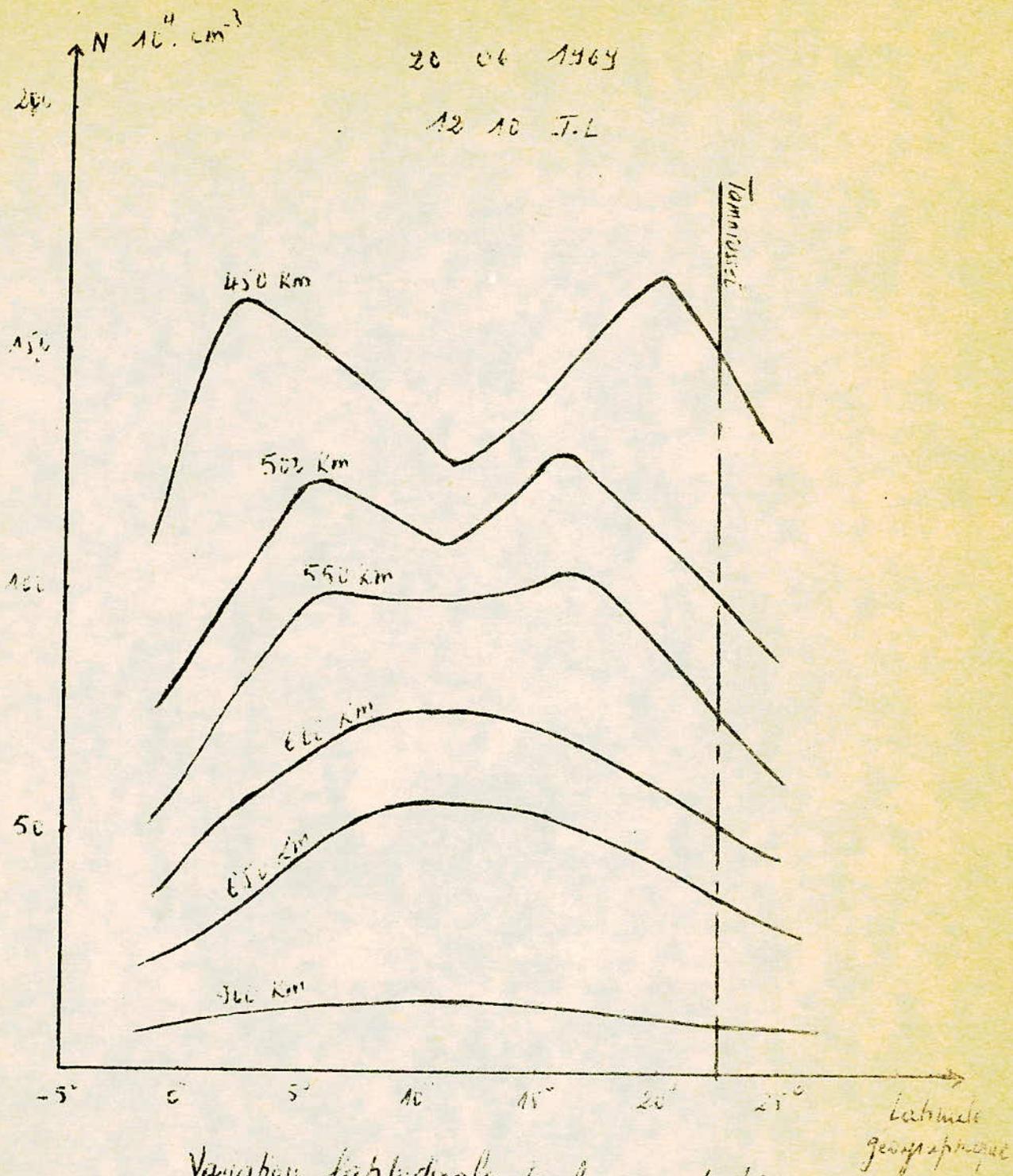


Fig I.1 . Courbes de chapman  
Taux de production electronique  
en fonction de la hauteur reduite  
pour differents  $\alpha$ .



Variation latitudinale de la concentration  
électronique pour quelques altitudes de  
l'ionosphère en période d'été.

Données des satellites ISIS  
Résultats présentés par P. Couvez, 1972.

C H A P I T R E II

DEPUILLEMENT ET CARACTERISTIQUES IONOSPHERIQUES

I.- GENERALITES

La méthode de BREIT et TUVE par laquelle se font les sondages ionosphériques verticaux pratiqués au moins toutes les heures, chaque sondage s'effectuant en quelques secondes ou dizaines de secondes, nous donne, si l'émetteur est muni d'un balayage automatique en fréquence, des enregistrements photographiques appelés " ionogrammes " qui mettent en évidence, sondage par sondage ( par cycle de balayage ) les variations des durées de trajets, c'est à dire des hauteurs virtuelles de reflection en fonction de la fréquence. L'échelle des hauteurs de l'enregistrement est linéaire, celle des fréquences est généralement logarithmique. La bande de fréquence explorée s'étend entre 1 et 20 MHz, ce qui permet dans presque tous les cas de mesurer les paramètres des différentes couches ( mis à part la région D).

On sélectionne certaines caractéristiques parmi celles que l'on détecte à partir de l'ionogramme, qui sont particulièrement significatives pour des études scientifiques du milieu ionosphérique et pour l'exploitation.

Le dépouillement est la technique employée pour évaluer les caractéristiques ionosphériques, il est régi par des règles internationales, dans le choix, l'identification et la mesure de ses caractéristiques ( W.R. PIGGOT et K.RAWER, 1972), au niveau de l'U.R.S.I.

II.- CARACTERISTIQUES PRINCIPALES

2.1.- FREQUENCE EXTREME ( TOP-FREQUENCY ) D'UNE COUCHE :  $f_t$

C'est la fréquence la plus élevée à laquelle est obtenu un écho zénithal sur une couche.

2.2.- FREQUENCE D'OCCULTATION D'UNE COUCHE :  $f_b$

C'est la fréquence la plus basse à partir de laquelle la couche commence à devenir transparente lorsqu'on augmente la fréquence de sondage, elle est identifiée par le début de l'apparition d'échos sur les couches immédiatement supérieures.

.../...

### 2.3.- FREQUENCE CRITIQUE D'UNE COUCHE: $f_0$

C'est la fréquence pour laquelle la couche ne réfléchit plus; alors que l'onde est infiniment retardée ou absorbée. Lorsque la couche est épaisse ( E, F1, F2 ) le retard provoque une élévation brusque de l'altitude de réflexion, ce qui permet de repérer aisément cette fréquence. C'est la caractéristique la plus importante.

### 2.4.6 HAUTEUR VIRTUELLE MINIMALE : $h'$

C'est la hauteur pour laquelle la trace présente une tangente horizontale.

### 2.5.- FACTEUR DE MUF : M (3000)

MUF : fréquence maximale utilisable.

Il permet la détermination de la fréquence maximale utilisable en propagation oblique pour un bond de 3000 Km, et le calcul de la hauteur du maximum d'ionisation .

Il est déterminé à l'aide d'un ABAQUE.

## 3.- CARACTERISTIQUES MESUREES/

L'onde électromagnétique qui pénètre dans l'ionosphère, se divise généralement en deux ondes de polarisations différentes, qui se réfléchissent indépendamment dans l'ionosphère donnant " LE MODE ORDINAIRE " et " LE MODE EXTRAORDINAIRE " d'où le dédoublement de la trace d'une couche observée sur l'ionogramme.

Les caractéristiques internationales dont définies à partir de la composante ORDINAIRE .

Les traces obliques ou d'ordre multiple étant ignorées, les caractéristiques relevées sur l'ionogramme selon l'ordre de la fiche de dépouillement journalière ( Fig.II-2) sont les suivantes :

### 3.1.- COUCHE D

Densité électronique faible ( $10^8$  à  $10^9$  électrons par mètre au cube), par conséquent il en est de même pour sa fréquence critique (0,5 MHz au maximum). On ne peut observer sa trace sur ionogrammes car la limite inférieure de la gamme de fréquence

.../...

d'un ionosonde classique est de l'ordre de 1 MHz, mais pour tenir compte de l'absorption qu'elle engendre de jour, on relève la fréquence la plus basse (noté :  $f_{\min}$ ) à laquelle on observe le premier écho d'une onde ordinaire.

### 3.2.- REGION E

#### 3.2.1.- Couche E normale:

On observe les caractéristiques :

- $h'E$ : hauteur minimale de la couche E
- $f_oE$  : fréquence critique relative à la couche E.

#### 3.2.2. - Couche sporadique Es

C'est une couche de la région E où se manifeste une ionisation anormale. Elle prend des formes diverses, parfois irrégulières et morcelées, parfois peu marquées, sans grande relation directe avec le rayonnement ionisant du soleil. Cette ionisation appelée " sporadique " et notée Es a des origines et des propriétés différentes suivant les diverses zones géographiques. Les caractéristiques relevées pour cette couche sont:

- $f_oEs$ : fréquence extrême de l'onde ordinaire à laquelle une trace continue de Es est observée.
- $h'Es$  : Hauteur minimale de la trace Es utilisée pour relever  $f_oEs$ .
- Ty : Types de traces Es observées, on notera que les traces Es sont classées en 11 catégories bien définies.
- $f_bEs$ : C'est la fréquence d'occultation la plus élevée des traces Es présentes.

### 3.3.- REGION F

Comme indiqué précédemment elle est constituée de 2 couches F1 et F2. Ces deux couches ont une caractéristique commune notée  $h'F$  et qui représente la hauteur virtuelle minimale de la région F.

#### 3.3.1.- Couche F1

- $f_oF1$ : fréquence critique correspondant à la couche F1
- $M(3000)F1$ : Facteur de MUF de la couche F1.

.../...

### 3.3.2.- Couche F2 :

Les caractéristiques relevées pour cette couche sont:

- $f_oF2$  : fréquence critique de la couche F2
- $h'F2$ : Hauteur virtuelle minimale de la couche F2
- $M(3000)F2$ : Facteur de MUF de la couche F2.
- $f_{XI}$  : Fréquence maximale des échos diffus.

### 4.- PRECISION DES MESURES:

Les caractéristiques ionosphériques étant ainsi définies, on pourra exprimer numériquement sur une fiche de dépouillement les informations recueillies à partir d'un ionogramme.

Des effets dus à des phénomènes ionosphériques, instrumentaux ou au brouillage rendent difficile la détermination des valeurs numériques avec la précision voulue. De ce fait, l'U.R.S.I. ( Union Radioélectrique Scientifique Internationale) a codifié l'identification et la classification des paramètres ionosphériques et décidé de la précision avec laquelle seront relevées les mesures. Ainsi on aura les lectures suivantes :

- $f_oE$ : est lue à 0,05 MHz près.
- $f_oEs$ ,  $f_oF1$ ,  $f_oF2$  et les autres fréquences sont lues à 0,1 MHz près.
- Les hauteurs virtuelles de E et Es sont lues à 2 Km près cela depuis 1972.
- Les autres hauteurs sont lues à 5 Km près.
- Les facteurs de MUF sont lues à 0,05 unités près.

Dans le but d'uniformiser le dépouillement l'U.R.S.I. a énoncé des règles strictes et dressé une liste de lettres utilisées comme symboles possédant chacune une signification bien particulière dont l'emploi explique la raison pour laquelle une mesure est douteuse ( valeur numérique accompagnée d'un ou de deux symboles) ou absente ( valeur numérique remplacée par un symbole).

Cette nomenclature permet de comparer entre elles les mesures des paramètres ionosphériques recueillies par le réseau mondial des stations de sondage et nous donne un aperçu sur la validité des résultats obtenus.

.../...

5.- MEDIANES MENSUELLES:

Pour une suite de mesures ou de relevés, la médiane est la valeur telle que la probabilité pour qu'une mesure ou relevé lui soit supérieur est égale à la probabilité pour qu'elle lui soit inférieur.

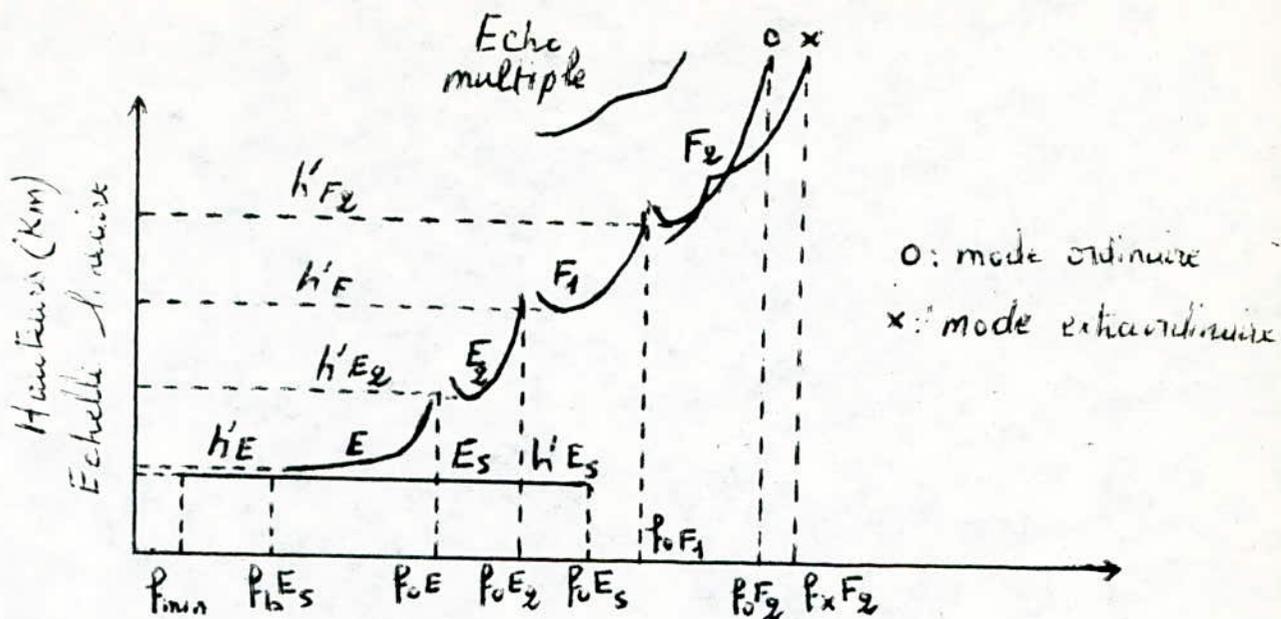
Donc dans une série de nombres rangés, la médiane est la valeur milieu tel qu'il y ~~est~~ ait autant de nombres supérieurs que de nombres inférieurs.

On définit aussi le quartile supérieur comme étant la médiane des nombres supérieurs et le quartile inférieur celle des nombres inférieurs .

Dans notre étude la dispersion des mesures d'un jour à un autre oblige à en étudier la statistique et à déterminer pour chaque heure de la journée la valeur médiane mensuelle de chacune des caractéristiques ionosphériques.

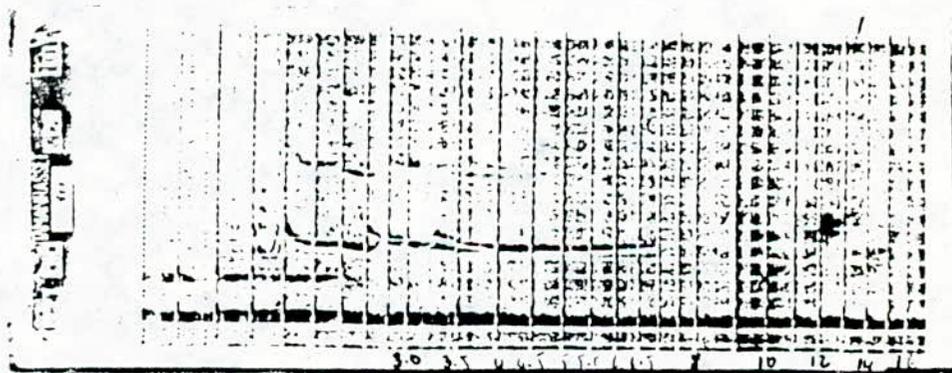
Dans la détermination des médianes mensuelles figurent des symboles à la suite des valeurs numériques ou à la place de celles-ci. Il faut en tenir compte conformément aux règles établies par l'U.R.S.I.

Les valeurs horaires et les médianes mensuelles recueillies au niveau de chaque station de sondage sont publiées dans des bulletins mensuels. Pour nous, ils représentent le principal outil de travail.



Fréquences (MHz), Echelle Logarithmique

Ionogramme type



Depouillement d'un ionogramme enregistré à Tamourasset (03 03 1966, 17,00 H)

$$f_{\min} = E; h'E = 110; f_oE = 1,80; h'E_s = 95$$

$$f_oE_s = J 20 X; f_{\min} E_s = E; h'F = 200; f_oF_1 = L$$

$$h'F_2 = 210; f_oF_2 = 8,6 C$$

C H A P I T R E III

METHODES DE PREVISIONS IONOSPHERIQUES A L'ECHELLE GLOBALE

I.- G E N E R A L I T E S

Les prévisions ionosphériques interviennent pour prévoir les conditions de propagation des ondes radioélectriques surtout dans la gamme décamétrique sur des liaisons bien définies. Les modes de propagation impliquant des réflexions sur les couches E et F sont déterminés à l'aide d'un modèle ionosphérique dont les paramètres varient le long du trajet et sont fonction des caractéristiques ionosphériques sous incidence verticale.

Les moyens ( pour programmation) et connaissances ( données) mis à notre disposition nous obligent à étudier un nombre restreint de paramètres (  $f_0E$ ,  $f_0F1$ ) qui caractérisent les couches ionosphériques sur lesquels on fera nos prévisions avec cette première méthode.

Vu que les conditions de propagation varient continuellement en fonction du temps, on est amenés à choisir une durée de prévisions ; on distingue alors :

- les prévisions à long terme ( au moins un mois à l'avance)
- les prévisions à moyen terme ( une semaine à l'avance)
- les prévisions à court terme ( 24 à 48 heures à l'avance)

Dans ce chapitre, on fera les prévisions à long terme. Celles -ci sont faites à partir des médianes mensuelles des caractéristiques ionosphériques, cela bien qu'il convienne de prendre en considération toutes les variations d'un jour à un autre pour se rendre compte du champ de dispersion à partir de ces valeurs.

Les valeurs de ces paramètres sont obtenues à partir d'ionogrammes enregistrés toutes les heures dans les 55 stations ionosphériques existant dans le monde.

Les équations empiriques fondées sur les médianes mensuelles des valeurs relevées antérieurement ont été établies pour représenter les variations géographiques et temporelles de ces valeurs.

.../...

Ces prévisions sont basées sur la prévision de l'indice d'activité solaire exprimée en fonction de la moyenne glissante sur 12 mois du nombre de taches solaires, il est noté R12 ou de la moyenne glissante sur 12 mois du flux du bruit solaire noté  $\phi_{12}$ .

Pour les prévisions on utilise des valeurs estimées soit du nombre de taches solaires soit du flux du bruit solaire.

Les valeurs mesurées antérieurement doivent s'établir au moins sur un cycle undecimnal qui correspond à un cycle complet du soleil. A partir de ces valeurs médianes mesurées dans les années précédentes on cherche à extrapoler les valeurs futures. L'une des méthodes consiste à considérer que la variation de la médiane en fonction de l'activité solaire est linéaire, cette méthode locale permet de prévoir les différents paramètres ionosphériques au dessus des stations de sondage.

## 2.- PREVISIONS DE $f_0E$ :

2.1. Méthode de MUGGELETON: Elle est donnée par des équations empiriques obtenues par MUGGELETON en 1975 à partir des données fournies par les 55 stations ionosphériques sur le réseau mondial. Ces équations permettent de déterminer la fréquence critique correspondante à la couche E à un instant donné en un lieu donné.

La médiane mensuelle  $f_0E$  est le produit de 4 termes qui rendent compte respectivement de l'activité solaire de la saison, de la position géographique et de l'heure du jour. On aura :

$$f_0E = (A.B.C.D) \phi_{12}^5 \quad (\text{III} - 1)$$

### 2.2.- Influence de l'activité solaire

Le terme A est fonction de l'indice de l'activité solaire, il est donné par:

$$A = 1 + 0,0091 R12 \quad (\text{III} - 2)$$

$$A = 1 + 0,0094 (\phi_{12} - 66) \quad (\text{III} - 3)$$

Que ce soit dans l'une ou l'autre de ces deux expressions, on admet par hypothèse que l'ionisation est uniquement produite par le rayonnement électromagnétique du soleil. L'existence d'une source d'ionisation supplémentaire entraîne une augmentation correspondante de  $f_0E$ .

.../...

2.3.- Influence de la saison:

KOURIS et MUGGELTON en 1973 ont montré que la variation saisonnière de la caractéristique  $f_{0E}$  peut être décrite par l'équation :

$$B = ( \cos X_{\text{midi}} )^m \quad (\text{III-4})$$

On remarquera que le terme B est une fonction de l'angle zénithal solaire à midi ( X ) et de la latitude géographique incluse dans la fonction m donné par :

$$\begin{aligned} m &= - 1,93 + 1,92 \cos \lambda \quad |\lambda| < 32^\circ \\ m &= 0,11 - 0,49 \cos \lambda \quad |\lambda| \geq 32^\circ \end{aligned} \quad (\text{III-5})$$

L'angle zénithal à midi est fonction de la latitude géographique et de la déclinaison solaire  $\delta$

$$X_{\text{midi}} = |\lambda - \delta| \quad (\text{III-6})$$

La relation B n'est valable que lorsque  $X_{\text{midi}}$  est inférieur à  $90^\circ$ . Quand cet angle est plus grand ou égal à  $90^\circ$  on se trouve dans la calote polaire de nuit permanente . Dans cette région  $\cos X_{\text{midi}}$  est toujours négatif ou nul ce qui explique la non validité de la relation qui traduit l'influence saisonnière.

2.4.- Influence de la position géographique

Le terme C représente l'influence de la position géographique , ce qui explique que ce dernier dépend systématiquement de la latitude géographique, il est donné par :

$$C = X + Y \cos \lambda \quad (\text{III-7})$$

$$\begin{aligned} X &= 23 , Y = 116 \quad \text{pour } |\lambda| < 32^\circ \\ X &= 92 , Y = 35 \quad \text{pour } |\lambda| \geq 32^\circ \end{aligned} \quad (\text{III-8})$$

2.5.- Influence de l'heure

Chaque heure du jour est caractérisée par l'angle zénithal solaire X compris entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$  et qui est défini par la relation :

$$\cos X = \sin \lambda \sin \delta + \cos \lambda \cos \delta \cos H \quad (\text{III-9})$$

dans laquelle  $\lambda$  est la latitude géographique et  $\delta$  la déclinaison solaire; H représente l'angle horaire local du soleil compté positivement vers l'Est à partir de midi apparent. Il est exprimé

.../...

en degrés et lié au temps local  $t$  exprimé en heures, on a la relation :

$$H = 15 ( t - 12 ) \quad ( \text{III-10} )$$

Les valeurs de l'angle zénithal  $X$  sont publiées pour chaque instant en tout point du globe sous forme de cartes isoparamétriques dans le rapport 340, C.C.I.R.

Le terme  $D$  est donné par :

$$D = ( \cos X )^p \quad ( \text{III-11} )$$

On apportera des corrections à l'expression de  $D$  de façon à ce que  $f_0E$  ne soit pas nul pour  $X = 90^\circ$ . Ce terme corrigé par MUGGELETON s'écrit :

$$D = ( \cos X )^p \quad \text{pour } X \leq 73^\circ \quad ( \text{III-12} )$$

$$D = ( \cos ( X - \delta X ) )^p \quad \text{pour } 73^\circ < X < 90^\circ \quad ( \text{III-13} )$$

$$\delta X = 6,27 \cdot 10^{-13} ( X - 50 )^{8,02} \quad X \text{ en degrés} \quad ( \text{III-14} )$$

$$p = 1,2 \quad \text{pour } |X| > 12^\circ$$

$$p = 1,31 \quad \text{pour } |X| \leq 12^\circ$$

La fonction  $D$  a été étendue pour obtenir des valeurs nocturnes de la caractéristique  $f_0E$ . Durant la nuit,  $X$  est supérieur à  $90^\circ$  et passe par un maximum à minuit local, l'ionisation de la couche  $E$  décroît après le coucher du soleil pour atteindre une valeur minimale non nulle et croît avec le lever du soleil. Le terme  $D$  est une fonction exponentielle du temps décroissante le soir et croissante le matin.

Du coucher du soleil à minuit local  $D$  s'écrit :

$$D = ( 0,077 )^p \text{ EXP } ( - 1,01 ( t - T_2 ) ) \quad ( \text{III-15} )$$

De minuit local au lever du soleil  $D$  s'écrit :

$$D = ( 0,077 )^p \text{ EXP } ( - 1,68 ( T_1 - t ) ) \quad ( \text{III-16} )$$

$t$  : temps local

$T_1$  : temps local du lever du soleil ( $X = 90^\circ$ )

$T_2$  : temps local du coucher du soleil ( $X = 90^\circ$ )

Tous ces temps sont exprimés en heures,  $p$  est exprimé suivant les conditions vues plus haut.

On remarque aussi que la décroissance du soir est plus lente que la croissance du matin. Entre ces deux phases de variations exponentielles  $f_0E$  a une valeur minimale uniquement fonction de l'activité solaire établie par WAKAI en 1971.

$$(f_{0\text{min}})^4 = 0,017 (1 + 0098 R12) \quad (\text{III-17})$$

ou

$$(f_{0\text{E min}})^4 = 0,004 (1 + 0,021 R12) \quad (\text{III-18})$$

de nuit, si la valeur de  $f_{0\text{E}}$  calculée selon les formules (III-1) à (III-16) est inférieure à celle donnée par une des formules (III-17) ou (III-18) c'est cette dernière qu'il faut adopter.

### 3.- PREVISIONS DE $f_{0\text{E}}$ A TAMANRASSET : ( en utilisant la méthode vue)

Données géographiques:

- latitude géographique: = 22°,8 N.
- longitude géographique: = 05°,51 E.

Suivant le modèle de prévisions adopté dans ce chapitre , et en faisant une programmation préalable relative aux données à TAMANRASSET, on a obtenu les résultats suivants:

- Les figures (III-1) et (III-2) donnent les variations diurnes de la médiane mensuelle  $f_{0\text{E}}$  prévues et mesurées pour les mois de Mars 1965 et Mars 1968 qui correspondent respectivement à un minimum et à un maximum d'indice d'activité solaire. Les écarts remarquables entre les valeurs théoriques de MUGGELETON et les valeurs expérimentales ne sont pas importants, ce qui confirme la représentativité du modèle , sauf au lever et au coucher du soleil où on ne peut pas vérifier la précision du modèle à cause de la limite inférieure de la gamme du sondeur SP 35/16 de la station ionosphérique de TAMANRASSET qui est de 1,2 MHz. On constate en outre que les valeurs mesurées sont légèrement supérieures aux valeurs prévues par la méthode de MUGGELETON.

- La figure (III-3) donne les variations futures de la fréquence  $f_{0\text{E}}$  pour le mois de Mars 1985, la valeur de l'indice d'activité solaire pour ce mois nous a été communiquée par le service de planification des fréquences du Ministère des P.T.T. à ALGER. On remarque que  $f_{0\text{E}}$  va croître jusqu'aux environs de midi local, puis décroître sans atteindre un minimum nul.

La méthode de MUGGELETON et les équations correspondantes ont été incluses dans un programme ( 105, 106) qui donne les variations prévues de  $f_{0\text{E}}$  pour TAMANRASSET pour un R12 donné.

.../...

4.- PREVISIONS DE LA MEDIANE MENSUELLE f<sub>o</sub>F1

Divers chercheurs ( SCOTT 1952, ALLEN 1948, RATCLIFFE et WEEKES 1960) ont montré que f<sub>o</sub>F1 varie avec la distance zénithale solaire, on peut exprimer son comportement de façon précise par le modèle f ~~f<sub>o</sub>F2~~ f<sub>o</sub>F1 = f<sub>s</sub>( COS X )<sup>n</sup> (III-19) cela pour X ≤ X<sub>m</sub> .

- X<sub>m</sub> étant la valeur maximale de X pour laquelle la couche F1 est observée en un lieu donné. Les paramètres f<sub>s</sub> et n dépendent de l'activité solaire et de la latitude géomagnétique du lieu considéré ( KERVIN 1971, DU CHARME et autres 1973).

Il arrive parfois que les variations diurnes de f<sub>o</sub>F1 ont des lieux voisins de l'équateur soient indépendantes de la distance zénithal du soleil en période d'activité solaire élevée ( LANGE -HESSE 1959), mais dépendent des variations des taux photo-chimiques.

KERVIN ( 1967) a signalé des différences dans le comportement de la fréquence f<sub>o</sub>F1 entre l'Amérique du Nord et l'Europe, mais ces différences sont réduites du simple fait que l'on représente les données en fonction de la latitude géomagnétique. L'emploi de cette latitude comme coordonnée a conduit à une meilleure représentation des variations de la couche F1 que celui des coordonnées géographiques.

Une analyse des valeurs de f<sub>o</sub>F1 montre que cette caractéristique peut, pour toute valeur de R12 se déduire des expressions suivantes :

$$f_{oF1} = f_s ( \cos X )^n \quad ( III-20)$$

$$f_s = f_{s0} + 0,01(f_{s100} - f_{s0} ) R12 \quad ( III-21)$$

dans laquelle :

$$f_{s0} = 4,35 + 0,0058 \lambda - 0,000120 \lambda^2$$

$$f_{s100} = 5,35 + 0,0110 \lambda - 0,000230 \lambda^2$$

$$n = 0,093 + 0,00461 \lambda - 0,0000540 \lambda^2 + 0,00031 R12$$

λ représente la latitude géomagnétique , elle s'exprime en degrés.

La distance zénithale maximale du soleil pour laquelle

la couche F1 est observée et donnée par les expressions suivantes:

$$X_m = X_0 + 0,01 ( X_{100} - X_0 ) R_{12} \text{ (degrés)} \quad (\text{III-22})$$

avec  $X_0 = 50 + 0,348 \lambda$

$$X_{100} = 38,7 + 0,509 \lambda$$

$X_0$  et  $X_{100}$  étant les valeurs de  $X_m$  respectivement pour  $R_{12}=0$  et  $R_{12} = 100$ .

$X_{100}$ ,  $X_0$ ,  $X_m$  sont exprimés en degrés.

#### 5.- PREVISIONS DE $f_oF1$ à TAMANRASSET :

Ce modèle appliqué à la prévision de la médiane mensuelle de la fréquence  $f_oF1$  à TAMANRASSET dont la latitude géomagnétique est de  $25^\circ,4$  nous donne les résultats suivants:

- les figures ( III-4 et 5 ) donnent les variations diurnes prévues et mesurées à TAMANRASSET pour les mois de Mars 1965 et Mars 1968 , les écarts remarquables entre les valeurs prévues par cette méthode et les valeurs relevées durant ces années pour ce mois sont faibles, d'où la bonne précision de ce modèle mondial.

- les valeurs prévues sont légèrement supérieures aux valeurs mesurées de plus les valeurs de  $X_m$  calculées et observées ne dépassent pas plus ou moins une heure, ce qui est bon.

- la figure ( III-6 ) donne l'évolution diurne de  $f_oF1$  pour mois futur Mars 1985.

Cette méthode est aisément programmable, le programme (I05 ) nous donne pour un  $R_{12}$  donné les variations prévues de  $f_oF1$ .

ORUN

DONNEZ LA VALEUR R12 DU MOIS CONSIDERE

712.5

DONNEZ LA VALEUR X MIDI

726

DONNEZ L'HEURE DU LEVER DU SOLEIL

76.25

DONNEZ L'HEURE DU COUCHER DU SOLEIL

716

HEURES

VALEURS DE FOE

0	.102204309
1	.155551029
2	.236742685
3	.360313266
4	.548382938
5	.83461775
6	1.45700463
7	1.8246761
8	2.32489083
9	2.57724723
10	2.81083653
11	2.91616183
12	2.94882159
13	2.91616183
14	2.83476707
15	2.83476707
16	2.66680222

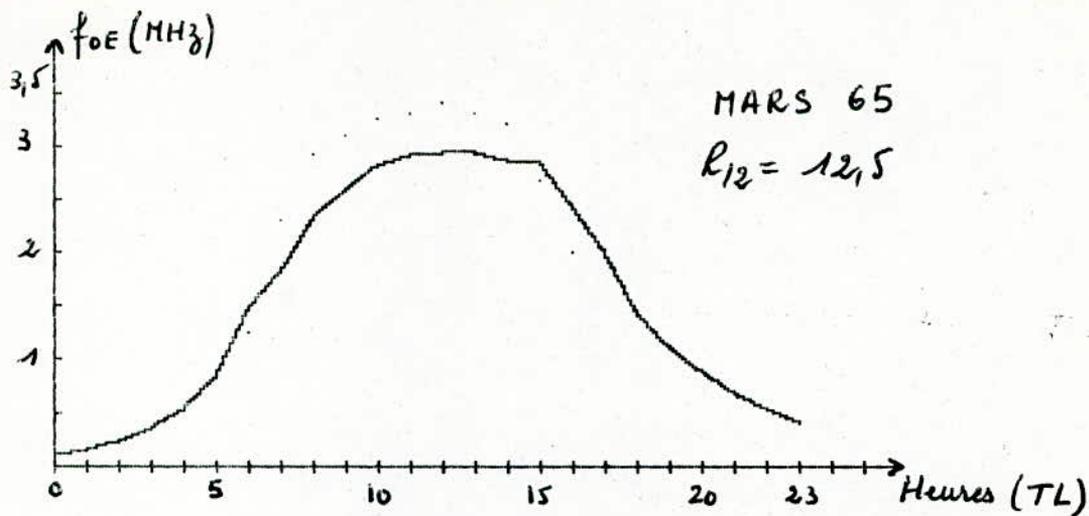


Fig III. 1

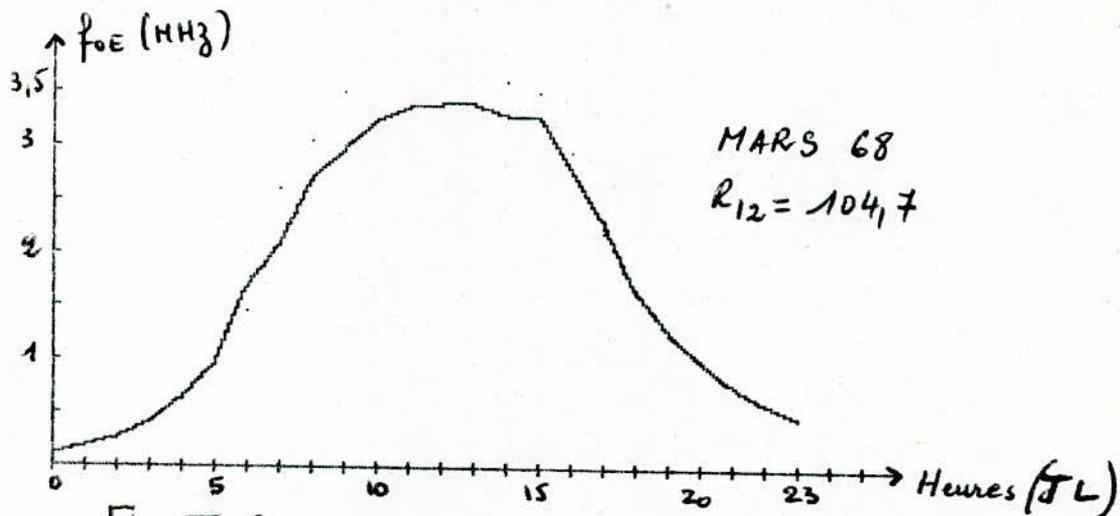


Fig III. 2

Variation prévue et mesurée de  $f_{oE}$  pour un maximum et un minimum de  $R_{12}$

à Tamonrasset.

— Courbe prévue  
... Courbe mesurée

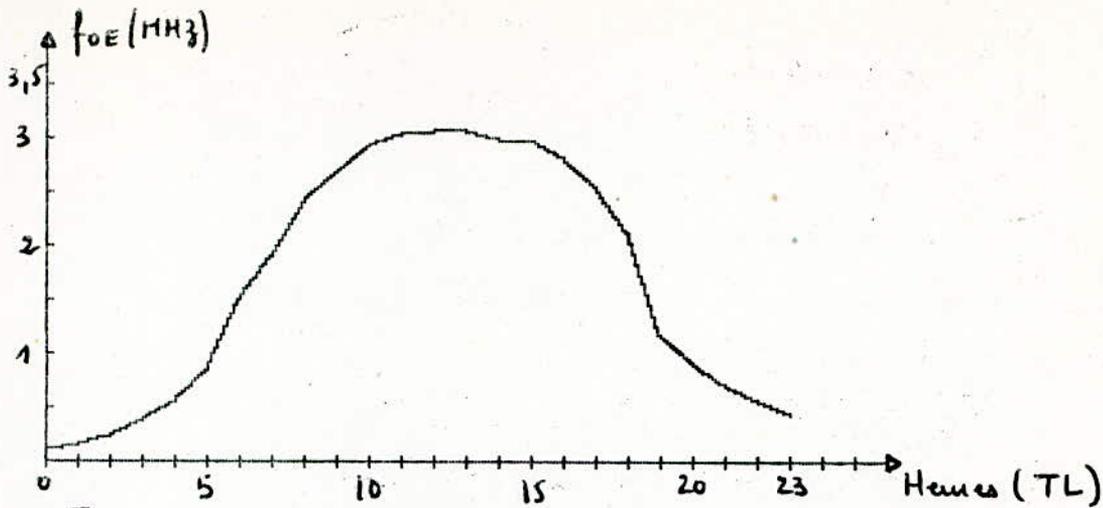
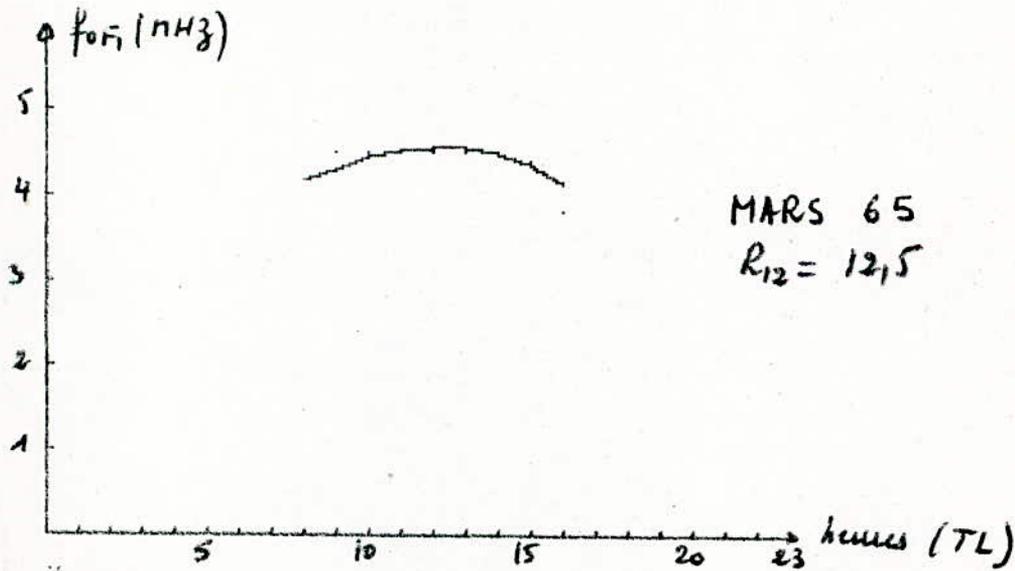


Fig III. 3 Variation prévue de  $f_oE$  pour le mois de Mars 85.  $R_{12} = 34$  à Tamourasset



MARS 65  
 $R_{12} = 12,5$

Fig III. 4 Variation prévue et mesurée de  $f_oF_1$  à Tamourasset  
— Courbe prévue  
... Valeurs mesurées

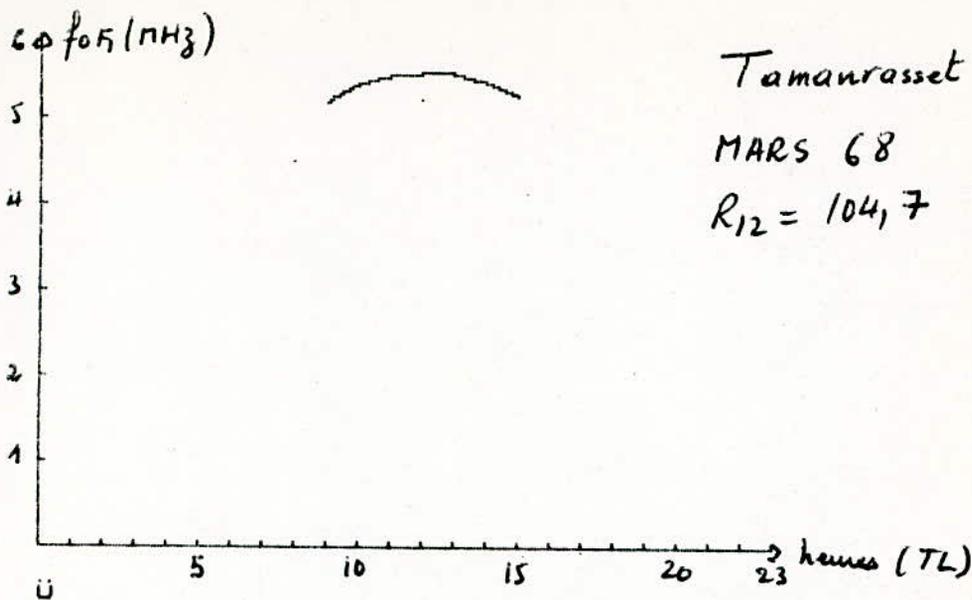


Fig III. 5 Variation diurne prévue et mesurée de  $f_oF_2$ . — Valeurs prévues  
... Valeurs mesurées

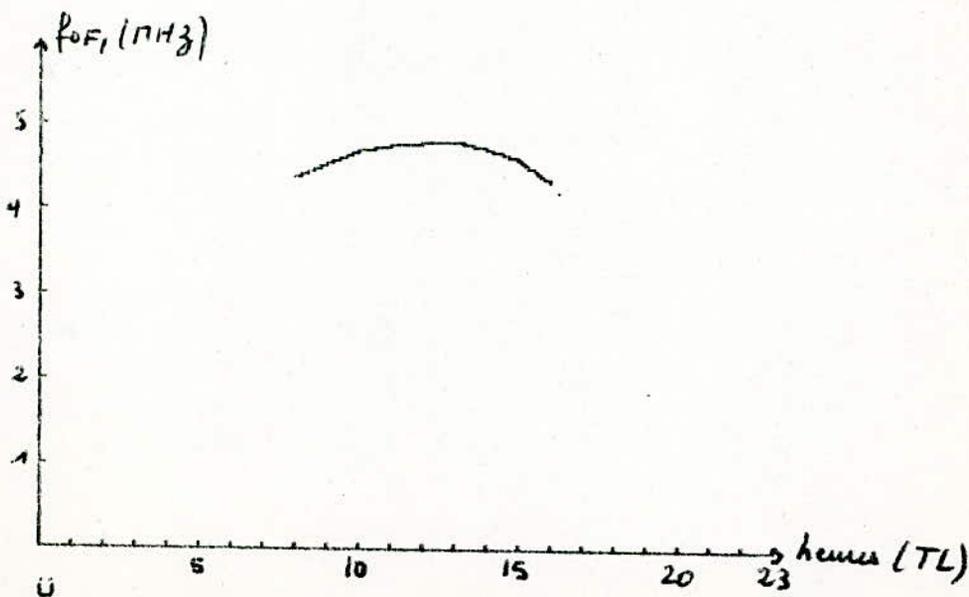


Fig III. 6 Variation diurne prévue de  $f_oF_2$  pour le mois de Mars 85 à Tamarrasset.  
 $R_{12} = 34$



La limite inférieure ( 1,2 MHz ) du sondeur entraîne une incertitude sur la valeur minimale (  $f_{\min}$  ) et une absence des valeurs numériques nocturnes de la fréquence critique de la couche E. On aura sur la fiche de relevés une série de symboles notés " E " ce qui nuit à l'établissement des valeurs médianes mensuelles. Pour déterminer la hauteur du bas de couche nécessaire à la détermination des profils réels d'ionisation, on procède à une interpolation de la trace , ce qui entraîne automatiquement des erreurs systématiques de lecture.

La disponibilité d'une autre sondeur ayant une gamme de fréquence plus large et une meilleure sensibilité associée à un dépouillement plus rigoureux selon les toutes dernières conventions adoptées par l'U.R.S.I.; améliorera nettement l'étude de l'ionosphère dans cette station et nous donnera des résultats meilleurs.

Le dépouillement comprend le relevé horaire des paramètres suivants:

1°/ Caractéristiques de fréquence:

$f_{\min}$  ;  $f_oE$  ;  $f_oES$  ;  $f_bES$ ;  $f_oF1$  ;  $f_oF2$

2°/ Hauteurs caractéristiques:

$h'E$  ;  $h'ES$ ;  $h'F$  ;  $h'F2$

3°/ Coefficients de MUF :

M (3000) F1 et M (3000)F2

Le dépouillement et le calcul des valeurs médianes sont effectués au groupe de recherches ionosphériques ; Centre National d'Etudes des Télécommunications en FRANCE et sont présentés sous forme de livres, chacun contenant des bulletins de dépouillement sur une période d'un mois.

Pour notre étude, nous disposons des bulletins mensuels de dépouillement contenant les relevés horaires des caractéristiques ionosphériques sur une période d'un peu plus d'un cycle undécennal. Cela nous permettra d'étudier le comportement de ces caractéristiques obtenues par dépouillement des ionogrammes enregistrés à la station et de voir leurs variations.

.../...

Temps Fuseau	E				Es			F	F <sub>1</sub>		F <sub>2</sub>			
	f <sub>min</sub>	h'	f <sub>o</sub>	h'	f <sub>o</sub>	f <sub>b</sub>	t <sub>y</sub>	h'	f <sub>o</sub>	M3000	h'	f <sub>o</sub>	M 3000	f <sub>x</sub> I
Code	42	24	20	34	30	32	36	16	10	13	04	00	03	51
00														
01														
02														
03														
04														
05														
06														
07														
08														
09														
10														
⋮														
⋮														
⋮														
⋮														
23														

Fiche de dépouillement journalière ( Utilisée au C.N.E. T. Lannion )

- 34 -

C H A P I T R E V

MODELE DES PREVISIONS DES PARAMETRES IONOSPHERIQUES

AU NIVEAU DE TAMANRASSET

1.- GENERALITES

Après avoir parlé de la station ionosphérique de TAMANRASSET et des relevés des différents paramètres on va faire , dans le présent chapitre, l'étude du comportement de ces caractéristiques obtenues par dépouillement des ionogrammes enregistrés, puis par des méthodes statistiques , on établira un modèle local; on le représentera par des équations. Ce modèle sera propre à cette station. Pour cela on dispose :

- Des bulletins mensuels de dépouillement sur une période d'un peu plus de 11 ans.

- Des valeurs de la distance zénithal solaire au niveau de TAMANRASSET, publiées à l'échelle mondiale sous forme de cartes isoparamétriques ( rapport 340 C.C.I.R.)

- Une liste des valeurs du cosinus de la distance zénithale solaire pour chaque mois ( 6 heures - 18 heures ).

On notera qu'on utilisera les valeurs médianes mensuelles relatives à chaque caractéristique à la verticale de ce site pour l'étude des variations diurnes saisonnières et undécimales de celle-ci.

2.- VARIATIONS DES FREQUENCES CRITIQUES

La fréquence critique d'une couche correspond au maximum d'ionisation au niveau de cette couche.

2.1.- CHAMPS DE DISPERSION DES FREQUENCES CRITIQUES

On remarque d'après les relevés ionosphériques que les valeurs des fréquences varient d'un jour à un autre pour une heure d'un mois donné, les écarts par rapport à la médiane mensuelle peuvent atteindre  $\pm 7\%$  pour  $f_0E$ ;  $\pm 8\%$  pour  $f_0F1$  et  $\pm 20\%$  pour  $f_0F2$  au niveau de midi local.

2.2.- VARIATIONS DIURNES

On constate d'après la figure ( V-1) que les variations diurnes des médianes mensuelles des fréquences critiques

relatives aux couches E et F1 sont régulières, elles présentent une symétrie par rapport à un maximum diurne.

On constate que les deux couches E et F1 apparaissent sur les ionogrammes après le lever du soleil aux environs de 6 heures, leurs fréquences augmentent régulièrement, passent par un maximum aux environs de midi local pour diminuer ensuite jusqu'à disparition complète des traces de ces deux couches au coucher du soleil ( 18h pour E et 17h pour F1).

La figure ( V-2) représente les variations diurnes de la médiane mensuelle de la fréquence critique au niveau de la couche F2. On constate que ces variations sont très complexes; cela est dû au fait que la couche F2 est sujette à un certain nombre d'anomalies au sens de la théorie de CHAPMAN. ( voir chap.I)

Le minimum d'ionisation est atteint une heure environ avant le lever du soleil puis on remarque une progression matinale jusqu'à un maximum principal précédé souvent d'un maximum secondaire. La pente de cette remontée et la position du maximum sont liées étroitement à l'effet saisonnier, ensuite l'ionisation décroît progressivement après le coucher du soleil, se poursuit régulièrement durant la nuit.

L'anomalie diurne consiste à ce que le maximum journalier de  $f_0F2$  se produit à une heure autre que le midi local et au fait que la variation présente souvent deux minimums au lieu d'un seul.

### 2.3.- VARIATIONS SAISONNIERES

La station de TAMANRASSET étant dans l'hémisphère nord les résultats obtenus sont donc propres à cet hémisphère.

On remarque d'après la figure ( V -3 a et b ) qu'à la même heure et pour des activités solaires comparables, les médianes mensuelles  $\bar{f}_0E$  et  $f_0F1$  sont plus importantes en été qu'en hiver, ce qui justifie le fait que la principale source d'ionisation est le rayonnement électromagnétique du soleil.

Par contre, on remarque d'après la figure (V-3 -c) que l'ionisation au niveau de la couche F2 est plus intense en hiver et aux équinoxes qu'en été, mais le minimum diurne atteint

par la fréquence critique  $f_{oF2}$  est plus élevée en été. Ainsi pour une station et une activité solaire données l'amplitude de l'écart entre le maximum et le minimum diurne de l'ionisation est fortement influencé par l'effet saisonnier ( fig. V - 4 ). Il en est de même pour la remontée matinale qui correspond à la durée de cet écart, on remarque d'après la figure (V-4) que l'augmentation matinale de la fréquence  $f_{oF2}$  est donc plus faible et plus lente en été qu'aux autres saisons. On remarque aussi d'après la figure ( ~~V~~ V -5 ) que les valeurs élevées de  $f_{oF2}$  de jour subsiste durant la nuit en hiver, surtout des valeurs de R12 élevées et ne diminuent que juste avant le lever du soleil.

L'ensemble de ces phénomènes anormaux au sens de la théorie de CHAPMAN constitue " l'anomalie saisonnière ".

#### 2.4.- INFLUENCE DU SOLEIL

Les fréquences critiques  $f_{oE}$  et  $f_{oF1}$  relatives aux couches E et F1 s'expriment par les relations :

$$f_{oE} = K_E ( \cos X )^n \quad ( V - 1 )$$

$$f_{oF1} = K_{F1} ( \cos X )^p \text{ pour } X \leq X_m \quad ( V - 2 )$$

X : distance zénithale solaire .

$X_m$  : valeur maximale de X pour laquelle la couche F1 est observable sur un ionogramme.

$K_E$  ;  $K_{F1}$  ; p ;  $X_m$  sont des fonctions de l'activité solaire.

A partir de la formule ( V - 1 ) on tire l'expression :

$$\text{LOG } f_{oE} = \text{LOG } K_E + n \text{ LOG } ( \cos X ) \quad ( V - 3 )$$

Pour un mois donné on reprend les valeurs relevées de la fréquence  $f_{oE}$  au niveau du site de TAMANRASSET contenues dans les bulletins de dépouillement puis on relève les COS X correspondants (soit sur une carte isoparamétrique qui correspond au mois donné, soit sur la liste représentant les cosinus de X pour ce mois, données pour toute heure de la journée).

Dans un programme sur APPEL II on calcule dans un premier temps des logarithmes relatifs aux valeurs relevées puis on trace point par point la fonction  $\text{LOG } f_{oE} = F(\text{LOG } \cos X)$ .

La figure (V.-6) du haut représente l'ensemble des points obtenus, on constate d'après cette figure que l'allure de la courbe est très proche de celle de la droite. On utilise alors la méthode mathématique de la regression linéaire qui consiste à chercher l'équation de la droite qui passe " au mieux " par la série de points expérimentaux, pour cela on utilise le critère des moindres carrés qui consistent à déterminer pour des points  $P_i$  de coordonnées  $(x_i, y_i)$ , les coefficients " a " et " b " qui représentent respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite cherchée. Ils sont donnés par les expressions déduites de la condition :

$$\sum_{i=0}^n (a x_i + b - y_i)^2 \quad \text{minimum}$$

on aura: 
$$a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

et 
$$b = \frac{n \sum y_i - a \sum x_i}{n - (\sum x_i)^2}$$

En outre pour s'assurer de la validité "statistique" du calcul on calculera un coefficient dit de corrélation noté : R lequel suivant que sa valeur s'approche ou s'éloigne de " 1 " on déduira alors que le calcul est ou n'est pas valable du point de vue statistique et que la regression linéaire s'applique bien ou mal au jeu de données considérées.

La figure ( V-6) du bas représente le résultat obtenu en utilisant la méthode mathématique citée plus haut. A partir de cette figure on obtient les résultats de la page ( 50 ) d'où on retient la valeur de la pente A qui est celle de l'indice "n" et l'ordonnée à l'origine B1, à partir de laquelle on déduit la valeur de  $K_E \cdot n$  et  $K_E$  sont ceux qu'on retrouve dans l'expression ( V-1).

En reproduisant la figure ( V - 6 ) plusieurs fois pour le même mois ( afin d'éviter l'effet saisonnier) mais pour différents indices d'activité solaire ( en changeant d'année) on aura pour chaque valeur de R12 une valeur de  $K_E$  et une valeur de l'indice n.

.../...

La première remarque déduite est que, quelque soit la valeur de l'indice d'activité solaire R12, l'exposant " n " ne varie pratiquement pas et demeure égal à lui même, on a opté pour :

$$n = 0,3 \quad ( V - 4 )$$

Par contre, la constante  $K_E$  varie avec R12. Un tracé de  $K_E$  en fonction de l'indice d'activité solaire, en utilisant toujours la méthode de la regression linéaire qui nous donne un bon résultat ( excellent coefficient de corrélation ) est représenté dans la figure ( V - 8 ) dont l'équation est de la forme :

$$K_E = 3,384 + 0,006668 .R12 \quad ( V - 5 )$$

Pour un mois donné, on reprend les valeurs relevées de la fréquence critique  $f_oF1$  contenues dans les bulletins et on relève les valeurs des angles X ou leurs cosinus qui leur correspondent puis on traite ces données de la même façon qu'on la fait avec la fréquence critique  $f_oF1$ .

On obtient les résultats de la page (50) pour  $K_{P1}$  et p qui correspondent à la figure ( V - 7 ). Puis, enfin les équations qui représentent les variations de  $K_{P1}$  et p en fonction de l'indice d'activité solaire R12 tirées à partir des figures ( V - 9 ) et ( V - 10 ). On obtient :

$$K_{P1} = 4,427 + 0,01075 .R12 \quad ( V - 6 )$$

et 
$$p = 0,1904 + 0,00031148 .R12 \quad ( V - 7 )$$

( résultats imprimés en page (53) )

#### 2.4.1.- Résultats déduits et COMPARAISONS

Pour la fréquence critique relative à la couche E et d'après la relation ( V - 1 ) on obtient les résultats local suivant:

$$f_oE ( MHz ) = ( 3,384 + 0,006668R12 ) (\cos X )^{0,3} \quad (V-8)$$

Cette relation établie à partir des données de TAMANRASSET vérifie bien la loi de HARNISOHAMER qui donne pour des latitudes comparable

.../....

$$f_{0E} \text{ (MHz)} = ( 3,3 + 0,005R12 ) (\text{COS } X)^{0,3} \quad ( V- 9)$$

Pour ce qui est de la fréquence critique  $f_{0F1}$ , la méthode de prévisions adoptée au chapitre III à l'échelle globale permet d'écrire pour le site de TAMANRASSET ( latitude géomagnétique =  $25^{\circ},4 \text{ N}$  ) les expressions :

$$K_{F1} = 4,42 + 0,0106R12$$

et  $p = 0,18 + 0,00031R12$

On voit que ces deux expressions sont sensiblement identiques aux expressions locales ( V - 6 ) et ( V - 7 ) . On déduit que les deux méthodes de prévisions sont équivalentes.

La figure ( V - 11 ) montre les variations de  $X_m$  à TAMANRASSET déduites à partir des heures d'apparition et de disparition de la trace de la couche F1 sur les ionogrammes en fonction de l'activité solaire.

Les résultats obtenus en page (54) en haut nous permettent d'écrire que :

$$X_m = 54,559 - 0,0137R12 \quad ( V - 10)$$

$X_m$  en degrés.

Ce résultat est comparable avec celui donné par la méthode de prévision à l'échelle globale soit :

$$X_m = 58,8 - 0,072R12$$

Bien que pour les deux expressions on ait des pentes négatives, on constate que la pente relative au modèle local est presque double de celle relative au modèle global.

Les équations expérimentales ( V - 8 ) ( V - 9 ) et ( V - 10 ) permettent de déterminer à la verticale du site de TAMANRASSET les valeurs de  $f_{0E}$  et  $f_{0F1}$  pour un indice d'activité solaire et une heure donnée.

Les valeurs de ces deux caractéristiques peuvent aussi être déterminées graphiquement sur des tracés expérimentaux tels que ceux des figures ( V- 12 ) et ( V - 14 ) reproduites sur toutes les heures de la journée les 12 mois de l'année.

.../...

A noter que ces deux courbes qui montrent pour une heure donnée, les variations des fréquences critiques  $f_{oE}$  et  $f_{oF1}$  avec l'activité solaire  $R_{12}$  ne sont plus linéaire dès que  $R_{12}$  atteint des valeurs fortes ( $R_{12} = 170$  et plus) ; à partir de cette valeur les deux courbes tendent vers des valeurs limites des deux fréquences.

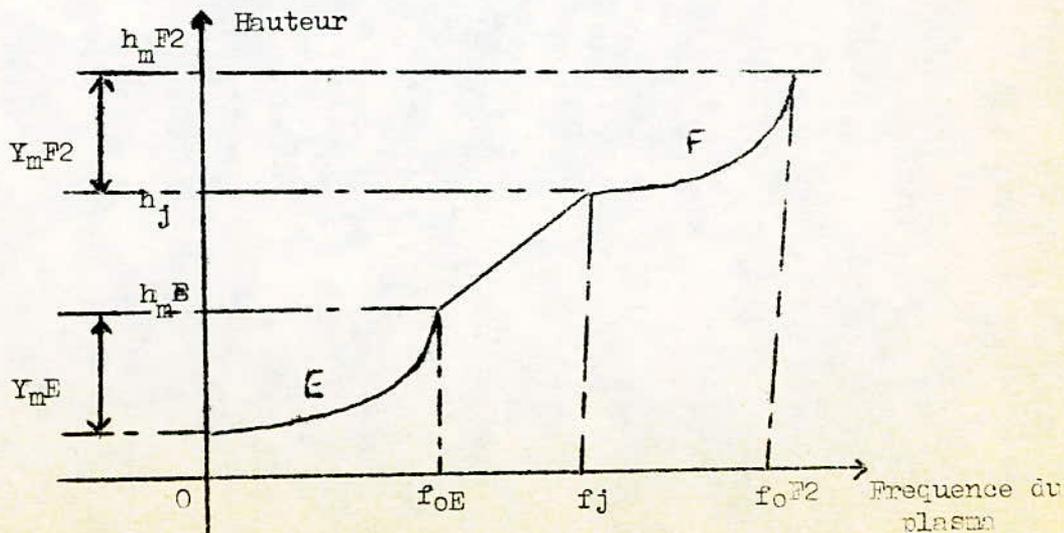
La fréquence critique de la couche F2,  $f_{oF2}$ , ne suit pas une loi en  $(\cos X)^n$  mais comme le montre la figure ( V - 13 ) elle varie linéairement avec l'activité solaire et tend vers une valeur limite dès que  $R_{12}$  dépasse 150 environ. On ne peut donner une formule simple pour la prévision de  $f_{oF2}$ , cependant des courbes comme celles de la figure ( V - 13 ) répétées pour chaque heure de la journée permettent de la déterminer graphiquement pour un  $R_{12}$  et une heure donnée.

#### 2.4.2.- Modèle de distribution verticale de la densité électronique dans les régions E et F.

On établit un modèle simple de la distribution verticale de la densité électronique dans les régions E et F. Pour ce modèle, les paramètres ont été déduits à partir d'équations empiriques qui les relient aux caractéristiques ionosphériques mesurées selon la méthode classique.

Le modèle peut être mis en oeuvre pour tout emplacement pour une heure donnée.

Ce modèle a été élaboré par BRADLEY et DUDENEY (1973) il est représenté par la figure suivante :



La couche E parabolique située au-dessous de la hauteur de sa densité électronique maximale  $h_m E$  a une demi-épaisseur  $Y_m E$ . On suppose  $h_m E$  constante et égale à 110 Km ainsi que  $Y_m E$  (20 Km).

La couche F parabolique est caractérisée par une hauteur de densité maximale  $h_m F2$  et une demi-épaisseur  $Y_m F2$ .

Entre les deux couches on remarque une augmentation linéaire qui va de la fréquence critique  $f_{oE}$  à la fréquence  $f_j = 1,7 f_{oE}$ .

Les paramètres  $h_m F2$  et  $Y_m F2$  sont donnés par les équations empiriques ( BRADLEY et DUDENEY; 1973 ; EYFRIG, 1974 ), suivantes:

$$h_m F2 = \frac{1490}{M(3000)F2 + dM} - 176$$

avec 
$$dM = \frac{0,18}{x - 1,4} + \frac{0,096 (R12-25)}{150}$$

où l'on prend pour x la plus grande des deux valeurs:

$$f_{oF2} / f_{oE} \quad \text{ou} \quad 1,7$$

$Y_m F2$  est alors déduite. On aura :

$$Y_m F2 = h_m F2 - h'F2 + dh'$$

avec 
$$dh' = \left( \frac{0,613}{x - 1,33} \right)^{0,86} \cdot (h_m F2 - 104)$$

$h'F2$  est la hauteur virtuelle minimale observée de réflexion sur la couche F2. A noter que pendant la nuit  $h'F2 = h'F$ .

#### 2.4.3.- Variations de $M(3000)F2$ , $h_m F2$ , $Y_m F2$

La détermination sur les ionogrammes du paramètre  $M(3000)F2$  est très importante vue qu'elle permet le calcul de la MUF en incidence oblique, la hauteur du maximum d'ionisation et la demi-épaisseur relative à la couche F2.

#### - Champs de dispersion de $M(3000)F2$ .

On constate d'après les bulletins de dépouillement que les variations d'un jour à un autre de la caractéristique  $M(3000)F2$  sont assez fortes et que les écarts des valeurs relevées

.../...

par rapport à la médiane mensuelle sont importants, ils peuvent atteindre plus ou moins 30%, ce qui correspond à des écarts de plus ou moins 100 Km pour  $h_m F2$ .

- Variations diurnes de  $M(3000)F2$

Les variations diurnes de  $M(3000)F2$  présentent un maximum avant le lever du soleil qui dure jusqu'aux environs de ( 7h30 - 08h) puis on a une décroissance jusqu'à un minimum de onze heures - douze heures ( 11h - 12 h) puis une augmentation légère, pour se stabiliser jusqu'à la fin de la journée - figure ( V - 15).

Il s'ensuit des variations presque en sens inverse de  $h_m F2$  et  $Y_m F2$ , - figures ( V - 16 ), ( V - 16' ), ( V - 17 ) et ( V - 17' ).

- Influence de l'activité solaire

$M(3000)F2$  diminue lorsque l'activité solaire  $R12$  augmente, sa variation avec cette dernière est pratiquement linéaire, - figure ( V - 18 ). On écrira son expression sous la forme :

$$M(3000)F2 = M_0 + d.R12$$

$M_0$  : Valeur de  $M(3000)F2$  pour un indice d'activité solaire nul. (  $R12 = 0$  ); elle dépend de l'heure de la journée et de la saison pour une station donnée.

D'après les résultats de la page (54) on a :

$$d = - 3,20776 \cdot 10^{-3} \quad ( V - 11 )$$

$d$  représente la pente de la droite.

$M_0$  varie avec l'heure, on a trouvé :

$$M_0 = 3,3692 \text{ pour l'heure (5 h 00)}$$

d'où pour la station ionosphérique de TAMANRASSET :

$$M(3000)F2 = M_0 - 0,00320776.R12 \quad ( V - 12 )$$

Les variations de  $h_m F2$  et  $Y_m F2$  avec l'indice d'activité solaire sont en sens inverse de celles de  $M(3000)F2$ . En effet, ces deux

.../...

paramètres augmentent avec R12, - figures( V-16 ) et ( V-17).

#### 2.4.4- Evolutions des hauteurs virtuelles des couches

La hauteur virtuelle de la couche E varie très peu au cours de la journée; elle est plus élevée en hiver qu'en été. Elle décroît du lever du soleil pour demeurer pratiquement constante entre 08 h et 15 h, puis elle s'élève de nouveau à l'heure du coucher du soleil. Figure ( V - 20 A).

La hauteur virtuelle  $h'F_2$  qui est égale à  $h'F$  durant les heures nocturnes présente un maximum diurne aux environs de midi local et une évolution journalière symétrique ( légèrement ) par rapport au maximum. Ces valeurs sont plus élevées en été qu'en hiver . Figure ( V- 20B).

Les valeurs de  $h'F$  représentées par la courbe de la figure ( V - 20 C) présentent une évolution assez régulière et diminuent légèrement avec l'activité solaire R12.

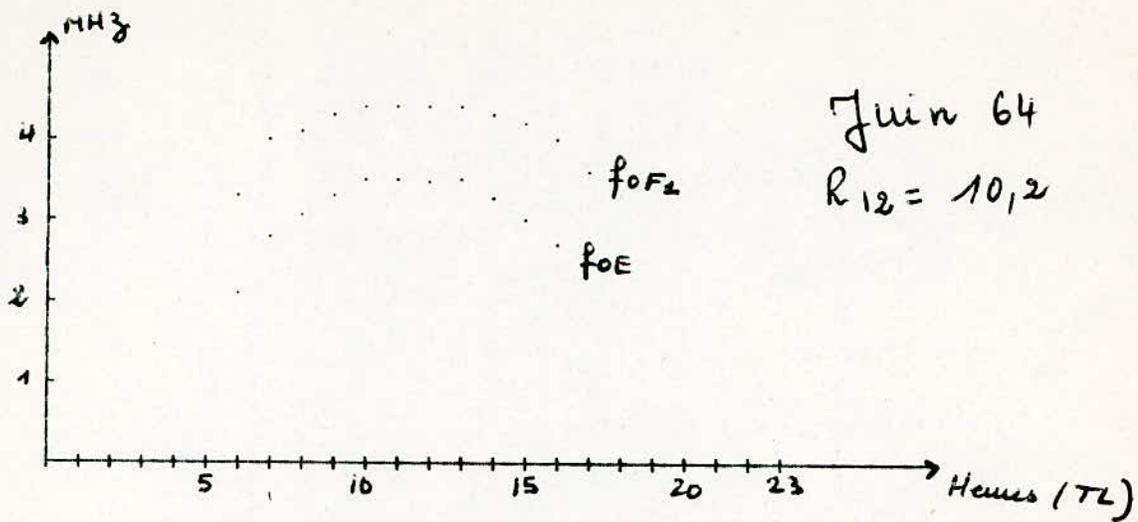


Fig V. 1

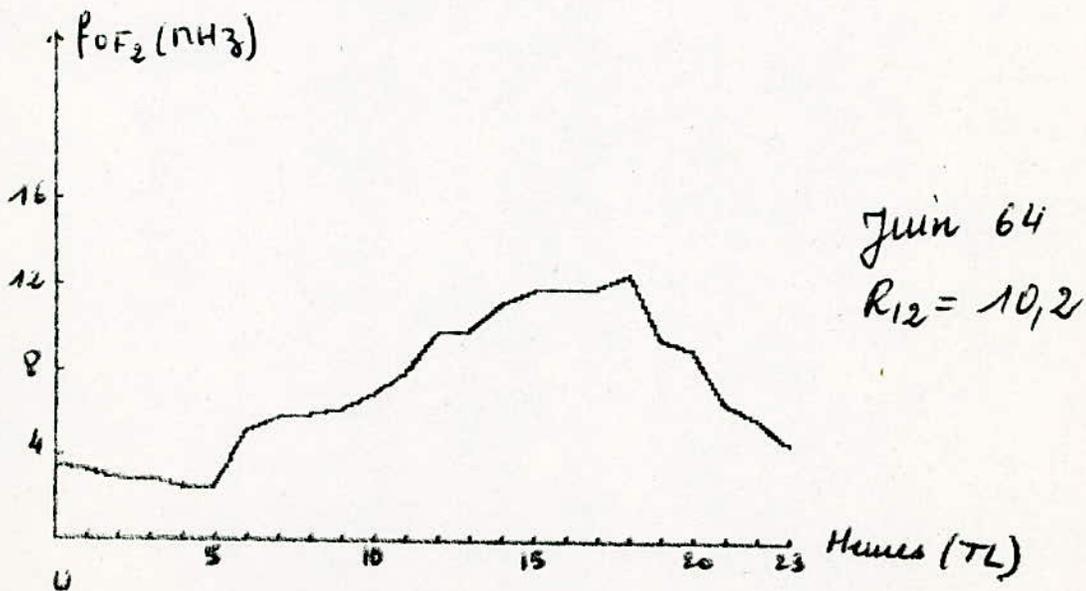


Fig V. 2 Variation diurne mesurée de  $f_oE$ ,  $f_oF_1$ ,  $f_oF_2$  à Tamanrasset.

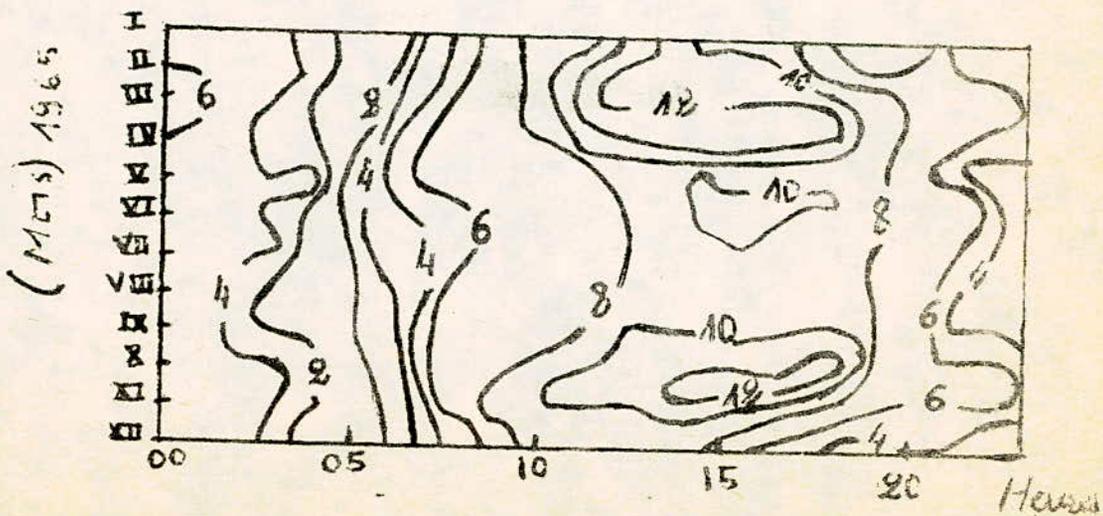
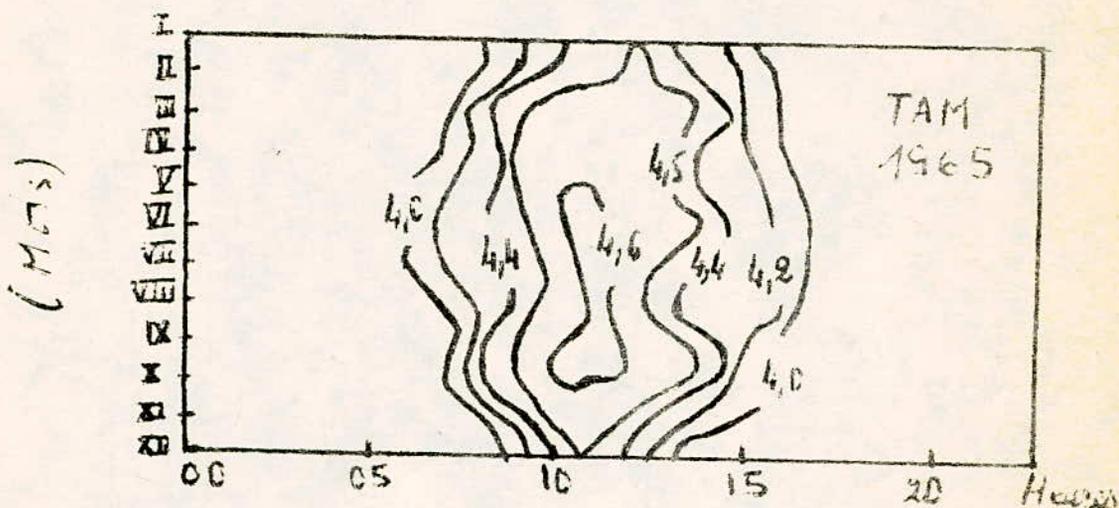
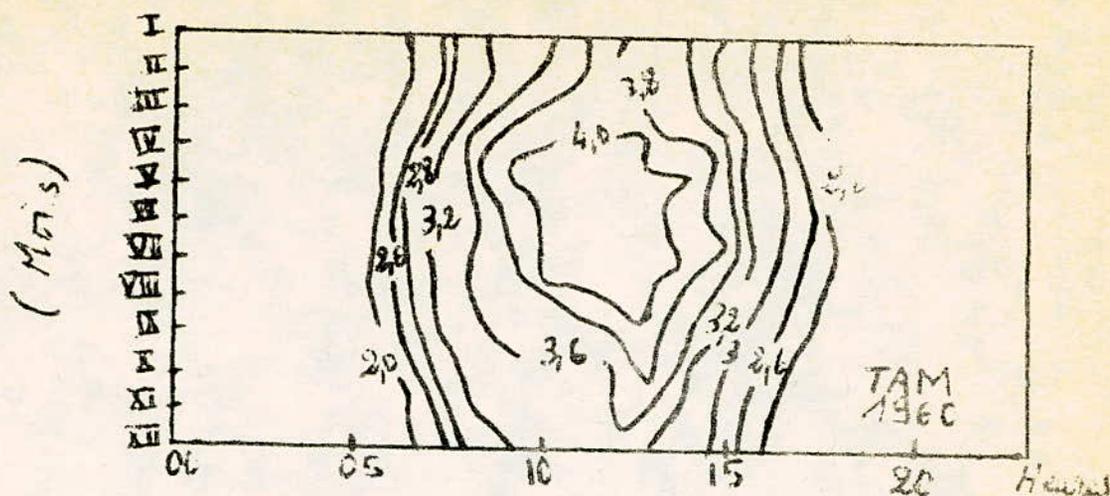


Fig. 3 Variations diurnes et saisonniere de  $f_{02}$  (a),  $f_{02}$  (b) et  $f_{02}$  (c) à Tamainaret

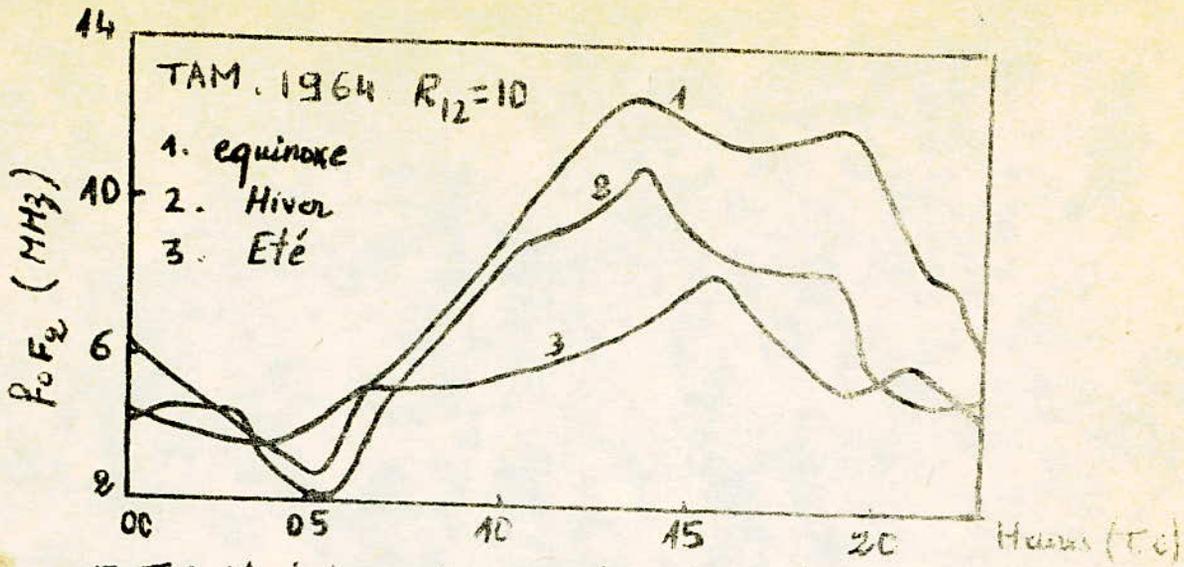


Fig. 4 Variation diurne et saisonnière de  $f_oF_2$  à Tamourasset.

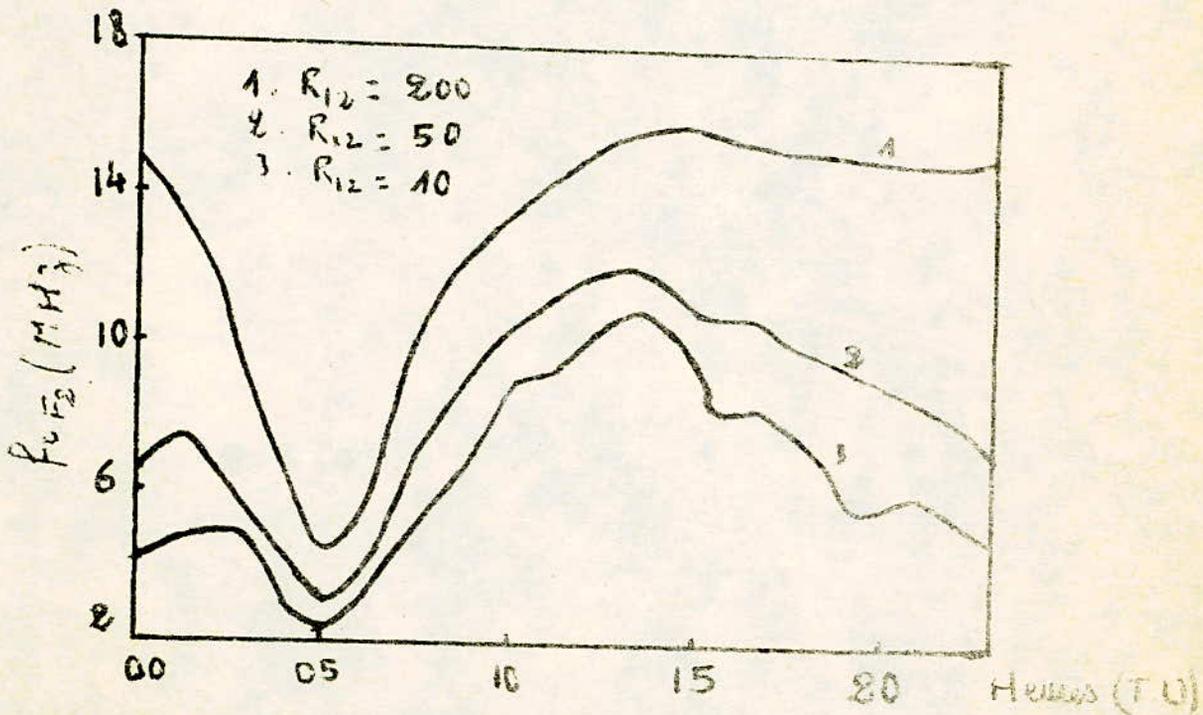
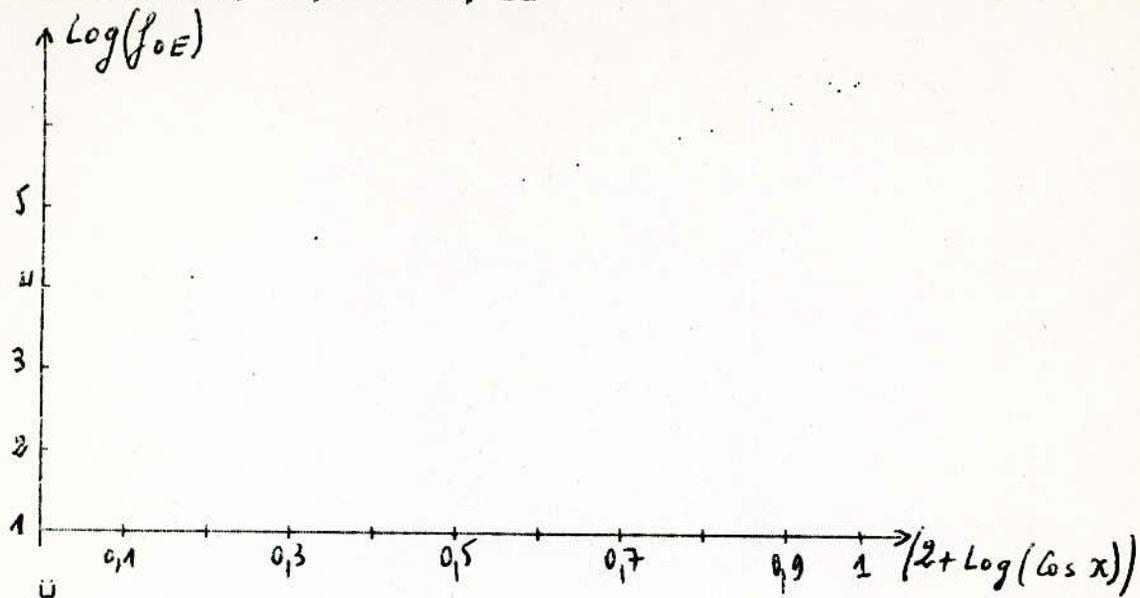


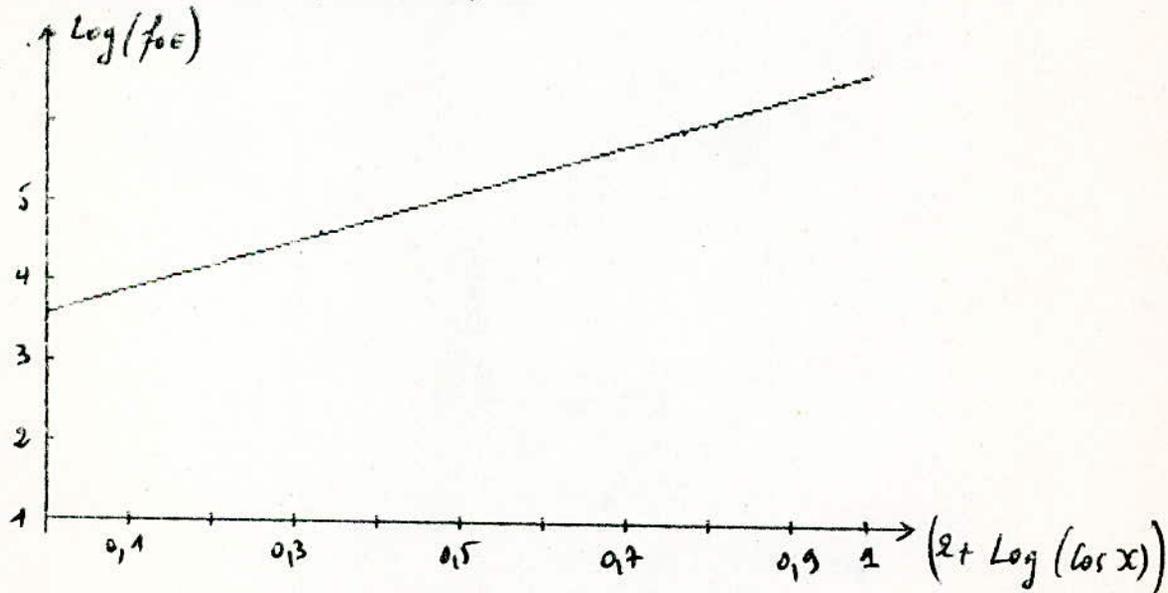
Fig. 5 Variation diurne et undecennale de  $f_oF_2$  à Tamourasset en hiver

?  
U?CHR#(27); "G"; CHR(9); "G2"  
OG2

UPR#1  
U?CHR#(27); "G"; CHR#(9); "G2"

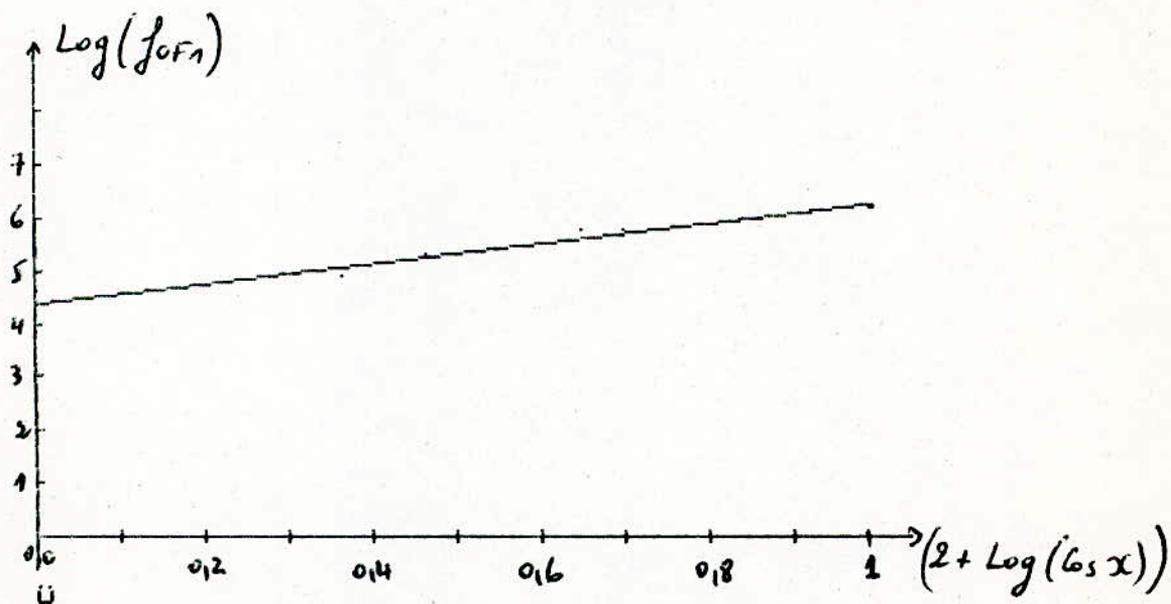
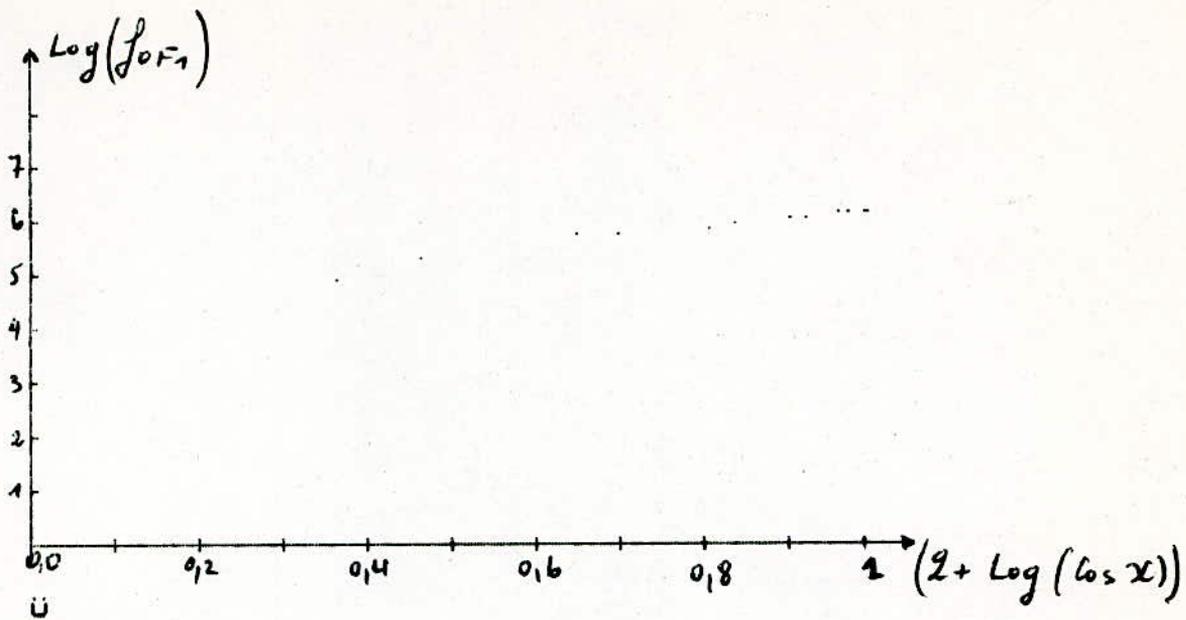


U?CHR#(27); "G"; CHR#(9); "G2"



Variation de  $f_{0E}$  avec la distance zénithale  $x$   
à Tamaraasset.

Fig II. 6



Variation de  $f_{OF1}$  avec la distance zénithale  $X$   
à Tamourasset  
Fig II. 7

PENTE A=.182634265  
ORDONNEE A L'ORIGINE B=.284114209  
ORDONNEE A L'ORIGINE REELLE B1=.64938274  
VALEUR DE KF1=4.46049174  
COEFFICIENT R=.979977887

X	Y MESURE
1.36919255	.518533103
1.65223349	.602082242
1.80955268	.612806503
1.90633158	.633491867
1.96520041	.643476457
1.99475675	.643476457
1.99825928	.643476457
1.97634911	.643476457
1.92582483	.633491867
1.84010019	.623272324
1.70328041	.602082242
1.46832768	.55632306

SI VOUS VOULER Y CALCULE TAPEZ OUI  
?

PENTE A=.305652953  
ORDONNEE A L'ORIGINE B=-.0293005723  
ORDONNEE A L'ORIGINE REELLE B1=.582005333  
VALEUR DE KE=3.81948961  
COEFFICIENT R=.998328546

X	Y MESURE
1.18181335	.332450746
1.58318337	.454861669
1.77231329	.507874641
1.88422449	.546562862
1.95036302	.579805024
1.98272275	.574052482
1.98677125	.579805024
1.96236794	.568222723
1.9057924	.550248688
1.80887881	.518533103
1.64639066	.47423379
1.33442916	.380225293

SI VOUS VOULER Y CALCULE TAPEZ OUI  
?

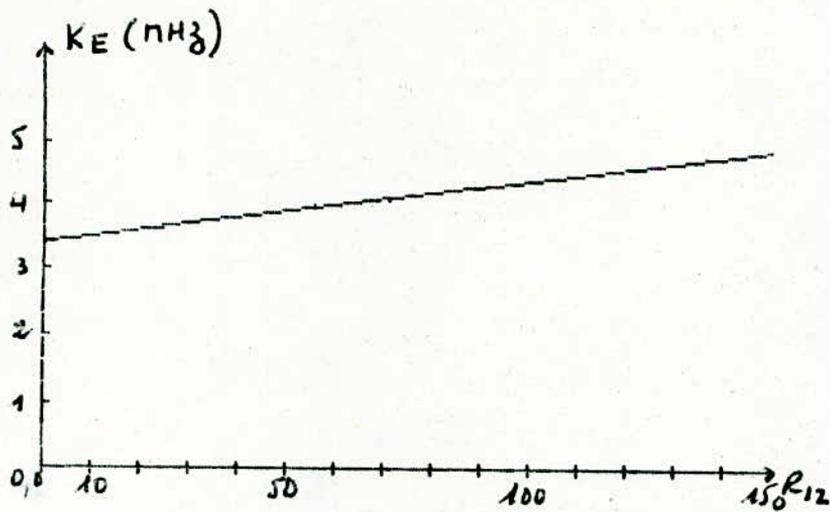


Fig V. 8 Variation de  $KE$  avec  $R_{12}$  à Tamarrasset pour le mois de Mars

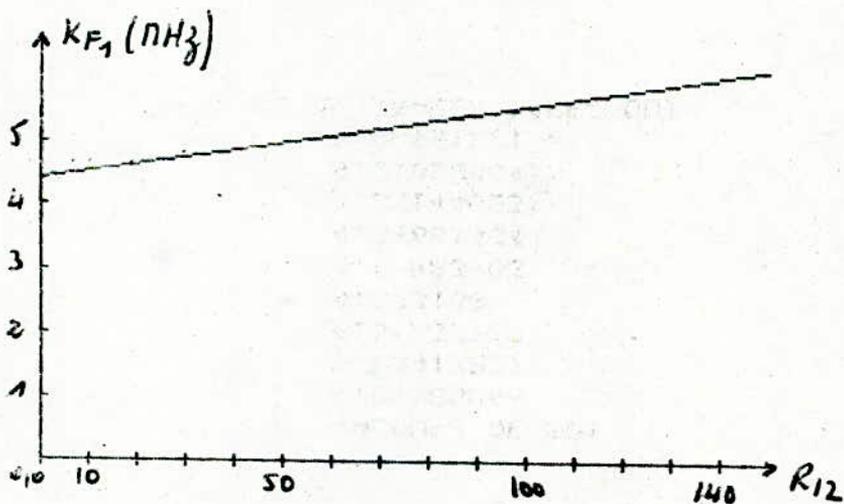


Fig V. 9 Variation de  $KF_1$  avec  $R_{12}$  à Tamarrasset pour le mois de Mars.

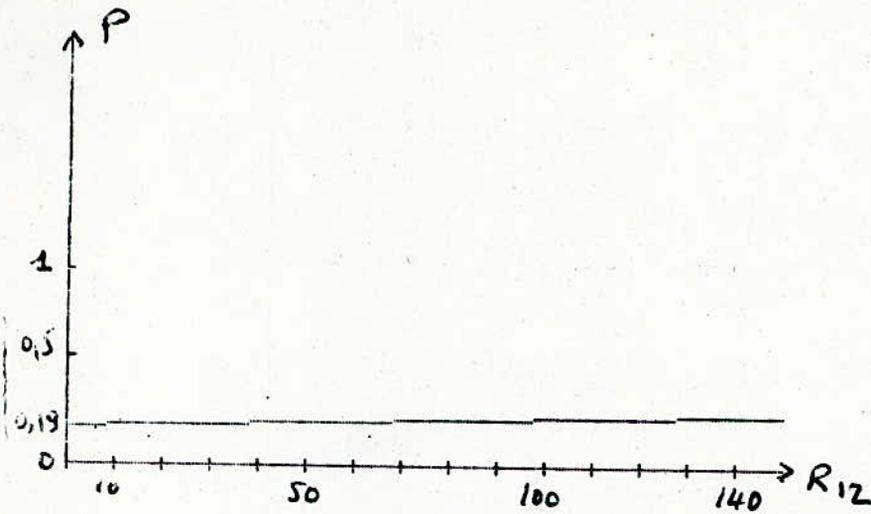


Fig II.10 Variation de l'exposant avec  $R_{12}$   
à Tamarrasset pour le mois de Mars

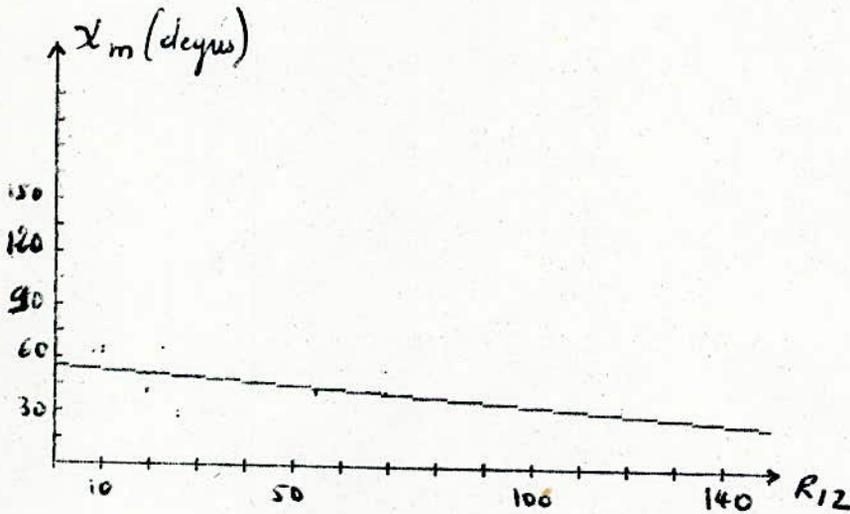


Fig II.11 Variation de  $X_m$  avec  $R_{12}$   
à Tamarrasset pour le mois de Mars

PENTE =6.66816997E-03  
ORDONNE A L'ORIGINE=3.38404127

$K_E = f(R)$

SI VOUS VOULEZ LE TRACER TAPEZ OUI  
?

PENTE =.0107561098  
ORDONNE A L'ORIGINE=4.42743021

$K_F = f(R_{12})$

SI VOUS VOULEZ LE TRACER TAPEZ OUI  
?

PENTE =3.11482485E-04  
ORDONNE A L'ORIGINE=.190415765

$p = f(R_{12})$

SI VOUS VOULEZ LE TRACER TAPEZ OUI  
?

PENTE =-.137749372  
ORDONNE A L'ORIGINE=54.5592143

$x_n = f($

SI VOUS VOULEZ LE TRACER TAPEZ OUI  
?

PENTE =-3.20776022E-03  
ORDONNE A L'ORIGINE=3.36920643

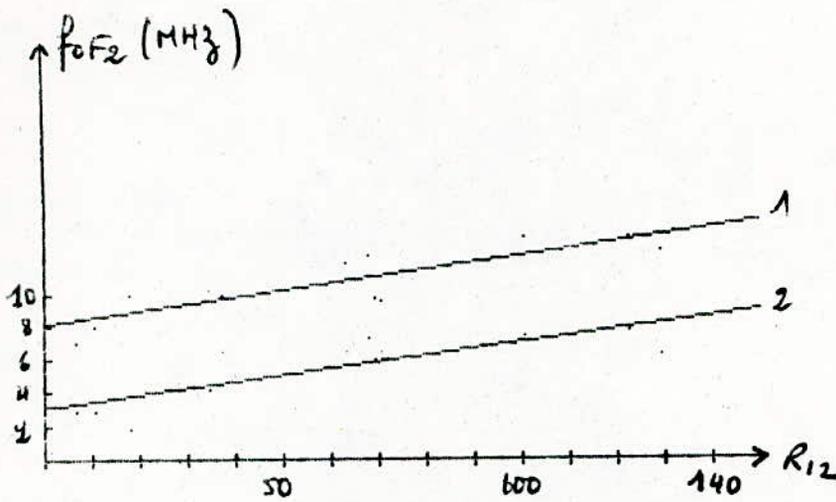
$M(3000)F_2 = f(R_{12})$

SI VOUS VOULEZ LE TRACER TAPEZ OUI  
?

PENTE =.0123525704  
ORDONNE A L'ORIGINE=4.24854387

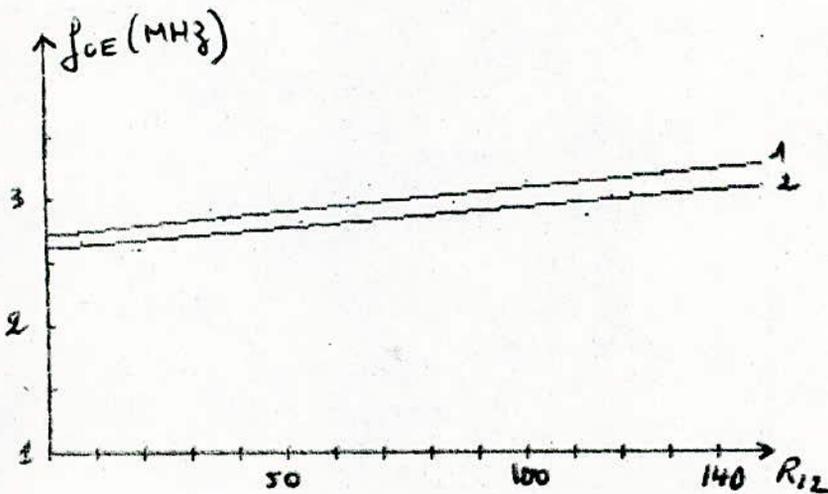
$f_{of_1} = f(R_{12})$

SI VOUS VOULEZ LE TRACER TAPEZ OUI  
?



- 1. été 12<sup>h</sup>,00
- 2. été 5<sup>h</sup>,00

Fig I. 13 Variation de  $f_{oF2}$  avec  $R_{12}$   
à Tamourasset.



- 1. été
- 2. Hiver

Fig I. 12 Variation de  $f_{oE}$  avec  $R_{12}$   
à Tamourasset à 12<sup>h</sup>,00

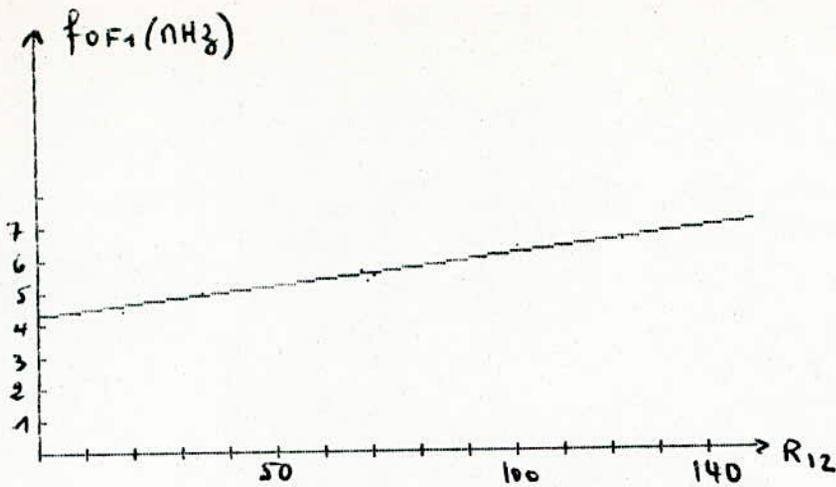


Fig. 14 Variation de  $f_oF_1$  avec  $R_{12}$  à Tamannasset au mois d'août à 12<sup>h</sup>.

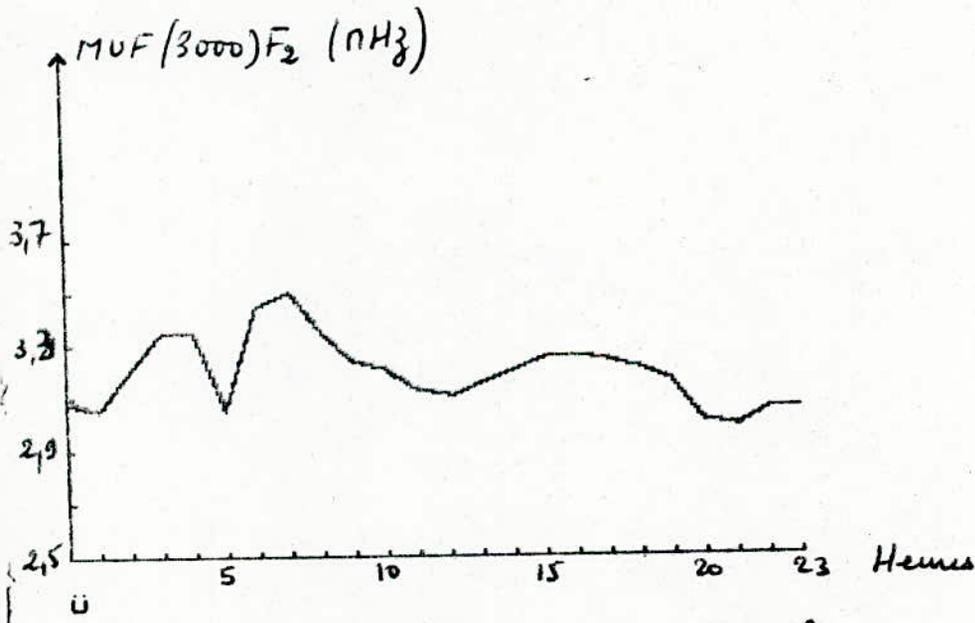
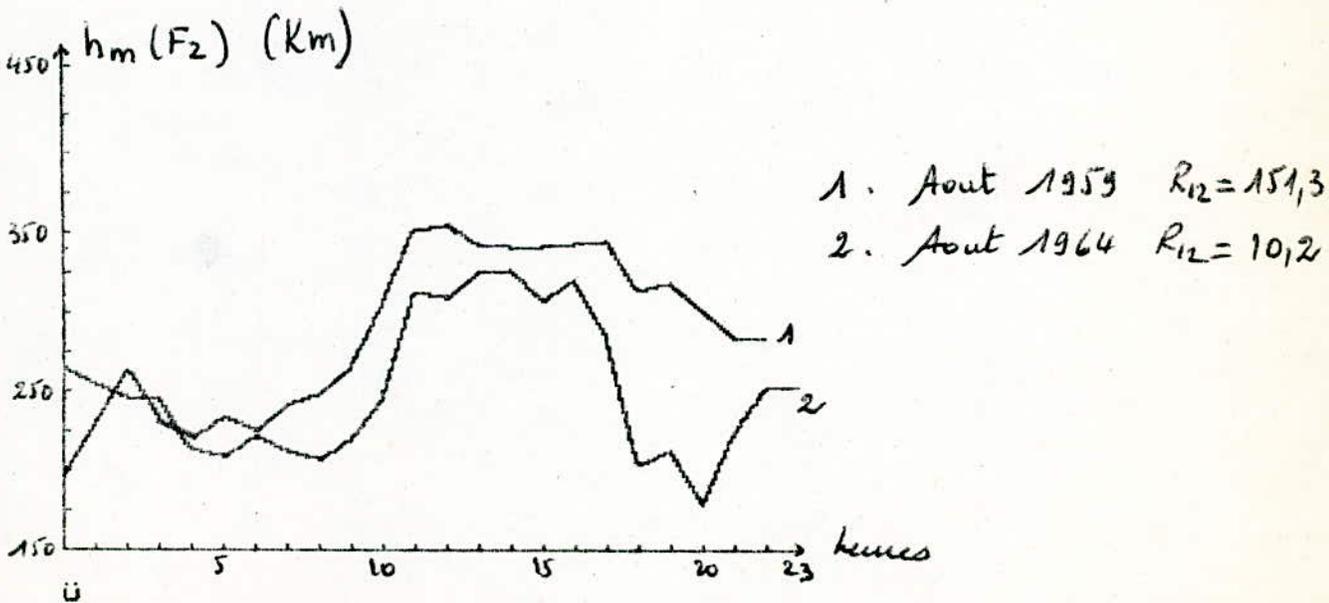
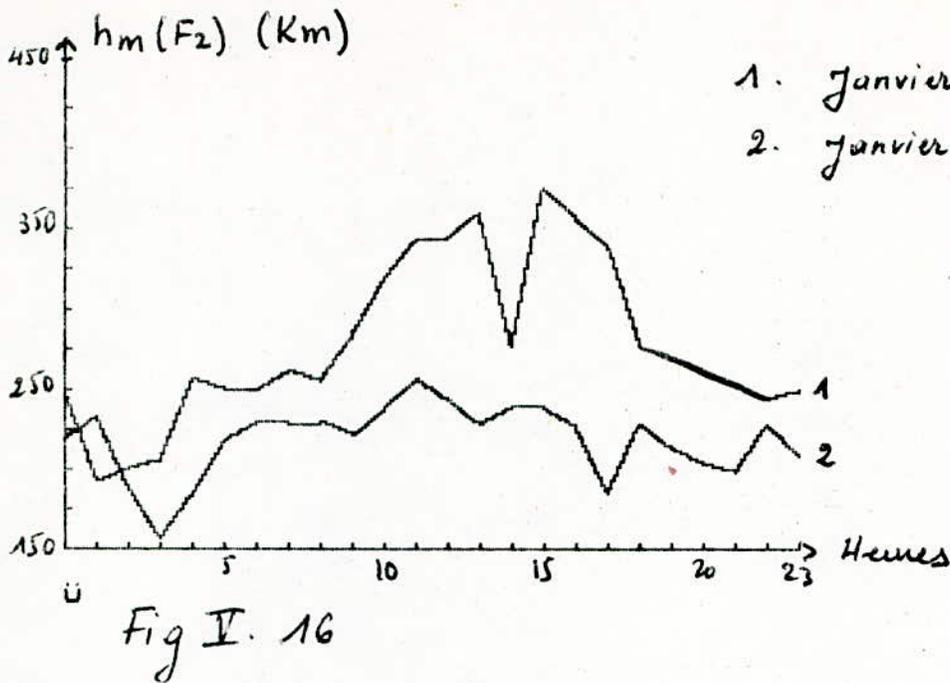


Fig. 15 Variation diurne de la médiane mensuelle de  $MUF(3000)F_2$  à Tamannasset. Pour le mois de Mars 1965.  $R_{12} = 12,5$



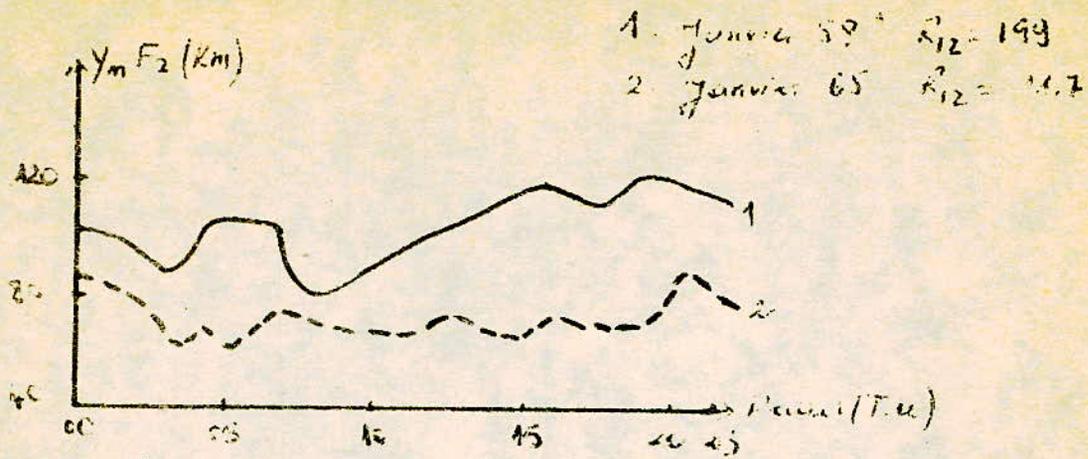


Fig I 16' Evolution diurne, saisonniere et  
decennale de  $y_m F_2$  à Tamoussouet.

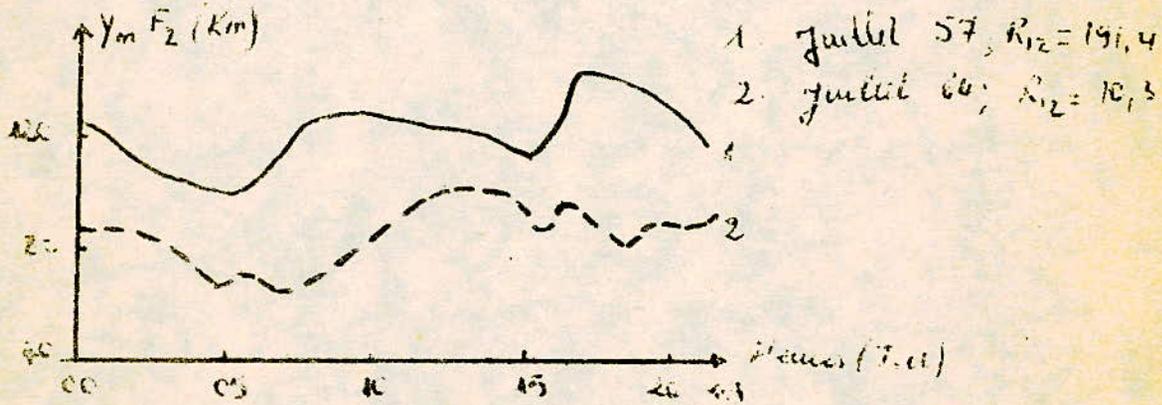


Fig I 17' Evolution diurne saisonniere et  
decennale de  $y_m F_2$  à Tamoussouet.

U?CHR#(27); "G"; CHR#(9); "G2"

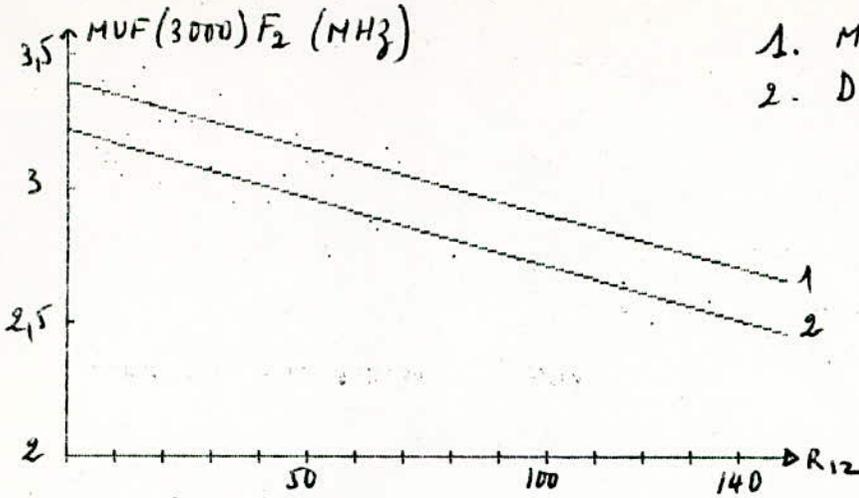


Fig I. 18

U  
U?CHR#(27); "G"; CHR#(9); "G2"

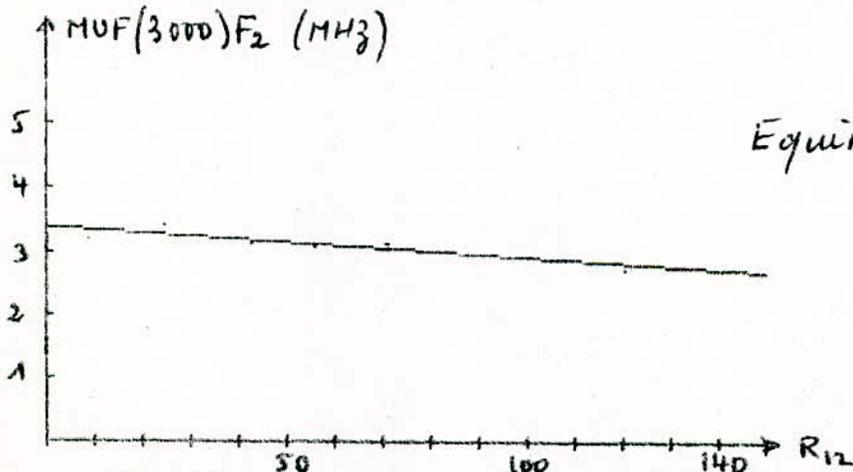


Fig II. 18

Evolution undecennale de MUF(3000)F<sub>2</sub> à Tamourasset.

U?CHR#(27); "G"; CHR#(9); "BON"

ORUN  
PENTE = -3.20776022E-03  
ORDONNE A L'ORIGINE = 3.36920643

SI VOUS VOULEZ LE TRACER TAPEZ OUI

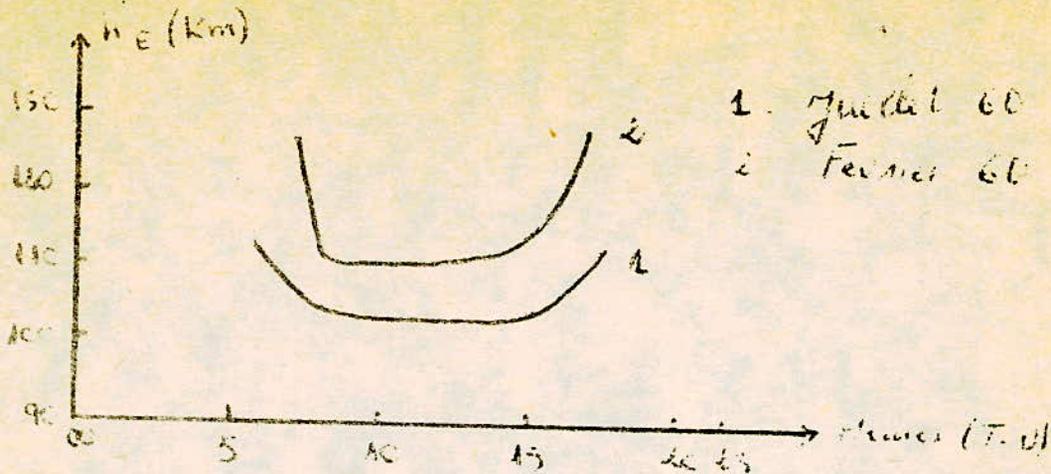


Fig I 20 a Variation diurne et saisonnière de  $h'E$  à Tomarussset.

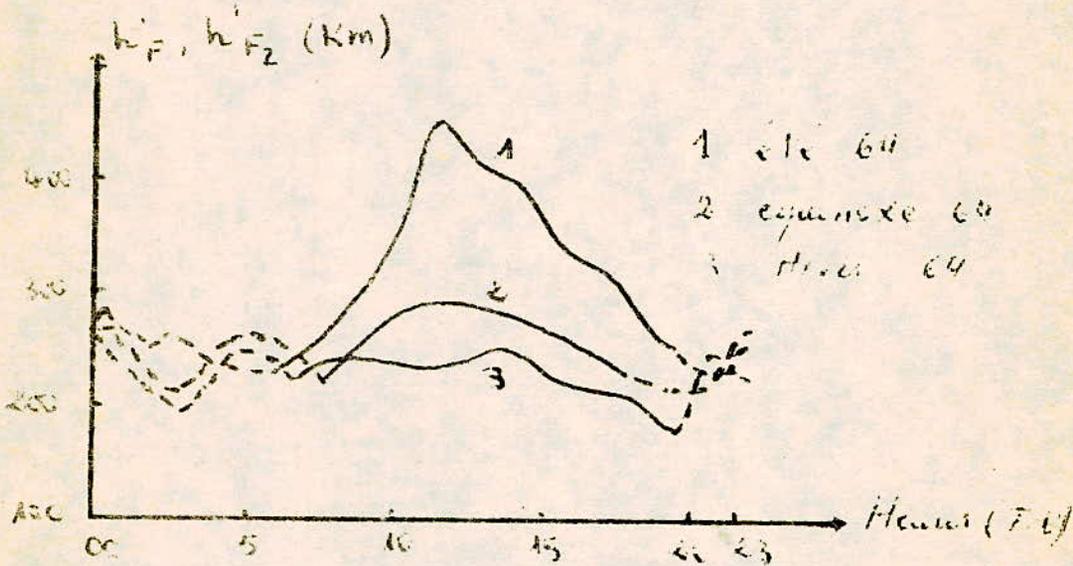


Fig II 20 b Variation diurne et saisonnière de  $h'F_1$  et  $h'F_2$  à Tomarussset

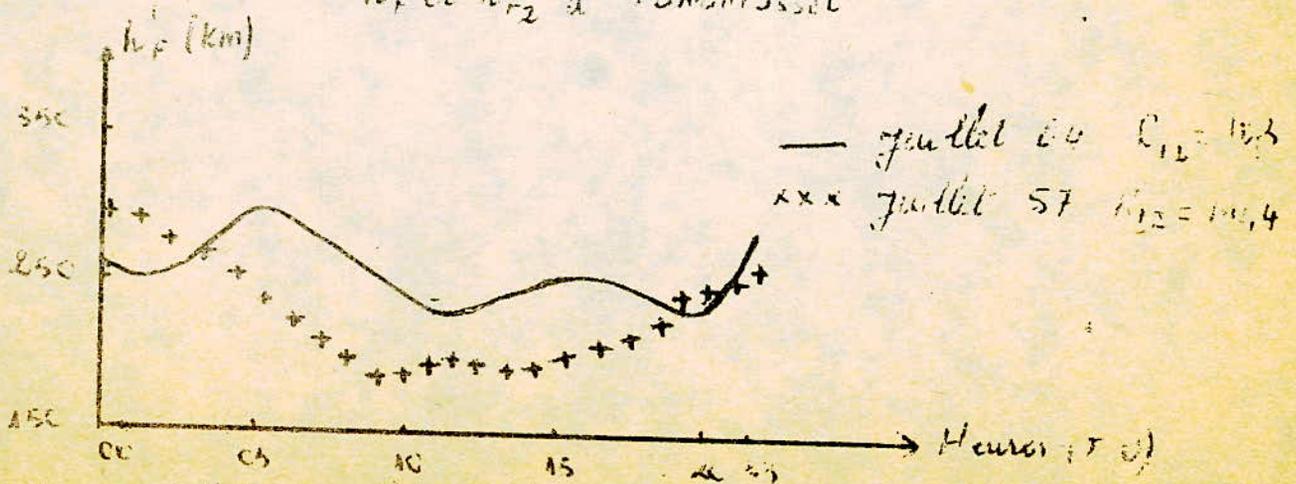


Fig I 20 c Effet de l'activité solaire à Tomarussset

Après avoir parlé de la théorie de la formation des différentes couches ionosphériques et leurs influences sur les liaisons radio, il s'est avéré nécessaire d'avoir un modèle de prévisions des caractéristiques relatives à chaque couche de l'ionosphère.

Un modèle de prévisions à l'échelle globale a été déterminé à partir de données ( relevés ) enregistrées antérieurement au niveau des 55 stations existant dans le monde, ce modèle, représenté par une série d'équations empiriques, nous a ~~été~~ donné, pour TAMANRASSET , des résultats très proches de ceux relevés réellement. ( CHAPITRE III ).

D'autre part, grâce aux données enregistrées durant une période undecennale ( 11 ans ) dans la région de TAMANRASSET, on a pu déterminer un modèle local de prévision des paramètres ionosphériques ( CHAPITRE IV ).

En comparant les résultats obtenus avec ceux trouvés en utilisant les méthodes mondiales on a constaté qu'il n'existait qu'une très faible différence entre eux. On a déduit que les deux modèles sont similaires et qu'ils donnent des résultats très valables ( proches des résultats réels ).

Toutes les données ont été traitées sur micro-ordinateur ( APPLE II ). Le langage de programmation utilisé est le BASIC. Nous regrettons l'étroitesse du micro-ordinateur utilisé, cela nous a empêché de faire l'étude de la fréquence critique  $f_oF2$  relative à la couche F2.

oooooooooooo000oooooooooooo

U

U7CHR\$(27); "G"; CHR\$(9); "132N"

ULIST

```
10 HGR2
20 HCOLOR= 7
30 HPLOT 0.0 TO 0.191: HPLOT 0.137 TO 279.137
32 FOR T = 1 TO 10
33 HPLOT 27 * T.135 TO 27 * T.139
35 NEXT T
36 FOR T = 0 TO 10
37 HPLOT 0.191 - 18 * T TO 2.191 - 18 * T
38 NEXT T
40 FOR I = 0 TO 4
50 READ N(I)
60 N(I) = 3.1416 * N(I) / 180
70 Z = COS (N(I))
80 FOR X = - 3 TO 6 STEP .01
90 K = ( EXP ( - X) ) / Z
100 Y = EXP (1 - X - K)
110 Y = Y * 270
120 HPLOT Y.137 - 18 * X
130 NEXT X
135 NEXT I
140 DATA 0.30.45.60.80
```

U

UPCHR\$(27) : "0" : CHR\$(9) : "132N"

ULIST

```
1  REM VARIATION PREVUE ET MESUREE DE FOE
2  DIM Z(100),T(100),U(100),X(100)
3  DIM F(100)
5  HOME
7  PRINT "DONNEZ LA VALEUR R12 DU MOIS CONSIDERE"
10 INPUT R
15 PRINT "DONNEZ LA VALEUR X MIDI"
20 INPUT X1
23 PRINT "DONNEZ L'HEURE DU LEVER DU SOLEIL"
25 INPUT T1
30 PRINT "DONNEZ L'HEURE DU COUCHER DU SOLEIL"
33 INPUT T2
35 P = 1.20
40 G = 22.8 * 3.141 / 180
50 W = COS (G)
60 M = - 1.93 + 1.92 * W
70 A = 1 + 0.0091 * R
80 B = (X1) ^ M
90 C = 23 + 116 * W
100 L = (A * B * C) ^ 0.25
105 PRINT "HEURES"; TAB( 20); "VALEURS DE FOE"
110 FOR I = 0 TO 23
120 T(I) = I
125 IF T(I) > = 0 AND T(I) < 6 GOTO 150
130 IF T(I) > 18 AND T(I) < = 23 GOTO 160
140 IF T(I) > = 6 AND T(I) < = 18 GOTO 170
150 D = (.077) ^ P * EXP ( - 1.68 * (T1 - T(I)))
155 GOTO 260
160 D = (.077) ^ P * EXP ( - 1.01 * (T(I) - T2))
165 GOTO 260
170 READ X(I)
180 IF X(I) < = 73 GOTO 200
190 IF X(I) > 73 GOTO 220
200 X(I) = X(I) * 3.141 / 180
205 D = ( COS (X(I))) ^ P
210 GOTO 260
220 U(I) = 6.27 * 10 ^ ( - 13) * (X(I) - 50) ^ 8.02
230 Z(I) = X(I) - U(I)
240 Z(I) = Z(I) * 3.141 / 180
```

```

250 D = ( COS (Z(I))) ^ P
260 D = D ^ 0.25
270 F(I) = L * D
280 PRINT I,F(I)
290 NEXT I
300 DATA 93,80,66,55,40,30,26,30,38,38,50,63,76,90
310 PRINT "SI VOUS VOULEZ LE TRACER TAPER OUI"
320 INPUT S$
330 IF S$ = "OUI" THEN GOTO 350
340 GOTO 320
350 HGR2
360 HCOLOR= 7
370 HPLOT 0,0 TO 0,159: HPLOT 0,159 TO 260,159
380 FOR T = 0 TO 25
390 HPLOT 10 * T,157 TO 10 * T,161
400 NEXT T
410 FOR I = 0 TO 7
420 HPLOT 0,159 - 20 * T TO 2,159 - 20 * T
430 NEXT I
440 FOR I = 0 TO 23
450 F(I) = F(I) * 40
460 F(I) = 159 - F(I)
470 HPLOT 10 * I,F(I)
480 NEXT I
490 FOR I = 0 TO 22
500 J = I + 1
510 HPLOT 10 * I,F(I) TO 10 * J,F(J)
520 NEXT I

```

U

```

07:CHR$(27):"G":CHR$(9):"132N"

```

ULIST

```

1 REM VARIATION PREVUE ET MESUREE DE FO F1
2 DIM X(100),F(100)
3 DIM T(100),H(100)
5 HOME
10 PRINT "DONNEZ LA VALEUR R12 DU MOIS CONSIDERE"
20 INPUT R
30 G = 25.4
40 X0 = 50 + 0.348 * G

```

```

50 X100 = 38.7 + 0.509 * G
60 XM = X0 + 0.01 * (X100 - X0) * R
110 N = 0.093 + 0.00461 * G - 0.000054 * G ^ 2 + 0.00031 * R
120 FSO = 4.35 + 0.0058 * G - 0.00012 * G ^ 2
130 V = 5.35 + 0.011 * G - 0.00023 * G ^ 2
140 H = FSO + 0.01 * (V - FSO) * R
145 PRINT "HEURES"; TAB( 18);"VALEURS DE F01"
150 FOR I = 6 TO 18
155 T(I) = I
160 READ X(I),H(I)
170 IF X(I) < = XM GOTO 185
175 GOTO 210
185 X(I) = X(I) * 3.141 / 180
190 F(I) = H * ( COS (X(I))) ^ N
200 PRINT T(I),F(I)
210 NEXT I
220 DATA 83,0.70,0.52,0.43,4.5,29,4.5,15,4.5,3,4.5,14,4.5,27,4.5,40,4
.67,0,80,0
230 PRINT "SI VOUS VOULEZ LE TRACER TAPEZ OUI"
240 INPUT S$
250 IF S$ = "OUI" THEN GOTO 270
260 GOTO 240
270 HGR2
280 HCOLOR= 7
290 HPLOT 0,0 TO 0,191; HPLOT 0,191 TO 230,191
300 FOR T = 0 TO 23
310 HPLOT 10 * T,189 TO 10 * T,191
320 NEXT T
330 FOR T = 0 TO 5
340 HPLOT 0,191 - 32 * T TO 2,191 - 32 * T
350 NEXT T
355 FOR I = 0 TO 23
360 F(I) = F(I) * 32
370 F(I) = 191 - F(I)
380 HPLOT 10 * T(I),F(I)
385 NEXT I
390 FOR I = 8 TO 15
400 J = I + 1
410 HPLOT 10 * T(I),F(I) TO 10 * T(J),F(J)
420 NEXT I
430 FOR I = 6 TO 18
450 H(I) = H(I) * 32
460 H(I) = 191 - H(I)
470 HPLOT 10 * I,H(I)
480 NEXT I

```

```
80 H PLOT 10 * T,189 TO 10 * T,1
U?CHR#(27);"G";CHR#(9);"8ON"
```

ULIST

```
5 REM "VARIATION DIURNE DE FOF1"
10 DIM X(100),Y(100)
20 HGR2
30 HCOLOR= 7
35 H PLOT 0,0 TO 0,159: H PLOT 0,159 TO 279,159
40 FOR T = 0 TO 23
45 H PLOT 10 * T,157 TO 10 * T,161
47 NEXT T
50 FOR T = 0 TO 4
52 H PLOT 0,159 - 30 * T TO 2,159 - 30 * T
54 NEXT T
55 READ N
60 FOR I = 0 TO N
70 READ X(I),Y(I)
75 X(I) = X(I) * 10
80 Y(I) = Y(I) * 30
85 Y(I) = 159 - Y(I)
90 H PLOT X(I),Y(I)
95 NEXT I
100 DATA 22
110 DATA 6,3.3,7,4,8,4.1,9,4.3,10,4.4,11,4.4,12,4.4,13,4.4,14,4.3,15,4
2,16,4,17,3.6,6,2.1,7,2.8,8,3.05,9,3.28,10,3.5,11,3.5,12,3.45,13,3.5
14,3.25,15,3,16,2.7,17,2.3
```

```
U
U?CHR#(27);"G";CHR#(9);"8ON"
```

ULIST

```
1 REM VARIATION DIURNE DE FOF2
2 DIM F(100),X(100)
5 HGR2
7 HCOLOR= 7
10 FOR I = 0 TO 47
30 READ F(I)
35 NEXT I
60 H PLOT 0,0 TO 0,191: H PLOT 0,191 TO 230,191
70 FOR T = 0 TO 23
```

```

80 HFPLOT 10 * T,189 TO 10 * T,191
90 NEXT T
100 FOR T = 0 TO 4
110 HFPLOT 0,191 - 32 * T TO 2,191 - 32 * T
120 NEXT T
125 FOR I = 0 TO 23
130 F(I) = F(I) * 8
140 F(I) = 191 - F(I)
150 HFPLOT 10 * I,F(I)
160 NEXT I
180 FOR I = 0 TO 22
190 J = I + 1
200 HFPLOT 10 * I,F(I) TO 10 * J,F(J)
210 NEXT I
280 DATA 3.4,3.2,2.8,2.8,2.4,2.4,5.2,5.8,6,6.2,6.9,8,9.8,9.8,11.2,11.8,
11.8,11.9,12.6,9.4,9,6.4,5.7,4.6,4.7,8.1,7.1,7.2,5.2,4.3,3.5,6.7,7.6,
8,8.7,9.7,11.3,12.7,13.1,14,14,14,14.5,0,0,0,0,10.8,9

```

```

U
U7CHR$(27) ; "G" ; CHR$(9) ; "BON"

```

```

ULIST

```

```

5 REM "DETERMINATION DE KE ET N POUR UN MOIS DONNE"
10 HOME
20 W = 2.3025
30 DIM Z(100),A(100)
40 DIM X(100),Y(100)
50 READ N
60 FOR I = 1 TO N
70 READ Z(I),A(I)
80 X(I) = ( LOG (Z(I))) / W + 2
90 Y(I) = ( LOG (A(I))) / W
100 NEXT I
110 GOSUB 400
120 GOSUB 300
130 PRINT TAB( 16) ; "PENTE A=" ; A
140 PRINT "ORDONNEE A L'ORIGINE B=" ; B
143 PRINT "ORDONNEE A L'ORIGINE REELLE B1=" ; B1
145 PRINT TAB( 10) ; "VALEUR DE KE=" ; KE
150 PRINT TAB( 8) ; "COEFFICIENT R=" ; R
160 PRINT
170 PRINT "X" ; TAB( 20) ; "Y MESURE"

```

```

180 PRINT
200 FOR I = 1 TO N
210 PRINT X(I),Y(I)
220 NEXT I
230 PRINT "SI VOUS VOULER Y CALCULE TAPEZ OUI"
240 INPUT S$
250 IF S$ = "OUI" THEN GOTO 255
252 GOTO 240
255 PRINT "X"; TAB( 20);"Y CALCULE"
260 PRINT
262 FOR I = 1 TO N
264 Y1 = A * X(I) + B
270 PRINT X(I),Y1
275 NEXT I
280 PRINT "SI VOUS VOULEZ LE TRACER Y=F(X) TAPEZ OUI"
290 INPUT Q$
292 IF Q$ = "OUI" THEN GOTO 600
295 END
297 DATA 12
299 DATA .152,2.15,.383,2.85,.592,3.22,.766,3.52,.892,3.8,.961,3.75,.
.3.8,.917,3.7,.805,3.55,.644,3.3,.443,2.98,.216,2.4
300 U1 = 0
310 U2 = 0
320 FOR I = 1 TO N
330 U1 = U1 + (Y(I) - A * X(I) - B) ^ 2
340 U2 = U2 + (A * X(I) + B - V1 / N) ^ 2
350 NEXT I
360 R = SGN (A) * SQR ( ABS (1 - U1 / U2))
370 RETURN
400 U1 = 0
410 U2 = 0
420 V1 = 0
430 K = 0
440 FOR I = 1 TO N
450 U1 = U1 + X(I)
460 V1 = V1 + Y(I)
470 U2 = U2 + X(I) * X(I)
480 K = K + X(I) * Y(I)
490 NEXT I
500 A = (K - U1 * V1 / N) / (U2 - U1 * U1 / N)
510 B = (V1 - A * U1) / N
515 B1 = B + 2 * A
518 KE = 10 ^ B1
520 RETURN
600 HGR2
610 HCOLOR= 7

```

```

620 HPLOT 0,0 TO 0,191: HPLOT 0,185 TO 270,185
623 FOR T = 0 TO 9
626 HPLOT 26 * T,183 TO 26 * T,187
628 NEXT T
630 FOR T = 0 TO 5
632 HPLOT 0,185 - 30 * T TO 2,185 - 30 * T
635 NEXT T
638 FOR I = 1 TO N
640 X(I) = X(I) * 260
650 Y(I) = 191 - 300 * Y(I)
660 HPLOT X(I) - 260,Y(I)
670 NEXT I
680 FOR X = 260 TO 520
690 X = X / 260
695 Y = A * X + B
700 Y = 191 - 300 * Y
705 X = X * 260
715 HPLOT X - 260,Y
730 NEXT X

```

0

UCBRR\$(27); "G"; CHR\$(9); "BON"

ULIST

```

1 REM "VARIATION DE KE DU KF1 AVEC R12"
2 READ N
10 DATA 5
20 FOR I = 1 TO N
25 READ R(I),K(I)
30 DATA 9.9,4.5426,17.4,4.6826,26.9,4.6339,63.1,5.0946,95.3,5.4702
40 NEXT I
45 GOSUB 200
50 HGR2
60 HCOLOR= 7
70 HPLOT 0,0 TO 0,159: HPLOT 0,159 TO 225,159
80 FOR T = 0 TO 14
90 HPLOT 15 * T,157 TO 15 * T,161
100 NEXT T
110 FOR T = 0 TO 5
120 HPLOT 0,159 - 24 * T TO 2,159 - 24 * T
130 NEXT T
140 FOR I = 1 TO N

```

```

150 K(I) = K(I) * 24
160 K(I) = 159 - K(I)
170 H PLOT R(I),K(I)
180 NEXT I
182 FOR R = 0 TO 225
184 K = A * R + B
186 K = 159 - 24 * K
188 H PLOT R,K
189 NEXT R
200 U1 = 0
210 U2 = 0
220 V1 = 0
230 Z = 0
235 HOME
240 FOR I = 1 TO N
250 U1 = U1 + R(I)
260 V1 = V1 + K(I)
270 U2 = U2 + R(I) * R(I)
280 Z = Z + R(I) * K(I)
290 NEXT I
300 A = (Z - U1 * V1 / N) / (U2 - U1 * U1 / N)
310 B = (V1 - A * U1) / N
320 PRINT "PENTE =" ; A
330 PRINT "ORDONNE A L'ORIGINE=" ; B
340 PRINT
350 PRINT "SI VOUS VOULEZ LE TRACER TAPEZ OUI"
360 INPUT S$
370 IF S$ = "OUI" GOTO 380
375 GOTO 350
380 RETURN

```

```

0
0?CHR$(27) ; "G" ; CHR$(9) ; "BON"

```

ULIST

```

1 REM "VARIATION DE P AVEC R12"
2 READ N
10 DATA 5
20 FOR I = 1 TO N
25 READ R(I),K(I)
30 DATA 9.9,0.1804,17.4,0.2108,26.9,0.1368,63.1,0.3403,95.3,0.15
40 NEXT I
45 GOSUB 200
50 HGR2

```

```

60 HCOLOR= 7
70 HPLOT 0,0 TO 0,159: HPLLOT 0,159 TO 225,159
80 FOR T = 0 TO 14
90 HPLLOT 15 * T,157 TO 15 * T,161
100 NEXT T
110 FOR T = 0 TO 5
120 HPLLOT 0,159 - 24 * T TO 2,159 - 24 * T
130 NEXT T
140 FOR I = 1 TO N
150 K(I) = K(I) * 24
160 K(I) = 159 - K(I)
170 HPLLOT R(I),K(I)
180 NEXT I
182 FOR R = 0 TO 225
184 K = A * R + B
186 K = 159 - 24 * K
188 HPLLOT R,K
189 NEXT R
200 U1 = 0
210 U2 = 0
220 V1 = 0
230 Z = 0
235 HOME
240 FOR I = 1 TO N
250 U1 = U1 + R(I)
260 V1 = V1 + K(I)
270 U2 = U2 + R(I) * R(I)
280 Z = Z + R(I) * K(I)
290 NEXT I
300 A = (Z - U1 * V1 / N) / (U2 - U1 * U1 / N)
310 B = (V1 - A * U1) / N
320 PRINT "PENDE =" ; A
330 PRINT "ORDONNE A L'ORIGINE=" ; B
340 PRINT
350 PRINT "SI VOUS VOULEZ LE TRACER TAPEZ OUI"
360 INPUT S#
370 IF S# = "OUI" GOTO 380
375 GOTO 350
380 RETURN

```

U

U:CHR\$(27);"G";CHR\$(9)+"BON"

ULIST

```
1 REM "VARIATION DE XM AVEC R12"
2 READ N
10 DATA 14
15 DIM R(100),K(100)
20 FOR I = 1 TO N
25 READ R(I),K(I)
30 DATA 39.8,30,39.8,26,29.7,40,29.7,42,15.4,66,15.4,63,12.5,53,12.5
    ,34.5,66,34.5,50,82.2,40,82.2,42,104.7,53,104.7,42
40 NEXT I
45 GOSUB 200
50 HGR2
60 HCOLOR= 7
70 HPLLOT 0,0 TO 0,159: HPLLOT 0,159 TO 225,159
80 FOR T = 0 TO 14
90 HPLLOT 15 * T,157 TO 15 * T,161
100 NEXT T
110 FOR T = 0 TO 14
120 HPLLOT 0,159 - 10 * T TO 2,159 - 10 * T
130 NEXT T
140 FOR I = 1 TO N
150 K(I) = K(I) * 10 / 15
160 K(I) = 159 - K(I)
170 HPLLOT R(I),K(I)
180 NEXT I
182 FOR R = 0 TO 225
184 K = A * R + B
186 K = 159 - K * 10 / 15
188 HPLLOT R,K
189 NEXT R
200 U1 = 0
210 U2 = 0
220 V1 = 0
230 Z = 0
235 HOME
240 FOR I = 1 TO N
250 U1 = U1 + R(I)
260 V1 = V1 + K(I)
270 U2 = U2 + R(I) * R(I)
280 Z = Z + R(I) * K(I)
290 NEXT I
300 A = (Z - U1 * V1 / N) / (U2 - U1 * U1 / N)
310 B = (V1 - A * U1) / N
320 PRINT "PENDE =" ; A
330 PRINT "ORDONNE A L'ORIGINE=" ; B
```

```

340 PRINT
350 PRINT "SI VOUS VOULEZ LE TRACER TAPEZ OUI"
360 INPUT S$
370 IF S$ = "OUI" GOTO 380
375 GOTO 350
380 RETURN

```

```

U
U?CHR$(27)+"G";CHR$(9);"BON"

```

#### ULIST

```

0 REM "VARIATION DE FOE AVEC R12 POUR UNE HEURE DONNEE /ETE/HIVER"
1 DIM R(100),K(100)
2 READ N
10 DATA 18
20 FOR I = 1 TO N
25 READ R(I),K(I)
30 DATA 194.4,4.3,184.9,4.02,151.3,4.25,102.4,4.2,52.4,3.8,27.2,3.2,1
    2,3.45,16.4,3.5,56.6,3.65,95.3,4
35 DATA 170.2,3.7,178.6,4,128.9,3.9,80.2,3.6,29.4,3.2,11.7,3.3,27.7,3
    .75,3.52
40 NEXT I
42 N = 10
43 HGR2
60 HCOLOR= 7
70 HPLOT 0,0 TO 0,159: HPLOT 0,159 TO 225,159
80 FOR T = 0 TO 14
90 HPLOT 15 * T,157 TO 15 * T,161
100 NEXT T
110 FOR T = 0 TO 5
120 HPLOT 0,159 - 24 * T TO 2,159 - 24 * T
130 NEXT T
131 GOSUB 200
132 GOTO 140
133 GOSUB 330
135 GOTO 190
140 FOR I = 0 TO 9
150 K(I) = K(I) * 24
160 K(I) = 159 - K(I)
170 HPLOT R(I),K(I)
180 NEXT I
182 FOR R = 0 TO 225
184 K = A * R + B
186 K = 159 - 24 * K
187 HPLOT R,K
188 NEXT R
189 GOTO 133
190 FOR I = 10 TO 18

```

```

191 K(I) = 159 - 24 * K(I)
192 HPLOT R(I),K(I)
193 NEXT I
194 FOR R = 0 TO 225
195 K = C * R + D
196 K = 159 - 24 * K
197 HPLOT R,K
198 NEXT R
200 U1 = 0
202 U2 = 0
204 V1 = 0
210 Z = 0
220 FOR I = 1 TO 10
250 U1 = U1 + R(I)
260 V1 = V1 + K(I)
270 U2 = U2 + R(I) * R(I)
280 Z = Z + R(I) * K(I)
290 NEXT I
300 A = (Z - U1 * V1 / N) / (U2 - U1 * U1 / N)
310 B = (V1 - A * U1) / N
320 RETURN
330 U1 = 0
335 N = 8
340 U2 = 0
350 V1 = 0
360 Z = 0
370 FOR I = 11 TO 18
380 U1 = U1 + R(I)
390 V1 = V1 + K(I)
400 U2 = U2 + R(I) * R(I)
410 Z = Z + R(I) * K(I)
420 NEXT I
430 C = (Z - U1 * V1 / N) / (U2 - U1 * U1 / N)
440 D = (V1 - C * U1) / N
450 RETURN

```

U

U7CHR\*(27);"G";CHR\*(9);"80N"

ULIST

0 REM "VARIATION DE FOF2 AVEC R12 EN ETE POUR DIFFERENTS HEURES DU JOUR

1 DIM R(100),K(100)

2 READ N

10 DATA 24

20 FOR I = 1 TO N

25 READ R(I),K(I)

30 DATA 194.4,6.3,184.9,7.8,151.3,7.5,102.4,7.2,52.4,4.1,27.2,1.7,10.2,  
2.8,16.4,2.8,56.6,6.4,95.3,6.4,104.8,6,106.5,6.5

35 DATA 194.4,12.8,184.9,13.6,151.3,13.6,102.4,12.4,52.4,10.3,27.2,10,  
0.2,7,16.4,8,56.6,10,95.3,11.9,104.8,9.8,106.5,9.6

40 NEXT I

42 N = 12

43 HGR2

60 HCOLOR= 7

70 HPLOT 0,0 TO 0,159: HPLOT 0,159 TO 225,159

80 FOR T = 0 TO 14

90 HPLOT 15 \* T,157 TO 15 \* T,161

100 NEXT T

110 FOR T = 0 TO 5

120 HPLOT 0,159 - 12 \* T TO 2,159 - 12 \* T

130 NEXT T

131 GOSUB 200

132 GOTO 140

133 GOSUB 330

135 GOTO 190

140 FOR I = 1 TO 12

150 K(I) = K(I) \* 6

160 K(I) = 159 - K(I)

170 HPLOT R(I),K(I)

180 NEXT I

182 FOR R = 0 TO 225

184 K = A \* R + B

186 K = 159 - 6 \* K

187 HPLOT R,K

188 NEXT R

189 GOTO 133

190 FOR I = 13 TO 24

191 K(I) = 159 - 6 \* K(I)

192 HPLOT R(I),K(I)

193 NEXT I

194 FOR R = 0 TO 225

195 K = C \* R + D

196 K = 159 - 6 \* K

197 HPLOT R,K

```

198 NEXT R
200 U1 = 0
202 U2 = 0
204 V1 = 0
210 Z = 0
220 FOR I = 1 TO 12
250 U1 = U1 + R(I)
260 V1 = V1 + K(I)
270 U2 = U2 + R(I) * R(I)
280 Z = Z + R(I) * K(I)
290 NEXT I
300 A = (Z - U1 * V1 / N) / (U2 - U1 * U1 / N)
310 B = (V1 - A * U1) / N
320 RETURN
330 U1 = 0
335 N = 12
340 U2 = 0
350 V1 = 0
360 Z = 0
370 FOR I = 13 TO 24
380 U1 = U1 + R(I)
390 V1 = V1 + K(I)
400 U2 = U2 + R(I) * R(I)
410 Z = Z + R(I) * K(I)
420 NEXT I
430 C = (Z - U1 * V1 / N) / (U2 - U1 * U1 / N)
440 D = (V1 - C * U1) / N
450 RETURN

```

```

0
07CHR*(27); "G"; CHR*(89); "BON"

```

ULIST

```

1 REM "VARIATION DE FOF1 AVEC R12 POUR UN MOIS ET UNE HEURE DONNE"
2 READ N
10 DATA 12
15 DIM R(100),K(100)
20 FOR I = 1 TO N
25 READ R(I),K(I)
30 DATA 194.4,6.6,184.9,6.5,151.3,6.3,102.4,5.6,52.4,5,27.2,4.4,10.2,
4,16.4,4.5,56.6,5,95.3,5.5,104.8,5.3,106.5,5.5
40 NEXT I
45 GOSUB 200
50 HGR2
60 HCOLOR= 7
70 HPLLOT 0,0 TO 0,159: HPLLOT 0,159 TO 225,159
80 FOR T = 0 TO 14

```

```

90 HPLOT 15 * I,157 TO 15 * T,161
100 NEXT T
110 FOR T = 0 TO 8
120 HPLOT 0,159 - 12 * T TO 2,159 - 12 * T
130 NEXT T
140 FOR I = 1 TO N
150 K(I) = K(I) * 12
160 K(I) = 159 - K(I)
170 HPLOT R(I),K(I)
180 NEXT I
182 FOR R = 0 TO 225
184 K = A * R + B
186 K = 159 - 12 * K
188 HPLOT R,K
189 NEXT R
200 U1 = 0
210 U2 = 0
220 V1 = 0
230 Z = 0
235 HOME
240 FOR I = 1 TO N
250 U1 = U1 + R(I)
260 V1 = V1 + K(I)
270 U2 = U2 + R(I) * R(I)
280 Z = Z + R(I) * K(I)
290 NEXT I
300 A = (Z - U1 * V1 / N) / (U2 - U1 * U1 / N)
310 B = (V1 - A * U1) / N
320 PRINT "PENTE =",A
330 PRINT "ORDONNE A L'ORIGINE=",B
340 PRINT
350 PRINT "SI VOUS VOULEZ LE TRACER TAPEZ OUI"
360 INPUT S$
370 IF S$ = "OUI" GOTO 380
375 GOTO 350
380 RETURN

```

```

0
0?CHR#827) ; "G" ; CHR#99) ; "BON"

```

ULIST

```

1 REM "VARIATION DIURNE DE M(3000)F2"
2 DIM F(100),X(100)
5 HGR2
7 HCOLOR= 7
10 FOR I = 0 TO 23
30 READ F(I)
35 NEXT I

```

```
60 HPLOT 0,0 TO 0,191; HPLOT 0,191 TO 230,191
70 FOR T = 0 TO 23
80 HPLOT 10 * T,189 TO 10 * T,191
90 NEXT T
100 FOR T = 0 TO 6
110 HPLOT 0,191 - 20 * T TO 2,191 - 20 * T
120 NEXT T
125 FOR I = 0 TO 23
130 F(I) = F(I) * 100 - 250
140 F(I) = 191 - F(I)
150 HPLOT 10 * I,F(I)
160 NEXT I
180 FOR I = 0 TO 22
190 J = I + 1
200 HPLOT 10 * I,F(I) TO 10 * J,F(J)
210 NEXT I
280 DATA 3.08,3.05,3.20,3.35,3.35,3.05,3.45,3.50,3.35,3.22,3.20,3.12,3.
10,3.15,3.20,3.25,3.25,3.22,3.20,3.15,3,2.98,3.05,3.05
```

U

U?CHR\$(27); "G"; CHR\$(9); "BON"

ULIST

```
0 REM "VARIATION DEM(3000)F2 AVEC R12 POUR UNE HEURE FIXEE EN EQUINOXE E
  T EN HIVER
1 DIM R(100),K(100)
20 FOR I = 1 TO 33
25 READ R(I),K(I)
30 DATA 201.3,2.58,174.5,2.65,121.6,2.75,68.8,3.05,39.8,3.25,29.7,3.02,
  15.4,3.1,12.5,3.1,34.5,3.25,82.2,2.75,104.7,3.1,183.8,2.5,146.3,2.7,9
  7.9,2.85,52.3,2.95,26.9,3.32,9.9,3.15,17.4,3.05,63.1,2.95,95.3,2.88
35 DATA 80.2,3.1,45.2,3.08,19.5,3.2,11.7,3.35,75,3.1,83.7,3.05,48.7,3.3
  5,29.8,3.25,21.3,3.38,11,3.4,24.5,3.45,72.7,3.2,100.6,3.15
40 NEXT I
43 HGR2
60 HCOLOR= 7
70 HPLLOT 0,0 TO 0,159: HPLLOT 0,159 TO 225,159
80 FOR T = 0 TO 14
90 HPLLOT 15 * T,157 TO 15 * T,161
100 NEXT T
110 FOR T = 0 TO 3
120 HPLLOT 0,159 - 50 * T TO 2,159 - 50 * T
130 NEXT T
131 GOSUB 200
132 GOTO 140
133 GOSUB 330
135 GOTO 190
140 FOR I = 1 TO 20
150 K(I) = K(I) * 100
160 K(I) = K(I) - 200
165 K(I) = 159 - K(I)
170 HPLLOT R(I),K(I)
180 NEXT I
182 FOR R = 0 TO 225
```

```

184 K = A * R + B
186 K = 159 - (100 * K - 200)
187 H PLOT R,K
188 NEXT R
189 GOTO 133
190 FOR I = 21 TO 33
191 K(I) = 159 - (100 * K(I) - 200)
192 H PLOT R(I),K(I)
193 NEXT I
194 FOR R = 0 TO 225
195 K = C * R + D
196 K = 159 - (100 * K - 200)
197 H PLOT R,K
198 NEXT R
200 U1 = 0
202 U2 = 0
204 V1 = 0
206 N = 20
210 Z = 0
220 FOR I = 1 TO 20
250 U1 = U1 + R(I)
260 V1 = V1 + K(I)
270 U2 = U2 + R(I) * R(I)
280 Z = Z + R(I) * K(I)
290 NEXT I
300 A = (Z - U1 * V1 / N) / (U2 - U1 * U1 / N)
310 B = (V1 - A * U1) / N
320 RETURN
330 U1 = 0
340 U2 = 0
345 V1 = 0
350 N = 13
360 Z = 0
370 FOR I = 21 TO 33
380 U1 = U1 + R(I)
390 V1 = V1 + K(I)
400 U2 = U2 + R(I) * R(I)
410 Z = Z + R(I) * K(I)

420 NEXT I
430 C = (Z - U1 * V1 / N) / (U2 - U1 * U1 / N)
440 D = (V1 - U1 * C) / N
450 RETURN

```

## B I B L I O G R A P H I E

AKSAS Rabia " CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'IONOSPHERE INTERTROPICALE  
CONDITIONS IONOSPHERIQUES A TAMANRASSET "

C.C.I.R.

- Rapport 340 ( Oslo 1966 ).
- Supplément n° 3 au rapport 340 ( Geneve 1980)
- Supplément au rapport 252 - 2 ( 1978 )
  
- \* Rapport technique ( EST / DPI / 887 )
- \* Valeurs de l'indice R 12 ( 1909-1980 )
- \* Code de caractéristique
- \* Article sur modelisation mathématique de  $f_o F2$
- \* Bulletins de dépouillement ( 1959-1969 ) au niveau  
de tamanrasset.