

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

40/87  
R. esc

## ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



# PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

CALCUL DE LIAISONS RADIO-  
-ELECTRIQUES EN H.F.  
A PARTIR DES PREVISIONS  
DES PARAMETRES IONOSPHERIQUES

Proposé par :

Mr. R. AKSAS

Etudié par :

R. SOUKEUR  
A. M. ABSI

Dirigé par :

Mr R. AKSAS

PROMOTION

*Juin 1987*

D E D I C A C E S

A MA MERE ..... A MON PERE

A TOUTE MA FAMILLE... SURTOUT LES PETITES :  
SIHAM, FELLA ET IMANE

A TOUS CEUX QUI TEMOIGNENT QU 'IL N'Y A DIEU QUE DIEU ....  
ET QUE MOHAMMED EST SON PROPHETE.

ABSI ABDERRAZAK MOURAD

DEDICACES

---

A LA MEMOIRE DE MON FRERE MUSTAPHA

A MES PARENTS

A MES FRERES, A MES SOEURS

A TOUS MES AMI-ES

Melle SOUKEUR RADIA

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à témoigner notre profonde gratitude à Monsieur : RABIA AKSAS, Professeur de l'E.N.P., qui nous a proposé le sujet, nous a fait profiter de sa compétence pour mener à bien notre projet.

Nous remercions bien vivement Monsieur OUHADJ, Directeur du service de la planification des fréquences au niveau du Ministère des Postes et Télécommunications pour avoir mis à notre disposition les futures valeurs de l'indice d'activité solaire.

C'est tout particulièrement que nous remercions les chercheurs du nouvel observatoire de Bouzaréah pour l'aide qu'ils nous ont prodiguée.

Nos remerciements vont également à tous les responsables et les employés du Centre de calcul de l'E.N.P., surtout à Monsieur A. SARI pour sa sympathie et sa disponibilité à tout moment.

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

S O M M A I R E

INTRODUCTION:.....	1
CHAPITRE I / : FORMATION ET MORPHOLOGIE DES COUCHES IONOSPHERIQUES.	
1.1. GENERALITES.....	3
1.2. FORMATION DES COUCHES IONOSPHERIQUES.....	3
1.1. MORPHOLOGIE DES COUCHES IONOSPHERIQUES.....	9
1.3.1. REGION D.....	11
1.3.2. REGION E.....	11
1.3.3. REGION F.....	11
1.3.3.1. LA COUCHE F1.....	13
1.3.3.2. LA COUCHE F2.....	13
1.4. LES PERTURBATIONS DE PROPAGATION IONOSPHERIQUE.....	13
1.4.1. LA P.I.D.B.....	14
1.4.2. LA P.C.A.....	14
1.4.3. LES PRECIPITATIONS DES PARTICULES.....	14
1.4.4. PREVISION DES PERTURBATIONS.....	17
CHAPITRE II / : PROPAGATION DES ONDES RADIO-ELECTRIQUES.....	18
I. GENERALITES.....	18
II. TRAJECTOIRES DES ONDES H F DANS L'IONOSPHERE.....	18
II.1. MODELE PLAN.....	22
II.1.1. LOI DE LA SECANTE: ( THEOREME DE MARTYN ) .....	22
II.1.2. CONDITION DE "REFLEXION".....	23
II.1.3. ZONE DE SILENCE.....	24
II.1.4. EQUATION DE LA TRAJECTOIRE EN MODELE PLAN.....	24
II.2. MODELE SPHERIQUE : ( TERRE ET IONOSPHERE SPHERIQUE ).....	29
II.2.1. LOI DE LA SECANTE (THEOREME DE MARTYN).....	29
II.2.2. TRAJECTOIRE DU RAYON EN MODELE SPHERIQUE.....	31
CHAPITRE III / : PREVISION DES PARAMETRES IONOSPHERIQUES.....	34
I. GENERALITES.....	35
II. PREVISION DE L'ACTIVITE SOLAIRE.....	36
III. PREVISION DE LA (FOE).....	36
III.1. INFLUENCE DE LA COUCHE SUR LA LAISON RADIO.....	36

III.2. METHODE DE "MUGGLETON" POUR LA (FOE).....	37
III.2.1. LA FONCTION D'ACTIVITE SOLAIRE A1.....	37
III.2.2. LA FONCTION SAISONNIERE A2.....	38
III.2.3. LA FONCTION DE LA POSITION GEOGRAPHIQUE A3.....	38
III.2.4. LA FONCTION HORAIRE A4.....	39
IV . PREVISION DE LA MEDIANE MENSUELLE (FOF1).....	43
IV.1. MODELE DE LA (FOF1).....	43
IV.2. PREVISION DE LA (FOF1).....	43
V. PREVISION DE LA (FOF2).....	46
V.1. PRINCIPE DE LA METHODE .....	46
V.1.1. ANALYSE TEMPORELLE .....	46
V.1.2. ANALYSE GEOGRAPHIQUE .....	48

CHAPITRE IV / : DETERMINATION DE LA (MUF) ET DE LA ZONE SILENCE

I. GENERALITES	52
II. DETERMINATION DE LA ZONE DE SILENCE .....	52
II.1. LIAISON COURTE .....	53
II.2. LIAISON A GRANDE DISTANCE .....	53
III. DETERMINATION DE LA (MUF) .....	53
V. CHAPITRE : CONCLUSION.....	58

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

II  
// INTRODUCTION

La propagation ionosphérique joue un rôle important dans les communications à grande distance. La maîtrise de la liaison nécessite la connaissance des densités électroniques aux points de "reflexion".

Pour calculer plusieurs liaisons dans une zone étendue, ou à partir d'un point donné pouvoir atteindre n'importe quel autre point dans un certain rayon alentour, il est nécessaire de connaître la valeur des paramètres ionosphériques dans une zone étendue .

Des méthodes ont été élaborées pour permettre de déterminer à priori un profil ionosphérique vertical à l'aide d'un nombre restreint de paramètres caractéristiques des couches ionisées que l'on peut calculer à l'avance avec un certain degré de précision.

L'objet de notre travail consiste à donner d'abord un bref aperçu sur le mécanisme de la formation des couches ionosphériques ainsi que la description de leur morphologie et leurs effets sur les liaisons radioélectriques.

Nous avons ensuite donné les conditions de "réflexion " d'une onde dans l'ionosphère ainsi que les différentes méthodes de calcul d'une liaison (fréquence maximale utilisable, zone de silence, élévation des aériens) à partir des paramètres fondamentaux (paramètres ionosphériques prévus) d'un modèle de profil ionosphérique choisi et de méthodes mathématiques (trajectoire de rayon, loi de la sécante).

Des logiciels ont été élaborés sur un micro-ordinateur TEK 4052 du laboratoire de télécommunication, et sur VAX750 (centre de calcul), (E.N.P) pour la prévision à long terme des paramètres ionosphériques et des caractéristiques d'une liaison radioélectrique.

Toutefois , nous devons signaler que nos calculs reposent sur une prévision à long terme des valeurs médianes mensuelles. Or la variation moyenne des paramètres ionosphériques est appréciable au cours d'un mois .D'autre part , il existe une variation d'un jour à l'autre et même d'une heure à l'autre qui semble aléatoire .

Ces diverses considerations rendent souhaitables de pouvoir , faute de corriger en temps réel les médianes mensuelles de ces paramètres, d'utiliser des méthodes de prévisions à moyen et à court terme .

## CHAPITRE 1

### FORMATION ET MORPHOLOGIE DES COUCHES IONOSPHERIQUES

#### 1. GENERALITES

L'enveloppe gazeuse que représente l'atmosphère terrestre joue un rôle fondamental relativement aux conditions de vie sur notre globe (présence d'oxygène, protection contre les radiations extraterrestres).

Si l'on veut se faire une idée générale de la structure de l'atmosphère, il convient de séparer les conditions électriques et les conditions physiques de température et de la pression qui y règnent ; de ce double point de vue, on distingue les couches atmosphériques dont les épaisseurs [Fig 1-1] sont connues approximativement, car elles dépendent de plusieurs paramètres (l'heure, la saison, ....).

Du point de vue propagation radioélectrique, l'atmosphère peut se subdiviser en deux régions fondamentales à savoir :

- la basse atmosphère (0 à 50 km environ) dans cette région l'indice de réfraction est pratiquement constant ( $n=1$ ) et les trajectoires des rayons radioélectriques en gamme VHF-UHF sont pratiquement rectilignes [1].

- la haute atmosphère située généralement au-dessus de 90 km environ. Cette région est ionisée et joue un rôle important dans les liaisons radioélectriques, en gamme décimétrique.

#### 2. FORMATION DES COUCHES IONOSPHERIQUES

L'ionisation du plasma ionosphérique est due essentielle-

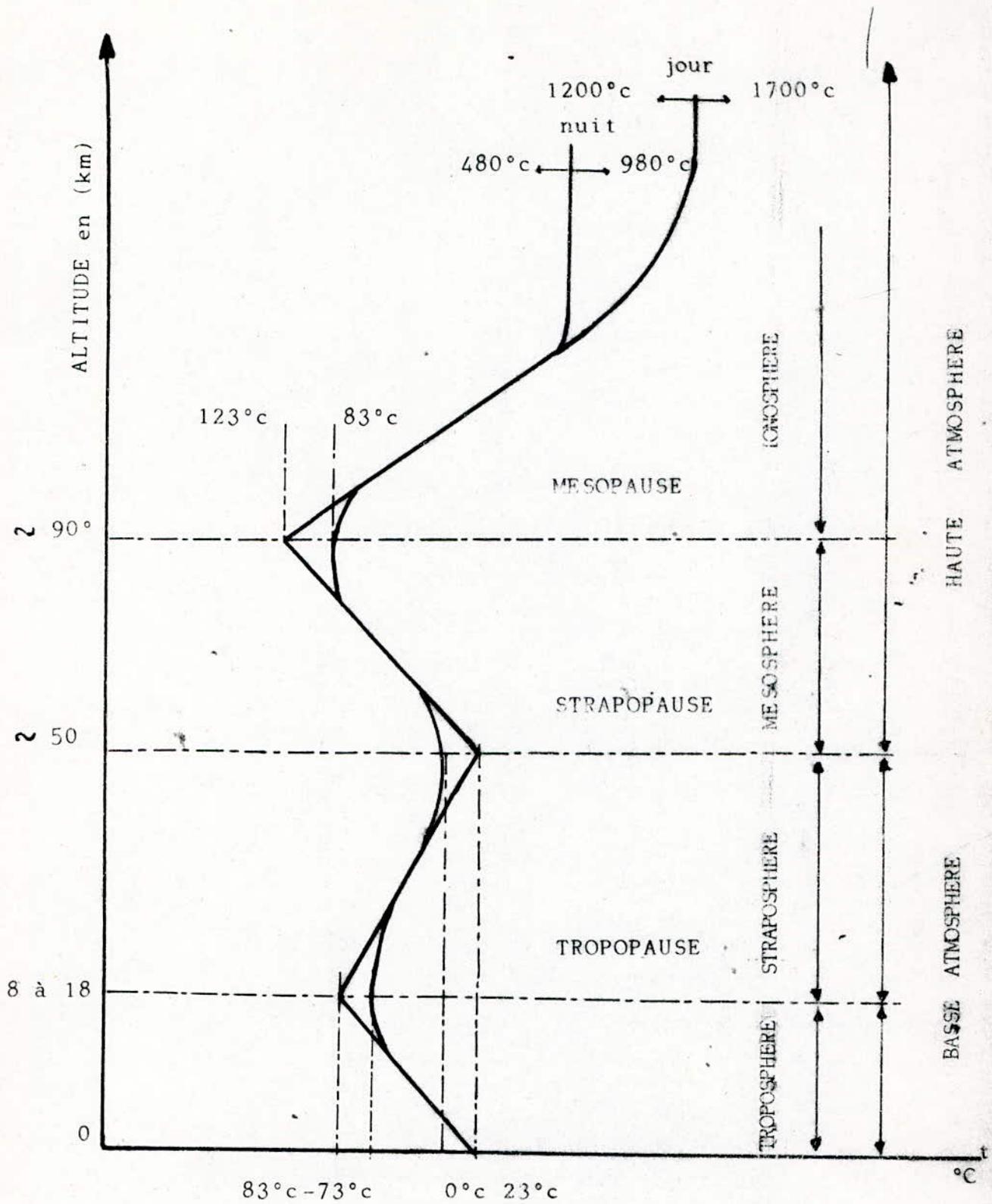


FIG I-1 Profil vertical de température et structure en couches de l'atmosphère terrestre

ment au rayonnement électromagnétique solaire\* situé dans le spectre couvrant l'ultra-violet et les rayons X.

Une ionisation supplémentaire est due également à des particules énergétiques d'origine solaire et des rayons cosmiques.

Ces rayonnements transportent des photons qui dissocient les molécules atmosphériques en atomes neutres et [ Fig 1-2 ] provoquent ensuite l'ionisation de ces atomes (pertes d'un ou de plusieurs électrons) 3. Les électrons arrachés se fixent sur les atomes neutres pour donner des ions négatifs.

Le rayonnement solaire étant progressivement absorbé au fur et à mesure qu'il traverse l'atmosphère, son pouvoir ionisant dépend donc essentiellement de la longueur de son trajet dans l'atmosphère, donc de la distance zenithale solaire [ Fig 1-3 ].

Cependant, la densité électronique varie également en fonction des saisons, de l'activité solaire, de la situation géographique du point d'observation.

Cette ionisation est alors compensée par le processus de recombinaison à la suite de collisions. La basse atmosphère étant plus dense, la fréquence de collision diminue [ 2 ] donc avec l'altitude, par conséquent la densité d'ionisation diminue également [ Fig 1-4 ] avec l'altitude. C'est la raison pour laquelle les couches ionosphériques hautes (F2, F1) sont plus ionisées que les couches inférieures (E, D).

Pour bien illustrer le phénomène de formation de l'ionosphère, Chapman (1931) a proposé un modèle mathématique, bien que simplifié, explique assez bien le processus de cette formation.

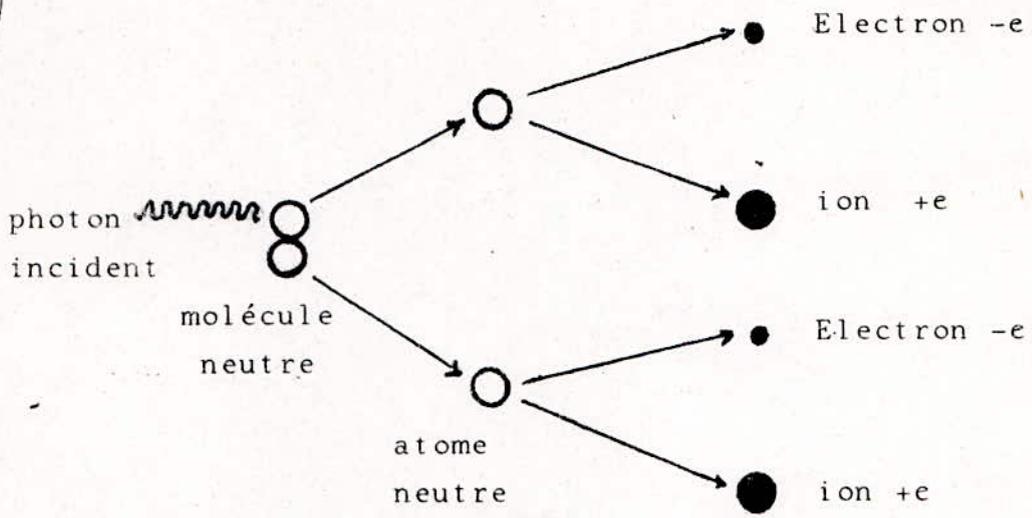


FIG I-2 DISSOCIATION D'UNE MOLECULE ET IONISATION DES ATOMES NEUTRES OBTENUS.

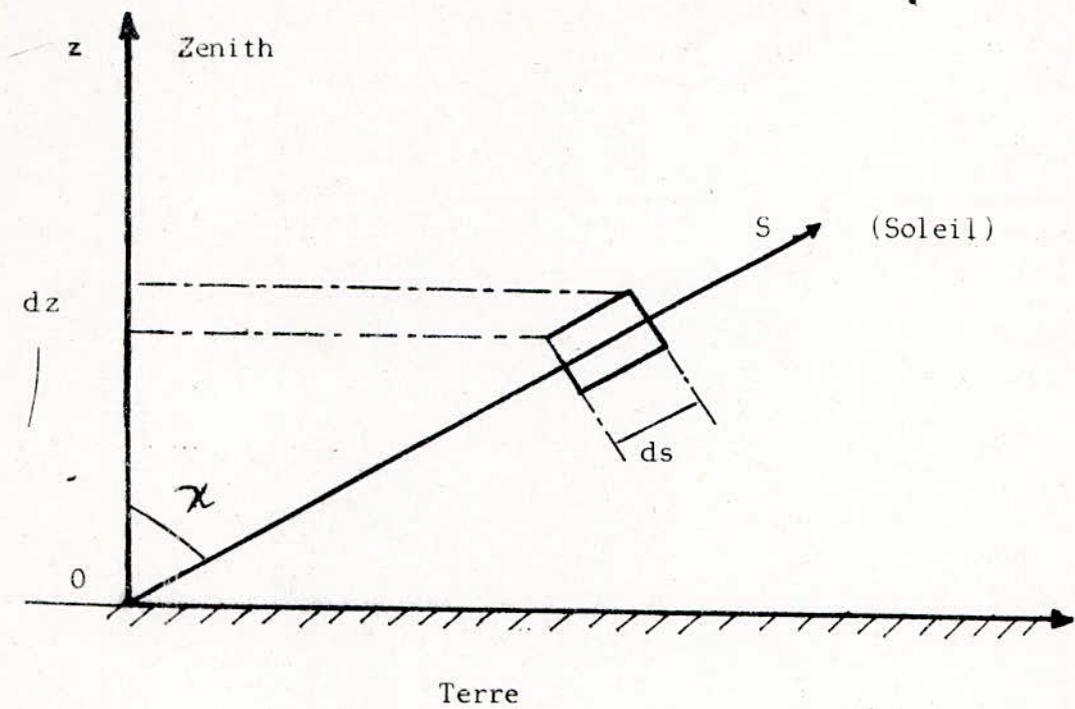


FIG. 1 - 3 .

$OZ$  : Direction Verticale

$OS$  : Direction du Soleil

$\chi$  : Distance Zenithale Solaire

$ds$  : element de l'atmosphère éclairé par le soleil

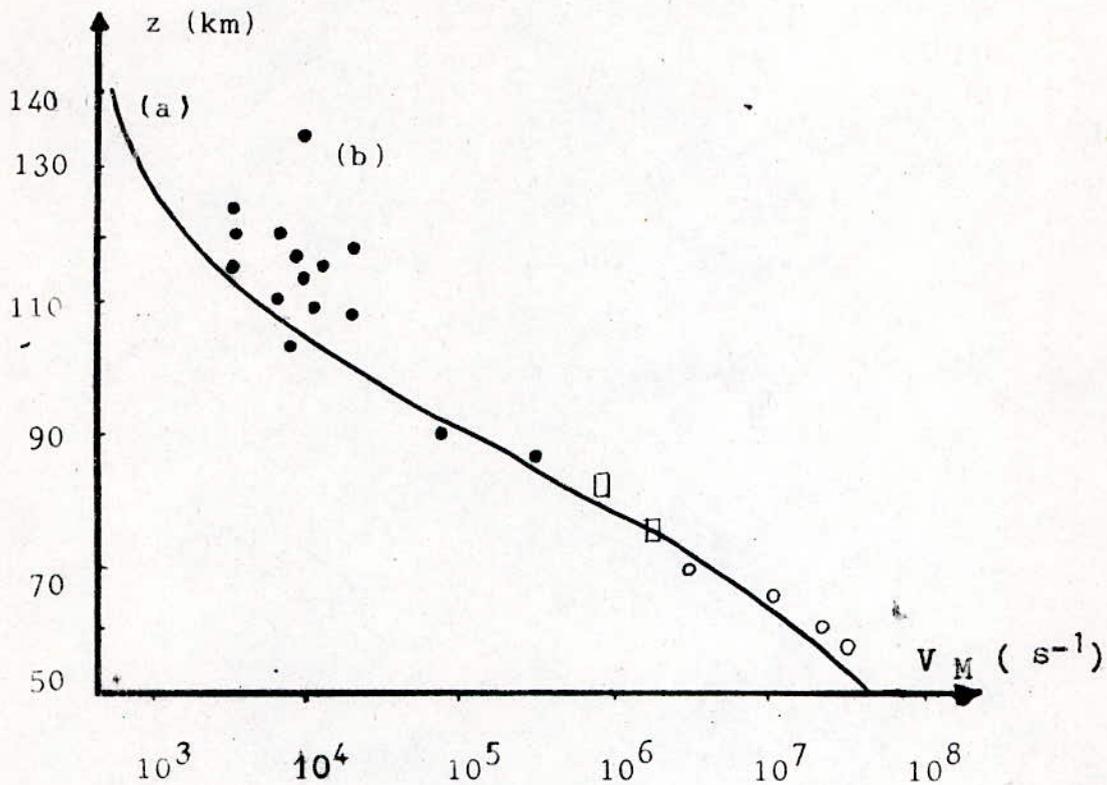


FIG 1-4

Variation de la fréquence des collisions en l'absence du **champ** électrique extérieur en fonction de l'altitude

- (a) Variation moyenne déduite de la variation moyenne de pression et de mesures des **sections** efficaces de  $N_2$  et  $O_2$  en laboratoire .
- (b) Valeurs mesurées par Kane, en Novembre 1965 (O), Mars 1969 (□) et Tacchia, en 1964, par satellite (●) .

[ Document CNET LANNION ]

Ce modèle donne le taux de production électronique en fonction de l'altitude, et s'exprime par la relation suivante :

$$P(Z) = P_{om} \exp \left[ 1 - \epsilon_0 - \frac{\exp - \epsilon_0}{\cos \chi} \right] \quad [1-1]$$

avec :

$P(Z)$  : taux de production des électrons

$P_{om}$  : taux de production maximal des électrons

$\chi$  : distance zenithale solaire

$\epsilon_0$  :  $\frac{Z - Z_{om}}{H}$  = Altitude réduite

$H = \frac{KT}{Mg}$  : échelle de hauteur

$K$  : constante de Boltzman

$T$  : température absolue

$m$  : masse moyenne particulaire

$g$  : champ de gravité

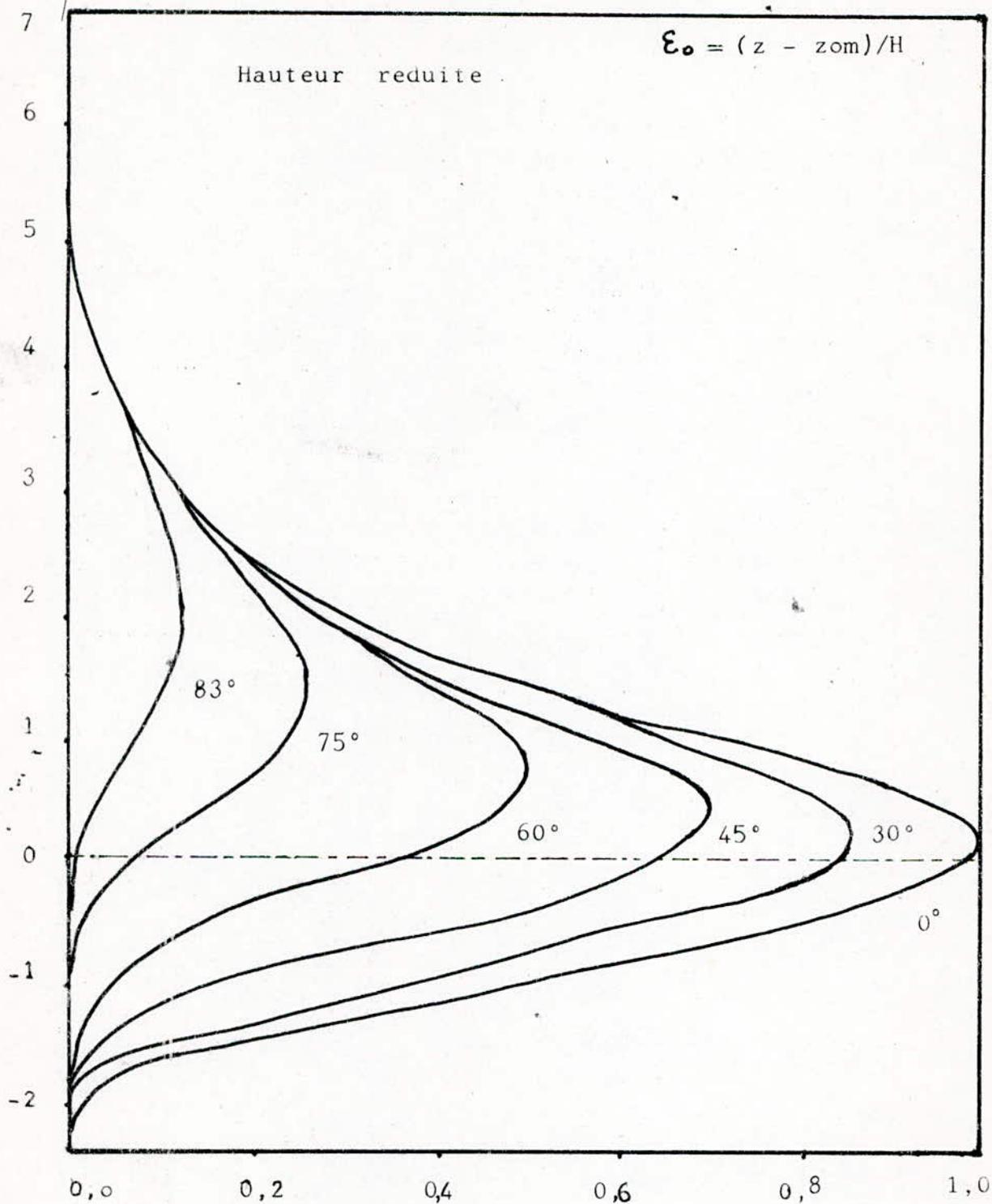
$Z_{om}$  : valeur de  $Z$  pour  $\chi = 0$

Les courbes de production électronique en fonction de la hauteur réduite sont illustrées par la [Fig. 1-5] obtenue en vertu de l'équation [1-1].

Le modèle de Chapman explique bien le comportement ionosphérique au niveau de la couche E, mais ne tient pas compte du phénomène de transport qui contribue pourtant à la formation de la couche F2.

### 3. MORPHOLOGIE DES COUCHES IONOSPHERIQUES

Depuis l'avènement des sondages verticaux on divise l'iono-



Courbes de Chapman :

Fig.1-5 Taux de production électronique en fonction de la hauteur réduite  $\epsilon_0$  pour différentes valeurs de la distance zénithale solaire  $\chi$  .[9] .

-sphère en trois grandes [ Tableau I-1 ] régions D, E et F. Selon, la densité électronique en fonction [ Fig I-6 ] de l'altitude, la nature des atomes ionisés et leur comportement vis à vis de la propagation des ondes radioélectriques.

3.1. - Région D : située approximativement entre 55 et 95 km d'altitude, possède la densité électronique la plus faible ( $10^8$  à  $10^9$  e<sup>-</sup>/m<sup>3</sup>) environ. Par conséquent sa fréquence critique (proportionnelle à la racine carrée de la densité électronique) ne peut excéder 0,5 MHz. Cette couche n'est donc pas observable sur les ionogrammes. Etant la plus basse le phénomène de recombinaison l'emporte sur le mécanisme d'ionisation, elle constitue ainsi un milieu absorbant pour les ondes moyennes (hectométriques par exemple). C'est donc une couche diurne qui se comporte pour de telles ondes comme un rideau opaque au dessous de la couche E.

Tous ces phénomènes sont dus au fait, que d'une part, étant la plus basse, elle cesse la première d'être éclairée, et, d'autre part, étant située dans une région de grande pression, la fréquence de collision est importante.

3.2. - Région E : située entre 95 et 150 km d'altitude environ, la couche E Normale est régulière, et son comportement est conforme au modèle de Chapman, avec un maximum d'ionisation vers midi local et un maximum saisonnier en été, et augmente linéairement en fonction de l'activité solaire. De nuit l'ionisation est très faible, ce qui explique l'absence de la trace sur les ionogrammes nocturnes, car sa fréquence critique n'excède pas 0,4 à 0,6 MHz (Formule de Wakaï chapitre III).

3.3. - Région F : située au-dessus de 150 km, elle présente une stratification le jour qui permet de la subdiviser en deux couches F1 et F2.

NOM DES REGIONS	ALTITUDE APPROXIMA- TIVE EN KM	NOMBRE MAXIMAL D'e <sup>-</sup> /m <sup>3</sup>	OBSERVATIONS
D	55 à 95	10 <sup>8</sup> à 10 <sup>9</sup>	De nuit la concentra- tion électronique n'est pratiquement pas mesu- rable
E	95 à 150	10 <sup>9</sup> - 10 <sup>11</sup>	Concentration nocturne, elle suit fidèlement les variations solaires
F	au-delà de 150	10 <sup>12</sup> vers 350 km	Pendant le jour la région F se dédouble en deux couches appelées F1 (maximum à 200 km) et F2 (vers 400 km) Au-delà de 900 km on ne peut plus parler de gaz ionisés mais déjà de plasmas.

[ Tableau 1-1 ]

Altitude  
en km

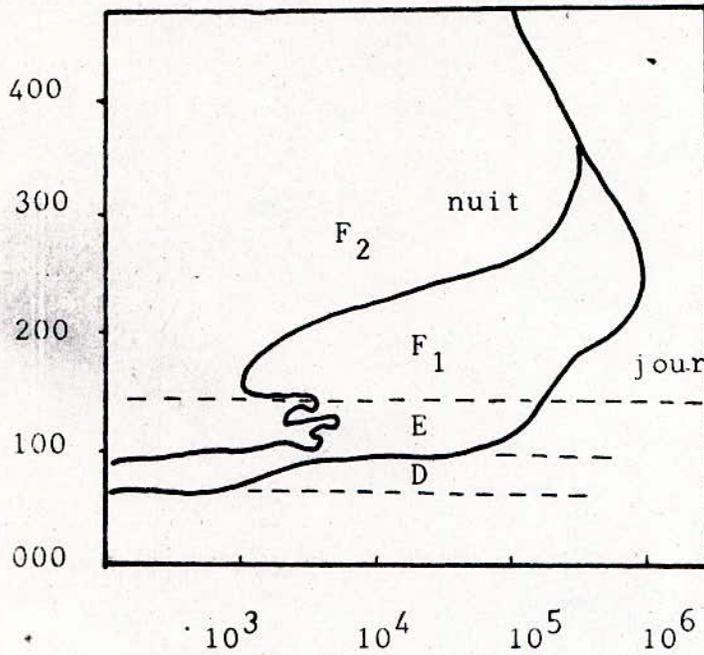


FIG 1-6 Densité Electronique (cm<sup>-3</sup>)

Caractéristiques des profils verticaux de la densité  
électronique dans la haute atmosphère (A.GIRAUD et  
M.PETIT) .[9] .

3.3.1. - La couche F1 : couche diurne ayant une concentration électronique de l'ordre de  $10^{11}$  électrons/m<sup>3</sup> environ, par conséquent, une fréquence critique de 1 MHz au maximum.

Comme la couche E, le comportement de cette couche est également conforme au modèle de Chapman.

3.3.2. - La couche F2 : étant la plus haute, elle possède ainsi la densité électronique la plus élevée ( $10^{12}$  électrons/m<sup>3</sup> environ). Elle permet ainsi des liaisons radio-électriques à grande distance et des fréquences maximales utilisables importantes. Son comportement est plus complexe et se prête mal au modèle de Chapman, car elle est influencée par le processus de transport et de dérives électrodynamiques (anomalies équatoriales).

Cette couche manifeste également un certain nombre d'anomalies au sens de la théorie de Chapman ; une anomalie diurne due au fait que le maximum d'ionisation ne se produit pas vers midi local (généralement entre 13 H et 15 H TL) ; et une anomalie saisonnière due au fait que l'ionisation est plus intense en hiver qu'en été, (phénomènes de transport et de conservation).

#### 4. LES PERTURBATIONS DE PROPAGATION IONOSPHERIQUE

Les perturbations de propagation ionosphérique sont dues aux transformations énergétiques qui se produisent dans la couronne solaire.

On dit alors que le soleil manifeste une activité. Cette activité solaire s'accompagne de phénomènes visibles : les tâches solaires, les protubérances ou invisibles (mais enregistrables, spectralement ou radioélectriquement) : éruptions solaires et sursauts.

4.3. - Les précipitations de particules : un flot de particules de faible énergie, électrons et protons, qui perturbent avec un délai de 20 à 40 heures le champ magnétique terrestre et produisent les aurores polaires optiques.

Cette perturbation affecte les radiocommunications dans la bande HF dont les parcours traversent l'ionosphère dans les régions aurorales.

Pour une cause inconnue, les perturbations constatées sur les radiocommunications sont beaucoup plus fréquentes en période équinoxiale (au mois de : février, mars, avril et août, septembre, octobre) qu'en période solsticiale.

4.4. - Prévisions des perturbations : les prévisions des perturbations de propagation ionosphérique sont fondées sur l'examen statistique des phénomènes similaires antérieurs. Par exemple, les statistiques permettent aux prévisionnistes d'indiquer une certaine probabilité d'effet sur l'ionosphère lorsqu'un certain type de phénomène d'une certaine importance apparaît sur le soleil.

Les éruptions chromosphériques solaires ont d'autant plus probables dans un centre d'activité que ce dernier est plus complexe et en développement plus rapide. Les éruptions associées aux émissions solaires engendrent des (P.LDB).

La plupart des perturbations ionosphériques sont précédées par une journée particulièrement calme. Elles sont associées à un orage géomagnétique. Elles sont plus fréquentes au voisinage des équinoxes. Enfin elles marquent une tendance à la récurrence de 27 jours due à la rotation solaire.

Les émissions solaires associées aux éruptions sont redoutables par leurs effets sur les radiocommunications. Ce sont les suivantes :

4.1. - La P.I.D.B : un rayonnement UV et X qui perturbe avec un délai très court l'ionosphère éclairée, autour du point subsolaire, en augmentant l'absorption des ondes radio de fréquence supérieure à environ 300 KHz.

L'évanouissement soudain total plus ou moins prolongé du champ des ondes courtes a été appelé "perturbation ionosphérique à début brusque" P.I.D.B .

Le phénomène est tellement soudain et imprévu que l'opérateur a immédiatement tendance à mettre en doute le fonctionnement de ses appareils, surtout s'il est isolé. Mais l'effet est général. Il concerne toutes les réflexions ionosphériques de l'hémisphère éclairé et, lorsqu'il est grave, atteint les ondes de fréquences égales à 50 MHz et davantage. Il n'y a aucun recours dans la bande HF contre l'évanouissement [ Fig. 1-7 ] du champ dû à une P.I.D.B .

4.2. - La P.C.A : des rayons cosmiques, principalement des protons, qui perturbent avec un délai de 15 mn à quelques heures la région D ionosphérique sur les calottes polaires, même dans l'hémisphère obscur; en augmentant fortement l'absorption des ondes radio.

Cette perturbation a été appelée "absorption de calotte polaire" ou "Polar and absorption" P.C.A . Elle peut gêner ou empêcher totalement les communications dans la bande HF pendant une durée de quelques heures au moins, à trois jours au plus, en particulier pendant les heures d'éclairement.

Niveau du champ en (Mv/m)

- P.I.D.B du Novembre 1960 à 10h T.U

Enregistrement du champ de Radio-Monte-Carlo [15]

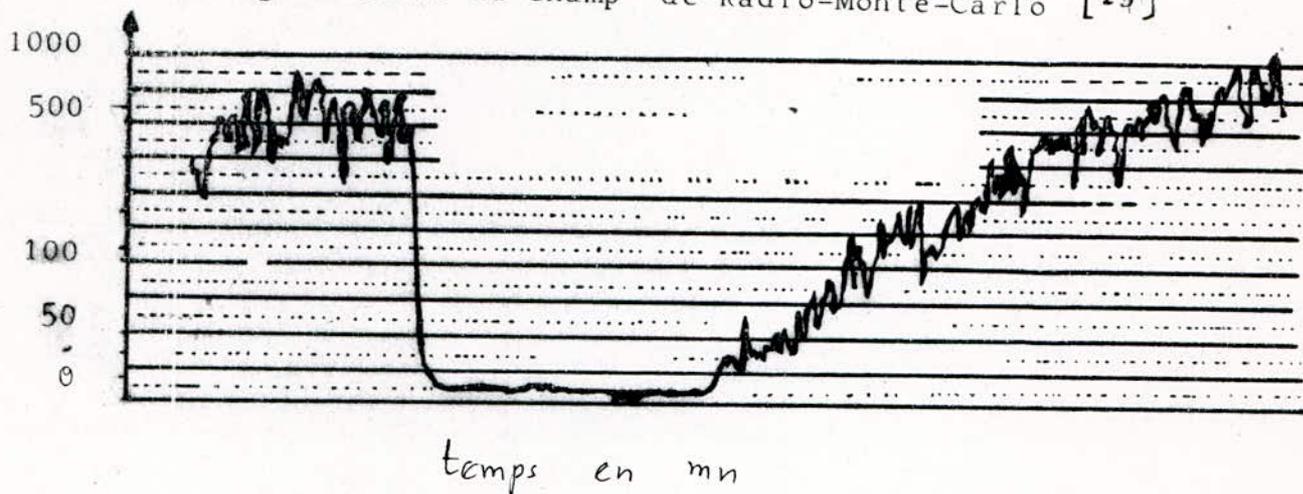


Fig 1-7

Evanouissement du champ en HF

Pendant une P.I.D.B.

CHAPITRE II  
PROPAGATION DES ONDES RADIOELECTRIQUES

I. GENERALITES

Les ondes décamétriques sont des ondes d'espace qui permettent donc des liaisons à grandes distances grâce à une réfraction progressive dans l'ionosphère.

Selon le comportement de ce milieu, les trajectoires des ondes HF sont multiples [ Fig. II-1 ] à savoir par un (ou plusieurs) bonds, par supermode [ 4 ], par conduit [ 5 ] ionosphérique ou par des modes [ 6 ] anormaux.

L'objet de ce chapitre est de donner les conditions de "réflexion" d'une onde HF sur l'ionosphère, de montrer l'existence d'une fréquence maximale utilisable (MUF) pour une liaison entre deux points, et l'existence d'une zone de silence autour d'un émetteur.

II. TRAJECTOIRES DES ONDES HF DANS L'IONOSPHERE

L'un des problèmes essentiels d'une liaison radio en HF est la détermination de la fréquence au-delà de laquelle l'onde n'est plus "réfléchi", appelée fréquence maximale utilisable (MUF) et de la distance minimale de cette liaison (zone de silence).

Il est évident que ces deux paramètres dépendent également des moyens opérationnels mis en jeu (puissance des émetteurs, le gain des aériens, la sensibilité des récepteurs ....).

La théorie magnéto-ionique [ 7 ] donne dans le cas général (tenant compte du champ magnétique terrestre et des collisions) l'expression de l'indice de réfraction complexe dans l'ionosphère qui s'écrit :

$$n^2 = \frac{1}{(1-jZ) - Y_T^2/2(1-X-jZ) \pm (Y_T^4/4(1-X-jZ)^2 + Y_L^2)^{1/2}}$$

$$Z = \frac{\nu}{\omega} = \frac{\nu}{2\pi f}$$

$\nu$ : fréquence de collision.

$$Y_T = \frac{f_b}{f} \sin\theta$$

$f_b = \frac{|q|}{2\pi m} B_0$ : gyrofréquence.

$$Y_L = \frac{f_b}{f} \cos\theta$$

$$X = \frac{f_p^2}{f^2}$$

$f_p = \frac{|q|}{2\pi (m\epsilon_0)^{1/2}} (N)^{1/2}$

: fréquence de plasma

q: charge de l'électron

m: masse de l'électron

$\epsilon_0$ : permittivité du vide

N: densité électronique

$B_0$ : induction magnétique terrestre

$\theta$ : Angle entre la direction de propagation et  $B_0$ .

Cette expression de l'indice de refraction décrit bien l'état de l'ionosphere à savoir qu'il est un milieu dispersif, anisotrope, biréfringent, et dissipatif.

Pendant son utilisation conduit à des calculs très complexes nécessitant un support informatique très coûteux

Pour le calcul de liaisons, nous avons donc tout intérêt (économique) à négliger l'influence des collisions et du champ magnétique terrestre, ce qui est assez légitime dans la gamme HF car les fréquences utilisées sont très supérieures à la gyrofréquence (de l'ordre de 1 MHz) et de la fréquence de collision, particulièrement au niveau de la couche F.

En vertu de ces hypothèses, l'expression [ II-1 ] devient

$$n^2 = \mu^2 = 1 - f_p^2 / f^2 \quad [ II-2 ]$$

Ce qui revient à admettre que le milieu est dispersif, isotrope, réfringent, et non absorbant.

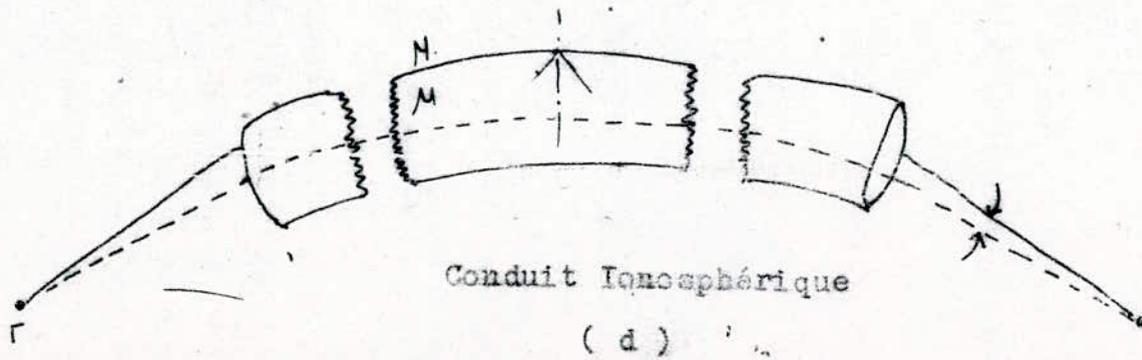
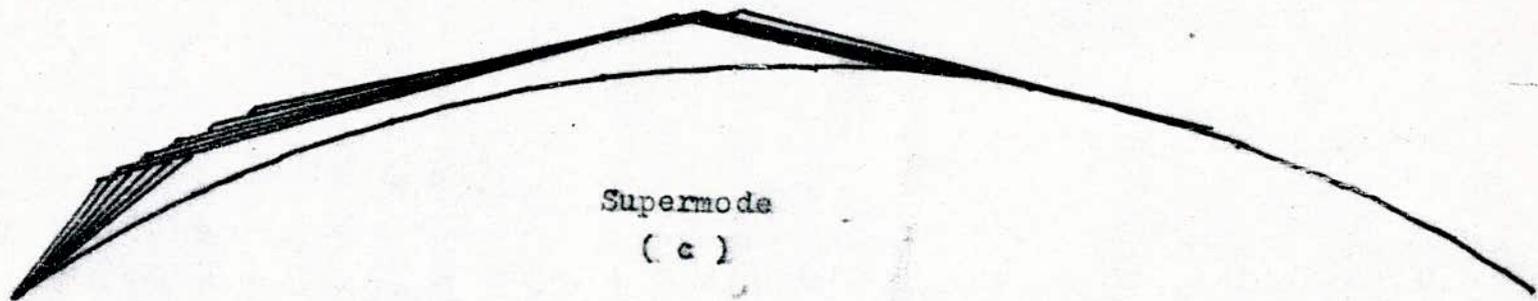
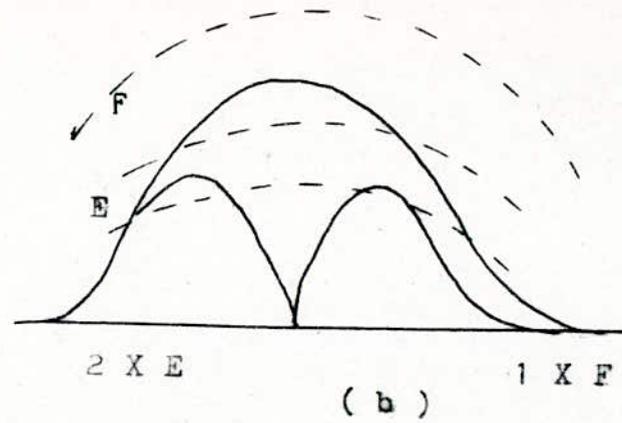
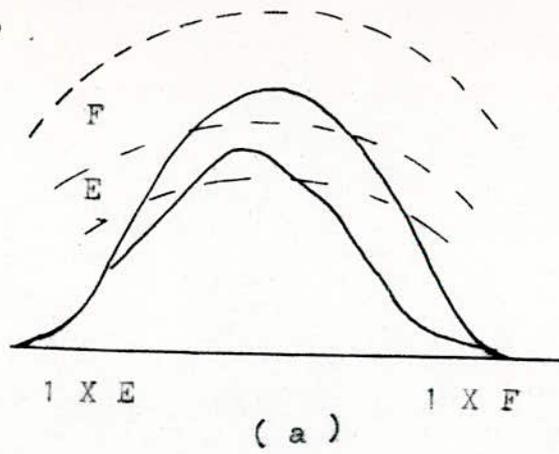


FIG II - 1 : Trajectoires des Ondes HF .

Dans le cas d'un modèle plan (terre et ionosphère planes) /Fig. II-2/), l'expression [II-2] permet d'aboutir à des lois importantes qui peuvent être appliquées pour des liaisons à courte distance.

Dans l'hypothèse d'une ionosphère stratifiée horizontalement, la loi Descartes de l'optique géométrique donne :

$$U(z_i) \sin \theta_i = U(z_{i+1}) \sin \theta_{i+1} \quad [II-3]$$

ou

$U(z_i)$  et  $U(z_{i+1})$  sont respectivement les indices de réfraction aux altitudes  $z_i$ , et  $z_{i+1}$ ;

$\theta_i$  et  $\theta_{i+1}$  sont les deux milieux (base atmosphère-ionosphère) la relation [II - 3] s'écrit :

$$\sin \theta_0 = \mu(z) \sin \theta_z \quad [II - 4]$$

$\mu(z)$  et  $\theta_z$  sont respectivement l'indice et l'angle de réfraction à une altitude  $z$  quelconque au-dessous du niveau de "réflexion".  $\theta_0$  étant l'angle de réfraction à la pénétration de l'onde de l'ionosphère.

### II.1. Loi de la sécante : (Théorème de Martyn)

A une certaine altitude  $z_r$ , hauteur de "réflexion" [point M Fig. II-2] nous avons :

$\theta = \pi/2$ , et, compte tenu de [II-2] l'expression [II-4] s'écrit :

$$f = f_p(z_r) \sec \theta_0 \quad [II-5]$$

Cette expression est bien connue et appelée loi de la Sécante. La fréquence de plasma  $f_p(z_r)$  est déterminée par sondage vertical (ionogramme), ce qui permet pour un angle de tir

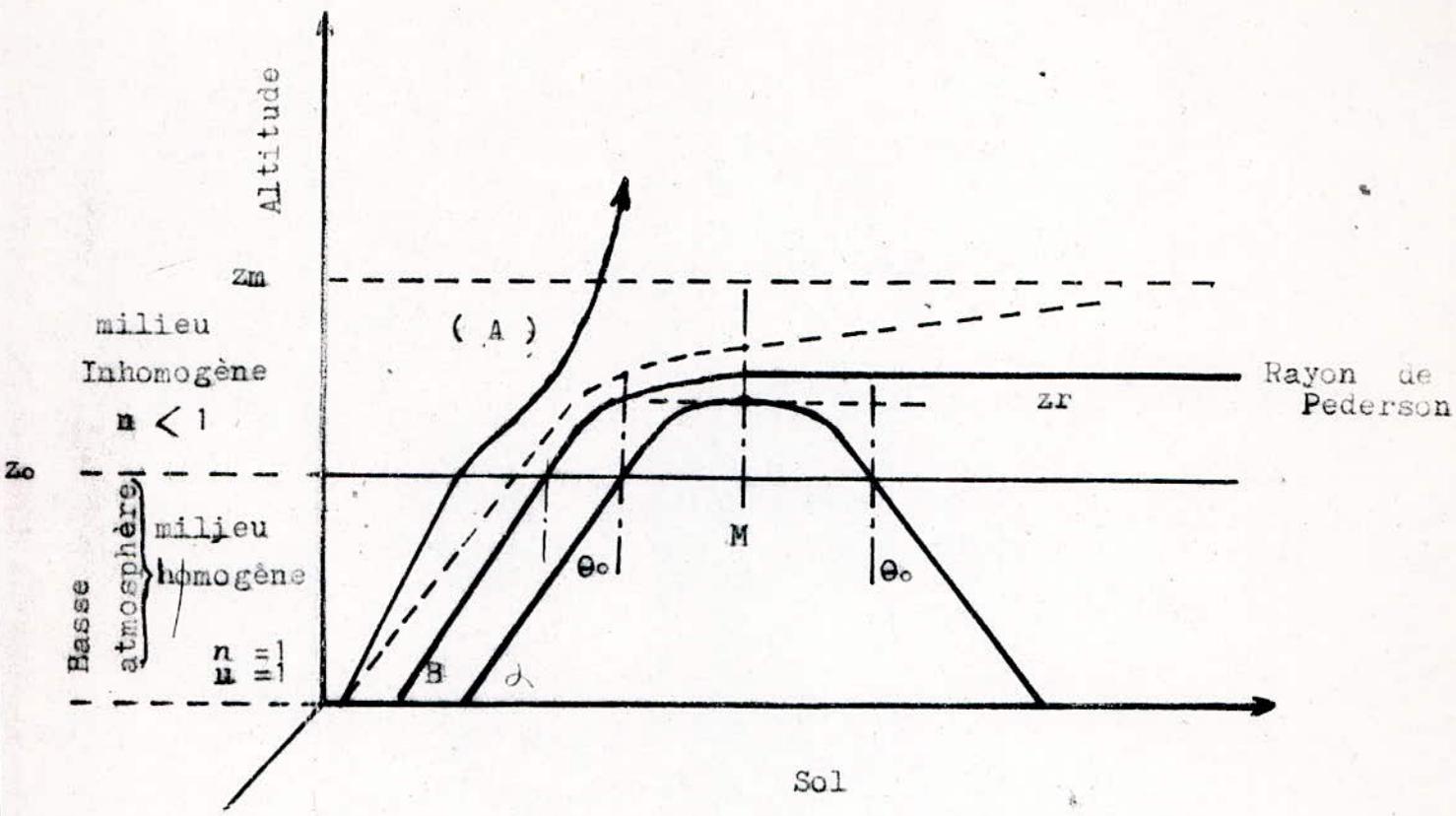


FIG II-2 Modèle Plan.

( $\alpha = \pi/2 - \theta$ ) fixée de déterminer la fréquence de travail de la liaison .

### 11. 2.- Condition de "reflexion"

La condition de la "reflexion" d'une onde de fréquence  $f$  est donc l'existence d'une densité électronique  $N$  à une altitude donnée  $z_r$  permettant de produire une fréquence de plasma :

$$f_p(z_r) = f_{os} \cos \theta_0 \quad [11-6] \quad [Trajectoire (B),$$

Fig. 11-2 / ] .

Dans le cas contraire [Trajectoire (A), Fig. 11-2] l'onde traverse l'ionosphère et se perd dans l'espace cosmique.

En faisant un balayage de fréquence  $f$  sous le même angle de tir  $\alpha$ , la dernière fréquence qui revient au sol est appelée (MUF).

Compte tenu du profil ionosphérique (chap. 1), à la densité électronique  $N_{max}$  correspond donc une fréquence de plasma maximale  $f_{pmax}$  appelée fréquence critique, notée souvent  $f_o$ , et déterminée par sondage vertical.

Pour un angle de tir imposé ( $\theta_0$  donc fixé), seules sont réfléchies en tir oblique les fréquences  $f$  vérifiant l'inégalité :

$$f < f_o \sec \theta_0 \quad [11-7.a]$$

ce qui correspond à des trajectoires de type (B).

Pour les fréquences telle que :

$$f > f_o \sec \theta_0 \quad [11-7.b]$$

nous obtenons les trajectoires de type (A).

$$\text{Si } f = f_o \sec \theta_0 \quad [11-7.c]$$

nous obtenons **une** trajectoire de type (C) appelée rayon de "Pederson".

### 11.3- Zone de silence

Lorsque la fréquence de travail est imposée, seules sont réfléchis les rayons sous un angle d'incidence  $\theta_0$  tels que :

$$\cos \theta_0 < f/f_o \quad [11-8.a]$$

a) Toutes les ondes de fréquence inférieure à la fréquence critique ( $f < f_0$ ), la condition [II-8] est vérifiée; et sont donc réfléchies [Fig. II-3] quel que soit la valeur de l'angle d'incidence  $\theta_0$ .

b) Dans le cas contraire, seuls sont réfléchis les rayons sous incidence  $\theta_0$  supérieur à un seuil  $\theta_{0s}$  tel que :

$$\cos(\theta_{0s}) = f_0/f \quad [II-8.b]$$

ce qui correspond au rayon de "Pederson".

Pour des angles d'incidence  $\theta_0 < \theta_{0s}$ , le rayon traverse l'ionosphère et se perd dans l'espace.

A partir de toutes ces considérations, on peut déterminer facilement pour ce modèle, les dimensions de la zone de silence autour d'un émetteur.

#### 11.4- Equation de la trajectoire en modèle-plan

Une autre méthode de détermination de la zone de silence et de la fréquence maximale utilisable consiste à déterminer au préalable l'équation de la trajectoire des rayons ramenés à un repère [Fig. II-4]

Pour déterminer l'équation de la trajectoire des rayons, il est nécessaire d'utiliser un profil d'ionisation. Le plus couramment utilisé est le profil parabolique [Fig. II-5] régi par la relation suivante:

$$N(z) = N_{\max} (1 - (z - z_m)^2 / z_m^2) \quad [II-9]$$

Dans ces conditions l'équation [II-7] de la trajectoire, compte tenu de ces hypothèses, s'écrit :

$$D = 2 \cdot h_0 \cdot \text{tg} \theta_0 + z_m (f/f_0) \text{Sin} \theta_0 \cdot \text{Ln} \left[ \frac{1 + \frac{f}{f_0} \text{Cos} \theta_0}{1 - \frac{f}{f_0} \text{Cos} \theta_0} \right] \quad [II-10]$$

$z_m$  : demi-épaisseur

Cette relation permet:

a) Pour une fréquence de travail et un profil vertical donnés, de calculer ou de tracer la fréquence en fonction de l'angle d'élévation  $\theta_0$  [Fig II-6] pour déterminer la distance

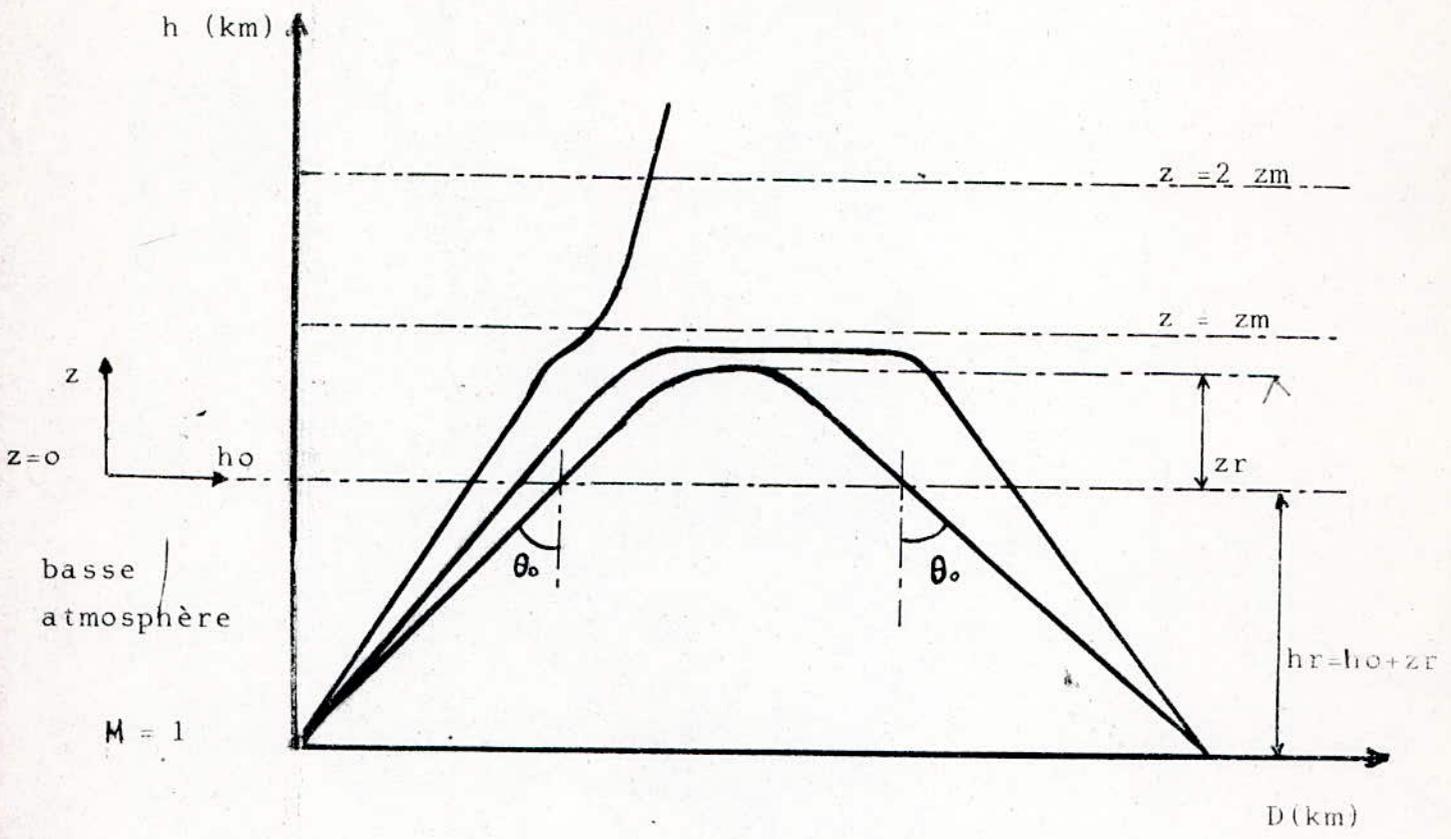


FIG II-4. Rayons ramenés à un repère

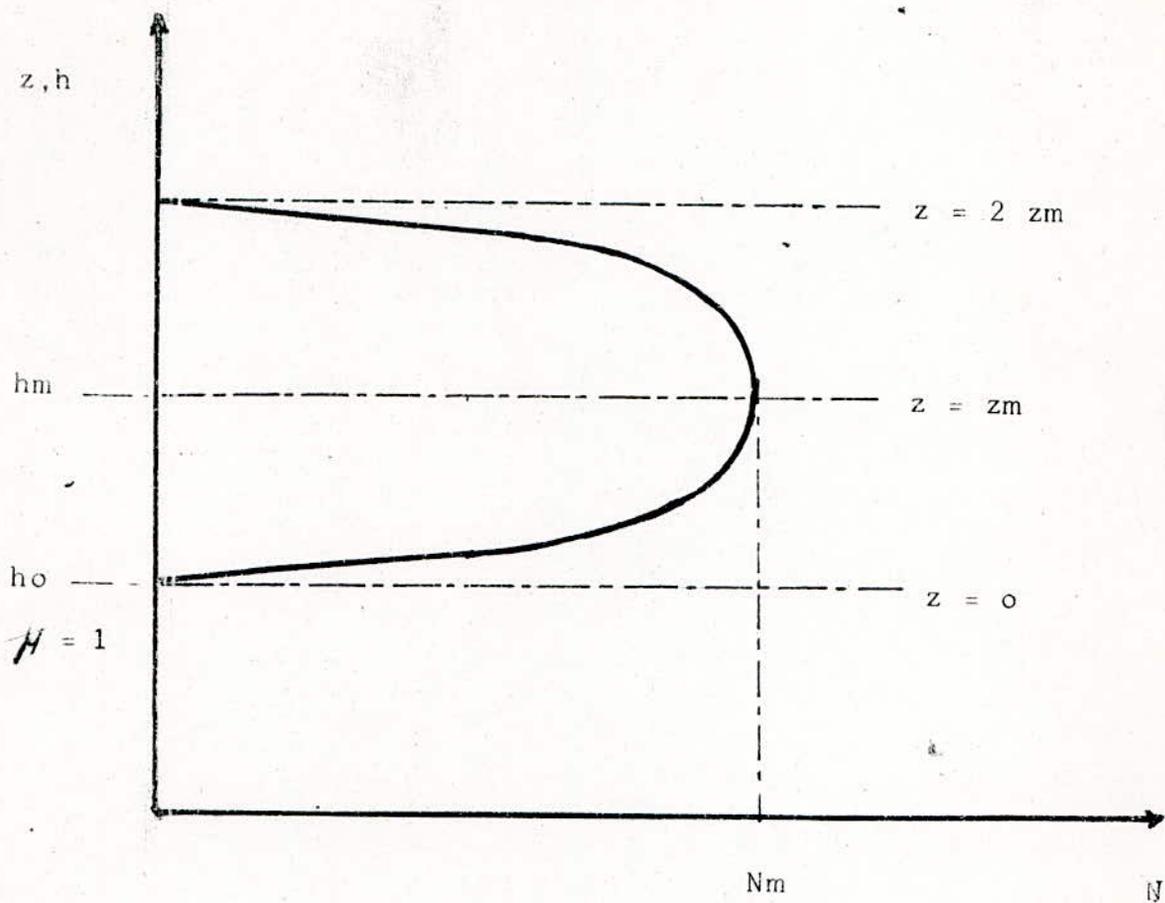


FIG II-5. Profil d'ionisation type parabolique

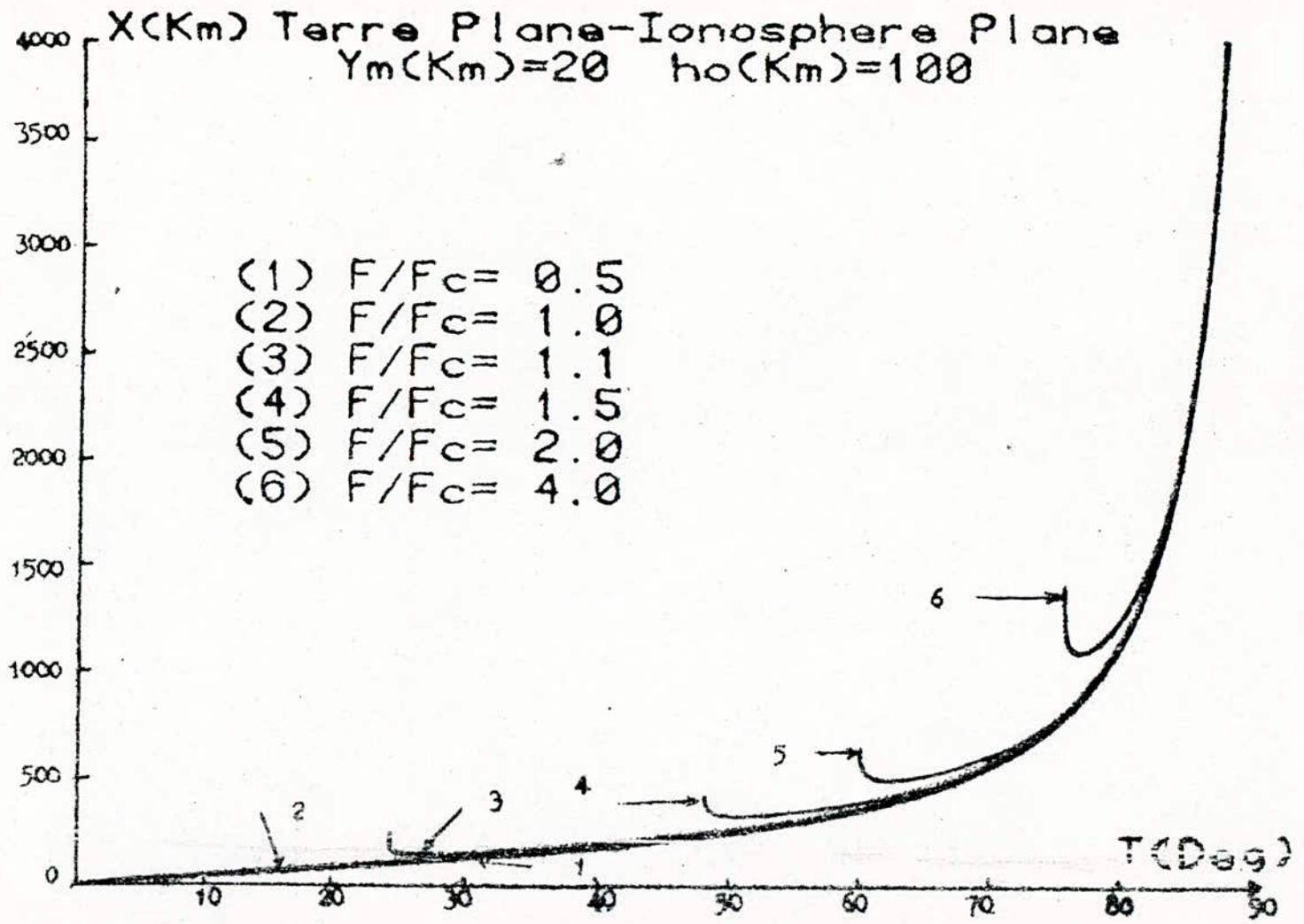


Fig.2.6 Distance au sol en fonction de l'angle d'attaque pour la couche E [4]

minimale donc l'étendue de la zone de silence .

- b) Pour une distance et un profil vertical donnés de calculer ou tracer la fréquence en fonction de l'angle d'élévation  $\theta_0$  pour aboutir à la fréquence maximale utilisable (MUF).

Ainsi la condition [ 4 ] du maximum et du minimum de la distance D est donnée par:

$$\frac{dD}{d\theta_0} = 0 \quad [ 11-11 ]$$

La résolution de cette équation permet de déterminer [Fig.11-2] la MUF.

#### 11.5. - Modèle sphérique : terre et ionosphère sphérique

##### 11.5.1. - Loi de la Sécante , ( Théorème de Martyn)

Si l'on tient compte de la courbure de la terre et de l'ionosphère [Fig. 11-7], la loi de Descartes doit être remplacée par la loi de Bouguer qui s'écrit :

$$r\mu(z)\sin\theta = r_0\sin\theta_0 \quad [11-12]$$

avec :

$$r = r_T + h$$

$$r_0 = r_T + h_0$$

$$h = h_0 + z$$

$r_T$  : étant le rayon terrestre.

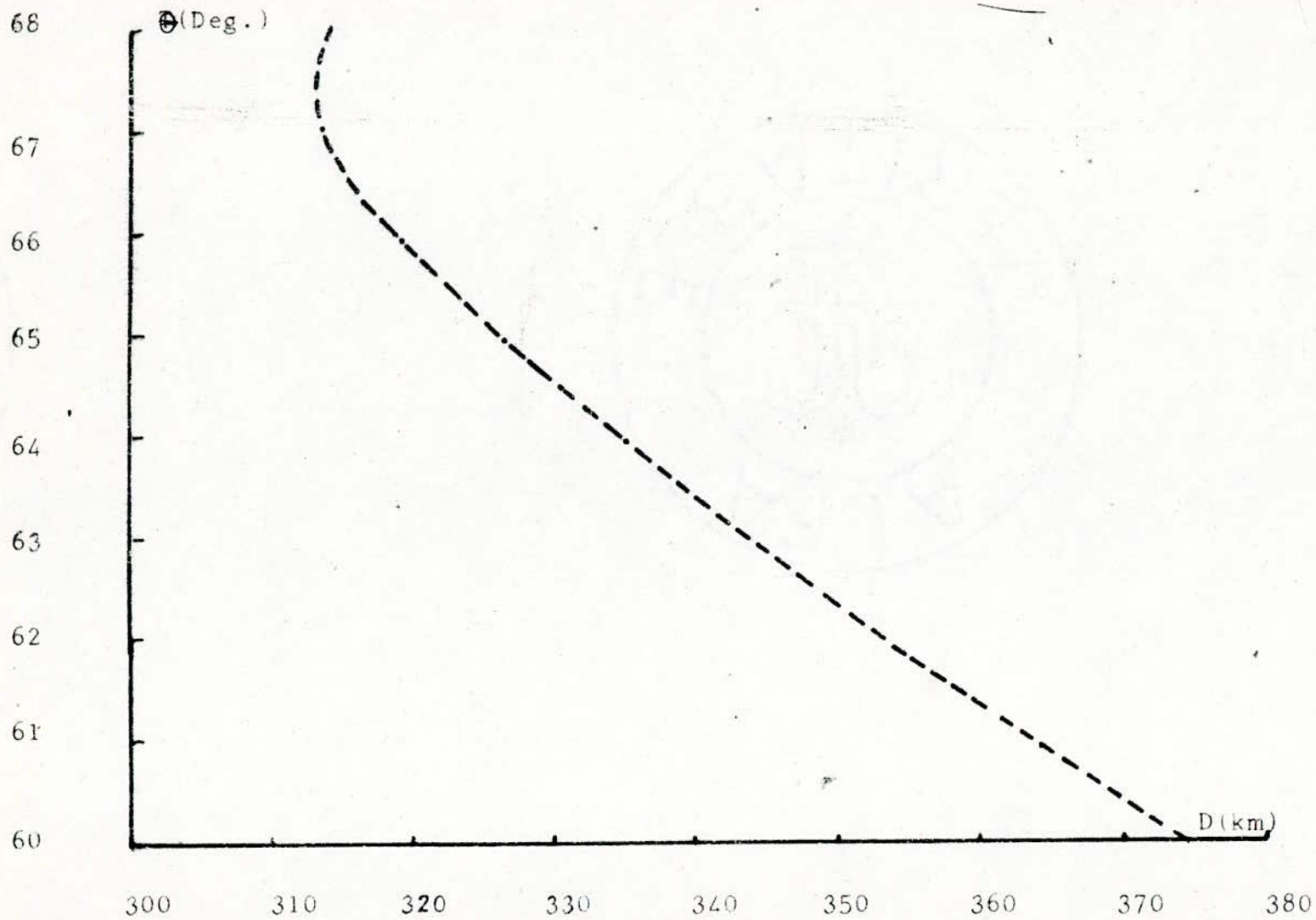


FIG II-7 Angle d'élévation en fonction de la distance au sol pour 8Mhz. [47]

L'expression de l'angle d'élévation s'écrit :

$$B = \text{Arctg} \frac{\cos(\theta/2) r_T / (r_T + h')}{\sin(\theta/2)} \quad [II - 17]$$

Les expressions [ II-13 ] à [ II-17 ] permettent à partir d'un profil vertical de déterminer la MUF pour une liaison point à point et, la zone de silence autour d'un émetteur.

### II.5.2. - Trajectoire du rayon en modèle sphérique

Comme pour le modèle plan, l'expression de l'équation de la trajectoire du rayon en modèle sphérique permet, compte tenu d'un profil vertical prévu ou mesuré, de déterminer les caractéristiques d'une liaison radioélectrique en gamme décimétrique .

En vertu du choix d'un profil parabolique [ II-9 ], l'équation de la trajectoire [ 7 ] du rayon s'écrit :

$$D = z_m \left( \frac{r_T}{r_T + h_0} \right) \cdot x \cdot \sin \phi_0 \cdot \ln \left[ \frac{1 - x^2 \cdot z_0 \cdot \sin^2 \phi_0 + x \cos \phi_0}{1 - x^2 \cdot z_0 \cdot \sin^2 \phi_0 - x \cos \phi_0} \right] + 2 r_T / \cotg \phi_0 - \left( \cotg^2 \phi_0 - 2 h_0 / r_T \right)^{1/2} \quad [II - 18]$$

avec :

$$x = f / f_0$$

$$z_0 = z_m / r_0$$

Dans ce modèle, les calculs sont plus complexes mais donnent des résultats plus conformes à la réalité surtout pour des liaisons à grandes distances.



Pour un tel modèle, la loi de la Sécante [ 2 ] s'écrit :

$$f = K f_v \operatorname{Sec} \phi_0 \quad [ 11-13 ]$$

avec :

$f$  = fréquence de travail

$f_v$  : fréquence de sondage vertical

$\phi_0$  : angle d'incidence (angle de tir par rapport à la verticale)

$K$  : facteur de correction, tenant compte de la sphéricité de la terre, qui s'écrit :

$$K = \left[ 1 - \frac{2(h' - h)}{(r_T + h_0)} \operatorname{tg}^2 \phi_0 \right]^{-1/2} \quad [ 11-14 ]$$

$h'$  et  $h$  étant respectivement les hauteurs virtuelles et réelles de "réflexion" déterminées [ 8 ] à l'aide du modèle de Bradley ou par inversion d'ionogramme [ 9 ].

On peut démontrer par les considérations géométriques [ Fig. 11-8 ] que :

$$\operatorname{tg} \phi_0 = \frac{\sin \theta / 2}{1 - \cos \theta / 2 + h' / r_T} \quad [ 11-15 ]$$

$$\theta = D / r_T \quad [ 11-16 ]$$

où :

$D$  : en km

$r_T$  : en km

$\theta$  : en radian

CHAPITRE III  
PREVISIONS DES PARAMETRES IONOSPHERIQUES

1. GENERALITES

L'exploitation de routine des liaisons radioélectriques en HF se heurte à la très grande variabilité de l'ionosphère et nécessite l'établissement régulier de prévision de propagation ionosphérique.

L'objet des prévisions des paramètres ionosphériques est de fournir aux exploitants des moyens de radiocommunication par réfraction ionosphérique, entre 2 et 35 MHz environ, les limites d'une bande de fréquence utilisable lorsque les extrémités de la liaison sont à l'intérieur d'une zone géographique déterminée ou au voisinage de cette zone, sans qu'il soit nécessaire de considérer les coordonnées des extrémités de la liaison, mais seulement la distance de cette liaison.

Puisqu'il n'est pas possible à l'aide des connaissances actuelles de faire une prévision du profil total de l'ionosphère, on se sert d'un nombre limité de paramètres ( $f_oE$ ,  $f_oF_2$ ,  $M(3000)F_2$ ,  $H'F$ ) caractérisant les couches ionosphériques et sur lesquelles on effectuera des prévisions portant sur les valeurs de ces paramètres.

Les méthodes de prévision seront différentes selon la durée choisie pour la prévision. On distingue ainsi les prévisions à long terme (au moins un mois à l'avance) à moyen terme (une semaine à l'avance) et à court terme (24 à 48 heures au maximum à l'avance).

Pour la prévision à long terme, les mesures ionosphériques doivent être analysées et l'ionosphère moyenne mensuelle future,

calculée en fonction d'un certain indice d'activité solaire, qui devient la seule valeur future à prévoir.

## 2. PREVISION DE L'ACTIVITE SOLAIRE

L'indice choisi par les services mondiaux, notamment le CCIR, pour son étroite corrélation avec les mesures ionosphériques est le paramètre spatiotemporel "ionosphérique" appelé indice d'activité solaire R12.

Cet indice est une moyenne glissante sur douze mois (publié chaque mois par les observatoires) du nombre relatif des tâches solaires de Wolf défini par :

$$R_{12}(m) = \frac{1}{12} \left[ \sum_{j=m-5}^{m+5} R_j + \frac{1}{2} \left( R_{m-6} + R_{m+6} \right) \right] \quad \text{[III.1]}$$

où : m étant le rang du mois considéré.

Il existe en fait deux catégories d'indices permettant de rendre compte de l'évolution de l'activité solaire :

- le nombre de Wolf établi à Zurich
- le flux du bruit radioélectrique  $\emptyset$  mesuré à Ottawa.

Les relations entre R12 et  $\emptyset$  12 sont données (Stewart et Leftin 1972) par :

$$\emptyset 12 = 63,7 + 0,728 R_{12} + 0,00089 R_{12}^2 \quad \text{[ III-2 ]}$$

$$R_{12} = \left[ 95524 + 1123 \emptyset 12 \right]^{1/2} - 408,8 \quad \text{[ III-3 ]}$$

L'indice R12 permet de définir les caractéristiques du cycle solaire : notamment, sa longueur, son intensité, les dates du minimum et du maximum.

La prévision de l'activité solaire repose sur des bases empiriques :

1° - on superpose les douze cycles précédents (8ème et 20ème cycle) en jouant sur leur amplitude et leur durée [Fig - III-1] .

2° - On superpose ensuite le cycle en cours (le 21ème cycle actuellement) incomplet et on détermine la valeur de R12 à la date désirée par l'extrapolation.

### 3. PREVISION DE LA FOE

#### 3.1. - Influence de la couche sur les liaisons radio

La couche E est importante non seulement parcequ'elle donne des modes de propagation relativement stables mais aussi parcequ'elle influe sur la MUF, l'angle de site et le champ dans la propagation de certains modes.

Pour cette raison dans toute l'analyse ou spécification de trajets ionosphériques, il y a avantage à prévoir avec précision et de façon économique les paramètres de la région E. Un de ces paramètres la fréquence critique de la couche E,  $f_oE$ , a été étudié à Edinbourg [13] à l'échelon mondial.

#### 3.2. - Méthode de Muggleton pour la $f_oE$ :

La valeur médiane mensuelle de la  $f_oE$  en fonction de l'activité solaire, du mois, de la position géographique et du

temps, peut s'exprimer sous la forme :

$$foE = (A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4)^{1/4} \quad / \text{ III-4 } /$$

où les termes  $A_1, A_2, A_3, A_4$  sont respectivement :

- $A_1$  : **influence** de l'activité solaire
- $A_2$  : **influence** de la saison
- $A_3$  : **influence** de la position géographique
- $A_4$  : **influence** du temps.

### 3.2.1. - La fonction d'activité solaire $A_1$

Au lieu d'exprimer directement l'intensité du rayonnement ionisant du soleil pour tenir compte de la variation d'un mois à l'autre de l'activité solaire, on applique habituellement une méthode indirecte qui consiste à utiliser l'indice d'activité solaire R12.

Le terme fonction de l'activité solaire  $A_1$  s'écrit :

$$A_1 = 1 + 0,0094 (\emptyset - 66) \quad [ \text{ III-5 } ]$$

où :

$\emptyset$  : le flux du bruit radio-électrique donne par [ III-2 ]

Dans les expressions ci-dessus on admet par hypothèse que l'ionisation est produite uniquement par le rayonnement solaire. Si on a une ionisation supplémentaire par précipitation de particules - cet effet est souvent important et se présente comme une variation proportionnelle dans les zones aurorales, la nuit - il en résultera une augmentation correspondante de la foE ; la valeur de cette augmentation dans les zones concernées, est encore à l'étude, et nous n'en tiendrons, donc, pas compte.

### 3.2.2. - La fonction saisonnière $A_2$

Pour tenir compte de l'influence des saisons sur le comportement de l'ionisation de la couche E, Muggleton [10], a montré que la variation purement saisonnière de la fréquence critique de la couche E peut s'écrire :

$$A_2 = (\text{Cos } (\psi \text{ midi}))^m \quad [III-6]$$

$$m = -0,4825 + 0,48 \text{ Cos } \lambda \quad \text{pour } |\lambda| < 32^\circ$$

$$m = 0,0275 - 0,1225 \text{ Cos } \lambda \quad \text{pour } |\lambda| \geq 32^\circ$$

L'angle zénithale solaire [Fig. III-1] à midi est fonction de la latitude géographique  $\lambda$  et de la déclinaison solaire  $\delta$  et s'écrit :

$$\psi \text{ midi} = | \delta - \lambda | \quad [III-7]$$

La relation [III-4] n'est évidemment valable que lorsque l'angle zénithal solaire à midi est inférieur à  $90^\circ$ . Quand cet angle est supérieur ou égal à  $90^\circ$  on se trouve dans la calotte polaire de nuit permanente [Fig. III-1]. Dans cette région  $\psi$  est toujours supérieur ou égal à  $90^\circ$  de sorte que  $\text{Cos } \psi \text{ midi}$  est toujours négatif ou nul et la relation [III-4] n'est pas applicable.

### 3.2.3. - La fonction de la position géographique $A_3$

Si on élimine de  $f_oE$  les composantes imputables aux variations de l'activité solaire, des saisons et de l'heure du jour, on s'aperçoit que le résidu dépend systématiquement de la latitude. D'après Muggleton [10], la variation de la  $(f_oE)^4$  avec la latitude géographique s'écrit :

$$A_3 = A + B \cos \lambda \quad [111-8] \quad \text{avec :}$$

$$A = 23 \quad ; \quad B = 116 \quad \text{pour} \quad |\lambda| < 32^\circ$$

$$A = 92 \quad ; \quad B = 35 \quad \text{pour} \quad |\lambda| \geq 32^\circ$$

Comme indiqué en 3-2-1, nous n'avons pas tenu compte des effets auroraux ; il faut donc appliquer ces prévisions avec précaution, notamment pendant les heures de nuit dans les zones aurorales.

#### 3.2.4. - La fonction horaire $A_4$

A un instant quelconque correspond une valeur de la distance zénithal du soleil  $\chi$ , et nous avons l'habitude de décrire la variation diurne de foE en fonction de ce paramètre. Compris entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$ , il caractérise l'heure du jour et est défini par la relation:

$$\cos \chi = \sin \lambda \cdot \sin \delta + \cos \lambda \cdot \cos \delta \cdot \cos H \quad [111-9]$$

où

$\lambda$  = latitude géographique

$\delta$  : déclinaison solaire

H : l'angle horaire local du soleil compté positivement vers l'Est à partir du midi apparent.

L'angle horaire H exprimé en degré est lié au temps local TL par la relation:

$$H = 15 \cdot (TL - 12) \quad [111-10]$$

Mugleton a élaboré une méthode qui consiste à étendre

l'expression - fonction horaire applicable pour les petites valeurs de  $\chi$  - en une forme équivalente à la fonction de Chapman, mais plus facile à évaluer, à l'aide du modèle suivant :

$$\text{pour } \chi \leq 73^\circ \quad A_4 = D = (\cos \chi)^P \quad [111-11]$$

$$\text{pour } 73^\circ < \chi \leq 90^\circ \quad A_4 = D = [\cos (\chi - \delta\chi)]^P \quad [111-12]$$

$$\text{où : } \delta\chi = 6.27 \cdot 10^{13} \cdot (\chi - 50)^{8.02}$$

$\chi > 90^\circ$ , ce qui correspond aux heures nocturnes, le quatrième terme

de l'expression de FoE s'écrit :

$$A_4 = (0.077)^P \cdot \text{EXP}(-1.68(T1 - TL)) \quad [111-13] \quad \text{entre minuit et}$$

$$A_4 = (0.077)^P \cdot \text{EXP}(-1.01(TL - T2)) \quad [111-14] \quad \begin{array}{l} \text{le lever du soleil;} \\ \text{entre le coucher} \\ \text{du soleil et minuit} \end{array}$$

où :

TL : heure locale, calculée à partir de l'heure universelle et de la longitude (Annexe A) ;

T1 : heure locale du lever du soleil

T2 : heure locale du coucher du soleil

La valeur minimale de la foE est donnée par la formule de Wakai [1971] qui s'écrit :

$$(foE)^4 \text{ min} = 0,017 \cdot [1 + 0.0098 R12] \quad [111-15]$$

Si les équations [111-4] à [111-14] donnent une valeur inférieure à celle fournie par [111-15], nous adopterons cette dernière valeur.

TABLEAU III- 1

\*\*\*\*\*

\*\*\* CALCUL DE LA MEDIANE MENSUELLE \*\*\*  
\*\*\* DE LA COUCHE E F0E PAR LA \*\*\*  
\*\*\* METHODE DE MUGGLETON C.C.I.R \*\*\*

\*\*\*\*\*

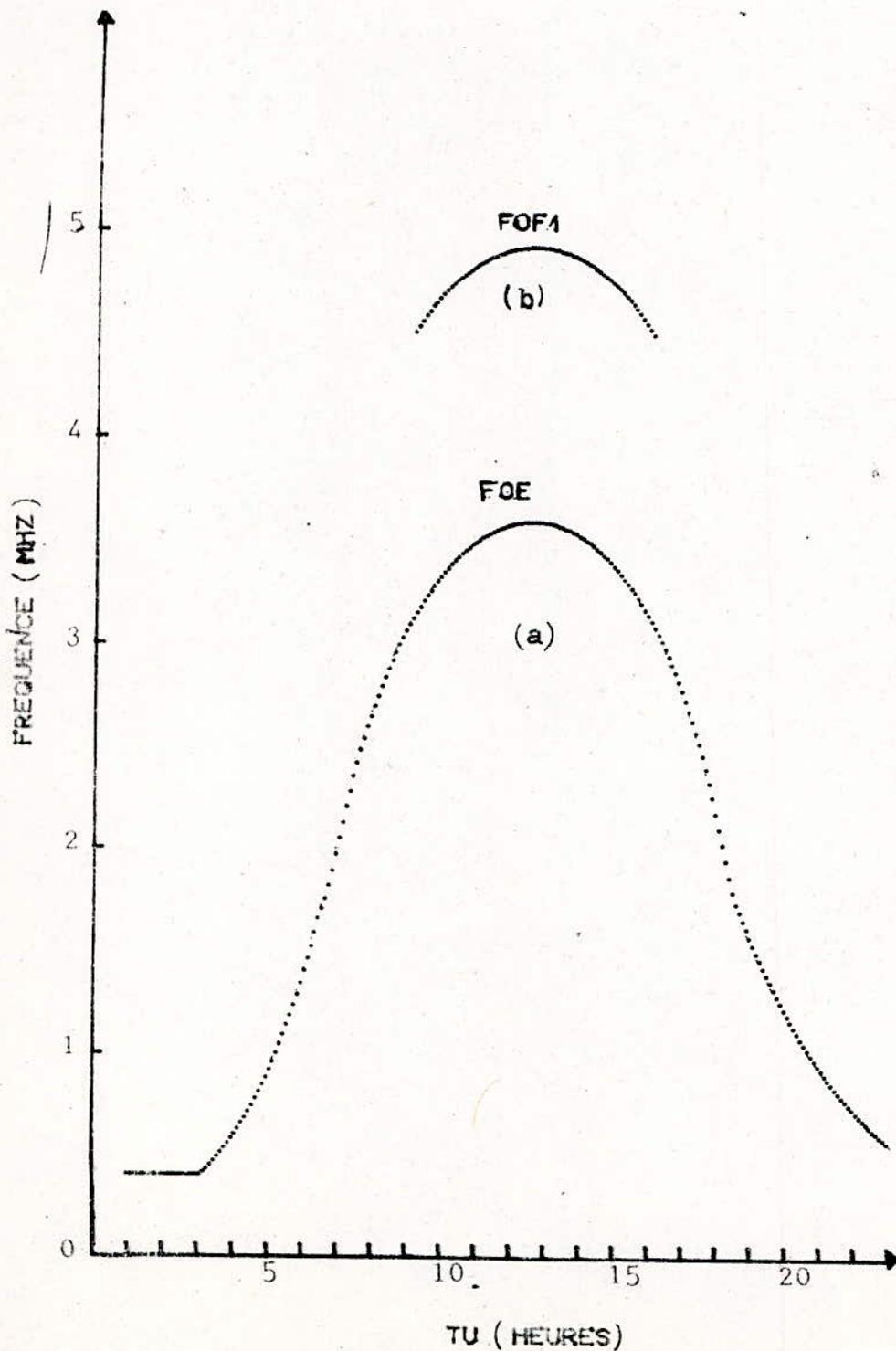
CONDITIONS DE CALCUL

R12=63.3  
AN=1987  
M=9  
LAT=22.8  
LON=6.6  
STATION : TAM.

TU (HEURES)	(F0E MHZ)
0	0.4
1	0.4
2	0.4
3	0.6
4	0.6
5	1.3
6	2.0
7	2.7
8	3.1
9	3.3
10	3.5
11	3.6
12	3.6
13	3.5
14	3.4
15	3.1
16	2.8
17	2.2
18	1.8
19	1.2
20	1.0
21	0.7
22	0.6
23	0.4

FIG. III-1 : VARIATIONS DIURNES DES VALEURS  
MEDIANES DES FREQUENCES CRITI-  
QUES DES COUCHES E ET F1 (VA-  
LEURS PREVUES)

---



Pour juger de l'interêt de cette méthode de prévision, nous avons élaboré un programme (Annexe A) dont les résultats [Tab. III-1], et [Fig III-1(a)], comparés aux valeurs expérimentales (données de Tamanrasset) sont d'une précision de  $\pm 5\%$  au maximum, indiquant ainsi la bonne représentativité du modèle (sauf peut être au lever et au coucher du soleil). La précision du modèle ne peut être vérifiée aux heures nocturnes à cause de la limite inférieure de la gamme de fréquence de l'ionosonde.

Le processus appliqué pour les médianes mensuelles a permis de réduire notablement les fluctuations erratiques ce qui a amélioré la qualité des résultats.

#### 4. PREVISION DE LA MEDIANE foF1

##### 4.1. - Modèle de foF1

La couche F1 est généralement présentes aux latitudes moyennes pendant les mois d'été bien que son apparition varie avec le cycle solaire. Aux basses latitudes la structure générale se complique et il devient impossible d'identifier une couche régulière et continue.

Scott 1952 ; Allen 1948, Ratcliffe et Weekes, (1960) ont montré que la foF1 varie avec la distance zénithale solaire, et que l'on peut d'ordinaire représenter son comportement de façon précise par le modèle suivant :

$$foF1 = f_s (\cos \chi)^n \quad [III-16]$$

pour  $\chi < \chi_m$

où

$\chi_m$  : valeur minimale de  $\chi$  pour laquelle la couche F1 est observée.

TABLEAU III-2 :

CALCUL DE LA MEDIANE MENSUELLE DE LA COUCHE F1,  
FOF1 PAR LA METHODE DU C.C.I.R.

CONDITIONS DE CALCUL

R12=52.3  
LGG=22.8  
LGM=25  
LON=5.5  
ANNEE 1987

RESULTATS DE CALCUL

TU (HEURES)	(FOF1 (MHZ))
0	*. **
1	*. **
2	*. **
3	*. **
4	*. **
5	*. **
6	*. **
7	*. **
8	*. **
9	4.70
10	4.84
11	4.92
12	4.92
13	4.87
14	4.74
15	4.53
16	*. **
17	*. **
18	*. **
19	*. **
20	*. **
21	*. **
22	*. **
23	*. **

Les paramètres  $f_s$  et  $n$  dépendent de l'activité solaire et de la latitude géomagnétique (Kervin, 1971 ; Du Charme et d'autres, 1973).

$$f_s = f_{s0} + 0,01 (f_{s100} - f_{s0}) R_{12} \quad [111-17]$$

avec :

$$f_{s0} = 4,35 + 0,0058 \cdot \lambda' - 0,000120 \cdot \lambda'^2 \quad [111-18]$$

$$f_{s100} = 5,35 + 0,0110 \cdot \lambda' - 0,00023 \cdot \lambda'^2 \quad [111-19]$$

$$n = 0,093 + 0,00461 \cdot \lambda' - 0,0000540 \cdot \lambda'^2 + 0,00031 R_{12} \quad [111-20]$$

$\lambda'$  : latitude géomagnétique en degrés.

La distance zénithale solaire  $\chi_m$  est donnée par les expressions :

$$\chi_m = \chi_0 + 0,01 \cdot (\chi_{100} - \chi_0) \cdot R_{12} \quad [111-21]$$

$$\chi_0 = 50,0 + 0,348 \cdot \lambda' \quad [111-22]$$

$$\chi_{100} = 38,7 + 0,509 \cdot \lambda'$$

où  $\chi_0$  et  $\chi_{100}$  étant les valeurs de  $\chi_m$  respectivement pour  $R_{12} = 0$  et  $R_{12} = 100$

$\chi_m, \chi_0, \chi_{100}$  sont exprimés en degrés.

#### 4.2. - Prévision de la foF1

De même que pour le modèle de la foF1, les écarts relatifs entre les valeurs théoriques et expérimentales sont inférieures à 5 % en valeur absolue.

Le calcul prévisionnel (Annexe B) donne des résultats [Tab. III-2], et [Fig. III-1 (b)] qui sont d'ailleurs assez conformes à la réalité .

## 5. PREVISION DE LA foF2

La densité électronique dans la région F2 est variable dans le temps et selon la position géographique du fait qu'au processus d'autoionisation et de pertes électroniques viennent s'ajouter des mouvements de l'ionisation sous l'action de phénomènes externes (processus de transport, anomalie saisonnière...).

La foF2 médiane mensuelle peut être calculée en n'importe quel point du globe -pour un mois donné et un indice d'activité solaire fixé- à partir des coefficients Usk.

Les coefficients Usk ont été établis à Boulder (USA) dans les années 1960-1965 par Jones et Gallet. Les auteurs [15] ont utilisé un développement mathématique (analyse en harmoniques sphériques) et ajustés les polynômes aux diverses mesures des sondes verticales entre 1954 et 1958 (partie croissante du 19<sup>ème</sup> cycle solaire).

### 5.1. - Principe de la méthode

La valeur de la médiane mensuelle foF2 peut être déterminée à partir des valeurs horaires journalières. Elle [14] représente un état moyen de la région et est utilisée dans l'établissement des prévisions ionosphériques à long terme.

#### 5.1.1. - Analyse temporelle

Les variations diurnes de la foF2 s'expriment par une série temporelle de Fourier :

$$foF2(\lambda, \varphi, T_0) = a_0(\lambda, \varphi) + \sum_{j=1}^H \left[ a_j(\lambda, \varphi) \cos jT_0 + b_j(\lambda, \varphi) \sin jT_0 \right] \quad [III-23]$$

où

$\lambda$  : latitude géographique ( $-90^\circ \leq \lambda \leq +90^\circ$ )

$\varphi$  : longitude géographique ( $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ E$ )

$T_0$  : Angle heure universelle (en degrés) donné par l'expression :

$$T_0 = 15 T - 180^\circ \quad [III-24]$$

où

$T$  : Temps universel exprimé en heures ( $0 < T < 23$ )

$H$  : Nombre maximal d'harmoniques utilisés.

On limite généralement la valeur de  $H$  à 6, en considérant que les harmoniques d'ordre supérieur de la série sont assimilés à un bruit.

Les coefficients de Fourier  $a_j(\lambda, \varphi)$  et  $b_j(\lambda, \varphi)$  varient avec la position géographique et sont développés à l'échelle globale en série de la forme :

$$a_j(\lambda, \varphi) = \sum_{k=0}^k U_{2j,k} G_k(\lambda, \varphi) \quad j=0, 1, 2, \dots, 6$$

$$b_j(\lambda, \varphi) = \sum_{k=0}^k U_{2j-1,k} G_k(\lambda, \varphi) \quad j=0, 1, 2, \dots, 6 \quad [III-25]$$

On obtient ainsi 13 coefficients de Fourier dans l'ordre

$$a_0 \ a_1 \ b_0 \ b_1 \ \dots \ b_6.$$

$U_{2j,k}$  et  $U_{2j-1,k}$  sont publiés sous forme de coefficients  $U_{sk}$ .

### 5.1.2. - Analyse géographique

Les fonctions géographiques  $G_k(\lambda, \varphi)$  introduites par Jones et Gallet sont des combinaisons de fonctions trigonométriques de la latitude, la longitude, et de l'inclinaison magnétique.

Le problème du choix de la variable principale a été étudié particulièrement par Jones et Gallet (1962 - 1969). Les auteurs sont arrivés aux résultats suivants :

- la variable  $\sin \lambda$  donne une meilleure représentation dans la zone équatoriale que la latitude  $\lambda$  [9].
- outre cette variation principale en latitude, l'évolution de foF2 présente une tendance longitudinale.
- les fonctions  $G_k(\lambda, \varphi)$  proposées par Jones et Gallet (1962) ne tiennent pas compte de la structure du champ magnétique terrestre.

La nouvelle variable principale à prendre en considération est :

$$X = \text{Arctg} \left( I / (\cos \lambda)^{1/2} \right) \quad [111-26]$$

I = inclinaison magnétique.

La détermination de la foF2 nécessite donc 13 coefficients de Fourier et 76 fonctions géographiques ( $K=75$ ). Ainsi 988 coefficients permettent de calculer la foF2 pour une heure donnée, en n'importe quel point du globe pour un indice spatiotemporel R12 fixé.

L'analyse ainsi faite pour la foF2 est valable pour le paramètre M(3000) F2 et H'F ; seuls changent les valeurs des coefficients USK .

### 5.1.3 - Interpolation en activité solaire

Les valeurs des coefficients USK étant publiées pour  $R_{12} = 0$  et  $R_{12} = 100$ , la détermination de foF2 et de M(3000)F2 pour indice d'activité solaire quelconque suppose une variation linéaire de ces deux caractéristiques ionosphériques en fonction de cet indice.

En fait la variation de M(3000)F2 en fonction de l'indice  $R_{12}$  est effectivement linéaire dans tout le domaine de variation de cet indice.

Par contre, il y a un écart perceptible par rapport à la linéarité dans la relation foF2 et  $R_{12}$ , surtout lorsque cet indice devient supérieur à 150 environ mais cet écart tend à devenir négligeable par rapport aux autres incertitudes des données et du tracé. Si l'indice  $R_{12}$  dépasse 150, on peut réduire l'écart en ramenant à 150 les valeurs de  $R_{12}$  supérieures à cette valeur (recommandation du C.C.I.R.). La relation linéaire entre foF2 et  $R_{12}$ , M(3000)F2 et  $R_{12}$ , permet ainsi d'interpoler entre 0 et 100 et d'extrapoler au-dessus de 100 au moyen des formules:

$$foF2 = fo + 0,01 (f_{100} - fo) R_{12} \quad [III - 27]$$

$$M(3000)F2 = m_0 + 0,01 (m_{100} - m_0) R_{12} \quad [III - 28]$$

où fo et  $f_{100}$  étant respectivement les valeurs de foF2 pour  $R_{12} = 0$  et  $R_{12} = 100$ ; de même  $m_0$  et  $m_{100}$  les valeurs de M(3000)F2 pour  $R_{12} = 0$  et  $R_{12} = 100$ .

### 5.2 - Prévision de foF2 à Tamanrasset

La méthode USK programmée sur VAX 750 du centre de calcul (E.N.P) donne des résultats [Tableau III-3], qui comparés aux mesures prises antérieurement à Tamanrasset donnent une précision de l'ordre de  $\pm 10\%$  [Annexe-C].

Pour un modèle de médiane mensuelle la précision est très satisfaisante sauf pour les valeurs d'indice d'activité solaire élevé où les valeurs mesurées sont faibles par rapport aux valeurs expérimentales.

TABLEAU III-3.

MOIS=9

VALEUR DE LA LATITUDE GEOGRAPHIQUE DLAT= 22,8

VALEUR DE LA LONGITUDE GEOGRAPHIQUE DLONG= 5,5

LA VALEUR DU R12 EST

52.30000

TU	FOF2	M(3000)F2
1.0	-4.5	-0.18E+08
2.0	-1.8	-0.97E+07
3.0	2.1	-0.22E+07
4.0	3.5	0.15E+07
5.0	4.5	0.41E+07
6.0	6.1	0.72E+07
7.0	5.2	0.79E+07
8.0	1.0	0.26E+07
9.0	-2.1	-0.89E+07
10.0	-1.4	-0.20E+08
11.0	0.4	-0.20E+08
12.0	0.2	-0.29E+07
13.0	-0.8	0.23E+08
14.0	-0.7	0.39E+08
15.0	-0.4	0.32E+08
16.0	-0.1	0.36E+08
17.0	0.8	0.44E+08
18.0	1.6	0.50E+08
19.0	0.6	0.47E+08
20.0	-0.1	-0.49E+07
21.0	2.7	-0.13E+08
22.0	6.4	-0.27E+08
23.0	4.9	-0.35E+07
24.0	-1.2	0.11E+08

FOF2 CORRIGEE

0.00	2.67	6.57	8.02	9.00	10.61
9.72	5.49	2.37	3.16	4.92	4.67
3.71	3.80	4.17	4.39	5.35	6.15
5.13	4.39	7.21	10.93	9.44	3.31

En vertu des modèles du C.C.I.R., nous avons élaboré des logiciels sur un micro-ordinateur (TEK 4052) pour la détermination des paramètres futurs des couches ionosphériques (prévisions à long terme).

938 coefficients USK sont nécessaires pour le calcul à une heure donnée en un point du globe de l'un des paramètres  $f_oE_g$ ,  $h'F$ ,  $M(3000)F2$  d'où la nécessité d'un support informatique plus puissant (VAX 750).

Les résultats obtenus sont assez précis, d'autant plus qu'il s'agit de médianes mensuelles.

Comme ces modèles sont établis à partir des résultats échelonnés sur un cycle undécennal, obtenus par les stations de sondage réparties irrégulièrement et un nombre insuffisant à travers la surface du globe, des prévisions à moyen et à court terme s'avèrent nécessaires pour rendre compte du comportement réel futur de l'ionosphère.

Nous avons pu juger la précision de ces modèles globaux, grâce à la connaissance d'un modèle local [ thèse annexe ] établi à partir des mesures effectuées au niveau du site de Tamanrasset.

## CHAPITRE IV

### DETERMINATION DE LA MUF ET DE LA ZONE DE SILENCE

#### I. GENERALITES

Une liaison radioélectrique en gamme décamétrique est principalement caractérisée par la fréquence maximale utilisable (MUF), l'étendue de la zone de silence et l'angle d'élévation des aériens.

Au préalable, il est nécessaire de déterminer les coordonnées géographiques du milieu du trajet selon le grand cercle pour calculer les paramètres principaux du profil d'ionisation (( prévision)) en ce point.

A partir de ces paramètres, des modèles mathématiques (équation de la trajectoire du rayon ou loi de la sécante) permettent le calcul de la liaison.

#### II. DETERMINATION DE LA ZONE DE SILENCE

Nous nous proposons de déterminer l'étendue de la zone de silence autour d'un point A (émetteur) d'une liaison ayant comme milieu le site de Tamanrasset.

Nous disposons ((prévision)) des paramètres ionosphériques suivants :

##### COUCHE F

$F_c = 9.54$  MHZ : fréquence critique de la couche F

$y = 189.10$  km : demi-épaisseur

$H = 112.85$  : bas de la couche

## COUCHE E

$F_c = 3.26$  MHZ : fréquence critique de la couche E

$y = 20$  km : demi-épaisseur

$h_o = 90$  km : bas de la couche

### II.1. - Liaison courte

Pour la liaison à courte distance, nous adoptons un modèle-plan (( terre et ionosphère planes)), conformément l'équation [II-10] à partir (Annexe E) de laquelle nous avons élaboré un logiciel dont les résultats sont illustrés par le tableau [IV-1] et la [fig.IV-1].

Ces résultats montrent que lorsque la fréquence de travail augmente l'étendue de la zone de silence et l'angle d'élévation (compté à partir de la verticale) augmentent.

### II.2. - Liaisons à grande distance

Pour les liaisons à grande distance, l'approximation modèle-plan n'est plus applicable, il faut tenir compte de la sphéricité de la terre et de l'ionosphère.

Pour les mêmes paramètres du profil vertical ((supposé parabolique)), nous avons élaboré un logiciel sur TEK4052, à partir de l'équation ((II-18)) de la trajectoire du rayon et dont les résultats [tableau IV-2] montrent également que l'étendue de la zone de silence et l'élévation des aériens augmentent avec la fréquence de travail.

## III - DETERMINATION DE LA MUF

Nous adoptons toujours les mêmes paramètres du profil vertical, mais au lieu de le considérer comme parabolique, nous utilisons le modèle de Bradley (Annexe D). Comme modèle de

TAB. IV-1: ZONE DE SILENCE EN FONCTION DE LA FREQUENCE DE TRAVAIL ET DE L'ANGLE D'ELEVATION POUR UN MODELE-PLAN

COUCHE F

PARAMETRES DU PROFIL VERTICAL

FC (MHZ) = 9.54  
 Y (KM) = 180.1  
 H (KM) = 112.85

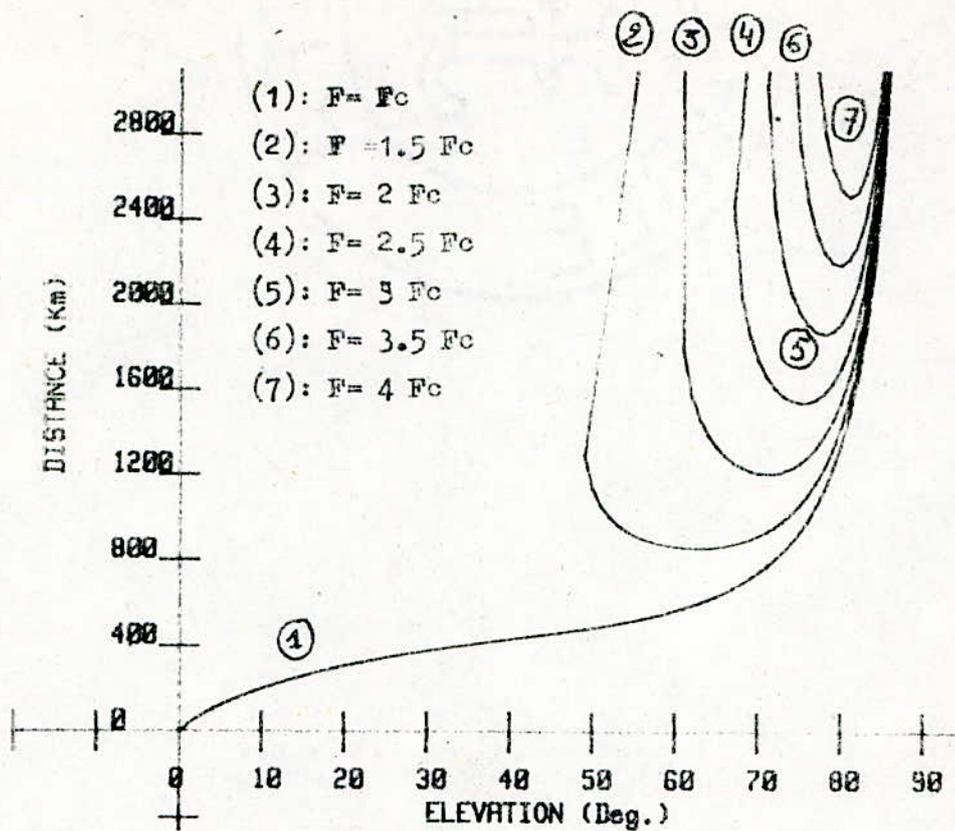
FREQUENCE (MHZ)	DMIN (KM)	ELEV. (DEg )
9.54	0.0	0.00
14.31	863.0	63.00
19.08	1211.4	71.00
23.85	1545.7	75.00
28.62	1873.2	76.00
33.39	2199.5	80.00
38.16	2622.3	84.00

COUCHE E

PARAMETRES DU PROFIL VERTICAL

FC (MHZ) = 3.20  
 Y (KM) = 20  
 H (KM) = 110

FREQUENCE (MHZ)	DMIN (KM)	ELEV. (DEg.)
3.26	0.0	0.00
4.89	354.2	50.00
6.52	535.9	62.00
8.15	703.0	68.00
9.78	863.9	72.00
11.41	1024.4	75.00
13.04	1182.3	77.00



COUCHE F		
FC (MHZ)	Y (KM)	H (KM)
9.54	189	112

FREQUENCE (MHZ)	DMIN (KM)
9.54	0.0
14.31	859.4
19.08	1206.1
23.85	1539.0
28.62	1864.8
33.39	2189.4
38.16	2511.0

Fig. IV-1: Distance min en fonction de la fréquence de travail et de l'angle d'élevation pour un profil vertical donné du type parabolique ( MODÈLE PLAN )

TAB. IV-2 : ZONE DE SILENCE EN FOCTION DE LA FEQUENCE  
DE TRAVAIL ET DE L'ANGLE D'ELEVATION POUR  
UN MODELE SPHERIQUE

---

COUCHE F

PARAMETRES DU PROFIL VERTICAL

FC (MHZ)=9.54  
Y (KM)=189.1  
H (KM)=112.85

FREQUENCE (MHZ)	DMIN (KM)	ELEV. (DEG.)
9.54	4.1	1.00
11.93	187.9	39.00
14.31	286.0	51.00
16.70	377.7	58.00
19.08	486.7	64.00
21.47	601.0	68.00
23.85	723.4	71.00
26.24	906.9	74.00
28.62	1104.8	76.00

COUCHE E

PARAMETRES DU PROFIL VERTICAL

FC (MHZ)=3.26  
Y (KM)=20  
H (KM)=90

FREQUENCE (MHZ)	DMIN (KM)	ELEV. (DEG.)
3.26	3.3	1.00
4.08	145.0	38.00
4.89	214.7	49.00
5.71	278.1	56.00
6.52	340.4	61.00
7.34	395.8	64.00
8.15	455.0	67.00
8.97	534.1	70.00
9.78	607.4	72.00

TABL. IV-3 : DETERMINATION DE LA M.U.F. EN FONCTION DE LA DISTANCE DU SAUT

DONNEES DU PROFIL VERTICAL

FUF2=9.54  
 HNF2=301.95  
 YMF2=180.1  
 FCE =3.26  
 YE=20  
 HME=110

DISTANCE (KM)	MUF (MHZ)	ELEV (DEG.)	NBOND
5000	28.80	6.98	2
4800	28.20	7.43	2
4600	27.57	8.06	2
4400	33.58	0.21	1
4200	33.51	0.75	1
4000	33.37	1.34	1
3800	33.15	1.98	1
3600	32.82	2.52	1
3400	32.30	3.27	1
3200	31.84	3.94	1
3000	31.15	4.68	1
2800	30.33	5.50	1
2600	29.35	6.41	1
2400	28.20	7.43	1
2200	26.88	8.59	1
2000	25.38	10.05	1
1800	23.70	11.50	1
1600	21.84	13.57	1
1400	19.82	16.13	1
1200	17.67	19.51	1
1000	15.43	24.07	1
800	13.20	31.48	1
600	11.20	45.56	1
400	10.02	66.88	1
200	8.68	82.23	1

calcul de la liaison, nous adoptons la loi de la sécante pour une terre et une atmosphère sphérique [Chapitre II]. A partir de ces données et de ces modèles mathématiques, nous avons élaboré un logiciel [Annexe D] dont les résultats [tableau IV-3] montrent que la MUF augmente et l'angle d'élévation (compté cette fois-ci à partir de l'horizontale) diminue quand la distance de la liaison augmente. Ces résultats montrent également qu'à partir de 4600 km, la liaison nécessite deux bonds.

#### IV - CONCLUSION

Les résultats obtenus sont conformes à ceux déjà établis [4,9]. Les modèles utilisés sont simples et nécessitent un support informatique modeste (micro-ordinateur).

Ces modèles supposent en outre une ionosphère stratifiée (sans gradients horizontaux) supposée comme milieu dispersif, isotrope et non absorbant.

Des modèles plus réalistes tenant compte des gradients horizontaux [4], du champ magnétique et des collisions ((programme de Jones nécessitant un support informatique plus puissant)) ont déjà été établis, mais sont très complexes.

## CONCLUSION

Un aperçu sommaire sur le processus de formation des couches ionosphériques nous a permis de connaître les sources de l'ionisation de cette région de l'atmosphère et son effet sur les liaisons radioélectriques en gamme décimétrique.

Le modèle simple de Chapman décrivant le mécanisme de cette ionisation bien que simple est très conforme aux résultats de calcul (prévision) ou de mesures (sondages verticaux) des paramètres ionosphériques des couches E et F1. Par contre, que la couche F2, ce modèle n'est plus valable, il faut faire intervenir au niveau de l'équation de continuité [ 11-18 ] des termes tenant compte des phénomènes de transport [ 4 ] et de dérive électrodynamique.

Le calcul en temps réel des paramètres d'une liaison radioélectrique en gamme décimétrique d'une manière exacte est pratiquement impossible, car il nécessite la connaissance, à un instant donné, des paramètres ionosphériques en tout point du globe, donc une répartition uniforme des stations de sondage à travers la planète-terre, ce qui est très onéreux (nombre infini de stations).

Pour le calcul des liaisons, nous avons élaboré des logiciels permettant de déterminer à partir, d'un profil ionosphérique vertical prévu [ modèle parabolique de Bradley ]. La fréquence maximale utilisable, l'angle d'élévation des aériens et la zone de silence autour de l'émetteur.

Ces logiciels ont été établis à l'aide de modèles mathématiques différents, soit à partir du théorème de Martyn [ 11.5.1. ], soit à partir des trajectoires de rayons [ 11.5.2. ] .

Le calcul que nous avons effectué suppose une ionosphère calme, régulière, stratifiée horizontalement. De plus, nous avons supposé que ce soutien est dispersif, isotrope et non dissipatif.

En effet, l'utilisation de l'expression complète de l'indice de réfraction [Jones] tenant compte des collisions et du champ magnétique terrestre conduit à des modèles très compliqués nécessitant un support informatique très puissant.

Enfin, l'effet des irrégularités (Esparatiduque, F diffus), des inversions de gradients [4], des orages magnétiques peuvent faire l'objet d'une thèse de projet de fin d'étude future.

ANNEXE-A

```
100 INIT
110 PRINT @1, 32:"S"; 0.94; 1.4
120 PRINT @1: "*****"
130 PRINT @1:
140 PRINT @1: "** CALCUL DE LA MEDIANE MENSUELLE **"
150 PRINT @1: "** DE LA COUCHE E FOE PAR LA **"
160 PRINT @1: "** METHODE DE MUGGLETON C. C. I. R **"
170 PRINT @1:
180 PRINT @1: "*****"
190 PRINT @1:
200 PRINT @1:
210 PRINT @1: "CONDITIONS DE CALCUL"
220 PRINT @1: "-----"
230 PRINT @1:
240 PRINT "DONNER L'ANNEE AN =";
250 INPUT An
260 PRINT "STATION A#";
270 INPUT A#
280 PRINT "DONNER LE MOIS M=";
290 INPUT M
300 PRINT "DONNER L'INDICE DE L'ACTIVITE SOLAIRE R12=";
310 INPUT R12
320 PRINT "DONNER LA LATITUDE GEOGRAPHIQUE LAT =";
330 INPUT Lat
340 PRINT "DONNER LA LONGITUDE GEOGRAPHIQUE LON =";
350 INPUT Lon
360 PAGE
370 PRINT @1: "R12="; R12
380 PRINT @1: "AN="; An
390 PRINT @1: "M="; M
400 PRINT @1: "LAT="; Lat
410 SET DEGREES
420 PRINT @1: "LON="; Lon
430 PRINT @1: "STATION ="; A#
440 PRINT @1:
450 PRINT @1:
460 PRINT @1: USING 470: "TU (HEURES)", "FOE (MHZ)"
470 IMAGE 6X, 11A, 28X, 9A
480 PRINT @1:
490 PRINT @1:
500 REM *****
510 REM ***** CALCUL DE LA DECLINAISON SOLAIRE *****
520 REM *****
530 DIM Decl(12)
540 FOR I=1 TO 12
550 READ Decl(I)
560 DATA -23, -12, -2, 8, 19, 23, 23, 14, 3, -8, -18, -23
570 NEXT I
580 Dec=Decl(M)
590 Alat=ABS(Lat)
```

```

***
610 REM *****  CALCUL DU FLUX SOLAIRE PHI *****
620 REM *****
630 Phi=63.75+0.728*R12+8.9E-4*R12^2
640 REM *****
650 REM *****  CALCUL DU TERME FONCTION DE *****
660 REM *****  L'ACTIVITE SOLAIRE *****
670 REM *****
680 A1=1+0.0094*(Phi-66)
690 REM *****
700 REM *****  TEST DE LAT PAR RAPPORT A 32 DEGRES*****
710 REM *****
720 IF A1at>32 THEN 770
730 A=23
740 B=116
750 Xm=-1.93+1.92*COS(Lat)
760 GO TO 800
770 A=92
780 B=35
790 Xm=0.11-0.49*COS(Lat)
800 A3=A+B*COS(Lat)
810 REM *****
820 REM *****  CALCUL DU TERME SAISONNIER *****
830 REM *****
840 Chim=ABS(Lat-Dec)
850 Cchim=COS(Chim)
860 A2=Cchim^Xm
870 REM *****
880 REM *****  CALCUL DU TEMPS LOCAL TL *****
890 REM *****
900 FOR K=1 TO 24
910   Tu=K-1
920   Tl=Tu+Lon/15
930   IF Tl>24 THEN
940     Tl=Tl-24
950   END IF
960   REM *****
970   REM *****  CALCUL DE L'ANGLE HORAIRE AH *****
980   REM *****
990   Ah=15*(Tl-12)
1000  REM *****
1010  REM *****  CALCUL DE L'ANGLE ZENITHAL *****
1020  REM *****  SOLAIRE CHI *****
1030  REM *****
1040  Cchi=SIN(Lat)*SIN(Dec)+COS(Lat)*COS(Dec)*COS(Ah)
1050  Chi=ACS(Cchi)
1060  REM *****
1070  REM *****  TEST SUR LAT PAR RAPPPOR A 12 DEGRES *****
1080  REM *****
1090  IF A1at>12 THEN 1120
1100  Xp=1.31
1110  GO TO 1130
1120  Xp=1.2

```

```

1130 REM *****
1140 REM ***** TEST SUR CHI PAR RAPPORT A 73 DEGRES *****
1150 REM *****
1160 IF Chi<=73 THEN 1180
1170 GO TO 1200
1180 D=Cchi↑XP
1190 GO TO 1450
1200 REM *****
1210 REM *****TEST DE CHI PAR RAPPORT A90 *****
1220 REM *****
1230 IF Chi>90 THEN 1270
1240 Dchi=6.27E-13*(Chi-50)↑8.02
1250 D=COS(Chi-Dchi)↑XP
1260 GO TO 1450
1270 Lato=90-ABS(Dec)
1280 IF Alat<Lato THEN 1310
1290 F1=0
1300 GO TO 1510
1310 REM *****
1320 REM ***** T1:LEVER DU SOLEIL *****
1330 REM *****
1340 REM ***** T2:COUCHER DU SOLEIL *****
1350 REM*****
1360 W1=-(SIN(Lat)*SIN(Dec))/COS(Lat)*COS(Dec)
1370 W2=ACS(W1)
1380 T1=12-W2/15
1390 T2=12+W2/15
1400 IF T1>T1 THEN 1430
1410 D=0.077↑XP*EXP(-1.68*(T1-T1))
1420 GO TO 1450
1430 IF T1<T2 THEN 1160
1440 D=0.077↑XP*EXP(-1.01*(T1-T2))
1450 A4=D
1460 REM *****
1470 REM ***** CALCUL DE LA FOE *****
1480 REM *****
1490 F1=(A1*A2*A3*A4)↑0.25
1500 REM VALEUR DE FOE MIN DE WAKAI
1510 F2=(0.017*(1+0.0098*R12))↑0.25
1520 Foe=F1 MAX F2
1530 PRINT @1: USING 1540:Tu, Foe
1540 IMAGE 9X, 2D, 29X, 1D, 1D
1550 NEXT K
1560 END

```

ANNEXE-B

```
100 INIT
110 PRINT @1, 32: "S"; 0.94; 1.4
120 PRINT @1: "          TABLEAU          : "
130 PRINT @1:
140 PRINT @1: "          'CALCUL DE LA MEDIANE MENSUELLE DE LA COUCHE F1, "
150 PRINT @1: "          FOF1 PAR LA METHODE DU C. C. I. R.          "
160 PRINT @1: "          -----"
170 PRINT @1:
180 PRINT @1:
190 SET DEGREES
200 DIM Decl(12)
210 FOR I=1 TO 12
220     READ Decl(I)
230     DATA -23, -12, -2, 8, 19, 23, 23, 14, 3, -8, -18, -23
240 NEXT I
250 PRINT "DONNER LE MOIS M=";
260 INPUT M
270 PRINT "DONNER R12=";
280 INPUT R12
290 PRINT "DONNER LA LATITUDE GEOMAGNETIQUE LGM=";
300 INPUT Lem
310 PRINT "DONNER LA LATITUDE GEOGRAPHIQUE LGG=";
320 INPUT Lge
330 PRINT "DONNER LA LONGITUDE LON=";
340 INPUT Lon
350 PRINT "DONNER L'ANNEE AN ";
360 INPUT An
370 PRINT @1: "          CONDITIONS DE CALCUL "
380 PRINT @1: "          -----"
390 PRINT @1:
400 PRINT @1: "          R12="; R12
410 PRINT @1: "          LGG="; Lge
420 PRINT @1: "          LGM="; Lem
430 PRINT @1: "          LON="; Lon
440 PRINT @1: "          ANNEE "; An
450 PRINT @1:
460 PRINT @1: "          RESULTATS DE CALCUL "
470 PRINT @1: "          -----"
480 PRINT @1:
490 PRINT @1: USING 500: "TU (HEURES)", "FOF1 (MHZ)"
500 IMAGE 6X, 11A, 20X, 10A
510 PRINT @1:
520 REM TEMPS LOCAL TLM
530 FOR K=1 TO 24
540     Tu=K-1
550     Tlm=Tu+Lon/15
560     IF Tlm>24 THEN
570         Tlm=Tlm-24
580     END IF
590     REM CALCUL DE AH
600     Ah=15*(Tlm-12)
610     Dec=Decl(M)
```

```

620 Cchi=SIN(Lss)*SIN(Dec)+COS(Lss)*COS(Dec)*COS(Ah)
630 Chi=ACS(Cchi)
640 REM VAL DE X0
650 X0=50+0.348*Lsm
660 REM VAL DE X100
670 X100=38.7+0.509*Lsm
680 REM VAL DE XM
690 Xm=X0+0.01*(X100-X0)*R12
700 IF Chi<=Xm THEN 720
710 GO TO 840
720 REM VAL DE N
730 N=0.093+0.00461*Lsm-5.4E-5*Lsm↑2+3.1E-4*R12
740 REM VAL DE FS0
750 Fs0=4.35+0.0058*Lsm-1.2E-4*Lsm↑2
760 REM VAL DE FS100
770 Fs100=5.37+0.011*Lsm-2.3E-4*Lsm↑2
780 REM VAL DE FS
790 Fs=Fs0+0.01*(Fs100-Fs0)*R12
800 Fof1=Fs*Cchi↑N
810 PRINT @1: USING 820:Tu, Fof1
820 IMAGE 9X, 2D, 27X, 2D, 2D
830 GO TO 860
840 PRINT @1: USING 850:Tu, "*. **"
850 IMAGE 9X, 2D, 28X, 4R
860 NEXT K
870 END

```

ANNEXE-C

Calcul de la (foF2) et  
XM(3000) F2 par les USK.

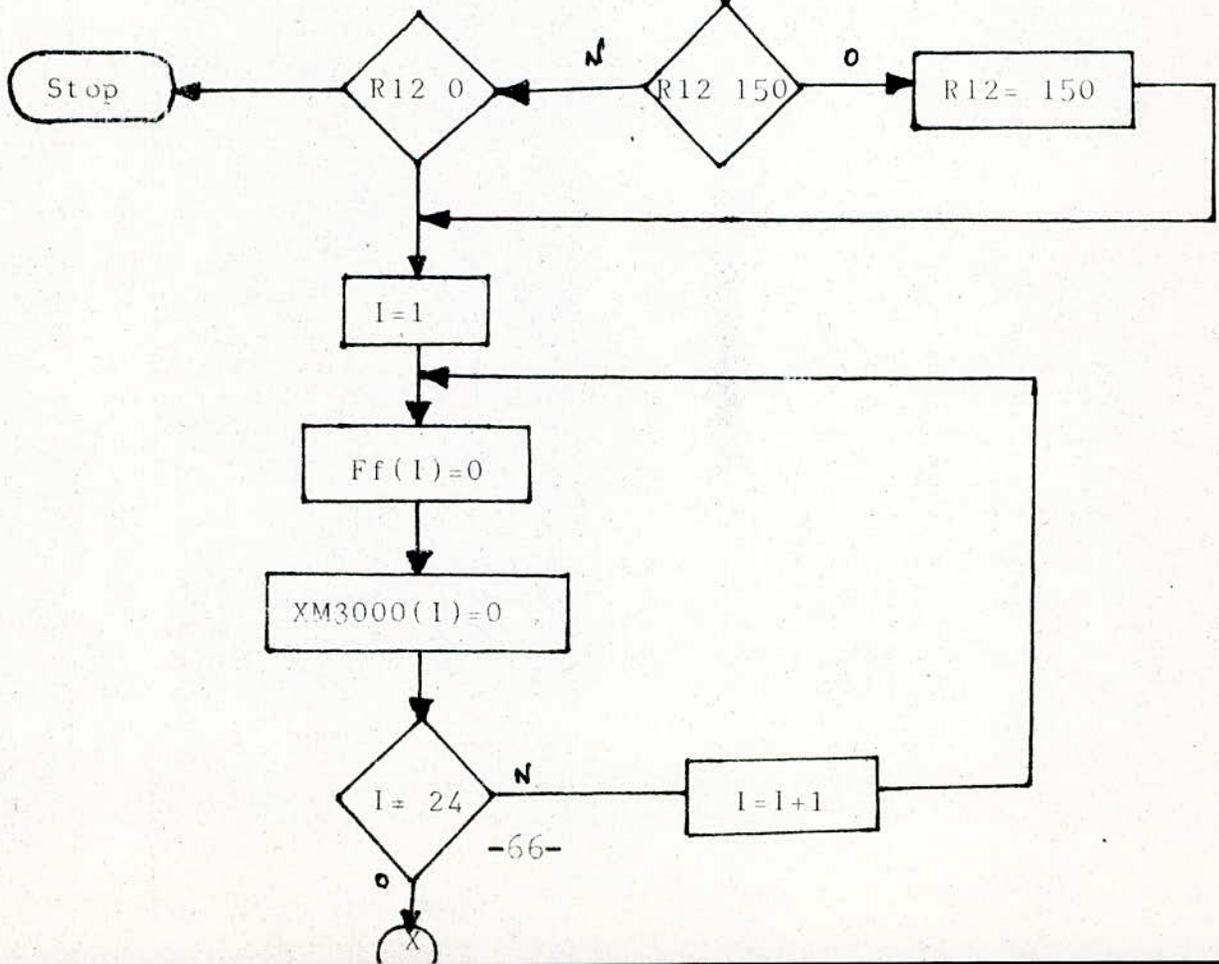
Debut

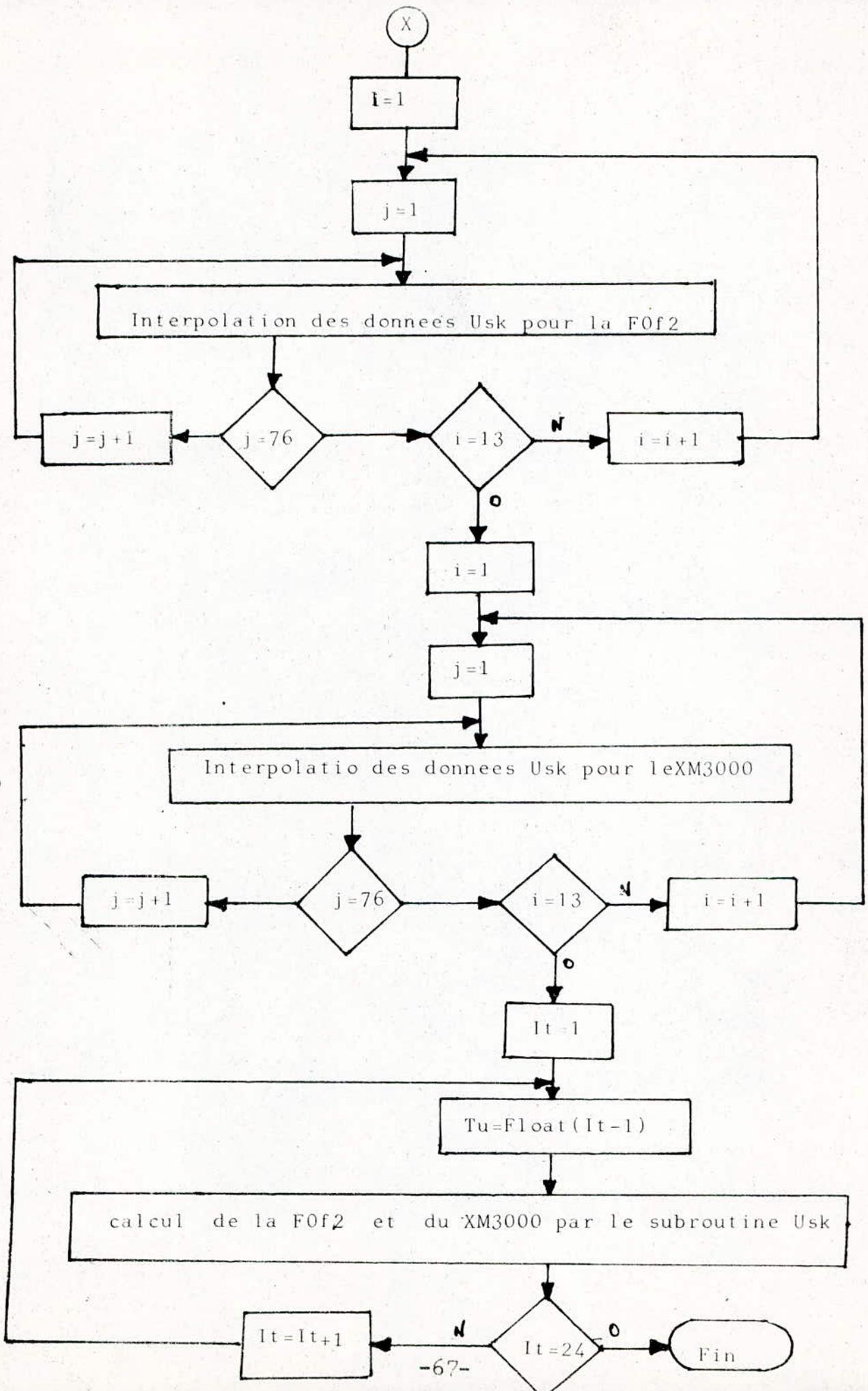
Dimensions U1(13,76),U2(13,76),Ua(13,76),K1(14),Ff(24)  
UU1(13,76),UU2(13,76),UUa(13,76),Kk1(14),XM3000(24)

Ouverture des fichiers de donnees pour les coefficients Usk  
correspondants a la Fof2 et au XM3000 pour R12=0 ,et R12=100

Introduction des donnees : Mois, Latitude, Longitude, R12( du soleil)

Lecture des coefficients Usk pour R12=0 et R12=100





ANNEXE D

```
100 REM *****
101 REM *****
102 REM ***** CALCUL DE LA MUF EN FONCTION DE LA DISTANCE *****
103 REM *****
104 REM *****
105 Nbond=1
106 REM ***** DONNEES DU PROFIL VERTICAL *****
107 PRINT "DONNER FOF2=";
108 INPUT Fof2
109 PRINT "DONNER HMF2=";
110 INPUT Hmf2
111 PRINT "DONNER YMF2=";
112 INPUT Ymf2
113 PRINT "DONNER FOE=";
114 INPUT Foe
115 Ye=20
116 Hme=110
117 PAGE
118 Fj=1.7+Foe
119 Hj=Hmf2-Ymf2*SQR(1-(Fj/Fof2)^2)
120 REM ***** PREMIERE DISTANCE *****
121 D=5000
122 Fpas=0.05
123 PRINT "FOF2="; Fof2
124 PRINT "HMF2="; Hmf2
125 PRINT "YMF2="; Ymf2
126 PRINT "FOE="; Foe
127 PRINT "YE="; Ye
128 PRINT "HME="; Hme
129 PRINT
130 PRINT
131 PRINT USING 132:"DISTANCE (KM)", "MUF (MHZ)", "ELEV (DEG.)", "NBOND"
132 IMAGE 4X, 13A, 8X, 9A, 8X, 11A, 8X, 5A
133 Fr=Fof2-0.01
134 Fcp=Fof2
135 CALL Bradley(Fof2, Hmf2, Ymf2, Foe, Hme, Ye, Fj, Hj, Fr, H, Hp)
136 CALL Plane(D, Fr, Hp, Fp)
137 CALL Courbe(D, Fr, Hp, H, Fc, Beta, Xk, Phi)
138 REM ***** RECHERCHE DE LA MUF *****
139 IF Fc<Fcp THEN 143
140 Fcp=Fc
141 Bet=Beta
142 GO TO 161
143 Muf=Fc
144 Elev=Bet
145 IF Elev<=0 THEN 152
146 Fr=Fr+FPas
147 D=D+Nbond
148 PRINT
149 PRINT USING 150:D, Muf, Elev, Nbond
150 IMAGE 7X, 4D, 15X, 2D, 2D, 13X, 2D, 2D, 14X, 1D
151 GO TO 157
152 D=D+Nbond
```

```

153 Nbond=Nbond+1
154 D=D/Nbond
155 GO TO 133
156 REM ***** NOUVELLE DISTANCE *****
157 D=D-100
158 Nbond=1
159 IF D=>0.1 THEN 133
160 STOP
161 Fr=Fr-Fpas
162 IF Fr=>1.4 THEN 135
163 GO TO 157
164 END
165 SUB Bradley(Fof2, Hmf2, Ymf2, Foe, Hme, Ye, Fj, HJ, Fr, H, HP)
166 DEF FNB(X)=0.5*LOG((1+X)/(1-X))
167 DEF FNC(X)=LOG(X+SQR(X^2-1))
168 DEF FNI(X)=0.5*LOG((X+1)/(X-1))
169 V=Fr/Foe
170 IF V=>1 THEN 175
171 REM ***** COUCHE E *****
172 H=Hme-Ye+SQR(1-V*V)
173 HP=Hme-Ye+V*Ye+FNB(V)
174 END SUB
175 W=Fr/Fj
176 IF W>1 THEN 181
177 REM ***** REGION LINERIRE *****
178 H=Hme+(Hj-Hme)*W*W*(V*V-1)/(V*V-W*W)
179 HP=Hme-Ye+V*Ye+FNI(V)+2*(Hj-Hme)*W*W*V*SQR(V*V-1)/(V*V-W*W)
180 END SUB
181 X=Fr/Fof2
182 REM ***** COUCHE F2 *****
183 H=Hmf2-Ymf2*SQR(1-X*X)
184 A=W*V*(W*SQR(V*V-1)-V*SQR(W*W-1))/(V*V-W*W)
185 Xx=(Hmf2-HJ)/(Ymf2*SQR(1-X^2))
186 HP=Hme-Ye+V*Ye+FNI(V)+2*(Hj-Hme)*A+X*Ymf2+FNC(Xx)
187 END SUB
188 SUB Plane(D, Fr, HP, Fobp)
189 Fobp=Fr*SQR(1+(D/2/HP)^2)
190 END SUB
191 END
192 SUB Courbe(D, Fr, HP, H, Fobc, Beta, Xk, Phi)
193 Rat=6371.2
194 Rd=180/PI
195 Teta2=D/(2*Rat)
196 Tphi=SIN(Teta2)/(1-COS(Teta2)+HP/Rat)
197 Phi=Rd*ATN(Tphi)
198 T2=Tphi^2
199 Xk=1/SQR(1-2*(HP-H)*T2/(Rat+H))
200 Fobc=Fr*Xk/SQR(1/(1+T2))
201 Tbet=(COS(Teta2)-Rat/(Rat+HP))/SIN(Teta2)
202 Beta=Rd*ATN(Tbet)
203 END SUB

```

ANNEXE-E

```
1 GCLEAR
3 GRAPHICS ON
10 VIEWPORT 10,60,55,95
20 WINDOW -20,95,-460,3100
30 CSIZE 2,.5
127 AXES 10,400
137 DEG
138 CSIZE 1.8,.45
147 FOR I=0 TO 90 STEP 10
157 MOVE I-3,-300
167 LABEL I
177 NEXT I
187 FOR J=0 TO 3000 STEP 400
197 MOVE -10,J-30
207 LABEL J
217 NEXT J
218 LDIR 90
219 MOVE -13,1200
220 LABEL "DISTANCE (Km)"
221 LDIR 0
222 MOVE 30,-458
223 LABEL "ELEVATION (Deg.)"
225 Fc=9.54
226 MOVE 0,0
227 FOR F=Fc TO 4*Fc STEP Fc/2
228 Y=189
229 H=112
230 X=F/Fc
231 FOR I=0 TO 89
232 A=SIN(I)
233 B=COS(I)
234 C=A/B
235 X1=1+X*B
236 X2=1-X*B
237 IF X2=0 THEN 243
238 X3=X1/X2
239 IF X3<=0 THEN 243
240 X4=LOG(X3)
241 D=Y*X*A*X4+2*H*C
242 DRAW I,D
243 NEXT I
244 NEXT F
289 END
```

ANNEXE E : Calcul de la zone de silence en fonction de l'angle d'elevation et de la fréquence de travail

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

- [ 1 ] K. SAADA  
"Etude de la propagation troposphérique et la réception  
des ondes VHF par radar St"  
Thèse de Magister Janvier 1986 (E.N.P.)
- [ 2 ] DAVIS, K. "Ionospheric radio propagation"  
Nat. Burd. Std. Monograph 80
- [ 3 ] | Bordas Encyclopédie  
Roger CARATI
- [ 4 ] M. MEHENNI  
"Contribution à l'étude du tracé de rayons de  
propagation HF dans la zone saharienne" Thèse de Magister  
Octobre 1982 (E.N.P.)
- [ 5 ] HERON, M.L., et Mc NAMARA, L.F.
- [ 6 ] "Crocher, M. "Propagation transéquatoriale en dehors  
du grand cercle en ondes décimétriques  
Ann. Geophys., t. 28, Fasc I, 1972 p., 27.35
- [ 7 ] J.M. Kelso "Radian Ray Propagation in the ionosphere"  
MG Grawhill Book Company  
p., 144 - 150  
p., 207 - 200
- [ 8 ] ATLAS DU CCIR DES CARACTERISTIQUES IONOSPHERIQUES  
Supplément n° 3 au rapport 340 du CCIR  
Genève 1980

[ 9 ]

R. AKSAS

"Contribution à l'étude de l'ionosphère intertropicale, condition ionosphérique à Tamanrasset".

Thèse de Magister

Octobre 1982 (E.N.P.)

[ 10 ]

KOURIS S.S. et MUGGLETON L.M. : "Word morphology of the Appleton E-Layer seasonal vol. 33 Page 1231-1297 (1971)

[ 11 ]

KOURIS S.S et MUGGLETON L.M. : "Analytical expression for prediction of the FOE for solar zenith angles 0-78°".

[ 12 ]

KOURIS S.S. et MUGGLETON L.M. "Diurnal variation in the layer ionisation

Journal of atmospheric and terrestrial physics, vol.35, page 133-139 1973

[ 13 ]

Instruction d'emploi des prévisions de propagation ionosphérique des ondes radioélectriques CNET 1969

[ 14 ]

R. FLEURY

La fréquence critique de la région F2 de l'ionosphère : modélisation de la médiane mensuelle et comportement en période magnétiquement perturbée.

[ 15 ]

JONES, W.D. et GALLET, R., "representation of diurnal and graphic variation of ionospheric data by numerical methods" Journal of recherche 1962.