

UNIVERSITE D'ALGER

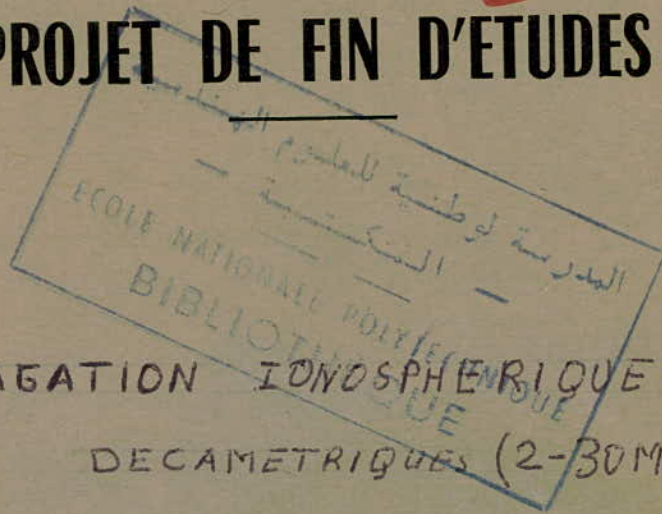
2/79

DEPARTEMENT ELECTRICITE

FILIERE D'INGENIEUR EN ELECTROTECHNIQUE



PROJET DE FIN D'ETUDES



SUJET : PROPAGATION IONOSPHERIQUE DES ONDES
DECAMETRIQUES (2-30MHz)

PROPOSE PAR : M^s AIT SI ALI

REALISE PAR : F. Bennacer

A. Ouali

La mise en évidence de l'ionosphère est étroitement liée, aux différentes étapes des progrès réalisés dans le domaine de la radioélectricité.

En 1904, H. Poincaré écrivait: " On avait annoncé récemment que M. Marconi, avait réussi à envoyer des signaux de télégraphie sans fil, d'Angleterre en Amérique. Quelque soit la sensibilité du cohéreur, ce résultat est bien fait pour nous surprendre, pour deux raisons ; à cause de la grande distance et de la courbure de la terre".

S'inspirant des travaux de Faraday, Ampère et Henry, Maxwell et Hertz ont montré que les ondes électromagnétiques étaient de même nature que la lumière et avaient un caractère ondulatoire, elles ne diffèrent que par leur longueurs d'ondes plus grandes; ce qui expliqua le phénomène observé par J. Henry en 1842, la transmission à distance, par induction, d'impulsions électriques produites par de puissantes étincelles, et en 1851 il suggéra que des décharges de formes alternatives, étaient capables d'engendrer, quelques choses comme des ondulations;

La théorie de Maxwell et Hertz, implique que la propagation des ondes électromagnétiques ne se faisait pas obligatoirement en ligne droite.

En 1902, Heaviside et Kennelly indépendamment l'un de l'autre relance l'idée de Gauss d'une existence d'une couche conductrice de l'électricité en haute atmosphère, car cette idée permettait d'expliquer les variations du magnétisme terrestre. Par suite cette idée était contrée, par la constatation que l'air était un isolant.

Le développement incessant de la recherche sur la véritable nature de l'électricité, permet alors d'expliquer l'existence possible de l'ionosphère.

Ainsi les travaux d'Edison sur l'effet photo-électrique de la lumière, de Milikan sur la mesure de la charge élémentaire d'un électron, de Fleming, Taylor et autres ne faisaient que confirmer l'existence de l'ionosphère; car c'était l'unique solution.

En 1925, Appléton et Barnett d'une part, à l'aide d'un émetteur F.M ont mis en évidence l'existence d'une région capable de réfléchir, située à environ 100 KM, et d'autre part Breit et Tuve à l'aide d'un émetteur à impulsions ont obtenus des réflexions d'ondes.

Enfin, cette région conductrice de la haute atmosphère dont la réalité ne faisait plus de doute, avait été baptisée par WATT sous le nom : IONOSPHERE.

----*--* INTRODUCTION GENERALE *--*--*--

Les télécommunications radioélectriques représentent l'ultime moyen de sauvegarder des liaisons dans le cas où les moyens classiques, fils, câbles, seraient détruits, par le fait de guerre ou de cataclysme naturel, et pour des liaisons à caractère militaire, même les transmissions via satellite seraient neutralisées, en cas de conflit.

La couche ionosphérique apparaît donc, comme un moyen très important pour les transmissions radioélectriques, car la propagation ionosphérique (ie, par réflexion sur l'ionosphère) des ondes radioélectriques est rendue possible par les propriétés du milieu ionisé (qu'est l'ionosphère) et les liaisons à moyennes et grandes distances sont rendues possibles grâce aux altitudes élevées des couches de l'ionosphère.

La propagation ionosphérique est due à la caractéristique principale de l'ionosphère, l'ionisation; qui a pour origine le rayonnement électromagnétique du soleil, l'ionisation de l'ionosphère dépend donc de la position et de l'activité du soleil; elle dépend donc du temps.

Le choix de la bande 2 - 30 MHz pour la propagation ionosphérique, et que, pour liaison donnée et un état de l'ionosphère donnée; la fréquence maximale utilisable (M.U.F) se situe toujours dans cette bande H.F, et la fréquence minimale utilisable (L.U.F) est toujours supérieure à 2 MHz, car pour des fréquences voisines de 2 MHz, l'absorption (qui est une des propriétés d'un milieu ionisé) provoque un tel affaiblissement qu'à la réception le signal réfléchi est tellement faible que la réception très mauvaise (brouillée).

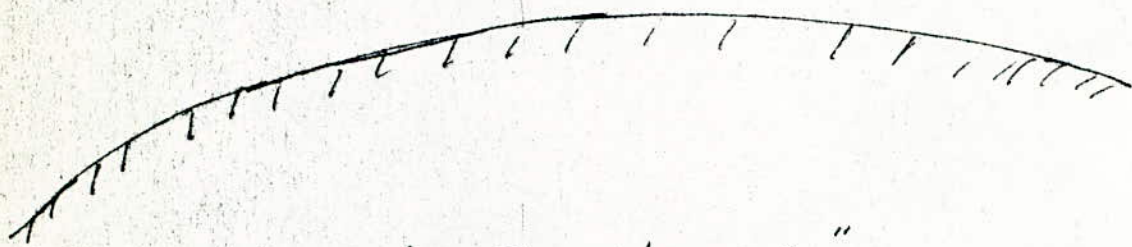
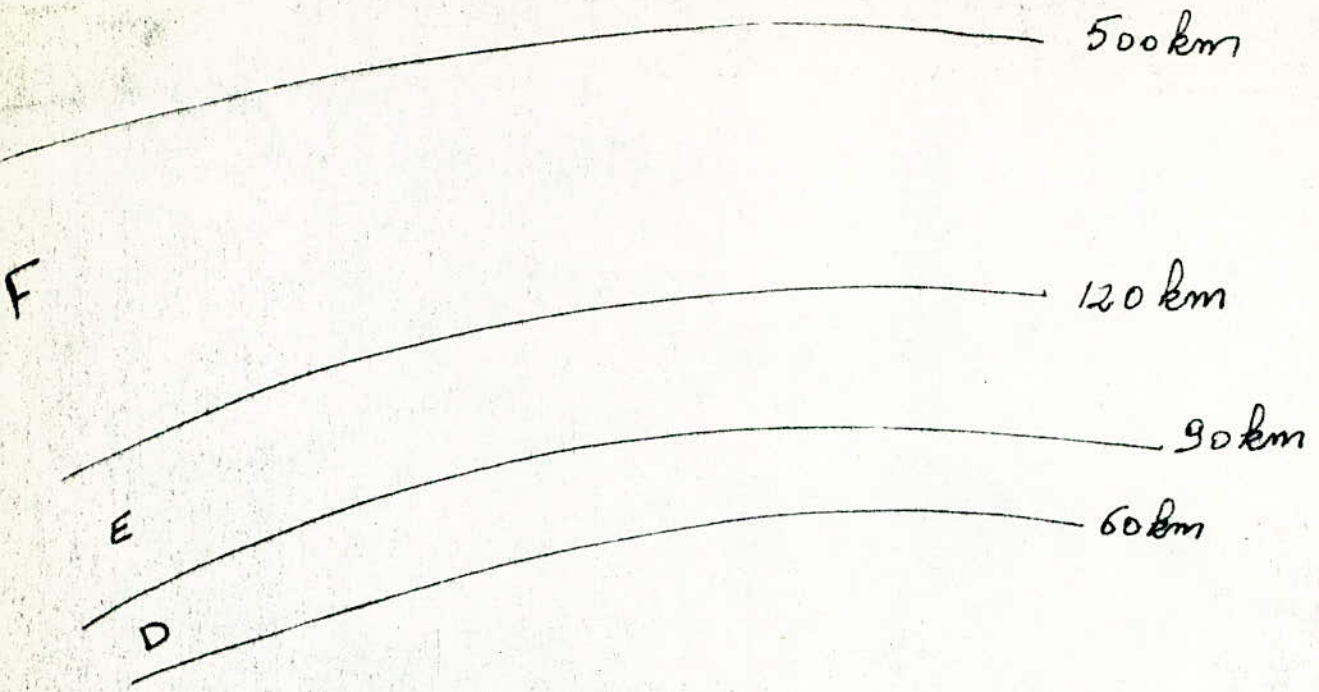
Les principales couches intéressant la propagation des ondes radioélectriques, sont les couches D, E, F, situées à des altitudes différentes (voir figure) sur lesquelles s'effectue la réflexion de ces ondes.

Pour une liaison donnée, la fréquence maximale utilisable (M.U.F) est proportionnelle à la racine carrée de la densité électronique de la couche utilisée; la fréquence maximale utilisable dépend donc, de la position et du niveau de l'activité

du soleil, elle dépend donc du temps (puisque la position et le niveau de l'activité du soleil varie dans le temps)

Dans plusieurs pays, des centres spécialisés dans le domaine de la propagation ionosphérique, font des prévisions des conditions de propagation, à long terme (3 mois à l'avance) et à court terme (quelques heures et quelques jours à l'avance); ces conditions consistent à prévoir, l'ionisation maximale des différentes couches, donc les fréquences maximales à utiliser (suivants la distance) et l'absorption des couches basses de l'ionosphère, donc de la fréquence minimale à utiliser, 3 mois à l'avance (comme par exemple la division de propagation ionosphérique du C.N.E.T. français)

Les problèmes qui se posent pour la propagation ionosphérique et qui n'ont pas de solutions, sont les perturbations de l'ionosphère lors des éruptions du soleil, car pendant cette période et dans certains cas, les liaisons utilisant la réflexion ionosphérique sont très brouillées et même interrompues.



" Couches Ionospheriques "

----* OBJET DE L'ETUDE *--*--*

L'objet de notre étude concerne la propagation par ondes ionosphériques dans la bande décamétriques(H.F), la synthèse des problèmes rencontrés et l'utilisation pratique de celle-ci.

TABLE DE MATIERE

PARTIE I : ETUDE THEORIQUE DE LA PROPAGATION IONOSPHERIQUE

CHAPITRE I : Etude des caractéristiques et propriétés
de l'ionosphère

CHAPITRE II : L'ionosphère perturbée et les conséquences
sur la propagation.

CHAPITRE III : Conclusions expérimentales sur le compor-
tement des caractéristiques des différentes
couches en fonction de la position et de
l'activité du soleil.

CHAPITRE IV : Conditions de propagations ionosphérique
(conditions sur la fréquence)

CHAPITRE V : Différents problèmes rencontrés.
(bruit, affaiblissement)

**CONCLUSIONS

**ANNEXE: Influence du champ magnétique terrestre sur
la propagation ionosphérique des ondes
décamétriques.

***ANNEXE 2: autre méthode de sondage: RETRODIFFUSION

PARTIE II: PREVISION A LONG TERME DES CONDITIONS DE PROPAGA-
tion IONOSPHERIQUE DES ONDES DECAMETRIQUES.

1./INTRODUCTION

2./BUT ET CAUSE DES PREVISIONS

3./METHODE DE PREVISION

4./DESCRIPTION ET UTILISATION DES PREVISIONS FRANÇAISES.

5./ METHODE DE PREVISION AMERICAINE.

ANNEXE :PREVISION A COURT TERME.

PARTIE III : ETUDES ACTUELLES SUR LA PROPAGATION IONOSPHERIQUE

1./ Modification de l'ionosphère provoquée par des émetteurs
à ondes décamétriques de grandes puissances.

2./ Méthode de brouillage : Transmodulation ionosphérique

3./ Propagation ionosphérique à grandes distances avec
et sans réflexion intermédiaire sur le sol.

CHAPITRE I : Caractéristiques et propriétés
de l'ionosphère .

- 1./ Introduction.
- 2./ L'activité solaire.
- 3./ Principe et cause de l'ionisation.
- 4./ Caractéristiques d'une couche ionisée de l'ionosphère.
- 5./ Cause, Propriétés de l'ionosphère
 - 5.1/cause, principe de la réflexion par une couche ionisée de l'ionosphère.
 - 5.2/Cause, principe et conséquences de l'absorption d'une couche ionisée de l'ionosphère.
- 6./ Comportement des différentes couches
 - 6.1/ couche D
 - 6.2/couche E
 - 6.3/couche F_1
 - 6.4/couche F_2
 - 6.5/couches anormales.

1./ Introduction.

L'ionosphère est une couche de la haute atmosphère, comprise entre, 90 et 500 km environ.

L'ionisation de l'ionosphère, est due au rayonnement électromagnétique du soleil.

L'ionisation, dépend donc de l'intensité du rayonnement solaire, elle dépend donc:

-de l'activité solaire(R)

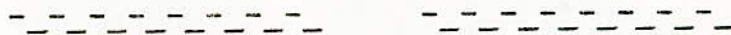
-et de la position du soleil(pour une certaine région de l'ionosphère.)

La position du soleil, est caractérisée par la distance du soleil zénithale du soleil $X(^{\circ})$, pour une certaine région de l'ionosphère, est minimale à midi (ie, 12h, heure local). La distance zénithale X , est fournie par des centres spécialisés, pour chaque mois de l'année en fonction de la latitude et de l'heure de la journée(elle est la même pour tous les points situés sous une même latitude.)

Dans notre domaine, c'est à dire la propagation des ondes l'ionosphère a été subdivisée en différentes couches, D, E, F, à cause du niveau d'ionisation qui est très différent. La hauteur ou l'altitude maximale d'une des couches, est celle de l'altitude de la l'ionisation maximale de la couche.

L'ionosphère, étant une région ionisée, elle a donc, la propriété :

- de réfracter une onde radioélectrique.
- d'absorber de l'énergie d'une onde radioélectrique



2./ L'activité solaire .

Le rayonnement ionisant du soleil varie l'activité du soleil, qui est caractérisé par l'indice R .

C'est Galilée à l'aide de sa première lunette, qui découvrit l'activité solaire, après avoir repéré des tâches, plus sombres sur la surface du soleil. Ces tâches, se déplacent de jour en jour, sur le disque, par suite de la rotation du soleil sur lui-même et dont la durée est de 27 jours.

-Niveau de l'activité solaire : R

Le niveau de l'activité, est caractérisé par l'indice R, qui est le nombre de tâches visibles sur le disque, on l'appelle aussi, "nombre de Wolf" ou "nombre de Zurich" .

$$**R = k(10g + f)$$

f : nombre de tâches isolées sur le disque.

g : nombre de groupes de tâches.

k : coefficient destiné à réduire à la même échelle, les données provenant d'observatoires divers.

-Cycle de l'activité solaire (voir figure 1)

Le nombre de tâches solaire visibles, varie et possède une période moyenne de 11 ans : c'est le cycle de l'activité solaire, découvert par l'allemand Schwabe en 1851.

-Variation dans le temps.

*D'un jour à l'autre (variation faible)

*D'un mois à l'autre (notable)

*D'une année à l'autre

*D'un cycle à l'autre (les maximas et les minimas varient)

3./ Principe et cause de l'ionisation de l'ionosphère.

Les fréquences du rayonnements électromagnétique, du soleil vont, des fréquences radioélectriques jusqu'aux rayons X en passant par l'infra-rouge, le spectre visible et l'ultra-violet.

- Cause de l'ionisation .

L'ionisation, est due au fait que, les "photons" composants le rayonnement électromagnétique du soleil, possèdent une énergie suffisante, pour ioniser, les atomes et molécules composant l'ionosphère.

- Principe d'ionisation : photo-ionisation (voir tab. 1

Le rayonnement électromagnétique du soleil, se divise en paquets d'énergie appelé "quanta" ou "photon" .

$$* \text{quanta} = h\nu \text{ (ergs)}$$

$$h: \text{ constante de planck} = 6,62 \cdot 10^{-27} \text{ (cgs)}$$

ν : fréquence du rayonnement électromagnétique.

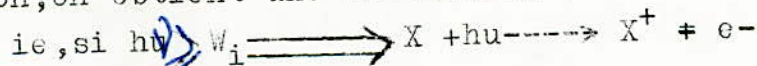
Soit X, un atome ou molécule de la haute atmosphère.

soit W_i , l'énergie d'extraction d'un électron périphérique de X.

Le principe d'ionisation, est la photo-ionisation, c'est à dire

que l'énergie $h\nu$ augmente la distance "électron-noyau"

Si cette énergie $h\nu$ est supérieur ou égal à l'énergie d'extraction, on obtient une ionisation .



$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

λ : longueur d'onde du rayonnement

$$** \lambda_i = \frac{ch}{W_i}, \text{ longueur d'onde ionisante}$$

$$\text{Ex: } W_i \text{ (oxygène atomique)} = 2,2 \cdot 10^{-11} \text{ ergs}, \lambda_i = 910 \text{ \AA}$$

Toutes longueurs d'onde λ du rayonnement solaire, telle que:

$$\lambda < \lambda_i(0) \text{ ionisera l'oxygène atomique.}$$

4./ Caractéristiques d'une couche ionisée

(en présence d'une onde radioélectrique)

Dans la haute atmosphère, à mesure qu'on s'élève en altitude la densité gazeuse (des ions et des particules neutres)

diminue .

On distinguera donc deux (2) sortes de couche :

4.1/couche ionisée raréfiée : ex. la couche ~~DF~~ et E

4.2/couche ionisée peu raréfiée : ex. la couche D

4.1/Couche ionisée raréfiée : (E,F)

On dit qu'une couche ionisée est raréfiée si "le parcours moyen des électrons est plus long que la période $2\pi/\omega$ "

* $\omega = 2\pi f$: pulsation de l'onde radioélectrique, traversant la couche.

Ce qui revient à dire que "le nombre de chocs d'un électron est faible".

4.1.1/constante diélectrique équivalente: η)

Le champ électrique de l'onde radioélectrique, qui est alternatif, communique un mouvement oscillatoire, aux électrons se trouvant dans la couche ionisée raréfiée, ce mouvement est régi par :

$$m \frac{dv}{dt} = - E_0 \cdot \exp(j\omega t)$$

$$v = \frac{j e}{m\omega} E_0 \cdot \exp(j\omega t)$$

$\rho = -N \cdot e$ densité de charge électrique

m, e, v : masse, charge, et vitesse d'un électron

E_0 amplitude du champ électrique de l'onde

*Densité de courant électronique :

$$i_e = - \frac{Ne^2}{m\omega} E_0 \exp(j\omega t)$$

*densité de courant de déplacement : i_d

$$i_d = j\omega \epsilon_0 E_0 \exp(j\omega t)$$

*densité de courant total : i_T

$$i_T = j\omega \left(\epsilon_0 - \frac{Ne^2}{m\omega^2} \right) E_0 \exp(j\omega t)$$

$$I_T = j\omega \left(\epsilon_0 - \frac{Ne^2}{m\omega^2} \right) \cdot E_0$$

*constante diélectrique équivalente η

$$\eta = \epsilon_0 - \frac{Ne^2}{m\omega^2}$$

ϵ_0 : constante diélectrique dans le vide, ie milieu diélectrique pur.

La constante diélectrique η d'un milieu ionisée raréfié, est purement réelle, comme dans un diélectrique pur, mais elle reste inférieure à ϵ_0 .

**N, densité des électrons de la couche.

4.1.2/ Indice de réfraction in

Une couche ionisée, possède un indice de réfraction n qui lie la vitesse de groupe de l'onde, et la vitesse de la lumière, par la relation suivante :

$v = n \cdot c$: vitesse de groupe
 n : indice de réfraction

$$\text{or, } v = c \cdot \sqrt{1 - \frac{Ne^2}{m \omega^2}} = \quad , n = \sqrt{1 - \frac{Ne^2}{m \omega^2}}$$

N : densité électronique de la couche

m, e : masse et charge de l'électron

$\omega = 2\pi f$ pulsation de l'onde radioélectrique

***conclusion : on remarque, que la constante diélectrique et l'indice de réfraction n , s'annulent pour :

$$f = f_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m}} \approx 9 \sqrt{N} \quad N \text{ en } 10^6 \text{ e/cm}^3$$

Cette fréquence qui annulent, la constante diélectrique et l'indice de réfraction, est appelée fréquence de plasma.

4.2/ couche ionisée peu raréfiée : (D)

On dit, qu'une couche ionisée est peu raréfiée, si le parcours

moyen d'un électron, est plus faible que $2\pi/\omega$

Dans ce cas, le nombre de chocs par seconde d'un électron est relativement élevé.

**courant de conduction : η

$$\eta = \epsilon_0 - j \frac{Ne^2}{m(\omega^2 + \nu^2)} E_0 \exp(j\omega t)$$

4.2.1/ constante diélectrique : ϵ_c

$$\epsilon_c = -j \frac{Ne^2 \omega}{m(\omega^2 + \nu^2)} E_0 \exp(j\omega t)$$

ν : nombre de chocs par seconde d'un électron

4.2.2/ conductivité :

Le choc des électrons, fait intervenir apparaître, une certaine conductivité σ :

$$\sigma \approx \frac{Ne^2}{m \omega^2} \cdot \nu$$

4.2.3/ facteur d'atténuation ↓

$$d = \frac{1}{2} \sigma \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = \frac{1}{2} \frac{Ne^2}{m \omega^2} \cdot v \cdot \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$$

μ_0 : perméabilité du vide

CONCLUSION : (voir tableau 2)

Dans une couche ionisée, peu raréfiée, il y a apparition:

- d'une conductivité σ
- d'un facteur d'atténuation, α

qui sont proportionnels au nombre de chocs d'un électron. L'absorption de l'énergie radioélectrique, ie l'affaiblissement du champ électrique de l'onde radioélectrique, est maximum dans la couche D où le nombre de chocs d'un électron est le plus élevé

$$v = 10^6 \text{ chocs / seconde environ.}$$

$$\text{Affaiblissement} = \exp(-\alpha x)$$

où x longueur du trajet parcouru dans la couche

5./ Propriétés de l'ionosphère

5.1/ cause, principe de la réflexion par une couche ionisée de l'ionosphère. (voir figure 2)

Une couche ionisée de l'ionosphère, possède une densité électronique N qui est croissante avec l'altitude h; ceci est dut à :

- les composants différent avec l'altitude h
- Au flux et à l'intensité du rayonnement électromagnétique, qui diminuent lorsque le rayonnement s'enfonce dans l'ionosphère, ie lorsque l'altitude diminue
- à ce que la densité gazeuse, augmente lorsque l'altitude diminue.

Dans, une couche ionisée de l'ionosphère on a :

- N = N(h), densité croissante avec h

- n = $\sqrt{1 - \frac{31.8 N}{f^2}}$, indice de réfraction est donc, décroissant avec h.

-v = c.n(h) , vitesse de groupe, est décroissante avec h

-n = $\epsilon_0 N(h)$, la constante diélectrique est aussi décroissante avec h

5.1.1/principe de réflexion, ou, de réfraction successive.

Etudions, un rayon radioélectrique incident sur une couche ionisée de l'ionosphère (ie, N est croissante avec l'altitude h)

La loi de Descartes-Snell, par analogie avec l'optique, nous donne en un point de la trajectoire :

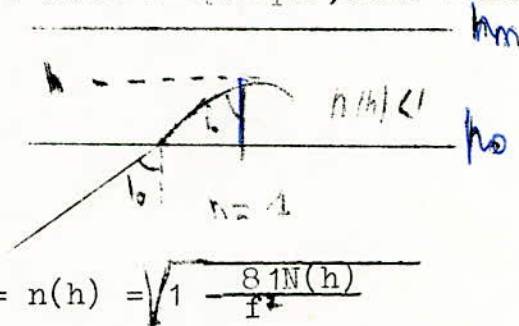
$$n \cdot \sin(i(h)) = \sin(i_0)$$

$$\sin(i(h)) = \sin(i_0) / n(h)$$

la réflexion a lieu à une

hauteur h telle que

$$i(h) = 90^\circ, \text{ donc pour, } \sin(i_0) = n(h) = \sqrt{1 - \frac{81N(h)}{f^2}}$$



En conclusion :

-pour qu'une onde de fréquence f soit réfléchi à la hauteur h, où, la densité est N(h); il faut que :

$$f = 9\sqrt{N(h)} / \cos(i_0), \text{ si l'angle d'incidence est } i_0.$$

-Une onde de fréquence f sera réfléchi à une hauteur h, où, la densité est: $N(h) = \frac{f^2 \cdot \cos^2(i_0)}{81}$

-réflexion sous incidence normale: $i_0 = 90^\circ$

La réflexion a lieu, à une hauteur h telle que :

$$N(h) = \frac{f^2}{81}$$

....réciproquement:

-pour qu'une de fréquence f soit réfléchi à une hauteur h, il faut que: $f = 9\sqrt{N(h)}$

**** Les causes de réflexion, sous incidence normale sont:

...Annulation de l'indice de réfraction n, donc

...Annulation de la vitesse de groupe et de la constante diélectrique

à la hauteur de réflexion .

****La réflexion par une couche ionisée (de l'ionosphère) (fig) est suite de réfraction ; car

$$N = N(h) \text{ donc: } \sin(i(h))$$

$$\sin(i) = \sin(i(h)) = \sin(i_0) / n(h)$$

avec n(h), décroissant avec h, donc i(h) décroissant de h.

à h, (passe de i_0 à 0°) ensuite il croit de h à h_0 (de 0 à i_0)

5.2/Cause, principe et conséquences de l'absorption d'une couche ionisée (de l'ionosphère)

5.2.1/ Causes

L'absorption, d'une couche ionisée a pour cause l'existence d'une conductivité σ ;

$$\sigma = Ne^2 / m(\omega^2 + \nu^2)$$

Cette conductivité est due, aux chocs des électrons avec les autres particules. Le nombre moyen de chocs par seconde dépend de la densité gazeuse de la couche.

Seule, la couche D, possède une densité gazeuse relativement élevée, entraînant un nombre de chocs important, donc une absorption relativement importante, par rapport aux couches E et F.

5.2.2/ Principe d'absorption.

Lorsque, l'onde radioélectrique arrive dans une couche ionisée, où la densité gazeuse est notable, les électrons commencent à osciller à la même fréquence que celle de l'onde incidente, sous l'effet du champ électrique alternatif. Les chocs de ces électrons, qui possèdent chacun une partie de l'énergie de l'onde, avec les autres particules avoisinantes: provoquent une perte de l'énergie cinétique de ces électrons.

Cette énergie, qui fait défaut à l'onde résultante, est celle perdue par ces électrons.

On dit que cette énergie perdue, est absorbée par la couche.

5.2.3/ Conséquences

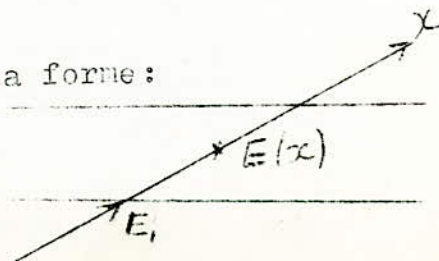
L'absorption, produit donc une perte de l'énergie radioélectrique de l'onde traversant la couche. Cette perte de l'énergie, se traduit par un affaiblissement du champ électrique de l'onde.

- l'absorption est caractérisée par la conductivité σ

- l'affaiblissement est caractérisé par le facteur d'atténuation: $d = \frac{1}{2} \sigma \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$

L'affaiblissement de E est de la forme:

$$E(x) = E_1 \cdot \exp(-\alpha x)$$



6./ comportement des différentes couches

L'étude de l'ionosphère, au cours des nombreuses années et en se basant sur des données expérimentales, a permis d'en tirer certaines conclusions, sur la variation dans le temps des caractéristiques de l'ionosphère.

La caractéristique commune des différentes couches, qui est l'ionisation est favorisée par :

- le milieu qui est très dilué
- sa densité gazeuse, qui est suffisante pour qu'elle puisse absorber une portion non-négligeable de l'énergie solaire.

La stratification des couches, a été faite, en fonction des différents maxima observés. La limite supérieure de chaque couche, correspond à l'altitude du maximum d'ionisation de la couche considérée.

L'ionisation de l'ionosphère dépend :

- de l'activité solaire
- et de la position du soleil (pour une certaine région de l'ionosphère considérée.)

6.1/ COUCHE D : comprise entre : 60 et 90 kms

- Elle n'existe que pendant le jour (ie que l'ionisation disparaît pendant la nuit) c'est à ce que, lorsque le soleil s'abaisse, pour disparaître, pour une certaine région, la recombinaison ($e + X^+$) devient relativement plus importante que l'ionisation qui est nulle pendant la nuit.
 - Elle possède la plus grande densité gazeuse,
 - L'ionisation de la couche D, est relativement très faible, c'est dû à ce que, lorsque le rayonnement solaire s'enfonce dans l'ionosphère, une partie élevée de son énergie est absorbée, par les couches supérieures E et F.
 - L'ionisation de D est en relation étroite avec l'activité solaire.
- La densité électronique N de D :
- *possède des variations diurnes, N est d'autant plus élevé que le soleil sera plus haut à l'horizon.
 - **possède des variations saisonnières, N augmente beaucoup de l'hiver à l'été.
 - ***possède des variations undécennales : variation avec le cycle de l'activité solaire (11 ans)

-variation avec l'altitude h:

$$h = 60 \text{ km} \quad N = 10^2 \text{ électron/cm}^3$$

$$h = 90 \text{ km} \quad N = 10^4 \text{ électron/cm}^3$$

Influence de la couche D, sur la propagation.

Le fait que la couche \tilde{D} , possède une densité élevée, fait que le nombre de chocs $\sqrt{}$ est élevé, ce qui entraîne que la l'absorption est relativement importante.

**6.4/ COUCHE E (normale): comprise entre: 90 et 120 km, environ.

-L'ionisation de la couche E est très lié avec l'activité solaire.

-La densité $N(E)$ présente les même variations que la couche D, sauf que pendant la nuit, l'ionisation de E subsiste (sauf en cas de faible activité solaire)

-Pour une activité solaire moyenne on a:

$$**N_{mE} = 10^5 \text{ à } 2 \cdot 10^5 \text{ e/cm}^3, \text{ pendant le jour.}$$

$$***N_{mE} = 10^3 \text{ e/cm}^3 \quad \text{La nuit}$$

-L'absorption de la couche E, est relativement faible.

**6.5/ COUCHE F/ comprise entre 175 et 500 km, environ

Pendant, l'été et le jour, la couche F se subdivise en deux (2) couches F_1 et F_2 , c'est dut à la présence de 2 maxims entre 175 et 500 kms.

6. .1/ couche F_1 : 175 et 250 km

Elle n'existe que pendant le jour et l'été (ie que l'ionisation ne subsiste que pendant le jour et l'été)

La densité électronique, est voisine de celle de E mais légèrement supérieur.

6. .2/ couche F_2 : 250 et 500 km

-La couche F_2 , existe le jour et la nuit.

-Sa densité électronique maximale, N_{mF_2} est la plus élevé car l'énergie solaire est maximale à son niveau.

$$**\text{le jour} \quad N_{mF_2} = (4-10) \cdot 10^5 \text{ e/cm}^3, \text{ environ}$$

$$**\text{la nuit} \quad N_{mF_2} = 10^5 \text{ e/cm}^3, \text{ environ}$$

-L'ionisation présente :

*des variations saisonnière; maximum en hiver

*des variations diurnes

* des variations undecennales.

6.4/ COUCHES ANORMALES

Parfois, on observe certaines étendues ionisées, qui apparaissent lors de d'un comportement anormale de l'activité solaire.

6.4.1/couche E aurorale.

La région E présente, dans certain cas et dans certaine zone, un comportement perturbée.

La couche E aurorale, est une des manifestations, du comportement perturbée., elle se manifeste par des échos intences vers 100 à 110 km, dans la région des aurores, elle se manifeste en même temps qu'une aurore polaire est observée, et, que de forte variations accidentelles du champ magnétique sont enregistrés. Elle est attribuée, tout comme les phénomènes optiques, et géomagnétique, à l'arrivée d'un courant de corpuscules issues du soleil.

La localisation de la couche E-aurorale, aux latitudes élevées est dut à la modification de la trajectoire des corpuscules issues du soleil, par le champ magnétique terrestre, qui les dirige vers les latitudes élevées.

6.4.2/couche E-sporadique :Es

La couche Es, est au contraire un phénomène fréquent sous toutes les latitudes.

On désigne sous ce nom, la présence intermittente d'une poite pointe d'ionisation, qui pendant la journée, vient se greffer entre la base de la couche E et son centre.

Es peut-être, présente pendant la nuit et c'est alors la seule manifestation sensible d'ionisation, entre 100 et 120 km.

Es est très mince, à elle est de l'ordre de 5 km

La densité de Es, est supérieur à E normale, la densité de Es est sujette à des variations dans le temps et dans l'espace.

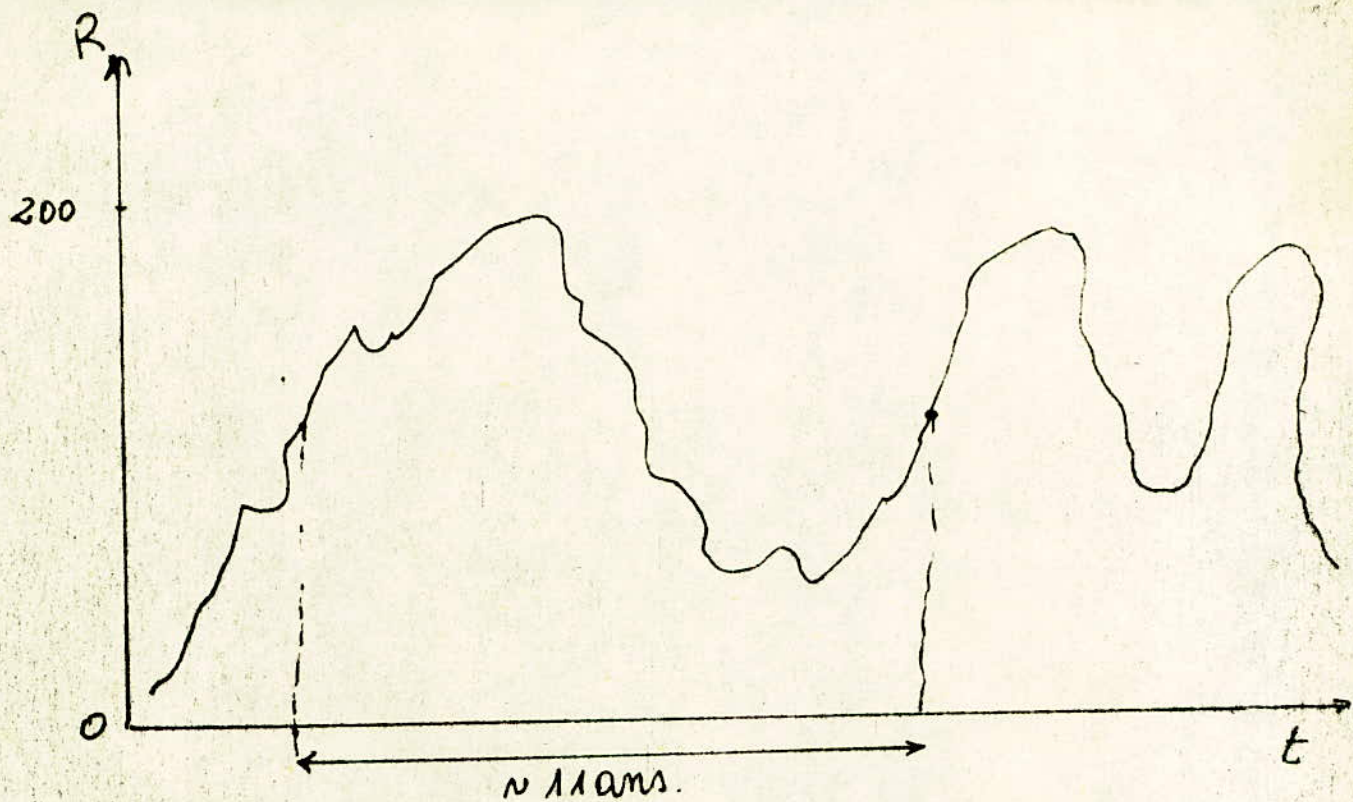


fig 1: "variation du nombre de taches solaires R
en fonction du temps."

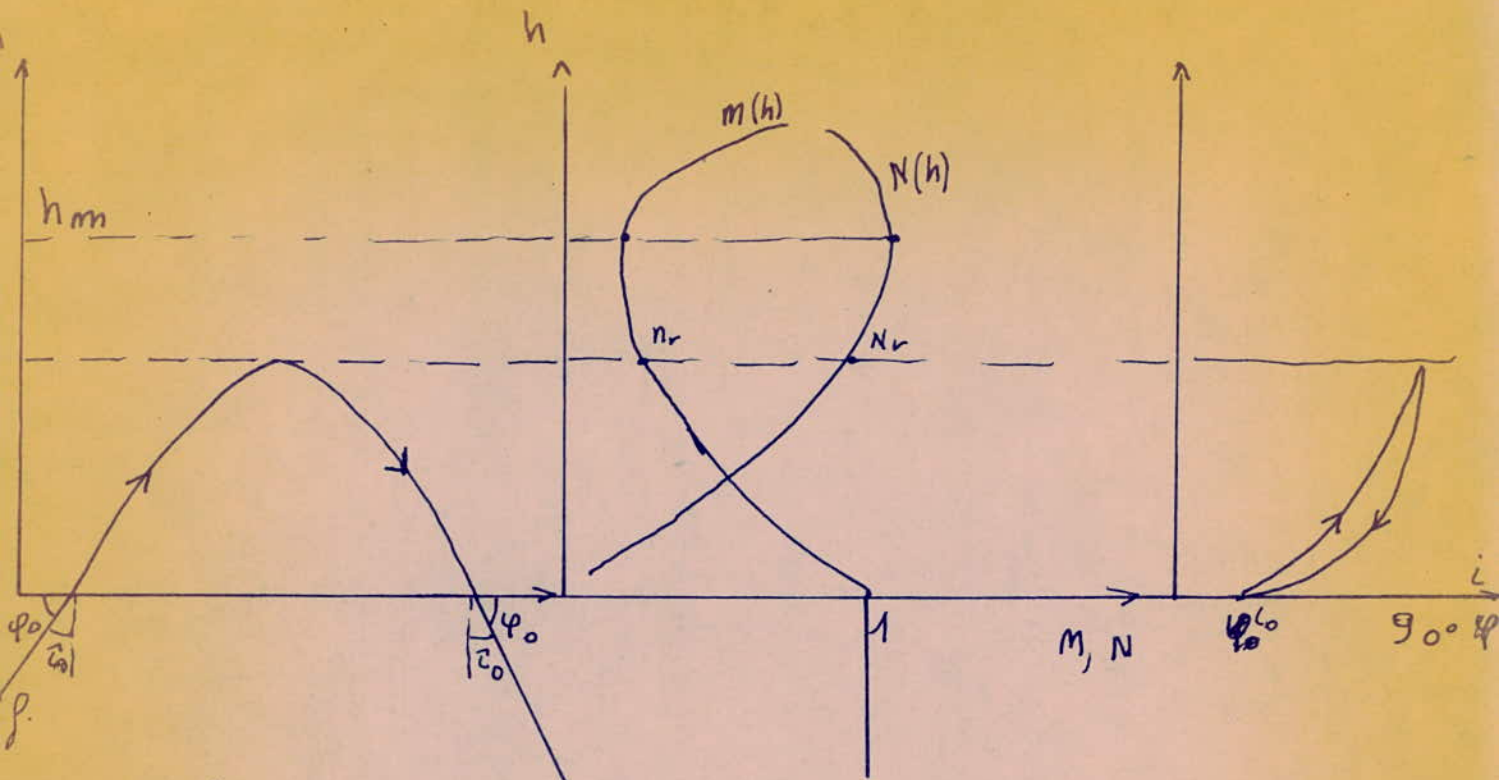
R: caractéristique principale de l'activité solaire.

Altitude et notation des Couche	Composants	Potentiel d'ionisation (V)	λ_c ionisantes (Angstrom Å) du Ray. solaire	Rayonnement correspondant aux liaisons.	Processus d'ionisation
D 60-90	N ₂	15,58	≤ 795	Lyman	NO principale source des électrons de D $h\nu + NO \rightarrow NO^+ + e^-$
	O ₂	12,8	≤ 1025	et	
	NO	9,25	≤ 1340	Rayons X	
E 90-120	N ₂	15,58	≤ 795	Rayons X mous $h\nu \approx 300\text{eV}$	$h\nu + N_2 \rightarrow N_2^+ + e^-$
	O ₂	12,8	≤ 1025		$h\nu + O_2 \rightarrow O_2^+ + e^-$
	O	13,61	≤ 910		$h\nu + O \rightarrow O^+ + e^-$
F (F ₁ , F ₂) 175-400	N ₂	15,58	≤ 795	Rayons X durs $h\nu > 300\text{eV}$	
	O	13,61	≤ 910		

Tableau 1. / "Caractéristiques Relatives A L'ionisation de L'ionosphère"

Milieu	couche Ionos. equivalente du milieu	courant existant dans le milieu: pas d'un passage d'une onde de fréquence $f = \frac{\omega}{2\pi}$	Propriétés: Absorption et refraction	$E = E_0 e^{-\alpha x}$ Affaiblissement d'une onde traversant le milieu
Ionise tres rarefié $v \approx 0$ densité gazeuse faible	E et F1	- électronique: i_e - déplacement: i_d $i_e = -j \frac{Ne^2}{m\omega^2} E$ $i_d = j\omega \epsilon E$ $i_T = j\omega \left(\epsilon - \frac{Ne^2}{m\omega^2} \right) E$ $i_T = j\omega \eta E$	conductivité faible: $\sigma \approx 0$ donc Absorption faible ----- $n = \sqrt{1 - \frac{81N}{f^2}}$ $n < 1$ pour $f \approx HF$.	faible
Ionise peu rarefié (velere, delere)	D	- Conduction: i_c $i_c = -j \frac{Ne^2 \omega}{m(\omega^2 + \nu^2)}$	- conductivité élevée $\sigma = \sigma(\nu, f)$ $n \approx 1$ ($f \approx HF$) $\sigma = \frac{Ne^2}{m} \frac{\nu}{\omega^2 + \nu^2}$ Absorption notable.	d: facteur d'atténuation élevée $L = \frac{1}{2} \sigma \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$

m, e : masse et charge d'un électron
 $\omega = 2\pi f$: pulsation (rad/s) ~~de~~ d'une onde dans le milieu
 η : constante diélectrique du milieu
 σ et ν : conductivité m/c de choc d'un électron
 Tableau 2 / "caractéristiques et propriétés d'un milieu ionisé"



"Principe de Reflexion Ionospherique"

$$n(h) = \sqrt{1 - \frac{81N^2}{f^2}}$$

$$n \sin \zeta(h) = \sin \zeta_0$$

A la reflexion

$$\begin{cases} n = 1 \\ \zeta(h_r) = 90^\circ \end{cases} \Rightarrow f = \frac{9\sqrt{N_r}}{c_0} = \frac{9\sqrt{N(h_r)}}{c_0}$$

h_0 : base de l'ionosphere

f : frequence de l'onde incidente

on suppose que $n(h) = 1$ pour $h \leq h_0 \approx 90 \text{ km}$.

Figure 2.

	(km) Altitude	Existence	densité électronique (electron/cm ³): N _M	V ₃ absorption	Variation dans le temps de N:
D	60-90	Jour	$10 < N_M < 10^4$	relativement élevée / E, F	- en relation étroite avec R - variation: diurne, saisonnière
E	90-120	Jour Nuit	1 à $2 \cdot 10^5$: Jour Nuit: $10^3, 10^4$	faible	"
F ₁	175-250	Jour et pendant l'été (X max.)	$N_j = 4 \text{ à } 15 \cdot 10^5$	faible	"
F ₂	250-400	Jour Nuit	$4 \text{ à } 15 \cdot 10^5$ Jour	très faible	- variation diurne, saisonnière maximale sa hiver - - variation undecennales (11 ans)

Tableau 3.

V: mode de choc/p d'un électron avec les autres particules du milieu; il caractérise l'absorption

« Caractéristiques propres des couches ionisées de l'ionosphère. »

***CHAPITRE II : IONOSPHERE PERTURBEE , ET LES CONSEQUENCES SUR LA PROPAGATION.

INTRODUCTION

L'ionosphère, est souvent perturbée par des éruptions du soleil, qu'on appelle "Eruption chromosphérique". La manifestation des éruptions solaire, sur l'ionosphère, est une augmentation brusque de l'ionisation, qui est dans certain cas localisé dans certaines régions. Ce comportement anormal du soleil, est le plus important, en ce qui concerne la propagation des ondes ionosphériques.

1. / Description des éruptions

Ces éruptions, se présentent comme une brusque augmentation de la brillance, d'une petite région située généralement, près d'une tache solaire.

L'augmentation, de la brillance lors d'une éruption est extrêmement rapide: un maximum est atteint en quelques minutes au plus, il est suivi d'une décroissance beaucoup plus lente qui peut durer, selon les éruptions, d'une dizaine de minutes à plusieurs heures.

Mais en pratique, ce n'est pas par sa durée, que l'on caractérise une éruption, mais par sa surface totale qu'elle couvre quand elle atteint sa brillance maximum, car cette quantité est plus facile à mesurer. Les astronomes ont adopté une classification, allant des éruptions d'une importance 1^- , les plus faibles, jusqu'aux très grandes éruptions 3^+ , suivant leur surface mesurée en $3 \cdot 10^6 \text{ m}^2$.

***Lors des éruptions, le soleil émet :

- des particules de très hautes énergies (rayons cosmiques)
- un nuage de gaz très chaud
- rayonnement invisibles, situés dans la région des ultra-violet et des rayons X.

***Exemple , des différents degrés d'éruption

- Sursaut de type II, il se manifeste sur l'atmosphère, par l'émission d'un nuage ionisé qui provoque, un ou deux jours plus tard après l'éruption, une perturbation dans le magnétisme terrestre.
- Sursaut de type IV : il se manifeste, par une émission d'électrons très énergiques, se déplaçant à une vitesse très voisine de la lumière (électrons relativistes) et des protons

très énergiques. Ces électrons relativistes, émettent des ondes radio qui perturbent les radars. Les protons, bombardent l'atmosphère terrestre, ce qui provoque dans les liaisons radio des perturbations.

**2./Eruption chromosphérique de classe 3 et 3⁺ et ses conséquences.

Ce type d'éruption, provoque les plus importantes perturbations de l'ionosphère.

***Caractéristiques.

L'éruption chromosphérique est caractérisée par l'émission:

- de rayonnement invisibles, d'une très grande intensité situés dans la région des ultra-violet et des rayons X.
- de corpuscules électrisés:

..des électrons de très haute énergie; électrons relativistes.

..ions positifs (H^+ , CA^+) possédant des énergies comprises entre 5 et 300 Mev

-et de nuages ionisés.

***Conséquences sur la haute atmosphère

L'émission du rayonnement électromagnétique provoque:

--une Perturbation Ionosphérique à Début Brusque : P.I.D.B

L'émission des protons et des électrons relativistes provoquent

-- Ionisation Intense de la Couche D

L'arrivée du nuage ionisé, au voisinage de l'atmosphère terrestre provoque:

— Orage ionosphérique

— Orage magnétique

***Conséquences sur la propagation des ondes décamétriques.

-Extinction brusque des communications (P.I.D.B.)

-Absorption de la calotte polaire (P.C.A)

-Absorption aurorale.

3./Etudes des phénomènes géomagnétiques provoqués par une éruption solaire.

3.1/ Orage ionosphérique.

Les particules éjectées, lorsque la tache solaire où s'est produite l'éruption est voisine du plan méridien central du soleil, pour un observateur terrestre, viennent après un temps de parcours de l'ordre de 24 heures à 48 heures, bombarder la magnétosphère terrestre.

Elles subissent, de la part du champ magnétique terrestre, un effet de guidage qui les amènent en majorité, dans les régions aurorales, aux latitudes élevées de l'ordre de 65° N et Sud. Les conséquences, d'un tel orage sont: un orage magnétique et une émission de bruit en ondes très longues.

Les orages ionosphériques présentent, souvent une récurrence de 27 jours, récurrence plus marquée en période du minimum de l'activité solaire.

L'intensité d'un tel phénomène, est maximal dans les régions aurorales, elle diminue généralement vite, lorsqu'on descend en latitude vers les régions tempérées.

3.2/ Orage magnétique

Le début brusque, de l'orage magnétique est observé un ou deux jours après l'éruption.

Lorsque le nuage ionisé, émit par l'éruption arrive dans les régions extérieures de l'atmosphère:

-Une partie sera réfléchi

-L'autre partie, des particules contournera la terre

Cette partie, qui contourne la terre avec des trajets différents, suivant qu'il s'agit d'électrons (qui sont négatifs) ou de protons (positifs), forme donc, une nappe de courant électrique qui provoque le début de l'orage.

L'effet de ce courant, qui provoque la perturbation du champ magnétique, est de diminuer la composante horizontale du champ 10 à 20 heures, après le début brusque.

Le retour à la normale, se fera ensuite en quelques jours;

Dans la haute atmosphère, la perturbation du champ modifiera le mouvement des particules ionisées qui s'y trouvent.

3.3/Perturbation Ionosphérique à Début Brusque :P.I.D.B

Ce phénomène se produit juste

après les éruptions solaires intenses.

Les P.I.D.B sont caractérisées, par une augmentation très importante, aux basses altitudes (couche D) de l'ionisation, c'est dû

à un renforcement important du rayonnement ultra-violet.

Les P.I.D.B sont surtout important en période d'activité solaire maximale.

3.4/Ionisation intense de la couche D

Ce phénomène, n'est observé

que lors des éruptions solaires très intenses, et il se manifeste dans les régions polaire (ie dans la calotte polaire) par une augmentation très importante de l'ionisation de la couche D une à six heures après l'éruption;

Cette importante élévation de l'ionisation de la couche D, est dû à une éjection des particules de très grandes énergies (3 à 300 mev), ce sont les protons relativistes.

La localisation dans les régions polaires, est dû à l'influence du champ magnétique terrestre, qui, croissant avec l'énergie et la vitesse des particules, ne laisse pénétrer ces particules que dans les régions polaires.

Ce phénomène est appelé "événement à protons", il est généralement suivi 18 heures au moins par un orage ionosphérique.

4./Absorption anormale de l'ionosphère, conséquence des éruptions solaire.

L'absorption des ondes décimétriques par l'ionosphère, est un des problèmes très important dont il faut tenir compte, lors d'une transmission.

L'absorption ionosphérique, des ondes décimétriques:

-limite le niveau du champ à la réception,

-limite inférieurement, la bande de fréquence d'utilisation.

L'absorption ionosphérique est caractérisée par la conductivité qui est fonction du nombre de chocs, de f , et de la densité.

4.1/ Absorption Normale de l'ionosphère.

On entend par absorption normale, l'absorption qui est due à une ionosphère en période calme (ie qu'elle n'est pas perturbée par une éruption solaire)

L'absorption normale varie en fonction:

**de la position du soleil (caractérisé par la distance zenithale X)

**de la saison

cycle de l'activité

4.2/ ABSORPTION ANORMALE

On dit qu'on a une absorption anormale, lorsque par exemple, à un certain moment de la journée on observe une brusque diminution du niveau du champ électrique de l'onde, à la réception;

Le degré d'absorption, est différent suivant le type de phénomène géomagnétique qui provoque cette absorption (qui est lui-même une conséquence d'une éruption solaire).

L'absorption anormale :

**A pour cause généralement; une augmentation de l'ionisation dans les couches inférieure de l'ionosphère qui entraîne une augmentation des chocs des électrons,

**est généralement observée de jour (ie dans les régions éclairées du globe)

**peut-être localisée, dans certaines régions seulement.

**peut se manifester, juste après l'éruption ou un ou deux jours après (ie suivant le phénomène géomagnétique qui donne naissance)

4.2.1/ Absorption de type I : P.I.D.B

-ne s'observe que dans les régions éclairées du globe

-Elle est provoquée par les P.I.D.B., elle a lieu juste après l'éruption (ie quelques minutes)

-Elle se manifeste au niveau de la couche D, laquelle voit son ionisation augmenter considérablement (5 à 10 fois l'ionisation normale)

-Elle est maximale, lorsque pendant l'éruption, le soleil est le plus haut à l'horizon.

-Elle varie dans le même sens que l'activité, et au cours de l'année, elle est maximale en été.

----* Conséquences sur la propagation des ondes déca- métriques.

Les liaisons en ondes décamétriques, ie les liaisons utilisant la réflexion sur E et F, après avoir traversé D, peuvent se trouver alors brutalement interrompues, par l'absorption de type I, qui se manifeste au niveau de D.

4.2.2/ Absorption de type II : absorption aurorale.

Elle se manifeste un ou deux jours, après l'éruption (ou après l'absorption de type I)

elle s'observe généralement, en même temps que les orages magnétiques

Elle est limitée aux zones aurorales et ne couvrent pas toute la calotte polaire.

Elle est due à une augmentation importante de l'ionisation de la couche D et à un degré moindre la couche E.

On pense, que cette ionisation intense est provoquée par l'arrivée d'électrons relativistes piégés dans le nuage ionisé émit par lors de l'éruption, et qui se déplace à une vitesse de 1000 à 2000 km/S.

La localisation dans la zone aurorale, a pour cause le trajet qu'on suppose se déplacer le long des lignes de forces du champ magnétique terrestre.

La durée peut aller de quelques minutes à quelques jours.

L'intensité de cette absorption diminue, lorsqu'on descend en latitude vers les régions tempérées.

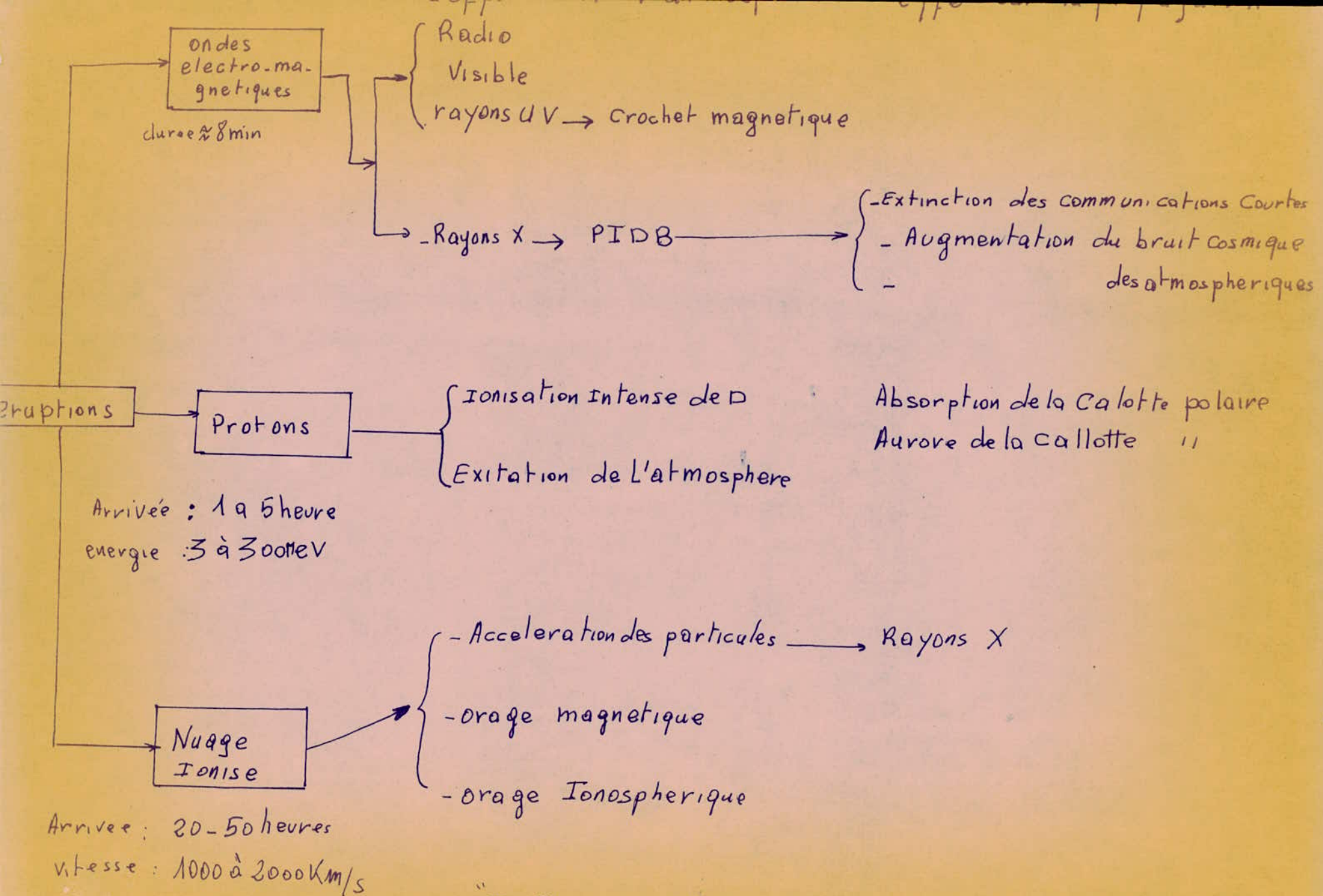
***Conséquence sur la propagation, est que, l'absorption de type II affecte durement les liaisons par réflexion ionosphérique, ces liaisons sont sinon interrompues ou du moins très perturbées.

4.2.3/ Absorption de type III : P.C.A (absorption de la calotte polaire)

Elle se manifeste dans les six heures qui suivent l'éruption.

Elle se manifeste, par une augmentation considérable de l'ionisation de la couche D, qui a pour cause l'arrivée de protons relativistes, de très grandes énergies.

La localisation dans la calotte polaire est due au champ magnétique, qui croissant avec la vitesse des particules, qui les dévient dans les régions polaire magnétique Nord et Sud.



"Influence d'une Eruption solaire" : figure 3

CHAPITRE III

CONCLUSIONS SUR EXPERIMENTALES SUR LE COMPORTEMENT DES CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES COUCHES, EN FONCTION DE LA POSITION ET DE L'ACTIVITE DU SOLEIL

- 1./ Introduction
- 2./ Methode d'investigation de l'ionosphère
 - 2.1. Principe de la méthode
 - 2.2. Ionogramme
- 3./ Variation des paramètres R et X en fonction du temps
- 4./ Comportement des caractéristiques en fonction du temps
- 5./ Conclusion générales.

--**

-*-*-**

-*-*-**

-*-*-**

1./ Introduction

Les caractéristiques les plus importantes, qui intéressent la propagation des ondes radioélectriques, par réflexion sur la région ionosphérique sont :

- la densité maximale des différentes couches : Nm
- et la hauteur (ou l'altitude) de ces maxima : hm

Ces caractéristiques varient dans le temps, car elles dépendent des paramètres suivants :

- l'activité solaire R (nombre de taches solaires)
- et de la position du soleil, qui est caractérisée par l'angle zénithal X, et qui peut être déterminé avec précision.

qui varient dans le temps.

***Définition de la fréquence critique f_c :

A une hauteur h où, la densité est N(h), la fréquence réfléchit sous incidence normale (voir principe de réflexion) à la valeur suivante :

$$f = 9/\sqrt{N(h)}$$

Donc si N_m est la densité maximale de la couche, la fréquence maximale réfléchit sous incidence normale est:

$$(f)_{MAX} = 9\sqrt{N(hm)} = 9\sqrt{Nm}$$

$(f)_{MAX}$, est appelée la fréquence critique de la couche

$$(f)_{max} = f_c$$

§§§§§§§§§§§§§§§§§§§§

2./Méthode d'investigation de l'ionosphère: "Sondage vertical"

La méthode expérimentale d'investigation de l'ionosphère, la plus utilisée, est la méthode classique c'est à dire "le sondage vertical".

C'est, Breit et Tuve qui l'ont mise au point et elle reste la source fondamentale de nos connaissances.

Cette investigation est réalisée au moyen d'un sondeur, qui est composé, d'un émetteur d'impulsions de fréquence f variable et d'un récepteur qui reçoit dans certains cas l'écho ionosphérique (ie, l'onde de fréquence f réfléchit par l'ionosphère, sous incidence normale)

2.1. Principe de la méthode (voir fig 2)

Le principe de la méthode, consiste à envoyer des impulsions de fréquence f d'un émetteur A avec une incidence normale, et à recueillir l'écho ionosphérique à l'aide d'un récepteur B très proche de l'émetteur A. Le récepteur, qui est accordé sur la fréquence f d'émission reçoit 2 signaux : (voir fig)

- l'un provenant de l'onde directe
- l'autre provenant de l'onde réfléchit

On constate, que le signal provenant de l'ionosphère possède un certain retard t par rapport à l'onde directe, c'est le temps mis par l'onde pour aller se réfléchir et revenir si on néglige le temps mis par l'onde directe (ce qui est admissible puisque on a même réussi à accoler le récepteur et l'émetteur)

Du temps mis par l'onde, pour aller se réfléchir et revenir

on tire la hauteur virtuelle hv:

$hv = ct/2$ (c'est la hauteur de réflexion si on suppose que l'onde se déplace à la vitesse de la lumière) La vitesse réelle de l'onde est inférieure à la vitesse de la lumière, car à l'intérieur de l'ionosphère l'indice de réfraction est inférieur à l'unité donc:

$$h \text{ réelle} < hv_{\text{vir.}}$$

La connaissance de la hauteur virtuelle permet le calcul de la hauteur réelle à l'aide de méthode utilisant des ordinateurs.

--* Résultats obtenus *-*-*

Donc, pour chaque fréquence f d'émission dont l'écho est parvenu au récepteur:

- on connaît la hauteur de réflexion h (à partir du temps qu'elle a mis)

donc la densité électronique N à la hauteur h, qui a permis le retour de l'onde de fréquence f, à la valeur suivante :

$$\underline{N(h) = f^2/81} \quad \begin{array}{l} f \text{ en MHz} \\ N \text{ en } 10^6 \text{ électron/cm}^3 \end{array}$$

2.2/ IONOGRAMME. (voir fig 2)

L'ionogramme est la courbe donnant, la fréquence en fonction de sa hauteur de réflexion h, sous incidence normale.

$$\underline{I_o = f(h) = 9/\sqrt{N(h)}}$$

L'ionogramme est obtenu en faisant défiler un film photographique, synchronisé avec les variations de f, qui enregistre le temps mis par l'onde, c'est à dire, la hauteur virtuelle, on passe ensuite aux hauteurs réelles.

--* REMARQUES *-*-*

On remarque sur l'ionogramme (ie, f(h)), une asymptote (h tend vers l'infini) pour une certaine fréquence, cette fréquence correspond à la fréquence maximale réfléchi par une couche ie, la fréquence critique de la couche fc.

La hauteur de réflexion de cette fréquence maximale fc est la hauteur qui correspond au maximum d'ionisation Nm

$$f_c = 9/\sqrt{Nm} = 9/\sqrt{N(h_m)}$$

: 3./ Variation des paramètres R et X

Les paramètres, dont dépend l'ionisation et les autres caractéristiques sont, l'activité solaire qui est caractérisé par l'indice R (nombre de taches solaire), et par la position du soleil qui est caractérisé par l'angle zénithale X .

3.1/l'activité solaire: voir chapitre I

3.2/angle zénithale du soleil: X

Pour une certaine région de l'ionosphère, la position du soleil est donnée par l'angle zénithale X.

... l'angle zénithale, est le même pour tous les points situés sous une même latitude (voir fig1, chap.7)

***Pour un point de latitude l; l'angle zénithale:

- varie au cours de la journée: il est minimal à midi (ie 12h)
- il est constant, pendant un mois de l'année, ie, l'angle est le même par exemple, à 10h pendant les 30 jours du mois.
- varie d'un mois à l'autre.

On dit par exemple, qu'une telle caractéristique est très liée à la position du soleil si elle est proportionnelle à COS(X); elle est donc maximal à midi

--*-*

-*-*-*

-*-*-*

4./ Comportement des caractéristiques en fonction du temps

Le sondage vertical, qui est la méthode la plus utilisée et qui est la méthode classique, qui permet de connaître la valeur de l'ionisation en fonction de son altitude, à permis à des centres spécialisés dans ce domaine, en se basant sur des relevés d'ionogramme effectués: tout au long d'une journée, pendant un mois et cela pour tous les mois de l'année de tirer certaines conclusions sur le comportement des caractéristiques des différentes couches.

4.1. Couche D.

La couche D n'est pas accessible au sondage vertical, car l'ionisation y est tellement faible que les impulsions issues du sondeur vertical, dont la bande de fréquence utilisée est comprise entre 2 et 30 MHz, la traverse.

Pendant le jour, où l'ionisation de D est la plus élevée, la fréquence critique f_{cD} est d'environ 0,5 MHz, c'est la fréquence qui correspond à la densité maximale, ie $9/\sqrt{NmD}$.
 Pendant la nuit, la couche D disparaît (ie que l'ionisation devient presque nulle).

4.2. Couche E.

Le maximum d'ionisation de E, NmE , est étroitement lié à l'activité solaire R.

Pendant la journée, la fréquence critique ($f_c = 9/\sqrt{NmE}$) est maximale à midi (12H), c'est à dire lorsque le soleil est au zénith ou encore lorsque l'angle zénithale X est minimal.
 Pendant la nuit, la couche E risque de disparaître, lorsque l'activité solaire est minimale.

Le fait que l'ionisation de E, soit très liée à l'activité solaire, à permet

Relation théorique

Le fait, que l'ionisation de E soit très liée à la position (ce qui de même pour toutes les couches) et à l'activité du soleil, à permet de mettre au point une relation entre l'ionisation de E et les paramètres R et X.

$$**f_{cE} = 9/\sqrt{NmE} = K(R) \cdot \cos(X) = (3,2 + 0,0062 \cdot R) \cdot \cos(X)$$

R: nombre de taches solaire, qui est en générale une moyenne mensuelle, (la valeur qui est donné par des centres spécialisés peut être utilisée pendant tout un mois)

X: l'angle zénithale, est donné avec précision pour chaque mois de l'année, 3 mois à l'avance.

Cette relation suppose, que les variations d'un jour à l'autre sont nulles (car R est constant, et pour une heure de la journée la l'angle zén. est constant, pendant tout un mois de l'année), ET que l'ionisation est la même pour tous les points situés sous une même latitude (X est le même et R est le même pour tout le globe)

**HARSCHACHER, fait intervenir l'effet de la latitude

$$f_{cE} = K(R) \cdot \cos^n(X), \text{ avec:}$$

$$\frac{K(R)}{n} = 2,25 + 1,5 \cdot \cos(1) + (0,01 - 0,007 \cdot \cos(1)) \cdot R$$

$$n = 0,21 + 0,12 \cdot \cos(1) + 0,0002 \cdot R$$

4.3. Couche F₁

La couche F₁ n'existe que pendant le jour et l'été.

L'ionisation de F₁, est très voisine de celle de E mais légèrement supérieur.

Le C.R.P.L (USA) admet la relation suivante :

$$f_oF_1 = (4,36 + 0,015.R) \cdot \cos^{0,2}(X)$$

4.4. Couche F₂ : (voir tableau 1)

Le comportement de la couche F₂, est le plus important avec celui de E, car c'est la couche la plus ionisée et la plus élevée.

Les variations dans le temps des caractéristiques de la couche F₂, ne sont pas aussi logique, comme par exemple pour la couche E où il existe une relation liant l'ionisation et les paramètres R et X, .

Voici, quelques variations non-logique de la couche F₂

*-*pendant l'hiver, on constate une variation diurne et le maximum est de l'ordre de 6MHZ et une valeur nocturne d'environ 3 MHZ.

*-*pendant l'été, les valeurs nocturnes sont légèrement plus fortes et durant la journée on a pas un maximum mais un sorte de palier d'environ 5 MHZ, persistant de 10 à 20 heure de la journée, et le véritable maximum se situe en fin du jour.

--*-*-*

-*-*-*-*-*

-*-* -*-*-*

5./ Conclusion générales

La valeur de la densité maximale Nm diminue, lorsque l'angle zénithale augmente (ie lorsque le soleil s'abaisse), ainsi que son altitude hm.

161 *-*Pendant un mois de l'année*-*

-les variations d'un jour à l'autre sont faibles.

Pendant une année, les variations d'un mois à l'autre sont notable

Pendant le cycle de 11 ans, les variations d'une année à l'autre sont aussi notable.

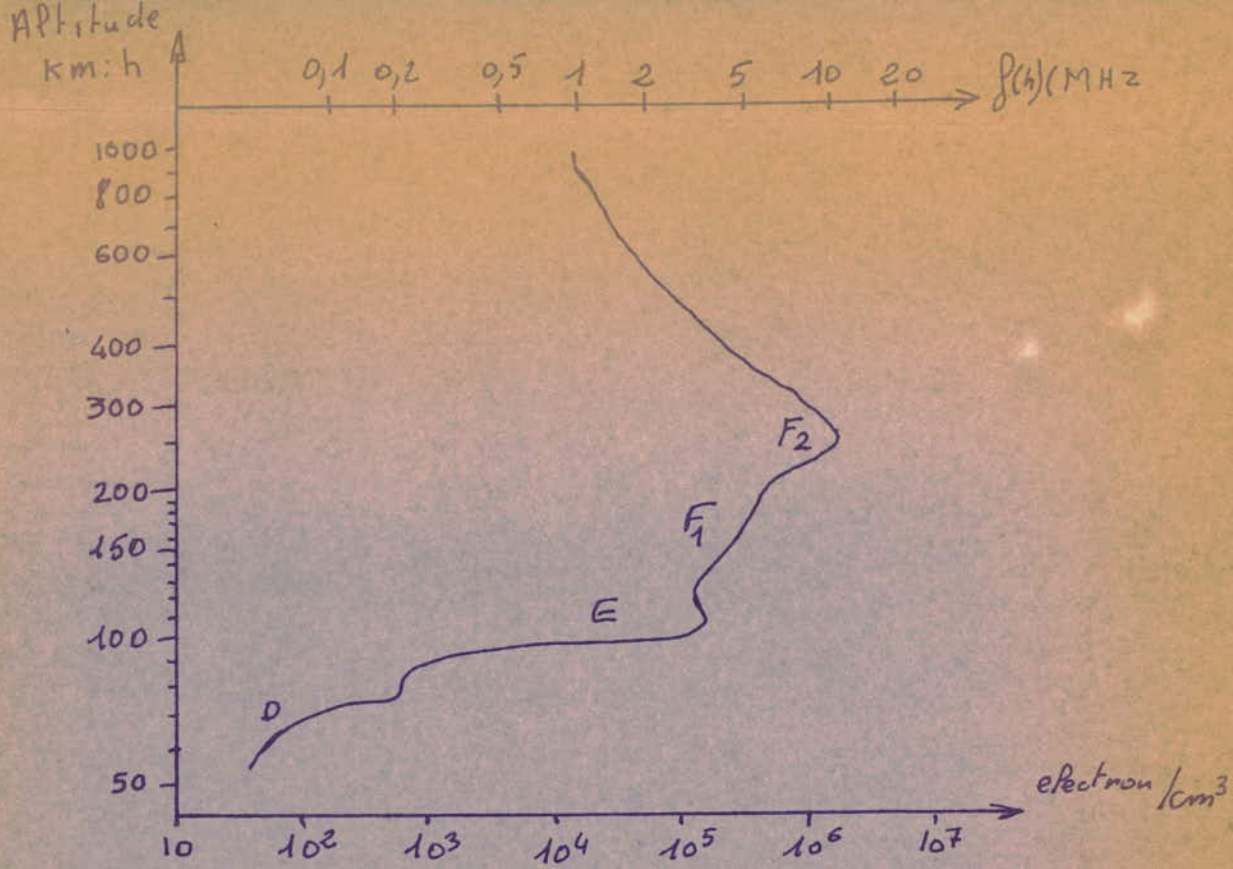
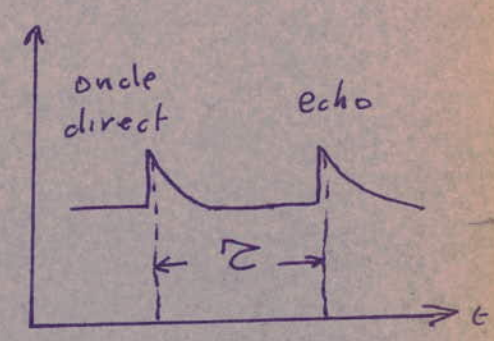
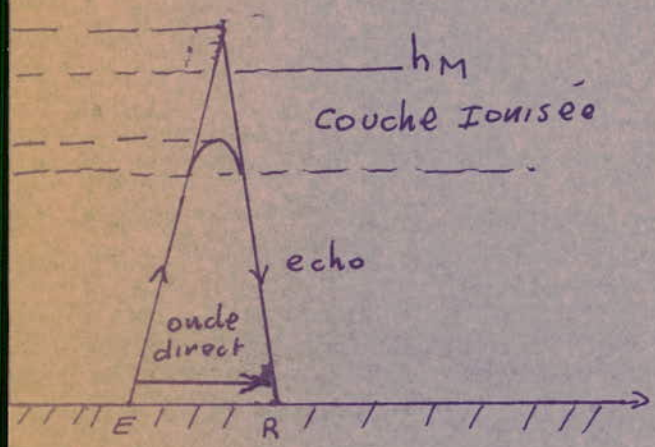


Fig 3. Profil d'ionisation de jour (densité électronique.)
 $f(h)$: fréquence qui sera réfléchi, à la hauteur h sous incidence normale.



"Sondage Vertical."
 h_0 : base de la couche
 h_r : hauteur de réflexion réelle.

Fig 1

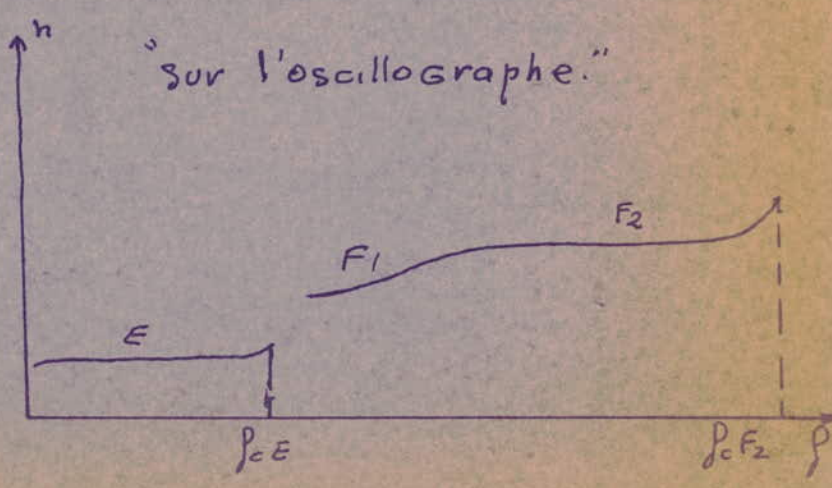


Fig 2 "Ionogramme expérimentale"
 f_c : fréquence maximale réfléchi par une couche sous incidence normale.

- 1./ Introduction
- 2./ Rappel des résultats expérimentaux, par sondage de l'ionosphère
- 3./ Description d'une liaison, et, différentes conditions limites
- 4./ Condition de réflexion par une couche ionosphérique
- 5./ Détermination de la MUF pour une distance d : M.U.F. d
 - M.U.F. $d.E$
 - M.U.F. $d.F_2$
- 5./ Angle de site maximale θ_M - portée maximale d_M
 - d_{ME} et d_{MF_2} , portée maximale de la ~~liaison~~ liaison utilisant, soit la couche E ou F_2 .
- 6./ portée minimale d_o - définition de la zone de silence
- 7./ L.U.F
- 8./ résumé

1./ Introduction

La propagation ionosphérique, utilise l'onde d'espace, qui si les conditions sont respectées, sera réfléchi par l'ionosphère.

La propagation ionosphérique, utilise la couche F_2 qui est permanente et la plus ionisée, et la couche E, qui peut aussi être permanente sauf dans des périodes où l'activité solaire est faible. Le calcul, ne porte plus sur la puissance, comme pour les liaisons à visibilité direct, mais sur celui des fréquences limites supérieur et inférieur, la M.U.F et la L.U.F.

La M.U.F, ie la fréquence maximale utilisable, comme on le verra, dépend de la distance et de la densité maximale de la couche considérée, donc la M.U.F dépendra de l'état de l'ionosphère, donc du temps.

La L.U.F, fréquence minimale utilisable, dépend de plusieurs paramètres, dont un est l'absorption ionosphérique.

2./ Rappel des résultats expérimentaux

L'étude de l'ionosphère, par la méthode du sondage verticale de l'ionosphère, a permis de tirer quelques conclusions sur les caractéristiques de l'ionosphère:

--la densité électronique N est croissante avec l'altitude

--pour chaque couche de l'ionosphère.

---On distingue presque en permanence, 2 maxima d'ionisations $N_m E$ et $N_m F_2$, correspondant respectivement à la couche E et la couche F_2 . La valeur de ces densités et leurs altitudes varient dans le temps.

--L'altitude et la valeur de la densité maximale de F_2 , sont les plus élevés.

--La couche D, n'intervient dans la propagation ionosphérique que par l'absorption, qu'elle produit sur l'énergie de l'onde.

3./ Description d'une liaison, et ,différentes conditions limites.

Soit A et B, les extrémités d'une liaison, A et B sont connus par leur longitude et par leur latitude, (l_1, L_1) et (l_2, L_2)

Soit, I, le point de réflexion, qui est toujours pris comme point milieu du trajet.

Soit l'émetteur A, émettant avec un angle θ , un rayon radioélectrique de fréquence f .

Soit B, le récepteur recevant, ce rayon réfléchi par l'ionosphère
Soit d , la distance entre A et B;

--Si A et B sont connus

°° Q'elle est la fréquence maximale utilisable et q'elle est la fréquence minimale utilisable.

°° quelle est l'angle de site maximale θ_m .

--Si on veut connaître les possibilités d'un émetteur A:

°° quelle est la portée maximale, suivant qu'on utilise le mode de propagation par E ou par F_2 ;

°° quelle est la portée minimale, au dessous de laquelle, l'écho ionosphérique de l'émission de A, ne parvient pas.

4./ Condition de réflexion, par une couche ionosphérique.

Dans une liaison, par réflexion ionosphérique, on suppose que la réflexion se fait au milieu du trajet, soit I;

-Si on se déplace, sur la verticale passant par I, la densité électronique est croissante avec l'altitude h .

4.1./ sous incidence normale:

C'est à dire, avec un émetteur A situé juste en dessous de I, on émet des ondes de fréquences f variables.

On s'aperçoit, qu'il y a en permanence, 2 fréquences maximales f_{cE} et f_{cF_2} , correspondant respectivement à la couche E et à la couche F_2 ;

- la fréquence maximale maximum, réfléchi par l'ionosphère, sous incidence normale, est la fréquence critique de la région F_2 , f_{cF_2} .

- c'est à dire que $f_{cF_2} > f_{cE}$

Ces fréquences critiques correspondent, aux fréquences maximales du plasma E et du plasma F_2 , elles sont données par la formule suivante :

$$\begin{aligned} - f_{cE} &= 9\sqrt{N_m^E} \\ - f_{cF_2} &= 9\sqrt{N_m^{F_2}} \end{aligned}$$

N_m , densité maximale exprimé en 10^6 électron/cm³

L'altitude, de la densité maximale de F_2 , est supérieur à celle de la couche E, $-h_m^{F_2} > h_m^E$

Conclusion: pour qu'une onde de fréquence f , soit réfléchi par :

- la couche E, il faut que $f \ll f_{cE}$, sinon elle est transmise;
- la couche F_2 , il faut que f , soit supérieur à la fréquence f_{cE} , de sorte que la couche transmette cette onde, et qu'elle soit inférieur à la fréquence f_{cF_2} , de manière à ce qu'elle soit réfléchi par la couche F_2 .

ie, $f_{cE} < f \ll f_{cF_2}$,

4.2./ Condition de réflexion, sous incidence oblique, par une couche ionosphérique.

On suppose, que la réflexion se fait, au milieu du trajet, soit I. On suppose aussi, qu'on connaît la repartition de la densité en fonction de l'altitude, ie $N(h)$, et soit N_m la valeur de la densité maximale de la couche.

La densité d'une couche ionosphérique est croissante avec h . Soit, h_0 et h_m , les altitudes de la base de la couche et de la limite supérieur de la couche.

- SOIENT, θ et i , les angles de départ ou de site d'incidence.

- soit, une onde radioélectrique de fréquence f , sous un angle θ_1 ;

la condition de réflexion, à la hauteur h_1 où la densité est $N(h_1)$ est :

-que $f_1 = \frac{9\sqrt{N(h_1)}}{\cos(i_1)}$

Si, on suppose connus, $N(h_1)$ et h_1 qui dépende de l'état de l'ionosphère, et comme on connaît la distance d , on peut:

-déterminer $\theta_1 = \theta(h_1, d)$ voir figure 2.

-et $i_1 = i(\theta_1, h_1)$, voir paragraphe suivant.

On peut donc, déterminer la fréquence f_1 , qui sera réfléchi au milieu du trajet, sous un angle θ_1 et à la hauteur h_1 .

De même, pour l'onde de fréquence f émit sous un angle θ_0 ;

la condition de réflexion :

est que $f = \frac{9\sqrt{Nn}}{\cos i_0}$

$i_0 = i(\theta_0, h_n)$

$\theta_0 = \theta(d, h_n)$

Connaissant, h_n et d , on peut déterminé l'angle θ_0 , a partir de la figure 2 et i_0 a partir de la relation .

Définition de la M.U.F :

La M.U.F, est la fréquence maximale utilisable, c'est la fréquence qui sera réfléchi, par la hauteur maximale h_n de la couche.

--M.U.F $= \frac{9\sqrt{Nn}}{\cos i_0} = \frac{9\sqrt{N(h_n)}}{\cos i_0}$

-- $i_0 = i(\theta_0, h_n)$

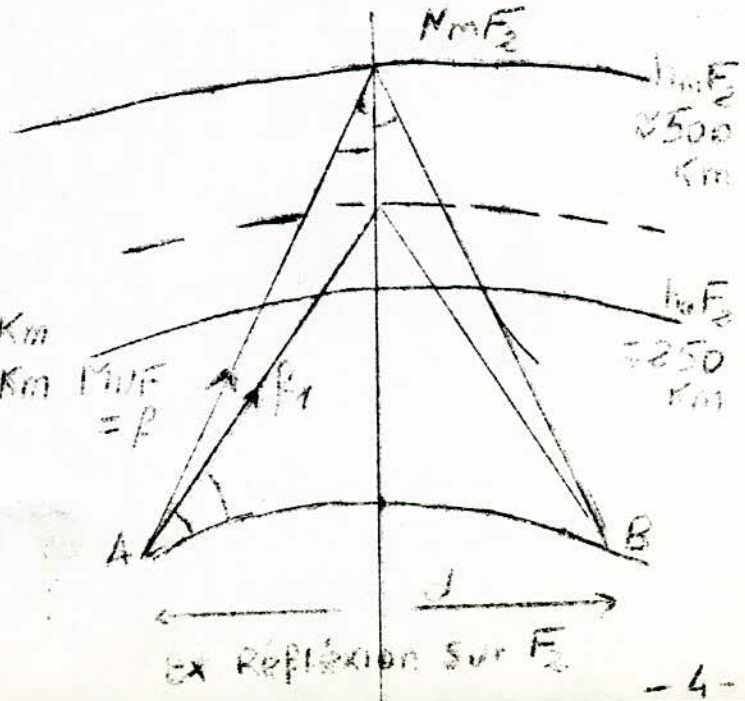
-- $\theta_0 = \theta(h_n, d)$

Donc, la M.U.F = M.U.F (θ, h) = M.U.F (d) est une condition qui dépend de la distance et de la densité maximale de la couche .

M.U.F = M.U.F (d, Nn), $9\sqrt{Nn}$ est appelé fréquence critique de la couche, f_c ;

$h_oF_2 \approx 250 \text{ Km}$
 $h_oE \approx 90 \text{ Km}$

$h'_{m}F_2 \approx 300 - 450 \text{ Km}$
 $h'_mE \approx 100 - 120 \text{ Km}$



5.7 Détermination et calcul de la M.U.F
pour une distance d : M.U.F d

La M.U.F, ie, la fréquence maximale utilisable pour une liaison de distance d dépend, de la valeur de la distance et de la valeur de la densité maximale de la couche considérée.

$$\text{on a : } M.U.F d = f_c / \cos(i_o) = 9\sqrt{Nm} / \cos(i_o)$$

on montre (voir fig.1) que:

$$\cos(i_o) = \frac{\sin^2 \theta_o + 2hm}{2hm + \sqrt{\sin^2 \theta_o + 2hm}}$$

$$\theta_o = \theta(d, hm), \text{ voir fig 2.}$$

$$\text{Donc } M.U.F d = 9\sqrt{Nm} \cdot \frac{\sqrt{2hm + \dots}}{\sin^2 \theta_o + 2hm}, f_c = 9\sqrt{Nm}$$

Pour une liaison de distance d on a les données suivantes:

- Nm et hm, ou directement $f_c = 9\sqrt{Nm}$, de la couche considérée, au point milieu du trajet.
- la distance d peut-être déterminé, en mesurant sur une carte mondiale la distance séparant A et B.
- c'est le rayon apparent de la terre = $4R/3 = 8533 \text{ KM}$

A partir de ces données on peut déterminé l'angle θ_o .

à partir du réseau de courbe (figure 2):

$$\theta_o = \theta(hm, d)$$

--* Notation:

Si on utilise la couche E par exemple (ie, sa fréquence f_c et sa hauteur pour la réflexion), la notation est la suivante:

$$M.U.F d = M.U.F d E = f_{cE} \cdot \frac{\sqrt{2hmE + \dots}}{\sin^2 \theta_o + 2hmE}, f_{cE} = 9\sqrt{NmE}$$

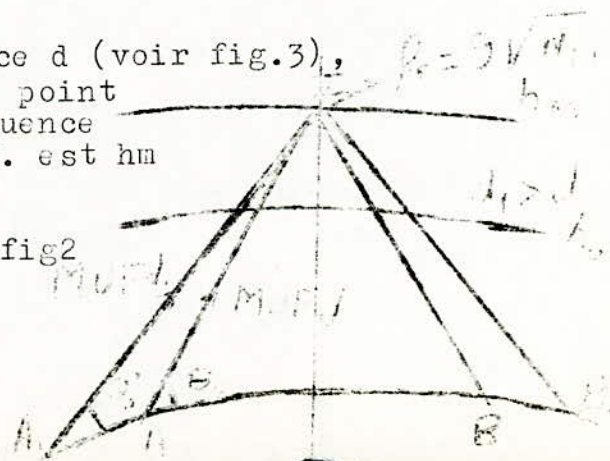
$$\theta_o = \theta(hmE, d)$$

Conclusion

La M.U.F augmente avec la distance d (voir fig.3), car un émetteur A₁ utilise le même point de réflexion que A, ie I ou la fréquence critique est f_c est la hauteur max. est hm on a:

donc $\theta_o = \theta(hm, d) < \theta_o' = \theta(hm, d_1)$, voir fig2 et $\sin \theta_o > \sin \theta_o'$

$$M.U.F d < M.U.F d_1$$



6./-Angle de site (ou de départ) maximale : θ_M

Portée maximale d'un émetteur A : d_M

6.1/ Angle de site maximale θ_M

Sous incidence oblique, la condition de réflexion est que :

$f \leq f_c / \cos(i)$, si maintenant on fixe f , la condition devient :

$$\cos(i) \leq \cos(i_c) = f_c / f \quad i \geq i_c$$

i_c , est l'angle d'incidence minimale sous lequel on peut avoir la réflexion.

DONC pour $i = i_c$ $\theta = \theta_M$, on sait que :

$$\theta = \text{Arcsin} \frac{\sqrt{(2h + \rho) \cdot \cos^2(i) - 2h}}{\rho}$$

pour $i = i_c$

$$\theta = \theta_M = \text{Arcsin} \frac{\sqrt{(2h_M + \rho) \cdot (f_c/f)^2 - 2h_M}}{\rho}$$

En résumé, si $\theta \leq \theta_M$, l'onde de fréquence f sera réfléchi
 $i \geq i_c$

6.2/ Portée maximale d'un émetteur : d_M

Soit un émetteur A, utilisant pour la transmission de ses signaux, vers d'autres points du globe, la réflexion sur les couches ionosphériques :

la portée d'un émetteur, émettant sous un angle θ :

voir fig.1

$$d = \rho \left[\pi - 2 \text{Arcos} \sqrt{\frac{\sin^2 \theta + 2h}{2h + \rho}} - 2\theta \right]$$

La portée maximale est donnée pour $\theta = 0$ et $h = h_m$

$$D \quad d_M = \rho \left[\pi - 2 \text{Arcos} \sqrt{\frac{2 \cdot h_m}{\rho + 2h_m}} \right]$$

Pour des hauteurs moyenne des couches E et F₂ on a :

*- $d_{ME} = 2000$ km c'est les portées maximales d'un émetteur
et $d_{MF_2} = 4000$ km suivant qu'il utilise E ou F₂

7./ Portée minimale d'un émetteur : d_0
Définition de la zone desilence

La portée d'un émetteur est minimale pour un angle de site -

maximale θ_M et pour $i = i_c = \arccos(fc/f)$ (on se fixe f)
 avec $-\theta_M = \theta(i_c)$

$$d_{\min} = d_0 = d(\theta_M, hm) = \rho \left[\pi - 2 \arccos \sqrt{\frac{\sin^2 \theta_M + 2hm}{\rho + 2hm}} - 2 \cdot \theta_M \right]$$

** Définition de la zone de silence

Un émetteur utilisant la propagation ionosphérique, possède une distance minimale en dessous de laquelle, le signal réfléchit par l'ionosphère ne parvient pas, cette distance est d_0 .

La zone de silence, est dans une première approximation, un cercle de centre l'émetteur et de rayon d_0 .

--*-*-*

8./ L.U.F : fréquence minimale utilisable

La L.U.F dépend de plusieurs paramètres :

- de la puissance de l'émetteur
- du gain de l'aérien d'émission
- de la distance d
- de l'absorption en $\exp(-Ax)$ dans la traversée des couches inférieurs.
- des bruits parasites à la réception.

--*-*-*

9./ RESUME

Soit A et B, les points d'émission et de réception.

Soit I, le point milieu du trajet

on suppose connu en I:

$$f_{cE} = 9/\sqrt{NmE} = 9/\sqrt{N(hmE)}$$

$$f_{cF_2} = 9/\sqrt{NmF_2}$$

et hmE, hmF_2

Connaissant la distance d , on peut déterminer à partir de la figure 2: $\theta_0 = \theta(hm, d)$, suivant qu'on utilise E ou F2

La distance maximale que peut couvrir une réflexion:

- sur E est 2000km
- sur F2 est 4000km

Donc si $d \leq 2000 \text{ km}$

On utilise la couche E, ie, qu'on utilise pour déterminer, la M.U.F : $h_m E$ et $f_c E$

Si $2000 \text{ km} < d < 4000 \text{ km}$

on utilise la couche F_2 , ie les différentes caractéristiques de la couche F.

$90 \text{ km} \leq h_m E \leq 120 \text{ km}$

$250 \text{ km} \leq h_m F_2 \leq 450 \text{ km}$

On peut évidemment, utilisé la couche F pour des distances $d < 2000 \text{ km}$ lorsque l'ionisation de couche E, est très faible (ce qui arrive pendant la nuit, et lorsque le niveau de l'activité solaire est faible.), l'inconvénient est que l'angle de départ devient très élevé.

Connaissant, $h_m E, h_m F, f_c E, f_c F, d$. On détermine $\theta_0(E) = \theta(h_m E, d)$ et $\theta_0(F) = \theta(h_m F, d)$, d'où la détermination de :

M.U.F d E et M.U.F d F

Il ne faut pas, perdre de vue que, $M.U.F d E < M.U.F d F_2$.
Donc, si on utilise la couche E ($d \leq 2000 \text{ km}$), la condition de réflexion est que $f \leq M.U.F d E$

si on utilise la couche F_2 , la condition est que :

$M.U.F d E < f \leq M.U.F d F$

Lorsque on prend une fréquence f M.U.F, (QUI est généralement prise au voisinage de la M.U.F), revient à dire, que lorsque on veut calculer la puissance de l'émetteur W_1 , qui dépend du gain g de l'antenne ou de l'aérien utilisé, donc de l'angle du rayon radioélectrique considéré (car l'antenne ou l'aérien émet des rayons radioélectriques sous différent angle θ), on doit prendre $g(\theta)$ avec $\theta < \theta_0 = \theta(h_m, d)$

Exemple: 1./ $d = 1500 \text{ km}$, on utilise donc de préférence E
 $h_m E = 110 \text{ km}$ au milieu du trajet

A partir de la figure 2 on tire $\theta_0(E) = 5^\circ$

la connaissance de $f_c E$, permettra de calculer la M.U.F 1500 E

IL faut donc prendre pour la liaison $f \leq M.U.F d = 1500 \text{ E}$

et pour le calcul de $W_1 = W_1(\theta)$, on prendra pour le calcul du gain g un angle $\theta < \theta_0(E)$

Il faut donc, θ_{max} de l'antenne soit inférieur à $\theta_0(E)$

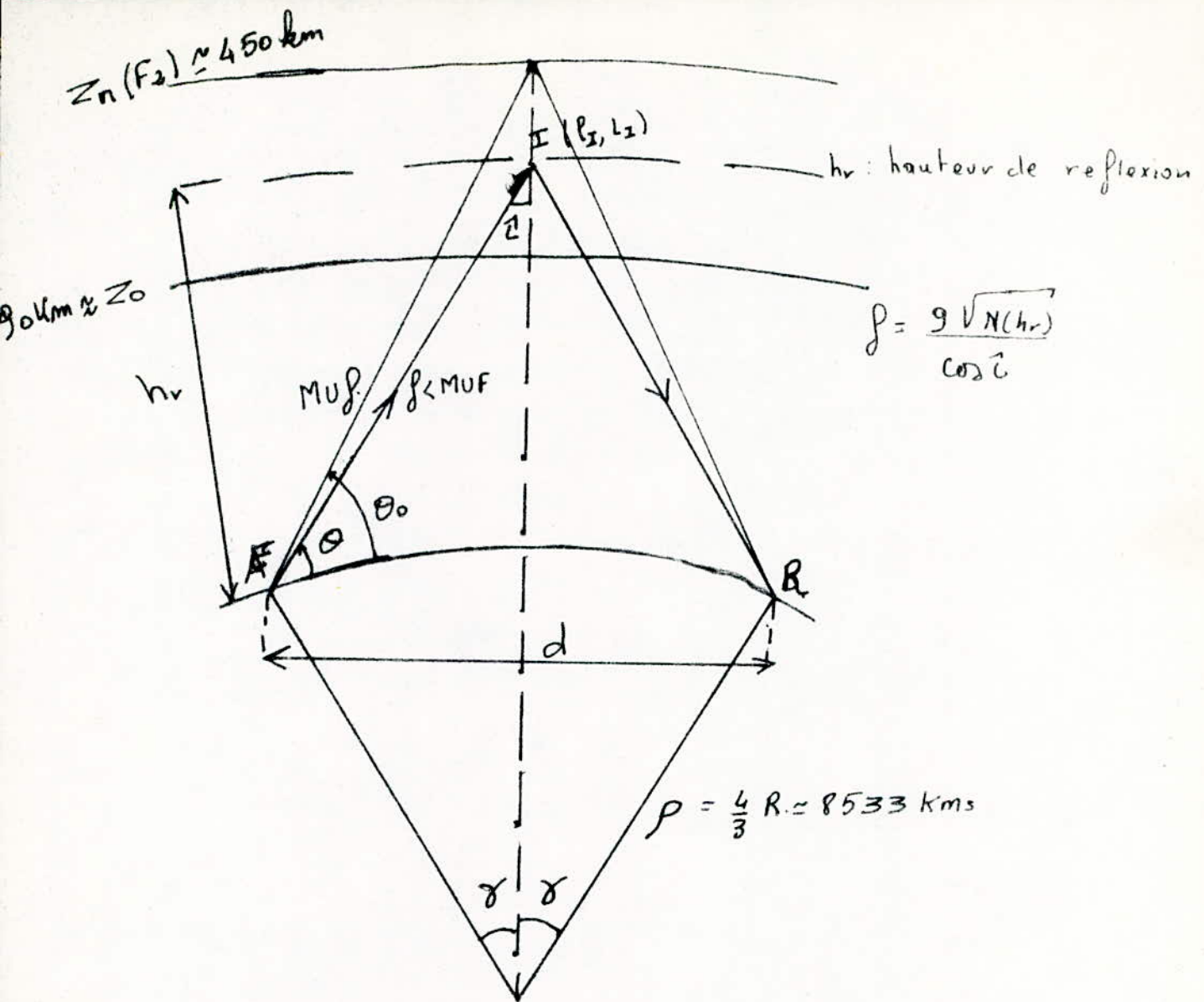
2./ 2000km \leq d \leq 4000km , on doit utilisé la couche F_2

Ex. d = 3000km, et, $h_{mF_2} = 320$ km au milieu du trajet

A partir de la figure 2, on tire $\theta_f(F) = 5^\circ$

Connaissant $f_c F$, au milieu du trajet, on ~~tire~~ détermine:

M.U.F d F (voir formule)



$$\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) + \tilde{c} + \gamma = \pi \quad \gamma = \frac{\pi}{2} - \theta - \tilde{c}$$

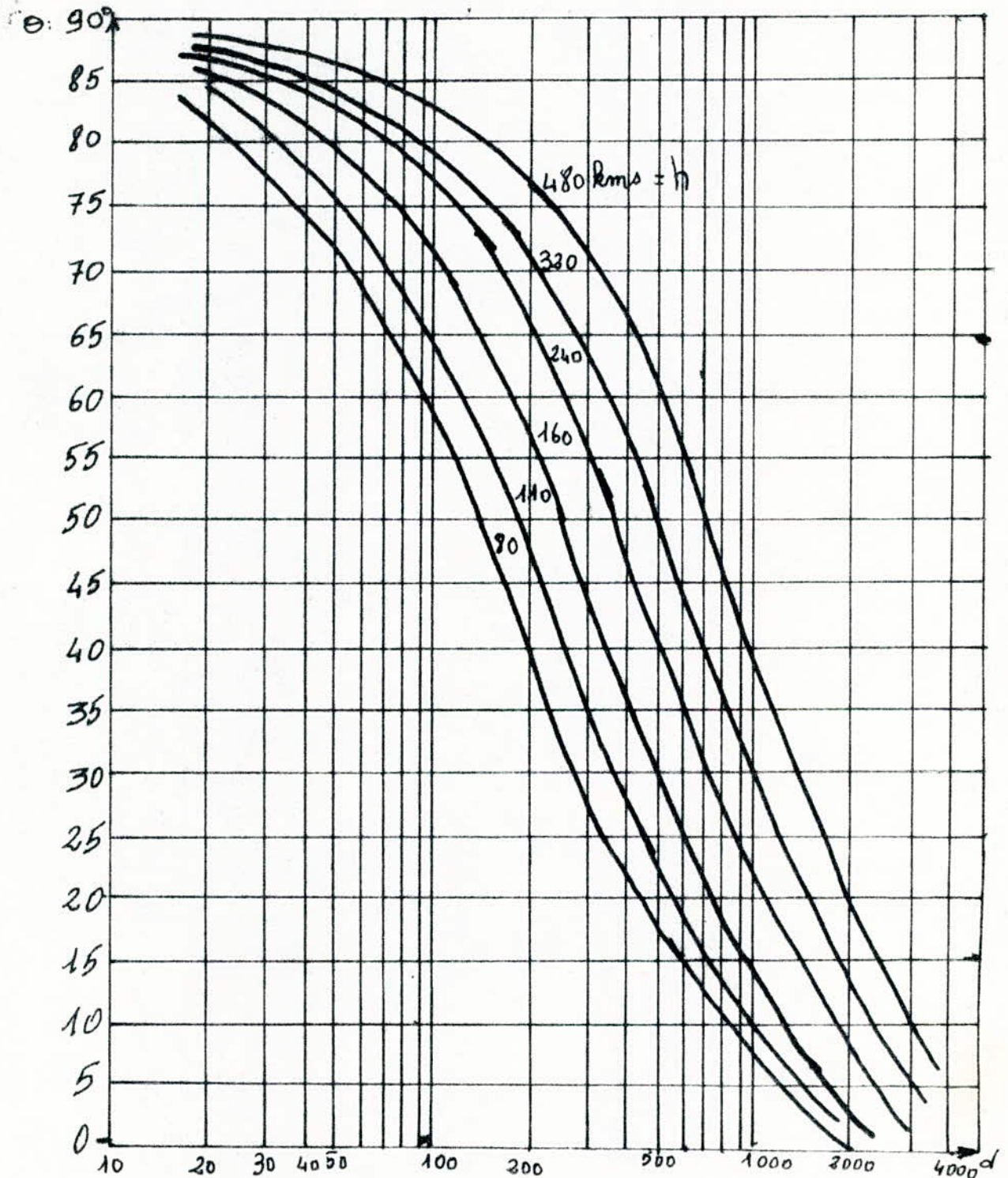
$$d = \rho \times 2\gamma \quad d = \rho (\pi - 2\tilde{c} - 2\theta)$$

$$\frac{\Delta \sin \tilde{c}}{\rho} = \frac{\cos \theta}{\rho + h} \Rightarrow \cos \tilde{c} = \sqrt{\frac{\rho \Delta \sin^2 \theta + 2h}{\rho + 2h}}$$

$$d = \rho (\pi - 2 \arccos \sqrt{\frac{\rho \Delta \sin^2 \theta + 2h}{\rho + 2h}} - 2\theta)$$

Figure 1 : "Schéma d'une liaison par réflexion ionosphérique"

Figure 2 : Angle de site θ : en fonction de la distance et de la hauteur de la Couche



(voir conclusion de propagation, conclusion).

courbes qui montrent que la MUF, augmente avec distance

$$R(d) = \frac{MUF d}{f_c}$$

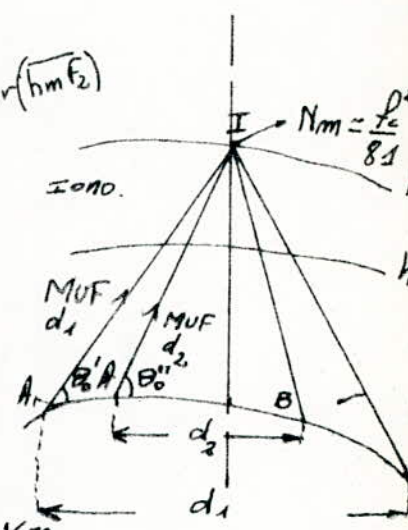
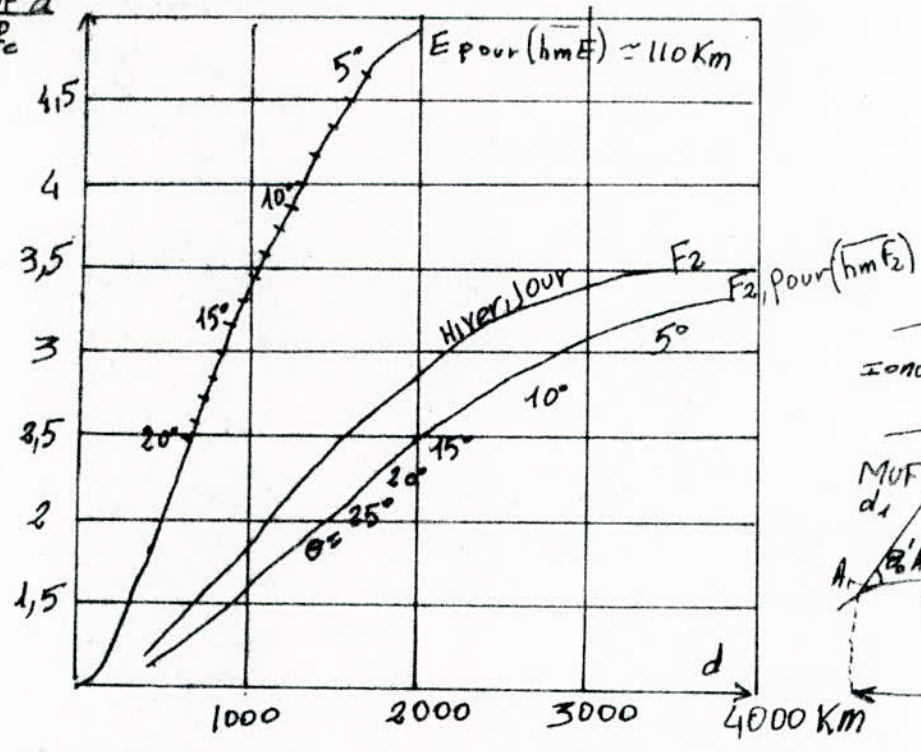


Fig3: "facteur par lequel, il faut multiplier f_c , pour avoir la MUF pour une distance d

soit, I milieu des liaisons $A_1 B_1$ et AB (utilisé comme pt de réflexion, où la densité est croissante de h_0 à h_m (où la densité est maximale))

$$MUF d_1 > MUF d_2, \text{ car } d_1 > d_2$$

$$MUF d / f_c = \left(\frac{P + 3hm}{P \sin^2 \theta + 3hm} \right)^{1/2}, f_c = 9 \sqrt{Nm}$$

Ces courbes, ont été tracés, pour E ($h_m \approx 110 \text{ km}$) et pour F_2 ($h_m \approx 350 \text{ km}$), ces courbes sont donc tracées en fixant le paramètre h_m qui varie dans le temps. Pour ce qui est de E , il n'y a pas d'écart en prenant $h_m = 110 \text{ km}$ (car $110 \leq h_m(E) \leq 120 \text{ km}$), ce qui n'est pas le cas pour F_2 ($300 \text{ km} \leq h_m(F_2) \leq 450 \text{ km}$)

CHAPITRE IV :DIFFERENTS PROBLEMES RENCONTRES

1./ BRUIT PARASITE A LA RECEPTION

2./ DIFFERENTS AFFAIBLISSEMENTS

3./CONSEQUENCES DU BRUIT ET DE L'AFFAIBLISSEMENT SUR LA
PROPAGATION.

- E_{2min} :champ minimal imposé à la réception

- P_T :pouvoir transmissif d'une liaison.

-

INTRODUCTION

En plus, des conditions de réflexion, on rencontre d'autres conditions qui sont imposées par:

- le bruit
- et l'affaiblissement

Le bruit, se manifeste à la réception par un signal, qui est capté par le récepteur en même temps que le signal utile. Le bruit devient perturbant, lorsque le signal qu'il induit dans l'antenne, est du même ordre que le signal utile ou plus élevé.

La raison pour laquelle, on ne peut empêcher un bruit d'être capté par l'antenne, est que le bruit possède une bande de fréquence très large.

L'affaiblissement, est la cause directe de l'absorption de l'ionosphère (surtout de la couche D). Cette absorption, est proportionnelle au nombre de chocs des électrons, qui sont élevés lorsque une couche possède une densité gazeuse élevée (cas de la couche D); et elle est inversement proportionnelle ($1/f^2$) au carré de la fréquence.

Donc après avoir fixé la fréquence, qui est toujours prise au voisinage de la M.U.F., on doit fixer la puissance à la émission, pour avoir un champ acceptable à la réception (ie supérieur à une certaine limite)

--*-*

--*-*

1. Bruits . . Parasites à la Réception

Les bruits parasites, sont des signaux perturbateurs, qui affectent la propagation des ondes radioélectriques, à la réception.

Le bruit, se manifeste en se superposant, à la réception au signal utile; Les bruits parasites, se manifestent par des signaux aperiodiques et dont la durée est très variable. On distingue, plusieurs sortes de bruits, et, ces différents types de bruits, possèdent des effets qui s'ajoutent dans le récepteur.

1.1/DIFFERENTS TYPES DE BRUITS

- bruit interne d'un récepteur

Ce bruit est inévitable, il a pour cause, l'agitation thermique des électrons dans les circuits et premiers étages amplificateurs. Un bruit analogue, prend naissance dans l'antenne, même si elle est enfermée dans une cage de Faraday.

- BRUITS extérieurs

Ces bruits sont captés en même temps que le signal utile.

a./ Bruits atmosphériques ou naturels

Les bruits atmosphériques proviennent, des orages ou de décharges électriques entre nuage plus ou moins éloignés

Le niveau des bruits atmosphériques dépend:

- lieu
- saison, heure
- fréquence

b./ Bruits artificiels ou industriels

Ils sont produits, par tous les appareils électriques, comportants des régimes transitoires:

- contacteurs, moteurs à collecteurs, tubes à décharges, lumineuses, allumages des moteurs à explosion .

On les trouve dans toute la gamme des fréquences utilisées

c./ Bruits extra-terrestres

on distingue 2 types:

- certains dits solaires, provenant du soleil
- d'autres dits cosmiques ou galactiques

provenants d'autres étoiles ou galaxies visibles ou non. Ce type de bruit, n'est perceptible que pour des récepteurs très sensibles.

1.2/Puissance de bruit d'un circuit et

assimilation de cette puissance à la température

Les bruits parasites, sont des phénomènes aléatoires assimilables dans une première approximation au bruit thermique.

Dans tous circuits passif:

- à la température T
- et de largeur de bande acoustique B

il y a création d'un bruit, qui a pour cause l'agitation thermique des électrons et dont la puissance est

$$W = 4.k.T.B \text{ , } k: \text{constante de Boltzman}$$

$$W = 4.1,38.10^{-23}.T(^{\circ}K).B(KH)$$

"c'est la puissance propre au circuit"

En général, la bande de fréquence B est imposée, par la nature et la vitesse de trafic, W devient donc proportionnel à la température T: -donc si B = Cte alors W = K.T avec K = k.B

Comparer la puissance de bruit, revient donc à comparer, la température de bruit.

--* Effet de plusieurs bruits.

Lorsque, un circuit est soumis à plusieurs bruits, la théorie des fonctions de variables aléatoires, montre que les puissances de bruits provenant de diverses sources, s'ajoutent purement et simplement.

Soit, plusieurs types de bruits se manifestants par leurs puissances; W_1, W_2, \dots, W_n .

Le résultat, serait le même si on avait, une seule source de puissance W_t donnée par:

$$W_t = W_1 + W_2 \dots + W_n$$

--* Définition de la température équivalente ou apparente

Soient, W_{ex} puissance de bruit des parasites extérieurs et W_p , puissance de bruit propre au circuit (bruit dut à l'agitation thermique des électrons)

Dans le circuit on aura:

$$W_t = W_{ex} + W_p = 4kBT_{ap}$$

$$T_{eq} = T_{ap} = \frac{W_{ex} + W_p}{4kB} ; p \text{ Température équivalente dans le circuit en présence de bruits exter.}$$

--* Bruits propre, de l'antenne et du récepteur

-Bruit propre d'un récepteur, W_p , provient des circuits de tête et des étages amplificateurs.

-Bruit propre d'une antenne (T_A, W_A), est celui correspondant à sa température T_A d'équilibre avec le milieu extérieur;

*Si, l'antenne est peu directive, et, placée au voisinage du sol, on pourra admettre que ce sol, joue le rôle d'enceinte, a sa température qui sera donc, celle du bruit propre de l'antenne.

*Si l'antenne est très directive, et, pointée vers une région à température T_1 , on pourra admettre que son bruit propre est celui correspondant à la température T_1 , si on néglige l'échappage avec les autres directions.

$$\text{ie, } W_A = kBT_A = kBT_1 \text{ (pour une antenne adaptée)}$$

--* Température équivalente d'une antenne : T_a
L'influence des parasites extérieurs à l'antenne, les plus prédominants sont :

- BRUITS ATMOSPHERIQUES
- BRUITS INDUSTRIELS

DANS LA gamme H.F, ie 2 à 30 MHz.

Soit w_{ex} , la puissance dans l'antenne, dut au bruit extérieur
Soit W_A , la puissance de bruit propre de l'antenne (ie, puissance qui correspond à la température d'équilibre avec le milieu où, se trouve ou vers lequel est dirigée, l'antenne.)

Dans l'antenne, la puissance de bruit est donnée par :

$$W_t = W_{ex} + W_A = kBT_a \quad W_t = W_{ex} + W_A = kBT_a \text{ pour une antenne adaptée.}$$

La température équivalente de l'antenne, T_a , est donnée par :

$$T_a = \frac{W_{ex} + W_A}{kB}$$

--*-*

--*-*

1.3/ FACTEUR DE BRUIT / f

Au lieu de donner, la température de bruit d'un récepteur ou d'une antenne, on donne un facteur de bruit qui est en relation simple avec elle.

--* puissance de référence : W_0

C'est la puissance qui correspond à la température de référence $T_0 = 288$ °K

$$W_0 = kBT_0$$

Soient, w_p , w_a , puissances, propre du récepteur et équivalente de l'antenne (bruit propre plus le bruit extérieur)

soit, w_{a0} , puissance de référence de l'antenne = kBT_0

ON DEFINIT, LE FACTEUR DE BRUIT COMME ETANT :

pour le récepteur : $f_r = (W_{ao} + W_r/W_{ao}) = (1 + W_r/W_{ao})$

pour l'antenne : $f_a = (W_{ao} + W_a)/W_{ao} = (1 + W_a/W_{ao})$

Si par exemple, on connaît les facteurs de bruits de l'antenne et du récepteur:

$$W_r = (f_r - 1)kBT_o$$

$$W_a = (f_a - 1)kBT_o$$

d'où la température équivalente de l'antenne: T_a

$$W_a/kB = T_a = (f_a - 1) \cdot T_o, T_o = 288 \text{ °K}$$

$$**k = 1,38 \cdot 10^{-23}, W_a(\text{watt}), B(\text{hertz})$$

------* **---*---* **---*---*

1.4/CHAMP DE BRUIT PARASITE Ep DES BRUITS ATMOSPHERIQUES

Les bruits atmosphériques, sont les perturbations les plus prédominantes, à la réception.

Les bruits atmosphériques, sont connus non pas, par la température, mais par le champ E_p qu'ils induisent dans l'antenne.

Pour cette raison, le calcul de la puissance captée et de la puissance disponible, se fera comme s'il s'agissait d'un signal

- Antennes utilisées pour le calcul de E_p :

On utilise des antennes courtes et vertical, placées juste au dessus du sol, voici les différentes antennes utilisées :

- petit doublet
- dipole demi-onde
- aérien directif de gain connu, g_i

ON suppose que $W_A = 0$, ie que le bruit propre de l'antenne est nulle ou encore que l'antenne est sans perte.

donc, $W_a = W_{ex} + W_A = W_{ex}$ (on suposera qu'elle est seulement due aux bruits atmosphériques)

Si E_p , est le champ induit dans l'antenne sans perte alors :

$$W_{ex} = W_a = \left(\frac{300}{f} \right)^2 \times \frac{E_p^2 (v/m/khz) \cdot B(khz)}{6720}, f \text{ en MHZ}$$

... DONC la puissance de bruit (bruit dû seulement aux parasites extérieurs à l'antenne), fournit au récepteur par l'antenne supposée sans pertes est :

$$W_a = 14,25 \cdot \frac{E_p^2 \cdot B}{f^2} = k \cdot f_a \cdot T_o \cdot B$$

on peut, tirer le facteur de bruit équivalent de l'antenne :

$$f_a = 3,5 \cdot 10^{18} \times \frac{E_p^2 (\text{V/m/kHz})}{f^2 (\text{MHz}^2)}$$

ON EXPRIME PRESQUE TOUJOURS LE FACTEUR DE BRUIT f_a en (dB)

$$\underline{F_a = 10 \log(f)}$$

EN dB, on a : $F_a = E_p \text{ (dB)} - 20 \log(f) + 65,5 - 10 \log(B)$

$$E_p = 20 \log \frac{E_p}{1 \mu\text{V/m}}, f \text{ en MHz, } B \text{ en KHZ}$$

pour E_p en DB au dessus de $1 \mu\text{V/m}$

$$F_a = E_p - 20 \log(f) + 5,5 - 10 \log(B)$$

-

--*-*-*

-*-*-*-*

2./DIFFERENTS TYPES D'AFFAIBLISSEMENTS

L'affaiblissement, d'une onde au cours de sa propagation, dans l'ionosphère ne dépend pas de l'énergie qu'elle transporte, mais du parcours et du milieu qu'elle traverse. Dans le cas, de la propagation ionosphérique, l'affaiblissement dépend pour la plus grande part de la couche D.

2.1 Affaiblissement de transmission fondamentale : d_o .

L'affaiblissement de transmission fondamentale, est le rapport :

-de la puissance rayonnée par une source isotrope, au lieu d'émission, W_{10}

-et de la puissance recueillie, par un collecteur isotrope placé au lieu de réception, W_{20}

$$*-* \underline{d_o = W_{10} / W_{20}}$$

Pour que, le signal à recevoir soit convenablement perceptible, dans des conditions naturelles et industrielles, il est nécessaire que la puissance théorique W_{20} soit

supérieur à une certaine limite.

Donc, si les conditions à l'émission sont fixées, et, comme :

l'absorption ionosphérique est indépendante des moyens opérationnels, il existe donc une valeur maximale de do admissible.

--*-*

2.2./ Affaiblissement de propagation pratique : dp

C'est le rapport :

- de E_1 , amplitude du champ rayonné dans la direction \bar{u} du chemin radioélectrique, par convention à 1 KM du point de d'émission.

- de E_2 , amplitude du champ à la réception, provenant du chemin radioélectrique considéré.

$$dp = E_1(\text{à } 1 \text{ KM})/E_2$$

La puissance d'alimentation d'une source isotrope, qui rayonnerait à la distance r , le champ E_1 est/:

$$W_{10} = k \cdot 4 \cdot r^2 \cdot E_1^2$$

La puissance captée par une source isotrope, en présence du champ E_2 est :

$$W_{20} = k \cdot S_0 \cdot E_2^2, S_0: \text{surface de captation} =$$

Relation entre do et dp :

$$\text{pour } r = 1 \text{ KM} \quad do =$$

--*-*-*- * *-*-*-*- * *-*-*-*-*-

3./ Conséquences du bruit et de l'affaiblissement sur la propagation.

Les bruits parasites extérieurs (surtout atmosphérique, dans la bande H.F) fixent, une limite inférieure du champ à la réception (E_{2min}), sous risque d'une réception brouillée.

Les bruits parasites, se manifestent par un champ E_p , et par un facteur de bruit fa .

3.1/ Puissance minimale à la réception : W_{2min}

Soit fa , le facteur de bruit globale (parasites internes et externes)

$Fa = 10 \log(fa)$ (dB), W_{2min} en dB est donné par

$$: \sqrt{W_{2min}} = \sqrt{F_a + R + 10 \log(B) - 104}$$

W_{2min} , en Db, au dessus de 1 watt

R: rapport signal/bruit nécessaire

B : largeur de bande en HZ.

3.2./ Champ minimal à la réception : E_{2min}

Soit E_p (voir 1.4)

le champ dut aux bruits extérieurs (surtout atmosphériques)

$$** E_{2min} = E_p + R - 60$$

* E_{2min} : en DB au dessus de 1mv/m

* E_p : en DB au dessus de 1uv/m (uv = 10^{-6} v)

$$** E_{2min} (dB/1uv/m) = E_p (dB/1uv/m) + R$$

Si, on ne tient compte que du bruit atmosphérique, qui est le plus prépondérant, alors le champ E_p est donné (1.4) par

$$** E_p (dB/1uv/m) = F_a + 20 \log(f, MHz) - 65,5 + 10 \log(B)$$

f: fréquence du signal radioélectrique

B: bande acoustique en KHZ

3.3/ Pouvoir transmissif d'une liaison : P_T

Les bruits naturels et industriels, imposent une limite inférieure, à la puissance et au champ à la réception:

ie, que $E_2 \geq E_{2min}$ et $W_2 \geq W_{2min}$

Par définition, le pouvoir transmissif est le rapport suivant

$$P_T = E^* \quad P_T = E_1^2 / E_{2min}^2$$

$$P_T (dB) = 20 \log E_1 - 20 \log E_{2min}$$

$$P_T (dB) = E_1 - E_{2min}$$

C'est en quelque sorte, l'affaiblissement de propagation pratique dp maximal.

Pour que, la liaison considérée fonctionne convenablement, il faut que P_T , soit supérieur à l'affaiblissement de propagation pratique dp:

ie, si E_1 est fixé il faut que $P_T \geq dp$, ce qui revient à dire qu'il faut que $E_2 \geq E_{2min}$

CALCUL DU POUVOIR TRANSMISSIF PT

E_1 , est donné à 1km du point d'émission par

** $E_1 = 222 W_1 \cdot g_1$, E_1 : en mv/m

* g_1 : gain de l'antenne ou de l'aérien d'émission

* W_1 : puissance en KW, à l'émission

** $E_{2min} = E_p + R - 60$,

* E_{2min} , dB au dessus de 1mv/m

* E_p , dB au dessus de 1uv/m, R : rapport signal/bruit

$P_T = E_1 = E_{2min} = 47 + W_1 + g_1 - E_{2min}$

* W_1 en KW

* E_{2min} en mv/m

--*-*-*-*-*-*-*-*

-*-*-*-*-*-*-*-*-*

CONCLUSION (VOIR TABLEAU 4)

A partir des différentes études correspondants aux différents chapitres (ionisation; M.U.F), on peut voir pourquoi c'est la bande décamétrique (2 à 30 MHz) qui est utilisée pour des liaisons allant jusqu'à 4000 KM, et par réflexion sur l'ionosphère:

Et cela à partir, de l'intervalle de variation de l'ionisation maximale des différentes couches, et de l'intervalle de variation des altitudes de ces maxima d'ionisations (voir tableau 3, chapitre I); ; ; et à partir de la relation qui lie la M.U.F et l'ionisation maximale.

Et à partir du fait que, la M.U.F augmente avec la distance d et qu'elle maximale pour:

-E, pour la distance 2000 KM (qui est la distance maximale couverte pour une réflexion sur E)

-F₂, pour une distance 4000 KM.

$$\begin{aligned} \text{Exemple : si } h_m E &= 110 \text{ KM} & h_m F_2 &= 350 \text{ KM} \\ f_c E &= 4 \text{ MHz} & f_c F_2 &= 9 \text{ MHz} \\ & & f_c &= 9/\sqrt{N_m} \end{aligned}$$

$$M.U.F \text{ d } E)_{MAX} = M.U.F \text{ 2000 E} = k(d) \cdot f_c E = 4,8 \cdot 4 = 19,2 \text{ (voir fig 3) chap. IV}$$

$$M.U.F \text{ d } F)_{MAX} = M.U.F \text{ 4000 F} = k(4000) \cdot f_c F = 3,3 \cdot 9 = 29,7 \text{ MHz (fig. 3, chap. IV)}$$

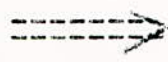

$$\text{Donc, } M.U.F)_{MAX} = M.U.F \text{ 4000 F} = 29,7 \text{ MHz}$$

C'est à partir de ces études théoriques, qu'on plus ou moins délimité la bande de fréquence utilisée pour la propagation ionosphérique.

	Altitude km	Existence	Caractéristique	Portée m. d'une Liaison utilisant l'une des couches	Propriétés
D	60-90	Jour	$f_c \approx 0,5 \text{ MHz}$ - diffuse en altitude - très liée à l'activité du soleil (R.)	ne réfléchit pas les ondes décamétriques.	- Réflexion des ondes km - les ondes hm la traversent avec une forte absorption - les ondes HF la traversent avec une certaine absorption.
E	90-110	Jour et nuit elle peut disparaître la nuit en cas de faible acti- vité solaire	$f_c \text{ jour} = 3 \text{ MHz}$ $f_c \text{ nuit} \approx 1 \text{ MHz}$ - stable en altitude	$d_m \approx 2000 \text{ km}$	- la nuit: Réflexion des ondes km et hm sous des incidences faibles (LF, MF) - phénomènes de fading pour les ondes hm - jour: réflexion ou transmission des ondes HF
F ₂	250-400	Jour et nuit	$f_c \text{ jour: } 10 \text{ à } 12 \text{ MHz}$ $f_c \text{ nuit: } 3 \text{ à } 4 \text{ MHz}$ - bonne stabilité -	$d_m \approx 4000 \text{ km}$	- la nuit: réflexion des fréquences situées au bas de la bande HF. sous des incidences faibles et moyennes. - le jour: c'est la couche la plus utilisée dans les liaisons à grande distance.

Tableau 4/ "Caractéristiques et propriétés des couches D, E, F"

des ondes ionosphériques, se portent sur la polarisation des ondes.

-1- si $E // H_t$  $P // H_t$ 

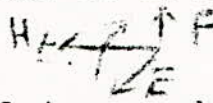
Le H_t ne produit aucun effet sur le mouvement des "électrons dans son sens, ie, comme si H_t n'existait pas.

-2- si $E \perp H_t$ 

Le H_t exerce sur les électrons en mouvement une force proportionnelle et perpendiculaire à leur vitesse, donc "déviatrice".

Les trajectoires deviennent courbes, et elles ont une certaine "fréquence propre" appelée "gyro-fréquence": f_g

$$f_g = \frac{e \cdot H}{2 \pi m c} \quad \begin{array}{l} H: \text{champ terrestre} \\ e, m \text{ masse et charge de l'électron} \\ c, \text{vitesse de la lumière.} \end{array}$$

-2 -2.1- si $P \perp H_t$ 

Pour une "propagation P perpendiculaire au champ H_t ", la déviation est dans le plan de de la propagation; elle ne détruit pas la symétrie de la propagation mais se contente de modifier l'intensité du courant électronique:

la constante diélectrique ϵ (voir chap. I) devient

$$\epsilon = \epsilon_0 - \frac{Nq^2}{4\pi m^2 \omega^2 (f^2 - f_g^2)}, \quad f \text{ fréquence de l'onde radio.}$$

La condition de réflexion de l'onde radioélectrique de fréquence f , sous incidence normale est que : (en négligeant H_t)

$$= 0 \text{ ie pour } f = 9 / N$$

mais dans ce cas, on voit que la réflexion à la hauteur h où la densité est N est donné pour une fréquence f_x tel que:

$$f_x \equiv \sqrt{f(f^2 - f_g^2)} = 9 / N_1, \text{ ie pour une densité } N_1$$

plus faible, donc à une hauteur h_1 plus faible que h (hauteur de réflexion de l'onde de fréquence f si le champ magnétique n'existait pas)

-2.2.- $P // H_t$ 

Pour "une propagation P parallèle à H_t ", la déviation des électrons est hors de leur plan normal de propagation et les trajectoires deviennent "hélicoïdales".

Le champ électrique de l'onde se divise en 2 composantes, polarisées "circulairement", et en sens "inverse":

- E_o : champ de l'onde ordinaire, dont l'affaiblissement est à la conductibilité σ :

$$\sigma = \frac{Nq^2}{m} \cdot (\sqrt{w + wg})$$

- Ex, champ de l'onde extraordinaire, et dont l'affaiblissement est dû à la conductibilité :

$$\sigma' = \frac{Nq^2}{m} \cdot (\sqrt{w - wg})$$

L'affaiblissement du champ est de la forme $\exp(-Ld)$

$$\text{où } L = \frac{1}{2} \sigma \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$$

on remarque donc, que le champ de l'onde extraordinaire est plus affaibli que le champ de l'onde ordinaire.

CONCLUSION

L'influence du champ magnétique terrestre H_t est donc de doubler le rayon radioélectrique, O et X' , on observera donc un mélange de ces divers effets.

Si, à la hauteur de réflexion l'ionisation est élevée:

-les 2 rayons se réfléchiront presque à la même hauteur, et à la réception leur écho arriveront presque en même temps et ne seront pas distingués (ils pourront cependant interférer et faire varier l'amplitude du champ)

Si, à la hauteur de réflexion l'ionisation est faible:

-les deux (2) rayons seront réfléchis avec une différence de parcours appréciable et donneront lieu à deux (2) échos différents.

Influence du champ magn. Terrestre

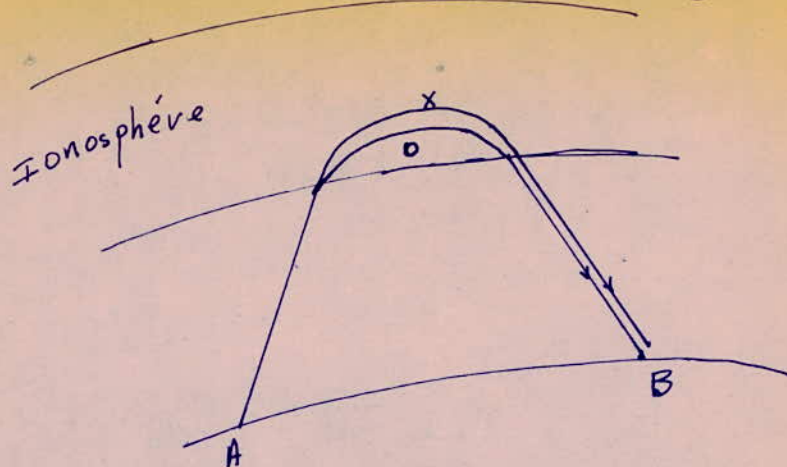
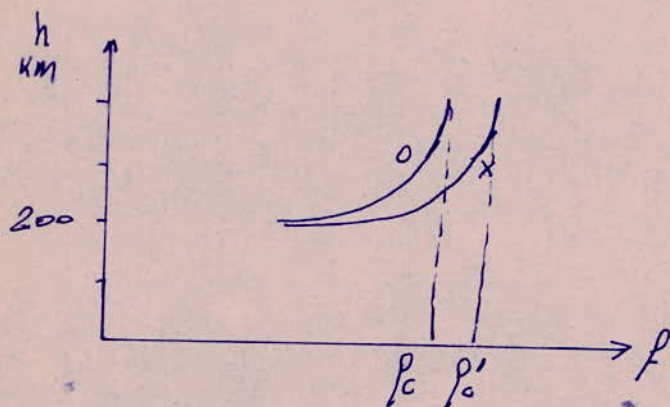


Fig. 1.1/ "dédoubllement du Rayon Radioélectrique"



"Exemple d'ionogramme où on enregistre l'influence du H_E "

(Voir conclusion, c'est le cas où, il y a une différence de marche).

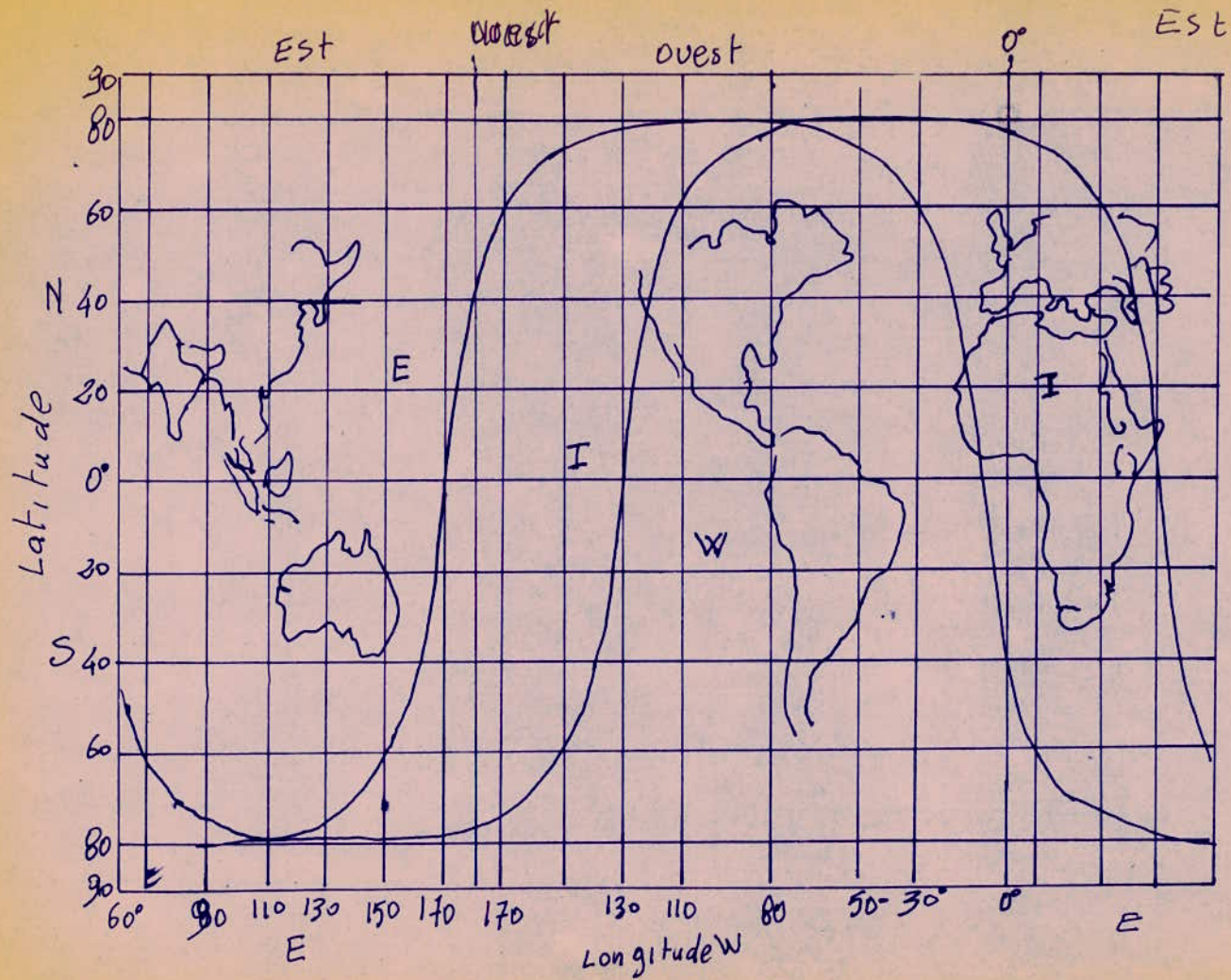


Fig. 2.

-Autre méthode d'investigation de l'ionosphère-

**** LA RETRODIFFUSION ****

En plus de la méthode de sondage classique, sondage vertical, il existe une autre méthode de sondage, sondage par rétrodiffusion.

Le principe de cette méthode est basée, sur le phénomène de diffusion, par les irrégularités du sol ou de la mer, jusqu'à un certain point, par celles de l'ionosphère.

La rétrodiffusion consiste à exploiter :

-la partie d'énergie diffusée et qui est renvoyée vers l'émetteur qui la émise, et suivant le même trajet de propagation.

La méthode de rétrodiffusion consiste à envoyer des impulsions assez larges (1 ms) sous incidence oblique et en mesurant, le temps de propagation de l'onde qui est se réfléchir sur l'ionosphère et revenir, on peut en déduire la distance oblique de la source de diffusion.

Si l'on dispose en outre, des renseignements sur la hauteur des et l'inclinaison des couches ionosphériques, on peut calculer la distance au sol d'après la distance mesurée de l'écho rétrodiffusé.

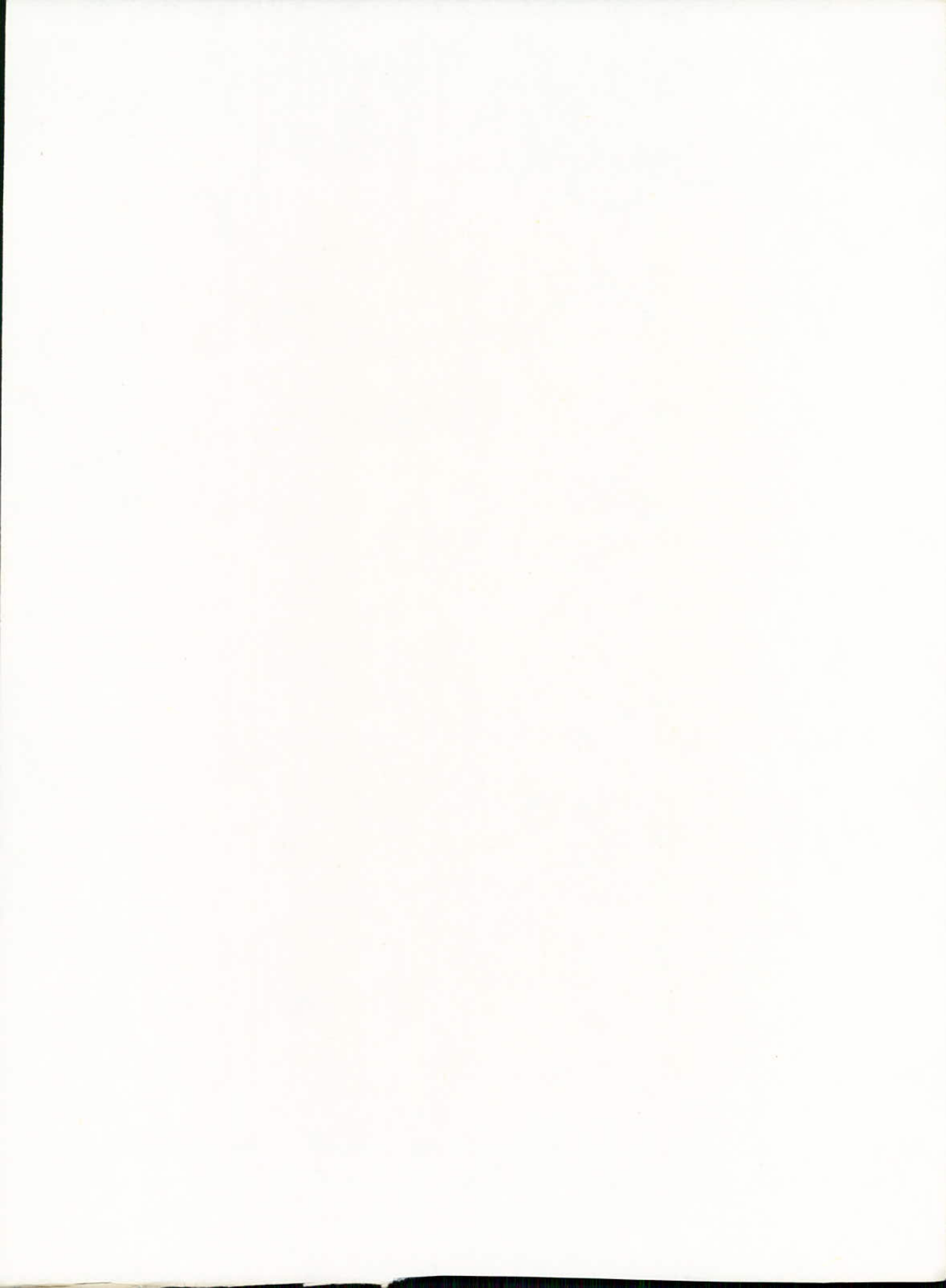
**** Différentes méthodes de la rétrodiffusion

a./ se fixer la fréquence d'émission et utiliser une antenne directive pivotant lentement autour de la vertical, ce qui permet d'estimer l'azimut de la région renvoyant l'écho.

b./ se fixer l'azimut et faire varier la fréquence d'émission plutôt qu'à faire varier l'azimut. Cette méthode est appelée "sondage par rétrodiffusion avec balayage de fréquence".

Cette méthode permet d'obtenir des renseignements plus précis sur les modes de propagation existant dans un azimut donné.

CONCLUSION : Ainsi, à partir d'une station unique, il est possible d'analyser les conditions de propagation ionosphérique existant dans toutes les directions et pour des distances généralement de plusieurs milliers de kilomètres.



. PARTIE II

PREVISION DES CONDITIONS DE PROPAGATION IONOSPHERIQUE
DES ONDES DECAMETRIQUES (2 - 30 MHZ)

A LONG TERME.

----*--*--*--*--*--*--*--*

----*--*--*--*--*--*--*--*

- 1./ INTRODUCTION.
- 2./ BUT ET CAUSE DES PREVISIONS
- 3./ METHODE DE PREVISION
- 4./ DESCRIPTION ET UTILISATION DES PREVISIONS FRANÇAISES.
- 5./ methode DE PREVISION AMERICAINE.

ANNEXE : PREVISION A COURT TERME

1./ INTRODUCTION

Les prévisions des conditions de propagation ionosphérique consistent, à prévoir à l'avance les conditions de propagation pour des liaisons utilisant la réflexion sur les couches ionosphériques.

Ces conditions sont les suivantes:

- la M.U.F (fréquence maximale utilisable), pour des distances allant de 500 à 4000 KM environ.
- la L.U.F (fréquence minimale utilisable)
- facteur de bruit

et cela pour tous les points du globe.

Les prévisions utilisent par exemple, pour prévoir ou encore estimer la valeur de l'ionisation maximale (dont dépend la M.U.F) quelque temps à l'avance (par exemple 3 mois), la corrélation qui existe entre l'ionisation et par exemple l'activité solaire (dont dépend l'ionisation) caractérisé par l'indice R qui est le nombre de taches solaires (l'indice R n'est le seul, il existe d'autres indices qui caractérisent certaines émissions extra-terrestres comme par exemple l'émission de bruits radioélectrique du soleil, qui sont en bonne corrélation avec certaines caractéristiques de l'ionosphère).

On dit par exemple que l'ionisation est en bonne corrélation avec l'activité solaire, si les variations de l'ionisation suivent (par exemple à 80 %) les variations de l'activité solaire.

2./ BUT et CAUSE DES PREVISIONS

Les conditions de propagation ionosphérique, dépendent de l'état de l'ionosphère qui varie dans le temps, donc il y a risque d'une interruption entre deux (2) stations émettant et recevant avec une certaine fréquence f, par suite de la variation de l'état de l'ionosphère; les prévisions ont pour but: d'éviter ce genre d'interruption en mettant au courant les différentes stations du globe des variations de l'état de l'ionosphère (en leur communiquant à l'avance les nouvelles conditions de propagation).

3./ Méthode de prévision

Les conditions de propagation ionosphérique dépendent pour la plus grande part de l'ionisation maximale des différentes couches, qui dépend de la position, qui peut-être prévue avec précision (courbes donnant l'angle zénithale du soleil) et de l'activité solaire qui peut aussi être prévue avec une certaine précision.

3.1 Principe de la méthode:

Le fait que l'ionisation dépend en partie de l'activité solaire (ie qu'elle suit les variations de R dans le temps avec un certain pourcentage), la méthode consiste à extrapoler la courbe de variation $I(R)$ passée sur quelques mois à venir;

$I(R)$: ionisation en fonction de l'activité solaire caractérisée par l'indice R

Exemple: supposons qu'on est au mois de janvier 78, donc on possède toutes les valeurs de l'ionisation et de R obtenus expérimentalement pour tous les mois antérieurs à janvier 78, on trace donc la courbe $I(R)$ (valeurs expérimentales) ensuite on estime la valeur de R par exemple pour le mois d'avril, si $R(\text{avril})$ est supérieur à la valeur maximale de R obtenus expérimentalement alors on a une extrapolation (ie qu'on prolonge la courbe $I(R)$ exp., si par contre la valeur de $R(\text{avril})$ est inférieur à la valeur maximale de R obtenu expérimentalement alors on a une interpolation (ie que c'est une valeur de l'ionisation qui existe déjà) L'indice R n'est pas le seul, qu'on utilise, car il existe d'autres qui sont en bonne corrélation avec certaines caractéristiques de l'ionosphère.

3.2 Introduction des statistiques

L'introduction des statistiques pour la prévision des caractéristiques de l'ionosphère est due au fait que :

-les caractéristiques dépendent de l'état de l'ionosphère, qui dépend de "la position" et de "l'activité" du soleil, qui varient dans le temps.
La position du soleil peut-être prévue avec précision, pour 3, 4, 5 mois à l'avance,
L'activité du soleil, caractérisé par "R" qui est le nombre

de taches solaires, peut-être prévu avec une bonne précision.

Le fait que les caractéristiques varient dans le temps on ne peut les prévoir qu'avec une certaine "probabilité d'être ou de ne pas être dépassé", pendant une certaine période de temps (en général un(1) mois)

3.3. Quelques constations, sur la variation dans le temps des caractéristiques.

Les conditions de propagation ionosphérique, sont généralement faites pour un(1) mois (ie qu'elles restent valable pour tout un mois).

Cette période d'un mois est due aux faits suivants/

-que les variations des caractéristiques d'un jour à l'autre pendant un mois, sont faibles.

-que la position du soleil, pendant un mois est presque constante (ie la position du soleil à une certaine heure de la journée (exemple 16h) est la même pendant tout le long du mois)

-que la variation du nombre de taches solaire (manifestation de l'activité solaire) est très faible pendant la période d'un mois.

A partir de toutes ces constations qui ont été faites expérimentalement, on voit que les conditions peuvent rester valable pour une période d'un mois.

3.4. Indices fondamentaux pour la propagation ionosphérique et leur prévision.

On entend par "indices de propagation ionosphérique", certains indices qui permettent de prévoir les caractéristiques (parce que ils sont en bonne corrélation avec elles), de l'ionosphère dont dépendent les conditions de propagation. Ces indices fondamentaux caractérisent des grandeurs mesurables liées au rayonnement solaire.

3.4.1. Indice de l'activité solaire: R

L'indice R, caractérise le nombre de taches solaire, qui est la composante du cycle solaire (11 ans).

Les valeurs mensuelles (valable pour tout un mois) sont fournies pour les 6 mois à venir et pour les 6 mois passés (voir tableau ;)

La prévision de l'indice R pour un mois à venir (pour pouvoir extrapoler la courbe de variation C(R) passée) consiste à prendre la "moyenne glissante" sur 12 mois du nombre de taches solaire

Soit à prévoir (ou à estimer) la valeur approchée de R pour le mois n:

$$R(n) = \frac{1}{12} \sum_{k=n-11}^{n} R_k$$

R_k : valeur moyenne mensuelle de R pour le mois k

exemple: R(avril), ie n = 4, les R_k sont les valeurs de R des 6 mois qui sont antérieurs à avril et des 6 mois qui précèdent avril

(toutes ces valeurs sont fournies par des centres spécialisés, voir tableau i)

3.4.2. Indice: \emptyset

L'indice \emptyset caractérise, le "flux de bruits radioélectrique solaire".

Ce flux de bruit radioélectrique, est observé par des laboratoires (Canada, Japon) sur des longueurs d'ondes d'environ 10 cm.

Le flux de bruit radioélectrique solaire est donné en unité de $10^{-22} \text{ w/m}^2 \text{ hz}$.

3.4.3. Indice ionosphérique: I_{F2}

Il a été défini sur la base de mesure de $fcF2$, faite à midi dans des observatoires ionosphériques.

On dispose des valeurs de cet indice depuis 1938.

3.4.4. Indice: \emptyset_{F2}

C'est une variante de I_{F2} , sur la base d'une corrélation curviligne entre \emptyset et $fcF2$.

3.4.5. Indice: T

Il a été mis au point en Australie, et il est basé sur la moyenne des 24 heures des médianes horaires de $fcF2$ de 30 stations.

Il est similaire à I_{F2} , sauf que les données correspondent à toutes les heures.

4./ Description et utilisation des prévisions françaises.

Ces prévisions sont fournies par la d.p.I (division de propagation ionosphérique) du C.N.E.T. (centre national d'étude des télécommunications) française.

La d.p.I fait des prévisions sur les conditions de propagation, qui permettent de dimensionner une liaison.

Ces conditions sont les suivantes :

- la M.U.F.
- la L.U.F.
- le facteur de bruit
- l'affaiblissement (standard)
- l'angle de site θ optimum, et le niveau de l'activité sola.

Ces prévisions sont fournies 3 mois à l'avance et elles sont valables pendant une (1) période d'un (1) mois (février, mars, avril, mai, août, septembre, octobre et novembre) et pendant une période de deux (2) mois pour (décembre et janvier réunis, juin et juillet réunis), et pendant une période de trois (3) mois pour le facteur de bruit.

La d.p.I présente ses prévisions pour :

a./ Pour 10 zones géographiques normalisées : (voir fig. 1)
Europe du nord; europe; méditerranée; Afrique occidentale;
côte sud de l'Afrique occidentale; Afrique équatoriale;
Afrique centrale; Madagascar; Antilles; Polynésie française.
Les prévisions faites sur ces zones, ne concernent que les liaisons (petites et moyennes distances) à l'intérieur de ces zones.

b./ Pour des liaisons à grandes distances (utilisant plusieurs réflexions ionosphère-sol) ($d \geq 4000$ KM)

Ces liaisons "point à point" sont au nombre de 130, exemple /

*Alger-Dakar, Alger-Pékin, Paris-Dakar etc..

4.1/ Prévisions de la M.U.F (90%/o)

La M.U.F est sous forme de graphe (figure 3) en fonction de l'heure de la journée (qui dépend de : l'angle zénithale du soleil, ie de la position du soleil)

Quelques rappels :

$M.U.F = f_c.k(d)$,croissante avec d
 $-f_c = 9/\sqrt{Nm}$,Nm densité maximale au point de réflexion.
 $-k(d)$,facteur de distance qui est croissant avec la distance d .

si $d \leq 2000$ km, on peut utiliser la couche E pour la liaison.
 donc $M.U.F = k(d).9/\sqrt{NmE}$

si $2000 \text{ KM} < d \leq 4000 \text{ KM}$, on utilise la couche F(F2)
 $M.U.F = k(d).9/\sqrt{NmF}$

(voir fig 2), où on voit que la M.U.F augmente avec la distance et qu'elle est donné par la couche E (ie on utilise f_cE pour le calcul) pour $d \leq 2000 \text{ KM}$, et par F pour $2000 < d \leq 4000 \text{ KM}$.

La M.U.F 90%/c ; c'est à dire la valeur de la M.U.F qui est dépassée pendant 90/100 du temps (ce qui revient à dire 27 JOURS/30)

La M.U.F 90/100 veut dire que la prévision à été faite en extrapolant la courbe $f_c 90/100 = A(R)$, ie la fréquence critique en fonction de l'activité solaire.

Les graphes donnant la M.U.F concernent:

-chaque zone normalisée, et pour des distances allant de 250 à 3000 km;

-pour les 130 liaisons normalisées.

------*---*---*---*---*---*---*---*---*---*---*---*---*---*

4.2/ Facteur de bruit :Fa ,

Il est donné pour des périodes de 3 mois, et pour des tranches de 4 heures de la journée (voir figure 4)

Le facteur de bruit est donné en "dB", il nous permettra de calculer le champ induit par les parasites dans l'antenne. Il est donné en fonction de "la longitude et de la latitude"

4.3/ Affaiblissement standard :dps

Il est donné pour chaque distance d (250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 2000, 2500, 3000 KM) d'une liaison située à l'intérieur d'une zone normalisée.

Les différentes valeurs de dps sont :

-70,85 et 100dB

Ces affaiblissements standards, sont des pouvoirs transmissifs déterminés pour:

- $E_{2min} = 1\mu v/m$ (champ imposée à la réception par les bruits)
- et pour des puissances normalisées: 6320, 200
6,32; 0,2 watts
et pour une antenne de référence.

(voir tableau 1)

Le pouvoir transmissif est donné par: (chpitre V)

$$PT = E1 - E_{2min} \text{ (dB)}$$

$$E1 = 47 + W1 + g1 \text{ (dB)}$$

$W1$ en kW, E_{2min} en $\mu v/m$

dps est calculé pour $g1 = 0$ et $E_{2min} = 0$

$$dps = 47 + W1 \text{ (dB)}$$

$W1 = 6320; 200; 6,32; 0,2$ watts, et $W1 \text{ (dB)} = 10 \log W1 \text{ (kw)}$

L_{40} / L.U.F: fréquence minimale utilisable

La dpI donne aussi la L.U.F à 10/100 et 30/100, ie valeurs dépassée pendant 27 jours/30 et 3 JOURS/30.

La dpI fournit aussi la valeur de l'angle de site à utiliser lorsque la fréquence utilisée est voisine de la L.U.F

(voir tableau 2)

angle de site θ

La dpI fait aussi des prévisions de l'angle qu'il faut utilisé suivant la distance et la hauteur du maximum d'ionisation de la couche considérée. (

UTILISATION DES PREVISIONS FRANÇAISES

L'utilisation des prévisions françaises se fera sur un exemple *Alger-Tamanrasset*

Les données sont pour "Alger-Tamanrasset" zone méditerranée" (fig 1)

- d = 1500 KM

- mois : janvier

- propagation de jour

Les prévisions sont : pour la zone "méditerranée", et d = 1500KM

- La bande de fréquence utilisable MUF-LUF, pour différents affaiblissements standard dps (figure 3')

- Facteur de bruit Fa à la réception, ie Tamanrasset, (figure 4)

EXEMPLE 1

si à l'émission :

-W1 = 300w

-Antenne quart-d'onde

-télégraphie A1 manuelle, 8 bauds

(classe d'émission, tab.3)

si à la réception :

champ minimal admis: 1uV/m

Problème : Déterminer les fréquences de travail de jour
Le choix de la fréquence se fait au voisinage de la L.U.F, à midi (ie, 12h), car de part et d'autre de midi la M.U.F et LA L.U.F diminuent, c'est à dire que ce choix nous permettra d'utiliser cette fréquence pendant un maximum de temps. La bande de fréquence utilisable est la bande HACHURÉE

a./ On consulte les graphes de la figure 3, on trouve pour midi (où l'ionisation est maximale)

L.U.F 90% cas 85 midi 9,5 MHz $\theta = 30^\circ$ (tab.2)

L.U.F " cas 70 midi 14 MHz $\theta = 30^\circ$

L.U.F " cas 100 midi .6MHz $\theta = 30^\circ$

b./ On calcule le pouvoir transmissif pour les différentes fréquences.

$$PT = E1 - E2_{min}$$

$$PT = Kp + g1 - E2_{min}$$

$$Kp = 47 + W1 \text{ (voir plache Ia)}$$

pour $W_1 = 300$ watts , on tire $K_p = 42$ dB(plan. Ia)
pour $E_{2min} = 1$ uV/m , on tire $E_{2min} = -60$ dB(plan. Ia)

----- POUR $f = 14$ MHz (cas 70 dB)
on sait que $\theta = 30^\circ$ (tab. 2)

$g_1(\theta, f) = -2,7$ dB(planche Ic), donc:

$$P_T = 42 + 60 - 2,7 = 99,3$$

$$\underline{P_T = 99,3}$$

----- POUR $f = 9,5$ (cas 85dB)

$g_1(\theta, f) = -2,2$ dB (Ic)

$$\underline{P_T = 99,8 \text{ dB}}$$

----- POUR $f = 6$ MHz (cas 100 dB)

$g_1(\theta, f) = -1,5$ dB (Ic)

$$\underline{P_T = 100,5 \text{ dB}}$$

CONCLUSION: on voit que le pouvoir transmissif qui se rapproche le plus du cas considéré est le cas 100 dB

Pour le choix des fréquences il faudra donc consulter le "cas 100 dB", pour la liaison Alger-Tamanrasset (1500 KM) qui est située dans la zone "méditerranée"

EXEMPLE DE CHOIX:

-entre 07h - 23h, on peut utiliser $f = 10$ MHz puisque dans cette intervalle elle est toujours dans la bande utilisable (ie M.U.F et L.U.F 90%); zone hachurée.

-entre 06h - 07h, on peut utiliser $f = 5$ MHz

-entre 00h - 06h, on peut utiliser $f = 3,5$ MHz

EXEMPLE 2

Calcul de la puissance à l'émission pour avoir une bonne réception.

Supposant qu'entre 08h - 12h on utilise $f = 10$ MHz, cas 100 dB

LIAISON : Alger - Tamanrasset

réception à Tamanrasset

télégraphie manuelle A1,8bauds ($R = -7$ dB = S/B)

Antenne quart-d'onde verticale.

POUR la télégraphie A1 8 bauds: $B = 6 \text{ KHZ}$

a./ Calcul du champ induit dans l'antenne: E_p

entre 08-012h, $F_a = 60 \text{ dB}$ (fig.4) à Tamanrasset.

et $f = 10 \text{ MHz}$;

A partir de la planche Id on tire:

$E_p = 15 \text{ dB}$, pour une bande de 1 KHZ

pour $B = 6 \text{ KHZ}$, on ajoute $20 \log(B) = 8 \text{ dB}$

$E_p = 23 \text{ dB}$, pour $B = 6 \text{ KHZ}$

b./ Calcul de $E_{2\text{min}}$

$$E_{2\text{min}} = E_p + R - 60 \quad , E_{2\text{min}}(\text{dB}/\mu\text{V}/\text{m})$$

(dB/mV/m)

$R = -7 \text{ dB}$ pour la télégraphie A1 ,8bauds

$$E_{2\text{min}} = 23 - 7 - 60 = - 44 \text{ db}$$

La planche Ib donne: $E_{2\text{min}} = 6,5 \mu\text{V}/\text{m}$

c./ Calcul de la puissance W_1 :

$$P_T = K_p + g_1 - E_{2\text{min}} = 100 \text{ dB}$$

Le fait qu'on est au voisinage de la L/U/F on prend $\theta = 30^\circ$

$$g_1(10 \text{ MHz}, 30^\circ) = - 2,5 \text{ dB} \quad (\text{plan. Ic})$$

$$K_p = 100 - 44 + 2,5 = 58,5$$

$K_p = 58,5 \text{ dB}$, donc à partir de la planche Ia, on tire:

$$\underline{W_1 = 15 \text{ KW}}$$

Cette grande puissance est due au facteur de bruit qui est élevé.

Les zones Aout.

I. / pacifique II. / Antilles III. / europe du Nord

IV. / Europe V. / mediterrannee VI. / Afrique Occidentale
VII. / Afrique equatoriale et TFAI VIII. / cote sud d'A.O IX. / Afrique centrale
X. / mado gascar.

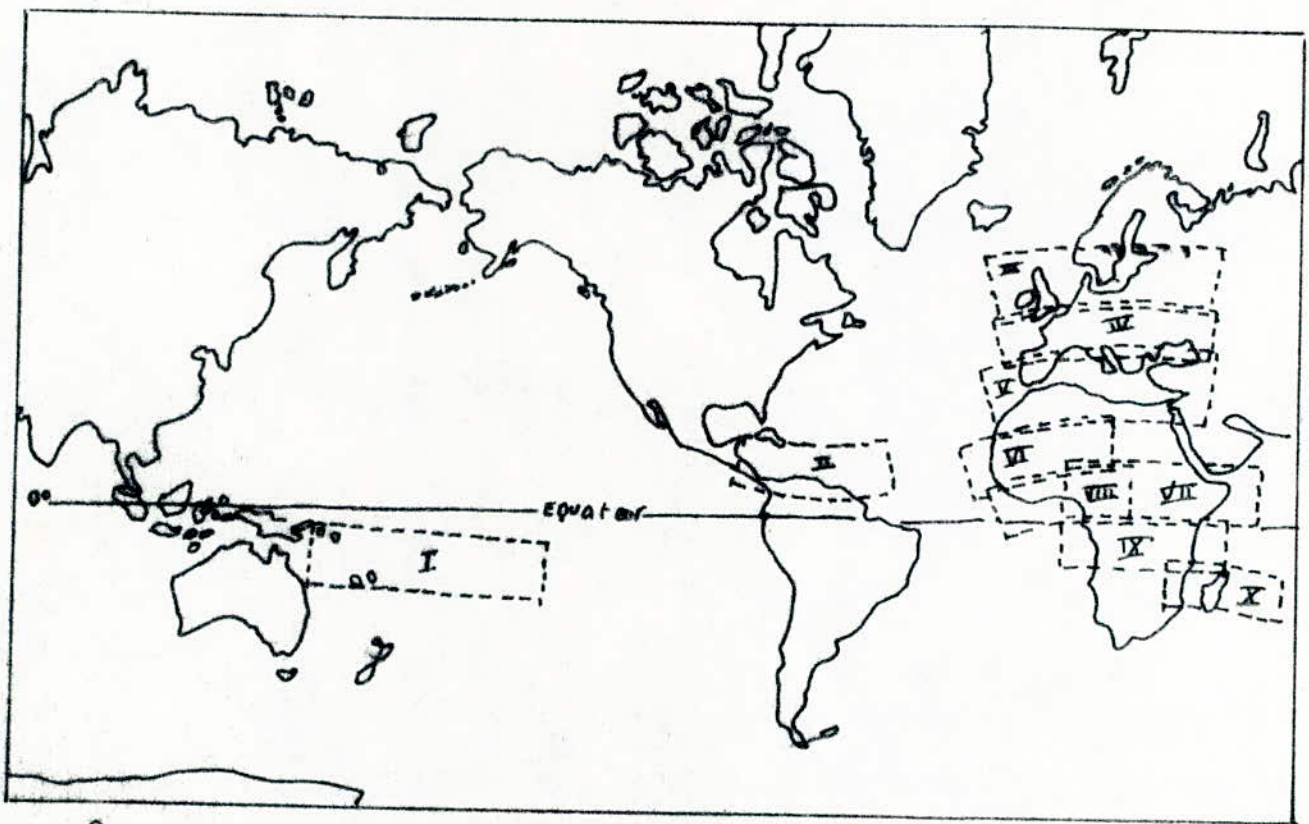


Figure 1 : carte mondiale indiquant les zones normalisées sur lesquelles la dpt du CNET français fait des prévisions de conditions de propagation.

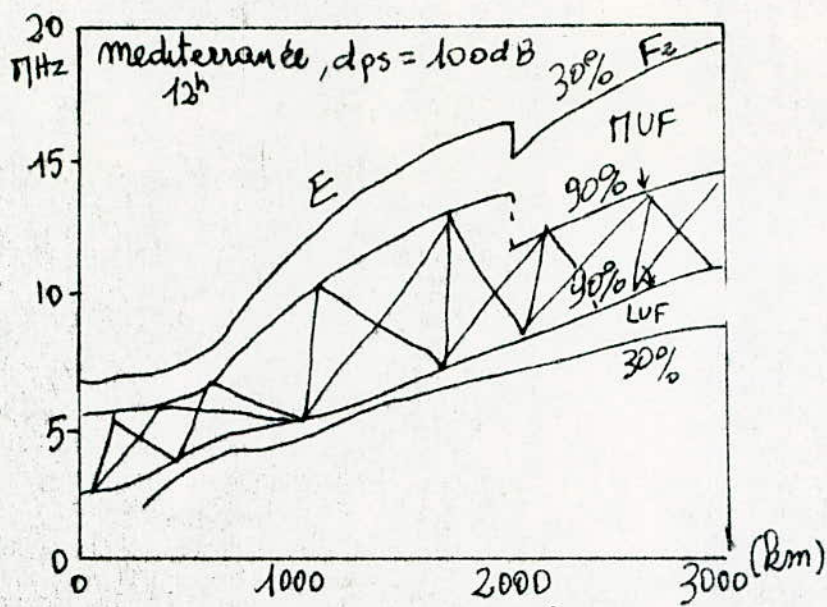


fig. 2. / $MUF = h(d) \times f_c$
 $f_c = d \cdot e$

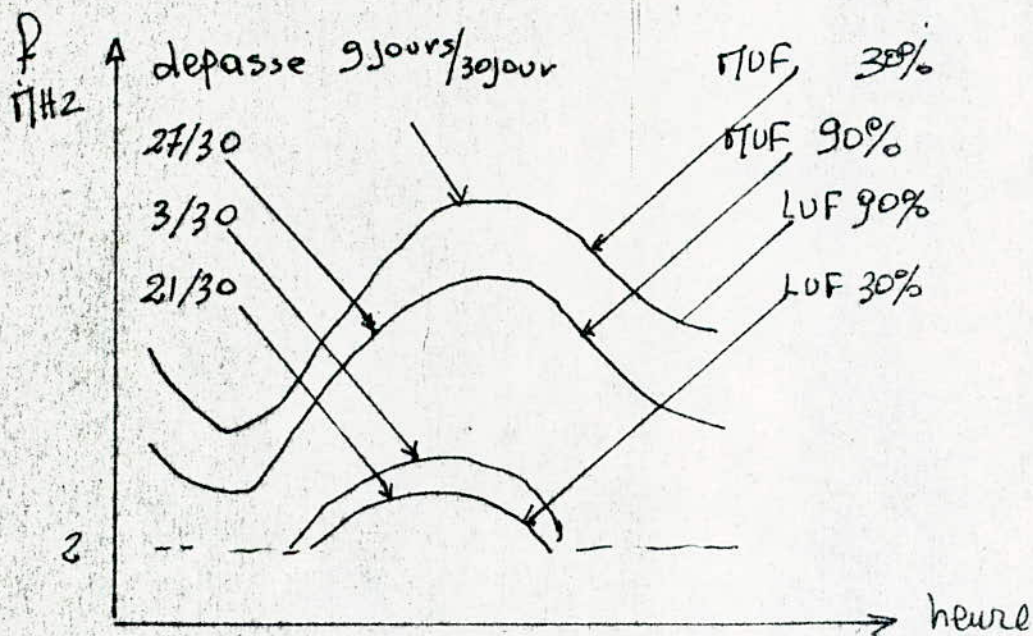
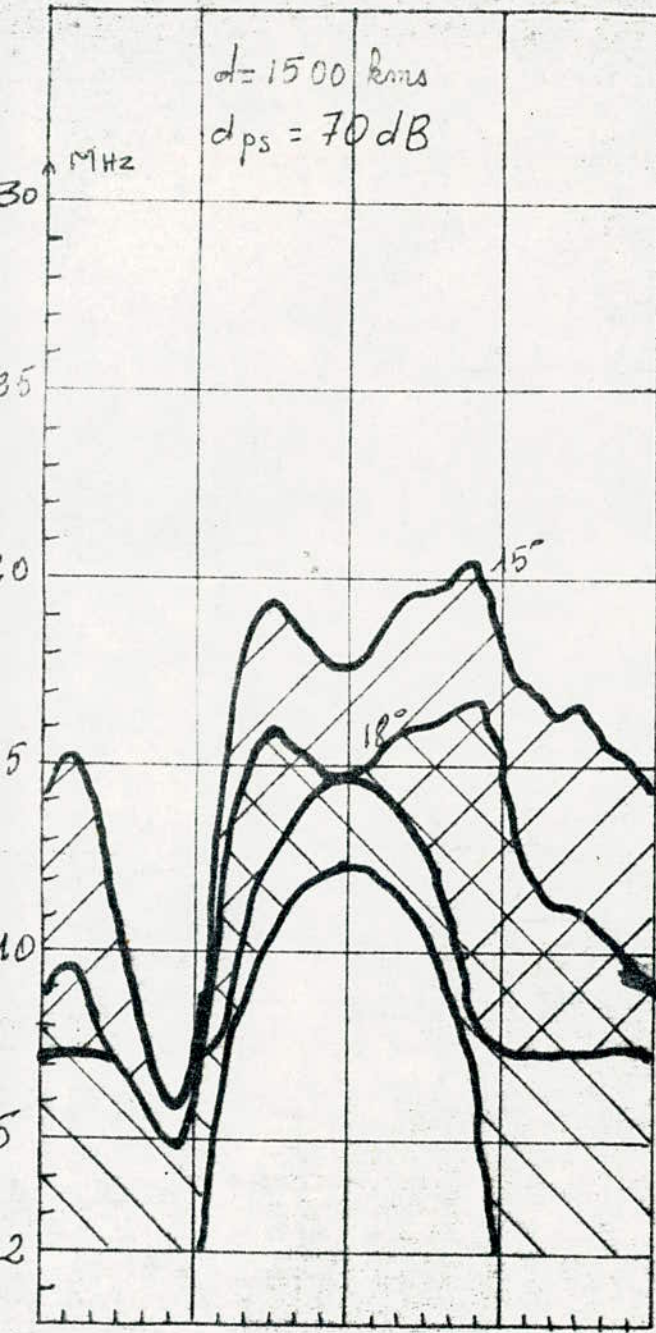


fig 3. / $MUF = f(x)$

ZONE Méditerranée



DECÈMBRE-JANVIER 1977-78

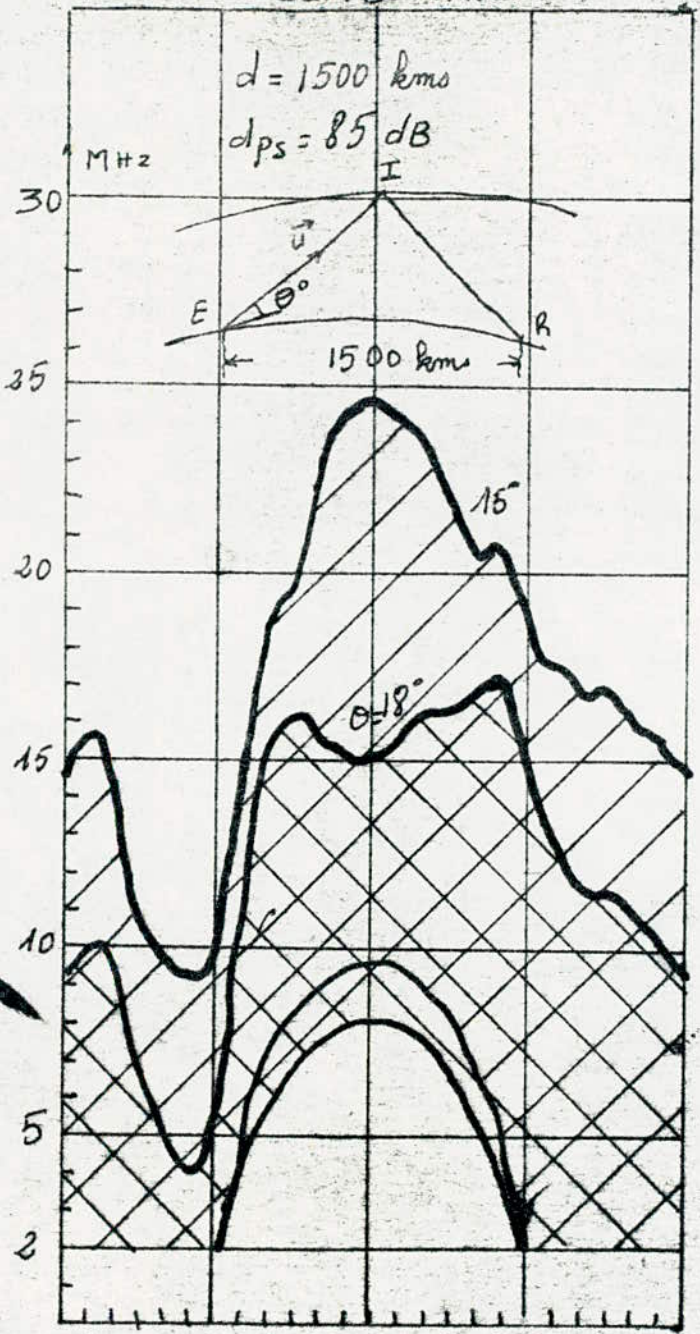
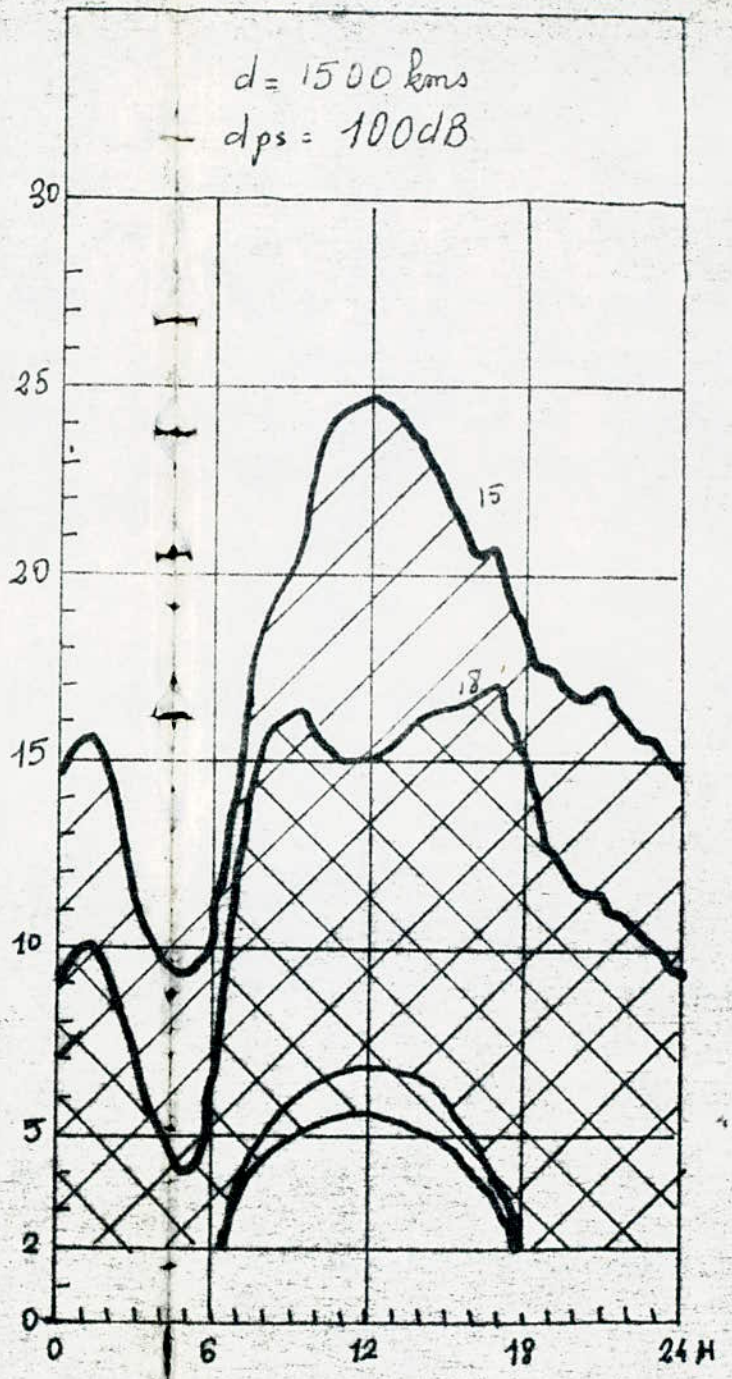


Fig 3!



100 dB = d_{ps}

TLM

Affaiblissements de propagation standards: d_{ps}	115	100	85	70
Gain de l'antenne de reference (dB.)	0	0	0	0
Puissance a l'emission (W_e)	6320	200	632	0,2
niveau de E_1 (dB/1 μ V/m eff.) (dB)	115	100	85	70
niveau de E_{3min} /1 μ V/m correspondant (dB)	0	0	0	0

Tableau: 1 "affaiblissements standards utilise par la d_{PI} du CNET français"

d_{ps} : affaiblissement imposee par la d_{PI} pour certaine liaison

$P_T \geq d_{ps}$: le pouvoir transmissif d'une liaison doit être supérieur ou égal, lors du dimensionnement d'une certaine liaison.

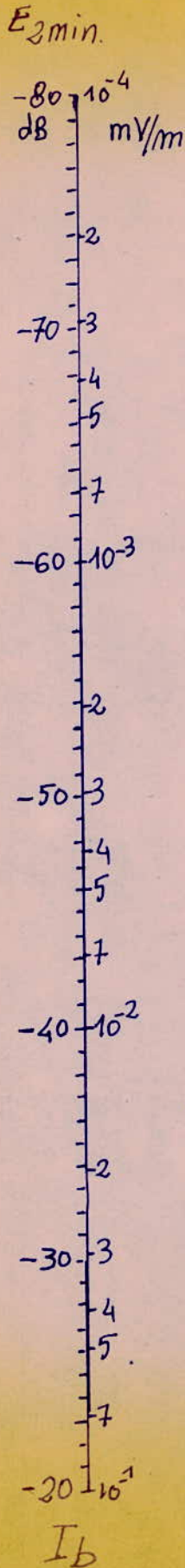
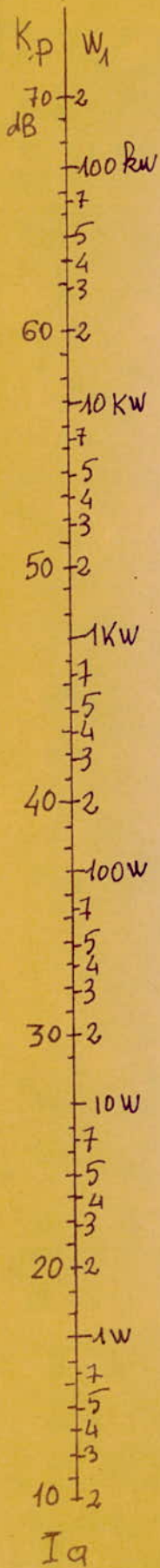
DISTANCE (km)	θ : de jour		θ de nuit
	Cas: 85, 100 et 115dB	Cas 70dB	Cas 70dB
250	40°	65 ou 40°	65
500	65	40	40
750	50	30	30
1000	40	25	25
1250	35	35	35
1500	30	30	30
2000	25	25	25
2500	20	20	20
3000	15	15	15

TABLEAU 2./ angles de depart θ (°, degrés.)
pour $f \approx LUF$ et $h = 12h$ (midi.)

c'est des angles, qui ont été calculés par la d.p. I pour différentes distances et lorsque la fréquence utilisée est voisine de la LUF. (ce qui est le cas à midi (12h).) Ils ne sont valables que lorsque la liaison se trouve dans une zone normalisée (fig. 1). Ils sont aussi donnés suivant l'affaiblissement standard utilisé.

ABaque de Transformation:

I



$$P_T = 47 + W_1 + g_1 - E_{2min}$$

$$K_p = 47 + W_1 \text{ (dB/1KW)}$$

- connaissant la puissance a l'emission en KW, \$I_a\$ donne directement en dB

$$47 + W_1 = K_p$$

- \$I_p\$ transforme \$E_{2min}\$ en mV/m en dB/mV/m.

Exemple:

$$* W_1 = 300W = 0,3KW$$

$$K_p = 43dB$$

$$* E_{2min} = 1\mu V/m = 10^{-3} mV/m$$

$$E_{2min} = -60dB$$

$$\text{donc: } P_T = 47 + W_1 + g_1 - E_{2min}$$

$$P_T = 43 + g_1 + 60 = (103 + g_1) dB$$

\$g_1\$ (voir planche \$I_c\$).

$$E_{2min} = E_p \text{ (dB/\mu V/m)} + R \text{ (dB)} - 60$$

\$E_p\$ (Voir Abaque \$I_d\$)

$$R = S/B$$

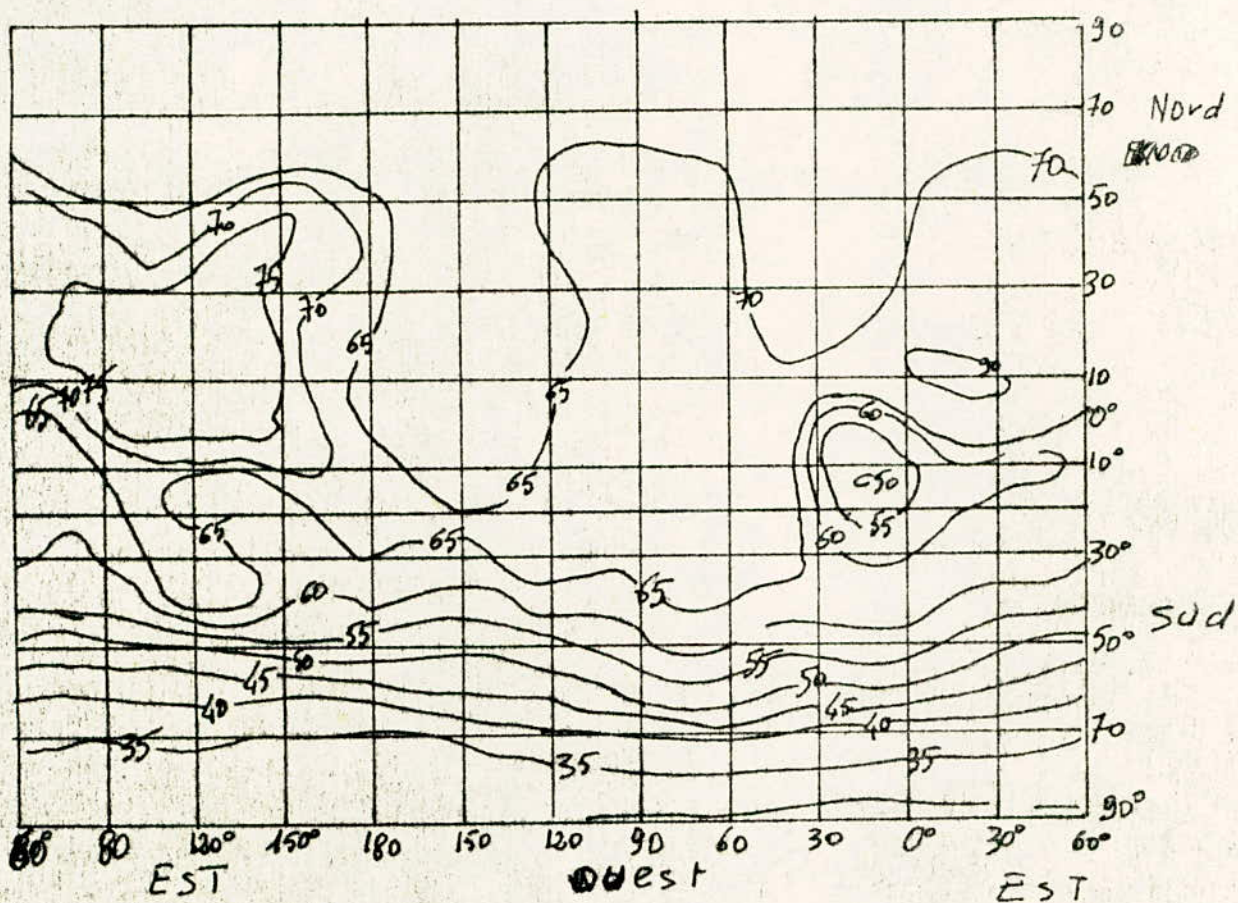


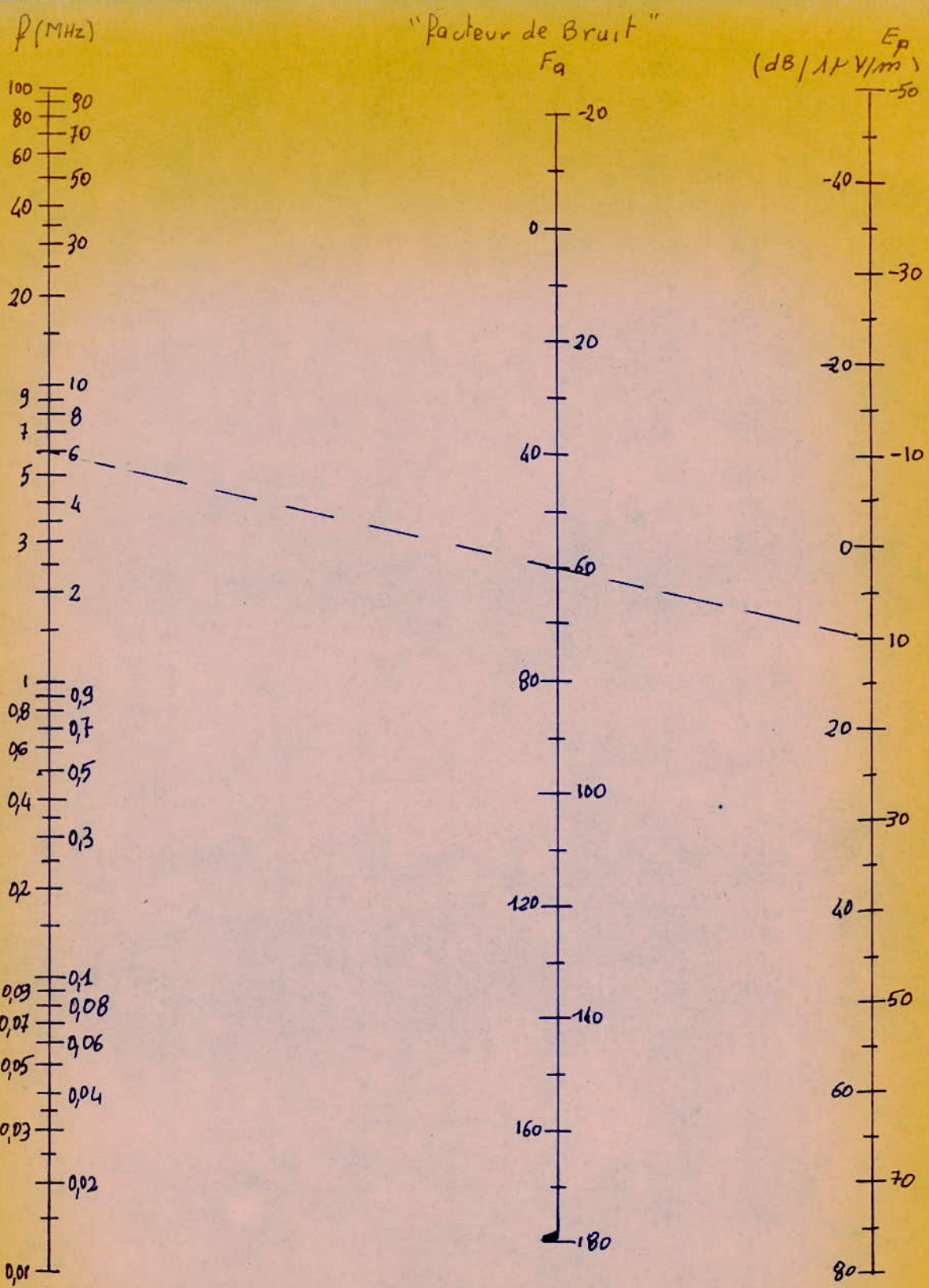
FIG.4 / Facteur de Bruit en dB

Valable : Pour les Mois : decembre, janvier, fevrier

Entre 08-12h.

La dPI fournie 6 cartes de cette forme (00-04h; 04h-08h; (08h-12h; 12h-16h...etc...) Valables pour les 3 mois.

(il permet, connaissant la position du récepteur, calculer le champ parasite E_p , induit dans l'antenne.)



Id. / "transformation de F_a en E_p " en fonction de la fréquence du signal.

Exemple: $f = 6 \text{ MHz}$, $F_a = 60 \text{ dB}$, $E_p = 10 \text{ dB}$

Connaissant la position du récepteur, à partir de la fig. 4 on détermine

F_a et connaissant la fréquence du signal;

on détermine le champ parasite E_p induit dans l'antenne:

$$E_p = F_a + 20 \log f - 65,5, \text{ pour une bande } B = 1 \text{ KHz.}$$

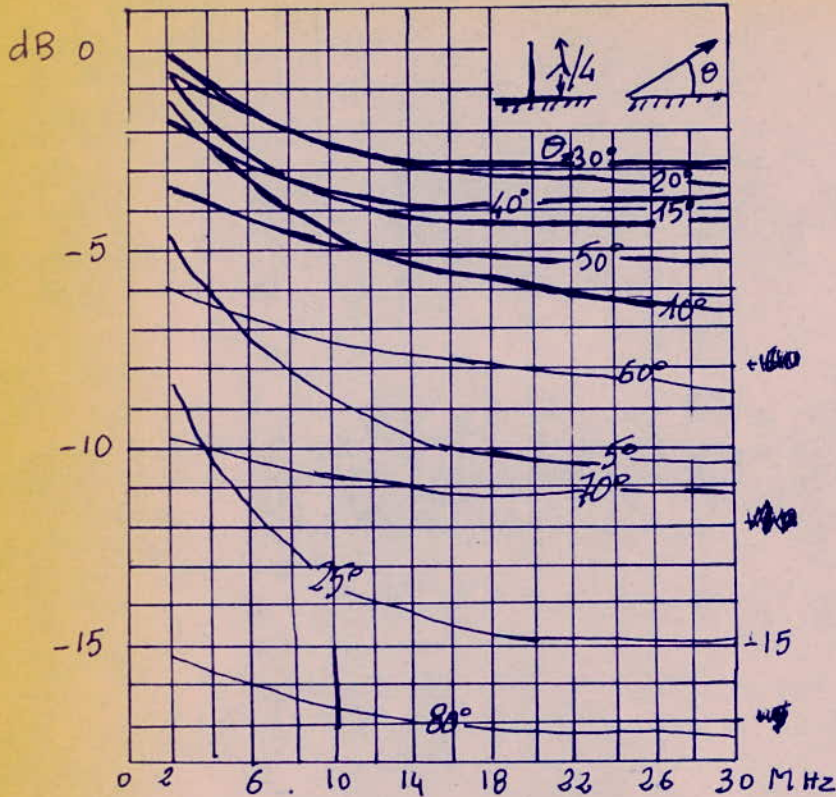


Planche I_c: gain d'une ANTENNE quart-d'onde ($\lambda/4$)

$$g = g(\theta, f) \text{ (dB)}$$

Exemple: si $f = 6 \text{ MHz}$ $\theta = 30^\circ$ (angle de depart ou de site)

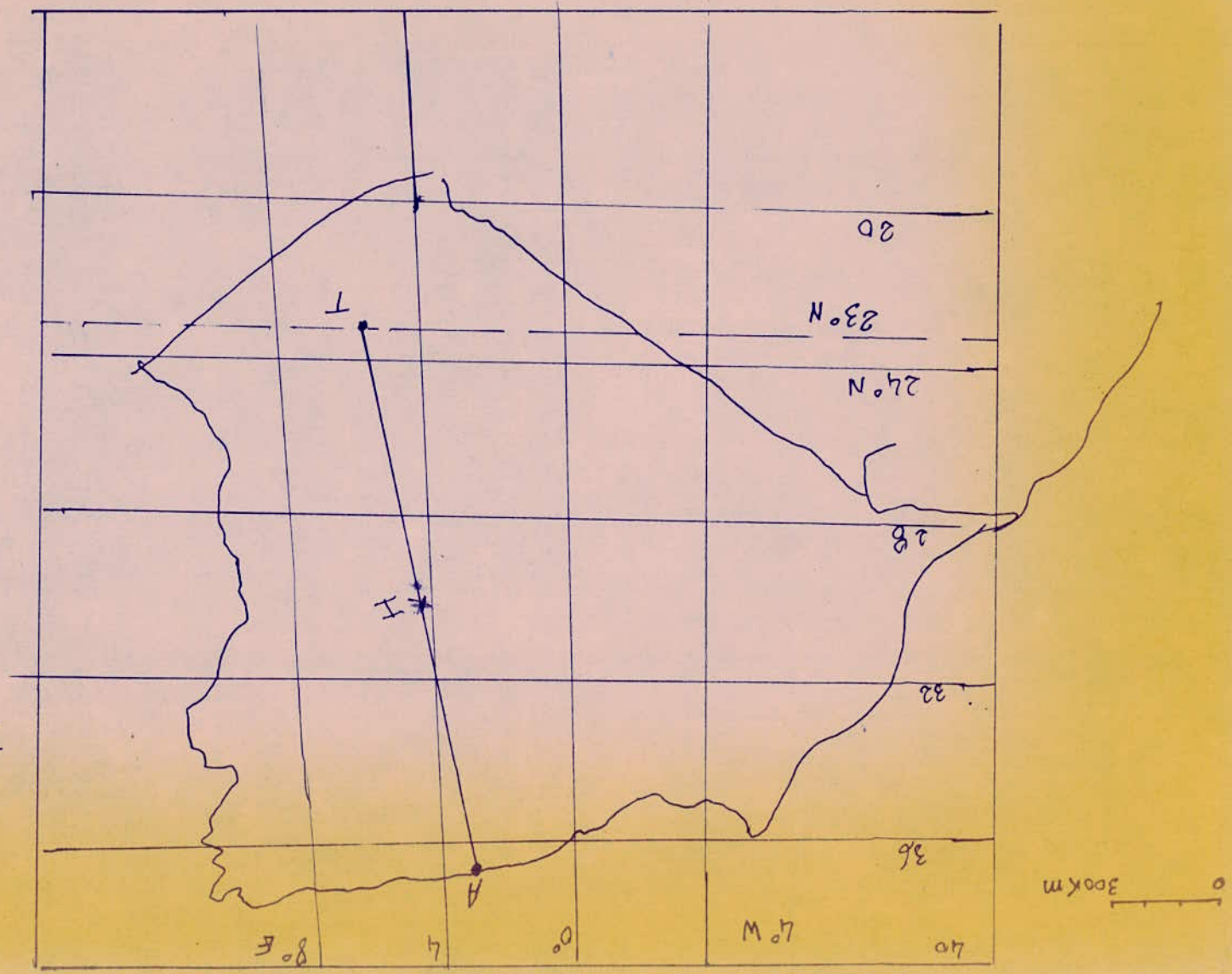
$$g = -1,5 \text{ dB}$$

si on reprend l'exemple sur les planches I_q et I_B où :

$$P_T = 102 + g_1 = 100,5 \text{ dB.}$$

Tamanrasset: $\phi = 8230''N$
 $L = 5^{\circ}E$

ALGERI: $\phi = 37^{\circ}N$
 $L = 3^{\circ}E$



CA CHAPITRE VII : METHODE DE PREVISION AMERICAINE
DU C.R.P.L

La méthode américaine est basée sur 3 faits :

1; 1. le fait que l'ionisation de la couche E dépend :
**de la distance zénithale du soleil X, (ce qui est logique
puisque l'ionisation dépend de l'intensité et du flux du
rayonnement solaire) pour une certaine région considérée.

2. et le fait que, l'ionisation de E est en relation
étroite avec l'activité solaire (ie que l'ionisation suit les
variations de l'activité solaire)

3./ et le fait que l'ionisation de F₂, varie en fonc-
tion de :

- la longitude (ce qui n'est pas le cas pour E)
- la latitude
- de R et de X.

CES dépendances de l'ionisation de E, avec R et X

(qui varient dans le temps), ont permis de mettre au point une
relation, liant l'ionisation de E avec R et X.

$$**f_{cE} = 9 N_m E E = (3;2 + 0,0062 \cdot R^0) \cos^{0,33}(X)$$

POUR ce qui est de F₂, aucune relation n'a pu être
mise au point, à cause des nombreux paramètres dont elle dépend ?
La méthode de prévision, est celle déjà décrite, ie la méthode qu
qui consiste à faire une extrapolation des résultats expé-
rimentaux, ie une extrapolation de la courbe; ionisation en
fonction de l'indice R (ou des autres indices, voir méthode
de prévision) dont les valeurs sont obtenus expérimentalement.

NOTIONS ET RAPPEL GENERAUX.

Soient, A et B, les extrémités d'une liaison de distance d (km)
Soit I le milieu du trajet, qui est pris comme point de réflex-
ion.

Les prévisions fournis par les centres de prévisions concer-
nent, notre point de réflexion.

Le point I peut-être repérer, sur une carte mondiale, en joignant
les extrémités A et B et en pointant le milieu du segment AB.

On peut donc repérer le point I = I(longitude, latitude)

--

--

Description des prévisions du C.R.P.L, qui sont

fournis 3 mois à l'avance.

1. valeur de R qui est valable, pour tout le mois sur lequel sont faits les prévisions.
2. Distance zénithale du soleil, en fonction de la latitude et de l'heure de la journée. (on suppose que, pour une certaine heure de la journée (ex 12h) la distance zénithale est constante pendant tout le mois), pour une certaine latitude)
3. Ionisation maximale ou encore la fréquence critique $f_c = 9 \text{ Nm}$ de la couche F_2 , en fonction de la longitude et de la latitude.
4. Valeurs de la M.U.F pour F_2 , pour une distance de 4000 km qui est la distance maximale d'une liaison utilisant la couche F_2 : M.U.F 4000 F_2 , en fonction de la longitude et de la latitude.

A partir de ces prévisions, on peut déterminer la MUF pour une distance d, à partir des "ABAQUES", qui ont été mis au point.

***PRINCIPE DES ABAQUES.

Le C.R.P.L a construit 3 abaques

La M.U.F d = MUF(fc, d), f_c est fixée par l'état de l'ionosphère et on sait que la MUF augmente avec la distance d (voir condition de propagation).

LES distances maximales couvertes par E et F_2 , sont respectivement, 2000 et 4000 kms.

Donc pour un état de l'ionosphère fixé;

$$**MUF d E)_{MAX} = MUF 24000 \quad MUF d E = MUF$$

$$MUF d E)_{MAX} = MUF 2000 E$$

$$MUF d F_2)_{MAX} = MUF 4000 F_2$$

ABAQUE I

IL fait intervenir 3 paramètres: R, X et la MUF 2000 E, il fait intervenir directement la MUF 2000 E, car on sait qu'il suffit de multiplier par un coefficient d'environ 4,78, la $f_c E$ pour obtenir la MUF 2000 E (c'est dû à la stabilité de l'altitude du maximum d'ionisation de E) VOIR condition de propagation, figure 3)

ABAQUE II

L'abaque II, fait intervenir; comme paramètres: MUF 2000 E et la distance d, et l'inconnue à reléver la MUF d E

La distance, étant connue, la MUF 2000 E a été déterminée en fonction de R et X (pour une ^{MIDI} de la journée et pour une certaine latitude, qui est celle de notre point de réflexion ie le point milieu du trajet)

ABAQUE III, pour les distances comprise entre 0 et 4000 km

A partir de la carte mondiale (fig.2) on tire fcF_2 et à partir de la fig.3 on tire MUF 4000F₂, connaissant la position de notre point de réflexion en fonction de la longitude et de la latitude.

L'abaque III, fait intervenir, comme paramètres: fcF_2 et MUF4000F et comme inconnue la MUF d F₂ d étant connu.

REMARQUE: L'abaque I et l'abaque II, qui se rapporte à la couche E, ne sont utilisables que pour des distances inférieures ou égales à 2000 km (qui est la distance maximale couverte par une réflexion sur E)

EXEMPLE D'UTILISATION DES ABAQUES.

Supposant, qu'on possède les prévisions pour:

-le mois de janvier 1978

PROBLEME: déterminer pour:

-d = 1500 km

-et pour d = 3000 km

les M.U.F (c'est à dire fréquences maximales utilisables pour ces distances)

si l'heure locale à notre point de réflexion est 12 h

LES PREVISIONS SONT LES SUIVANTES: (fournis au mois d'octobre 77

--* R = 44 c'est le nombre de taches solaires qu'on a estimé, pour le mois de janvier 78

--* Distance ou angle zenithale (en fonction de la latitude et de l'heure), FIGURE 1.

--* MUF ZERO F₂ = fcF_2 = 9 NmF₂, pour MIDI ie, 12h en fonction de la longitude et de la latitude. fig2

--* M.U.F 4000F₂ pour MIDI (12h), en fonction aussi de la longitude et de la latitude. fig.3

1^{ère} étape: déterminer la position du milieu du trajet (qu'on
soit notre point de réflexion), en reliant le point A(l_1, L_1)
d'émission et le point de réception B(l_2, L_2), et relever la
position du milieu (l, L) VOIR FIG. 7, à l'aide d'une carte
mondiale.

Supposant que: $l = 40^\circ \text{N}$, $L = 105^\circ \text{W}$ au point milieu
 l et L sont respectivement la latitude et la longitude.

2^{ème} étape: relever pour MIDI (12h), la distance zenithale
 X pour la latitude $l = 40^\circ \text{N}$

on trouve $X = 65^\circ$ (fig 1)

3^{ème} étape: Relever sur la figure 2 et 3, respectivement, $f_c F_2$
et M.U.F 4000 F_2 , au point milieu du trajet $l = 40^\circ \text{N}$ ET
 $L = 105^\circ \text{W}$;

On trouve: $f_c F_2 = 6 \text{ MHz}$ et M.U.F 4000 $F_2 = 16 \text{ MHz}$

--* pour $d = 1500 \text{ km}$, on utilise la couche E de
préférence.

connaissant $R = 44$ et $X = 65^\circ$ et $l = 40^\circ$

on détermine, MUF 2000 E à partir de l'abaque I, en reliant X et
R on trouve MUF 2000 E = 16,6 MHz (fig. 4)

A partir de l'abaque II, on détermine pour la distance 1500 km
MUF 1500 E = 15 MHz

--* POUR $d = 3000 \text{ km}$, on est obligé d'utiliser la
couche F_2

connaissant, au point de réflexion: $f_c F_2 = 6 \text{ MHz}$ et la MUF 4000 F_2
pour une liaison utilisant ce point de réflexion (40°N , 105°W)

MUF 4000 $F_2 = 16 \text{ MHz}$

A partir de l'abaque III, on détermine :

MUF 3000 $F_2 = 15 \text{ MHz}$

RESUME

TOUTES liaisons, utilisant le point I (40°N , 105°W) à midi (12h)
pour la réflexion au mois de janvier 78 aura:

pour une liaison de distance $d = 1500 \text{ km}$, la fréquence ma-
ximale utilisable en utilisant la couche E =

MUF 1500 E = 15 MHz

et pour une liaison de distance $d = 3000 \text{ km}$

MUF 3000 $F_2 = 15 \text{ MHz}$

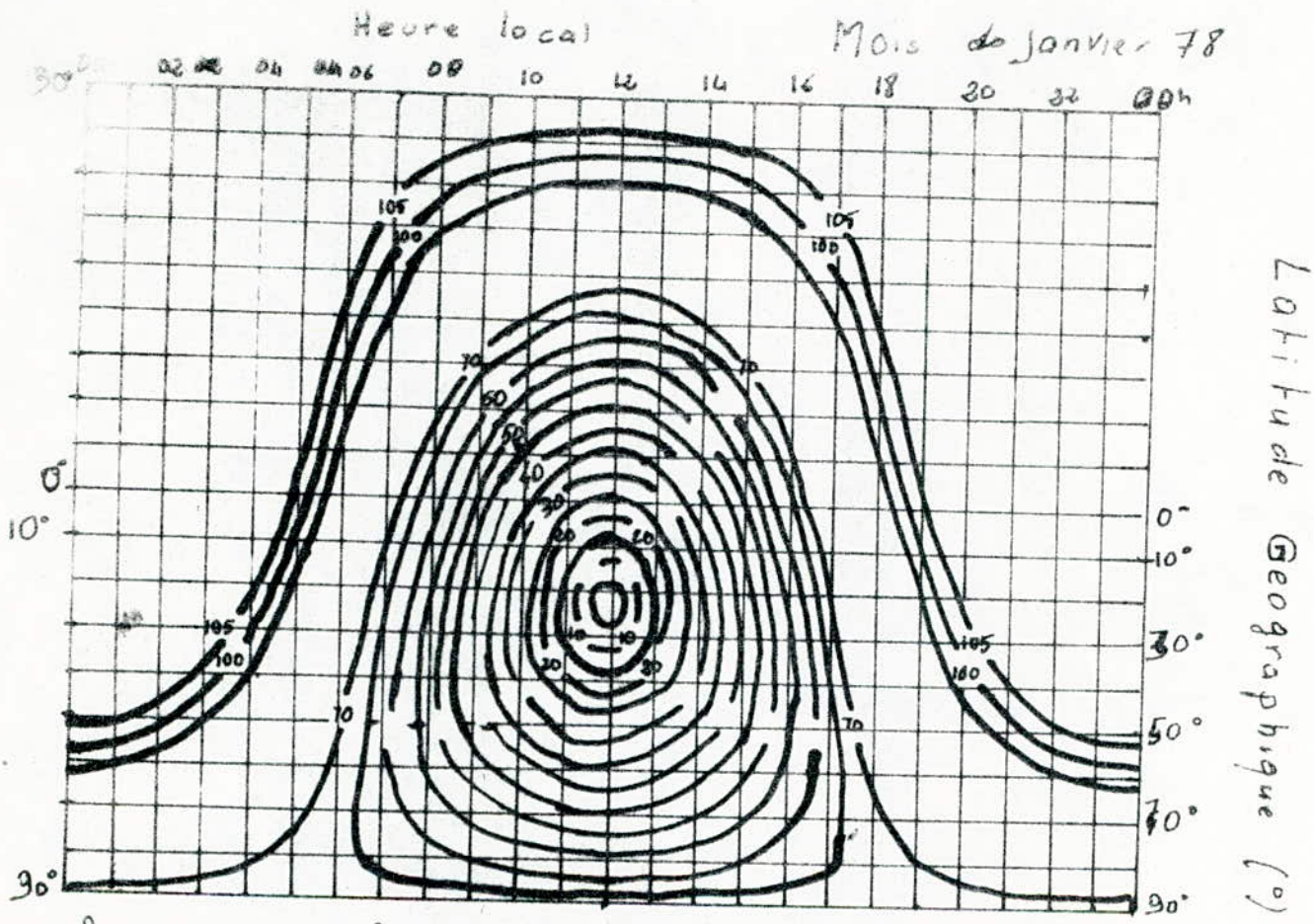
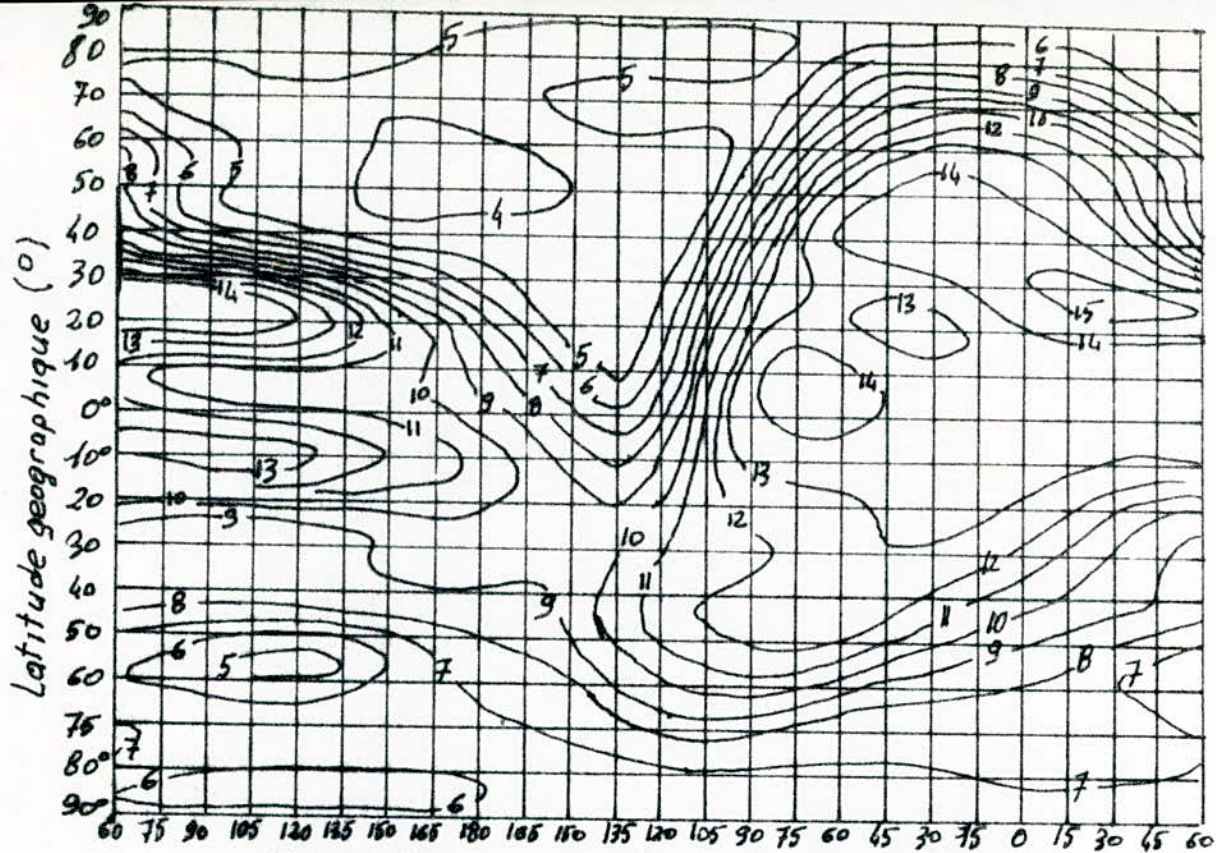


Figure 1 : Angle Zenithal (X) du soleil
 en fonction de la latitude et de l'heure local



Mois: janvier
heure: 14h

Figure 2 : MUF zero $F_2 \equiv F_2 F_2$ Longitude ($^\circ$).

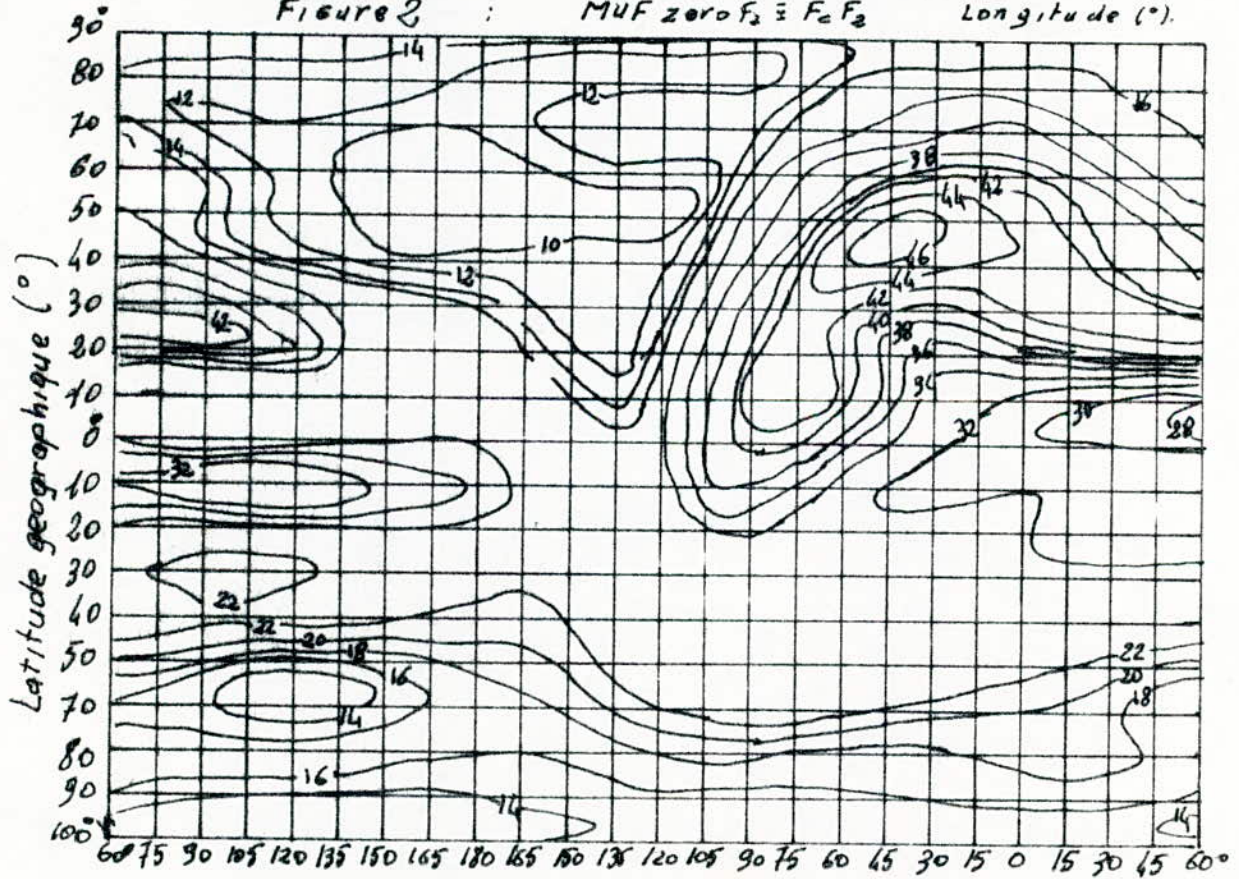
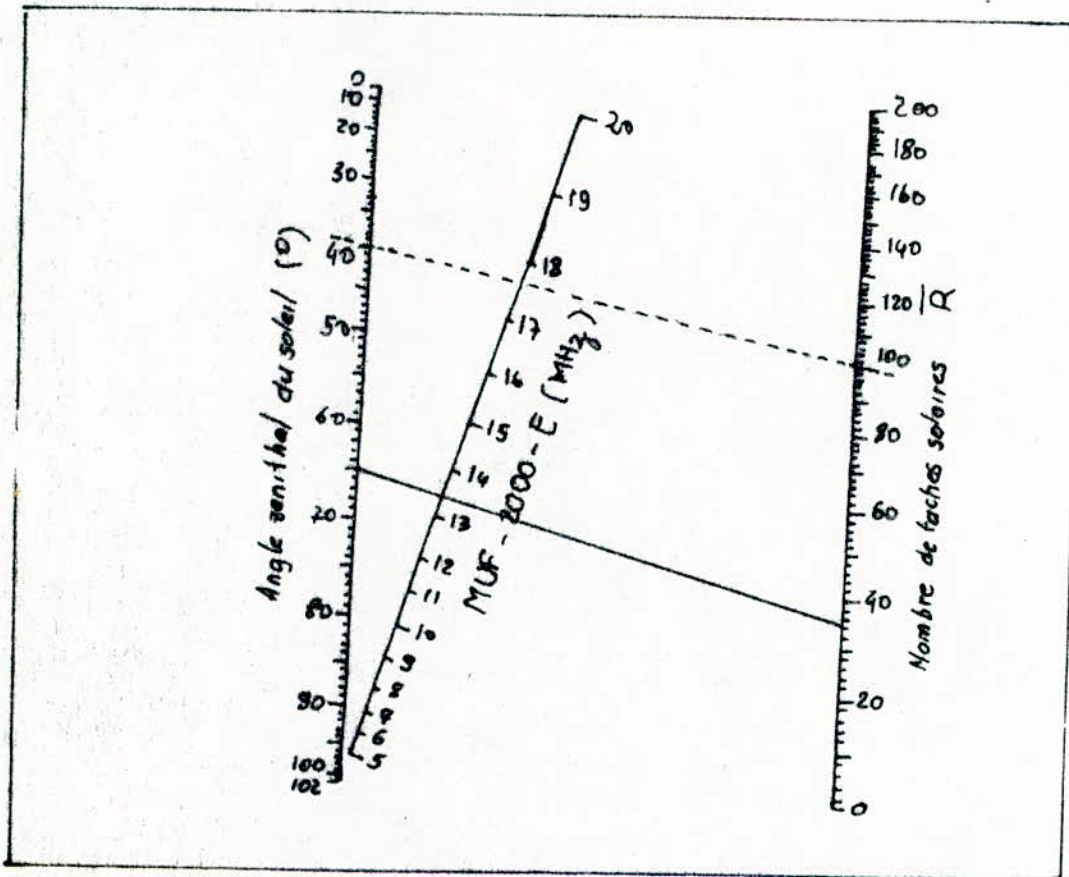


Figure 3 : MUF 4000 F_2 Longitude ($^\circ$).

le CRPL donne 24 cartes de la forme ci-dessus

12 pour $f_o F_2$, chacune correspondant a 1 heure paire de la journée
12 pour MUF 4000 F_2 " " "



ABAQUE I. / MUF pour un trajet de ~~la~~ par réflexion sur la couche E, en fonction du nombre de taches solaires et de l'angle zénithal.

$$(MUF \text{ pour } E)_{MAX} = MUF 2000 E = g(R, X(^{\circ}))$$

$$\text{Si } R = 44 \text{ et } X = 65^{\circ}$$

$MUF 2000 E = 13,4 \text{ MHz}$ (Pour Tous les points dont la latitude est $40^{\circ} N$, à 13h local, janvier 78)

Methode de prevision Americaine du C. R. P. L.

Abaque donnant la MUF pour un trajet de d km par reflexion sur E en fonction de: $MUF_{3000}E$ et d (km).

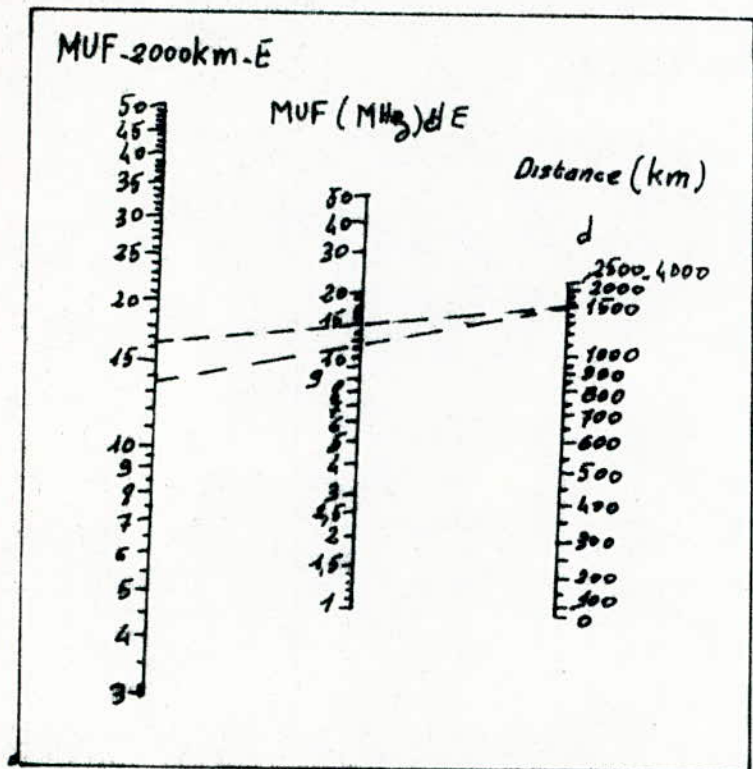


Figure 6: $MUF d'E = f(d, MUF_{3000}E)$

Exemple: notre point de reflexion sur E se trouve a une latitude $\delta = 40^\circ$

Pour le mois de Janvier 78, a 14h

$$X = 65^\circ$$

donc, d'après l'abaque 8 III $MUF_{3000}E = 13,8 \text{ MHz}$.

si la notre liaison est d'une distance d

$$d = 1500 \text{ km}$$

alors $MUF d'E = MUF_{1500}E = 12 \text{ MHz}$.

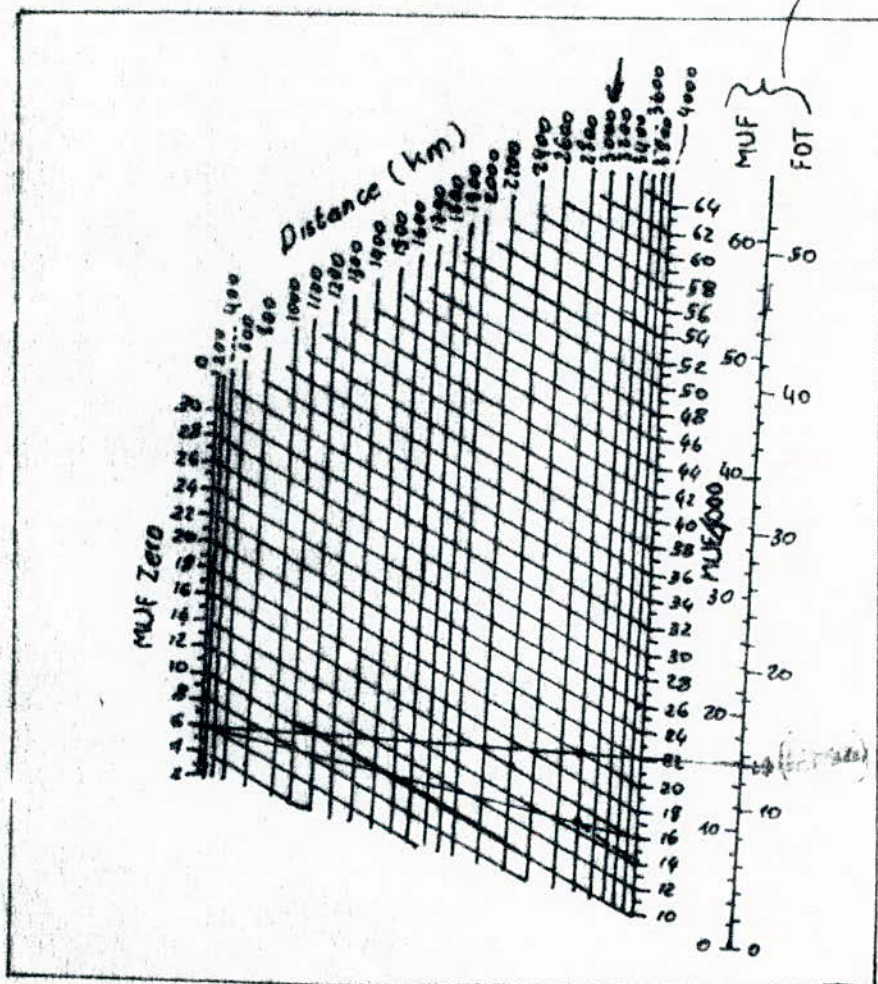
donc l'émission doit utiliser $f \leq 12 \text{ MHz}$

A braguette donnant la MUF pour un trajet de d km, par réflexion sur la couche F_2 , en fonction de la $MUF - 0000 km - F_2$ et de la $MUF - 4000 km - F_2$.

Equivalence entre MUF et F.O.T. (fréquence optimum de trafic)

Equivalence entre FOT et MUF.

$$FOT = 85\% MUF$$



si le point, utilisé pour la réflexion (ce point milieu du trajet) est à $P = 40^\circ N$ et $L = 105^\circ W$

A partir des figures 2 et 3 (pour 13h, janvier 78)

si ce point est utilisé, pour la réflexion, d'une liaison de 3000 km alors on tire de A_{III}

$$MUF_{3000 F_2} = 14,3 \text{ MHz}, FOT = 12,3 \text{ MHz}$$

ANNEXE 2 :PREVISION A COURT TERME DES CARACTERISTIQUES
D'EXPLOITATION,POUR LES RADIOCOMMUNICATIONS
IONOSPHERIQUES

Les prévisions à court terme consistent, à prévoir quelques heures ou quelques jours à l'avance :

- pérturbations magnétiques
- pérturbations ionosphériques
- variations des caractéristiques de l'ionosphère(f_cE , f_cF_2 , h_mF_2) par rapport aux prévisions à long terme.

Les prévisions des perturbations magnétiques et ionosphériques consistent :

- à prévoir à l'avance la date où elles se manifesteront
- à localiser la région de l'ionosphère où elles se produiront.

Les prévisions des variations des caractéristiques de l'ionosphère consistent à prévoir:

**pour une zone normalisée ou une liaison surveillée; les écarts par rapport aux prévisions à long terme (ie les valeurs qui ont été prévues, il y a de ça 3 mois).

1./ Prévision à court terme de l'activité solaire

L'activité solaire se manifeste par le nombre de taches solaires sur le disque solaire.

L'activité solaire est caractérisé par l'indice R (nombre de taches solaires)

1.1/ La prévision à court terme de l'activité solaire permet :

- d'indiquer la probabilité d'apparition d'éruptions solaires provoquant un accroissement de l'ionisation de la couche D.
- d'indiquer l'apparition possible des situations solaires provoquant susceptibles d'être suivis de perturbations magnétiques et ionosphériques.
- d'indiquer des variations à court terme du rayonnement ionisant du soleil, conduisant à des variations des fréquences critiques f_c donc des M.U.F.

1.2/ Prévision des zones (régions) actives du disque solaire susceptibles de donner naissance : à des éruptions de protons.

Les émissions du rayonnement optique, radioélectrique et des rayons X du soleil sont mesurés journallement dans les centres de l'I.U.W.D.S.

Ces observations sont utilisées par ces centres pour la prévision de l'activité solaire et de ses effets sur le comportement des systèmes de radiocommunications.

- Localisation des zones actives : du disque solaire où prendront naissance des éruptions H , ainsi que leur effet est prévue quelques heures et même quelques jours à l'avance grâce aux observations solaires , de ces centres régionaux.

- Début des éruptions : il peut-être annoncé par l'arrivée d'une onde de choc (dont la vitesse est d'environ 800 à 1000 KM/S)

- Les éléments de base, utilisés pour ces prévisions/
*Spectrohéliogramme solaire (H , calcium)

*Magnétogramme solaire

*Cartes radioélectriques établies pour des longueurs d'ondes centimétriques.

*Rapports quotidiens sur les éruptions H observées.

--*-* -*-*-* -*-*-*-* -*-*-*

2./ Prévision à court-terme des perturbations: magnétiques et ionosphériques.

Les résultats fournis par les observations solaire, les satellites et les sondes spatiales sont très utiles pour la prévision et la confirmation des perturbations magnétiques et ionosphériques.

--* Les observations effectuées à partir du sol, sur l'état du milieu interplanétaire servent actuellement à :

- prévoir le niveau général de l'activité magnétique.
- prévoir, ainsi, la perturbation ionosphérique associée à la perturbation magnétique.

--* Les observations de la couronne solaire sont utilisées: pour prévoir les modifications de l'activité géomagnétique plusieurs jours à l'avance.

-- Le début des orages géomagnétiques est associée à l'arrivée, d'une onde de choc et suivant la position de la sonde spatiale, cette onde peut-être détectée avant l'orage. L'onde de choc, c'elle qui donne naissance à des orages géomagnétiques et à des perturbations ionosphériques. La détection de l'onde de choc et la détermination de sa vitesse, dans le milieu interplanétaire, est faites à l'aide des mesures de scintillations interplanétaires des radiosources; ces radiosources sont utilisées pour prévoir (avec une bonne probabilité) l'instant du début brusque de l'orage géomagnétiques.

---- Exemple de données, permettant la prévision d'une perturbation de l'ionosphère, dont la conséquence est la P.C.A (ie, absorption de la calotte polaire) La P.C.A peut-être prévue quelques dizaines de minutes à l'avance, grâce à certaines données relatives aux éruptions H

ces données sont les suivantes :

- position de l'éruption sur le disque solaire, par rapport à la position des taches solaires.
- sursauts radioélectriques sur les longueurs d'ondes centimétriques, c'est à dire par le spectre de ces sursauts.
- rayons X durs observés par satellites.

La P.C.A peut-être confirmé par la mesure du flux de protons d'énergie supérieur à 10 Mev, par des satellites géostationnaires ou autres; on peut ainsi donner une alerte d'une perturbation magnétique.

----*--*--*--*--*

----*--*--*--*

3./ Prévision à court-terme des variations ionosphériques d'un jour à l'autre

On a observé des variations de 15 à 20% par rapport à la médiane mensuelle de f_oF_2 (caractéristique la plus importante) pendant des périodes calmes et pendant les orages magnétiques.

Ces variations, sont les écarts des caractéristiques de l'ionosphère prévues 3 mois à l'avance par rapport aux valeurs réelles (obtenues expérimentalement) de ces caractéristiques

4./ Conclusions sur certaines études et observations.

4.1/ Se fondant sur les données recueillies en 1965 et 1966 par les des engins spatiaux (pioneer 6 et 7), l'étude de la fiabilité, des données concernant, les particules recueillies par ces engins spatiaux comme indicateurs de l'activité du milieu situé entre le soleil et la terre, à trouvée une différence de 15° / entre la moyenne journalière, et les données d'observations rapides.

4.2/ Prévision à l'aide d'ordinateurs.

Le centre spécialisé, OT/ITS(USA), en se fondant sur des études faites par plusieurs spécialistes (ionosphériques) sur une méthode perfectionnée pour la prévision des perturbations magnétiques, à mis au point des programmes d'ordinateurs fondés sur:

-des paramètres solaires et géophysiques expérimentaux et théoriques. en vue en vue de prévoir, l'heure, l'emplacement, la probabilité et l'ampleur des variations ionosphériques causées par les éruptions solaires, les protons solaire et les orages magnétiques.

4.3/ Causes des variations de la hauteur hm (l'altitude du maximum d'ionisation) de F2 : hmF2

Davies en 1974, à proposé un modèle de variations dues aux orages magnétiques dans lesquels :

"une source de chaleur se trouvant dans la partie diurne de l'ovale auroral, donne naissance à un vent d'air neutre orienté vers l'équateur, ce vent soulève l'ionosphère à des niveaux où le taux de perte des électrons est faible. L'effet du vent, ayant une certaine force et une direction donnée, varie sensiblement avec la longitude en raison des grandes variations en longitude de l'inclinaison et de la déclinaison magnétique!"

Il en résulte, des variations importantes de la dérive ionosphérique verticale d'où, des variations de hauteur du maximum de la région F2.

4.4/ Quelques conclusions, sur les variations de la région F2.

Au cours des orages magnétiques, on à observé que les variations de la M.U.F aux latitudes basses, sont en général

plus petites que les fluctuations de f_cF_2 d'un jour à l'autre, pendant les jours calmes.

L'augmentation de f_cF_2 aux latitudes basses était composé, par une augmentation de h_mF_2 , si bien que les variations nettes de la M.U.F n'étaient pas considérables. On a aussi observé, qu'aux latitudes élevés, on a des modifications sensibles de la M.U.F et de la L.U.F. pendant les perturbations magnétiques.

4.5/ Méthode allemande de la "Deutsche Bundespost"

Elle est fondée, sur l'enregistrement continu des données relevées sur 20 circuits radioélectriques européens et extra-européens, en plus des méthodes de prévision de l'activité solaire et des perturbations magnétiques déjà décrites.

Toutes les 24 heures, on établit les pourcentages d'écarts par rapport aux prévisions à long terme (ie p valeurs des caractéristiques qui ont été prévues il y a de ça 3 mois) en fonction des événements solaire et géophysiques actuels et en fonction des conditions qui au même stade des cycles solaires précédents.

Comme les prévisions portent principalement sur des circuits faisant déjà l'objet de surveillance, on élimine ainsi l'influence des anomalies spatiales et la méthode est entachée des mêmes incertitudes que les méthodes mentionnées précédemment.

Cette méthode constitue une extrapolation des procédés anciens.

4 5./ Différents systèmes opérationnels (pour les prévisions à court-terme)

AUSTRALIE.

-La prévision se fait sur demande.

-Les prévisions se rapportent :

**aux évanouissements sur ondes courtes.

**aux perturbations magnétiques.

**indications générales sur l'activité solaire et géophysique.

**fourniture de prévisions supplémentaires (seulement aux usagers) selon les latitudes des circuits.

FRANCE

FRANCE

- Prévisions sur :

** l'activité solaire

** les orages magnétiques.

fournies par l'observatoire de Paris et du C.N.E.T (centre national d'étude des télécommunications), Meudon.

- Le C.N.E.T, département des mesures ionosphériques et radio-électriques, fait des prévisions :

** journalières et hebdomadaires sur: la M.U.F et LA
L.U.F.

pour la zone europe et la zone europe du nord.

R.F d'Allemagne

- Analyse sur les 24 heures passées et la prévision sur :

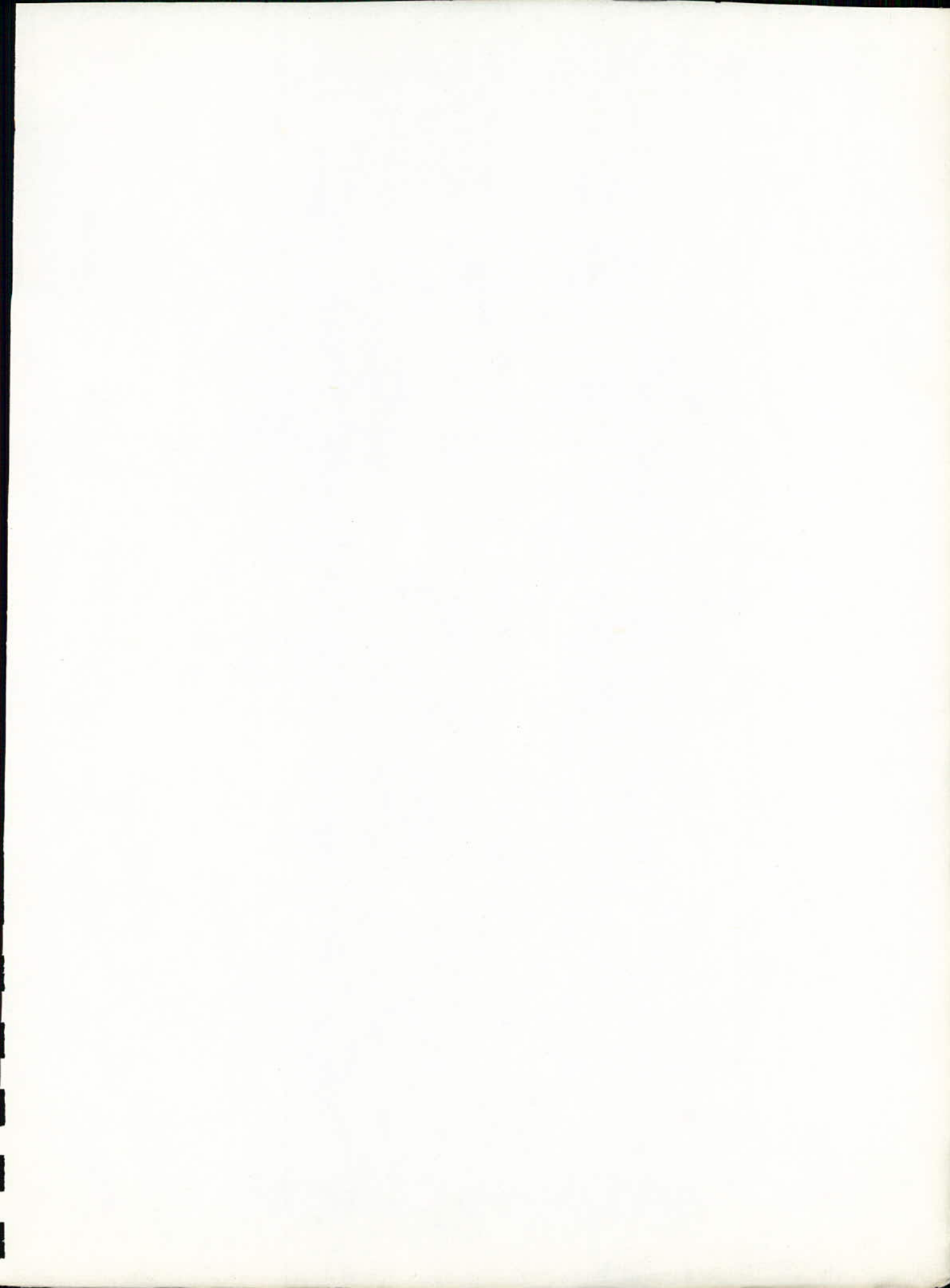
** l'activité solaire

** l'activité magnétique

** fcF2

** les conditions de propagations entre l'Allemagne
et 5 régions;

pour les 24 heures à venir.



MODIFICATION DE L'IONOSPHERE PROVOQUEE PAR DES
EMETTEURS A ONDES DECAMETRIQUES DE GRANDE PUISSANCE
(modification de la région F)

Cette modification consiste à perturber intentionnellement la température et la densité électronique dans la région F. Cette perturbation artificielle de la région F est réalisée en émettant du sol des émissions à ondes décimétriques de grande puissance.

L'émission se faisant normalement, à incidence nulle, devra donc avoir une fréquence supérieure à la fréquence critique de la couche E, de sorte que l'émission traverse E et se réfléchisse sur F.

1./Effets de l'onde décimétrique de G.P. sur la couche F

La couche ionisée F constitue un plasma, c'est-à-dire une couche ionisée soumise à un champ magnétique.

- Aux altitudes de la couche F :
- * la densité gazeuse est d'environ 10^9 particules/cm³
- * les particules neutres sont : O₂, O, N₂ et He
- * les particules ionisées ; principalement l'oxygène atomique
- * la densité moyenne des électrons est d'environ 10^6 el/cm³
- * la fréquence du plasma f_{Nest}

..... Les électrons et les ions sont soumis à des oscillations naturelles à leur fréquence de plasma respectives. Lorsque l'onde radioélectrique de fréquence traverse l'ionosphère à la recherche de la résonance naturelle on :

a./ Sous l'influence du passage de l'onde radioélectrique un mouvement oscillatoire à la fréquence f est communiqué aux ions et aux électrons du plasma. En conséquence, il y a absorption d'une partie de l'énergie provenant de l'onde en raison des chocs entre les particules tandis qu'une autre partie est re-rayonnée.

b./ Au voisinage de la résonance naturelle, c'est-à-dire au voisinage de l'altitude où la fréquence de plasma est voisine de celle de l'onde radioélectrique f : il y a absorption notable à cause du ralentissement de l'onde (vitesse de groupe diminuée) ce qui augmente la possibilité de chocs des électrons avec les autres particules.

En conclusion, on peut donc dire que cette énergie, extraite de l'onde radioélectrique, augmente "l'énergie thermique des électrons qui est aléatoire";

..... Conséquences sur le plasma F
Au voisinage de l'altitude, où, sera réfléchi l'onde de fréquence f , il y a donc une augmentation de l'énergie thermique des électrons.
À mesure, que la température augmente, la pression du plasma augmente, et, étant donné que les électrons sont contraints, par le champ magnétique terrestre de suivre un trajet en spirale selon les lignes de forces du champ : le plasma se détend, donc, le long de ces lignes de forces, jusqu'à ce que la pression retombe au niveau du milieu environnant.

2./- Effets des ondes électromagnétiques de G.P. sur la structure de F.

Lorsque, ces émetteurs de grandes puissances sont mis en marche, il y a apparition :

-d'une zone perturbée dans la région F, qu'on appelle, "F diffus", c'est une zone où on a des irrégularités de densité électronique.

-des irrégularités de la densité alignée le long des lignes de forces du champ magnétique terrestre.

-la profondeur et le taux d'évanouissement de signaux radioélectriques traversant cette région augmentent.

3./Avantages de cette modification voulue de l'ionosphère.

L'avantage, de cette modification de l'ionosphère, par des émetteurs de grandes puissances, et, qui utilisent des ondes décadiques et des ondes qui sont réfléchies par l'ionosphère, est, la production dans une zone de la région F; des irrégularités d'ionisation.

Ces irrégularités, ont la propriété importante, qui est la diffusion des ondes radioélectriques, qui se fait dans toutes les directions.

Les irrégularités alignées le long des lignes de forces, sont utilisées pour assurer diverses transmissions : télégraphie, télén, fac-similé, impulsions, entre des points au sol séparés par des milliers de km, sur des fréquences allant des ondes décadiques aux ondes métriques, qui, sans cela n'auraient pu être employées sur ces trajets ionosphériques.

Les irrégularités alignées le long des lignes de forces du champ produisent un effet réflecteur comparable à celui d'un radar à portée transversale (10^5 à 10^9 m²) - sur 250 à 300 km

Dans la région F, la diffusion par la zone perturbée "F diffus"

est assez nettement sensible à la directivité. Ainsi les

où sont reçus les signaux sur la terre, grâce à ce mécanisme de diffusion, dépendent en partie de la position géomagnétique et de la hauteur de la région de l'ionosphère, qui a été modifiée. En général, les signaux peuvent être reçus dans une zone située du côté équatorial de la région modifiée, zone très étendue dans la direction Est-Ouest et pouvant atteindre 4000 km, alors qu'elle n'est que de 200 à 500 km dans la direction Nord-Sud.

4./I vénients de cette modification.

L'inconvénient de cette modification de l'ionosphère, risque d'augmenter les brouillages, allant des ondes décamétriques aux ondes décimétriques, dans les régions modifiées.

Le fait que la diffusion, intervient dans toutes les directions on risque de voir, l'énergie d'un émetteur au sol, diffusé dans l'espace, ie, qui risque de brouiller les réceptions des satellites

5./Exemple d'expérience pratiques déjà utilisé

C'est depuis 1970, qu'on a utilisé des émetteurs de grande puissance installés au sol, et fonctionnant dans la bande décimétriques, pour modifier intentionnellement, la température des électrons et leurs densité (due à la dilatation de la zone perturbée de la région F.)

Des expériences pratiques, ont prouvées que des puissances beaucoup moins élevées, que celles qui avaient été déterminées par des études théoriques, suffiraient à produire des modifications de l'ionosphère, et, que des signaux traversant la région perturbée ou diffusée par elle, pouvaient être affectés dans une gamme de fréquences étendue, allant jusqu'à 437 MHz.

.....Exemple de puissance utilisé, ayant entraîné des modifications importantes.

**On a utilisé, une puissance moyenne de 2 MW et une antenne ayant un gain d'environ 18 dB_i (ie, fournissant une puissance apparente rayonnée, p.a.r., d'environ 100 MW)

**p_m = 150 KW g = 8dB_i (p.a.r. = 0,5 MW)

Pour ces deux (2) niveaux de puissance, le "F diffus", et les irrégularités de la densité le long des lignes de force du champ magnétique, se produisent, quelques secondes après la mise en fonctionnement de ces émetteurs.

2./ METHODE DE BROUILLAGE

La transmodulation ionosphérique

Comment brouillée une émission utilisant la réflexion sur l'ionosphère ou encore comment rendre un signal inexploitable à la réception, la méthode la plus simple est d'affaiblir le champ électrique suffisamment.

L'affaiblissement est une conséquence de l'absorption des couches inférieures de l'ionosphère (D,E), qui elle-même est due aux chocs des électrons avec les autres particules, enfin de compte l'affaiblissement est une conséquence du choc des électrons.

PRINCIPE DE LA TRANSMODULATION

Elle consiste, à envoyer des émissions de grande puissances avec des fréquences de manière à être réfléchis par la couche D ou E, vers une région de l'ionosphère où on veut brouiller les émissions traversants cette région.

Ces émissions de grandes puissances, provoquent une perturbation de la température des couches D ou E (dans une couche) où le nombre de chocs des électrons par secondes \checkmark est élevé.

Cette augmentation de la température à pour conséquence :

- la modulation de la fréquence de collisions des électrons \checkmark , qui à pour conséquence la modulation de la conductivité \checkmark de cette région perturbée et comme le facteur d'atténuation \checkmark est proportionnel à cette conductivité il sera lui aussi modulé, donc une augmentation de l'affaiblissement.

Le taux de modulation de la fréquence de collisions des électrons est proportionnel à la puissance de ces émissions brouilleuses.

La transmodulation ionosphérique consiste donc à augmenté la fréquence de collisions des électrons des couches D ou E, de manière à augmenté l'absorption de celles-ci et ainsi à augmentér l'affaiblissement des ondes traversant la région perturbée pour aller se réfléchir sur E ou F.

- 3./ PROPAGATION IONOSPHERIQUE A GRANDE DISTANCE

1./ avec réflexions intermédiaire sur le sol

Les liaisons à grandes distances, ie $d > 4000$ KM, on utilise comme récepteur-réémetteur intermédiaire, le sol (voir fig) Le calcul des fréquences se fait en décomposant cette liaison à grande distance, en liaison élémentaire de distance maximale, ie 2000 KM pour E et 4000 KM pour F2,.

Exemple (voir figure 2): soit une liaison, $d = 8000$ km -supposant qu'on utilise la couche F2, dont la portée maximale est de 4000 KM.

*sur une carte mondiale on repère le point I1 où se fait la première réflexion, pour une liaison de 4000 KM (ie que l'émetteur se trouve à 2000 KM) à partir des prévisions on détermine la fréquence, soit f_1 ;

*on refait le même procédé pour le point I2 (car les prévisions fournies par les centres spécialisés, donnent pour n'importe quel point de l'ionosphère la fréquence à utiliser suivant la distance de la liaison)

Pour relever les fréquences sur les cartes de prévisions on utilise une carte mondiale donnant les écarts horaires entre les différents points du globe (par exemple si pour notre liaison, on utilise une réflexion au dessus de la France, il faudra relever sur les cartes de prévisions la concernant, la fréquence à une heure = à notre heure local pendant l'émission + 60 minutes).

Parmi les deux (2) fréquences relevées on prendra la plus petite, pour éviter le risque que l'onde ne traverse la couche.

La d.p.I fait des prévisions sur 130 liaisons de ce genre dont les distances vont de 4000 à 12000 km.

2./ Sans réflexion intermédiaire sur le sol

Il existe des modes de propagation par les régions ionosphériques normales, dans lesquels les ondes décimétriques peuvent parcourir de grandes distances, dans l'ionosphère ou en dessous, en suivant des trajets de faible absorption ne comportant aucune réflexion intermédiaire sur le sol.

2.1-Propagation suivant le rayon de Pedersen.

C'est une propagation normale à un seul bond, utilisant des rayons émis sous de grands angles.

Il ressort des données expérimentales:

A./La propagation à un seul bond suivant le rayon de Pedersen se produit fréquemment jusqu'à 5600 KM, pendant les jours d'été

b./ La limite supérieur de la distance de propagation suivant le rayon de pèdersen(à un seul bond)peut facilement dépasser 7500 KMDans les régions tempérées et 10000 KM dans les régions équatoriales.

2.2-Propagation favorisée par l'inclinaison des couches/

Les ondes décamétriques peuvent se propager sur de grandes distances selon des modes favorisés par l'inclinaison longitudinale des couches de l'ionosphère.

L'inclinaison d'une couche ionosphériquepeut provoquer, par réfraction, soit le retour d'un rayon vers la terre soit sa propagation au dessus de la surface terrestre avant qu'il ne pénètre à nouveau dans l'ionosphère et ne subisse une nouvelle réfraction qui le ramènera vers la surface.

Ce type de propagation permet d'envoyer un signal qui peut atteindre un point situé à l'antipode du point où il a été émis.

2.3- On distingue aussi une propagation guidée de l'ionosphère, qui peut dans certain cas provoquer la propagation autour de la terre d'une onde radioélectrique.

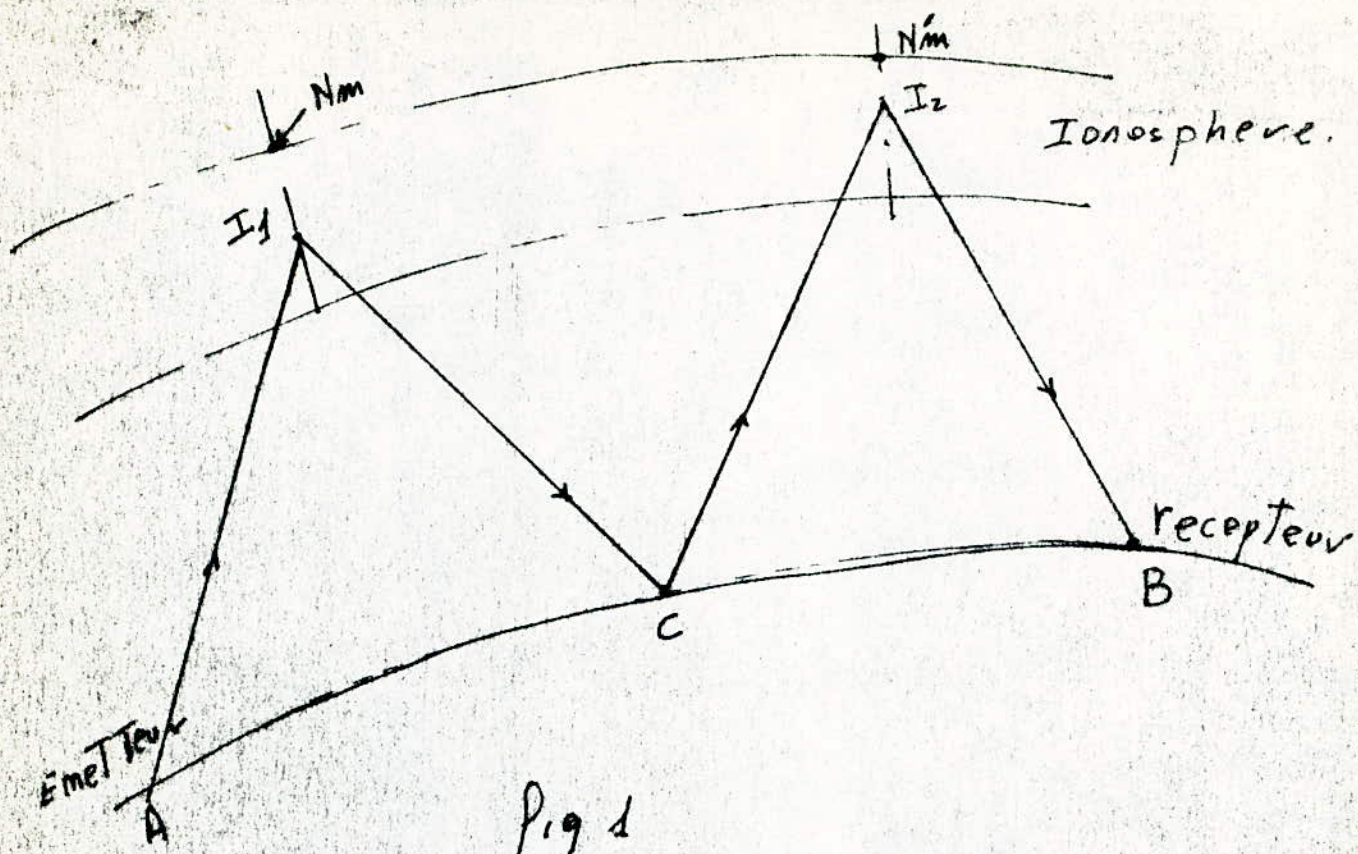


Fig 1

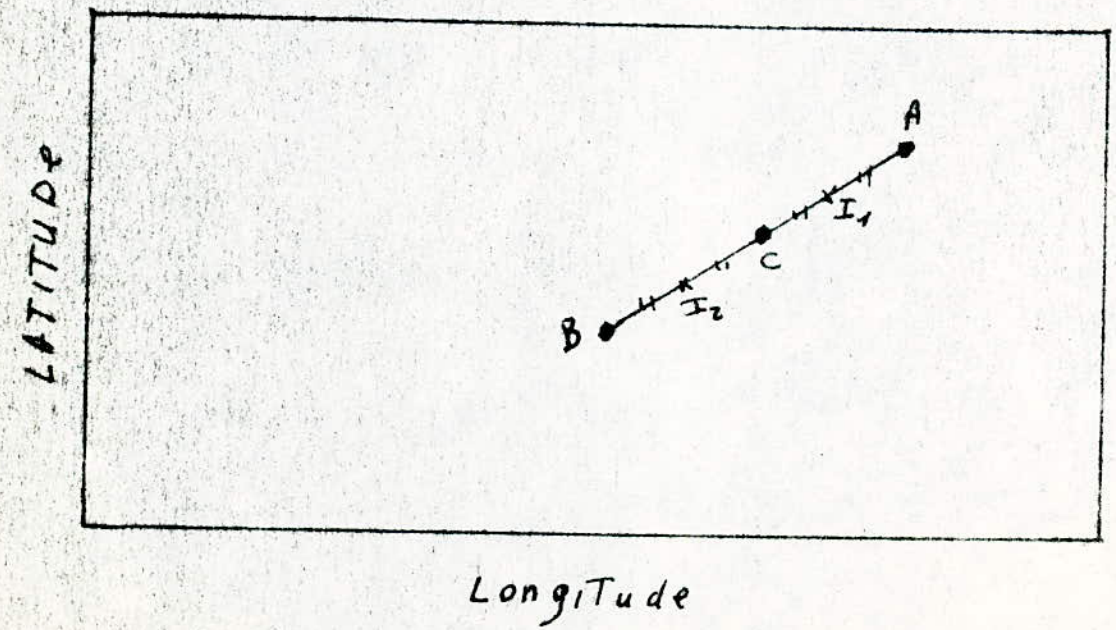


Fig 2.