

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT

ELECTRONIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

ETUDE DES GUIDES
TROPOSPHERIQUES
PAR TRACE DE RAYONS

Proposé par :

K. SAADA

Etudié par :

**M. ZERKOUK
R. TADJINE**

Dirigé par :

K. SAADA

PROMOTION :

JANVIER 1986

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

Nos remerciements vont particulièrement à notre promoteur Monsieur Khemis SAADA pour nous avoir bien suivi et mis à notre disposition tous les moyens nécessaires pour notre thèse

Que Monsieur Ali ZERKOUK trouve ici l'expression de nos plus vifs remerciements pour avoir assuré la dactylographie et le tirage de cette thèse

Nous tenons à remercier tous qui de près ou de loin ont collaborés d'une manière quelconque à la bonne marche de ce travail

Nous sommes reconnaissant à tous les personnes du département d'Electronique pour la compréhension dont ils ont fait preuve.

- S O M M A I R E -

INTRODUCTION ,	1
I - PHYSIQUE DE LA BASSE ATMOSPHERE ,	2
1. Indice de réfraction de la troposphère ,	2
2. Interaction onde radioélectrique - Atmosphère ,	9
3. Réfraction troposphérique ,	13
4. Portée optique et radioélectrique ,	24
II - ETUDE THEORIQUE DES GUIDES ,	26
1. Formation des conduits troposphériques ,	26
2. Equation des trajectoires ,	28
3. Conditions météorologiques favorables à la formation des conduits troposphériques ,	36
4. Interet des guides troposphériques dans la telecommunication ,	38
III - ETUDE DES GUIDES TROPOSPHERIQUES PAR TRACE DE RAYONS,	39
1. Méthode pas à pas ,	39
2. Méthode analytique ,	42
IV - ETUDE EXPERIMENTALE ,	45
1. Données et mesure de l'indice de réfraction ,	45
2. Tracé des trajectoires ,	46
CONCLUSION ,	65
ANNEXES	
A. Théorie des modes ,	66
B. Propagation en espace libre ,	69
C. Programmes de simulation ,	73
BIBLIOGRAPHIE ,	80

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

Les ondes d'espace , ondes directes , se propagent en ligne droites et necessitent donc une ligne de vue entre l'emetteur et le recepteur . Or l'atmosphère est un milieu caracterisé par son indice de réfraction qui est lié directement aux paramètres météorologiques . Un changement d'indice de réfraction de l'atmosphère pourrait altérer la trajectoire rectiligne . Il arrive que dans certaines conditions météorologiques , ils se forment des guides atmosphériques , identiques à des guides metaliques mais d'epaisseurs plus grandes allant de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres .

Une onde émise par une antenne située dans la zone de guidage sous un angle très faible ne dépassant pas quelques degrés peut être guidée , d'où concentration de l'energie radio-electrique dans une zone concentrique à la terre . Par consequent les portées seront extrêmement grandes .

Dans ce travail nous allons étudier ces guides par une méthode approximative qui est la méthode de tracé de rayons . Celle-ci nous permet de reconstituer la trajectoire de l'onde par une succession de segments de droites . Pour cela il nous faudra connaître la variation de l'indice de réfraction de l'atmosphère avec l'altitude . Des sondages troposphériques sont alors necessaires . De plus ils doivent être assez précis , suffisamment fréquents , et étendus sur des surfaces assez larges .

Le travail decrit dans ce mémoire a été effectué à l'ENP dans le departement d'Electronique . Il represente à notre connaissance , la première tentative d'etude de guides atmosphériques ainsi, il nous a permis de développer notre savoir dans le domaine des télécommunications .

- I - PHYSIQUE DE LA BASSE ATMOSPHERE

Introduction

Nous avons constamment supposé que l'atmosphère est un milieu diélectrique et parfaitement "transparent" n'affectant pas les conditions de propagation des ondes électromagnétiques. Historiquement cette hypothèse a régné jusqu'à 1930 environ quand les travaux de Jouaust et de ses continuateurs ont commencé à dévoiler le rôle de la troposphère sur la propagation des ondes radioélectriques.

La troposphère est la première couche de l'atmosphère (fig 1.1) dans laquelle se forment les nuages et qui s'étend du sol jusqu'à une altitude d'une dizaine de kilomètres.

I.1 Indice de réfraction de la troposphère

Si l'atmosphère était un milieu homogène, caractérisée par un indice de réfraction n identique en chaque point d'espace, les rayons électromagnétiques seraient comme dans le vide, rectilignes. Dans la réalité cet indice varie, et les rayons électromagnétiques sont curvilignes.

I.1.1 Loi de variation de l'indice de réfraction

n varie autour de l'unité, selon une loi traduite par la formule expérimentale :

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = 77,6 P/T - 6 e/T + 3,75 \cdot 10^5 e/T \quad (I.1)$$

où

- P : pression atmosphérique exprimée en millibar
- T : la température absolue en degré kelvin
- e ; pression partielle de vapeur d'eau en millibar

Comme la quantité $n-1$ est très petite, on utilise habituellement une quantité N qui est 10^6 fois grande et qu'on appelle coindice de l'air, exprimé en unité de N .

Dans la relation précédente (I.1). Le second terme peut être négligé car ($P = 1000$ mbars et $e = 10$ mbars), on aboutit ainsi à la formule adoptée à l'échelle internationale.

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = 77.6 (P + 4810 \cdot e/T) / T \quad (I.2)$$

Au niveau de la mer la valeur de N est d'environ 300

L'humidité de l'air peut s'exprimer de plusieurs autres façons, ce qui donne autant de formes différentes à l'expression de N . En particulier on peut utiliser :

I. L'humidité spécifique qui est le rapport de la masse de vapeur d'eau mélangée à l'air, à la masse de l'air humide.

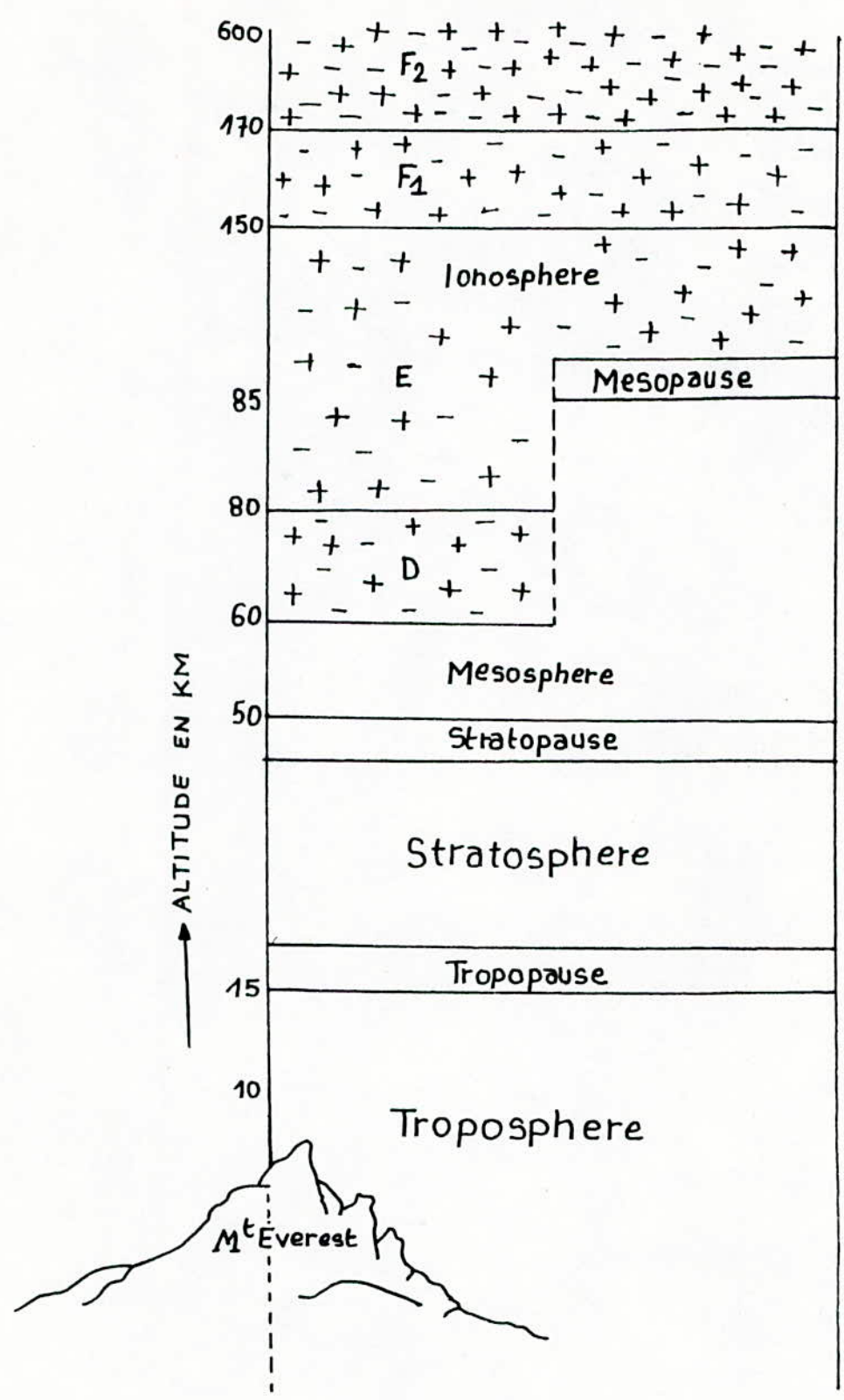


Fig I.1

Elle est exprimée par la relation suivante.

4

$$S = 622 \frac{e}{P} \quad (\text{g/Kg})$$

2. Le rapport de mélange qui est le rapport de masse de vapeur d'eau mélangée à l'air, à la masse de l'air sec correspondant, il est exprimée par la relation suivante :

$$R = 622 \frac{e}{P-e} \quad (\text{g/Kg})$$

c'est cette quantité qui est fournie par les services météorologique

3. L'humidité relative qui est le rapport entre la tension de vapeur d'eau existante et la tension de vapeur d'eau saturante à la même température.

Le calcul du rapport de mélange saturant est donné par la relation approchée :

$$\text{Log}_{10} S_0 = 12,22 - \text{Log}_{10} P - \frac{2360}{T}$$

l'humidité relative est exprimée en 100 (e/es) %

L'expression de N comprend deux termes :

Le premier terme qui ne dépend pas de l'humidité est appelé "terme sec" le deuxième est appelé "terme humide".

Les monogrammes des fig I.2 et I.3 permettent de calculer séparément les termes sec et humide, ce dernier étant obtenu à partir de l'humidité relative.

I.1.2 Indice au sol N_s et indice réduit au niveau de la mer N_0

L'indice de réfraction au voisinage du sol joue un rôle particulier parcequ'il est facile à mesurer et que certaines méthodes de prévisions de propagation sont basées sur son utilisation.

Cependant, comme les stations météorologiques sont situées à des altitudes diverses, il paraît préférable de prendre le niveau de la mer, comme altitude de référence et de calculer N_0 pour celle-ci.

Pour cela, on doit faire une hypothèse sur la variation de l'indice avec l'altitude. On admet généralement que l'indice N est une fonction exponentielle de l'altitude ce qui peut être considéré seulement comme une approximation assez grossière au voisinage du sol

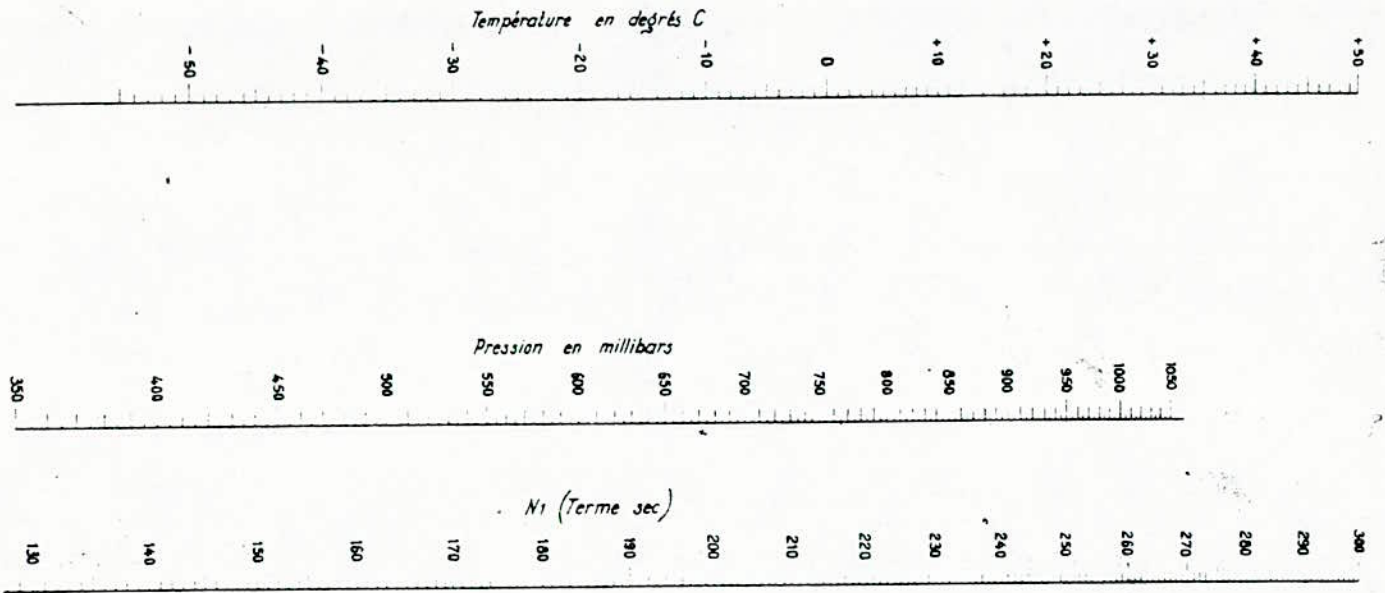


Fig. 12 Indice de réfraction de l'air N_1 (terme sec).

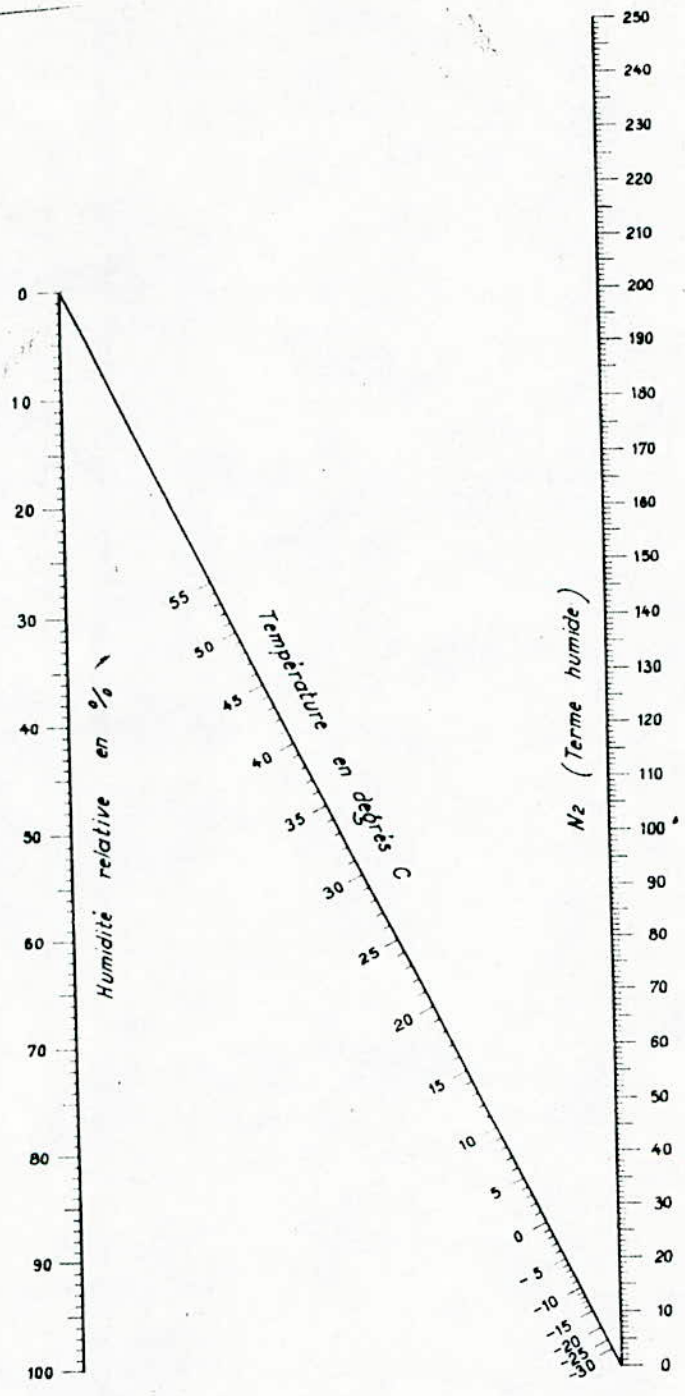


Fig. 13 Indice de réfraction de l'air N₂ (terme humide).

I.1.3 Atmosphère de référence pour la réfraction et atmosphère réelle.

Quand l'altitude croit, en générale l'indice de réfraction décroît et tend vers l'unité et par conséquent, N tend vers zéro. Cependant cette loi de décroissance moyenne est souvent considérablement perturbée dans les basses couches de l'atmosphère. Pour simplifier on peut dire que la décroissance moyenne est déterminée par celle de la pression, alors que les variations autour de la valeur moyenne sont dues aux irrégularités de la température et de l'humidité.

La loi de décroissance de la pression étant exponentielle. Il en est de même pour la loi moyenne de l'indice de réfraction on a été conduit à définir une atmosphère de référence pour la réfraction. Le C.C.I.R (comité consultatif des radio communications) a choisi la loi suivante :

$$N(h) = 315 \exp(-0,136 h)$$

la hauteur h étant exprimée en kilomètres. Cette formule donne un gradient moyen (dN/dh) de - 40 N/Km sur le premier kilomètre.

La figure (I. 4) nous donne quelques profils d'indice de l'atmosphère ayant subi dans le temps des variations importantes comportant une partie périodique (du jour, annuelle) et une partie non périodique liée aux conditions météorologiques locales.

I.1.4 Troposphère standard

En moyenne, dans les basses couches de l'atmosphère et dans les climats tempérés la pression, la température et l'humidité varient linéairement avec l'altitude.

A partir de cette constatation expérimentale nous construisons un modèle physique que nous appelons TROPOSPHERE STANDARD qui possède les propriétés moyennes de la troposphère réelle et qui nous servira à étudier d'une manière aussi simple que possible les phénomènes de propagations.

Précisons que la troposphère standard est une troposphère STRATIFIEE dont l'indice n est fonction de l'altitude seulement. Elle est aussi une troposphère normale dans laquelle l'indice n obéit à une variation régulière en fonction de l'altitude h sans discontinuité, ni variation brusque de (dn/dh).

I.1.5 Gradient vertical de l'indice de réfraction de l'air

On appelle gradient, le taux de variation d'un élément en fonction de la distance (dans le sens vertical).

Comme la pression, la température et l'humidité varient avec l'altitude (pour un point et un instant donnés), l'indice de l'air varie aussi avec l'altitude, et la valeur de sa dérivée verticale à une grande importance en propagation. On peut alors écrire :

$$\frac{dN}{dh} = \frac{A}{dh} P + \frac{B}{dh} T + \frac{C}{dh} R$$

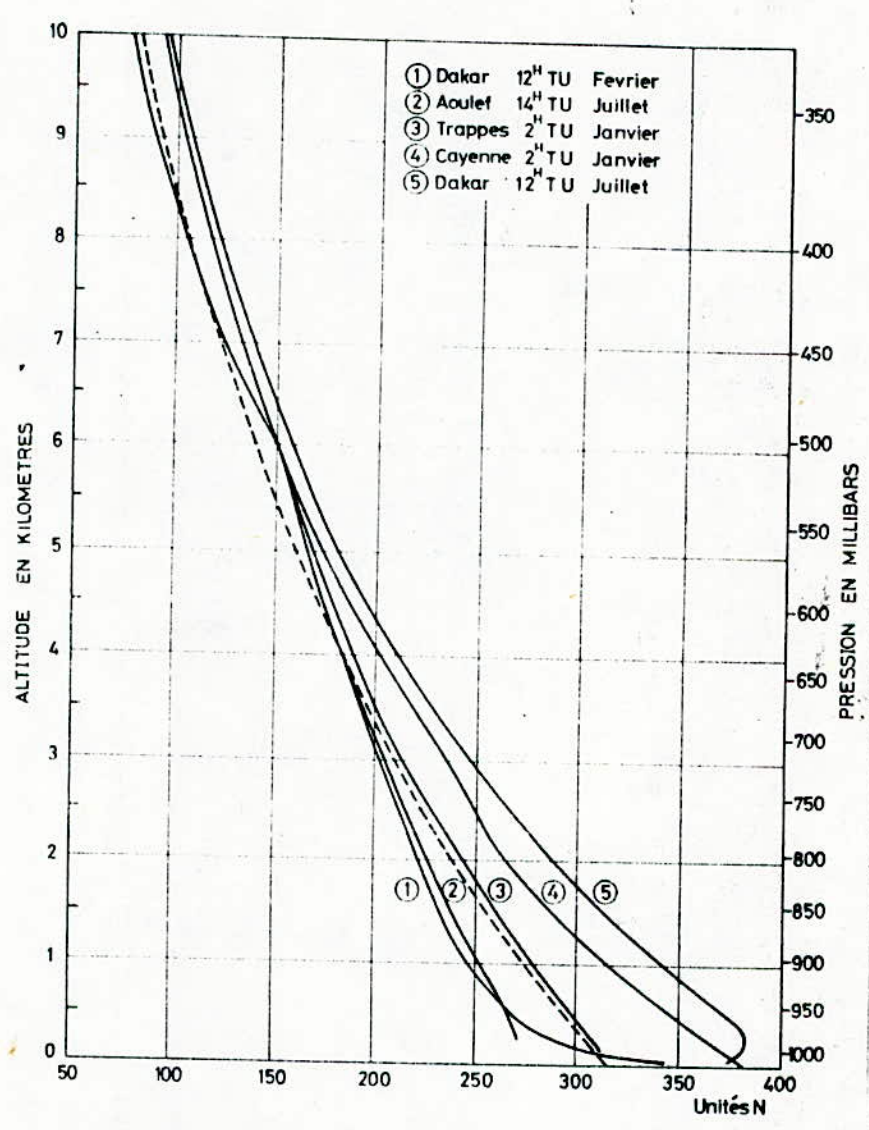


Fig. 1.4 Exemples de profils d'indice de réfraction (moyennes mensuelles).
--- Atmosphère de référence pour la réfraction (CCIR).

A, B et C sont les dérivées partielles de N par rapport aux trois variables P, T, R (équation I.2) et ont les signes suivants :

$$A > 0 \quad , \quad B < 0 \quad \text{et} \quad C > 0$$

Les gradients verticaux de pression, de température et d'humidité sont en générale négatifs, mais les deux derniers peuvent devenir positifs dans certaines situations météorologiques le gradient de N est généralement négatif, mais peut varier dans de très grandes limites.

Signalons que les dérivées partielles de l'indice de réfraction ont des valeurs qui varient assez peu dans la basse couche de l'atmosphère et on peut quelque fois prendre l'approximation suivante :

$$\frac{dN}{dh} = 0,35 \frac{dP}{dh} - 1,3 \frac{dT}{dh} + 7 \frac{dR}{dh}$$

dans laquelle la pression est exprimée en millibar, la température en degrés Celcius et l'humidité en grammes de vapeur d'eau par kilogramme d'air.

La fig (I.5) donne des exemples de lois de repartition statistique du gradient moyen sur les 100 premiers mètres, en trois points de latitudes différentes, on voit que la gamme de variation est extrêmement grande

Remarquons que compte tenu des signes de A, B et C les valeurs fortement négatives du gradient vertical seront obtenues lorsqu'on aura au moins l'une des conditions suivantes :

$\frac{dT}{dh}$ positif (inversion de température)

$\frac{dR}{dh}$ très négatif (couche d'air sec surmontant une couche d'air humide)

I.2 Interaction onde radio électrique Atmosphere

I.2.1 Stabilité de la Troposphère

Dans une épaisseur d'atmosphère limitée aux basses couches, on peut utiliser la formule pratique :

$$N = 0,35 \Delta P - 1,3 \Delta T + 7 \Delta R$$

Les variations de pressions ΔP et de température ΔT peuvent être considérées comme négligeables à côté des variations d'humidité ΔR qui jouent un rôle prépondérant. La vapeur d'eau dans l'atmosphère provient du sol par évaporation, elle tend à se diffuser lentement dans une atmosphère calme. Elle est au contraire beaucoup plus rapide en atmosphère turbulente. Il en résulte que le taux d'humidité varie peu en zone turbulente et qu'il peut au contraire avoir un fort gradient vertical en zone stable. Ces quelques indications permettent de distinguer deux situations différentes, zone turbulente et zone stable.

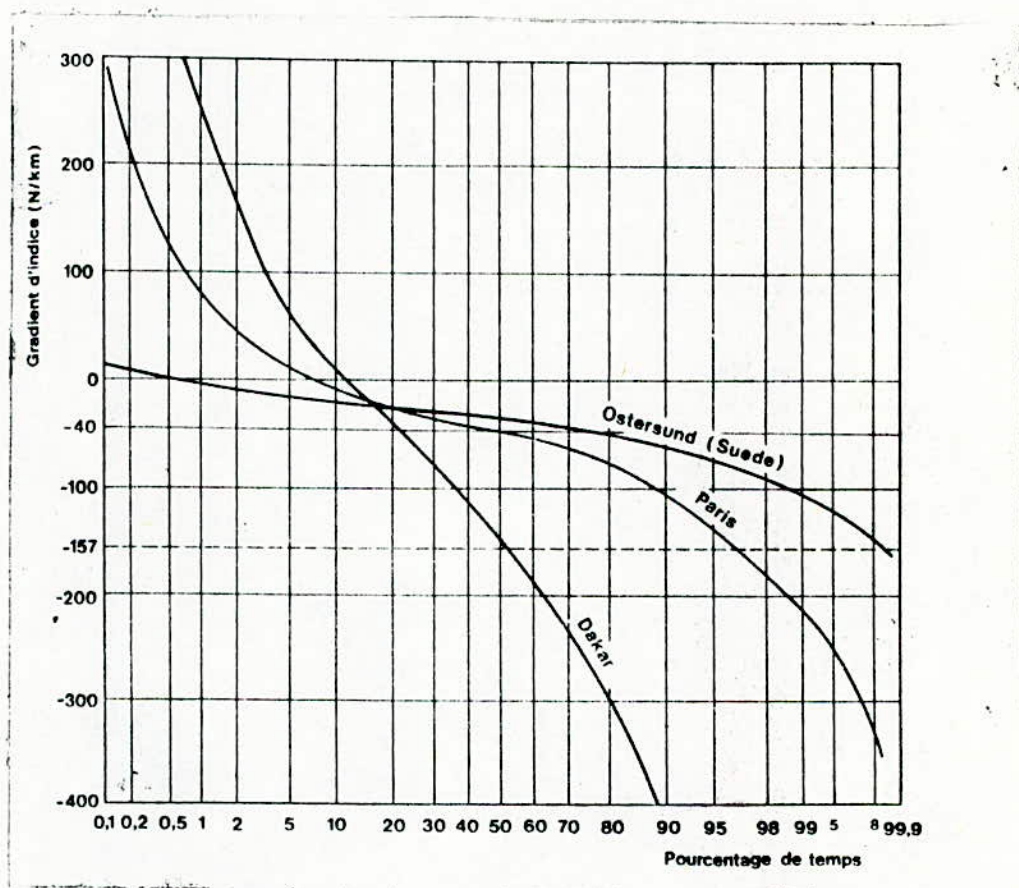
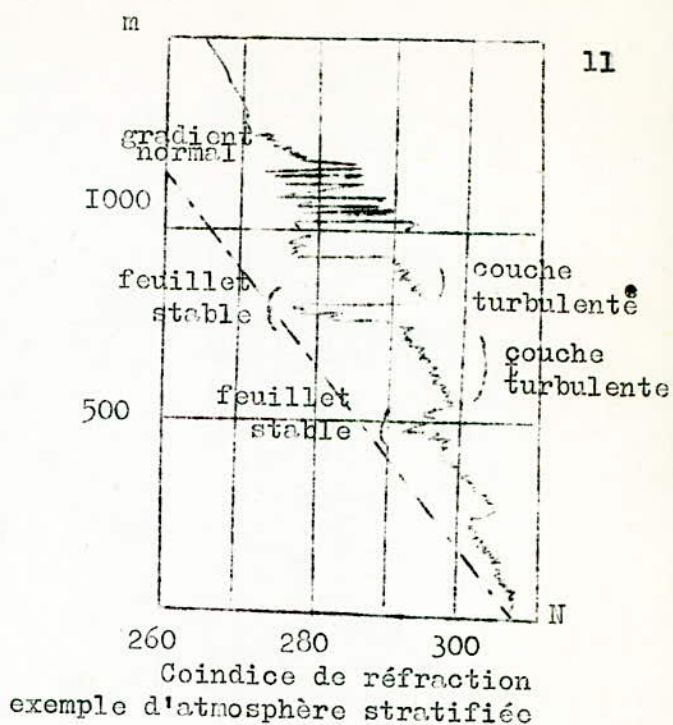


Fig I. 5

Une représentation assez plausible de l'atmosphère correspond donc à une superposition dans l'espace de zones à feuillets stables et de zones à couches turbulentes (fig ci-contre)

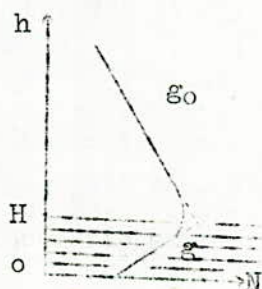


a/ Couches stables

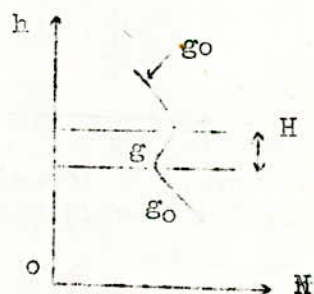
Les feuillets stables peuvent avoir des caractéristiques très variables. Leurs épaisseurs peuvent prendre des valeurs très dispersées. Lorsque cette couche est grande et la variation d'indice importante, on parlera plutôt de couches d'inversion du gradient d'indice. Lorsque l'épaisseur est faible on parlera de feuillets stables et on peut considérer que la variation d'indice S_n se fait sur une épaisseur e très faible pour pouvoir envisager une discontinuité du gradient d'indice tel que $S_g = S_n/e$. Les dimensions des feuillets stables sont généralement moins importantes que celles des couches d'inversions, leurs surfaces sont souvent irrégulières, sous l'influence des mouvements des couches turbulentes adjacentes.

b/ Couches turbulentes :

Les mouvements turbulents de l'atmosphère sont liés aux fluctuations du gradient de vitesse du vent :



(a) Dans une couche d'inversion le gradient réel diffère du gradient moyen dans une grande épaisseur



(b) Dans un feuillet une variation du gradient n'intéresse qu'une épaisseur plus faible

Dans une couche d'épaisseur h grande par rapport à la longueur d'onde λ , il peut se présenter un gradient vertical d'indice g tel que la courbure de la trajectoire de l'onde soit suffisante pour renvoyer le rayonnement vers la terre

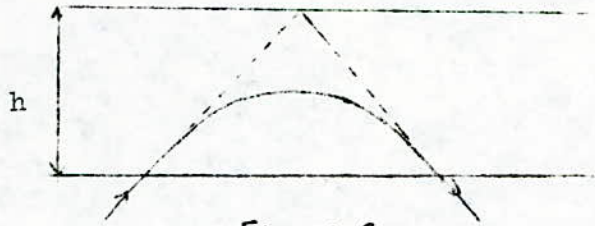


Fig I. 6

La réfraction se traduit alors par une réflexion graduelle totale. Fig (I.6)

I.2.3 Réflexion partielle

Si l'épaisseur du feuillet est au contraire faible devant la longueur d'onde, le phénomène est approximativement relatif à une réflexion sur une surface de discontinuité de l'indice de refraction. L'angle d'incidence formé par le rayon incident et la surface de la couche est faible mais en générale inférieur à l'angle limité correspondant à une réflexion totale. Fig (I. 7)

Le coefficient de réflexion en amplitude r est exprimé en fonction de la discontinuité d'indice S_n par la formule approximative

$$r = \frac{S_n}{2 \sin^2 \alpha}$$

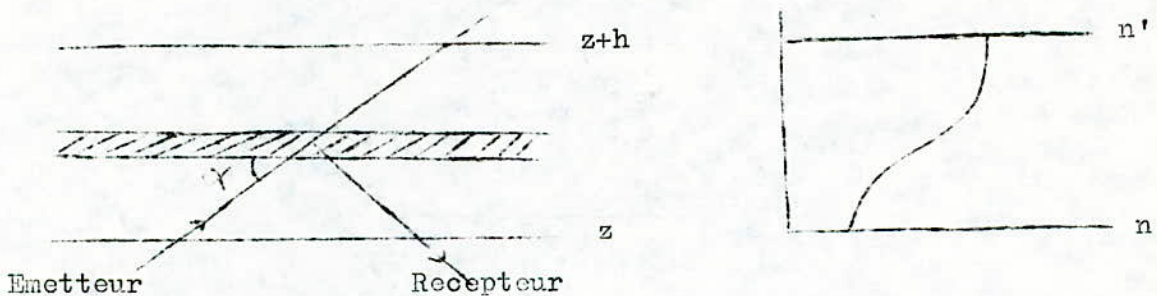
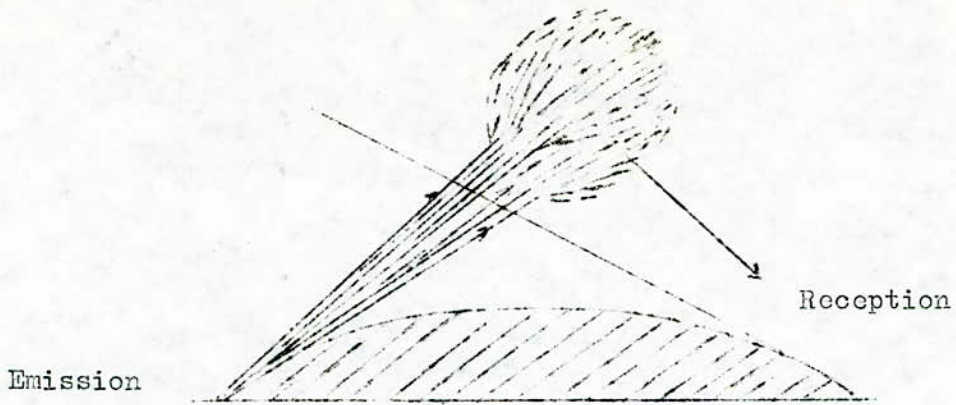


Fig I. 7

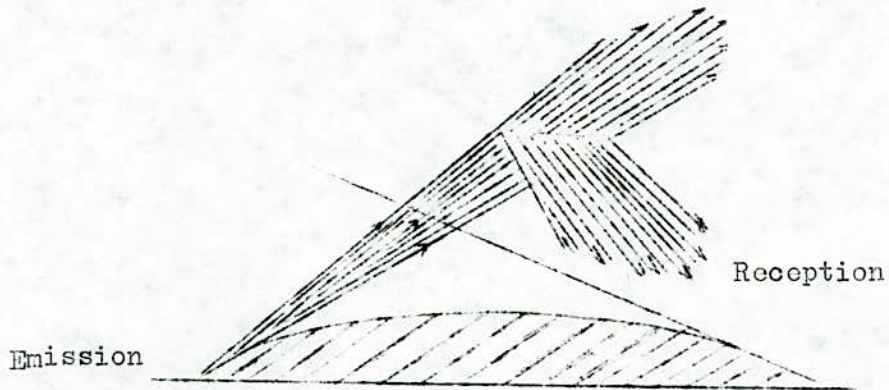
I.2.4 Diffusion turbulente

Les phénomènes de propagation, qui se produisent par l'influence des hétérogénéités de la troposphère, peuvent être considérés de deux points de vue différents :

- Dans le premier cas les tourbillons diffusent le rayonnement incident dans un angle solide



- Dans le second cas les irrégularités de surface produisent une réflexion diffusée



Le premier cas se traduit par le fait qu'à chaque tourbillon correspond une certaine discontinuité d'indice S_n (ou de gradient S_g) et que toute discontinuité élémentaire engendre un rayonnement élémentaire diffusé dans toutes directions. Du fait de l'incohérence de chaque source la composition des contributions élémentaires ne peut se faire qu'en additionnant des puissances et non des champs.

1.3 Refraction troposphérique.

1.3.1 Loi de Bouguet

Pour que la notion de " rayon " ou de " trajectoire " reste valable, on suppose que toute variation de l'indice de refraction avec l'altitude s'effectue dans un intervalle assez grand par rapport à la longueur d'onde, ceci revient à admettre qu'à l'intérieur de chaque petite région de la troposphère la propagation s'effectue comme dans un milieu homogène.

Considérons deux couches troposphériques adjacentes de rayon r_1 et r_2 , d'indice de refraction n_1 et n_2 dont la variation est supposée lente. Le trajet d'une onde émise par émetteur dans la couche 1, se compose alors de segments de droites consécutifs (voir fig I.8)

La loi de Descartes s'écrit alors :

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2'$$

cherchons une relation entre les angles θ_2' et θ_2
on a :

14

$$\sin \theta_2 = \frac{P_1 H_1}{P_1 P_2} \quad \text{et} \quad \sin \theta_2' = \frac{P_2 H_2}{P_1 P_2}$$

D'autre part
$$\frac{P_1 H_1}{P_1 H_2} = \frac{r_1}{r_2}$$

D'ou la relation :
$$\frac{\sin \theta_2'}{\sin \theta_2} = \frac{P_2 H_2}{P_1 H_1} = \frac{r_2}{r_1}$$

$$\sin \theta_2' = \frac{r_2}{r_1} \sin \theta_2$$

et l'equation devient

$$n_1 r_1 \sin \theta_1 = n_2 r_2 \sin \theta_2$$

soit d'une façon générale

$$n r \sin \theta = \text{cste} \quad \text{e9 (I.3)}$$

la valeur de la constante est déterminée par les conditions au départ de l'onde

L'equation (I.3) exprime la loi de Bouguet qui remplace la loi de Descartes dans le cas d'une stratification troposphérique horizontale.

En effet, lorsqu'on considère deux couches consécutives, la variation du rayon r de la couche est négligeable et comme l'indice de refraction d'une troposphere standard decroit avec l'altitude, l'angle d'incidence θ doit au contraire croître. Le rayon électromagnétique se refracte donc suivant un trajet incurvé vers la terre. Ce qui aboutit par un renforcement du champ au delà de l'horizon.

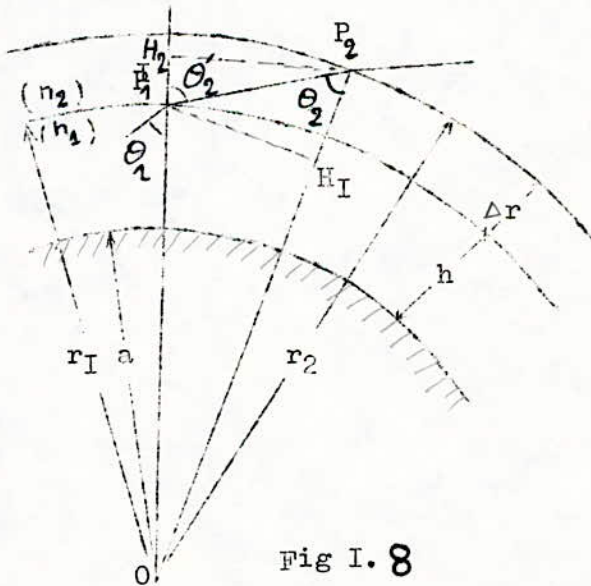


Fig I. 8

En posant $\sin(\theta + d\theta) \simeq \sin\theta + \cos\theta \cdot d\theta$

16

($d\theta$ très faible, donc $\cos d\theta \simeq 1$ et $\sin\theta \simeq d\theta$)

et en négligeant les termes de second ordre on obtient à partir de l'équation précédente

$$d\theta = - \left(\frac{dn}{n} + \frac{dr}{r} \right) \operatorname{tg}\theta$$

L'introduction de cette expression dans l'équation (I.4) donne

$$\widehat{AB} = \frac{- \left(\frac{dn}{n} + \frac{dr}{r} \right) \operatorname{tg}\theta}{1 - (r/\rho) \sin\theta}$$

puisque dans le triangle ABD on a la relation :

$$\widehat{AB} = dr/\cos\theta$$

il en résulte

$$\rho = \frac{n}{\left\{ - \frac{dn}{dh} \right\} \sin\theta} \quad (\text{I.5})$$

Cette relation (é I.5), exprime le rayon de courbure de la trajectoire, en fonction de l'indice de refraction de la troposphère, de l'angle d'incidence au point considéré

Conséquences de cette relation (é I.5)

- 1°/ Si l'angle d'incidence est nul (onde émise à la verticale), la trajectoire est rectiligne pour n'importe quelle loi de variation de l'indice de refraction en troposphère stratifiée
- 2°/ Lorsque l'angle d'incidence croît de 0 à $\pi/2$ la trajectoire s'incurve de plus en plus et la courbure $1/\rho$ devient maximale pour un rayon horizontale
- 3°/ Or en pratique, on ne s'intéresse qu'à une incidence plus ou moins rasante ($\sin \simeq 1$), on peut en outre poser $n \simeq 1$ on aboutit ainsi à une formule plus simple à savoir

$$\rho = - \frac{1}{\left\{ \frac{dn}{dh} \right\}} \quad (\text{I.6})$$

Le rayon de courbure de la trajectoire étant inversement proportionnel à " $- dn/dh$ " ainsi, pour un gradient négatif, le rayon de courbure est positif et par conséquent le " rayon " est renvoyé vers la terre. Dans le cas contraire le " rayon " est incurvé vers le haut.

Avec un gradient (dn/dh) constant et valant $- 4 \cdot 10^{-8} \text{ (m}^{-1}\text{)}$ on montre que dans l'atmosphère standard, le rayon de courbure de la trajectoire est constant et vaut $\left\{ \rho = 25 \cdot 10^6 \text{ m} \right\}$

Même dans le cas simplifié de la représentation par " rayon " électromagnétique, la refraction troposphérique ne fait que compliquer l'étude de propagation, puisqu'on aurait affaire à des trajets curvilignes autour d'une terre sphérique.

Cependant le problème se simplifie considérablement par le moyen de certaine transformation géométrique qui ramène soit, à l'étude des trajets rectilignes au dessus d'une terre sphérique de rayon convenablement modifié (terre fictive), soit à des trajets curvilignes modifiés au dessus d'une terre plane (de rayon infini).

I.3.3.1 Représentation à terre fictive - rayon apparent de la terre

Cette représentation consiste à utiliser un rayon terrestre fictif, choisi de telle façon qu'en comptant les altitudes à parti. de cette surface fictive, les trajectoires soient rectilignes. Cette nouvelle surface terrestre est donc supposée placée dans une atmosphère homogène (d'indice constant).

La représentation n'est autre qu'une transformation géométrique (Inversion), qui conserve les angles et qui transforme certains cercles en des droites. Le pôle de cette inversion est situé au point P de la trajectoire diamétralement opposé à l'émetteur E. En choisissant en outre, la puissance de telle sorte que le point E soit conservé

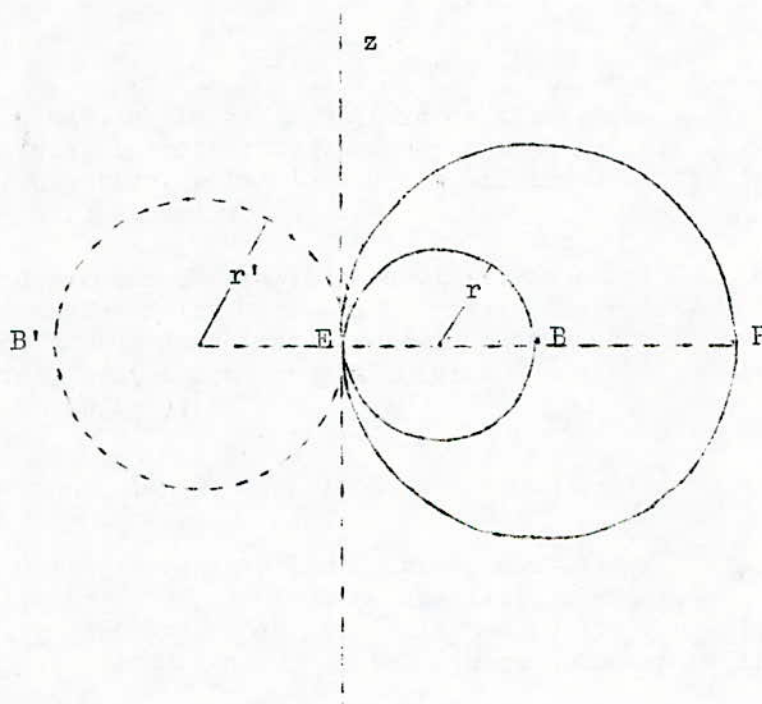


Fig I. 10

Pour simplifier, supposons que l'émetteur soit placé à la surface de la terre, et que le " rayon " est considéré, initialement, comme horizontal (voir fig (I. 10))

$$\text{On a alors } PB \cdot PB' = 4 m^2 r^2$$

avec $\rho = 4 m r$ où ρ : est le rayon de la trajectoire réelle

soit

$$(2m r - 2r) (2m r + 2Kr) = 4m^2 r^2$$

$$K = \frac{m}{m-1}$$

Pour la troposphère standard, nous avons vu que le rayon de courbure valait 25.10^6 m, soit approximativement 4 fois le rayon terrestre

Donc $\rho = mr = 4r$

d'où $m = 4$ et $K = 4/3$

D'une manière générale, pour une troposphère standard en partant toujours de :

$$K = \frac{m}{m-1}$$

et puisque $K = \frac{r'}{r}$ et $m = \rho/r$

soit $\frac{1}{r'} = \frac{1}{r} - \frac{1}{\rho}$ (eq I.7)

pour une incidence presque rasante ou à

$$\rho = \frac{1}{-dn/dh}$$

donc $\frac{1}{r'} = \frac{1}{r} + \frac{dn}{dh}$

$$K = \frac{1}{1 + r \frac{dn}{dh}} \quad (I.8)$$

Par exemple, pour tenir compte de la refraction troposphérique dans une troposphère standard, on remplacera dans toutes les méthodes de calculs, le rayon réel de la terre par son rayon apparent $r' = Kr$ où K la valeur $4/3$

Le coefficient K est appelé coefficient multiplicatif du rayon terrestre, il donne suivant sa valeur, une idée simple et précise du caractère favorable ou de favorable de la refraction troposphérique dans une zone donnée à un instant donné.

En effet

- Si $K > 1$ le rayon apparent de la terre est supérieur au rayon réel. La liaison est améliorée par la refraction
- Si $K = 1$ le rayon apparent de la terre est égal au rayon réel. Il n'y a pas de refraction
- Si $K < 1$ le rayon apparent est inférieur au rayon réel. L'horizon étant rapproché la portée de la liaison est diminuée par la refraction.

On se sert donc bien souvent du coefficient K pour caractériser l'état de la troposphère sur le parcours de la liaison qu'on veut étudier ou prévoir.

On le détermine expérimentalement à partir du relevé du coindice N; en deux positions d'altitudes différentes. La différence ΔN entre ces deux valeurs conduit à K par application de la formule. (eq I.7)

$$K = \frac{1}{1 + 6,4 \cdot 10^{-3} \Delta N}$$

ou ΔN est donné en (unité de N/Km).

Voici quelques données de K pour différents climats donné par le CNET

- Dans les climats humides et chauds la valeur médiane de K est supérieure à 4/3 (de l'ordre de 1,5)
- Dans les zones tempérées, elle est égale à 4/3
- Dans les climats secs, elle est inférieure à 4/3.

Pour une liaison d'environ 50 Km, les valeurs :

K = 1 : climats humides et chauds

K = 0,8 : zone tempérée

K = 0,6 : climat sec (desertique)

Sont dépassées pendant la quasi-totalité du temps (plus de 99,9 %)

La fig (I.11) donne deux distributions de ΔN et donc de K, relevées dans la zone tempérée (Trappes et cap Kennedy), notons que ces distributions sont valables pour un point déterminé, et non pour une liaison complète

La fig (I.12) donne la valeur minimale de K pour un trajet, cette valeur est dépassée pendant plus de 99,9 % du temps.

On retrouve sur la courbe pour une liaison de 50 Km (K = 0,8).

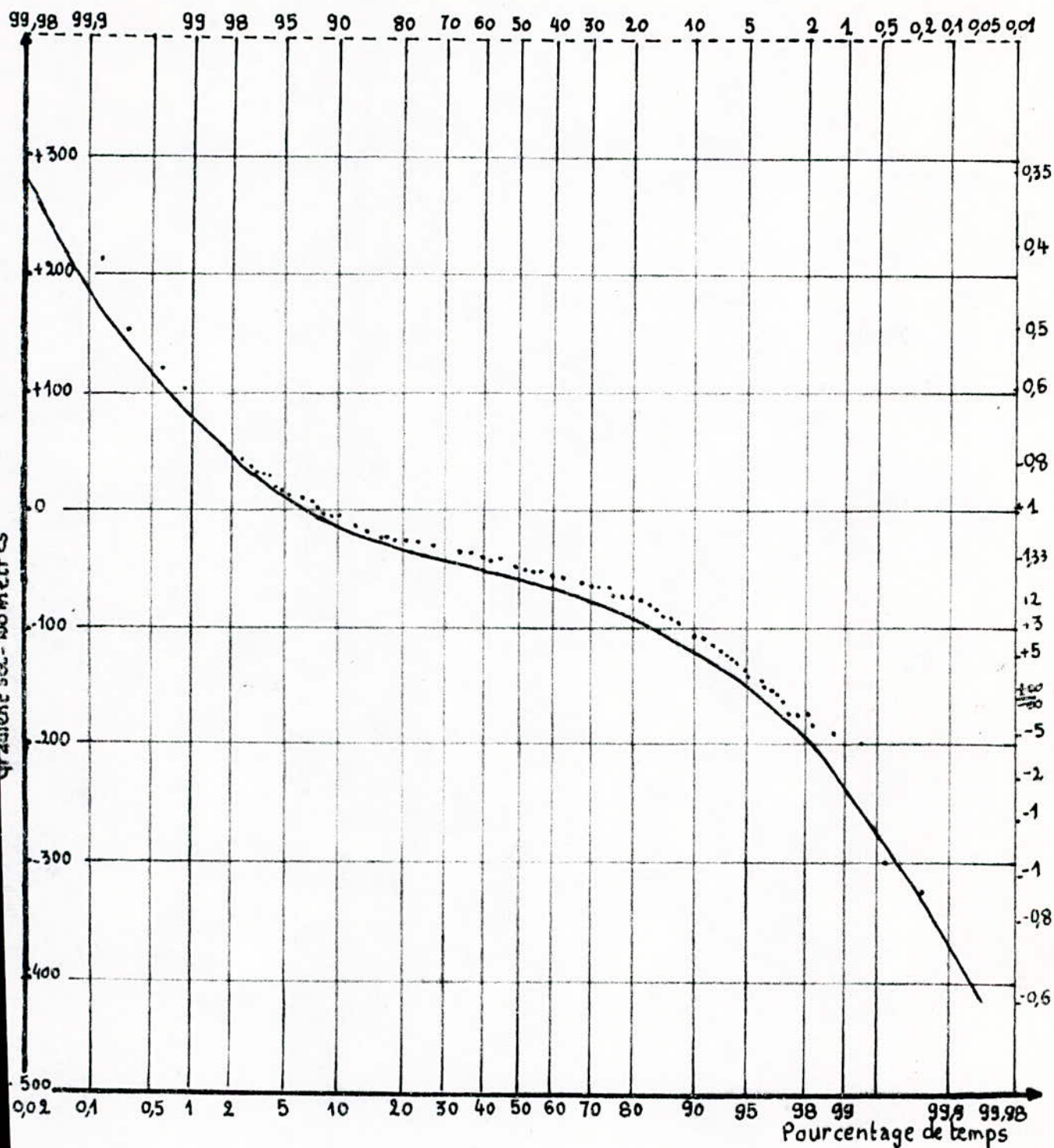
I.3.3.2 Représentation à terre plane - indice modifié

Du fait que la représentation par trajectoires rectilignes n'est valable que dans une troposphère standard, on va maintenant exposer une seconde méthode pour traiter les problèmes de la refraction troposphérique, sans plus supposer une troposphère standard. Cette méthode sera en effet valable pour n'importe quelle loi de variation de l'indice de refraction avec l'altitude.

Soient H1 et H2 deux points quelconques de la troposphère (h_1, θ_1, n_1) et (h_2, θ_2, n_2) leurs valeurs respectivement d'altitude, d'angle d'incidence et d'indice de réfraction.

On aura donc d'après la loi de Bouguer :

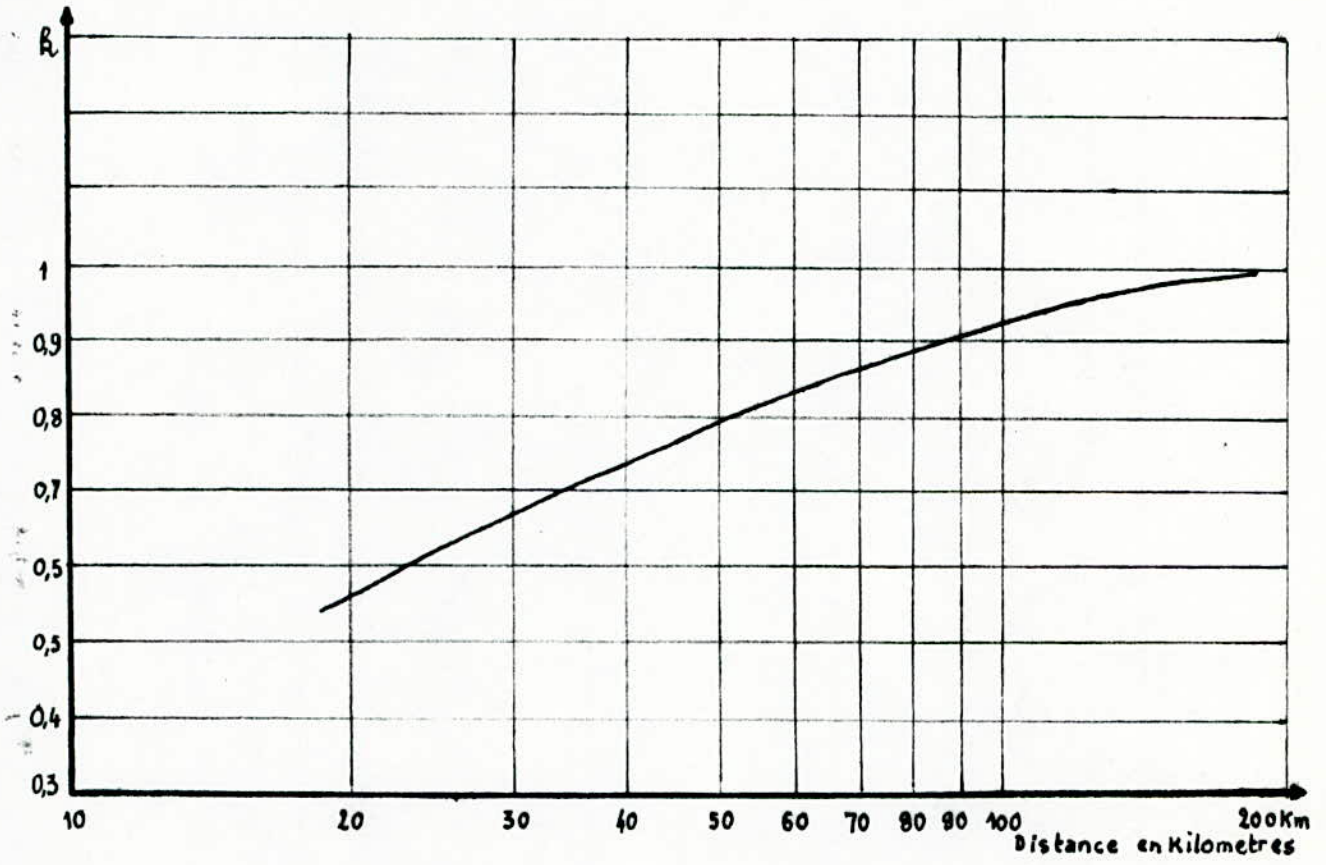
$$n_1 (a + h_1) \sin \theta_1 = n_2 (a + h_2) \sin \theta_2$$



Loi de distribution de ΔN et de R
 ——— Cap Kennedy (U.S.A)
 - - - - - Trappes (France)

(CNET)

Fig I. 11



Valeur minimale de K pour le trajet - Climat temperé (CNET)

Fig I. 12

En admettant toujours que $h \ll a$ et en tenant compte du fait que " n " diffère peu de l'unité ($n_1 = 1 + \Delta n$; $n_2 = 1 + \Delta n$). On obtient au second ordre près .

$$(n_1 + h_1/a) \cdot \text{SIN} \theta_1 = (n_2 + h_2/a) \cdot \text{SIN} \theta_2$$

Cette relation est vraie pour deux points quelconques de la troposphère , on écrira d'une façon générale pour un point quelconque .

$$(n + h/a) \cdot \text{SIN} \theta = \text{Cte}$$

En posant $n + h/a = N_m$, que l'on appelle indice de réfraction modifié de la troposphère . La loi de Bouguet s'écrit alors :

$$N_m \cdot \text{SIN} \theta = \text{Cte} \quad (I.9)$$

L'introduction de cet indice modifié " N_m " permet de reconstituer la forme simple de la loi de Descartes pour une troposphère à stratification sphérique .

Le gradient de cet indice modifié est :

$$dN_m/dh = dn/dh + 1/a$$

Or un "rayon" qui se propage dans une troposphère d'indice modifié N_m aurait d'après l'équation (I.6) un rayon de courbure ρ' égal à $1/(-dN_m/dh)$, pour laquelle on suppose une incidence plus ou moins rasante . L'équation (I.7) peut donc s'écrire :

$$1/\infty - 1/\rho' = 1/a - 1/\rho$$

où ρ est le rayon de courbure de la trajectoire dans la troposphère d'indice n et " a " le rayon terrestre .

Par conséquent, un trajet évoluant dans une troposphère d'indice modifié N_m au dessus d'une terre plane possède une courbure relative égale à celle qu'aurait un trajet correspondant évoluant dans la troposphère d'indice n par rapport à la terre réelle de rayon " a " .

Transformation " à terre plane "

On est ainsi amené à imposer au schéma réel de la propagation , la transformation qui à tout point H de coordonnées sphériques (r, ψ) fait correspondre dans le plan cartésien le point H' de coordonnées (x, z)

$$\text{avec } x = r \cdot \psi \quad \text{et } z = h = \rho - a \quad (I.10)$$

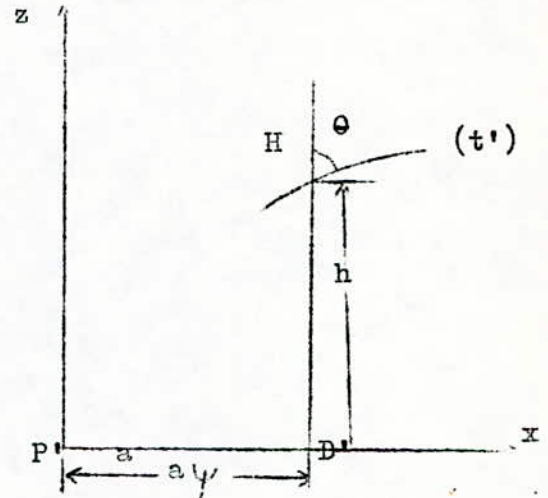
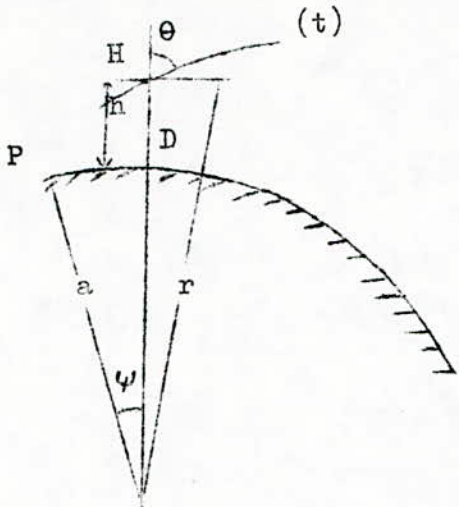
Cette transformation est conforme, elle a donc l'avantage de conserver les angles .

Ainsi que dans le schéma transformé , on admet que :

- Le plan $z = 0$ représente la surface de la terre plane au dessus de laquelle s'étend une troposphère d'indice modifié N_m .

- La courbure relative d'une certaine trajectoire, sera également conservée.

- La loi de Descartes écrite avec l'indice modifié, redevient valable.



Par ailleurs cette représentation a l'avantage d'être beaucoup moins restrictive que la précédente puisqu'elle ne fait aucune hypothèse
 -ni sur la loi de variation de l'indice (outre son caractère "lent"
 -ni sur l'angle au départ
 -ni sur la forme de la trajectoire

La représentation à terre plane constitue donc une méthode plus générale pour l'étude des phénomènes de la réfraction troposphérique (mais toujours dans le cadre de l'optique géométrique). Une fois l'étude faite, il sera ensuite facile de passer à la représentation en terre réelle par les formules de transformation indiquées par l'équation (I.10).

Grandeur M

Du fait que l'indice modifié N_m diffère peu de l'unité, il est donc plus commode d'utiliser son excès M par rapport à l'unité, exprimé en millionnièmes.

M est défini par la relation suivante

$$M = (N_m - 1) \cdot 10^6 = (n + h/a - 1) \cdot 10^6$$

$$M = (n - 1) \cdot 10^6 + 10^6 \cdot h/a = N + 10^6 \cdot h/a$$

$$M = N + 0,157h \quad \text{où } h \text{ est exprimé en mètre}$$

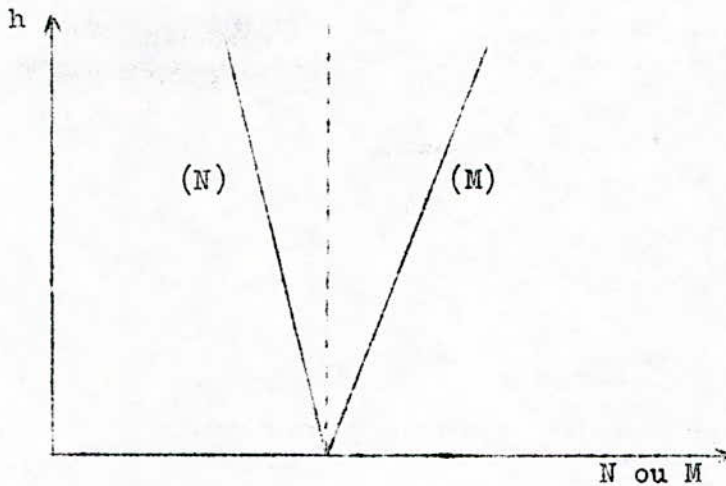
Les ordres de grandeurs de M sont de quelques centaines d'unités.

Dans la troposphère standard $dn/dh = -4 \cdot 10^{-8}$ (I/m)

On aura $dM/dh = -0.04 + 0.157 = 0.117$ (I/m)

On remarque que le gradient de l'indice modifié M , comme d'ailleurs de Nm est positif , contrairement à celui de N ou de n , ceci est dû à l'introduction du terme complémentaire h/a qui varie beaucoup plus vite que le terme à variation négative de n .

Ce fait est illustré sur la figure ci dessous , dans laquelle les droites représentant N et M ont des pentes opposées .

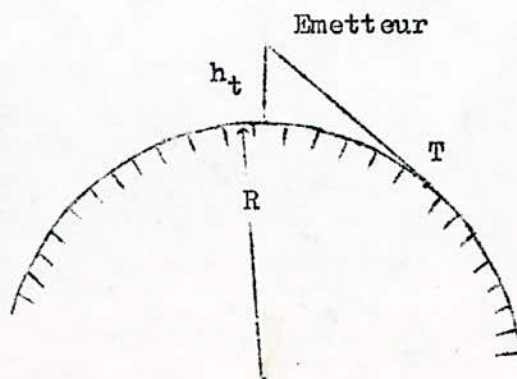


I.4 Portée optique et radioélectrique

Si l'on néglige les effets de la réfraction troposphérique les ondes radioélectriques se propagent en ligne droite et nécessitent donc une ligne de vue entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception . La surface de la terre n'étant pas plane , la portée d'une telle onde est donc limitée . Un calcul géométrique simple a permis de conclure que la portée d'une émise par une antenne se trouvant à la hauteur h_t est égale à :

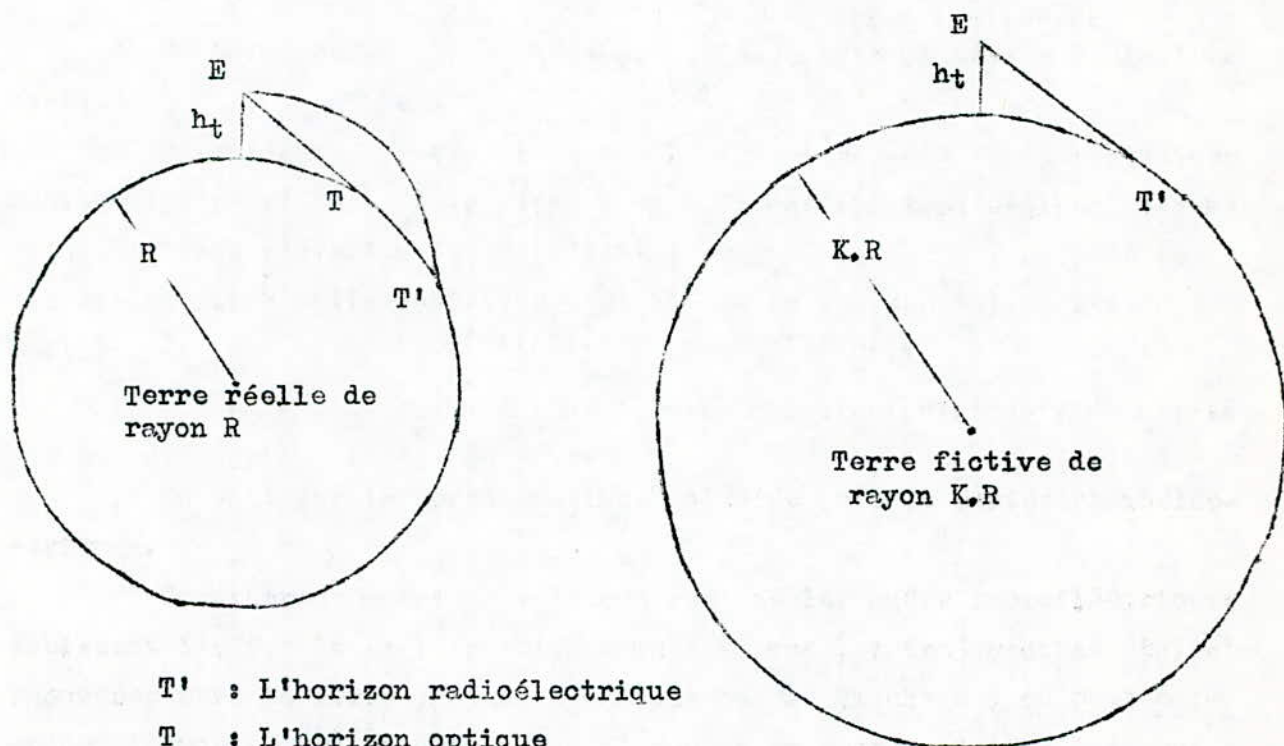
$$\sqrt{2 h_t R} \quad R \text{ rayon de la terre } (R = 6400 \text{ Km })$$

cela équivaut à une portée de 36 Km pour une antenne située à l'altitude 100 m .



On voit que la portée optique coïncide avec la portée radioélectrique .

Considérons maintenant le cas réel où les ondes radioélectriques subissent l'effet de la réfraction . On a vu que les trajectoires étaient incurvées vers la terre , et cela dans le cas où $dn/dh > 0$, on peut calculer la portée radioélectrique à l'aide de la représentation à rayons rectilignes .



T' : L'horizon radioélectrique

T : L'horizon optique

K : Facteur multiplicatif du rayon terrestre

Donc pour le calcul de la portée radioélectrique , on utilise la même expression précédente , c'est à dire $\sqrt{2 h_t R}$ en remplaçant seulement R par KR , d'où la portée :

$$\sqrt{2 h_t K R}$$

On dit que l'horizon radioélectrique " est plus éloigné " que l'horizon optique (T), et cet effet subsiste tant que le rayon de courbure de l'onde est positif .

- II - ETUDE THEORIQUE DES GUIDES

Il y a deux méthodes d'aborder l'étude de la propagation dans un conduit :

a/ Théorie géométrique

La méthode géométrique consiste à tracer des trajectoires issues de l'antenne d'émission pour des angles d'élevation croissants régulièrement, par exemple tout les milliradians. L'observation de toutes ces trajectoires montre une concentration de l'énergie le long de certaines lignes, ce qu'il fait, qu'il est impossible d'atteindre certaines régions fig (II.I).

C'est cette méthode que nous allons étudier dans le chapitre suivant .

b/ Théorie des modes

Comme dans un guide métallique, une onde peut se propager dans un conduit troposphérique, suivant un certain nombre de modes. Ce dernier dépend du rapport entre l'épaisseur du conduit et la longueur d'onde (Voir annexe A)

II.I Formation des conduits troposphériques

Envisageons maintenant une discussion sur l'allure des phénomènes de la réfraction troposphérique dans le cas général, où l'indice de réfraction suit une loi quelconque (bien que toujours lente) avec l'altitude.

La représentation à terre plane est mieux adaptée à une telle discussion, puisqu'elle ne fait aucune hypothèse sur le gradient de l'indice et on se rapporte en même temps à la représentation à rayons rectilignes, en supposant que le gradient de l'indice de réfraction possède à chaque fois une valeur constante, mais quelconque.

Cette discussion aboutit à la possibilité de formation des conduits à l'intérieur desquels les ondes sont guidées.

On a vu que l'excès de l'indice de réfraction modifié est égal à :

$$M = (n - I) \cdot 10^6 + 10^6 \cdot h/a$$

Donc : $dM/dh = 10^6 \cdot dn/dh + 10^6 \cdot I/a$ $dn/dh = M' \cdot 10^{-6} - I/a$ avec $M' = dM/dh$

Introduisons dn/dh dans l'expression de $K = r'/r$

$$K = r'/r = 10^6/a \cdot M' \quad \text{soit} \quad K = 0.157/M' \quad (\text{ II.I })$$

On distingue trois cas différentes, suivant que $M' = 0.157$,

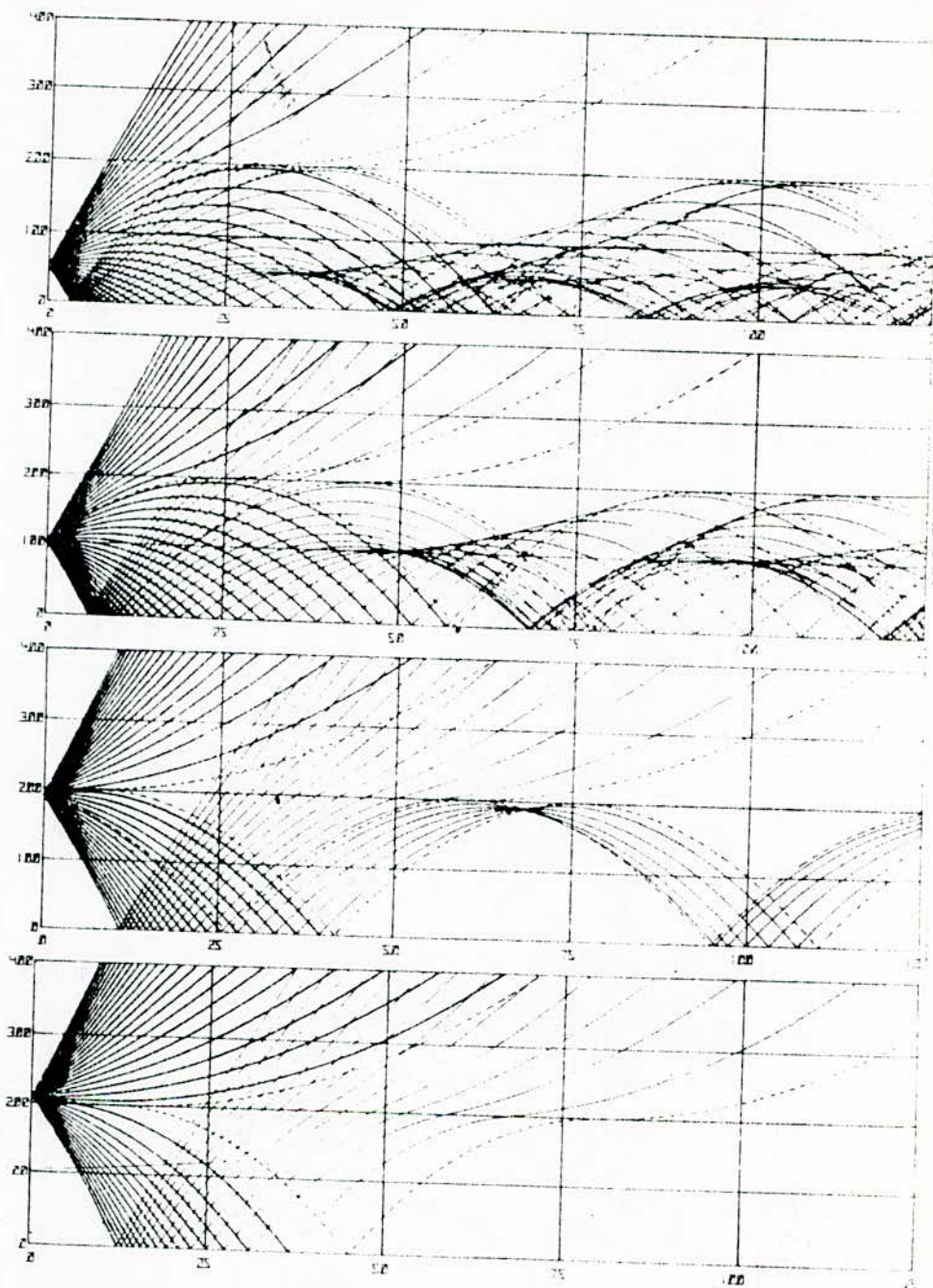


Fig. 11.4 Exemple de tracé de trajectoires.
 Gradient d'indice dans le conduit : -500 N km
 Épaisseur du conduit : 200 m.
 Hauteur de l'émetteur : 50 m ; 100 m ; 190 m ; 210 m.

$M' > 0.157$ ou $M' < 0.157$ c'est à dire suivant que $K=I$, $K < I$ ou $K > I$.

II.2 Equation des trajectoires

Reprenons l'équation (I.9)

$$Nm \cdot \sin \theta = \text{Cte}$$

Dans la propagation des ondes radio-électriques, on utilise l'angle d'élevation ϕ (ou angle de site), au dessus de l'horizontale c'est à dire

$$\phi = \pi/2 - \theta \quad (\text{II.9})$$

La relation précédente s'écrit alors :

$$Nm \cdot \cos \phi = \text{Cte}$$

En remplaçant Nm par $I + M \cdot 10^{-6}$

On obtient

$$(I + M \cdot 10^{-6}) \cdot \cos \phi = \text{Cte} \quad (\text{II.3})$$

Cette relation est l'équation des trajectoires des ondes radio-électriques émises dans la troposphère. La valeur de la constante est déterminée par les conditions au départ.

Ceci dit, connaissant le profil de l'indice de réfraction modifiée M en fonction de l'altitude, et l'angle au départ du trajet, on peut construire facilement la trajectoire de l'onde réfractée.

Soit un point de référence (le point où se trouve l'émetteur) où l'indice de réfraction a la valeur M_I et l'angle au départ est ϕ_I . Si M et ϕ sont les grandeurs correspondantes à un point quelconque du trajet on aura d'après cette relation.

$$(I + M_I \cdot 10^{-6}) \cdot \cos \phi_I = (I + M \cdot 10^{-6}) \cdot \cos \phi$$

Or l'angle au départ est habituellement assez petit, donc on peut écrire

$$(I + M_I \cdot 10^{-6}) \cdot (I + \frac{\phi_I^2}{2}) = (I + M \cdot 10^{-6}) \cdot (I + \frac{\phi^2}{2})$$

Ce qui donne en négligeant les termes en $M \cdot \phi^2$:

$$\phi^2 = \phi_I^2 + 2 \cdot (M - M_I) \cdot 10^{-6} \quad (\text{II.4})$$

Cette relation exprime (au signe près) l'angle ϕ que fait la tra-

-jectoire transformée avec l'horizontale en fonction des paramètres (M_I, ϕ_I) du point de référence et de la valeur de M au point considéré .

Par ailleurs , puisque ϕ est assez petit on peut poser :

$dh/dd = \text{TAN}\phi = \phi$, et en tenant compte de l'équation (II.3) on aura

$$d = \int dh/\phi = \int dh/\sqrt{\phi_I^2 + 2(M - M_I) \cdot 10^{-6}} \quad (\text{II.5})$$

Cette relation peut également servir à sa construction graphique où d , est la portée de liaison .

On peut ensuite déterminer le niveau h pour lequel la trajectoire devient horizontale . On aura alors $\phi = 0$ et l'équation (II.4) donne la valeur correspondante de l'excès :

$$M = M_I - (\phi_I^2 \cdot 10^6)/2 \quad (\text{II.6})$$

La méthode du tracé sera décrite dans le chapitre suivant , bien que nous l'utiliserons dans ce chapitre pour représenter les différents cas cités précédemment ($M' = 0.157$, $M' > 0.157$, $M' < 0.157$)

II.2.1 Absence de réfraction troposphérique ($M' = 0.157$)

Lorsque $M' = 0.157$, $dn/dh = 0$ d'où , n est constant la propagation s'effectue ainsi, dans une troposphère homogène où les trajectoires sont rectilignes , dans ce cas le rayon apparent de la terre est égal au rayon réel .

II.2.2 Réfraction négative ($M' > 0.157$)

$M' > 0.157$, entraîne $dn/dh > 0$ et l'équation donne $\rho < 0$; ceci explique que les trajectoires réelles se réfractent vers le haut. Le rayonnement semble donc rejeté. Pour arriver à une représentation à rayons rectilignes, on doit imposer à ce schéma réel une inflexion qui augmenterait la courbure de la terre de telle sorte que celle-ci, transformée ait un rayon apparent inférieur à son rayon réel. L'équation II.1 donne d'ailleurs $K < 1$ donc $r' < r$.

Pour mieux expliquer, faisant l'étude en représentation à terre plane . Adoptons par exemple une loi de variation de l'indice modifié M , tel que l'on ait $M' = 0.300$ jusqu'à une certaine altitude h_1 , et $M' = 0.117$ au delà de cette dernière.

Plaçons ensuite l'émetteur à un point A où le niveau h_1 est supérieur à celui de A , à savoir h_e

La figure (II.2) nous montre que dans le cas considéré , les trajectoires sont plus courbées que dans le cas d'une troposphère standard avec $M' = 0.117$. Remarquons en plus que le rayon (1) à cause de sa courbure plus poussée , son point de contact avec la terre se trouve à une distance inférieure à celle du rayon (2)

Lorsqu'on passe au schéma réelle de la propagation , on voit qu'une refraction négative fait diminuer (figure II.2d) la portée des liaisons par rapport au cas de la troposphère standard , où $M' = 0.117$ (figure II.2c) cette diminution est moins sensible , lorsque l'émetteur se trouve à une côte assez élevée , pour que le gradient reprenne la valeur 0.117 . En conclusion , la réduction de la portée sera d'autant plus importante que la valeur du gradient ($M' > 0.157$) sera plus forte , et que cette valeur sera maintenue jusqu'à une altitude plus élevée .

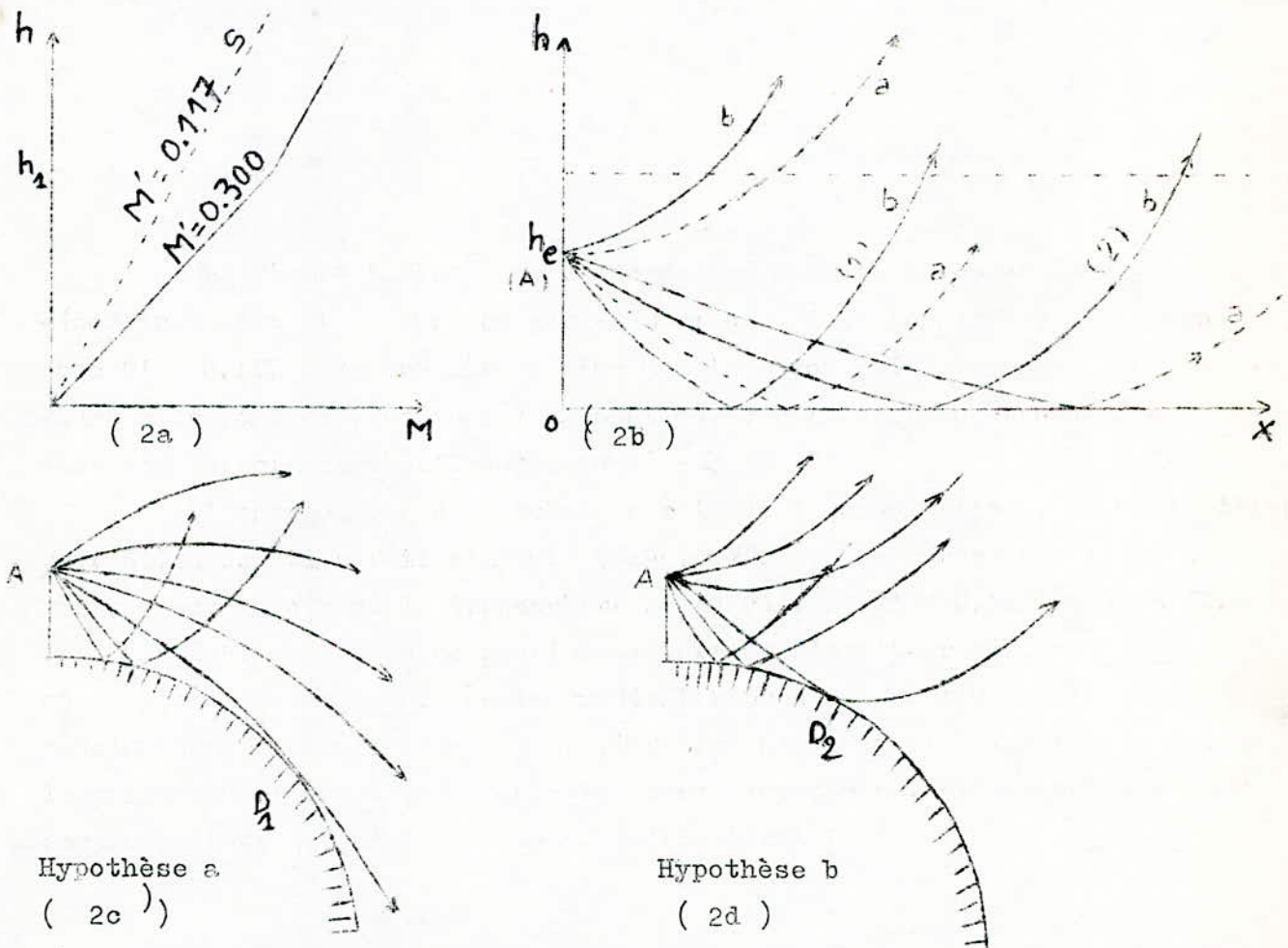


Fig II.2

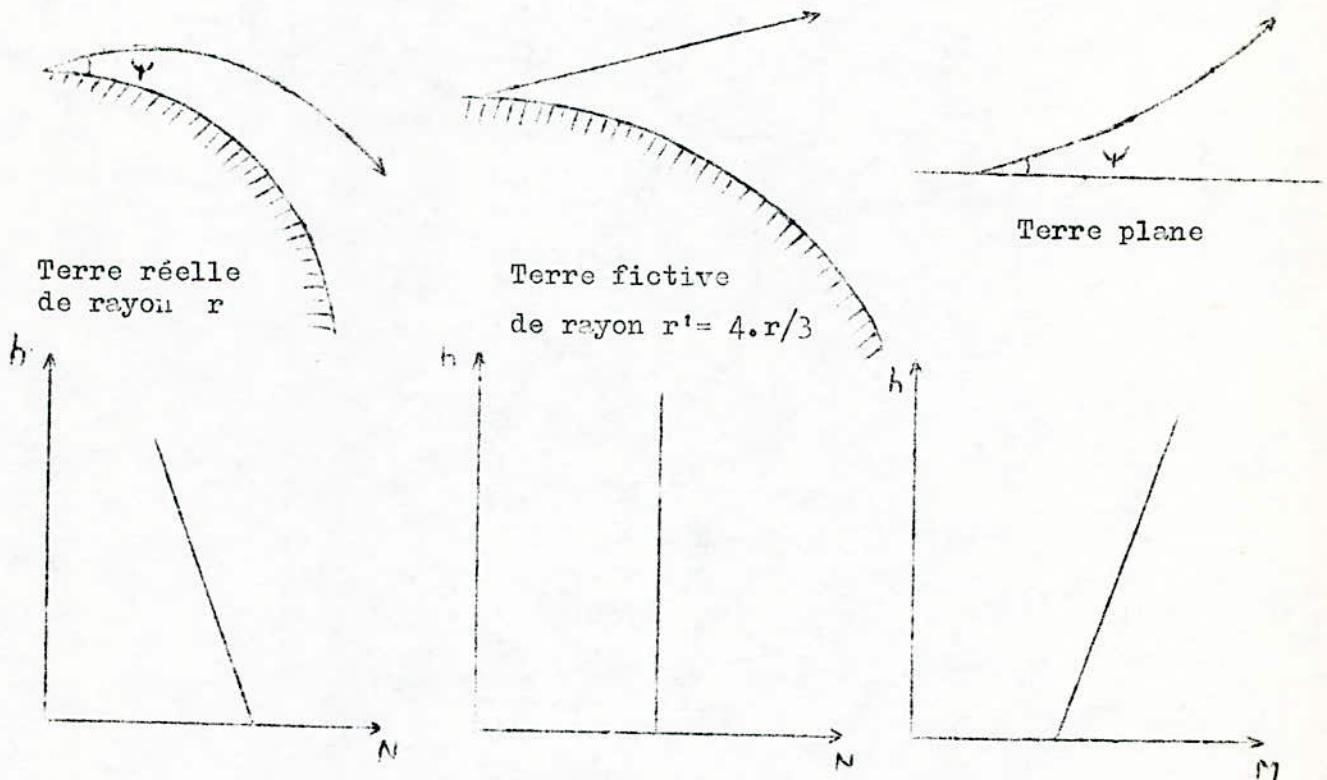
II.2.3 Refraction positive ($M' < 0.157$)

Lorsque $M' < 0.157$ on aura $dn/dh < 0$ et par conséquent $\rho > 0$. Les rayons réels sont ainsi détournés vers la terre la refraction troposphérique devient favorable pour la portée . Restant dans ce domaine de refraction , on distingue trois cas possibles suivant que: $M' = 0.117$, $M' > 0.117$ ou $M' < 0.117$

II.2.3.1 Réfraction standard ($M' = 0.117$)

Dans ce cas standard , $dn/dh = -4.10^{-8}$ (I/m) , le rayon de courbure (vaut 25.10^6 m , et K étant égal à $4/3$.

L'allure d'un rayon émis par un émetteur placé à la surface de la terre est représentée sur les figures ci-dessous .



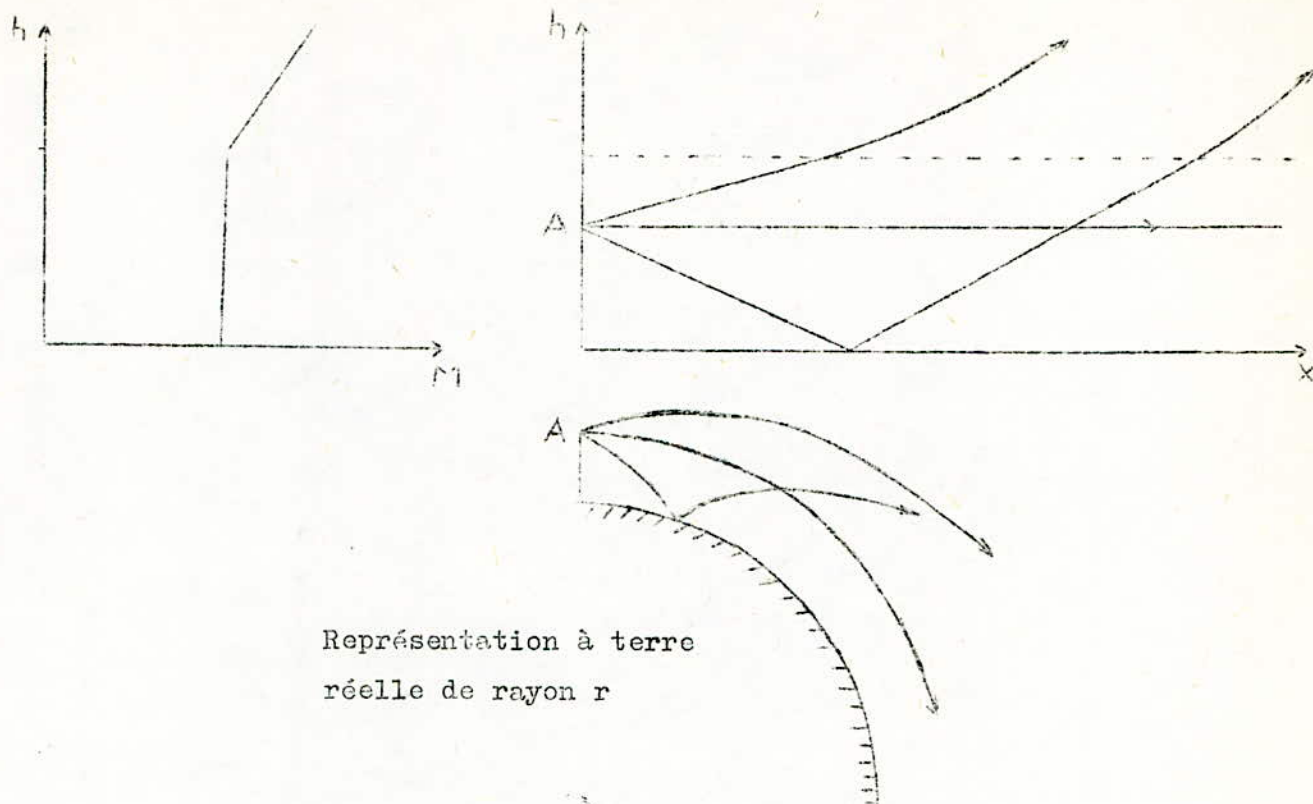
Lorsque $M' > 0.117$, on dit que la réfraction est sous-standard bien quelle puisse être encore positive . lorsqu'au contraire $M' < 0.117$, la réfraction est dite super-standard .

II.2.3.2 Réfraction critique ($M' = 0$)

Pour avoir $M' = 0$, on doit avoir $dn/dh = -15.7 \cdot 10^{-8}$ (I/m) , K est donc infini , ce qui est également pour le rayon apparent (r' est infini) ceci dit, en représentation par rayons rectilignes la propagation s'effectue comme au dessus d'une terre transformée plane .

Le même résultat s'obtient par l'autre représentation qui fait intervenir l'indice de réfraction modifié M .

Supposant en effet qu'on a M' constant jusqu'à une certaine altitude et qu'il devient croissant au delà de cette dernière (figure ci-dessous)



Représentation à terre
réelle de rayon r

Dans la zone où M est constant, les trajectoires transformées auront une pente constante et par conséquent, elles seront rectilignes. Donc un rayon émis à l'horizontale reste parallèle au sol. Le trajet réel correspondant forme un cercle concentrique à la terre (figure ci-dessus)

On voit donc que dans ce cas critique, les rayons peuvent contourner parfaitement la courbure de la terre par réfraction.

II.2.3.3 Super-réfraction ($M' < 0$)

Formation des conduits

L'équation (I.II') indique que M' devient négatif dès que dn/dh est inférieur à $-15.7 \cdot 10^{-8}$ (I/m). La trajectoire aura donc un rayon de courbure $\rho < r$, par conséquent un rayon émis sous un angle, même positif peut éventuellement retourner vers la terre, se réfléchir et continuer son allure sans pouvoir dépasser une certaine altitude.

Ce même résultat s'obtient, lorsqu'on fait appel à la représentation par rayons rectilignes. En effet si M' est négatif, alors K est négatif et il en est de même pour r' . Un rayon apparent négatif signifie que la terre fictive doit être concave. Ainsi une trajectoire fictive peut alors rencontrer la terre transformée, et il en est de même pour le schéma réel de la propagation.

L'étude de ces phénomènes s'effectue plus correctement et se montre beaucoup plus fécond, lorsqu'on revient à la représentation à terre plane.

Considerons la figure (II.3.a) qui représente la courbe de variation de l'indice modifié M en fonction de l'altitude. Cette courbe est caractérisée par le fait qu'elle présente tout au moins une partie dans laquelle $M' < 0$.

Plaçons ensuite notre émetteur au niveau $h_e < h_c$ où h_c est l'altitude correspondante au coude de la courbe, au delà duquel M' reprend des valeurs positifs.

Les trajectoires des rayons émis par l'émetteur sous divers angles peuvent être tracées suivant le procédé indiqué par II.2 ; ainsi on représente quelques trajets sur la figure (II.3.b)

On y constate que seuls les rayons émis sous un angle ϕ_1 inférieur à ϕ_e ($\phi_1 \ll 0$) peuvent retourner vers la terre sur laquelle se réfléchissent et continuent leurs allures sans pouvoir dépasser le niveau h_c . On dit dans ce cas qu'on ait en présence d'un conduit au sol, puisque ces ondes restent dans un certain couloir limité par la terre et le niveau h_c .

Par contre les rayons sous un angle ϕ_2 supérieur à ϕ_e s'échappent du couloir de guidage. ϕ_e est alors appelé angle limite sous lequel un rayon d'onde émis à partir d'une altitude h_e atteint tangentiellement le niveau h_c .

L'angle ϕ_e est déterminé à partir de l'équation suivante :

$$\phi_e^2 = 2(M_e - M_c) \cdot 10^{-6} \quad (\text{II.7})$$

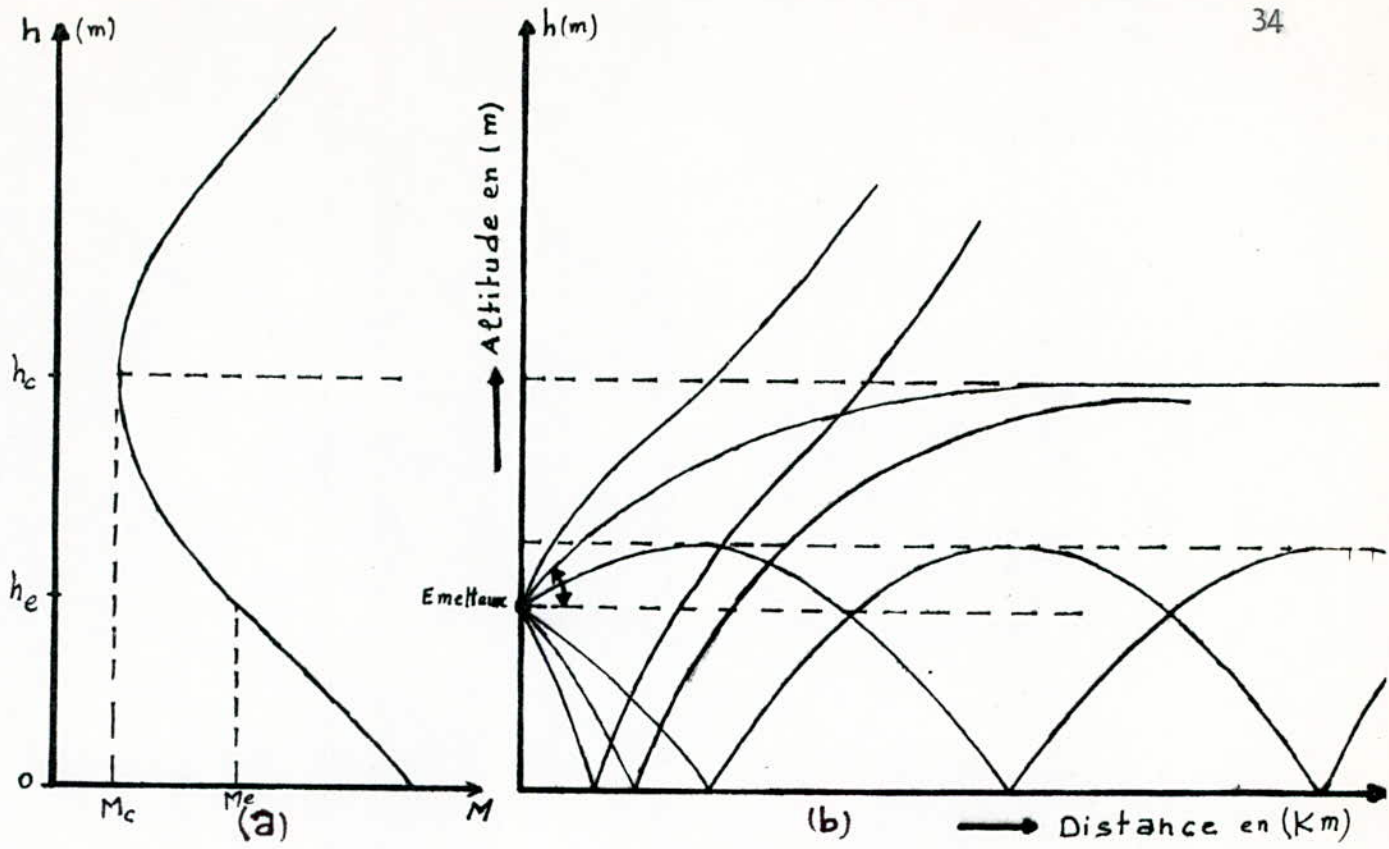
où M_e est la valeur de l'excès au niveau h_e et M_c celle au niveau

Une autre loi de variation possible de l'indice modifié M , susceptible de donner naissance à un conduit troposphérique est illustrée sur la figure (II.4.a).

Les mêmes raisonnements montrent que les rayons émis sous un angle $\phi_1 < \phi_e$ restent captés dans un conduit s'étendant entre les niveaux surélevés h'_c et h''_c comme indique sur la figure (II.4.b). Tandis que les rayons émis sous des angles supérieurs à ϕ_e sortent du conduit

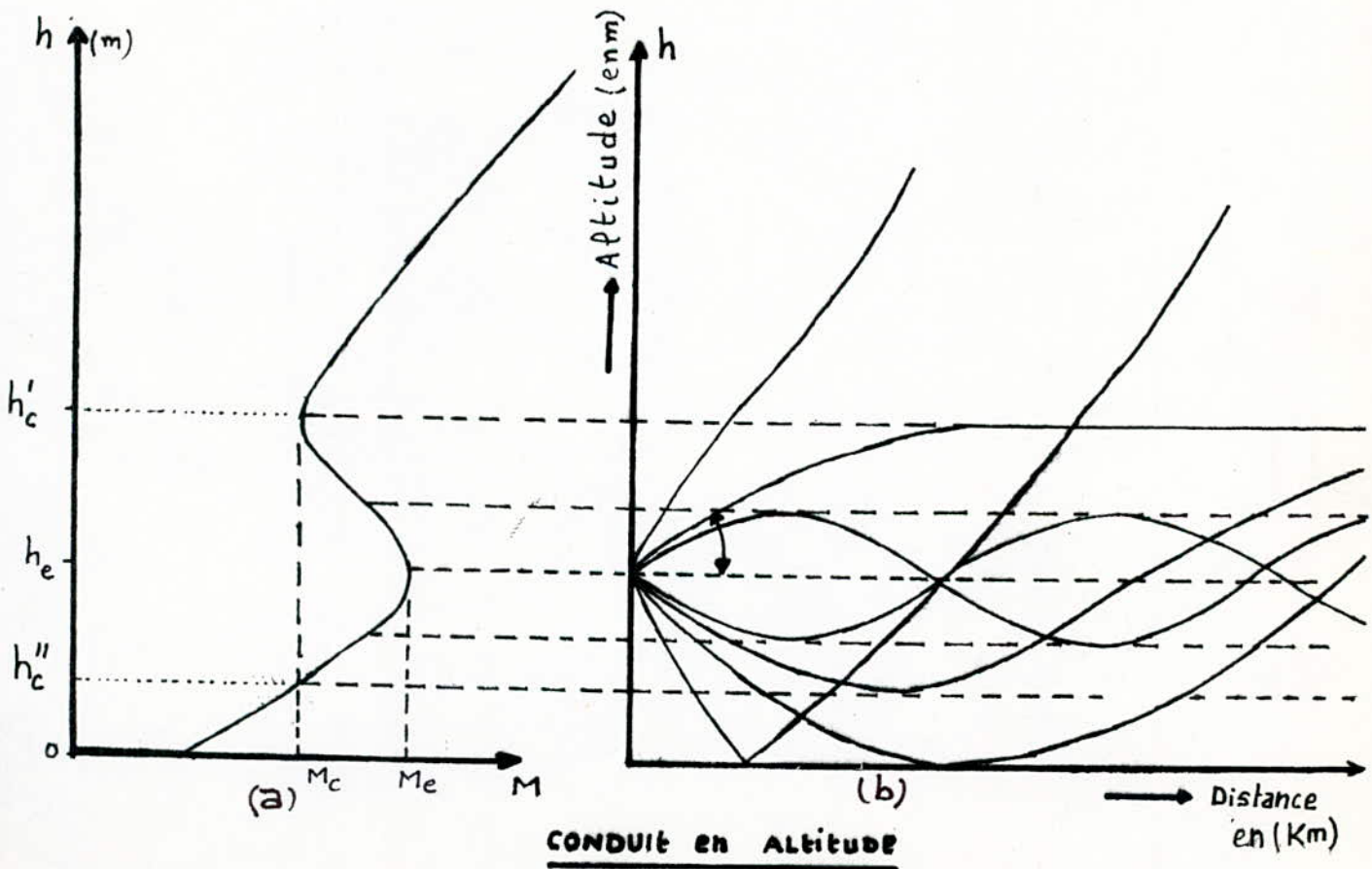
Les ondes guidées restent donc, dans le couloir limité par h'_c et h''_c . On dit dans ce cas qu'on a un conduit en altitude.

Il est essentiel de remarquer que le guidage n'affecte que les rayons voisins de l'horizontale. En effet l'angle limite ϕ_e (donné par l'équation II.7) ne peut dépasser en réalité l'ordre d'un degré. Donc pour qu'une quantité suffisamment importante d'énergie soit concentrée sur un lobe d'un degré d'ouverture, il faut que l'antenne d'émission soit très directive.



CONDUIT au SOL

Fig II.3



CONDUIT en ALTITUDE

Fig II.4

Par ailleurs , la théorie des modes (Annexe A) montre pour qu'une onde soit bien guidée , il faut qu'elle ait une longueur d'onde inférieure à λ_{\max} . Si ce n'est pas le cas le conduit fuit (lorsque la longueur d'onde approche la valeur λ_{\max}) ; ou il n'y aura plus guidage (si la longueur d'onde est supérieure à λ_{\max}) .

λ_{\max} est donnée par :

$$H/\lambda_{\max} = 265/\sqrt{\Delta M} \quad \text{soit} \quad \lambda_{\max} = 3.72 H \sqrt{\Delta M \cdot 10^{-6}}$$

pour un conduit en altitude .

Et par :

$$H/\lambda_{\max} = 400/\sqrt{\Delta M} \quad \text{soit} \quad \lambda_{\max} = 2.5 H \sqrt{\Delta M \cdot 10^{-6}}$$

pour un conduit au sol .

Avec H l'épaisseur du conduit et ΔM la décroissance totale de M dans la couche de guidage .

Dans une zone tempérée la hauteur H des conduits est de l'ordre d'une centaine de mètres , ΔM d'une centaine pour les conduits les plus élevés , d'une dizaine pour les conduits moyens .

Le tableau ci-dessous , donne l'ordre de grandeur de λ_{\max} en fonction de la hauteur du conduit

H (m)	7	23	130	700
$\lambda_{\max}(m)$	0.01	0.1	1	10

L'examen de ce tableau , montre que les ondes centimétriques et décimétriques sont très sensibles au phénomène de guidage , par contre les ondes métriques sont rarement guidées et les ondes les plus longues ne le sont pratiquement jamais .

II . 3 Conditions météorologique favorables à la formation des conduits troposphériques

Pour qu'il ait , conduit il faut que se produise une inversion du gradient du coindice de l'air en fonction de l'altitude, il faut donc une diminution très rapide de l'air, avec un gradient superieur en valeur absolu. Il existe deux sortes de conduits :

a/ Conduit de surface

-Inversion de surface dûes au rayonnement nocturne . Par ciel decouvert, le sol rayonne et se refroidit de tel sorte que sa température, devient inférieure à celle de l'air . Doù une inversion de température, et possibilité d'un conduit de faible altitude . Dans un milieu végétal, la vitesse de refroidissement, est si lente , par contre dans une région désertique elle serait plus rapide et par conséquent , favorable à la présence de conduits.

Les inversions dûes au rayonnement ne se présentent que rarement sur la mer , elle ne s'étend guère au delà d'une distance de 2 à 3 Km des côtés - Couches d'air froid , se deplaçant sur une mer chaude .

Il y a alors production de conduits extrêmement importants . Il n'y a pas alors , dans ce cas des inversion de température , mais l'effet est produit apparament par l'évaporation de l'eau . Dans les niveaux inférieurs de l'atmosphère , on constate que plus la vitesse de déplacement est plus grande plus la hauteur et les dimensions des conduits sont grandes .

Ces conduits sont particulièrement important , car ils s'étendent sur des grandes distances et se produisent très fréquement aussi bien dans l'atlantique que dans le pacifique .

-Inversion résultant du déplacement d'air continental chaud sur mer froide Il y a présence d'effet de capture , par suite de l'inversion de température , et l'évaporation de l'eau de la mer dans l'air chaud et sec .

La base de l'inversion se trouve habituellement à la surface de la mer , et la hauteur du conduit est comprise entre 50 et 500 m .

La Leur distribution à la surface du globe depend de la direction des vents venant des continents .

Ils se produisent en été , époque où la différence de température entre la mer et la terre , est plus grande , leur intensité sera plus , pour la même raison , juste après midi .

A grande distance des côtes , la hauteur du conduit s'élève et l'on peut avoir des portées extraordinaires . Bien que la présence de brouillard ne soit pas associée habituellement à de telles inversions , il arrive que leur présence à cinq ou dix milles de la côte indique la présence d'un tel conduit .

Si les conduits que nous venons d'examiner sont des conduits de

surface , nous allons voir maintenant une autre categorie de ceux qui sont situés en altitude .

b/ Conduit en altitude

Inversion dte à la subsidence

Une masse d'air qui s'affaisse dans une zone de pression élevée subit une compression adiabatique qui fait augmenter sa temperature et reduit son degré hygrometrique . La subsidence produit une inverssion de temperature et crée des conditions favorables à la formation de conduits en altitude , si bien que les communication d'un point à un autre du sol , peuvent ne pas être affectées tandis qu'elles le seront entre un avion , et le sol ou un autre avion .

Un phenomene associé aux conduits dds à la subsidence se presente parfois dans les regions montagneuses , quand l'air apres la pluie est chaud et sec .

Les different climats du globe se comportent ainsi differement en ce qui concerne les phenomenes de propagation anormale .

_ Le climat equatorial n'est pas tres favorable , car les frequ-entes chutes de pluie brassent l'air et conduisent à la propagation normale

_ Les climats tropicaux sont au contraire très favorables . Le temps y etant presque toujours beau . Ce sont les zones tropicales où la super-refraction est la plus frequente et les conduits troposphériques les plus forts .

_ Les climats temperes , où le temps est periodiquement beau , favorisent la propagation anormale surtout en été . La mediterrannée par exemple est , en été tres favorable à la super-réfraction .

La determination , et la prevision de la formation des conduits troposphériques , est d'un intérêt evident .

On doit savoir et prevoir , dans ce but la loi de variation de l'indice de réfraction avec l'altitude . Or les sondages troposphériques necessaires qui donneraient la pression et le degré hygrometrique en fonction de l'altitude sont difficiles à effectuer , puisqu'ils doivent être "fins" . De plus ce sondage doit être effectué jusqu'à une altitude suffisamment élevée , et doit s'etendre à des surfaces assez larges , car la stratification peut varier d'un lieu à un autre .

Avec les données experimentales dont on dispose actuellement , on est seulement en mesure de presenter la possibilité de formation d'un conduit , mais on ne peut pas encore en donner des previsions scientifiques rigoureuses : c'est là , une préoccupation de plus pour la radio-meteorologie

II.4 Interet des guides tropospheriques dans la telecommunication

Les guides tropospheriques presentent un interet important dans la telecommunication car ils permettent d'avoir des portees extremement grandes . En pratique le guidage n'est efficace que pour des longueurs d'ondes petites , donc il est insignifiant sur des liaisons radiodiffusions et n'appartient de maniere mesurable que sur des liaisons de television ou de radar .

Les guides situes aux dessus des nuages à une altitude superieure à 1000m , dans la zone ou les avions sont susceptibles de se trouver , favorisent les communications entre eux , ou leurs detection par radars aeroportes .

A coté d'une augmentation extraordinaire de la portée , les guides tropospheriques presentent un inconvenient car le champ est tres reduit en dehors du conduit ce qui serait defavorable dans le cas par exemple d'un radar qui tenterait de capter un avion au dessus d'un conduit. Comme inconvenient on trouve aussi les evanouissements qui sont dû aux variations temporelles de l'indice de refraction de l'air .

Il existe deux methodes de trace de rayons qui sont les suivantes

III.I Methode pas à pas

Cette methode consiste à utiliser les deux equations recurrentes suivantes :

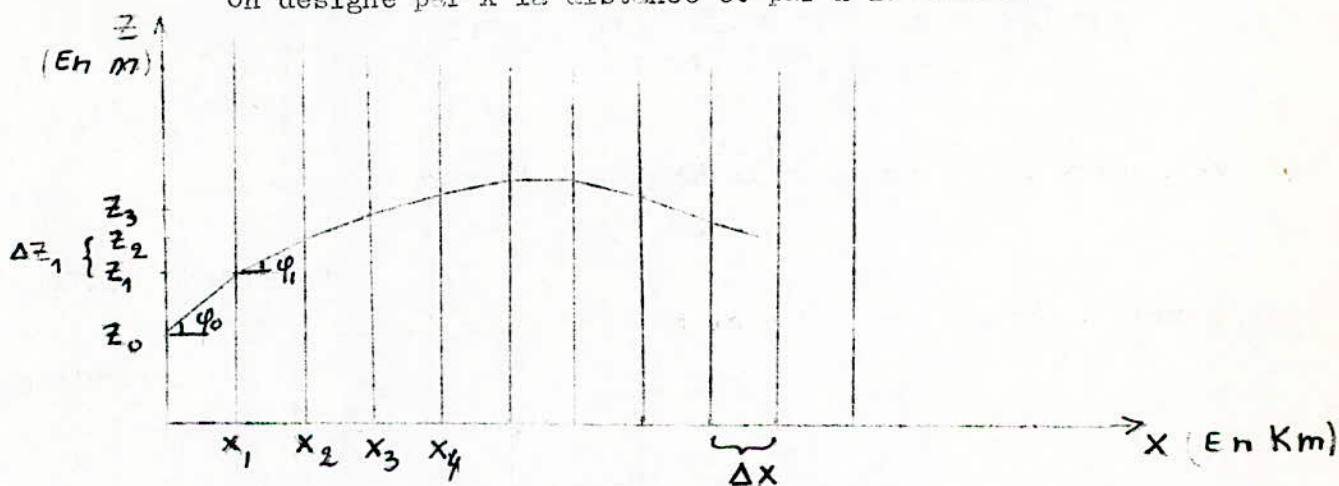
$$Z_i = Z_{i-1} + \Delta Z_{i-1}$$

$$X_i = X_{i-1} + \Delta X$$

Ceci dit connaissant un point quelconque du trajet , on peut facilement deduire le point suivant en utilisant ces deux equations recurrentes et l'equation de la trajectoire donnée par la relation (II.3). La trajectoire de l'onde est alors constituée par une succession de segments de droites .

Le point (Z_0, X_0) de la trajectoire etant donne (Z_0 est l'altitude correspondant au niveau de l'emetteur , $X_0 = 0$)

On designe par X la distance et par Z la hauteur



Expression de ΔZ_{i-1} :

On prend le pas suivant X , ce qui donne :

$$\text{TAN} \phi_0 = (Z_1 - Z_0) / (X_1 - X_0) = (Z_1 - Z_0) / \Delta X \quad Z_1 = Z_0 + \text{TAN} \phi_0 \cdot \Delta X$$

$$\text{TAN} \phi_1 = (Z_2 - Z_1) / (X_2 - X_1) = (Z_2 - Z_1) / \Delta X \quad Z_2 = Z_1 + \text{TAN} \phi_1 \cdot \Delta X$$

Et ainsi de suite , donc d'une façon générale on aura pour le point i de la trajectoire :

$$Z_i = Z_{i-1} + \Delta Z_{i-1}$$

$$X_i = X_{i-1} + \Delta X$$

Avec : $\Delta Z_{i-1} = \Delta X \cdot \text{TAN} \phi_{i-1}$

Marche à suivre pour le tracé :

_ Le premier point de la trajectoire represente la position de l'emetteur c'est à dire le point (Z_0, X_0) , l'angle au depart est ϕ_0

_ Connaissant Z_0 et ϕ_0 , on peut à partir de la courbe donnant M en fonction de l'altitude h determiner la valeur de l'indice modifié M_0 à la position Z_0

_ M_0 étant déterminé et ϕ_0 donné, on peut d'après l'équation (II.3) trouver la valeur de la constante C

$$C = (1 + M_0 \cdot 10^{-6}) \cdot \cos \phi_0$$

de même, on peut calculer $\Delta Z_0 = \Delta X \cdot \tan \phi_0$

_ X_0 et ΔZ_0 sont connus, on peut donc représenter le deuxième point (Z_1, X_1)

$$Z_1 = Z_0 + \Delta Z_0$$

$$X_1 = X_0 + \Delta X$$

_ On connaît Z_1 , on peut calculer la valeur de l'indice M_1 à partir de la courbe $M = f(Z)$

_ M_1 est déterminé, on peut déterminer la valeur de l'angle ϕ_1 à partir de l'équation (II.3)

$$\phi_1 = \text{ARCOS} \left(C / (1 + M_1 \cdot 10^{-6}) \right)$$

D'où la valeur de $\Delta Z_1 = \Delta X \cdot \tan \phi_1$

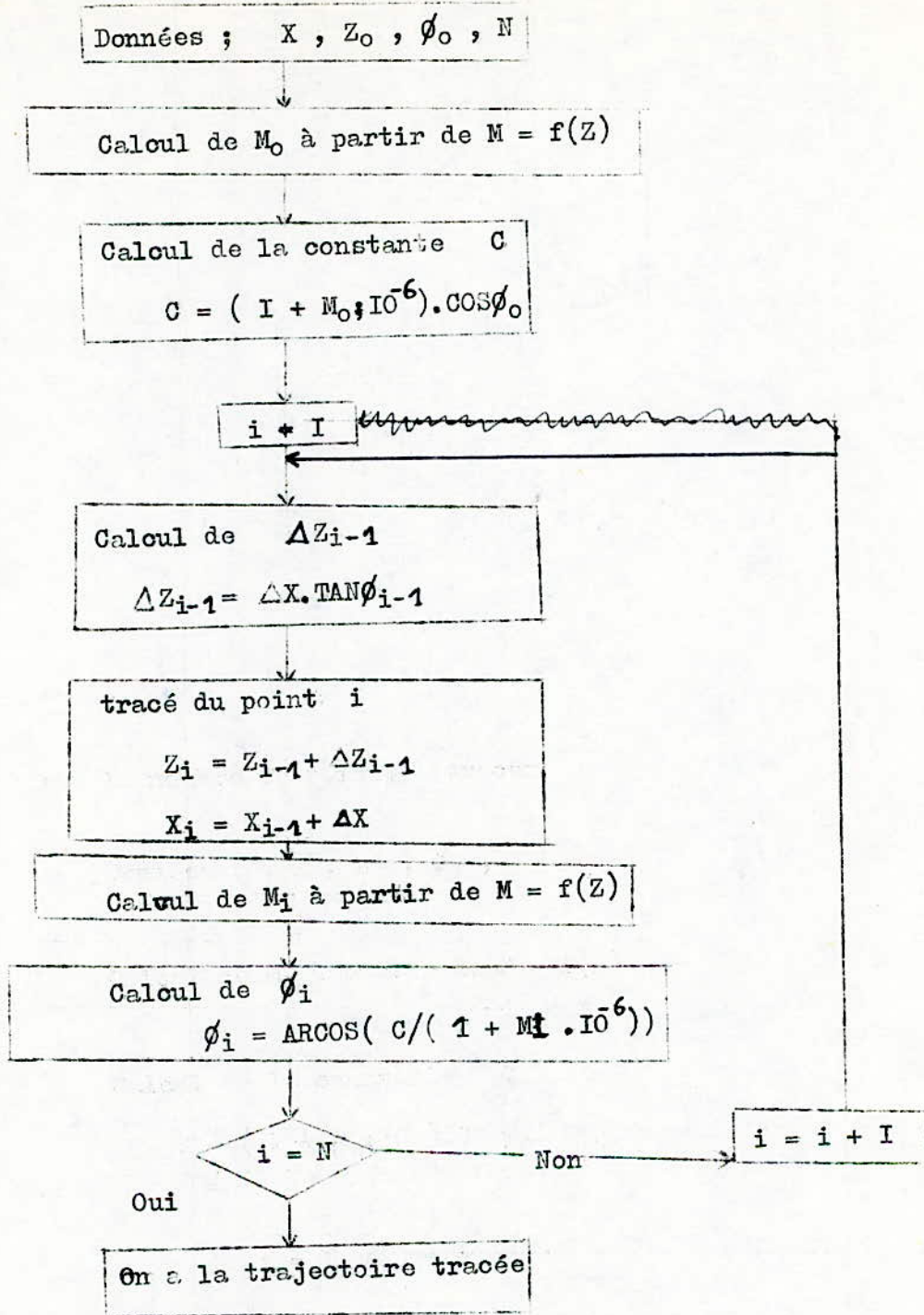
Et ainsi le troisième point est représenté

$$Z_2 = Z_1 + \Delta Z_1$$

$$X_2 = X_1 + \Delta X$$

Et ainsi, point par point, on peut reconstituer la trajectoire de l'onde

Reprenons ceci par un organigramme :



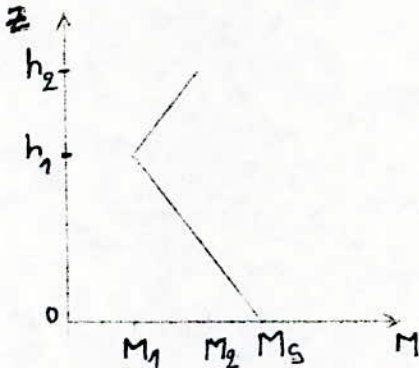
III.2 Methode analytique

On cherche dans cette methode à tirer une relation entre la distance X et l'altitude Z telle que l'on ait $X = f(Z, z_0, \phi_0)$; et ce à partir de la relation donnant l'equation des trajectoires et de celle donnant le profil de l'indice de réfraction modifié M en fonction de l'altitude .

Z_0 est la hauteur correspondante au niveau de l'emetteur

ϕ_0 est l'angle au depart (angle de site à la position Z)

On se limite dans ce cas au trace des trajectoires pour un conduit au sol .



Equation de M en fonction de Z :

$$M = - (M_1 - M_2) \cdot Z/h_1 + M_s = b_1 \cdot Z + M_s \quad \text{Pour } 0 < Z < h_1$$

$$M = (M_2 - M_1) \cdot (Z - h_1)/(h_2 - h_1) + M_1 = b_2 \cdot Z + M_1 \quad \text{Pour } h_1 < Z < h_2$$

M_s represente la valeur de M au sol

Reprenons l'equation(II.4)

$$\phi^2 = \phi_1^2 + 2(M - M_1) \cdot 10^{-6}$$

En exprimant l'angle en milliradian cette relation devient :

$$\phi^2 = \phi_1^2 + 2(M - M_1)$$

L'application de cette equation entre le point (Z_0, ϕ_0) de la trajectoire et le quelconque (Z, ϕ) de cette derniere donne en remplaçant M par /

$$M = b_1 \cdot Z + M_s \quad \text{pour } 0 < Z < h_1$$

$$b_1 \cdot Z - \phi^2 / 2 = b_1 \cdot Z_0 - \phi_0^2 / 2$$

Ce qui donne par différentiation

$$b_1 dZ - \phi d\phi = 0$$

D'autre part , comme l'angle ϕ est petit

$$dZ/dX = \text{TAN}\phi \approx \phi$$

On en déduit la representation paramétrique de la trajectoire

$$b_1 \cdot X = \phi - \phi_0$$

$$b_1 \cdot (Z - Z_0) = \phi^2 / 2 - \phi_0^2 / 2$$

l'élimination du paramètre ϕ donne l'équation cartésienne

$$Z = Z_0 + \phi_0 \cdot X + b_1 \cdot X^2/2$$

On connaît une parabole, qui à l'intérieur du conduit a sa concavité tournée vers le bas. Cette parabole doit être limitée au sol ($Z=0$) mais elle peut être limitée aussi au sommet du conduit ($Z = h_1$). Si l'angle au départ est trop grand, la trajectoire sort alors du conduit. Si l'on désigne par ϕ_e l'angle de sortie et par d_1 la distance de sortie correspondante, on trouve :

$$b_1 \cdot (h_1 - Z_0) = \phi_e^2/2 - \phi_0^2/2 \quad ; \quad b_1 \cdot d_1 = \phi_e - \phi_0$$

$$\phi_e^2 = \phi_0^2 + 2b_1(h_1 - Z_0)$$

et $d_1 = (\phi_e - \phi_0)/b_1$

avec $|\phi_0| \geq \sqrt{-2b_1(h_1 - Z_0)}$

Au dessus de la couche de guidage, l'équation de la trajectoire est donnée par :

$$Z = h_1 + \phi_e (X - d_1) + b_2 \cdot (X - d_1)^2/2$$

Longueur des "arches" dans un conduit

Si l'angle ϕ est inférieur à la valeur précédemment calculée la trajectoire reste dans le conduit. Elle se réfléchit sur le sol à la distance

$$d = - (\phi_0 + \sqrt{\phi_0^2 - 2b_1 Z_0})/b_1$$

il y a alors une succession d'arches. La longueur de chacune est donnée par la relation

$$L = - 2\sqrt{\phi_0^2 - 2b_1 Z_0}/b_1$$

la valeur maximale de L est obtenue lorsque l'angle ϕ a la valeur limite précédemment calculée c'est à dire

$$|\phi_0| = \sqrt{-2b_1(h_1 - Z_0)}$$

On obtient alors pour longueur maximale des arches

$$L_{max} = 2\sqrt{2h_1/-b_1}$$

Condition pour avoir au moins une trajectoire passant à la même hauteur que celle de l'émetteur dans le conduit quelle que soit la distance.

Une trajectoire partant de l'émetteur sous l'angle ϕ_0 repasse après réflexion à la même hauteur à la distance L calculée précédemment. Pour la première arche, c'est à dire celle passant par l'émetteur, les abscisses des points situés à la hauteur h sont d'après l'équation de

cette trajectoire

$$X_1 = 0 \quad \text{et} \quad X_2 = -2\phi_0/b_1$$

Les abscisses des points successifs situés à la même hauteur forment deux suites à savoir

$$n_1 L \quad \text{et} \quad -2\phi_0/b_1 + n_2 L \quad n_1 \quad \text{et} \quad n_2 \quad \text{sont des entiers}$$

Les trajectoires limites, tangentes à la surface supérieure du conduit sont obtenues pour

$$\phi_0 = \pm \sqrt{-2b_1(h_1 - Z_0)}$$

et elle ont pour longueur L_{\max} défini précédemment

$$L_{\max} = 2\sqrt{2}\sqrt{h_1 - b_1}$$

Les abscisses de la première suite ne dépendent pas du signe de ϕ_0 et les trajectoires correspondantes se croisent à la hauteur Z . Les abscisses de la seconde suite dépendent du signe de ϕ_0 et en conséquence les trajectoires montantes et les trajectoires descendantes ne se croisent pas à la hauteur Z_0 . On aura toujours une trajectoire passant à la hauteur Z_0 quelle que soit la distance. S'il n'existe pas d'intervalle entre les trajectoires ayant subi n réflexions et les trajectoires ayant subi $(n+1)$ réflexions et si l'on désigne par ϕ_0 la valeur positive de l'angle, ~~xxx~~ la condition s'écrit donc

$$nL + 2\phi_0/-b_1 \gg (n+1)L + 2\phi_0/-b_1$$

soit

$$4\phi_0/-b_1 \gg L$$

ou

$$\phi_0^2 \gg b_1^2 L^2 / 16$$

Compte tenu des expressions de ϕ_0 et de L , la condition s'écrit finalement

$$Z_0 \leq 3h_1/4$$

L'émetteur doit être placé dans les trois quarts inférieurs du conduit.

- IV - ETUDE EXPERIMENTAL

Dans ce chapitre on se propose de tracer les trajectoires d'ondes radioélectriques connaissant le profil du coefficient de réfraction en fonction de l'altitude

IV . I Données et mesure de l'indice de réfraction

La mesure de l'indice de réfraction de l'air peut être envisagée à partir de deux méthodes différentes .

a/ Méthode thermodynamique

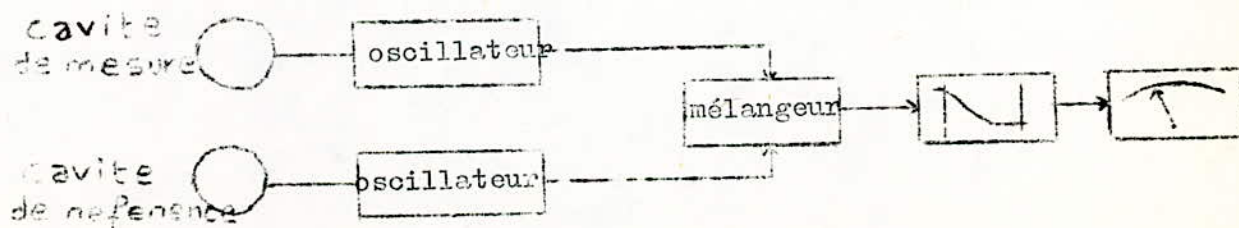
Cette méthode permet par application de l'équation I.2 de calculer l'indice de réfraction . En effet cette équation lie l'indice de réfraction n (ou N) aux paramètres météorologiques pression, température, et l'humidité . Donc les relevés de ces paramètres permettent de déterminer l'indice N (ou n) et par conséquent M (ou m) qui est fonction de N et de l'altitude .

La mesure des diverses paramètres est faite de façon indépendante par divers appareils de mesure qui sont montés dans une même sonde cette dernière est alors fixée sous un ballon et les indications des appareils sont retransmises par radio au cours de l'ascension du ballon .

b/ Méthode électronique

Cette méthode permet de mesurer directement l'indice de réfraction à l'aide d'un appareil qu'on appelle "Réfractomètre" . Dans son principe , le réfractomètre comprend une cavité isolée du milieu ambiant qui sert de référence . Une cavité est ouverte au passage de l'air et sert de cavité de mesure . Au repos les deux cavités ont la même fréquence de résonance . Mais lorsqu'un gaz d'indice variable circule dans la cavité de mesure la fréquence de résonance est fonction de l'indice de ce gaz . Une méthode de battement entre les deux cavités permet aussi une mesure de l'indice de ce gaz .

Le schéma de principe de cet appareil est représenté ci-dessous



Vu les paramètres météorologiques pression, température, humidité qu'on nous a fournis et qui concernent la station de NIMES pour trois dates différentes, nous avons adopté la méthode thermodynamique. Cependant ces relevés sont insuffisants pour une étude complète de la propagation troposphérique.

On a élaboré un programme (voir annexe C) qui permet de calculer et de tracer le coindice de réfraction N , et le coindice de réfraction M modifié en fonction de l'altitude.

Les formules utilisées dans ce calcul sont les suivantes :

$$N = 77,6.P/T + 600.P.R/T^2. (R/622 + 1)$$

$$M = N + h/a$$

où

N : est exprimé en unité de N

T : en degré Kévin

P : en millibars

R : en g/kg

a : rayon terrestre en milliers de Km ($a = 6,37$)

h : altitude en mètres

M : en unité de M

Les résultats de calcul, ainsi que les données sont dressées séparément pour chaque date dans les tableaux qui suivent.

IV.2 Tracé des trajectoires

La méthode utilisée pour le tracé, est la méthode pas à pas. Le programme de simulation des trajectoires (voir annexe C) établi a été exécuté sur l'OLIVETTI (M 24).

Les seules données nécessaires pour l'exécution du programme sont :

- Le profil de M en fonction de l'altitude ($M = f(h)$)

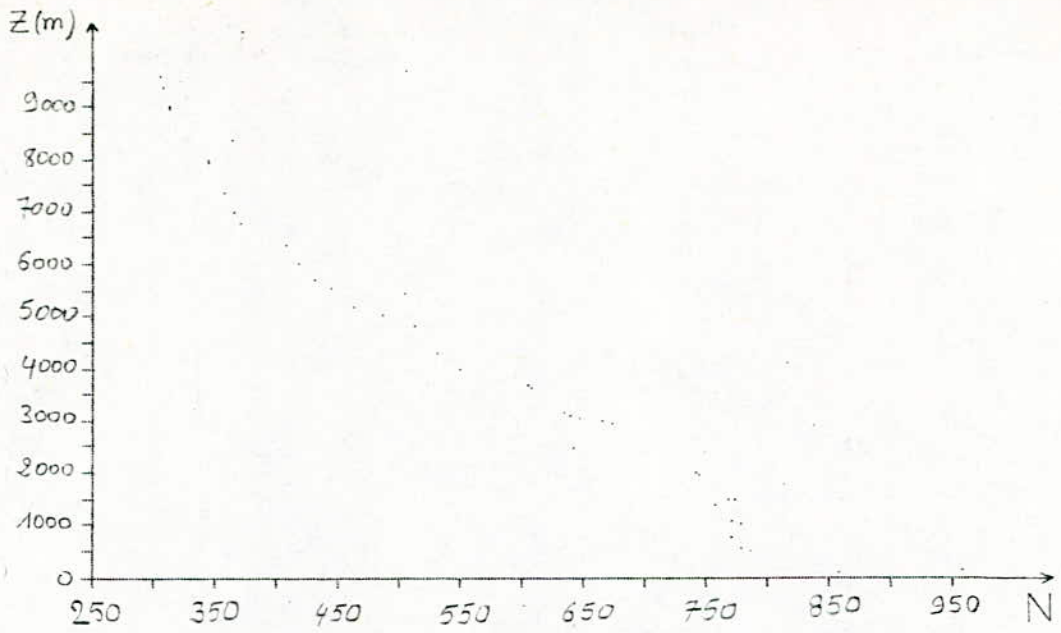
- Position de l'émetteur Z_0

- L'angle d'émission ϕ_0

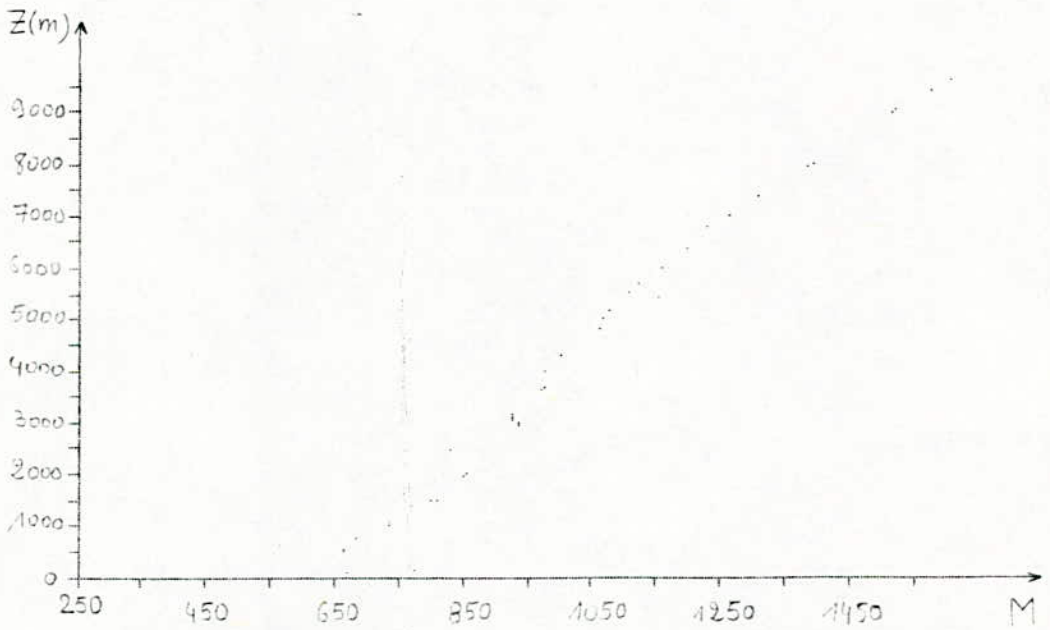
DONNEES : 12 OCTOBRE 1982

RESULTATS DE N=F(P,T,R) ET DE M=F(P,T,R,Z)

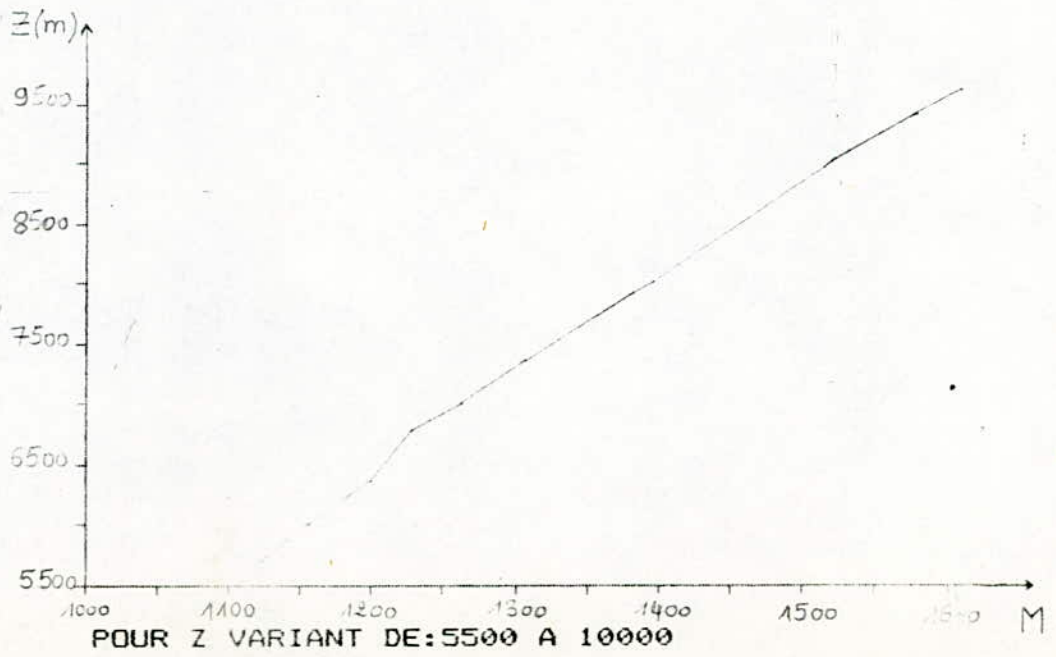
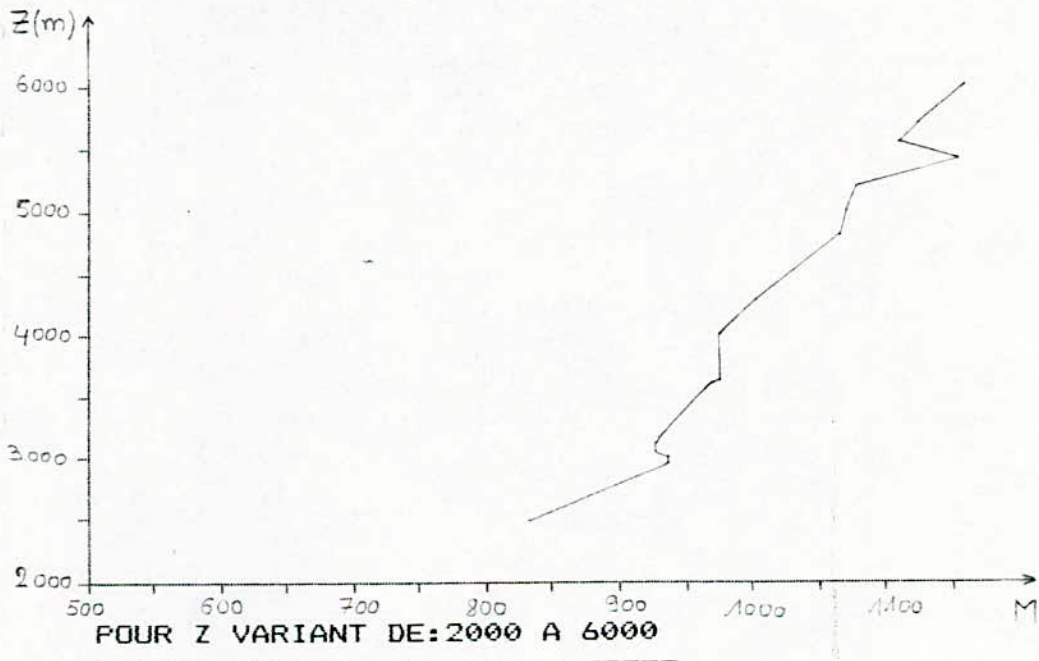
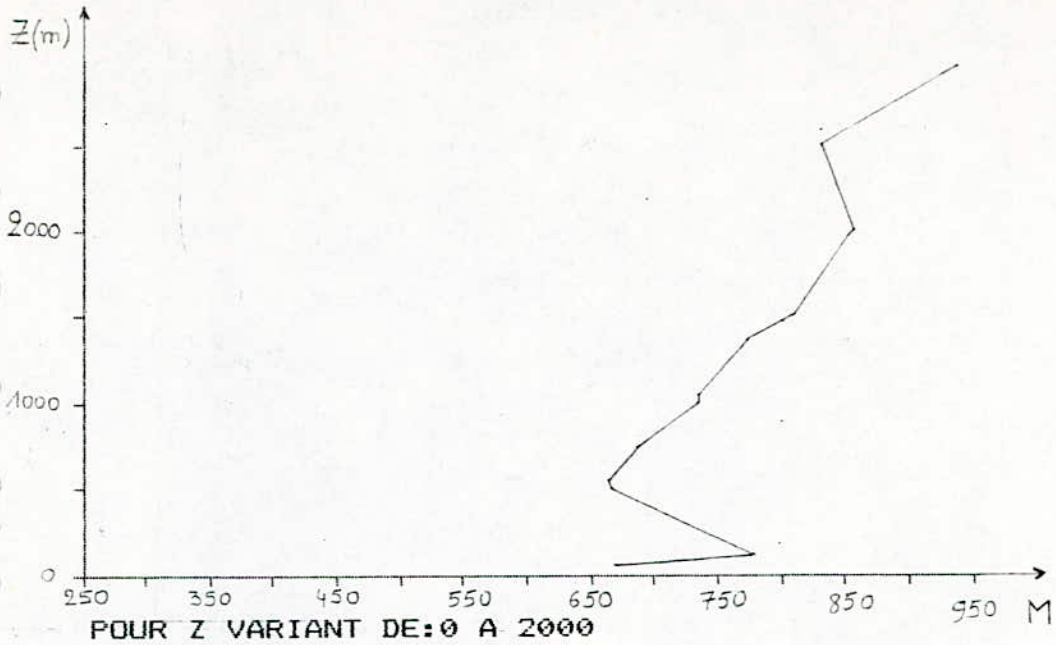
P	T	R	Z	N	M
1006.4	16.5	59	62	658.021523	667.709023
928	9.8	49	742	570.873091	686.810591
894.4	8.6	52	1048	571.219985	734.969985
861.2	9	54	1362	559.828021	772.640521
708.7	0	52	2952	475.24025	936.49025
695	.4	47	3110	441.045814	926.983314
653.4	-2.9	44	3602	408.54839	971.360891
581.7	-6.9	29	5416	306.209152	1152.45915
561.4	-8.4	33	4792	315.410633	1064.16063
533.1	-7.3	25	5194	264.590245	1076.15275
458.6	-16.7	17	6348	208.165299	1200.0403
433.3	-18.6	10	6772	171.704879	1229.82988
370.8	-27.6	8	7912	146.433547	1382.68355
319.5	-35.5	3	8968	114.53916	1515.78916
291	-40	3	9614	106.518789	1608.70629
690.2	0	46	3164	434.186365	928.561366
510.6	-10	22	5528	244.76872	1108.51872
1000	-15.8	55	116	760.035921	778.160921
950	11.5	49	546	578.991816	664.304316
900	8.8	53	996	579.939465	735.564464
850	8.4	57	1470	570.692143	800.379643
800	6	57	1968	544.488516	851.988517
750	27	54	2494	442.431953	832.119453
700	.2	48	3050	449.580878	926.143378
650	-3.1	44	3642	406.886558	975.949058
600	-6.4	33	4274	333.368624	1001.18112
500	-11.4	20	5690	233.261734	1122.32423
400	-23.4	9	7362	158.535319	1308.84782
300	-37.8	3	9406	108.694294	1578.38179
959.3	12.1	50	500	588.82683	666.95183
899.6	8.9	53	1000	579.358364	735.608364
846.9	8.3	58	1500	574.312878	808.687878
797	5.8	57	2000	543.066088	855.566088
704.5	.1	51	3000	467.317338	936.067338
621.3	-4.4	35	4000	350.708729	975.708728
546.5	-7.7	29	5000	288.935298	1070.1853
480.2	-13.8	18	6000	218.785181	1156.28518
420.1	-20.3	10	7000	167.853607	1261.60361
366.2	-28.2	8	8000	145.042208	1395.04221
318	-34.7	3	9000	113.584912	1519.83491



* COURBE DE* N=F(Z) 12 OCTOBRE 1982 A 12H TU *



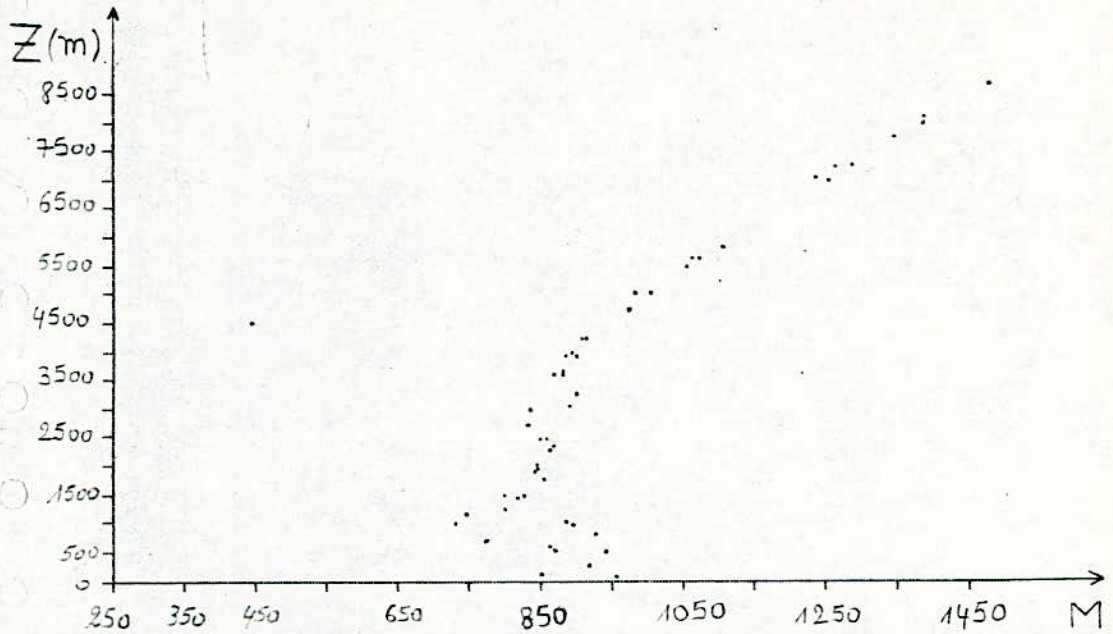
* COURBE DE: M=F(Z) 12 OCTOBRE 1982 A 12H TU *



P	T	R	Z	N	M
1000.2	16	111	62	945.352495	955.039995
542.2	-13.7	13	5000	223.874769	1005.12477
912.6	11.5	93	836	796.231433	926.856433
474.7	-18.3	10	6000	187.838038	1125.33804
869.1	9.1	62	1244	608.509168	802.884168
414.4	-25.7	8	7000	162.145776	1255.89578
817.5	6.1	62	1748	582.308738	855.433738
360.2	-33.6	5	8000	135.460774	1385.46077
726.2	1.9	38	2712	411.479767	835.229767
1006.4	18	87	62	812.624417	822.311917
622.8	-5.8	18	3932	272.433914	886.808914
985.6	16.2	102	240	884.056737	921.556737
561.1	-12.1	14	4740	234.607161	975.232161
946.6	12.9	85	580	776.541751	867.166751
508.8	-16.7	10	5482	199.787186	1056.34969
937.9	13.3	67	660	669.463857	772.588857
483	-16.9	11	5830	194.111576	1105.04908
881.6	9.8	53	1176	564.927878	748.677878
374.2	-31.3	5	7732	139.203486	1347.32849
770	.5	51	2284	509.592178	866.467178
325.2	-40	2	8708	115.47211	1476.09711
681.3	-5.8	36	3254	392.705088	901.142588
700.1	0	32	3004	370.536165	839.911165
647.2	-8.4	23	3654	312.824176	883.761676
580.7	-10	16	4476	249.914055	949.289055
542.6	-15.4	8	5004	202.204701	984.079701
412	-31.4	2	7020	140.774002	1237.649
950	13.5	102	496	865.836225	943.336225
354.5	-40	2	8062	125.875963	1385.56346
900	10.8	85	952	747.459407	896.209407
764.2	0	50	2344	501.947169	868.197169
850	8	62	1426	598.885774	821.698274
625.3	-10	20	3920	289.601782	902.101782
800	5.1	56	1924	542.080196	842.705196
1000	17.4	91	116	832.024894	850.149894
750	2.6	47	2450	470.066174	852.878675
950	13.1	86	548	783.804143	869.429143
700	-.1	31	3004	365.572712	834.947911

900	10.9	54	1002	578.891863	735.454363
650	-3.8	23	3596	306.733885	868.608885
850	7.1	56	1478	569.445959	800.383459
600	-8.1	16	4222	255.789917	915.477417
800	3	53	1974	532.668673	841.106173
500	-17.3	10	5612	196.898155	1073.77315
750	-1.7	45	2494	471.083285	860.770785
400	-27.9	7	7256	154.29647	1288.04647
700	-4.5	39	3040	416.112345	891.112345
949.7	13.6	102	500	865.048608	943.173608
650	-8.2	24	3620	319.011385	884.636385
894.8	10.6	83	1000	733.65405	889.90405
600	-12	14	4236	250.748177	912.623178
842.5	7.6	62	1500	594.962935	829.337935
500	-20	7	5614	185.802459	1062.98996
792.6	4.8	55	2000	532.793439	845.293439
400	-33.1	2	7226	137.700795	1266.7633
700.5	.1	32	3000	370.549292	839.299292
617.4	-6.3	18	4000	270.748577	895.748577
955.6	13.7	89	500	801.752365	879.877365
900.4	11	55	1000	584.490331	740.740331
847.8	7	57	1500	573.74663	808.12163
797.5	2.9	54	2000	536.637553	849.137553
703.5	-4.1	40	3000	422.412923	891.162923
618.8	-10.4	19	4000	282.124845	907.124845
542.8	-15.3	9	5000	206.9585	988.2085
474.5	-22.6	5	6000	169.571765	1107.07177
413.1	-31.1	2	7000	140.964317	1234.71432
357.7	-39.4	2	8000	126.665799	1376.6658

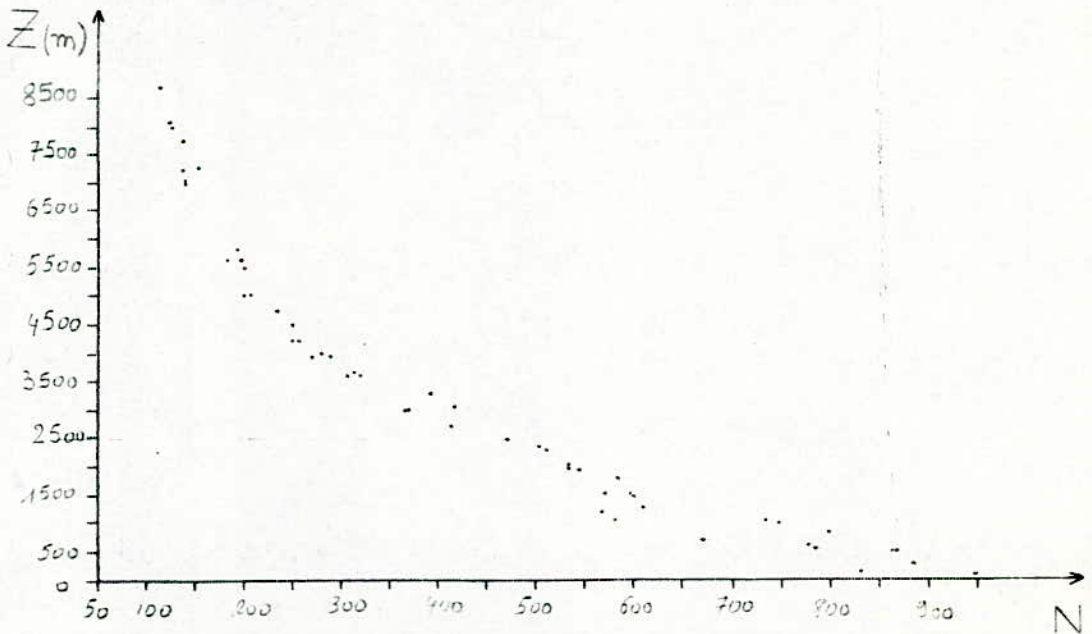
K=54



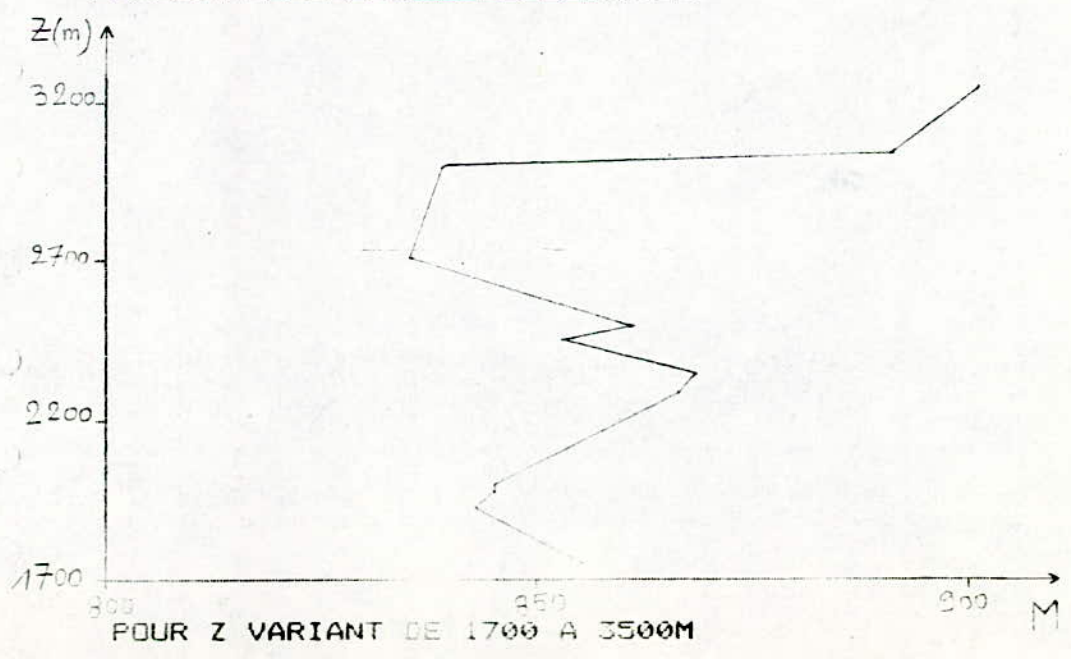
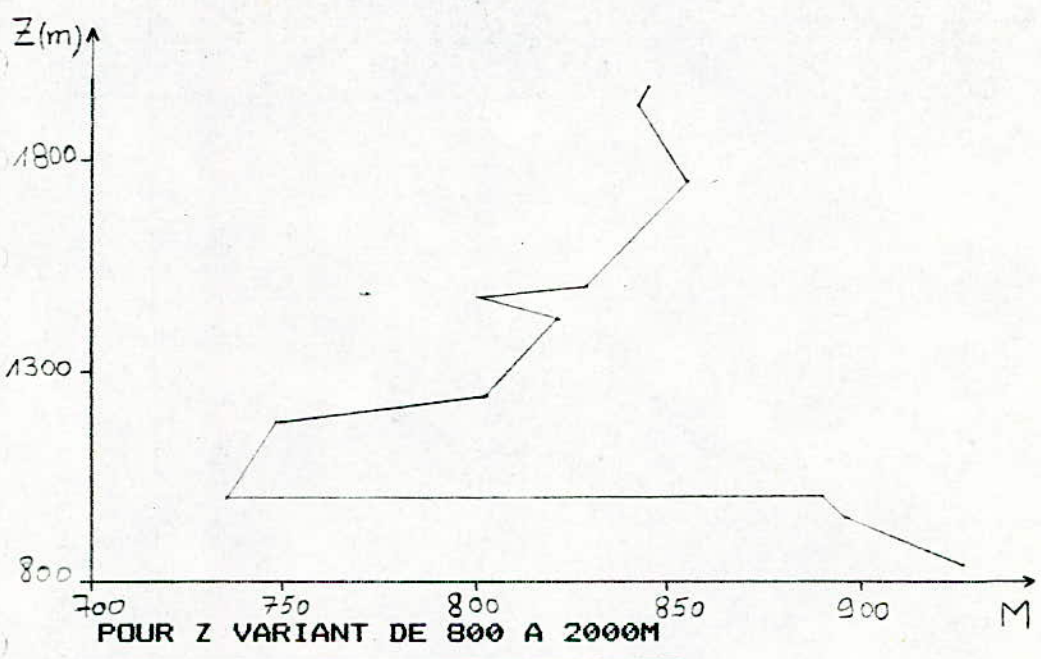
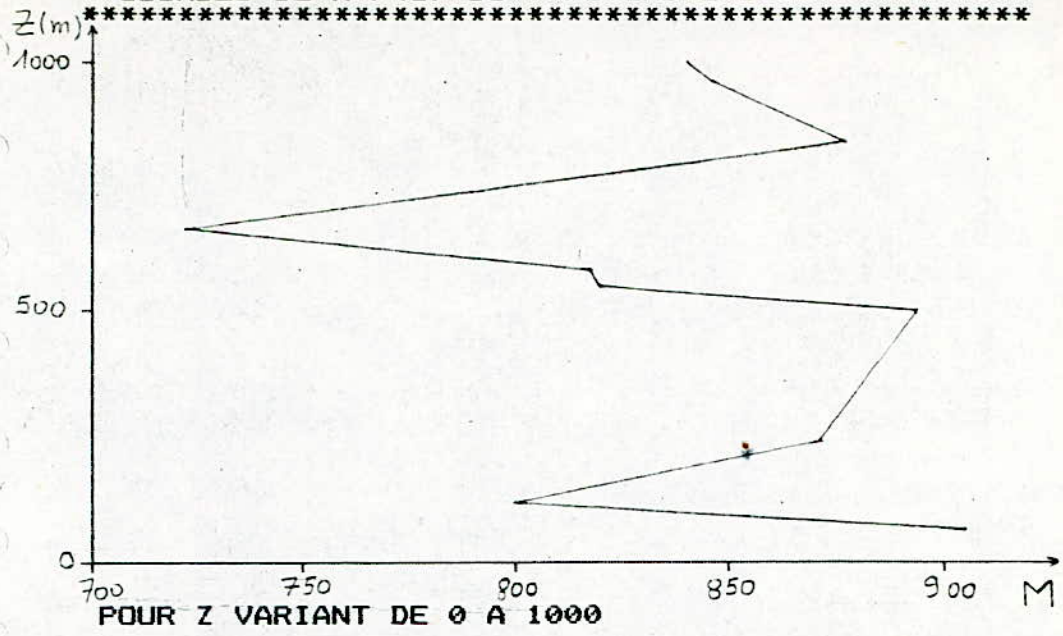
* COURBE DE: M=F(Z) 9 NOVEMBRE 1982 A 00H TU *

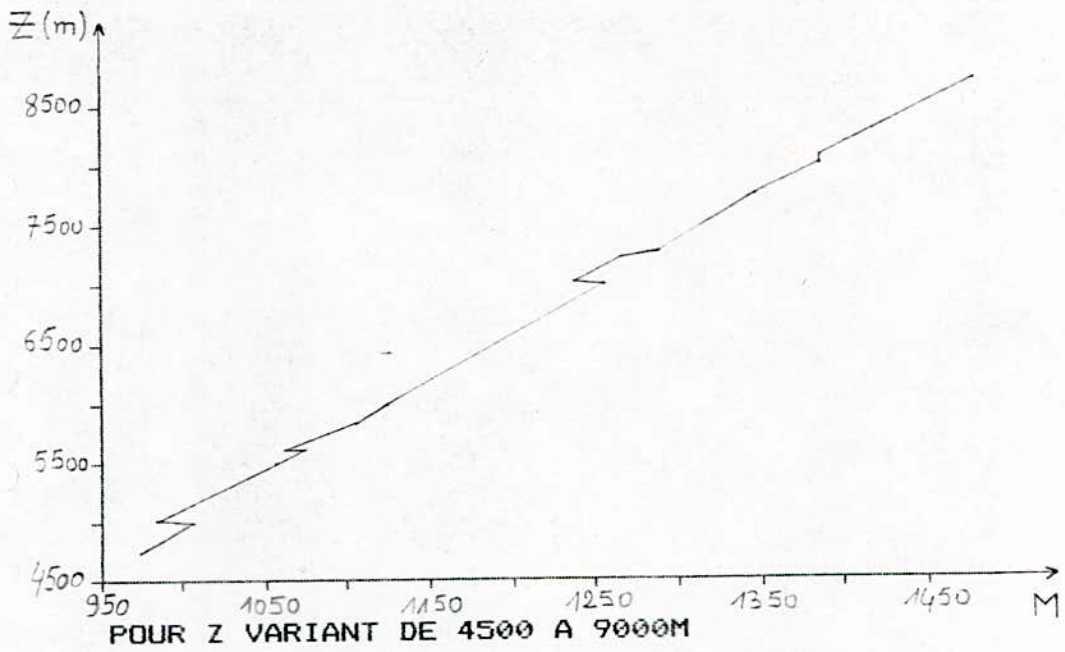
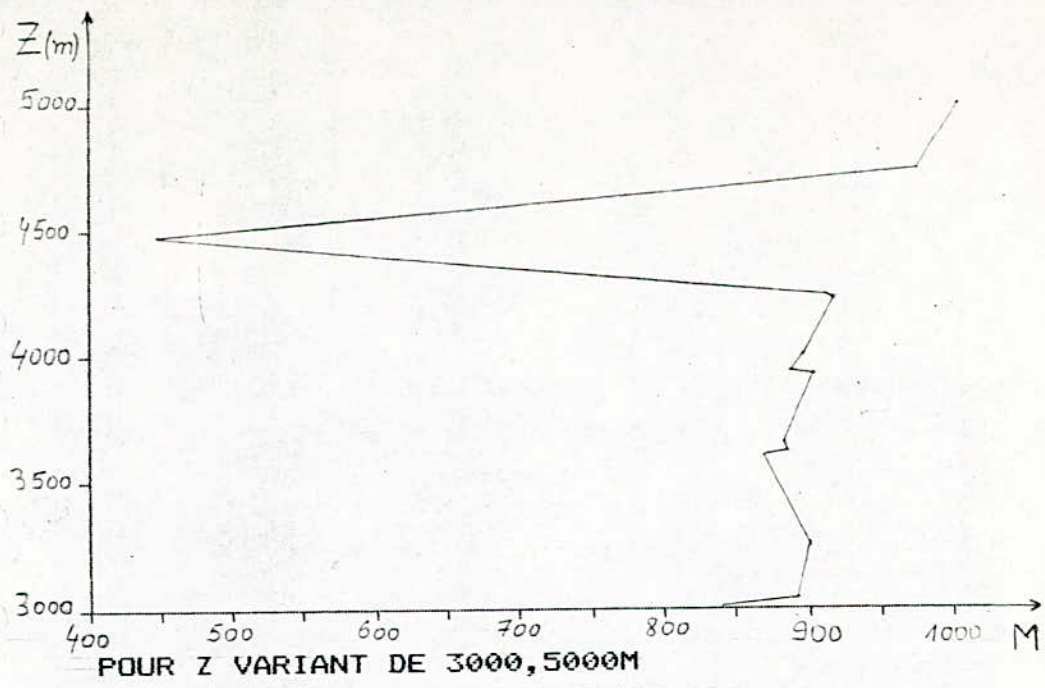
IRUN

K=54



* COURBE DE: N=F(Z) 9 NOVEMBRE 1982 A 00H TU *

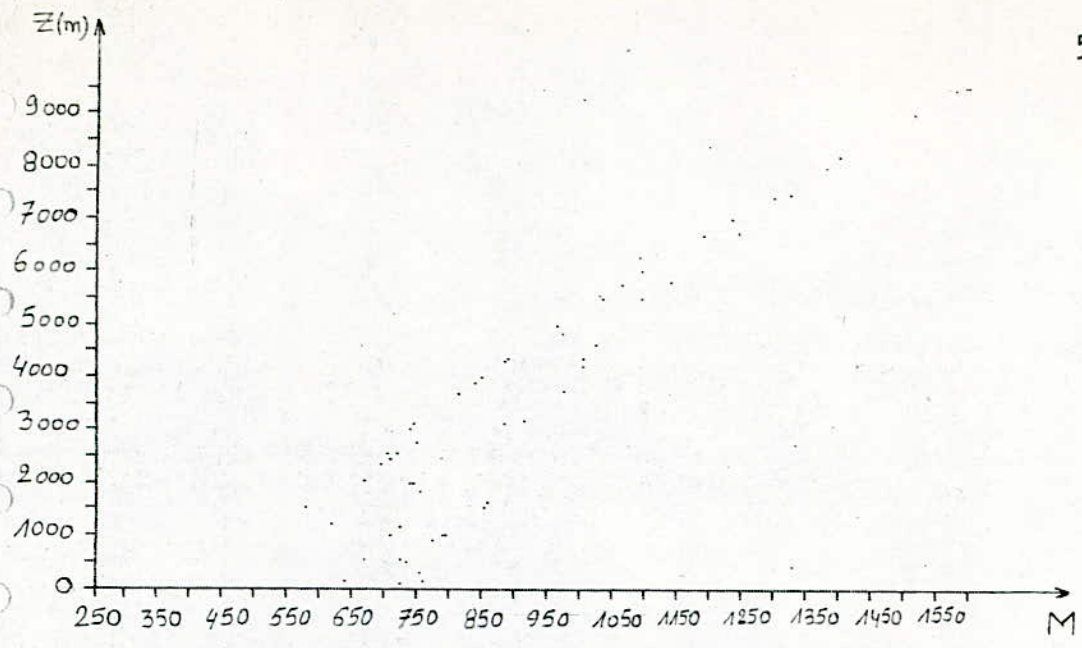




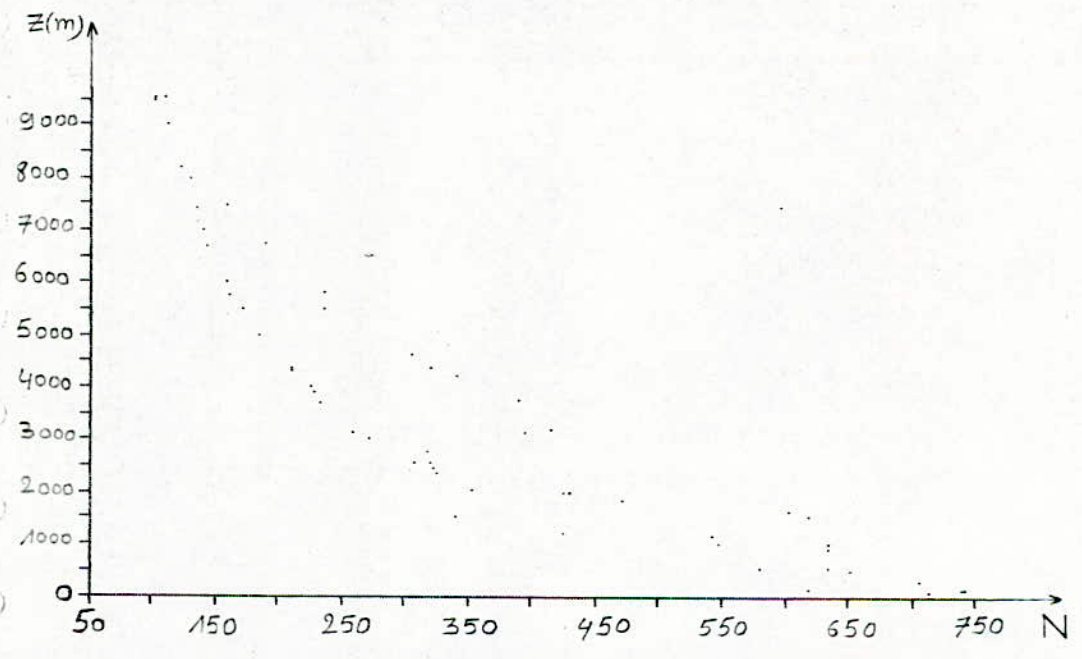
RESULTATS DE N=F (P, T, R) ET DE M=F (P, T, R, Z)

P	T	R	Z	N	M
1006.6	20	71	62	714.914734	724.602234
1006.1	28.1	61	62	629.181927	638.869427
1000.9	19.6	76	110	740.499928	757.687428
978.1	21	74	308	707.171758	755.296758
914.4	16.9	66	886	634.291648	772.729148
837.4	10.2	66	1628	603.260758	857.635757
818.5	10	43	1818	471.060136	755.122636
767	8.1	20	2356	324.589012	692.714012
633.3	3	10	3922	227.150843	839.963343
442.6	-19.3	2	6700	143.604834	1190.47983
360.8	-31.1	2	8182	123.117709	1401.55521
295.7	-40	1	9568	101.74488	1596.74488
604.1	0	8	4300	210.127552	882.002553
516.5	-10	4	5530	170.203768	1034.26627
1000	19.6	76	116	739.834077	757.959077
950	19.1	63	560	634.545372	722.045372
950	22.2	55	562	580.255703	668.068203
900	15.6	67	1022	634.141193	793.828693
900	17.4	52	1026	547.775919	708.088419
850	11.3	68	1502	618.790805	853.478305
850.2	11.4	68	1500	618.58279	852.95779
851.4	16.1	19	1500	341.219355	575.594355
800	9.6	36	2008	424.207699	737.957699
800.8	9.7	37	2000	429.773358	742.273358
802.4	12.9	24	2000	353.898062	666.398062
750	7.3	18	2540	307.830412	704.705412
700	5.6	12	3106	258.679276	743.991776
709.1	5.9	14	3000	272.186955	740.936954
711.6	9	28	3000	339.670862	808.420862
650	3.9	10	3708	232.219758	811.594758
650	2.8	43	3740	389.097838	973.472838
600	-.5	8	4354	209.154496	889.466997
500	-12.1	3	5780	161.874433	1064.99943
500	-12.3	20	5808	234.361269	1141.86127
400	-24.8	3	7442	136.692031	1299.50453
400	-23.9	9	7478	158.922273	1327.35977
300	-39.3	1	9470	102.905357	1582.59286

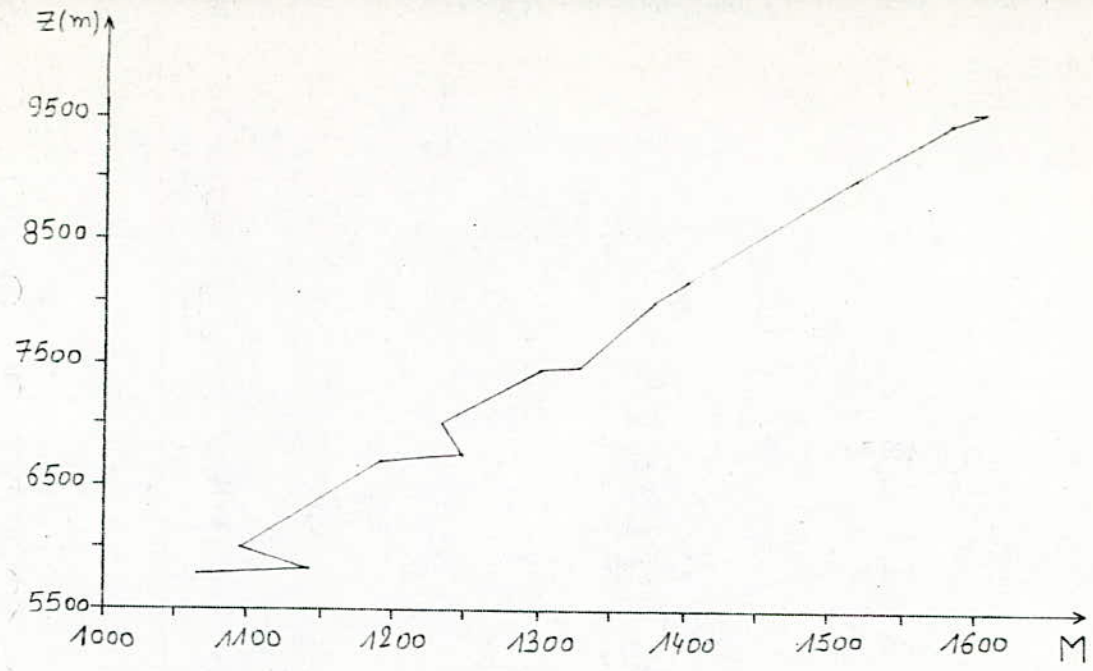
956.7	19.7	66	500	653.424153	731.549153
956.9	22.9	57	500	593.339541	671.464541
902.3	15.9	67	1000	634.693759	790.943759
902.8	17.8	53	1000	553.748065	709.998065
627.1	2.4	10	4000	225.523216	850.523216
629.4	1.4	42	4000	375.318249	1000.31825
553	-5.5	5	5000	183.421355	964.671355
555.2	-5.9	25	5000	273.523354	1054.77335
485.7	-13.8	3	6000	158.36052	1095.86052
437.6	-13.6	19	6000	202.849553	1140.34955
425	-22.1	2	7000	139.522389	1233.27239
426.8	-20.3	12	7000	178.27471	1272.02471
370.2	-30	3	8000	129.450945	1379.45094
372.1	-27.7	7	8000	143.396306	1393.39631
321.2	-35.4	2	9000	111.709355	1517.95936
886.6	16.2	52	1156	543.120481	723.745481
877.9	17.2	32	1240	425.106949	618.856949
759	10	21	2464	323.631363	708.631363
732.6	10.7	22	2758	316.431956	747.369456
694.5	7.4	45	3200	414.606141	914.60614
582.5	-2.4	30	4622	303.64516	1025.83266
440.6	-18.6	14	6764	190.324024	1247.19902
297.7	-40	3	9564	108.971284	1603.34628
611.6	0	36	4232	341.40291	1002.65291
520.1	-10	23	5506	253.524835	1113.83734
1000	26.9	59	114	618.248537	636.061037
850	16.1	19	1514	340.658271	577.220771
800	12.6	24	2024	353.352865	669.602865
750	10.2	21	2562	319.487443	719.799943
700	7.9	40	3134	393.428262	883.115762
600	-1	32	4384	319.267007	1004.26701



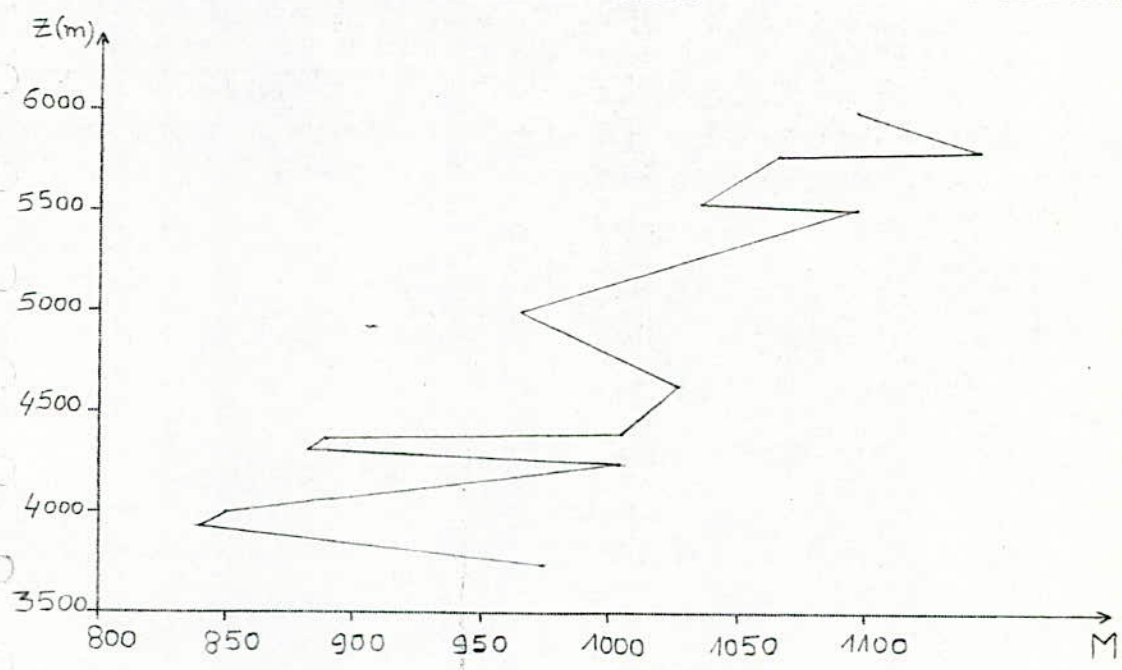
* COURBE DE: $M=F(Z)$ DU 24 JUIN 1982 A 00H TU *



* COURBE DE: $N=F(Z)$ DU 24 JUIN 1982 A 00H TU *



POUR Z VARIANT DE 5500 A 10000M



POUR Z VARIANT DE 3500 A 6000M

Pour illustrer la methode de trace de rayons , citons 3 exemples qui sont representés par les fig IV.1 et IV.2, IV.3

A partir des equations II. 7 et A.4 (annexe A) on a calculer la longueur d'onde max et l'angle limite pour ces 3 exemples . Les résultats sont dressés dans le tableau suivant.

	position de l'emetteur	hauteur du conduit H	ΔM	angle limite ϕ_l	λ_{Max}
f fig IV.1 12.oct .82	5416 m	235 m	43.97	9.4 mrad	6 m
fig IV.2 12.oct.82	116 m	479 m	112	15 mrad	18 m
fig IV.3 9 . nov . 82	78 m	116 m	200	12 mrad	4 m

Remarques

_ Pour la fig IV. 1 , on a un conduit au sol, de plus notons la présence de zones éclairées, ainsi que des zones d'ombres. Graphiquement, la zone éclairée s'étend à peu près sur 29 km, par contre, celle qui est sombre s'étend sur 18 km environ

_ De la fig IV.2 on en deduit la présence d'un guide en altitude, près du sol, donc pour qu'il y est reception il faudrait que l'antenne soit située dans la zone éclairée.

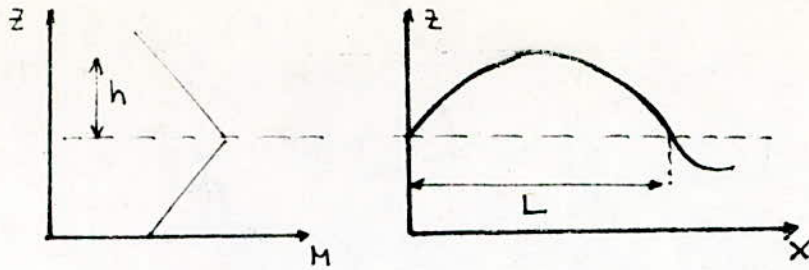
_ Pour la fig IV.1, le guide est situé à une altitude assez élevée (5000m) et c'est là où les avions sont susceptibles de se trouver

On note aussi, une légère symetrie des trajectoires d'angles $\pm \phi$, et cela est due au fait que les pentes qui forment le coude ont approximativement la même valeur absolue

_ Tous ces guides favorisent le guidage des ondes de la gamme VHF , UHF

Longueur des arches

Faisant une comparaison entre les trois méthodes de mesure de la longueur des arches .



-Méthode pas à pas

On mesure directement les longueurs des arches sur les graphes des figures IV.1 , IV.2, IV.3 , à l'aide d'une règle graduée.

Prenons l'exemple de la fig IV.2, et mesurant la longueur de l'arche qui correspond à l'angle limite ($\theta = 15 \text{ mrad}$) d'émission ; on trouve

$$L = 111 \text{ Km}$$

- Méthode analytique

De l'équation III.3 $L = 113 \text{ Km}$

- Méthode (représentation à terre fictive)

De l'équation 11.1 $K = -5.94$

Le signe de K nous montre que la terre fictive est concave .

$$L = 2.1 K I. a. \theta$$

$$L = 113 \text{ Km}$$

fig IV.2 CONDUIT en altitude près du sol

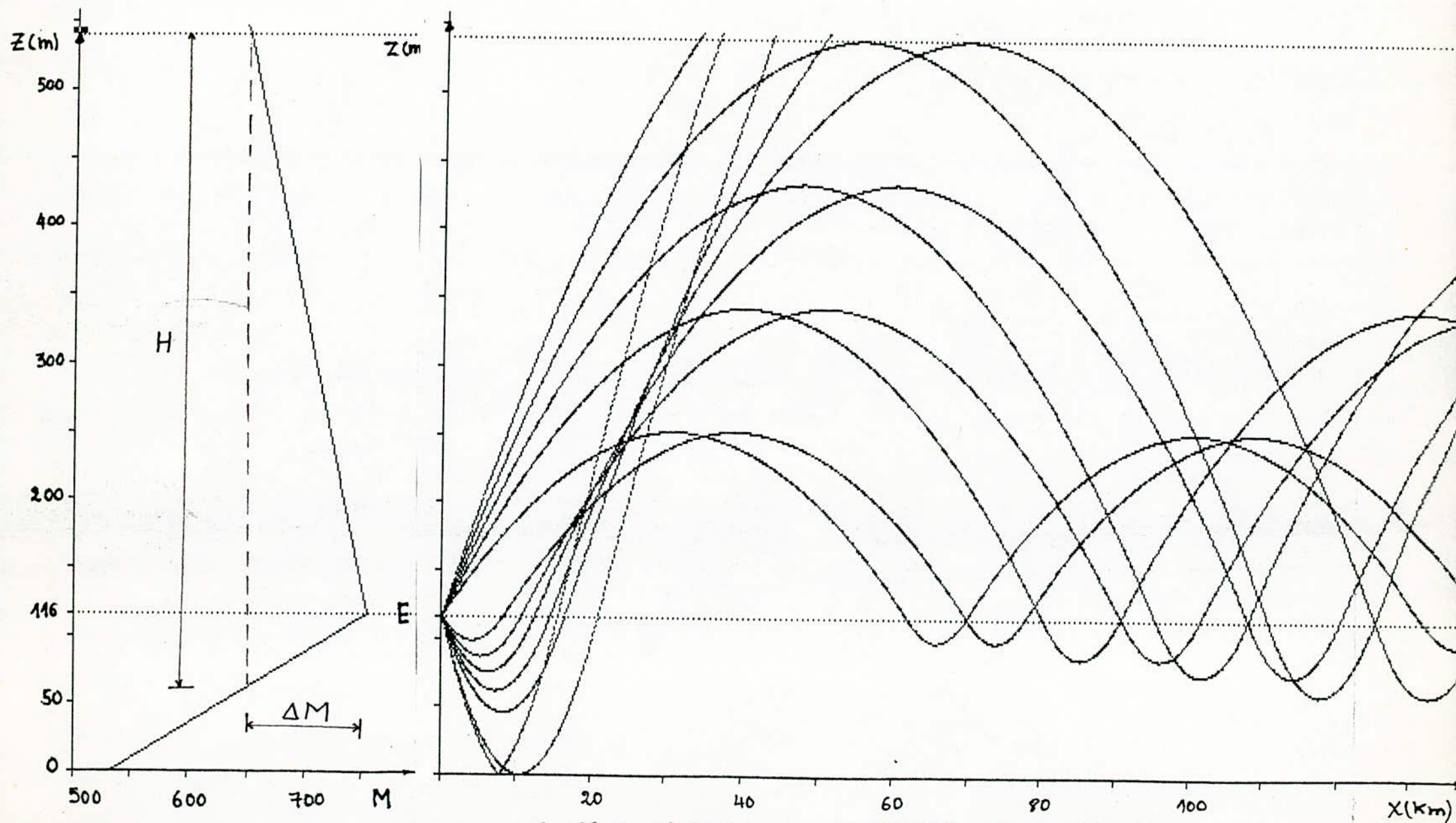


fig IV.2 CONDUIT EN ALTITUDE PRES DU SOL

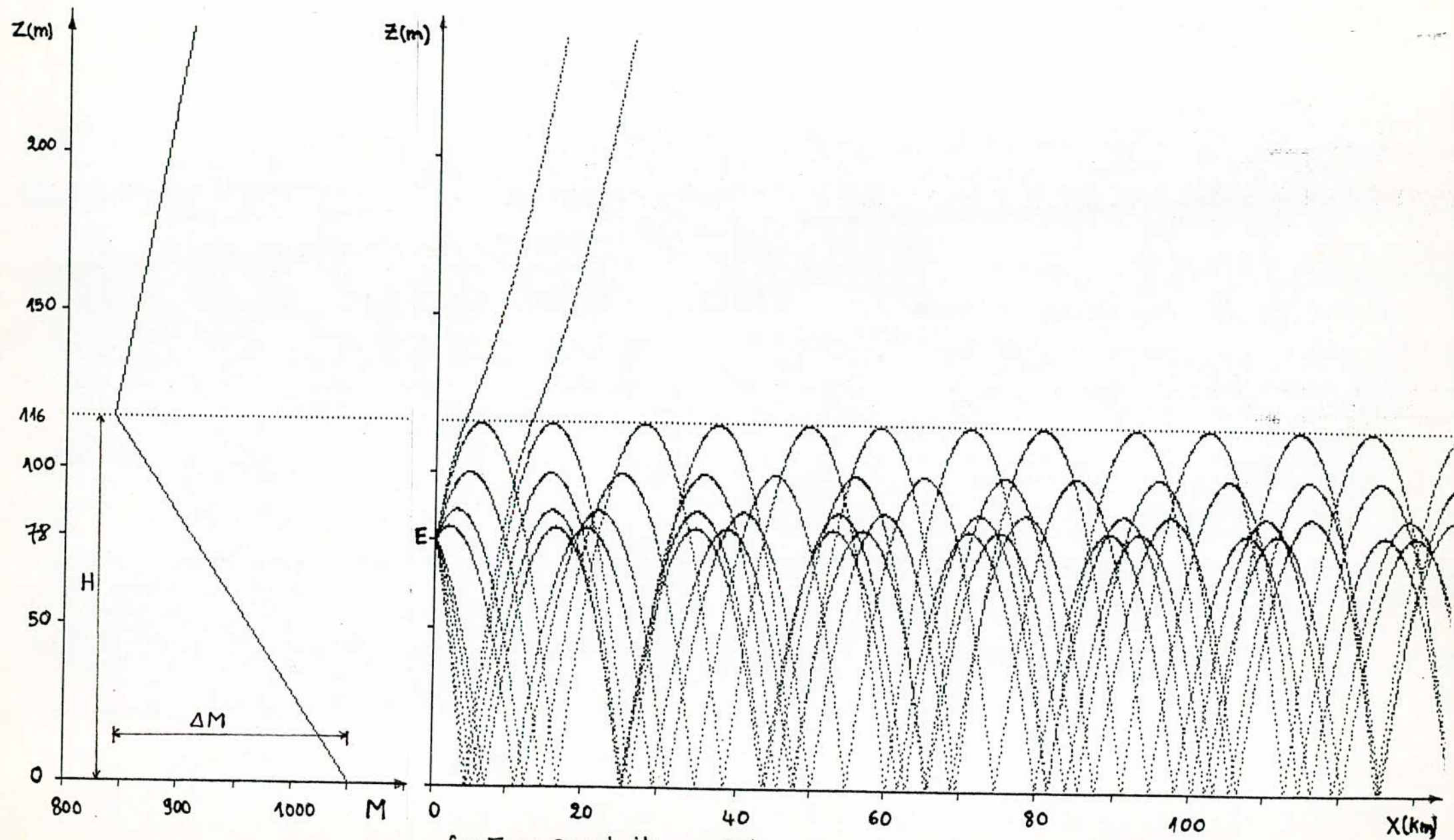


Fig IV.3 Conduit au sol

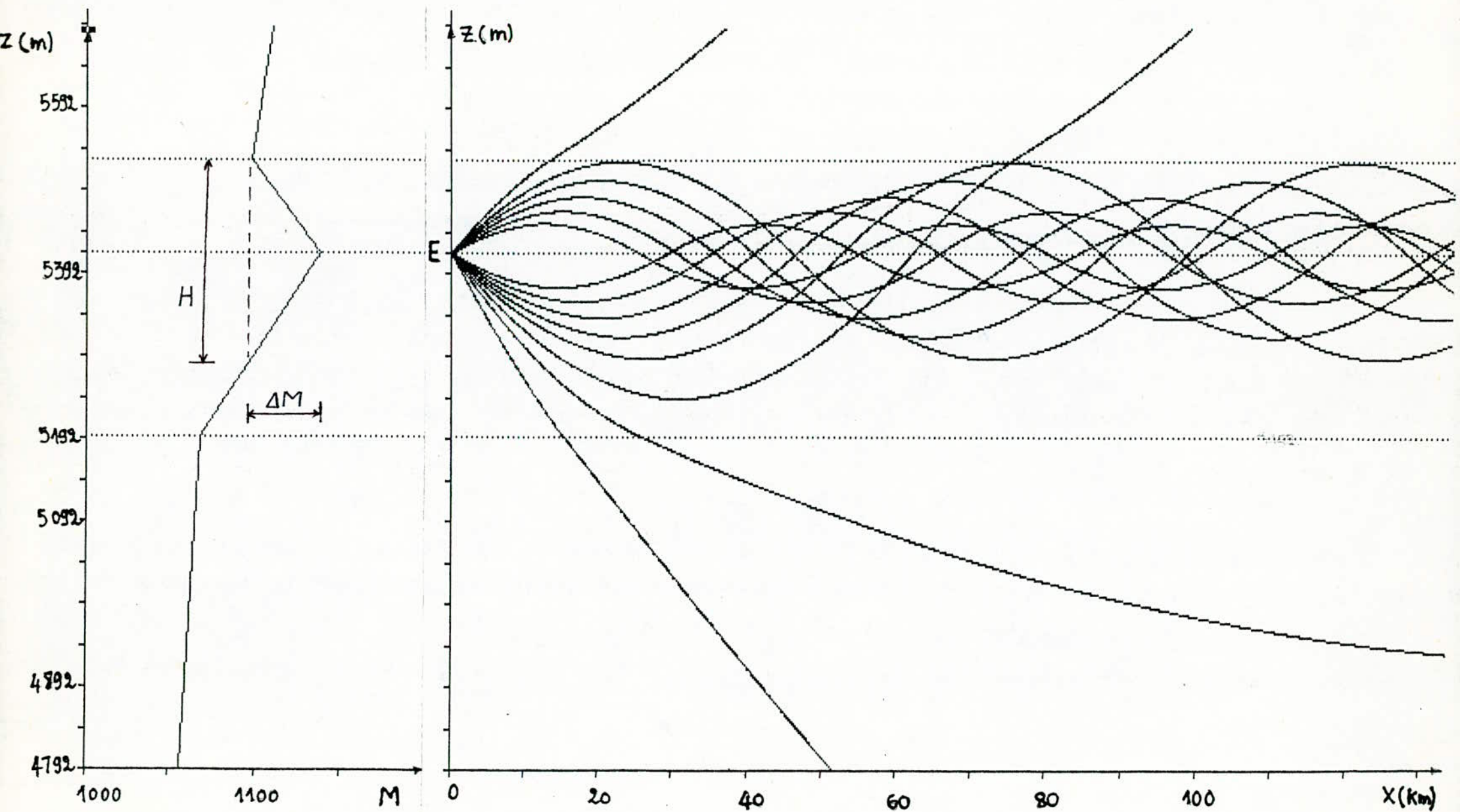


Fig IV. 1 CONDUIT EN ALTITUDE

- CONCLUSION -

L'objet de notre travail a été d'étudier les guides atmosphériques par tracé de rayons et de voir les différentes conditions météorologiques favorables à leur formation . Il est essentielle de remarquer que le guidage troposphérique n'affecte que les "rayons" voisins de l'horizontale par ailleurs , une étude théorique plus approfondie montre que , pour qu'il y ait guidage, il faut aussi respecter une condition de fréquence

De plus cette étude nous a permis d'attirer l'attention sur les facteurs météorologiques .

La méthode de tracé de rayons s'avère en tout cas nécessaire, pour l'étude des phénomènes de propagation troposphérique, car c'est une méthode simple , ne faisant pas intervenir les équations de MAXWELL qui présentent un certain nombre de difficultés mathématiques, et qui seraient très longues pour être exposées sous une forme plus ou moins simplifiée .

Notons ainsi que la méthode pas à pas nous a permis d'élaborer des programmes de simulation des trajectoires, faites à l'aide du micro-ordinateur (APPEL II). On a pu visualisé les courbes sur un écran TV, mais vu les problèmes survenus ultérieurement à savoir, lecteur de disquettes détérioré, interface de l'imprimante non disponible. On a fait recours au micro-ordinateur (OLLEVITE°). Cependant la modification des programmes précédent est nécessaire.

Pour conclure nous pouvons noté que cette étude aurait pu être plus intéressante, si on avait eu des données météorologiques concernant notre pays, pour une période assez longue. Espérant que ce travail peut être plus benifique à ceux qui seront intéressé par notre sujet, et ceci pour qu'ils achevent cette étude .

- ANNEXE A -

Théorie des modes

D'après cette théorie, l'onde se propage dans le conduit troposphérique suivant un certain nombre de modes, lequel nombre dépend du rapport, entre l'épaisseur du conduit et la longueur d'onde.

En supposant une décroissance linéaire de l'indice modifié M avec l'altitude, on aura d'après cette théorie, l'épaisseur minimal H pour le mode d'ordre n.

$$H/\lambda = A_n/\sqrt{\Delta M} \quad (1)$$

ΔM est la décroissance totale de M dans la couche de guidage et A_n est un nombre qui dépend du rang du mode considéré.

Pour un conduit au sol, on a approximativement

$$A_1 = 400 \quad A_2 = 930 \quad A_3 = 1460$$

Au lieu de prendre comme paramètre la valeur ΔM dans la couche de guidage, on peut utiliser le gradient dM/dh , en tenant compte du signe.

$$dM/dh = -\Delta M/H, \quad dM/dh \text{ est exprimé en unité de M par mètre}$$

On aboutit ainsi à l'expression suivante :

$$(H)^{3/2}/\lambda = A_n/\sqrt{-dM/dh} \quad (2)$$

Comme d'autre part on a $dM/dh = dN/dh + 1/a = 1/K.a$

On peut exprimer aussi la relation précédente en fonction du coefficient multiplicatif du rayon terrestre K.

$$(H)^{3/2}/\lambda = A_n\sqrt{|K|.a} \quad C_n\sqrt{|K|} \quad (3)$$

$$C_1 = 1004 \quad C_2 = 2342 \quad C_3 = 3685$$

H et λ étant exprimées en mètre et A en milliers de Km

Exemple :

Supposons qu'au voisinage du sol existe une tranche d'atmosphère de 100m d'épaisseur, avec un gradient d'indice de réfraction $dN/dh = -300 N/Km$, surmontée d'une atmosphère normale. Dans cette tranche la décroissance de M est égale à

$$\Delta M = -H.dM/dh = -H(dN/dh + 1/a)$$

$$\Delta M = -100(-300/1000 + 1/6.37) = 14.30 \text{ unités de M}$$

Ce qui donne pour le premier mode d'après la relation (1) :

$$H/\lambda = 400/\sqrt{14.3} = 105.8$$

La longueur d'onde la plus longue qui peut être guidée est donc

$$\lambda = 100/105.8 = 0.945m \text{ soit } f = 317 \text{ MHz}$$

On voit d'après cet exemple qu'un conduit troposphérique de quelques centaines de mètres, peut guider les ondes métriques.

Le nombre de modes guidés étant de quelques unités en ondes métriques et de quelques dizaines en ondes décimétriques.

La longueur d'onde maximale qui peut être guidée dans le cas général est donnée par la relation suivante :

$$\lambda_{\max} = H \cdot \sqrt{\Delta M} / 400 = 0.25 \text{ IO } H \sqrt{\Delta M}$$

D'où $\lambda_{\max} = 2.5 H \sqrt{\Delta M}$ (4)

Condition d'existence des modes guidés dans un conduit troposphérique

Comme les conduits troposphériques sont pratiquement parallèles au sol, on opérera en représentation à terre plane en remplaçant l'indice n par l'indice modifié m . Les distances seront désignées par X et les hauteurs par Z .

Le déphasage dû à un petit déplacement ds incliné de l'angle ϕ est donné par :

$$d\phi = (2\pi/\lambda) \cdot m \cdot (dx \cdot \cos\phi + dz \cdot \sin\phi) \cdot ds \quad ((5))$$

Et le déphasage entre les points (x_2, z_2) et (x_1, z_1) de la trajectoire est égal à l'intégrale de la quantité ci-dessus

Mais la loi de DESCARTES donne :

$$m \cdot \cos\phi = m_0 \cdot \cos\phi_0 = A$$

$$\phi_2 - \phi_1 = (2\pi/\lambda) \cdot (A(x_2 - x_1) + \int_{z_1}^{z_2} m \cdot \sin\phi \cdot dz) \quad (6)$$

Comme le conduit est limité dans la direction OZ, la seule solution possible consiste en un régime d'ondes stationnaires entre les limites supérieures et inférieures du conduit. Il faut pour cela que le terme contenant l'intégrale soit égal à un certain nombre de fois 2 lorsque l'intégrale est calculée sur un aller et retour entre le bas du conduit et le haut.

Si l'on tient compte de l'avance d'un quart d'onde qui se manifeste lorsqu'une onde passe par un foyer ou une caustique (Surface limite du conduit), on obtient la relation qui définit les modes pouvant exister dans un conduit situé entre les hauteurs h_1 et h_2 au dessus du sol (Fig 2)

$$(4\pi/\lambda) \cdot \int_{z_1}^{z_2} m \cdot \sin\phi \cdot dz - \pi = 2k\pi \quad (7)$$

k étant un entier quelconque

Si l'on tient compte de la loi de DESCARTES, écrite entre un point quelconque d'une trajectoire et le sommet de cette trajectoire, c'est à dire

$$m \cdot \cos \phi = m_2$$

La relation (7) devient :

$$\left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \int_{h_0}^{h_2} \left(m^2(z) - m_2^2 \right)^{1/2} dz = 4 \left(k + 1/2 \right) \cdot \pi / 2 \quad (8)$$

Comme m est voisin de l'unité, on utilise de préférence son excès M

$$m = 1 + M \cdot 10^{-3}$$

Et l'équation (8) devient :

$$\int_{h_0}^{h_2} \sqrt{M(z) - M_2} dz = \lambda \left(k + 1/2 \right) \cdot 10^3 / 2\sqrt{2} \quad (9)$$

Avec : $M_2 = M(h_2) = M(h_0)$

Pour calculer cette intégrale, on doit connaître la fonction $M(z)$. On va faire le calcul en supposant que c'est une fonction linéaire de l'altitude à l'intérieur du conduit (Voir figure 2)

$$M(z) = \Delta M \cdot (z - h_0) / (h_1 - h_0) + M_2 \text{ Pour } h_0 < z < h_1$$

$$M(z) = \Delta M \cdot (z - h_2) / (h_1 - h_2) + M_2 \text{ Pour } h_1 < z < h_2$$

En désignant par ΔM la décroissance totale de M à l'intérieur du conduit

L'intégration donne la relation suivante, dans laquelle H représente la hauteur totale du conduit entre les altitudes h_0 et h_2

$$H/\lambda = \left(3(k + 1/2) \cdot 10^3 / 4\sqrt{2} \right) \cdot 1/\sqrt{\Delta M}$$

Pour $k = 0$ (premier mode) on a : $H/\lambda = 265/\sqrt{\Delta M}$

Pour $k = 1, 2, 3$, on trouve respectivement 795-1325-1855

Cas d'une couche de guidage au sol (Fig 1)

Si la couche de guidage est au sol la tranche d'atmosphère au dessous de h n'existe pas. D'autre part la réflexion se fait sur le sol avec un changement de phase de π . L'équation (7) est alors remplacée par

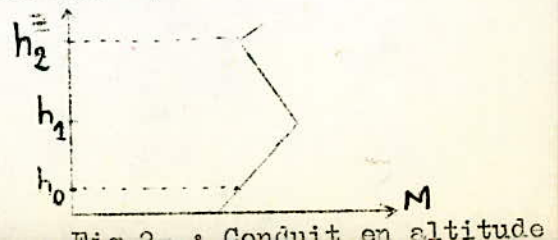
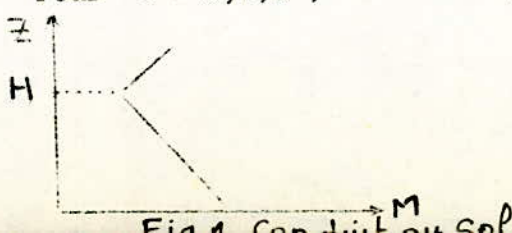
$$\left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \cdot \int_0^H m \cdot \sin \phi \cdot dz - \pi/2 - \pi = 2k\pi$$

Et on aura :

$$H/\lambda = \left(3(k + 1/4) \cdot 10^3 / 4\sqrt{2} \right) \cdot 1/\sqrt{\Delta M}$$

Pour $k = 0$ (premier mode) on a : $H/\lambda = (398)/\sqrt{\Delta M} = 400/\sqrt{\Delta M}$

Pour $k = 1, 2, 3$, on trouve / 928-1458-1988



ANNEXE B

PROPAGATION EN ESPACE LIBRE

Introduction

Les ondes électromagnétiques sont dues à des phénomènes électriques et magnétiques. Elles sont caractérisées par la présence de deux champs variables, l'un électrique et l'autre magnétique .

C

Considérations générales

Il est bon de rappeler très succinctement quelques notions fondamentales relatives à la propagation normale des ondes radioélectriques

Les relations fondamentales de MAXWELL ne sont pas autre chose que l'expression des lois générales de l'électromagnétisme .

- Le premier groupe (Relation de MAXWELL-AMPERE) s'écrit :

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} \quad \text{avec} \quad \vec{J} = \sigma \vec{E} + \epsilon \partial \vec{E} / \partial t$$

\vec{H} : champ magnétique

\vec{J} : densité de courant au point où règne H

\vec{E} : champ électrique

ϵ : constante diélectrique

- Le deuxième groupe (Relation de MAXWELL-FARADAY)

$$\text{rot } \vec{E} = - \partial \vec{B} / \partial t \quad \text{avec} \quad \vec{B} = \mu \vec{H}$$

\vec{B} : étant vecteur induction magnétique

μ : perméabilité magnétique

Ces deux groupes traduisent les faits physiques suivants :

- La variation de courant implique la création d'un champ magnétique
- De même la variation du champ magnétique implique la création d'un champ électrique .

Ces deux effets vont de pair .

Pour un milieu homogène sans perte ($\vec{I} = 0$) /

Les équations de MAXWELL deviennent

$$\text{rot } \vec{H} = \epsilon \partial \vec{E} / \partial t \quad ; \quad -\text{rot } \vec{E} = \mu \partial \vec{H} / \partial t$$

Combinant ces deux dernières équations nous pouvons conclure :

$$\nabla^2 \vec{E} = (I/v^2). \partial^2 \vec{E} / \partial t^2 \quad ; \quad \nabla^2 \vec{H} = (I/v^2). \partial^2 \vec{H} / \partial t^2$$

Ces relations sont les équations d'onde se propageant à la vitesse $v = I/\sqrt{\epsilon \mu}$

Puissance de rayonnement d'une onde

L'onde électromagnétique est une forme d'énergie de rayonnement qui est d'autant plus forte que les intensités des champs électriques et

magnétique sont grandes . Il est courant de parler de la puissance de rayonnement émise par une source et de la densité de puissance autour de la source .

L'expérience montre qu'une source d'onde S , de puissance de rayonnement P , émettant uniformément dans toutes les directions de l'espace, distribuera à une distance d une densité de puissance Pr telle que

$$Pr = P/4\pi d^2$$

Or cette densité de puissance peut être exprimée aussi au moyen du vecteur de POYNTING

$$S = E \wedge H$$

Si l'on est loin de l'antenne on a

$$E/H = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi \text{ Ohms}$$

Le module de S a pour valeur

$$|S| = E^2 \sqrt{\epsilon_0/\mu_0} = E^2/120\pi$$

$$\text{On en déduit } E^2/120\pi = Pt/4\pi d^2$$

D'où le champ électrique

$$E = \sqrt{30P} / d$$

Cette formule s'écrit souvent en prenant comme unité pratique respectivement le millivolt par mètre, le kilomètre et le kilowatt (Fig B.1)

$$E(\text{mv/m}) = 173\sqrt{P(\text{Kw})} / d(\text{km})$$

Affaiblissement de propagation en espace libre

Entre antennes isotropes

On appelle ainsi le rapport entre la puissance Pe émise par une antenne isotrope et la puissance Pr reçue par une autre antenne isotrope placée à la distance d de la première .

$$Pr/Pe = (\lambda/4\pi d)^2$$

L'affaiblissement de transmission est représenté par le rapport inverse, qui est un nombre en général grand et qu'on exprime en décibels (Fig B.2)

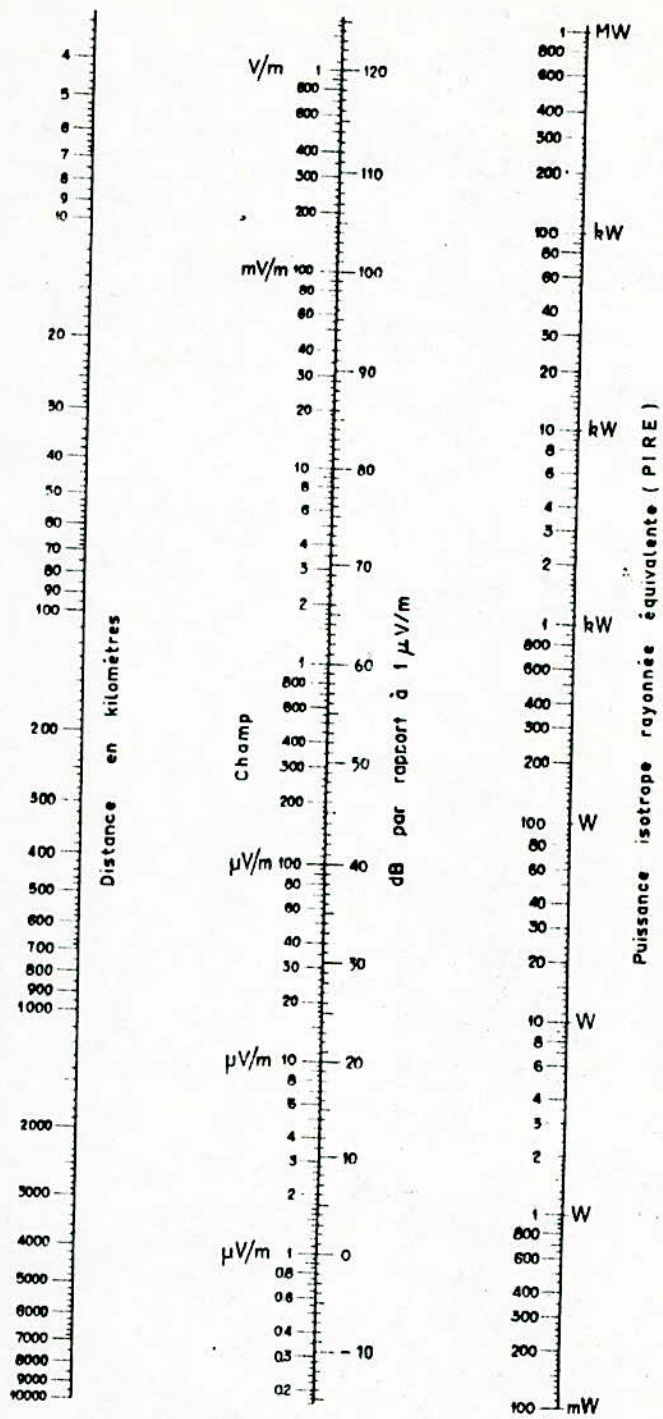


Fig. B1. Champ en espace libre.

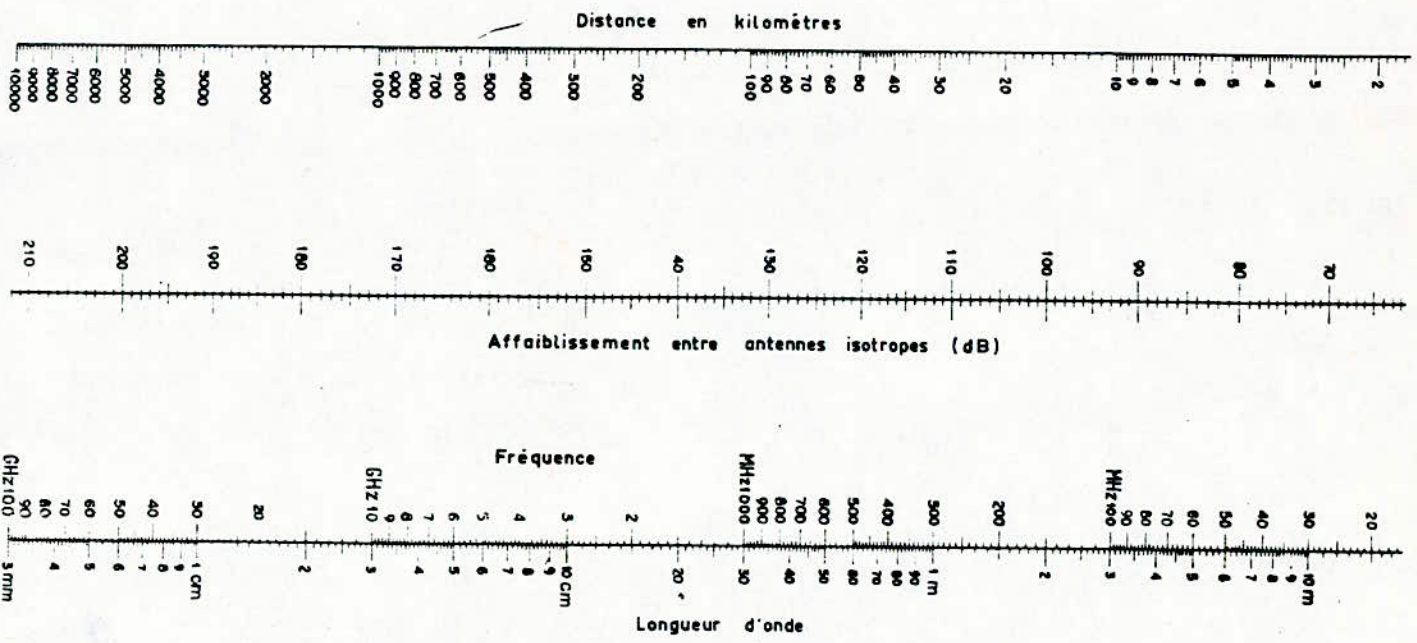


Fig. B2 Affaiblissement en espace libre entre antennes isotropes.

ANNEXE.C

PROGRAMME DE CALCUL ET DE TRACE DE M, N EN fonction de L'altitude

```

5 REM CALCUL DE N , DE M ET TRACE DE N=F(Z), M=F(Z)
6 REM G=1 TRACE N=F(Z)
7 REM G<>1 TRACE DE M=F(Z)
8 INPUT "G=";G
10 REM N:COINDICE DE L'AIR ;M :COINDICE DE L'AIR MODIFIE
20 REM INTRODUCTION DES DONNEES METEOROLOGIQUES
30 DATA
40 DATA
50 DATA
60 DATA
70 DATA
75 INPUT "N=";N
80 REM REMPLISSAGE DE LA MATRICE A(N,4)
90 REM A(I,1) : PRESSION ATMOSPHERIQUE EN MBARS
100 REM A(I,2) : TEMPERATURE EN DEGRES KELVIN
110 REM A(I,3):RAPPORT DE MELANGE EN g/Kg
120 REM A(I,4):ALTITUDE EN metres
150 FOR I=1 TO N
160 FOR J=1 TO 4
170 READ A(I,J)
180 NEXT J,I
190 REM CALCUL DU COINDICE DE REFRACTION
195 REM N=F(P,T,R)
200 FOR I=1 TO N
210 N(I)=77.6*A(I,1)/(A(I,2)+273)+600*A(I,1)*A(I,3)/((A(I,3)/622+1)*((A(I,2)+273)
)^2))
220 NEXT I
230 REM CALCUL DU COINDICE DE REFRACTION MODIFIE M=F(P,T,R,Z)
240 REM B: RAYON TERRESTRE EN MILLIERS DE Km
245 B=6.4
250 FOR I=1 TO N
260 M(I)=N(I)+A(I,4)/B
270 NEXT I
275 PRINT "-----"
280 REM AFFICHAGE DES RESULTATS
290 PRINT "-----"
295 PRINT "-----"
300 PRINT "P";TAB(8);"T";TAB(15);"R";TAB(20);"Z";TAB(26);"N";TAB(38);"M"
310 PRINT "-----"
320 FOR I=1 TO N
330 PRINT A(I,1);TAB(8);A(I,2);TAB(15);A(I,3);TAB(20);A(I,4);TAB(26);N(I);TAB(38)
);M(I)
340 PRINT "-----"

```

```

-----"
350 NEXT I
360 REM RECHERCHE DE M:MAX, SOIT P=MAX
370 P=M(1)
380 FOR I=2 TO N
390 IF M(I)<P THEN 402
400 P=M(I)
402 NEXT I
404 REM RECHERCHE DE N: MAX ,SOIT Q=N(1)
406 Q=N(1)
408 FOR I=2 TO N
410 IF N(I)< Q THEN 416
412 N(I) =Q
416 NEXT I
420 REM RECHERCHE DE Z:MAX
430 ZMAX=A(1,4)
450 FOR I=2 TO N
460 IF A(I,4)<ZMAX THEN 480
480 NEXT I
490 REM PASSAGE AU MODE GRAPHIQUE
500 HGR2
510 HCOLOR=3
520 REM TRACE DES AXES :Z EN ORDONNEES M OU (N) EN ABSCISSES
530 FOR I =0 TO 279
540 HPLOT I,188
550 NEXT I
560 FOR I=0 TO 191
570 HPLOT 3,I
580 NEXT I
590 REM TRACE DES ECHELLES :AXE VERTICAL
592 X=180*50/ZMAX
593 X1=INT(188/X)
600 FOR I=0 TO X1
610 FOR J= 1 TO 3
620 HPLOT 3-J,188-X*I
622 NEXT J,I
630 IF G=1 THEN 730
632 REM TRACE DE M=F(Z)
634 Y=270*100/(P-250)
636 Y1=INT(276/Y)
640 FOR I=0 TO Y1
650 FOR J=1 TO 3
660 HPLOT 3+4*I,188+J
670 NEXT J,I
680 FOR I=1 TO N
690 HPLOT 3+270*(M(I)-250)/(P-250),180*A(I,4)/ZMAX
700 NEXT I
710 PRINT " COURBE DE M=F(Z) "
712 PRINT "-----"
720 GOTO 850
730 REM TRACE DE N=F(Z)
740 W=270*50/(Q-100)
742 W1=INT(276/W)
750 FOR I=0 TO W1
760 FOR J=1 TO 3
780 NEXT J,I
790 FOR I=1 TO N
800 HPLOT 3+270*(N(I)-100)/(Q-100),188 -180*A(I,4)/ZMAX
810 NEXT I
820 PRINT " COURBE DE N=F(Z) "
830 PRINT "-----"
850 END

```



```

10 CLS
20 REM LES EQUATIONS DE M=F(H)
30 REM H :ALITUDE ;M COINDICE DE L'AIR
40 INPUT "DONNEZ LE NOMBRE DE DROITES N=";N
50 N1=N+1 :N2=N-1
60 DIM A(N) ,MP(N1) ,H(N1) ,B(N)
70 REM RELEVÉ DES MP(J);H(J)
80 FOR J=0 TO N
90 INPUT "H=";H(J)
100 INPUT "M=";MP(J)
110 NEXT J
120 A(1)=(H(0)-H(1))/(MP(0)-MP(1))
130 B(1)=H(0)-A(1)*MP(0)
140 MS=-B(1)/A(1)
145 PRINT "MS=";MS
150 INPUT "H(0)=";H(0)
160 INPUT "MP(0)=";MP(0)
170 A=H(N)-H(0)
190 INPUT "MAX=";MAX
200 INPUT "MIN=";MIN
210 Q=MAX-MIN
212 PRINT "Q=";Q
215 INPUT "F=";F
218 INPUT "Z(0)=";Z(0)
220 REM TRACE DES AXES
225 CLS
230 REM -----
240 SCREEN 3
250 FOR I= 0 TO 200
260 PSET(I,396)
270 NEXT I
280 FOR I=20 TO 399
290 PSET(3,I)
300 NEXT I
310 FOR J= 0 TO N2
320 FOR I=0 TO 64
330 PSET(3+3*I,396-368*(H(J)-H(0))/A)
340 NEXT I,J
350 REM TRACE DES ECHELLES
360 X=368*50/A
370 FOR I=0 TO 10
380 Z=193*F/Q
390 FOR J=1 TO 3
400 PSET(3+Z*I,396+J)
410 NEXT J,I
420 FOR I= 0 TO INT(376/X)
430 FOR J= 1 TO 3
440 PSET(3-J,396-X*I)
450 NEXT J,I
460 FOR J=1 TO 3
470 PSET(3-J,396-368*(Z(0)-H(0))/A)
480 NEXT J
490 FOR J= 1 TO N
500 R1=(MP(J-1)-MIN)*180/Q
510 V1=396-368*(H(J-1)-H(0))/A
520 R2=(MP(J)-MIN)*180/Q
530 V2=396-368*(H(J)-H(0))/A
540 LINE (R1,V1)-(R2,V2)
550 NEXT J
560 END

```

PROGRAMME DE SIMULATION DES TRAJECTOIRES

```

5 CLS
10 W=0
20 DIM Z(2),V(2),M(2)
30 REM LES EQUATIONS M=F(H)
40 REM H:ALITUDE ,M: COINDICE DE L'AIR
50 INPUT " DONNEZ LE NOMBRE DE DROITES N=";N
60 N1=N+1
70 N2=N-1
80 Q=COS(.0000143)
90 DIM A(N) ,MP(N1) ,H(N1) ,B(N)
100 REM RELEVÉ DES MP(J) ,H(J)
110 FOR J=0 TO N
120 INPUT "H=";H(J)
130 INPUT "M=";MP(J)
140 NEXT J
150 REM CALCUL DE A(J) ,B(J)
155 FOR J=1 TO N
160 A(J)=(H(J-1)-H(J))/(MP(J-1)-MP(J))
170 B(J)=H(J-1)-A(J)*MP(J-1)
180 NEXT J
190 MS=-B(1)/A(1)
200 PRINT "MS=";MS
210 INPUT "H(0)=";H(0)
220 INPUT "M(0)=";MP(0)
230 X1=0 : A=H(N)-H(0)
240 INPUT "PAS=";PAS
250 NBRE=1500
260 INPUT "POSITION DE L'EMETTEUR Z(0)=";Z(0)
270 FOR J= 1 TO N
280 IF Z(0)>=H(J-1) AND Z(0)<=H(J) THEN M(0)=Z(0)/A(J) -B(J)/A(J)
290 NEXT J
300 INPUT "ML=";ML
310 INPUT "MC=";MC
320 REM CALCUL DES ANGLES LIMITES
330 VL=SQR(ABS(2*(M(0)-ML)*(10^-6)))
340 VC=SQR(ABS(2*(M(0)-MC)*(10^-6)))
350 PRINT "VL=";VL,"VC=";VC
360 LOCATE 1,1: INPUT "ANGLE DE SITE EN RAD V(0)=";V(0)
370 X1=0
375 IF W=1 THEN 390
380 GOSUB 1150
390 Z1=Z(0) :V1=V(0)
400 R=NBRE*PAS/1000
410 REM TEST SUR Z(0) ET V(0)
420 IF V(0)<>0 THEN 520
430 V1=.000015
440 IF Z(0)=H(0) THEN 540
450 FOR J= 1 TO N2
460 IF Z(0)<H(J) AND Z(0)>H(J-1) THEN S=SGN(A(J))
470 IF Z(0)=H(J) AND SGN(A(J))<>SGN(A(J+1)) THEN S=0
480 IF Z(0)=H(J) AND SGN(A(J+1))=SGN(A(J+1)) THEN S=SGN(A(J))
490 NEXT J
500 REM LA DIRECTION DE L'ONDE DEPEND DU SIGNE DE S
510 GOTO 560
520 S=SGN(V(0))
530 GOTO 580
540 S=SGN(A(1))
550 GOTO 580
560 IF S=0 THEN 660
570 REM ** CALCUL DE CSTE K **
580 FOR J=1 TO N
590 IF Z(0)>=H(J-1) AND Z(0)<=H(J) THEN M(0)=Z(0)/A(J)-B(J)/A(J)

```



```

600 NEXT J
610 M1=M(0)
620 K=cos(V(0))*(M(0)*(10^-6)+1)
630 REM *****
640 REM *   CALCUL DE Z2, X2   *
650 REM *****
660 I=0
670 I=I+1
680 W=1
690 X2=X1+PAS
700 Z2=Z1+S*PAS*TAN(ABS(V1))
710 Z2=INT(Z2*(10^4)+.5)/(10^4)
720 IF Z2>H(N) OR (Z2<H(0) AND H(0)<>0) THEN 1010
730 IF S=0 THEN 990
740 REM *****
750 REM *CALCUL DE M*
760 REM *****
770 FOR J=1 TO N
780 IF Z2>=H(J-1) AND Z2<H(J) THEN M=Z2/A(J)-B(J)/A(J)
790 NEXT J
800 IF Z2<=0 AND V1<>0 THEN 930
810 L=K/(M*(10^-6)+1)
820 IF L<>1 AND L<=Q THEN 1030
830 REM *****
840 REM *TEST SUR Z2*
850 REM *****
860 FOR J=1 TO N2
870 IF INT(Z2*10+.5)/10=H(J) AND SGN(A(J))<>SGN(A(J+1)) THEN 980
880 NEXT J
890 S=-S : REM L'ONDE CHANGE DE DIRECTION
910 V2=S*V1
920 GOTO 1040
930 S=-S : REM REFLEXION DE SUR LE SOL
940 V2=S*V1
950 M1=M
960 Z2=0
970 GOTO 1040
980 S=0 : REM L'ONDE EST RECTILIGNE
990 V2=0
1000 GOTO 1040
1010 NBRE=I
1020 GOTO 1070
1030 V2=S*ATN(SQR(1/(L^2)-1))
1040 U=X1 : X1=X2
1050 Y=Z1 : Z1=Z2
1060 REM TRACE DE LA TRAJECTOIRE DEL'ONDE
1070 IF INT(636*U/R/1000+.5)=INT(636*X1/R /1000+.5) THEN 1090
1080 U=X1
1090 PSET(3+636*U/R/1000,396-368*(Y-H(0))/A)
1100 V1=V2
1110 Z1=Z2
1120 IF I<NBRE THEN 670
1135 NBRE=1500
1140 GOTO 360
1145 NBRE=1500
1150 REM TRACE DES AXES
1160 REM -----
1165 CLS
1170 SCREEN 3
1190 FOR I= 0 TO 639
1200 PSET(I,396)
1210 NEXT I

```

```
1220 FOR I=20 TO 399
1230 PSET(3,I)
1240 NEXT I
1250 FOR J=0 TO N2
1260 FOR I=0 TO 212
1270 PSET(3+3*I,396-368*(H(J)-H(0))/A)
1280 NEXT I,J
1290 REM TRACE DES ECHELLES
1300 X=368*50/A
1310 FOR I=0 TO 15
1320 Z=636/15
1330 FOR J=1 TO 3
1340 PSET(3+Z*I,396+J)
1350 NEXT J,I
1360 FOR I=0 TO INT(376/X)
1370 FOR J=1 TO 3
1380 PSET(3-J,396-X*I)
1390 NEXT J,I
1400 FOR J= 1 TO 3
1410 PSET(3-J,396-368*(Z(0)-H(0))/A)
1420 NEXT J
1430 RETURN
1440 END
```