



HAL
open science

Etude des situations météorologiques donnant lieu à des phénomènes de trajets multiples

Valérie Ciarletti

► **To cite this version:**

Valérie Ciarletti. Etude des situations météorologiques donnant lieu à des phénomènes de trajets multiples. [Rapport de recherche] Note technique - CRPE n° 183, Centre de recherches en physique de l'environnement terrestre et planétaire (CRPE). 1990, 132 p., figures. hal-02191383

HAL Id: hal-02191383

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02191383>

Submitted on 23 Jul 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INGE

RP 10400

**CENTRE NATIONAL D'ETUDES
DES TELECOMMUNICATIONS**

**CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**CENTRE DE
RECHERCHES
EN PHYSIQUE DE
L'ENVIRONNEMENT
TERRESTRE
ET PLANETAIRE**

CRPE

NOTE TECHNIQUE

CRPE / 183

**ETUDE DES SITUATIONS METEOROLOGIQUES
DONNANT LIEU A DES PHENOMENES DE
TRAJETS MULTIPLES**

Par

V. CIARLETTI

**INSTITUT DE L'INFORMATION
SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE**

**2, Allée du Parc de Brabois - Tél. 83.53.43.00
INIST - 54514 VANDŒUVRE LÈS NANCY CEDEX**

RPE/ETP

**38-40, rue du Général Leclerc
92131 ISSY-LES-MOULINEAUX, FRANCE**

G 76044

**CENTRE DE RECHERCHES EN PHYSIQUE DE
L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE ET PLANETAIRE**

NOTE TECHNIQUE CRPE/183

**ETUDE DES SITUATIONS METEOROLOGIQUES
DONNANT LIEU A DES PHENOMENES DE
TRAJETS MULTIPLES**

par

**V. CIARLETTI
RPE/ETP**

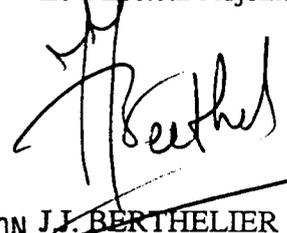
38-40 rue du Général Leclerc
92131 ISSY-LES-MOULINEAUX

Le Directeur



G. SOMMERIA

Le Directeur Adjoint



J.J. BERTHELIER

Juin 1990

INSTITUT DE L'INFORMATION J.J. BERTHELIER
SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE
2, Allée du Parc de Brahois - Tél. 83.50.43.00
INIST - 54514 VANDŒUVRE LÈS NANCY CEDEX

LISTE DE DIFFUSION SYSTEMATIQUE

CNET

MM.	POITEVIN	Directeur du CNET
	THABARD	Directeur Adjoint du CNET
	COLONNA	Adjoint Militaire au Directeur du CNET
	MERLIN	Directeur des Programmes
	BLOCH	DICET
	THUE	DICET
MME	HENAFF	DICET
MM.	PIGNAL	PAB
	RAMAT	PAB
	NOBLANC	PAB-BAG
	ABOUDARHAM	PAB-SHM
	HOCQUET	PAB-STC
	THEBAULT	PAB-STC
MME	PARIS	PAB-RPE
MM.	BAUDIN	PAB-RPE
	BERTHELIER	PAB-RPE
	BIC	PAB-RPE
	CERISIER	PAB-RPE
	GENDRIN	PAB-RPE
	LAVERGNAT	PAB-RPE
	ROBERT	PAB-RPE
	ROUX	PAB-RPE
	SOMMERIA	PAB-RPE
	TESTUD	PAB-RPE
	VIDAL-MADJAR	PAB-RPE

CNRS

MM.	BERROIR	TOAE
	CHARPENTIER	SPI
MME	SAHAL	TOAE
MM.	COUTURIER	INSU
MME	LEFEUVRE	AD3
M.	DUVAL	AD5

CNES

MMES	AMMAR
	DEBOUZY
MM.	BAUDOIN
	FELLOUS
	HERNANDEZ (Toulouse)

Bibliothèques

CNET-SDI (3)
 CNET-EDB
 CNET-RPE (Issy) (5)
 CNET-RPE (St Maur) (2)
 Observatoire de Meudon
 CNRS-SA
 CNRS-INIST
 CNRS-LPCE

LISTE COMPLEMENTAIRE

LAB/DIR	PAPET-LEPTNE
LAB/SMR/TCM	PINAULT
LAB/MER/MLS	MEYER
LAB/MER/STA	RENAN
LAB/IFE/COD	ROCHARD
DIT/AIN	DELEAU
PAA/TPA/PRG	MOUNIER
PAB/SHM/CEM	AZOULAY
PAB/SHM/PHZ	
PAB/RPE/ETP	GLOAGUEN
PAB/RPE/TID	LEBLANC

CNS - GRENOBLE

DIR/SVP	ARNDT
---------	-------

CCETT - RENNES

DOCUMENTATION

EXTERIEUR

TRT	DAOUT
TRT	RENARD
SAT-DTEL	DAMBLIN
STM	FERNANDEZ
DMN	LOITIERE
ENST	BARRAL
ENST	BIBLIOTHEQUE

Cette note reprend le texte de la thèse de l'Université Paris VI soutenue par l'auteur le 16 juin 1989.

Le travail présenté s'inscrit dans le programme d'étude des trajets multiples et de leurs effets sur les liaisons radioélectriques engagé au RPE depuis 1982. Il s'agit ici d'estimer l'importance potentielle des variations horizontales de l'indice de réfraction atmosphérique.

Nous nous sommes servi~~e~~ pour notre étude de mesures radiométéorologiques obtenues par un avion instrumenté de la Météorologie Nationale au cours de l'expérience PACEM 3 (Propagation en Air Clair et Météorologie). Après quelques rappels sur les phénomènes étudiés (chapitre II), une présentation de l'expérience (chapitre III) et une description du traitement des données (chapitre IV), toujours très important dans les études radiométéorologiques, nous nous livrons à deux études de cas pour lesquels il a été possible de reconstituer avec une vraisemblance raisonnable la structure bidimensionnelle de l'indice de réfraction (chapitres V et VI). Ayant ainsi des données quantitatives concernant les gradients d'indice, tant horizontaux que verticaux, on a pu interpréter correctement, à l'aide de simulations par tracés de rayons, les observations radioélectriques concomitantes (chapitres VII et VIII). Cette étude montre que si les gradients verticaux sont nécessaires à l'occurrence de trajets multiples, la prise en compte des gradients horizontaux peut être nécessaire à une description fine des observations. Dans le dernier chapitre, nous étendons ces résultats en regardant par simulation quels paramètres de la structure de l'indice atmosphérique sont les plus susceptibles d'affecter la propagation.

Plan

I - Introduction.....	1
II - Présentation des phénomènes de trajets multiples.....	5
<u>1 - Effets des trajets multiples sur les liaisons hertziennes.....</u>	<u>5</u>
<u>2 - Radiométéorologie et indice de réfraction.....</u>	<u>8</u>
2.1 - Indice de réfraction de l'air.....	8
2.2 - Indice de réfraction et trajets multiples.....	12
<u>3 - PACEM 3.....</u>	<u>17</u>
III - Description de l'expérience.....	21
<u>1 - Description globale de l'expérience.....</u>	<u>21</u>
<u>2 - Mesures radioélectriques.....</u>	<u>23</u>
2.1 - La liaison hertzienne.....	23
2.2 - Le M.L.A.....	24
<u>3 - Mesures météorologiques.....</u>	<u>28</u>
3.1 - Le ballon captif.....	29
3.1.1 - Mesures de vent.....	30
3.1.2 - Mesures de température et d'humidité.....	30
3.1.3 - Calcul de la hauteur du ballon par rapport au sol.....	31
3.1.4 - Calcul du co-indice de réfraction de l'air.....	33

3.2 - L'avion instrumenté.....	33
3.2.1 - Mesures de vent.....	36
3.2.2 - Mesures de température.....	36
3.2.3 - Mesures d'humidité.....	37
3.2.4 - Mesures de la hauteur de l'avion.....	39
3.2.5 - Calcul de l'indice de réfraction.....	40
IV - Traitement des données.....	41
<u>1 - Définition des gradients horizontaux adoptée.....</u>	41
<u>2- Comparaison des données avion et ballon (température et humidité)... </u>	42
V - Nuit du 13-14 Juin : une situation quasi-stationnaire.....	47
<u>1 - Données radioélectriques.....</u>	47
<u>2 - Profil vertical d'indice de réfraction.....</u>	49
<u>3 - Structures horizontales mises en évidence par l'avion.....</u>	52
3.1 - Gradient horizontaux à l'échelle de la liaison.....	53
3.1.1 - Etude de la circulation de l'air au dessus de la liaison.....	57
3.1.2 - Interprétation des gradients horizontaux observés à l'échelle de la liaison.....	61
3.2 - Structure à petite échelle (≈ 1 km).....	61
3.2.1 - Analyse spectrale.....	64
3.2.2 - Restitution de la longueur d'onde et de la vitesse de propagation des ondes.....	67
3.2.3 - Comparaison avec quelques résultats théoriques et interprétation.....	71
<u>4 - Conclusion.....</u>	74

VI - Nuit du 23-24 Juin : Situation évoluant avec le temps.....	77
<u>1 - Données radioélectriques.....</u>	77
<u>2 - Profil vertical de l'indice de réfraction.....</u>	79
<u>3 - Mesures d'indice effectuées horizontalement par l'avion.....</u>	82
<u>4 - Interprétation du phénomène.....</u>	86
<u>5 - Conclusion.....</u>	88
VII - Description du programme de simulation par tracé de rayons....	89
<u>1 - Principe de la théorie des rayons.....</u>	89
<u>2 - Illustration sur un exemple du type de résultats obtenus.....</u>	93
VIII - Interprétation des événements radio observés lors des deux nuits.....	101
<u>1 - Nuit du 13 - 14 Juin.....</u>	101
1.1 - Simulations effectuées à partir du profil vertical seul.....	104
1.2 - Modèle bi-dimensionnel d'indice.....	106
<u>2 - Nuit du 23 - 24 Juin.....</u>	106
2.1 - Simulations effectuées à partir du profil vertical seul.....	107
2.2 - Modèle bi-dimensionnel d'indice.....	108

IX - Etude systématique de l'influence des gradients horizontaux sur la zone affectée par les trajets multiples.....	111
<u>1 - Gradient horizontal dû à un changement de hauteur de la couche superréfractante.....</u>	<u>112</u>
1.1 - Influence de la position du gradient (x_0).....	114
1.2 - Influence de l'étendue du domaine de variation horizontale (Δx)..	116
<u>2 - Influence d'un changement d'intensité de la couche.....</u>	<u>118</u>
<u>3 - Conclusion.....</u>	<u>120</u>
X - Conclusion - Perspectives.....	121

I-Introduction

Les liaisons hertziennes en vue directe qui servent à la transmission d'informations (téléphone, télévision,...) utilisent les premières centaines de mètres de la troposphère comme milieu de propagation. Dans les conditions normales de propagation, les ondes suivent un trajet unique entre antennes d'émission et de réception. Le signal reçu est alors une réplique du signal émis et l'information est transmise dans de bonnes conditions. Cependant, il arrive parfois que le niveau du signal reçu chute brusquement de façon importante. Si les moyens techniques mis en place permettent d'analyser le signal sur une plage de fréquence suffisante, on s'aperçoit que ces évanouissements sont sélectifs en fréquence, c'est-à-dire que leur importance dépend fortement de la fréquence.

L'interprétation de ce phénomène en terme de "trajets multiples" a été faite dans les années 40 : ces affaiblissements sont provoqués par la réception simultanée de plusieurs répliques du signal émis. L'approximation des rayons (justifiée aux fréquences qui nous intéressent) permet d'associer à chacune de ces répliques un rayon qui parvient au récepteur par un chemin qui lui est propre (d'où la terminologie employée). Ces multiples rayons diffèrent donc, entre eux, par leur temps de propagation et leur amplitude et, du fait de leur interférence, détériorent le signal transmis.

L'origine de ces trajets multiples doit être recherchée dans le milieu de propagation. En effet, les équations qui régissent la propagation des ondes électromagnétiques montrent que le paramètre clef du problème est l'indice de réfraction du milieu. Dans la mesure où l'on souhaite améliorer la compréhension des phénomènes physiques qui provoquent l'apparition d'affaiblissements sélectifs, il est nécessaire de compléter les mesures radioélectriques par des mesures d'indice de réfraction.

La connaissance exacte de cet indice en tout point permettrait, en théorie, de simuler numériquement la propagation de l'onde et de retrouver le signal radioélectrique transmis en tout point de l'espace. Cela pourrait sembler séduisant, mais on comprendra aisément qu'une telle démarche n'est pas réaliste. Cependant, sans entrer à ce niveau de détails utopique qui consisterait

à vouloir restituer la situation réelle, des simulations simplifiées mais réalistes, utilisant la technique du tracé de rayons (Webster, 1982) ont permis de caractériser les structures verticales d'indice qui peuvent conduire à des phénomènes de trajets multiples.

Le travail présenté ici, qui s'appuie sur des données recueillies lors de la campagne de mesure PACEM 3, tente d'apporter une contribution à l'étude des situations physiques qui conduisent à des phénomènes de trajets multiples. Les moyens de mesures des différents paramètres météorologiques mis en œuvre pour cette expérience, à savoir un ballon captif et un avion instrumenté, permettent d'évaluer les gradients verticaux et horizontaux d'indice de réfraction. Ce dernier point fait l'originalité de cette campagne de mesure par rapport à la plupart des précédentes qui n'enregistraient les valeurs de l'indice de réfraction qu'à la verticale d'un point.

Le chapitre suivant est consacré à une présentation générale du phénomène de trajets multiples. Deux points de vue seront tour à tour adoptés : le premier s'intéresse à ses effets sur le signal transmis ; le second, plus proche de la démarche que nous avons suivie, consiste à étudier les situations physiques qui provoquent des trajets multiples. Pour finir, cette partie situe l'expérience PACEM 3 (qui sert de support à notre étude) dans le contexte des autres expériences déjà faites dans le domaine et en précise les objectifs.

Le chapitre III comporte une description des moyens radioélectriques (M.L.A.) et météorologiques (ballon captif et avion instrumenté) mis en œuvre lors de la campagne de mesure PACEM 3. Les appareils de mesure y sont présentés et la qualité des données recueillies y est discutée.

Les problèmes posés par le traitement de l'ensemble des données météorologiques recueillies par les capteurs de l'avion et du ballon sont abordés dans le chapitre IV.

Les deux chapitres suivants, V et VI, sont consacrés à l'étude détaillée de deux nuits. Au cours de ces nuits, les événements radioélectriques étaient particulièrement intenses et durables, et un avion instrumenté a effectué des mesures le long de la liaison hertzienne. Les données recueillies nous ont permis de mettre en évidence des variations horizontales d'indice. Pour chacune de ces nuits, une interprétation raisonnable des phénomènes physiques qui sont à l'origine des structures observées a pu être donnée. La partie purement météorologique se termine avec ces chapitres.

Dans la suite nous utilisons l'ordre de grandeur des variations horizontales d'indice effectivement observées afin d'en déterminer l'impact éventuel sur la propagation des ondes centimétriques. Le programme de simulation par tracé de rayons utilisé est présenté brièvement au chapitre VII. Dans un premier temps, au chapitre VIII, nous essayons de simuler au mieux la situation de chacune des deux nuits afin d'interpréter les affaiblissements sélectifs observés par le M.L.A. ainsi que la différence entre les évolutions dynamiques du signal radio observées lors des deux nuits. Enfin, sur des modèles d'indice volontairement simplifiés, nous montrons (Chapitre IX) de façon plus systématique l'influence de différents gradients horizontaux sur la zone affectée par les trajets multiples.

Le chapitre de conclusion résume, bien entendu, les résultats de notre étude sur les gradients horizontaux et leur influence sur la propagation. L'expérience PACEM 3 nous aura permis de progresser dans la compréhension des phénomènes physiques qui peuvent entraîner l'existence de trajets multiples. Malheureusement le nombre important d'hypothèses que nous avons été amenée à faire, faute d'informations plus précises, au cours des deux études de cas, montre les limites de l'expérience en question. Nous finirons cependant sur une note optimiste en montrant, à la lueur de PACEM 3, dans quelle mesure il serait possible d'améliorer à l'avenir ce genre d'expérience.

II - Présentation du phénomène de trajets multiples

1 - Effets des trajets multiples sur les liaisons hertziennes

C'est avant tout parce qu'ils perturbent les liaisons hertziennes que les trajets multiples ont fait l'objet d'études depuis les années 40. Dans l'introduction, nous avons rapidement décrit les effets des trajets multiples sur le signal transmis : évanouissements soudains et profonds de l'amplitude du signal dont l'ampleur varie fortement avec la fréquence considérée. La figure 1 montre sur un cas typique de données expérimentales enregistrées à fréquence fixe, les variations de l'amplitude du signal radio avec le temps (Dougherty, 1968).

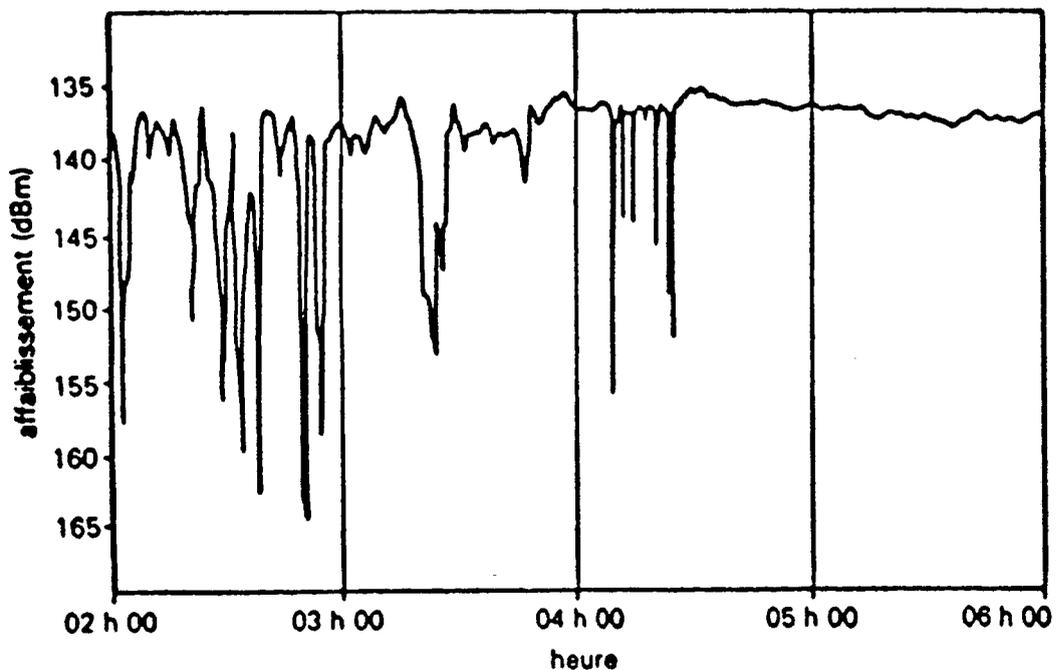


Figure 1 : Enregistrement à fréquence fixe (7 GHz) du niveau du signal en fonction du temps en période de trajets multiples (Dougherty, 1968).

La sélectivité en fréquence du phénomène peut être observée si le signal est enregistré sur plusieurs fréquences ou mieux encore de façon quasi-continue sur une large bande de fréquence. L'exemple de la figure 2 montre que la baisse du niveau de signal observée affecte particulièrement certaines fréquences. La variation de l'amplitude du signal avec la fréquence s'accompagne d'une distorsion du temps de propagation de groupe (T.P.G.). Le temps de propagation de groupe est égal à la dérivée de la phase du signal par rapport à la fréquence angulaire. On voit sur la figure 2 qu'amplitude et T.P.G. ont leur extrêmes pour les mêmes fréquences.

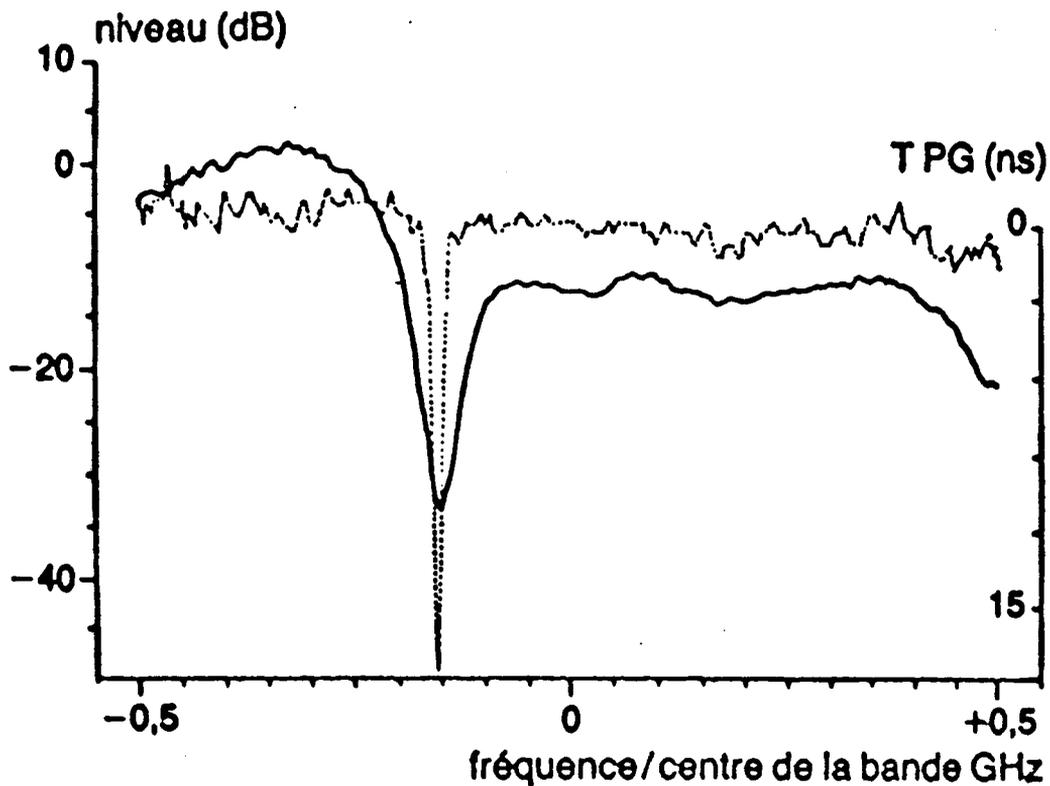


Figure 2 : Sélectivité en fréquence des affaiblissements causés par les trajets multiples. Données expérimentales recueillies sur la liaison expérimentale Marcheville - Viabon lors de l'expérience PACEM 1 (Sylvain et al., 1983). L'amplitude est représentée en ligne continue et le T.P.G. en pointillé.

Il a été expérimentalement démontré par des mesures d'angle d'arrivée (Sharpless, 1946 ; Crawford et Sharpless, 1946 ; Crawford et Jakes, 1952) que ces affaiblissements sélectifs sont dus à la multiplicité des rayons qui parviennent simultanément au récepteur. Considérant le problème inverse, il est possible de montrer qu'en effet la combinaison de n rayons de même fréquence (ω) mais qui diffèrent par leur amplitude (a_i), leur temps de propagation (τ_i) et leur phase (φ_i), conduit à des affaiblissements sélectifs de l'amplitude du signal reçu.

L'enveloppe du signal (S) s'écrit sous la forme d'une somme de termes correspondant aux n rayons.

$$S = \sum_{i=1}^n a_i \exp i (\omega\tau_i + \varphi_i) \quad (1)$$

L'expression (1) montre que selon les valeurs des temps de propagation (τ_i) et des phases (φ_i), pour certaines valeurs de ω , deux des termes peuvent se trouver en opposition de phase, situation qui conduit à un affaiblissement du signal pour la fréquence correspondante.

Ces phénomènes affectent grandement la qualité des liaisons hertziennes et divers moyens techniques ont été envisagés afin de récupérer le mieux possible l'information. Le caractère sélectif du phénomène permet d'envisager un premier moyen : si l'on transmet la même information sur deux bandes de fréquences distinctes (diversité de fréquence), la probabilité pour que celles-ci soient affaiblies simultanément est faible et le pourcentage de temps où le signal est reçu correctement s'en trouve accru. Cette méthode, bien qu'efficace, est très peu utilisée car elle conduit à doubler l'occupation du spectre de fréquence.

Citons rapidement un autre procédé très utilisé : la diversité d'espace. On reçoit simultanément le signal sur deux antennes séparées de quelques mètres. Les signaux transmis aux deux récepteurs sont généralement perturbés différemment par les trajets multiples et une combinaison judicieuse des deux peut restituer approximativement le signal émis. On imagine aisément que les critères de choix ne sont pas faciles à arrêter.

Les études menées à partir des données expérimentales d'affaiblissement ou de taux d'erreur ont permis de tirer des lois statistiques sur

le comportement du canal de propagation. Les paramètres dont dépendent ces lois ont été déterminés pour des liaisons particulières et ne peuvent être facilement extrapolés à une autre liaison. Des modèles de prévision seraient envisageables si l'on parvenait à relier ces paramètres statistiques à des caractéristiques physiques de la liaison (longueur de la liaison, hauteur des antennes par rapport au sol, relief, végétation, type de climat, ...). La radiométéorologie permet d'aborder le problème d'une façon différente et complémentaire. Elle consiste à étudier les causes des perturbations du signal radio afin de comprendre les mécanismes mis en jeu, de déterminer les facteurs météorologiques essentiels et éventuellement à terme de pouvoir prévoir l'occurrence des événements.

2 - Radiométéorologie et indice de réfraction

Les statistiques effectuées à partir de données expérimentales montrent que les phénomènes de trajets multiples apparaissent (dans les régions de climat tempéré) plus fréquemment au cours des nuits d'été ; ceci traduit le fait que ces perturbations sont liées d'une manière ou d'une autre aux conditions météorologiques globales. Ce qui n'est pas surprenant puisque la propagation des ondes est conditionnée par l'indice de réfraction du milieu, lequel est fonction de divers paramètres météorologiques locaux : pression, température et pression de vapeur d'eau.

La compréhension physique du canal de propagation passe donc par l'étude de l'indice de réfraction.

2.1 - Indice de réfraction de l'air

Dans la partie de l'atmosphère qui est concernée par les liaisons hertziennes, l'air se comporte comme un diélectrique de perméabilité relative $\mu = 1$. On a donc :

$$n = \sqrt{\varepsilon \mu} = \sqrt{\varepsilon} \quad (2)$$

n est très proche de l'unité et pour des motifs de commodité, on utilise souvent le coindice de réfraction, noté N qui se définit en fonction de n .

$$N = (n - 1) 10^6 \quad (3)$$

N est typiquement de l'ordre de grandeur de 300 unités-N.

Les études de Debye ont abouti à une expression semi-théorique de N en fonction de la température (T), la pression totale (P) et la pression partielle de vapeur d'eau (e). La formule (4) est une expression approchée qui, pour les fréquences radioélectriques, permet de déterminer N avec une précision de 0,5%.

$$N = 77,6 \left(\frac{P}{T} + 4810 \frac{e}{T^2} \right) \quad (4)$$

avec P et e en mb et T en K.

L'expression (4) met en évidence le fait que l'indice N dépend uniquement de paramètres météorologiques classiques.

Notons que pour les fréquences radioélectriques (entre 1 et 20 GHz), l'indice peut être considéré comme indépendant de la fréquence de l'onde.

Dans les basses couches de la troposphère, la pression P décroît d'environ 0,1 mb par mètre, la température T typiquement de 0,01 K/m. Le comportement de la pression de vapeur d'eau est moins facilement modélisable. Cependant une assez bonne estimation peut être faite en considérant que l'humidité relative ne varie pas avec l'altitude ; si celle-ci reste constante alors que la température diminue, cela signifie que la pression de vapeur d'eau e diminue elle aussi. Un rapide calcul donne un gradient vertical de pression de vapeur d'eau de l'ordre de grandeur de -0,004 mb/m. Les contributions de ces différents termes donnent globalement une décroissance de l'indice de réfraction d'environ 0,04 unités-N/m. Cette valeur de gradient vertical d'indice, qui globalement correspond aux tendances effectivement observées, définit la situation "normale" de référence. Cependant, les mesures montrent que, dans les premières centaines de mètres de l'atmosphère, les valeurs des gradients verticaux d'indice peuvent s'éloigner considérablement de la normale définie plus haut.

Les profils verticaux d'indice, portés sur la figure 3, ont été mesurés par des capteurs embarqués sur un avion. Ils montrent la persistance dans le temps d'une épaisse couche à gradient d'indice fortement négatif (de l'ordre de

grandeur de - 40 unités-N sur 150 mètres).

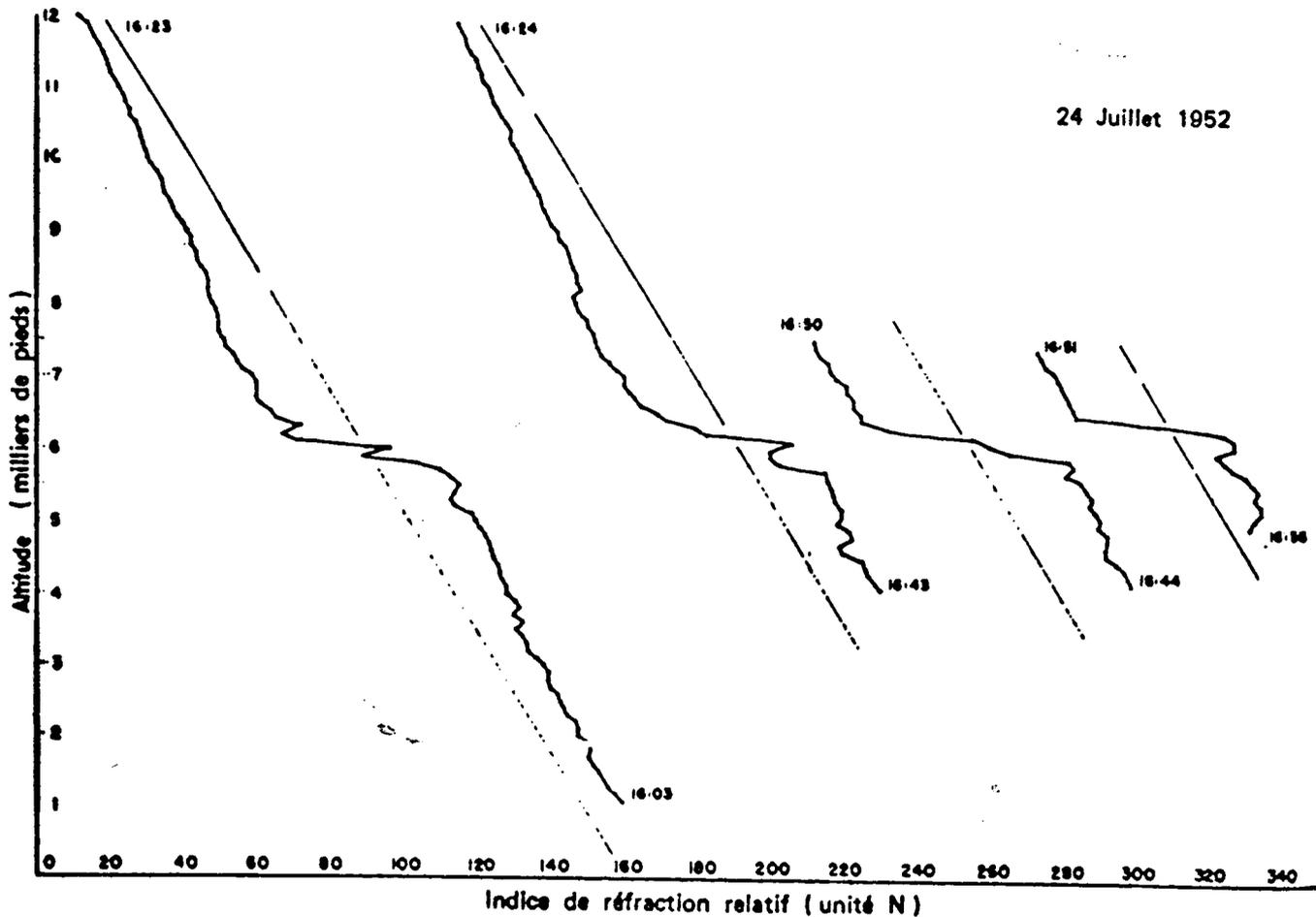


Figure 3 : Exemples de profils verticaux d'indice de réfraction présentant une couche à fort gradient vertical. Mesures successives par avion au dessus de l'Ohio. (CRAIN, 1955). Nous avons représenté en pointillés le gradient moyen de -4 unités-N pour 100 mètres.

Les profils expérimentaux d'indice regroupés dans la figure 4 ont été enregistrés à l'aide d'un ballon captif dans la nuit du 14 au 15 Juin 1986 (PACEM 3).

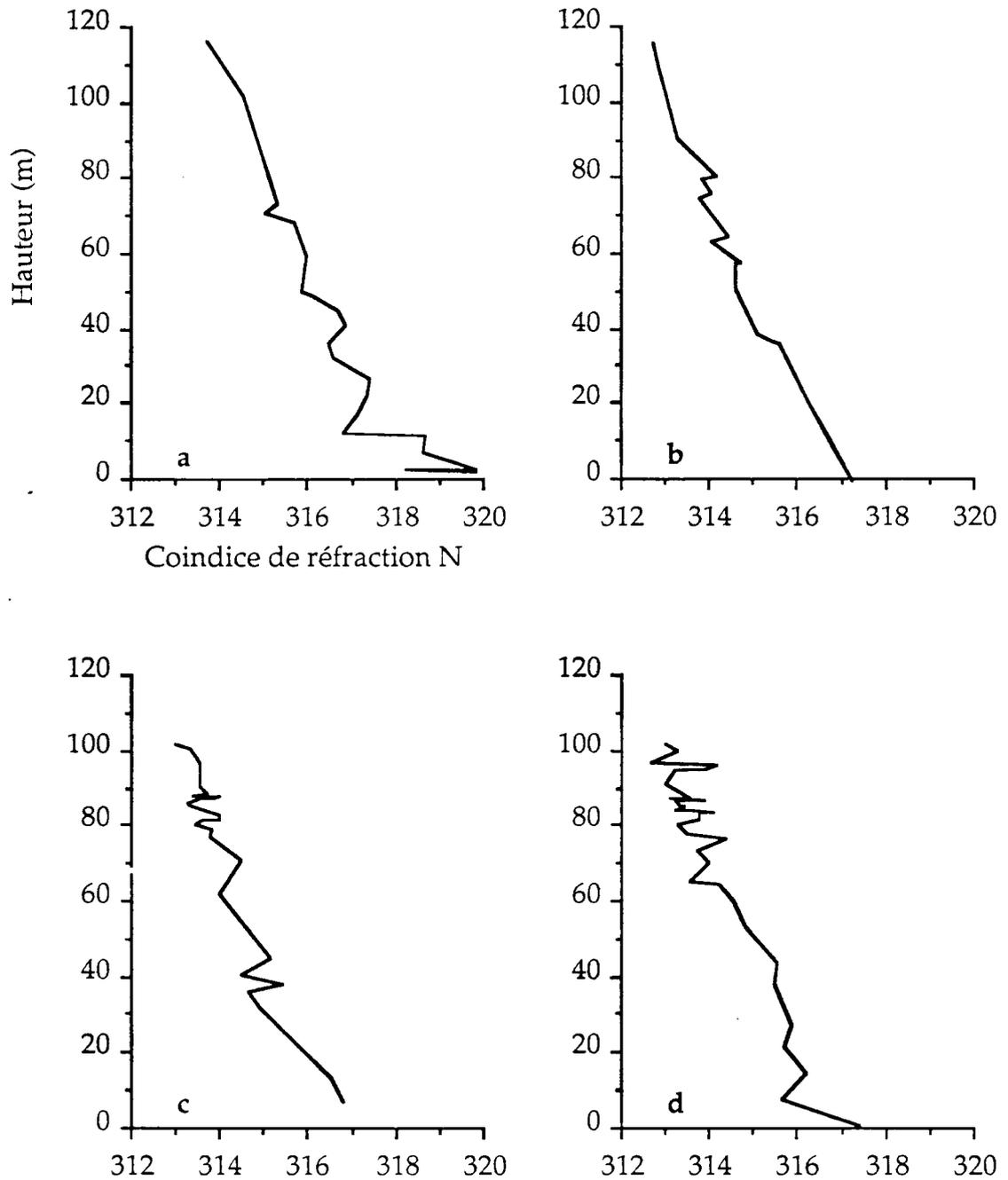


Figure 4 : Exemples de profils verticaux de coindice de réfraction N . Ces données ont été enregistrées, à différentes heures, lors de la campagne PACEM 3.

a : entre 23:50 et 00:01

b : entre 00:01 et 00:05

c : entre 00:45 et 00:54

d : entre 00:54 et 01:01

Ils mettent en évidence des structures verticales beaucoup plus fines qui

évoluent rapidement avec le temps.

Les figures 3 et 4 illustrent la grande variabilité des profils verticaux d'indice. Schématiquement, on observe : un profil globalement décroissant avec l'altitude (de l'ordre de 0,04 unités/m) auquel se superposent des couches d'épaisseur variable à l'intérieur desquelles l'indice varie plus fortement. De telles structures ne peuvent manquer d'avoir une influence sur la propagation des ondes et de nombreux auteurs se sont attachés à en étudier les effets.

2.2 - Indice de réfraction et trajets multiples

Le problème qui consiste, connaissant la valeur de l'indice de réfraction en tout point, à retrouver les caractéristiques du signal transmis sera présenté plus en détail dans le chapitre VII, consacré aux simulations par tracé de rayons. L'objectif de ce paragraphe est de présenter rapidement les principaux résultats que l'on trouve sur le sujet dans la littérature.

La propagation dépend de l'indice de réfraction du milieu de propagation. On fait généralement l'hypothèse que l'influence des variations horizontales d'indice est négligeable devant celle des gradients verticaux. (Ceci est peut-être discutable ; car, s'il est clair que les gradients horizontaux d'indice sont a priori faibles, ils peuvent s'étendre sur plusieurs kilomètres et il est difficile de préjuger leur impact sur la propagation. L'étude que nous présentons devrait permettre d'avoir une idée plus claire à ce sujet.) Cette parenthèse fermée, les résultats qui suivent ont tous été obtenus en supposant une stratification horizontale de l'indice de réfraction.

Pour un tel milieu, le problème est à géométrie sphérique. Si l'on se place dans des conditions où l'approximation des rayons est justifiée, la loi de Bouguer (5) permet de retrouver les trajectoires des rayons.

$$n r \cos \varphi = \text{constante} \quad (5)$$

n est l'indice de réfraction au point défini par sa distance au centre de la terre r et l'angle φ représente l'inclinaison du rayon par rapport à l'horizontale en ce point. Cette formule est un cas particulier de la formule générale qui sera utilisée au chapitre VII.

La formule (5) montre que dans un milieu d'indice constant, la

propagation se fait en ligne droite. Si le gradient vertical d'indice dn/dr (ou encore dN/dr) est constant, les trajectoires des rayons sont, en première approximation, des arcs de cercle dont le rayon de courbure ρ est inversement proportionnel au gradient vertical.

Notant R_0 le rayon de la Terre et z la hauteur ($r = R_0 + z$), on obtient les résultats suivants :

$$\text{Pour } \frac{dN}{dz} > -157 \text{ unités/km, } \rho > R_0$$

les rayons sont moins courbés que la surface de la Terre.

$$\text{Pour } \frac{dN}{dz} = -157 \text{ unités/km, } \rho = R_0$$

les rayons sont parallèles à la surface de la Terre.

$$\text{Pour } \frac{dN}{dz} < -157 \text{ unités/km, } \rho < R_0$$

Les rayons sont plus courbés que la surface de la terre et se réfléchissent sur le sol au bout d'une certaine distance. Nous qualifierons de superréfractante toute couche à l'intérieur de laquelle le gradient dN/dz est inférieur à -157 unités-N^* .

On a pris l'habitude de raisonner en terme d'indice de réfraction modifié m ou de module de réfraction M , dans lequel on fait intervenir l'altitude z :

$$m = n \left(1 + \frac{z}{R_0} \right) \approx n + \frac{z}{R_0} \quad (6)$$

$$M = N + 10^6 \frac{z}{R_0} \quad (7)$$

L'équation (5) devient alors

$$m \cos \varphi = \text{constante} \quad (8)$$

* Nous préférons cette définition à la définition classique dans laquelle la superréfractivité est définie par référence au gradient moyen de -40 unités-N/km , car cette limite ne correspond pas à une situation de propagation particulière, comme celle de -157 unités-N/km .

Cet indice modifié a été introduit, à l'origine, pour simplifier l'expression analytique des calculs en se ramenant fictivement dans une géométrie plane ; de ce point de vue, son emploi n'est plus justifié du fait des progrès de l'informatique.

Cependant, les couches superréfractantes et les conduits de guidage apparaissent plus clairement sur le profil vertical du module de réfraction M que sur celui de l'indice N (les couches superréfractantes apparaissent comme des couches où M décroît avec la hauteur), et dans ce sens, l'indice M permet d'évaluer rapidement les possibilités de trajets multiples.

Lorsqu'un profil vertical comprend une couche dans laquelle dN/dz est inférieur à -157 unités/km, il existe un conduit de guidage dans lequel les ondes peuvent être piégées (Ikegami, 1967). Le profil vertical de la figure 5 qui présente une couche superréfractante entre les hauteurs a et b , va nous permettre d'expliquer brièvement la notion de conduit de guidage.

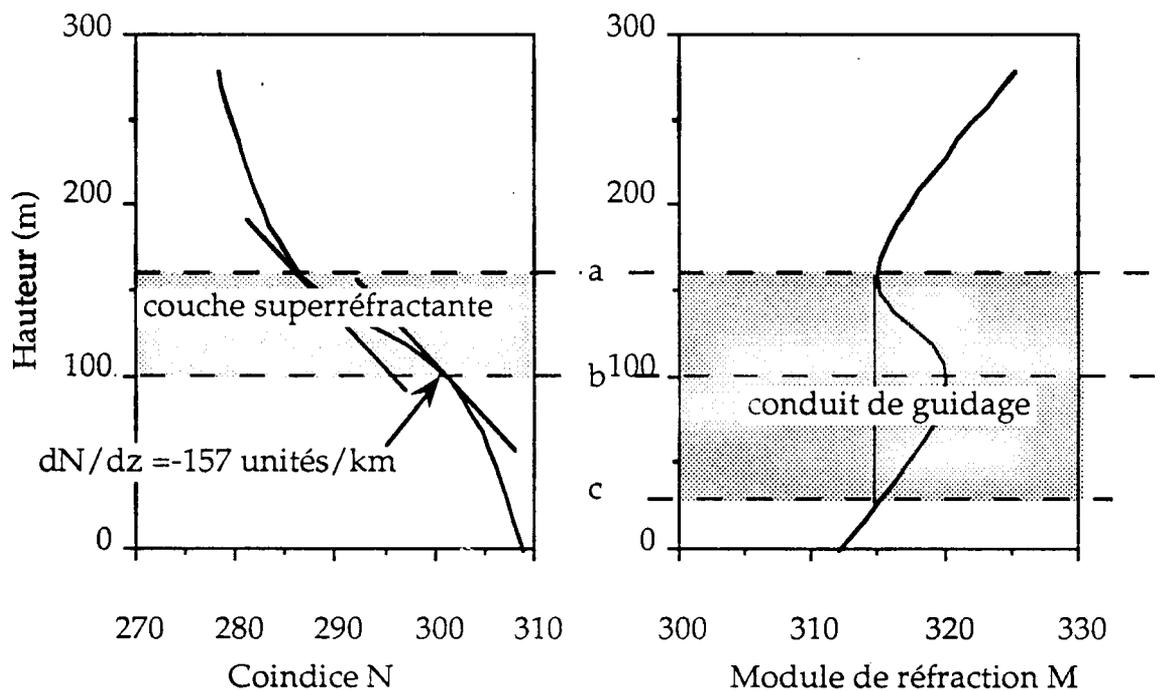


Figure 5 : le profil vertical de co-indice de réfraction N présente une couche superréfractante entre les hauteurs (a) et (b) . Sur le profil vertical de module de réfraction M correspondant (à droite), celle-ci se traduit par une couche à gradient vertical négatif. Le conduit de guidage associé s'étend entre le sommet de la couche superréfractante (a) et la hauteur (c) à laquelle on retrouve la même valeur de module M .

D'après l'équation (8), un rayon qui atteint le sommet de la couche (a) avec une inclinaison nulle par rapport à l'horizontale se trouve d'abord rabattu vers le sol (puisque dM/dz est négatif) jusqu'en (b) où le gradient dM/dz devenant positif, la courbure change de signe. Le rayon atteint finalement la hauteur (c) avec une tangente nulle et s'élève à nouveau dans la couche. Un tel rayon se trouve piégé à l'intérieur de la couche comprise entre les hauteurs (a) et (c) qui se comporte comme un guide d'onde et est appelé conduit de guidage. Il est clair, d'après l'expression (8) que, si un rayon passe par deux points de même indice M , il aura en ces deux points une même inclinaison par rapport à l'horizontale, comme c'est le cas aux points (a) et (c).

Un tel profil vertical d'indice peut donc être à l'origine de trajets multiples. En pratique, l'existence d'une zone de trajets multiples dépend de la position de l'émetteur par rapport à la couche. Lorsque l'émetteur est dans le conduit associé à celle-ci, il existe une zone de trajets multiples (figures 6a, 6b et 6c).

On notera au passage que la position et la forme de la zone affectée par les trajets multiples varient selon la distance entre l'émetteur et la couche. Dans le cas de la figure a l'émetteur est très bas et la zone de trajets multiples apparaît au delà des cinquante kilomètres représentés.

Par contre, si l'émetteur est situé au dessus de la couche les rayons sont soit rabattus sur le sol, soit déviés vers le haut (figure 6d). Il y a défocalisation du signal et création d'un trou radioélectrique mais pas de trajets multiples, ce qui se traduit par un affaiblissement très important mais non sélectif du signal transmis. Les avions équipés de radar ont mis en évidence depuis longtemps l'existence de ces trous radioélectriques qui empêchent l'observation de certaines zones de l'espace (Wong, 1958).

L'influence de la position relative de l'émetteur par rapport à la couche montre que, pour une liaison donnée (hauteur d'émetteur fixée), une élévation ou un abaissement de la hauteur de la couche peuvent faire passer d'une situation de propagation normale à une situation de trajets multiples et inversement.

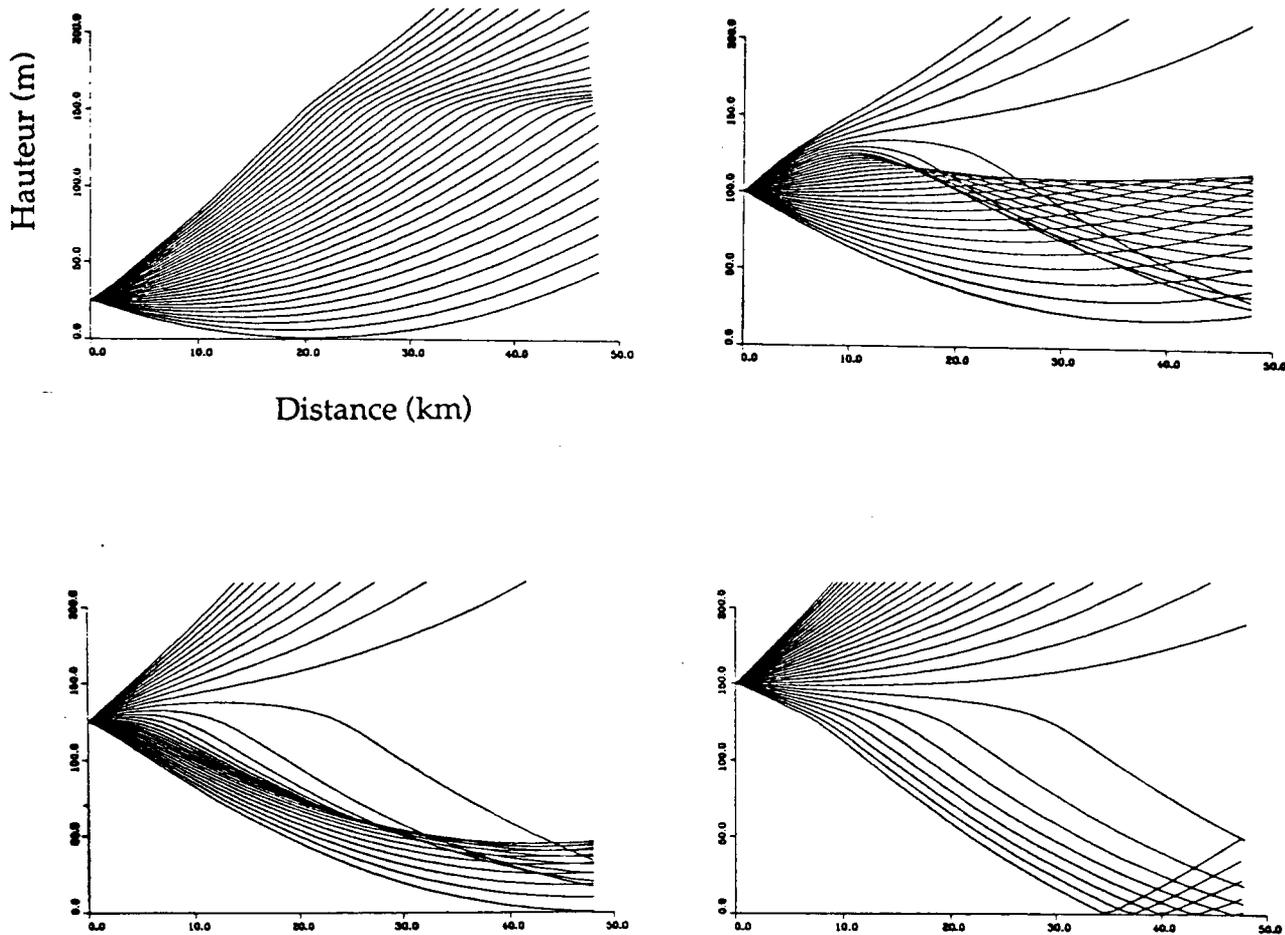


Figure 6 : Influence de la position relative de l'émetteur et d'une couche superréfractante sur la zone affectée par des trajets multiples. La couche superréfractante se situe entre 100 et 150 mètres.

a : émetteur à 75 mètres (au dessous de la couche)

b : émetteur à 100 mètres (à la limite inférieure de la couche)

c : émetteur à 125 mètres (dans la couche)

d : émetteur à 150 mètres (au dessus de la couche)

Du point de vue de la propagation, les profils verticaux d'indice qui présentent des couches à fort gradient négatif sont particulièrement néfastes. Il est donc intéressant de connaître les conditions météorologiques particulières qui peuvent conduire à ce type de profil. Dans les pays tempérés, la chaleur

emmagasinée par la surface terrestre durant la journée (lorsque celle-ci a été ensoleillée) est rayonnée pendant la nuit. La température qui décroît habituellement de jour avec l'altitude, augmente alors jusqu'à des hauteurs allant de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres. On parle de couche d'inversion de température. Assez fréquemment, ce gradient positif de température s'accompagne d'un gradient négatif d'humidité et entraîne la formation d'une couche où le gradient d'indice peut être inférieur à -157 unités-N/km. Ce processus assez fréquent en été explique la formation de couches superréfractantes peu élevées. La hauteur de ces couches évolue au cours de la nuit (Klapisz et Weill, 1985 ; Yamada, 1979), elle augmente généralement en fin de nuit. Lorsqu'à un moment ou à un autre, l'émetteur se trouve dans le conduit de guidage, la propagation est perturbée par des trajets multiples. Ce mécanisme de création de couches superréfractantes nous permet d'expliquer pourquoi des situations de trajets multiples sont fréquemment observés pendant les nuits d'été.

Les résultats de l'expérience PACEM 2 qui étudie de façon statistique la répartition journalière et saisonnière des affaiblissements du signal radioélectrique, montrent effectivement que les événements radioélectriques sont plus fréquents la nuit entre 22 h et 6 h et que l'été est la saison pendant laquelle le signal est le plus souvent perturbé (Golé et al., 1988).

De ce fait, la campagne de mesure PACEM 3 qui visait à faire des études de cas ponctuelles sur les conditions de propagation en période de trajets multiples s'est déroulée l'été.

3 - PACEM 3

L'expérience PACEM 3, qui sert de support à l'étude qui suit, s'inscrit dans le cadre du programme PACEM (Propagation en Air Clair Et Météorologie) élaboré et mis en œuvre par le CRPE. Ce programme qui a débuté durant l'été 1982, a pour objectif l'étude des phénomènes de trajets multiples qui affectent, par temps clair, la qualité des liaisons hertziennes en visibilité directe. Nous avons vu que les situations de trajets multiples peuvent être caractérisées de deux façons complémentaires : la première consiste à étudier les phénomènes météorologiques qui, modifiant la distribution d'indice de réfraction, en sont à l'origine, la seconde, elle, s'intéresse à leurs

effets sur la qualité de la liaison. Les campagnes de mesure PACEM, au nombre de trois jusqu'à présent, associent donc des mesures radioélectriques qui caractérisent le signal transmis au récepteur et des mesures de divers paramètres physiques qui permettent de décrire la situation du point de vue météorologique et de connaître autant que faire se peut l'indice de réfraction de l'air.

La première campagne de mesure de la série, PACEM 1, a eu lieu au cours de l'été 1982 autour d'une liaison hertzienne établie en Beauce entre Marcheville et Viabon. Les moyens météorologiques mis en œuvre (mât instrumenté et ballon captif) permettaient de connaître le profil vertical d'indice en un point de la liaison. L'étude de cas (Claverie et Klapisz, 1985) menée à partir des données radioélectriques et météorologiques recueillies a montré que dans bon nombre de cas la seule considération du profil vertical suffit à interpréter les affaiblissements sélectifs du signal transmis mais que certains cas n'ont pu être ainsi expliqués de façon satisfaisante.

Le problème d'éventuelles variations horizontales d'indice a alors été posé. En effet, si l'hypothèse qui consiste à supposer que l'indice est uniformément stratifié sur toute la longueur de la liaison (une cinquantaine de kilomètres) peut sembler raisonnable lorsque la liaison est établie sur un terrain quasiment plat (mer, plaine,...), elle ne l'est certainement plus lorsque la liaison se trouve implantée dans une zone de relief accidenté. En outre, le relief n'est pas la seule cause possible de variations horizontales d'indice. Des phénomènes météorologiques à grande échelle créent des inhomogénéités horizontales d'indice de réfraction qui peuvent également avoir un impact sur la propagation. Dès lors, il est apparu utile d'avoir une idée de l'ordre de grandeur des inhomogénéités horizontales de l'indice de réfraction afin d'estimer leur impact potentiel sur les conditions de propagation.

On trouve dans la littérature des résultats de mesures qui mettent en évidence de façon indiscutable des variations horizontales d'indice de réfraction. La figure 7 (Vickers et Lopez, 1975) en donne un exemple. Malheureusement, la situation très particulière (perturbation causée au dessus de l'eau par la présence d'une île) et les hauteurs auxquelles ont été effectuées ces mesures (supérieures à 300 mètres) les rendent difficilement utilisables pour notre propos.

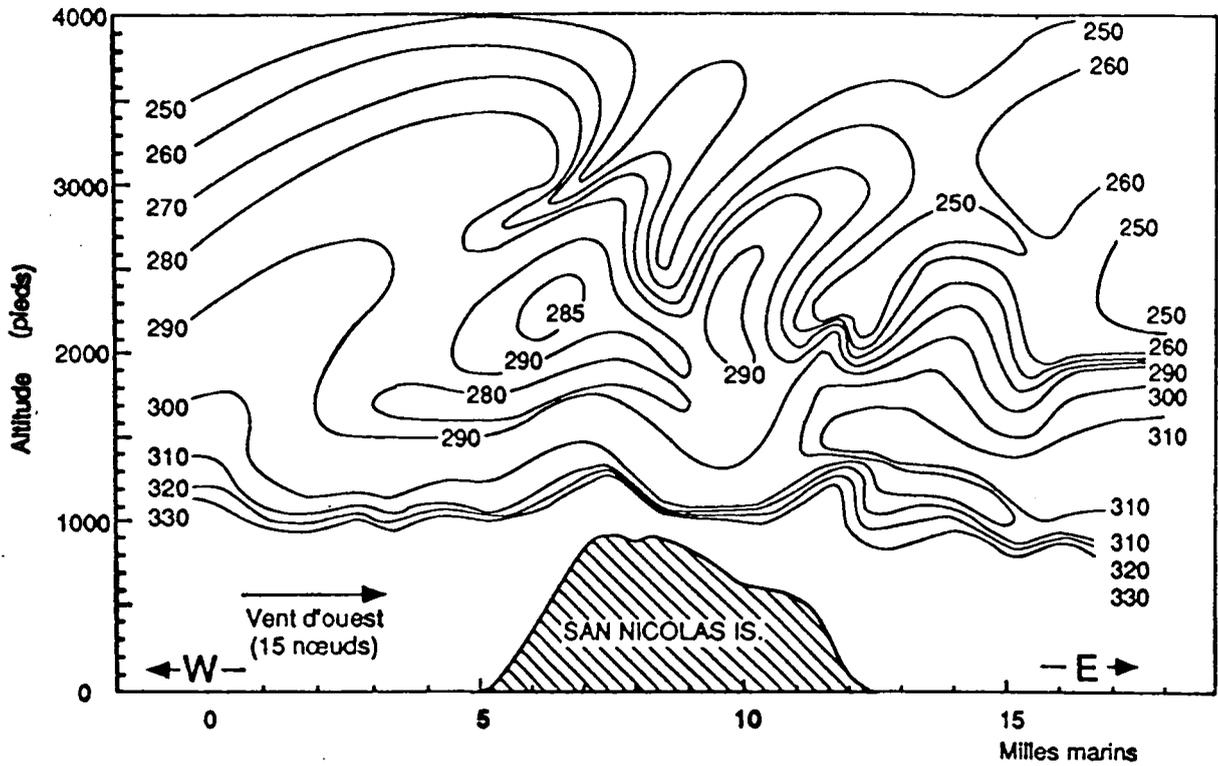


Figure 7 : Influence du relief sur la structure bi-dimensionnelle d'indice. Effets de sillage d'une île (Vickers et Lopez, 1975).

Plus récemment, des mesures simultanées d'affaiblissement de signal radio et d'indice de réfraction en deux dimensions ont été obtenues par le Rutherford Appleton Laboratory (Craig et Kennedy, 1987). Les lignes d'iso-indice restituées montrent (figure 8) des variations tant verticales qu'horizontales de l'indice.

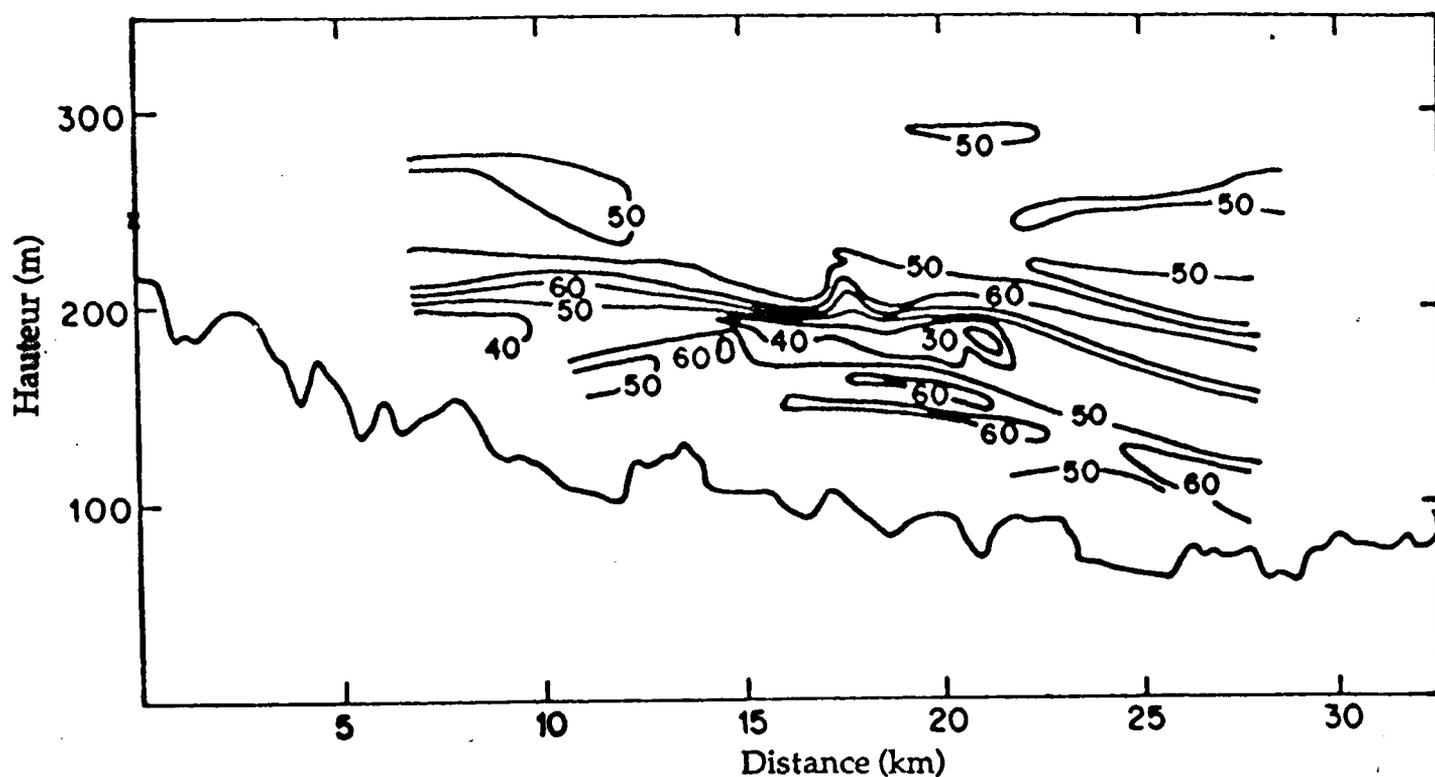


Figure 8 : Isocontours d'indice de réfraction obtenus à partir de mesures effectuées par un réfractomètre aéroporté. Les valeurs d'indice sont en unités-N comptées à partir d'une origine arbitraire.

Dans ce contexte, l'expérience PACEM 3 visait précisément à compléter notre connaissance des phénomènes physiques qui donnent lieu à des situations de trajets multiples en recueillant simultanément des données d'affaiblissement du signal radio et des informations concernant les variations verticales mais également horizontales d'indice.

III - Description de l'expérience

1 - Description globale de l'expérience

L'expérience PACEM3 a eu lieu du 6 au 25 Juin 1986 dans le Sud-Ouest de la France. Le lieu et la date avaient été choisies pour bénéficier de la couverture météorologique, et en particulier d'un des avions instrumentés (Piper Aztec) du C.A.M.* , associée à l'expérience MOBILHY. La carte de la figure 9 permet de situer géographiquement la liaison expérimentale qui a servi de support à la campagne de mesure (entre Mont-de-Marsan et Maillas) ainsi que les principales caractéristiques du relief à grande échelle qui peuvent avoir une influence sur la structure locale de l'indice (vallées des cours d'eau et les Pyrénées).

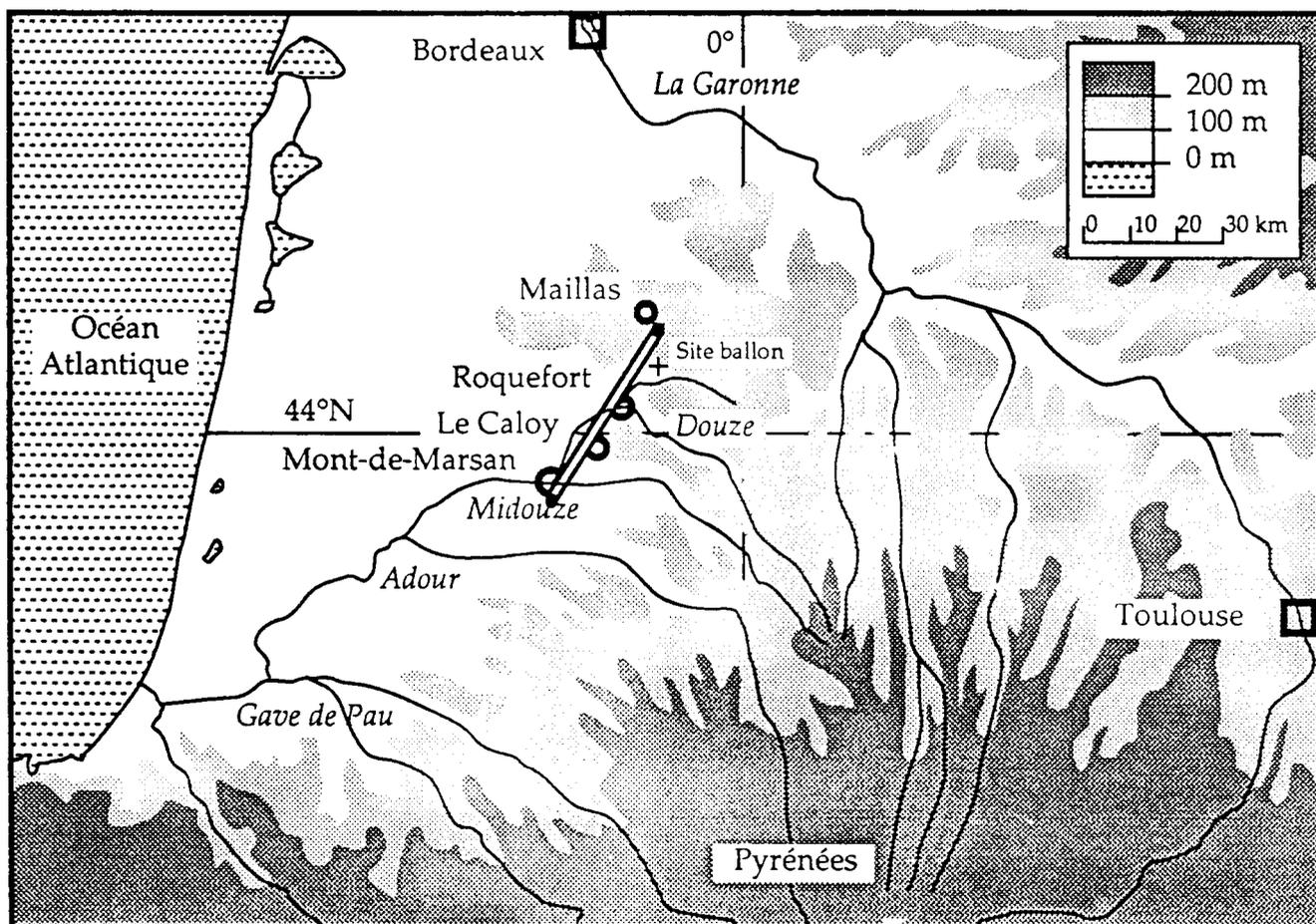
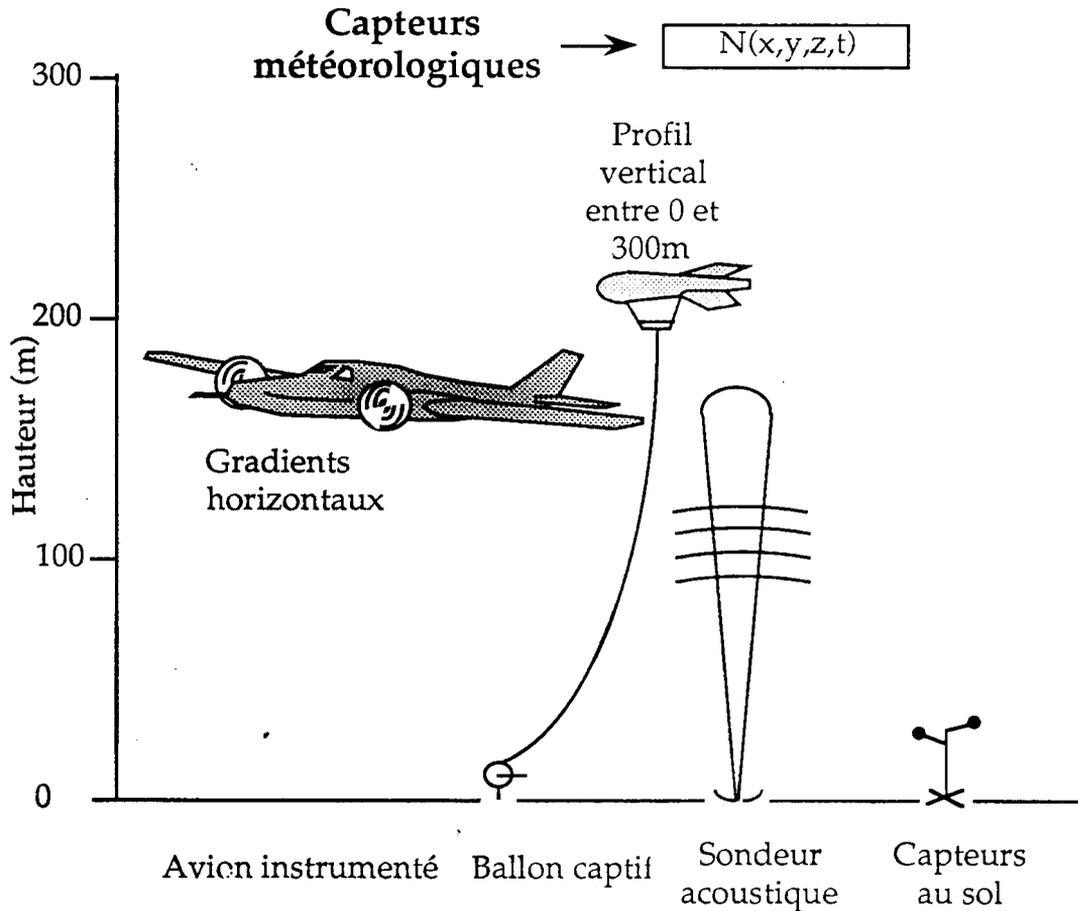


Figure 9 : Carte du Sud-Ouest de la France montrant la liaison expérimentale entre Mont-de-Marsan et Maillas.

* C.A.M. : Centre d'Aviation Météorologique

Cette expérience associe, autour d'une liaison hertzienne expérimentale destinée à la mesure de la fonction de transfert du canal de propagation, des mesures de paramètres météorologiques permettant de connaître l'indice de réfraction de l'air.

La figure 10 donne un schéma complet de l'expérience.



Liaison hertzienne expérimentale entre Mont-de-Marsan et Maillas

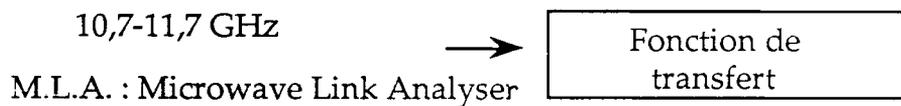


Figure 10 : Différents moyens mis en œuvre lors de la campagne PACEM3 .

Les profils verticaux des différents paramètres météorologiques étaient mesurés systématiquement toutes les nuits favorables (c'est-à-dire temps clair et vent suffisamment faible) par les capteurs du ballon captif. La liaison expérimentale à 11 GHz fonctionnait en permanence et le M.L.A. (Microwave Link Analyzer*) donnait la fonction de transfert du canal de propagation correspondant. Lorsque les données du M.L.A. mettaient en évidence des affaiblissements sélectifs, durables et intenses, caractéristiques de trajets multiples, le PIPER AZTEC du Centre d'Aviation Météorologique basé à Toulouse était appelé. Il arrivait au dessus de la liaison environ 1h30 plus tard. Ce fut le cas deux fois au cours de l'expérience : la nuit du 13 au 14 Juin et celle du 23 au 24 Juin.

2 - Mesures radioélectriques

L'objet de l'expérience était d'approfondir notre connaissance des mécanismes qui perturbent les liaisons hertziennes. Avant toute chose, donc, il était nécessaire de disposer de données caractérisant la propagation des ondes au sein du milieu étudié. Une liaison expérimentale, équipée d'un M.L.A. , a été installée pour permettre l'acquisition de données décrivant le comportement radioélectrique du milieu.

2.1 - La liaison hertzienne (Photo 1)

Pour les besoins de l'expérience, une liaison expérimentale en bande large (1 GHz) à 11GHz avait donc été établie entre Mont-de-Marsan et Maillas. L'émetteur et le récepteur distants d'environ 50 kilomètres, se trouvaient tous deux à 70 mètres du sol. Le relief correspondant à cette liaison est représenté figure 11. Pour des raisons de sécurité, la portion de la liaison comprise entre Le Caloy et Mont-de-Marsan n'a pas pu être survolée par l'avion, du fait de la proximité de Mont-de-Marsan. Sur la figure 11, la végétation, essentiellement constituée de pins d'une vingtaine de mètres de haut, est représentée en noir. On peut d'ores et déjà noter la présence au niveau de Roquefort d'une vallée (vallée de la Douze, voir figure 9) qui peut, nous le verrons par la suite, avoir des effets sur la structure de l'indice de réfraction dans les couches proches du sol.

* Analyseur de liaison microonde

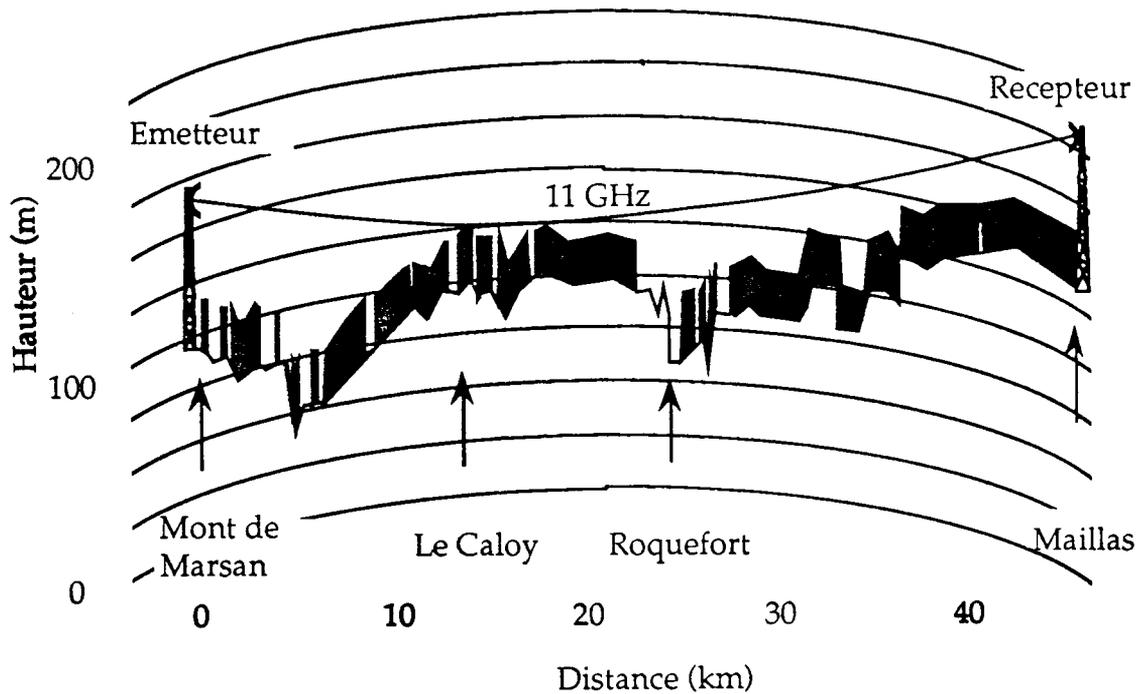


Figure 11 : Profil de la liaison expérimentale. Les arbres sont représentés en noir.

2.2 - Le M.L.A. (Photo2)

Pour caractériser le canal de propagation d'un point de vue radioélectrique, on le considère comme un filtre, et on cherche à en déterminer la fonction de transfert $H(\omega)$. Celle-ci peut se mettre sous la forme $H(\omega) = A(\omega) e^{-i\Phi(\omega)}$.

Pendant la durée de la campagne de mesure, un analyseur de liaison hertzienne (Microwave Link Analyzer) caractérisait, entre 10,7 et 11,7 GHz, le canal de propagation par sa réponse en amplitude $A(\omega)$ et la distorsion amenée sur le temps de propagation de groupe, $D(\omega) = \partial\Phi/\partial\omega$.

Le schéma de principe du fonctionnement de l'appareil est présenté figure 12.

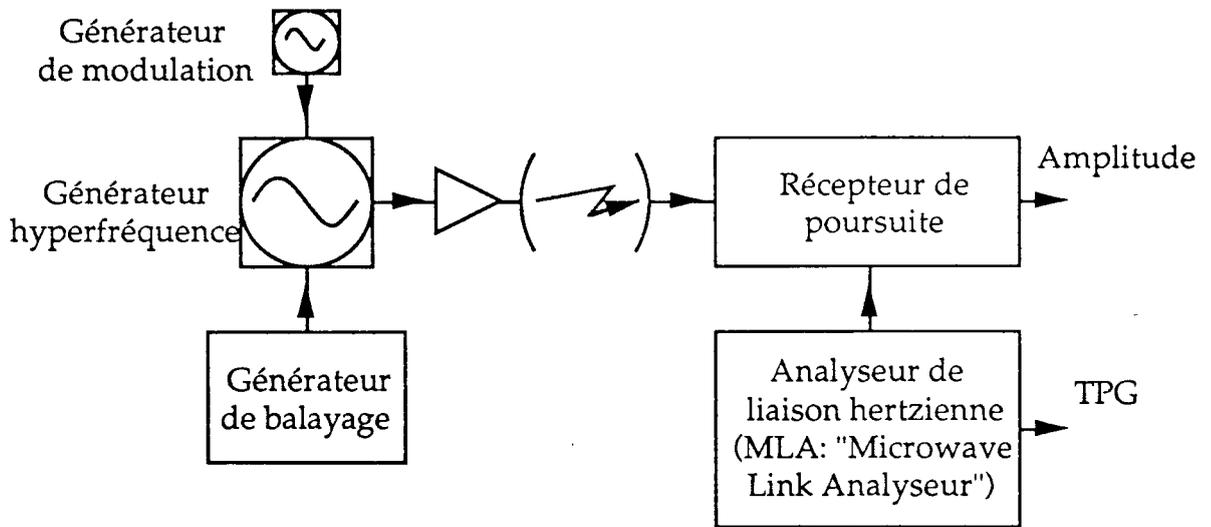


Figure 12 : Mesure de la fonction de transfert par la méthode de balayage en fréquence

La largeur de la bande analysée (1 GHz) est balayée à une fréquence de 15,28 Hz, ce qui correspond à une mesure de la fonction de transfert toutes les 32 ms environ. Pour mesurer le temps de propagation de groupe (T.P.G.), on superpose au balayage lent à 15,28 Hz une modulation de fréquence rapide. Le temps de propagation de groupe est obtenu à partir de la mesure de la variation de phase du signal sur l'excursion en fréquence Δf de cette modulation. Le T.P.G. étant défini comme une dérivée, il est nécessaire que cette excursion de fréquence Δf soit suffisamment petite. Dans l'expérience PACEM 3, la fréquence de cette modulation est de 500 kHz et son amplitude de 707 kHz.

Les principales performances et caractéristiques de l'appareil sont regroupées dans le tableau I.

Paramètres caractéristiques de l'émission		
Balayage en fréquence	mode fréquence excursion	sinusoïdal 15,28 Hz ± 500 MHz
Modulation de fréquence	mode fréquence excursion	sinusoïdal 500 kHz ± 707 kHz
Performances d'ensemble		
Mesure de l'amplitude	dynamique	50 dB
Mesure du T.P.G.	résolution excursion	0,1 dB ± 80 ns
Mesure de la fréquence	résolution dérive par jour (*)	± 0,5 ns < 0,4 MHz
Mesure du temps	résolution (*)	6,14 MHz 0,128 ms

(*) à la fréquence centrale

Tableau I : Performance de l'analyseur large bande utilisé lors de l'expérience PACEM 3.

Avant traitement, les données analogiques étaient échantillonnées et numérisées sur 256 fréquences réparties dans la bande de 1GHz.

L'existence de trajets multiples se traduit par un affaiblissement du signal associé à un extremum du temps de propagation de groupe qui affecte sélectivement certaines fréquences. Les deux figures qui suivent montrent les variations d'amplitude et de temps de propagation de groupe enregistrées lors de l'expérience PACEM3 pendant un événement dans la bande de 1 GHz. Dans cet exemple, les fréquences principalement affectées se situent aux environs de 11,1 GHz.

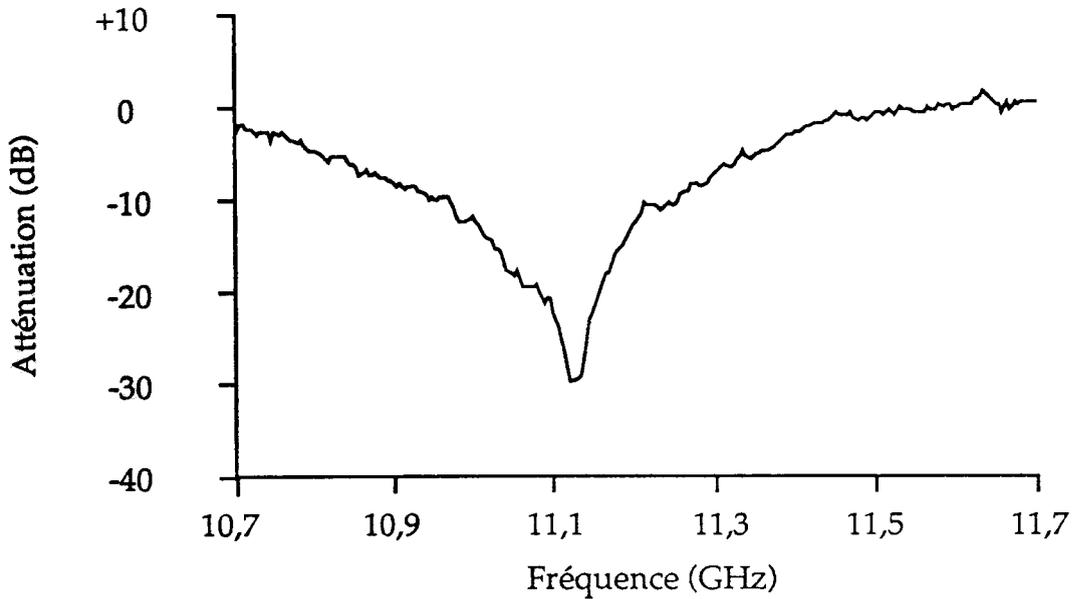


Figure 13 : Atténuations dans la bande de 1GHz enregistrées par le M.L.A. la nuit du 23 au 24 juin pendant une période de trajets multiples.

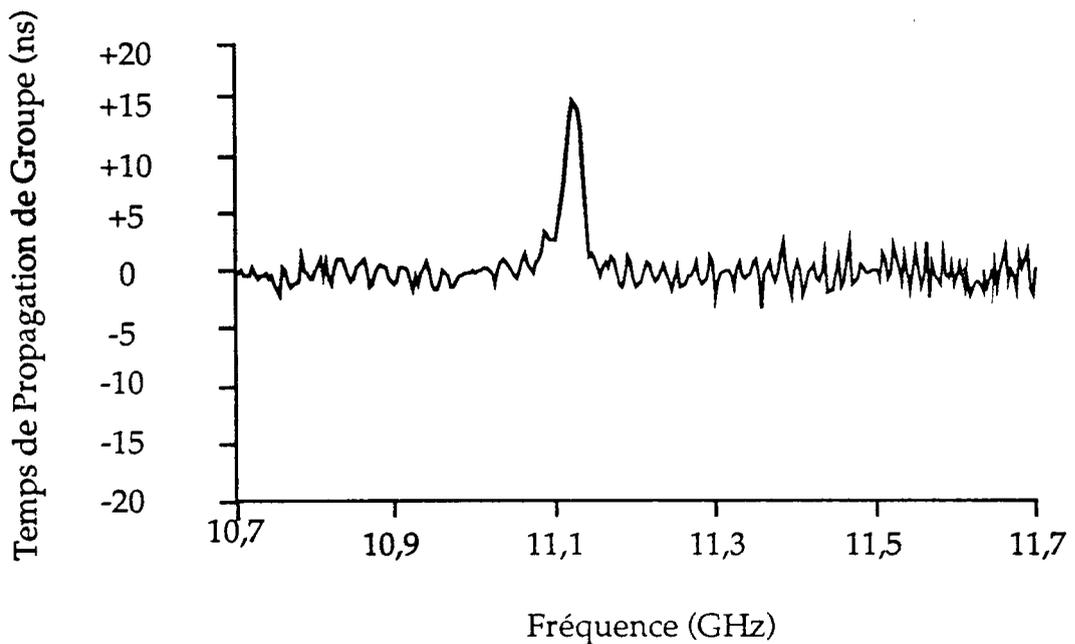


Figure 14 : Valeurs du temps de propagation de groupe correspondant.

On peut aisément montrer par le calcul que le T.P.G. et l'amplitude possèdent toujours leurs extrémums pour les mêmes fréquences. Dans l'exemple montré, au creux d'amplitude correspond un maximum du T.P.G.. La figure 2 du chapitre II montre un exemple de fonction de transfert à T.P.G. minimal.

Dans un premier temps, le M.L.A. a permis, sur le terrain même, de repérer les périodes de trajets multiples et de faire appel à l'avion lorsque la situation était intéressante. Dans un second temps, le traitement plus détaillé des données va permettre d'étudier la dynamique des événements observés et d'en donner éventuellement une interprétation. Le deuxième ensemble de données nécessaire à cette interprétation des phénomènes était fourni par différents moyens de mesures des paramètres météorologiques.

3 - Mesures météorologiques

C'est l'indice de réfraction de l'air qui conditionne la propagation des ondes radio. Sa connaissance doit permettre d'interpréter les données radioélectriques recueillies par le M.L.A..

L'indice de réfraction du milieu peut être mesuré directement par un réfractomètre hyperfréquence ou calculé, comme le montre la formule (1), à partir de la température (T), la pression (P) et la pression de vapeur (e) de l'air. Dans l'expérience qui nous intéresse, les valeurs de coindice ont été calculées grâce à la formule (1).

$$N = 77,6 \frac{P}{T} + 3,73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (1)$$

où (e) et (P) sont en mb et (T) en K.

En réalité, il y avait également un réfractomètre aéroporté; malheureusement celui-ci n'ayant pas été qualifié, nous avons été amenés à ne pas utiliser ses données, par trop sujettes à caution. En effet, la comparaison entre la valeur d'indice fournie par le réfractomètre situé sur l'avion et celle calculée à partir des données météorologiques mesurées également à bord de l'avion a mis en évidence une dérive importante de l'une par rapport à l'autre. La bonne cohérence des données des capteurs de température et d'humidité redondants installé à bord de l'avion a jeté le doute sur la fiabilité du réfractomètre. Par suite, il a été montré que la conception même de l'appareil pouvait expliquer les dérives observées.

Nous disposions de plusieurs ensembles de capteurs météorologiques : Le premier, au sol, servait de référence, le deuxième attaché à un ballon captif donnait les profils verticaux en un point de la liaison et le troisième installé à bord de l'avion appelé à survoler horizontalement la liaison permettait de

restituer les variations horizontales .

3.1 - Le ballon captif (photo 3)

Toutes les nuits favorables, entre le 6 et le 25 Juin 1986, le ballon captif instrumenté effectuait systématiquement des montées et descentes entre le sol et environ 300 mètres de hauteur, mesurant pression atmosphérique (P), températures sèche (T) et humide (T_h) (Nous verrons au § 3.1.2 de ce chapitre que la valeur de la température humide permet de calculer la pression partielle de vapeur d'eau lorsque l'on connaît par ailleurs la température sèche et la pression totale de l'air) et, enfin, force et direction du vent. Toutes ces données étaient transmises au récepteur toutes les quinze secondes. De façon courante, le ballon mettait approximativement 20 minutes pour effectuer une montée-descente.

Le tableau II donne les caractéristiques des différents capteurs du ballon captif.

Paramètre mesuré	Type de capteur	étendue de mesure	Précision	Constante de temps
Température sèche	Thermistance	- 50 à + 50 °C	± 0,5 °C	5 s
Température humide	Thermistance	- 50 à + 50 °C	± 0,5 °C	15 s
Pression différentielle	Capacité anéroïde	0 à 100 mb	± 1mb	
Vitesse horizontale du vent	Anémomètre à coupelles	0,5 à 20 m/s	±0,25m/s	
Direction du vent	Compas magnétique	0 à 360°	±5°	

Tableau II : Principales caractéristiques des capteurs du ballon captif.

Au vu des constantes de temps des capteurs et particulièrement du thermomètre humide, il est évident que la vitesse de déplacement du ballon sera responsable d'un écart entre les grandeurs réelles et les mesures qui en seront faites. Pour un gradient de température humide de $-0,04^{\circ}\text{C}/\text{m}$, avec les constantes de temps du tableau II, une vitesse verticale typique de $0,25\text{ms}^{-1}$ donnerait un écart d'environ $0,1^{\circ}\text{C}$ entre la température humide réelle et sa mesure. On peut également avoir des erreurs sur la valeur d'un gradient constant (Claverie, 1985) ou sur l'altitude d'une inversion de température par exemple.

3.1.1 - Mesures du vent

De par sa forme aérodynamique, le ballon captif s'oriente automatiquement dans le sens du vent. La direction du vent est alors obtenue grâce à une boussole solidaire du ballon. La vitesse du vent est mesurée par un anémomètre à coupelles, qui donne la composante horizontale du vent. La précision de ces deux grandeurs n'est pas excellente mais suffisante pour vérifier que le ballon n'est pas soumis à des contraintes trop élevées du fait d'une grande vitesse du vent ou d'un cisaillement important, et pour avoir une idée de la structure dynamique des couches atmosphériques. En effet, la vitesse du vent n'intervient pas dans le calcul de l'indice de réfraction, mais les mesures de vent sont utiles lorsqu'il s'agit de comprendre et décrire les mécanismes physiques qui modifient la propagation des ondes.

3.1.2 - Mesures de température et d'humidité*

Un thermomètre donne une mesure de la température réelle de l'air (θ), dite "sèche". Un deuxième thermomètre opérant dans des conditions différentes donne la température (θ_h), dite "humide". Ce second thermomètre, placé dans un manchon de tissu relié à un réservoir d'eau distillée, est constamment maintenu humide. Du fait du refroidissement produit par l'évaporation de l'eau qui l'entoure, ce thermomètre mesure une température (θ_h), dite "humide", plus basse que la température de l'air ambiant. Dans le cas particulier où l'air est déjà saturé en vapeur d'eau, c'est-à-dire où la pression partielle de vapeur d'eau est égale à la pression de vapeur saturante, il n'y a pas d'évaporation et les températures sèche et humide sont égales.

* Dans tout le texte, nous notons T les températures Kelvin et par θ les températures Celsius.

Pour que l'évaporation s'effectue suffisamment rapidement, il faut que l'ensemble soit ventilé. Dans la sonde utilisée, une aspiration forcée maintient l'écoulement de l'air à une vitesse de 3m/s approximativement.

A partir de la connaissance des deux températures (θ) et (θ_h), on calcule la pression de vapeur (e) pour une pression atmosphérique donnée (P) en utilisant la formule (2).

$$e = e_{vs} - 0,00066 (1 + 0,00115 \theta_h) P (\theta - \theta_h) \quad (2)$$

Dans la formule (2), (e_{vs}) représente la pression de vapeur saturante de l'eau à la température (θ_h). La pression de vapeur saturante ne dépend que de la température, et parmi toutes les formules en donnant l'expression, nous avons choisi celle donnée par la formule (3).

$$e_{vs}(\theta) = 6,10778 \cdot 10^{\left(\frac{7,5 \theta_h}{237,3 + \theta_h}\right)} \quad (3)$$

En dérivant les deux équations précédentes (2) et (3), on obtient une évaluation de l'erreur maximale qui peut entacher la valeur calculée de (e) du fait des incertitudes sur (θ), (θ_h) et (P). Pour les valeurs suivantes, $\theta = 17$ °C, $\theta_h = 10$ °C et $P = 1000$ mb, qui correspondent à une pression de vapeur d'eau (e) de 12,3 mb et à une humidité relative (Hr) de 63 %, on obtient :

$$\Delta e = 0,005 \Delta P + 0,66 \Delta \theta + 1,51 \Delta \theta_h \quad (4)$$

La formule (4) donne, en tenant compte des incertitudes figurant dans le tableau II, une erreur d'approximativement 0,66 mb sur la pression de vapeur d'eau (soit 5% de la valeur).

3.1.3 - Calcul de la hauteur du ballon par rapport au sol

Afin de restituer les profils verticaux des différentes grandeurs, il est nécessaire de connaître la hauteur à laquelle elles ont été mesurées. Le capteur de pression accroché au ballon captif ne donne pas la valeur absolue de la pression. En fait, on a accès à l'écart entre la pression mesurée par ce capteur en un point donné et une pression de référence fixe. Il faut donc avoir la pression au niveau du sol et ses variations au cours du temps, afin de déduire de la

mesure de pression différentielle, la valeur de la pression à la hauteur de la sonde. Ce recalage fait, on calcule la hauteur de la sonde en assimilant l'atmosphère à un fluide en équilibre hydrostatique. Cet équilibre vertical se traduit par l'équation (5) qui relie la différence de hauteur entre deux points et la différence de pression mesurée entre ces deux points.

$$dP = - \rho_h g dz \quad (5)$$

Où ρ_h est la masse volumique de l'air humide.

Dans notre cas, le gaz considéré est assimilé à un mélange de deux gaz assimilés à des gaz parfaits : air sec ($M = 28,96$) et vapeur d'eau ($M = 18$). L'équation d'état permet d'éliminer ρ_h dans la formule (5).

$$P = \rho_h R T \quad (6)$$

Dans cette équation (6), R (constante des gaz parfaits) dépend de la nature du gaz considéré et, dans le cas présent, est une moyenne pondérée des constantes R_a et R_v des deux gaz du mélange (7) :

$$R (1+r) = R_a + r R_v \quad (7)$$

L'équation d'état de l'air humide s'écrit alors :

$$P = \rho_h R_a \left(\frac{1 + \frac{R_v}{R_a} r}{1 + r} \right) T \quad (8)$$

De façon à garder pour R la valeur R_a de l'air sec, il est habituel de transférer sur le terme de température, la correction à apporter du fait de la présence de vapeur d'eau. On introduit ainsi la température virtuelle (θ_v en °C ou T_v en K).

$$T_v = T \frac{1 + 1,608 r}{1 + r} \quad (9)$$

avec $R_v/R_a = 1,608$

Combinant les équations (5), (8) et (9) et intégrant entre les niveaux z_{n-1} et z_n , on obtient la formule de Laplace (10) :

$$z_n - z_{n-1} = 2,30259 \frac{R_a}{g} T_v \log \frac{P(z_{n-1})}{P(z_n)} \quad (10)$$

Elle permet de calculer entre chaque point de mesure de P, la distance verticale parcourue. La température (T_v) de la formule est la température virtuelle moyenne entre le niveau z_n et le niveau z_{n-1} . En utilisant la formule (10), il est possible de restituer les déplacements verticaux du ballon. La précision de la hauteur ainsi obtenue est d'environ 5 mètres.

3.1.4 - Calcul du coindice de réfraction de l'air

Utilisant les formule (2) et (3) pour obtenir (e) et injectant la valeur trouvée dans la formule (1), on calcule le coindice de réfraction (N). Si l'on dérive l'ensemble de ces trois équations, on obtient une formule qui donne une estimation de l'erreur maximale sur N. En fonction des erreurs maximales sur les grandeurs mesurées, on trouve :

$$\Delta N = 4,1 \Delta T + 6,6 \Delta T_h + 0,27 \Delta P \quad (11)$$

Les coefficients de la formule précédente (11) ont été calculés pour $T = 290$ K, $T_h = 283$ K et $P = 1000$ mb. Ce calcul aboutit à une erreur de 5,7 unités-N sur la valeur du coindice. De toute évidence cette valeur maximum est très pessimiste ; une estimation plus réaliste doit tenir compte de la répartition statistique des différents paramètres. Si l'on fait l'hypothèse que les paramètres concernés (P), (T_h) et (T) sont distribués uniformément à l'intérieur de leur intervalle d'incertitude, il est possible de calculer la probabilité associée à une valeur de l'erreur. Le calcul (Sylvain, non publié) montre que, pendant 80% du temps, l'erreur sur N est inférieure à 3,1 unités-N, et que l'incertitude de la mesure de pression joue un rôle minime dans le total.

3.2 - L'avion instrumenté (Photo 4)

Lors de l'expérience, le PIPER AZTEC n'était appelé qu'en cas d'événements très intenses et susceptibles de durer jusqu'à son arrivée sur la liaison. Le plan de vol de l'avion permettait de recueillir des informations le long de la liaison et perpendiculairement à celle-ci à différentes hauteurs au dessus du sol entre environ 80 et 250 mètres. Une partie de la liaison n'a

cependant pas pu être explorée à cause de la proximité de Mont-de-Marsan : l'avion faisait des allers et retours entre Maillas et Le Caloy (voir figure 9). De façon générale, l'avion volait à une vitesse à peu près constante d'environ 60m/s.

Deux types de données étaient enregistrées à bord : les unes, nécessaires à la navigation, permettent de reconstituer la trajectoire, la position et l'allure de l'avion au cours du vol; les autres sont les mesures des différents paramètres physiques du milieu qui, entre autres, rendent possible le calcul de l'indice de réfraction. Les principales mesures effectuées par les capteurs de l'avion sont données avec leur incertitude dans le tableau qui suit (André, 1985).

En outre, le calculateur installé à bord procédait au traitement préliminaire et à l'enregistrement des données en unités physiques.

Paramètre mesuré	Type de capteur	étendue de mesure	Précision	Constante de temps
Localisation	Tacan Tacan	0-100NM 0-360°	± 0.1 NM ±1°	
Vitesse sol	Doppler	0-130m/s	±1m/s	
Hauteur	Radio altimètre	0 à 100 mb	±5% (piste) ±5% + 15m	
Pression statique	Capacité variable	100-1050mb	±1 mb	0,05s
Pression dynamique	Capacité variable	0-60mb	±0,5mb	0,05s
Température	Rosemount	-50 +50°C	± 0,3°C	0,05s(1/e)
Température	"Reverse flow"	-50 +50 °C	± 0,3 °C	1s
Température du point de rosée	Hygromètre thermoelectrique	-50 +50°C	±0,5°C (θd>0°C) ±1°C (θd <0°C)	2°C/s
Densité de vapeur d'eau	Lyman Alpha	0.5-30 g/m3	±0,2g/m3	0,001s (95%)
Humidité relative	Sonde au carbone	5-95%	±5%	0,15s (40-80%)

Tableau III : Caractéristiques des principaux capteurs installés à bord de l'avion.

3.2.1 - Mesures du vent

L'ordinateur de bord, à partir de la vitesse sol de l'avion mesurée par un radar Doppler et de la vitesse de l'air vue par l'avion, retrouve en temps réel la vitesse horizontale du vent et sa direction. Ce calcul complexe tient compte de l'attitude de l'avion (cap, roulis, tangage,...). L'erreur estimée est de 10% de la valeur mesurée pour la vitesse du vent et de 8° pour sa direction. Bien que peu précises ces valeurs sont d'une grande utilité lors de l'interprétation des phénomènes observés.

3.2.2 - Mesures de température

L'avion de la Météorologie est équipé de deux capteurs de température indépendants et de type différent. Etant donnée la vitesse de déplacement de l'avion par rapport à l'air environnant, il n'est pas possible de mesurer directement la température réelle de l'air et ceci quel que soit le type de capteur installé à bord. En effet, la mesure est entachée d'une erreur systématique due à la dissipation d'une partie de l'énergie cinétique des particules de l'air dans le repère lié à l'avion. Cependant, la connaissance de la vitesse de l'avion par rapport à l'air permet de corriger la valeur mesurée et de retrouver la température réelle. Cette restitution de la température réelle est faite par l'ordinateur de bord.

La température de l'air est déterminée par deux chaînes de mesure. L'une a pour capteur une sonde Rosemount pour laquelle une partie du flux d'air qui pénètre est dévié à 90° et est dirigée vers l'élément sensible en platine qui reste ainsi protégé des éventuelles particules solides. Quant à l'autre, il s'agit d'un capteur à flux inversé (Reverse flow). Son comportement est plus satisfaisant en atmosphère nuageuse que celui du capteur précédent, au prix d'un temps de réponse plus long. La comparaison entre les valeurs de température obtenues par ces deux capteurs est montrée figure 15.

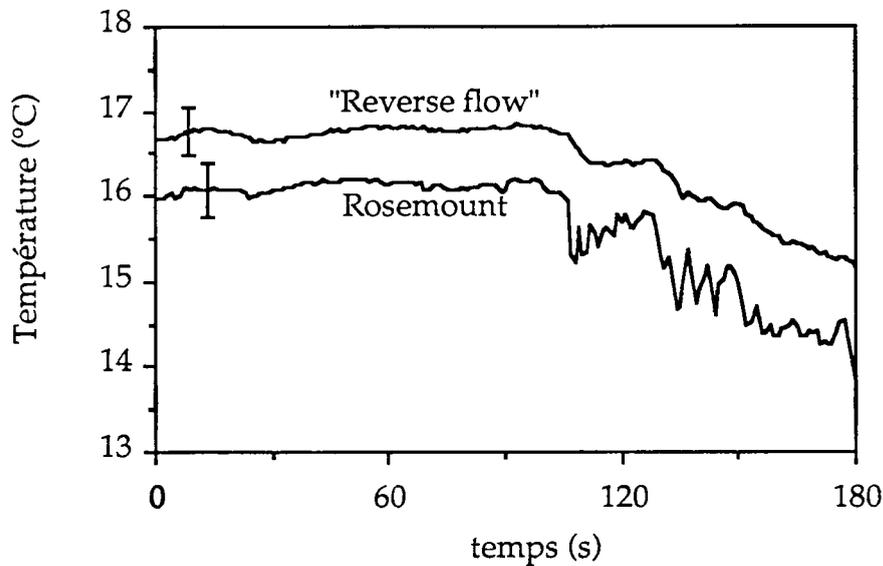


Figure 15 : Comparaison des mesures faites par les deux capteurs de température installés à bord de l'avion.

L'écart entre les deux courbes est de $0,7^{\circ}\text{C}$. Etant donnée l'incertitude sur les valeurs mesurées par les deux sondes, soit $0,3^{\circ}\text{C}$, cet écart est légèrement supérieur à l'incertitude prévue. Il apparaît donc que les deux appareils ne fonctionnaient pas en parfait accord. Néanmoins, les évolutions des deux courbes sont tout à fait similaires, ce qui indique qu'il n'y avait qu'une erreur systématique plus grande que la précision relative des valeurs. La figure 15 montre que la sonde Rosemount permet d'avoir accès aux fluctuations rapides de température, ce à quoi l'on s'attendait du fait de sa faible constante de temps ($0,05\text{s}$ pour $1/e$ du signal contre 1s pour le "Reverse flow"). Dans la suite de l'étude, nous utiliserons exclusivement les données de la sonde Rosemount, tout en gardant à l'esprit le fait que la valeur absolue de la température n'est pas connue précisément puisque l'écart entre les deux capteurs de l'avion est de $0,7^{\circ}\text{C}$ et qu'il n'est pas possible de savoir a priori lequel des deux instruments mesure réellement la température de l'air.

3.2.3 - Mesures d'humidité

A bord de l'avion l'humidité était mesurée par trois capteurs différents : une sonde au carbone, un appareil Lyman Alpha et une mesure du point de rosée.

- La sonde au carbone (hygromètre) mesure directement l'humidité relative de l'air (H_r) à partir de la variation de sa résistance électrique. Elle n'est pas très fiable à long terme, en particulier dès qu'elle a traversé une zone

saturée en humidité. La formule (1) qui permet le calcul du co-indice de l'air nécessite la connaissance de la pression de vapeur d'eau contenue dans l'air (e). On obtient celle-ci aisément à partir de l'humidité relative (exprimée en %) et de la température (θ) en utilisant la formule (12) :

$$e = \frac{Hr}{100} e_{vs}(\theta) \quad (12)$$

La pression de vapeur saturante est donnée par la formule (3) appliquée cette fois à la température sèche (θ) en °C.

- L'hygromètre à absorption Lyman Alpha utilise la mesure de l'absorption sur un trajet connu de la raie d'émission Lyman Alpha de l'hydrogène par la vapeur d'eau. Il mesure donc la densité de vapeur d'eau présente dans l'air (ρ_v). Cette quantité est ensuite convertie en pression de vapeur en utilisant la loi des gaz parfaits :

$$e = R_v \rho_v T \quad (13)$$

avec T en K, ρ_v en kg/m^3 et e en Pa, la constante $R_v = 461,27 \text{ J}/\text{K}\cdot\text{kg}$.

Cet appareil a un temps de réponse très court (0,001s à 95% de la valeur mesurée), mais il nécessite de fréquents étalonnages du fait de son importante dérive dans le temps. De plus, l'oxygène, bien qu'ayant un coefficient d'absorption faible, joue, du fait de sa concentration importante, un rôle qui n'est pas toujours négligeable. En résumé, cet hygromètre est d'utilisation peu commode. Cependant, de par son excellent temps de réponse, il reste le seul moyen de mesurer des fluctuations rapides.

- L'hygromètre à point de rosée mesure la température de point de rosée de l'air. Un miroir très fin est refroidi jusqu'à ce qu'il se couvre d'une couche de buée. La température (θ_r) à laquelle se produit le phénomène est la température pour laquelle la pression de vapeur saturante de l'eau ($e_{vs}(\theta_r)$) est égale à la pression partielle ambiante de vapeur ($e(\theta)$), puisqu'il y a condensation. La pression de vapeur d'eau recherchée est donc donnée par la formule (3), appliquée à la température de point de rosée (θ_r). Ce système donne, en moyenne, une valeur de (e) plus fiable que les deux précédents. Cependant, son temps de réponse qui est fixé par la vitesse de refroidissement

du miroir (2°C/s) le rend difficilement utilisable pour l'étude des fluctuations rapides.

La comparaison des mesures des trois capteurs, présentée figure 16, fait ressortir la bonne cohérence des valeurs obtenues. Il est clair que les fluctuations restituées indépendamment par les trois capteurs représentent des variations réelles du milieu. La meilleure résolution obtenue avec le Lyman Alpha est très nette, ainsi que sa dérive sur la période représentée.

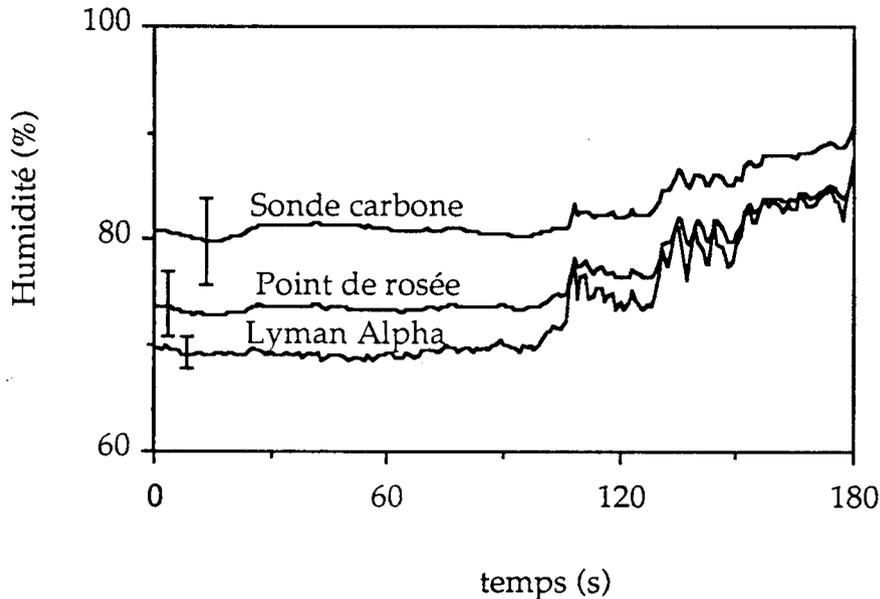


Figure 16 : Comparaison des mesures d'humidité relative obtenues à partir des trois différents capteurs d'humidité installés à bord de l'avion.

En conclusion, nous retiendrons comme valeur absolue de l'humidité celle obtenue à partir du point de rosée et nous utiliserons les données du Lyman Alpha pour l'étude des fluctuations rapides.

Différentiant la formule (3) qui permet de calculer (e) en fonction de θ_r , on obtient une précision d'environ 0,25mb pour une température θ_r de point de rosée de 10°C , correspondant à une pression partielle de vapeur d'eau de 12,3 mb.

3.2.4 - Calcul de l'indice de réfraction

Enfin, la grandeur qui nous intéresse tout particulièrement, l'indice de réfraction de l'air, est calculé à l'aide de la formule (1) dans laquelle (e) est déduit de la température du point de rosée.

La relation (14) donne une estimation de l'erreur maximale commise sur N pour $T = 290 \text{ K}$, $T_r = 283 \text{ K}$ et $P = 1000 \text{ mb}$, c'est-à-dire $e = 12,3 \text{ mb}$.

$$\Delta N = 0,27 \Delta P + 3,76 \Delta T_r + 1,22 \Delta T \quad (14)$$

Les précisions données au tableau III conduisent à une erreur d'environ 1,8 unités-N. Si l'on fait le même calcul qu'au paragraphe 3.1.4, on trouve une erreur inférieure à 0,8 unités-N pour 80% du temps.

3.2.5 - Mesures de la hauteur de l'avion

Dans la mesure où il est nécessaire de faire des recoupements entre les données-avion et ballon, le problème de la localisation exacte de l'avion par rapport au ballon se pose. Le système de bord du PIPER AZTEC donnait la position de l'avion dans un plan horizontal avec une précision de l'ordre de 1km. Le problème de la hauteur de l'avion, pour laquelle on souhaite une très bonne précision compte tenu de la dimension des structures à observer, est un peu plus délicat. Deux appareils à bord donnaient une mesure de hauteur : le baromètre qui permet de retrouver la hauteur par rapport à une référence fixe (cf paragraphe 3.1.3 au sujet du ballon captif) et le radioaltimètre qui mesure directement la hauteur par rapport au sol. Nous verrons par la suite que la mesure que nous utilisons est celle donnée par le radioaltimètre. La précision de la valeur fournie par cet appareil est de 5% de la valeur sur un sol idéal (sur piste, par exemple). Dans la pratique, la nature du terrain et du sursol a une grande influence : pour une forêt, l'incertitude peut atteindre la hauteur des arbres, car il est difficile de savoir à quel niveau, entre le niveau du sol et le sommet des arbres, se fait la réflexion du signal radio. Dans notre expérience, de nombreuses zones étaient plantées d'arbres ; toutefois, il n'a pas été possible de mettre en évidence aux transitions champ-forêt des discontinuités dans la hauteur mesurée par le radioaltimètre, ce qui tend à faire penser que l'erreur commise du fait des arbres est négligeable. En conclusion, nous considérerons que la hauteur au dessus du sol est donnée avec une précision d'environ 5% par le radioaltimètre. Cette mesure, comparée à l'altitude déduite de la mesure de pression, permettra si nécessaire de retrouver le relief du sol survolé.

Ce chapitre de description de l'expérience nous a permis de préciser les moyens de mesure des paramètres que nous allons utiliser par la suite et d'en connaître les limites.



Photo 1: Vue aérienne du pylône du site de réception de Maillas.



Photo 2: Vue des équipements de réception, d'acquisition et d'enregistrement.

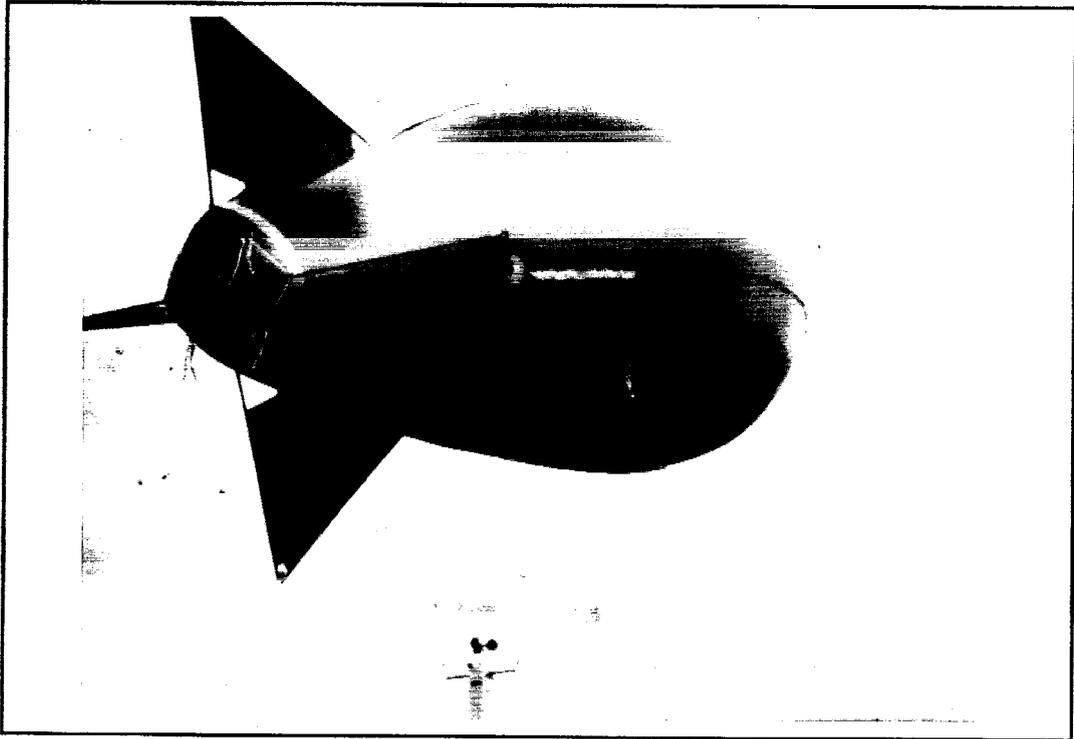


Photo 3: Vue du ballon captif et de la sonde météorologique.



Photo 4: Vue du PIPER AZTEC, avion instrumenté du Centre d'Aviation Météorologique.

IV - Traitement des données

L'indice de réfraction de l'air est fonction à la fois de l'espace et du temps. Comme il a été mentionné précédemment, les gradients horizontaux de N ont presque toujours été négligés devant les gradients verticaux. L'expérience PACEM3 visait précisément à connaître l'ordre de grandeur des variations horizontales qu'il est possible de rencontrer dans les basses couches de l'atmosphère et à en déterminer l'impact sur la propagation des ondes hertziennes.

1 - Définition des gradients horizontaux adoptée

Avant de procéder au traitement des données et à l'interprétation des résultats, il est nécessaire de définir précisément ce que nous avons jusqu'alors appelé de façon volontairement imprécise "gradients horizontaux". S'agit-il de variations observées en se déplaçant horizontalement, c'est-à-dire en suivant la courbure de la terre, ou bien de changements observés lorsque l'on suit le relief à hauteur constante? Les résultats obtenus en adoptant le premier point de vue, point de vue dans lequel la coordonnée z représente la hauteur par rapport à une référence fixe, n'ont pas permis de dégager des tendances claires sur le comportement de l'indice de réfraction. Par contre, une première exploitation rapide des données a permis de remarquer que, pour les deux nuits étudiées et aux hauteurs concernées, l'indice de réfraction de l'air suivait la plupart du temps le relief du sol. De là, il nous a semblé plus intéressant de supposer, a priori, qu'aux hauteurs considérées dans notre expérience, l'indice de réfraction dépendait de la hauteur par rapport au sol plutôt que de l'altitude et une situation sans gradient horizontal a donc été définie comme une situation pour laquelle les courbes d'iso-indice sont parallèles au sol. L'existence de gradients horizontaux se traduira donc par des écarts par rapport à cette situation de référence.

Dans tout ce qui suit, l'axe de la liaison, orienté dans le sens Mont-de-Marsan - Maillas, sera pris comme axe des x avec l'origine à Le Caloy. La coordonnée verticale z , dont le choix découle de la discussion ci-dessus, représentera toujours la hauteur par rapport au terrain et non par rapport à une référence fixe. Enfin, l'axe des y est choisi perpendiculaire aux deux

précédents.

Le site du ballon captif, défini par ses coordonnées horizontales (x_0, y_0) , était situé approximativement sur le trajet de la liaison hertzienne aux alentours de Maillas. Le ballon, lors de ses montées et descentes, mesurait donc le profil vertical de l'indice de réfraction à la verticale de ce point : $N_{\text{ballon}}(x_0, y_0, z, t)$.

L'avion, lui, pouvait se déplacer horizontalement et verticalement mesurant l'indice de réfraction $N_{\text{avion}}(x, y, z, t)$ en un point donné, à un instant t donné. Si l'avion avait pu suivre le relief, donc voler à z constant, la connaissance de $N_{\text{avion}}(x, y, z, t)$ aurait été suffisante pour avoir une idée des gradients horizontaux rencontrés. En fait, la simple considération des gradients verticaux mesurés par le ballon montre qu'un faible écart sur z peut entraîner un changement important de l'indice. De manière à nous affranchir des variations d'indice uniquement dues à des changements d'altitude de l'avion, nous allons procéder par comparaison : à instant donné t , connaissant la hauteur $z(t)$ de l'avion et la valeur d'indice mesurée par celui-ci, il est possible de comparer cette valeur $N_{\text{avion}}(x, y, z(t), t)$ avec celle, mesurée à la même hauteur à la verticale du point (x_0, y_0) par le ballon, soit $N_{\text{ballon}}(x_0, y_0, z(t), t)$. Cette façon de procéder permet de voir si l'indice de réfraction suit effectivement le relief et, dans le cas contraire, de quantifier les écarts par rapport à une situation sans gradients horizontaux.

Le profil donné par le ballon sert donc de référence. Pour effectuer dans de bonnes conditions des comparaisons entre des valeurs obtenues d'une part avec les capteurs du ballon et d'autre part avec ceux de l'avion, il est nécessaire de procéder a posteriori à un étalonnage des seconds par rapport aux premiers.

2 - Comparaisons des données Avion-Ballon (température et humidité)

Nous avons comparé les données recueillies par l'avion et le ballon à peu près au même instant et au même endroit. Les figures 17 et 18, qui suivent, mettent en évidence une assez bonne cohérence des valeurs tant sur la mesure de la température que sur celle de l'humidité.

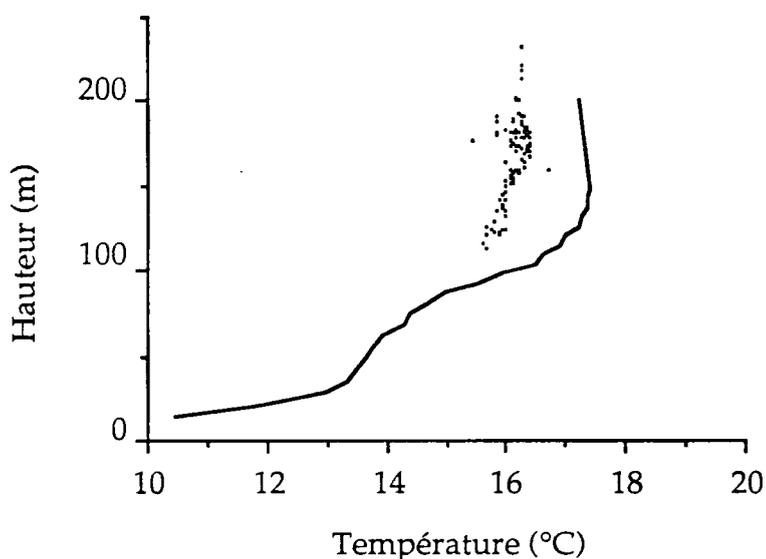


Figure 17 : Comparaison des mesures de température ballon et avion. Les points représentent les données avion recueillies à proximité du site ballon entre 03:49 et 04:10 le 14 Juin ; la courbe est le tracé du profil enregistré par le ballon entre 03:30 et 03:40 le même jour.

La figure 17 met en évidence un écart d'environ $0,7^{\circ}\text{C}$ entre la température (Rosemount) mesurée par l'avion et celle enregistrée par le ballon. La prise en compte des incertitudes des capteurs eux-mêmes ($0,5^{\circ}\text{C}$ pour le ballon et $0,3^{\circ}\text{C}$ pour la sonde Rosemount de l'avion) permet de justifier le décalage observé.

Rappelons cependant que la comparaison entre les mesures faites par les deux capteurs de température montés sur l'avion (figure 15) a montré que la sonde Rosemount donnait une température inférieure à celle mesurée par le "Reverse flow" d'environ $0,7^{\circ}\text{C}$. Les mesures effectuées par la sonde "Reverse flow" sont moins intéressantes pour l'étude des fluctuations rapides mais sont globalement en accord avec celles faites à partir du ballon.

En ce qui concerne les mesures d'humidité, le décalage qui apparaît, figure 18, entre les deux ensembles de valeurs d'humidité relative, soit environ 2,5% est également explicable par les imprécisions de chacun des instruments.

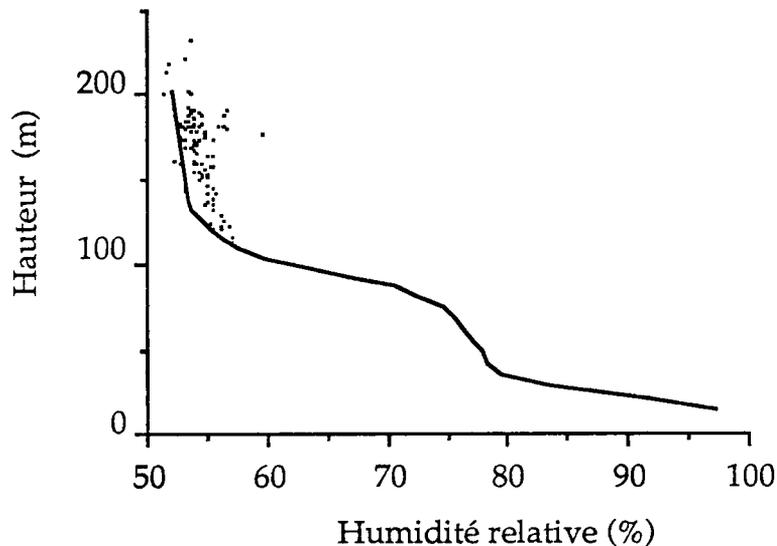


Figure 18 : Comparaison des mesures d'humidité Ballon et Avion. (mêmes conditions qu'à la figure 17).

De façon générale, d'après la figure 17 (respectivement 18), la courbe avion de température (respectivement d'humidité) semble pouvoir se déduire du profil ballon par un simple décalage.

Notre "étalonnage" consiste donc à décaler simplement les valeurs obtenues par les capteurs avion de façon à les faire correspondre aux mieux avec celles données par les sondes du ballon. En effet, étant données la vitesse de l'avion et la grande difficulté à procéder à des étalonnages dynamiques des capteurs, il semble raisonnable d'accorder plus de crédit aux valeurs absolues mesurées par les capteurs du ballon. Quoi qu'il en soit, l'indice de réfraction de l'air conditionne la propagation des ondes plus par ses variations que par sa valeur absolue et par conséquent les décalages décrits ci-dessus, qui ne sont pas très importants, ne changeront en rien l'interprétation des phénomènes observés.

Ceci fait, nous pouvons introduire une nouvelle variable $\underline{\Delta N}$, qui prend une valeur nulle partout où l'indice de réfraction mesuré par l'avion est égal à la valeur mesurée par le ballon à la hauteur considérée.

$$\underline{\Delta N} = N_{\text{avion}}(x,y,z,t) - N_{\text{ballon}}(x_0,y_0,z,t) \quad (1)$$

On rappelle que z est la hauteur au dessus du sol et que si l'indice de réfraction suit le relief, $\underline{\Delta N}$ est presque nul partout.

Nous définissons également une fonction indicatrice $I(x(t),y(t),z(t))$ qui prend deux valeurs différentes selon que l'écart $\underline{\Delta N}$ est négligeable ($I = 0$) ou non ($I = 1$). Il nous appartient de fixer la limite à partir de laquelle $\underline{\Delta N}$ est considéré comme significativement différent de 0. Dans ce but, nous utilisons la distribution statistique de valeurs prises par $\underline{\Delta N}$. Pour chacune des deux nuits, l'écart type σ_N calculé sur l'ensemble des valeurs correspondant à des fluctuations autour de zero donnera la limite recherchée.

$$\begin{aligned} |\underline{\Delta N}| > \sigma_N & \quad I = 1 \\ |\underline{\Delta N}| \leq \sigma_N & \quad I = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

La figure 19 illustre sur les données recueillies lors d'un des passages de l'avion au dessus de la liaison la nécessité de s'attacher à la différence $\underline{\Delta N}$ plutôt qu'aux données de l'avion.

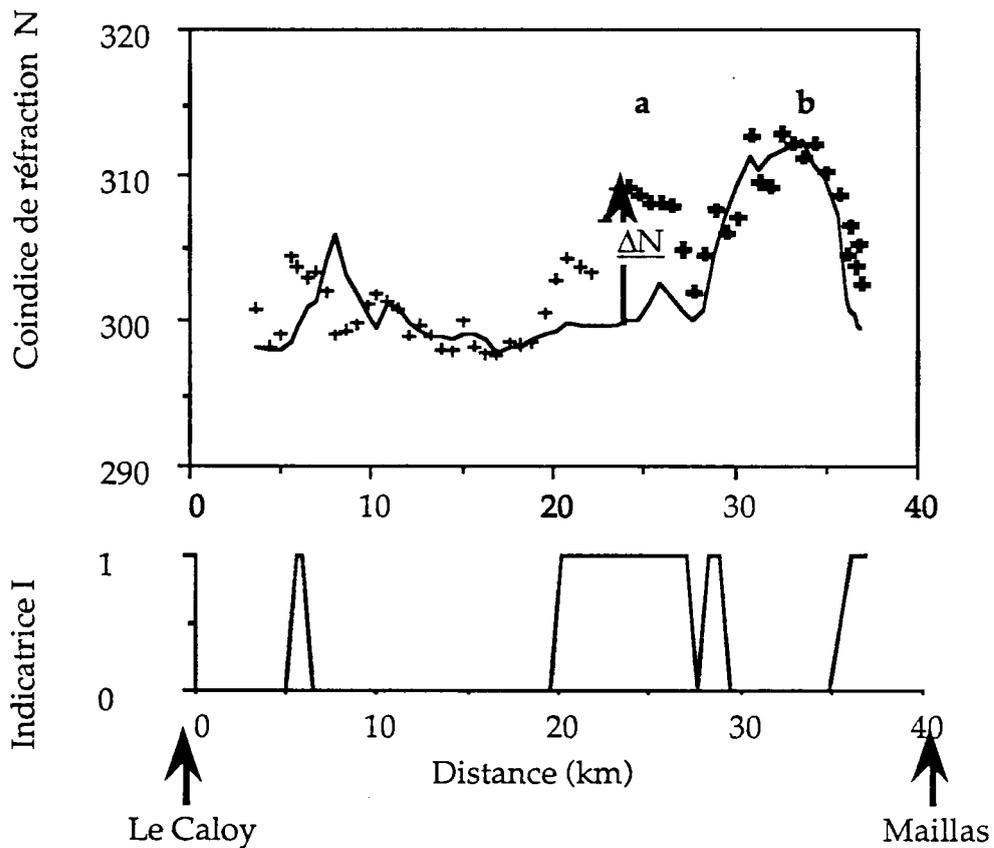


Figure 19 : Illustration sur un passage de l'avion (de 04:08 à 04:17 le 24 Juin). Les croix représentent les points relevés par l'avion : $N_{avion}(x,y,z,t)$, la courbe continue la valeur d'indice obtenue pour la hauteur z de l'avion à partir du profil ballon : $N_{ballon}(x_0,y_0,z,t)$.

En effet, sur les deux zones (a et b) de la liaison où l'avion a trouvé des valeurs d'indice sensiblement plus élevées qu'ailleurs, la comparaison avec les données ballon permet d'éliminer l'une des deux (b), uniquement imputable à un changement de hauteur de l'avion. Par contre l'augmentation de la valeur d'indice mesurée en (a) est tout-à-fait significative d'un phénomène réel.

En procédant de cette façon, on élimine automatiquement les petites fluctuations de l'indice de réfraction qui peuvent être dues à des phénomènes réels mais dont l'importance est de l'ordre de grandeur de l'imprécision sur la mesure d'indice.

A ce point de l'étude, nous disposons des outils qui vont nous permettre, à partir des données ballon et avion, de quantifier les gradients horizontaux rencontrés lors des deux nuits étudiées, de restituer la structure, à l'échelle de la liaison, de l'indice de réfraction de l'air et d'en étudier l'évolution temporelle.

V - Nuit du 13 au 14 Juin : une situation stationnaire

1 - Données radioélectriques

Le 14 Juin, les données enregistrées par le M.L.A. ont permis de détecter des perturbations du signal radio dès 01:30.

Sur la figure 20, sont représentées en gris les périodes durant lesquelles on a relevé un affaiblissement sélectif d'au moins 5 dB dans la bande de 1 GHz.

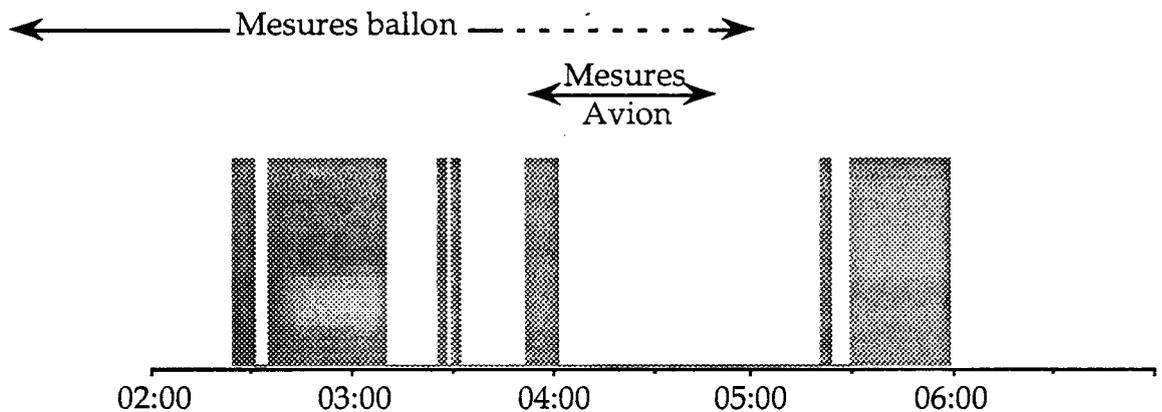


Figure 20 : Périodes d'affaiblissements sélectifs dans la bande de 1 GHz (en grisé) et de mesures de l'indice de réfraction par le ballon captif et par l'avion. Les pointillés indiquent une panne dans l'acquisition des données ballon.

Entre 02:20 et 03:00, l'amplitude du signal a montré, pendant près de 40 minutes, un affaiblissement très sélectif d'environ 40 dB aux alentours de 10,9 GHz. A partir de 03:00, le creux d'amplitude s'est déplacé vers les fréquences plus élevées et est sorti de la bande analysée vers 03:10. La figure 21 montre précisément l'évolution de l'amplitude du signal à ce moment entre 10,7 et 11,7 GHz. Nous avons choisi d'échantillonner la fonction de transfert chaque seconde pour représenter l'évolution de l'affaiblissement dans la bande. Les affaiblissements qui, sur cette figure, affectent sélectivement certaines fréquences sont tout à fait caractéristiques des trajets multiples qui sont l'objet de notre étude.

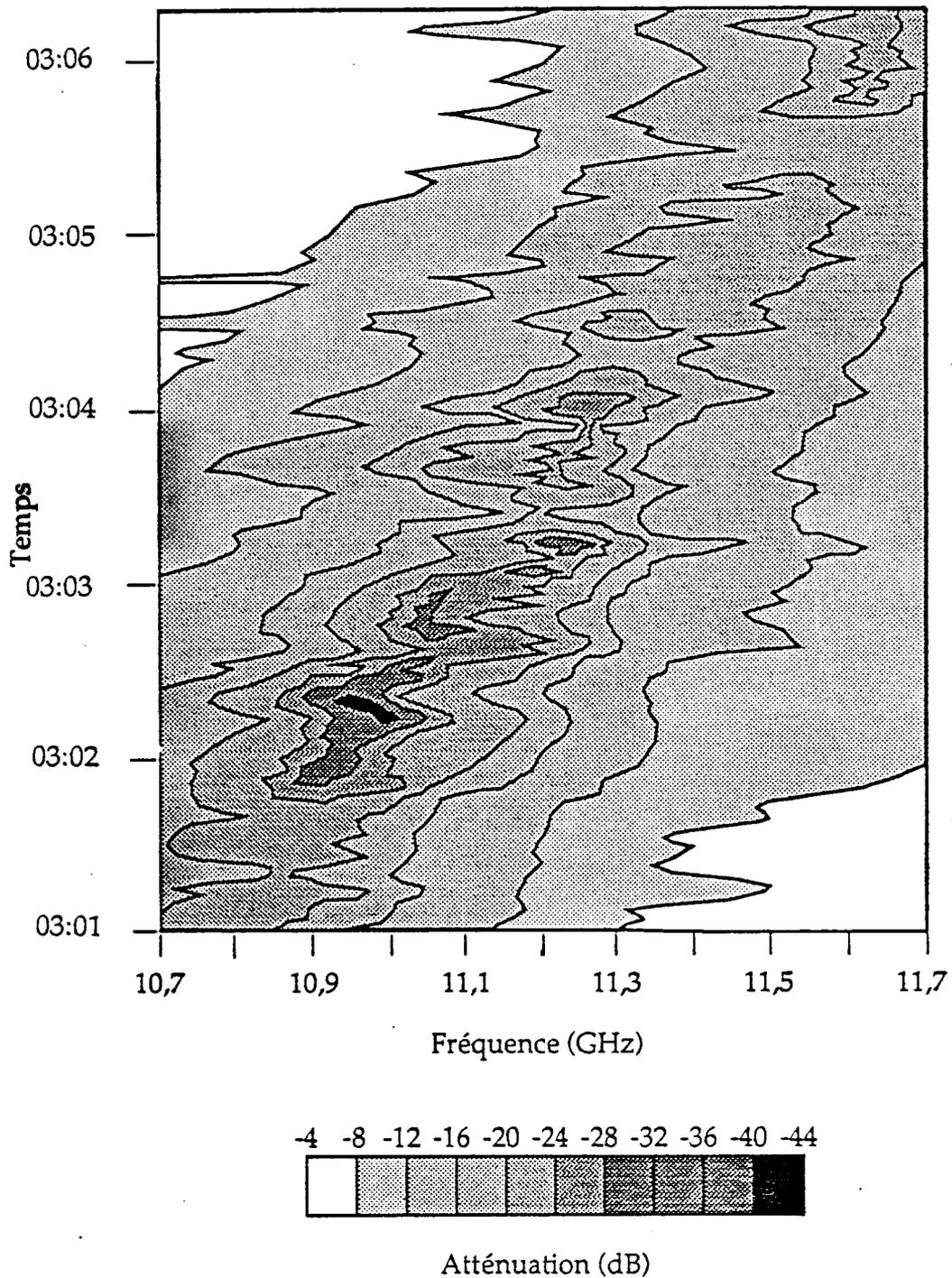


Figure 21 : Evolution temporelle de l'atténuation dans la bande de 1GHz entre 03:01 et 03:06 le 14 Juin. Une fréquence d'échantillonnage d'une fonction de transfert par seconde a été choisie.

A partir de 03:10, les affaiblissements enregistrés étaient moins importants mais toujours sélectifs (dispersion de 5 à 10 dB dans la bande). Il semble raisonnable de supposer que lors de cette deuxième période, la fonction de transfert présentait un minimum d'amplitude plus important mais à l'extérieur de la bande analysée. Ce dernier point met en évidence l'importance d'avoir des mesures de fonction de transfert en bande la plus large possible.

En conclusion, l'évolution temporelle des fonctions de transfert du canal de propagation montre que, cette nuit-là, les événements étaient longs (plusieurs dizaines de minutes) et que les fréquences affectées variaient peu ou très lentement sur des échelles de temps de l'ordre de la dizaine de minutes.

Les données météorologiques enregistrées simultanément par le ballon captif et l'avion instrumenté doivent nous permettre d'interpréter les phénomènes radioélectriques observés.

2 - Profil vertical de l'indice de réfraction

Le ballon captif est monté et descendu huit fois au cours de la nuit entre 00:06 et 05:11, mesurant pression, températures sèche et humide, force et direction du vent. Un incident technique a malencontreusement stoppé l'acquisition des données ballon vers 03:40 au moment de l'arrivée de l'avion au dessus de la liaison. Cependant, puisque l'évolution temporelle des profils verticaux de température et d'humidité avait été jusqu'alors très lente et régulière, il est peu probable que l'atmosphère ait connu des changements notables dans l'heure suivante. Nous considérerons donc que le dernier profil vertical disponible est représentatif des conditions météorologiques au dessus du site ballon pendant toute la durée des mesures avion. La vraisemblance de cette hypothèse est confirmée par la cohérence de l'interprétation des mesures effectuées. Ce profil vertical d'indice de réfraction, montré figure 22, nous servira donc de référence.

On note, sur la figure 22, deux couches superréfractantes, présentant des gradients verticaux de l'ordre de $-0,2$ unités-N/m. La première se situe près du sol, entre 15 et 35 mètres et l'autre, entre 70 et 110 mètres, juste au dessus de l'émetteur.

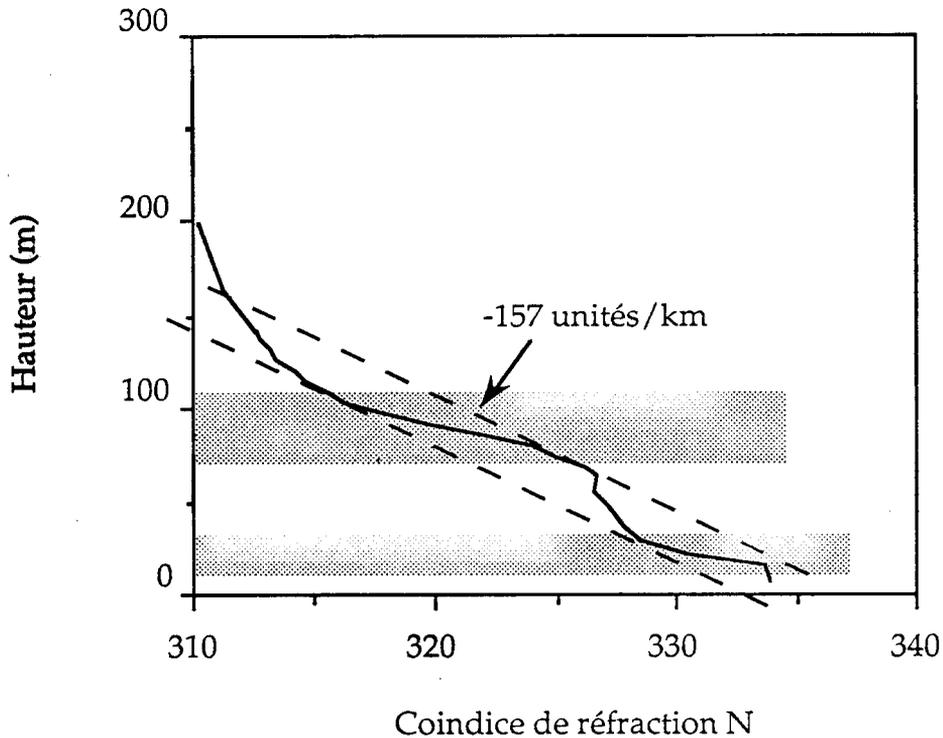


Figure 22 : Profil relevé par le ballon entre 03:30 et 03:40 le 14 Juin. Les couches superréfractantes responsables de trajets multiples sont représentées en grisé.

La position de la couche supérieure par rapport à celle de l'émetteur laisse supposer l'existence de trajets multiples. Afin d'estimer qualitativement l'effet d'un tel profil sur la propagation des ondes, il est commode de raisonner en terme de module de réfraction M (Le module de réfraction a été défini précédemment dans la partie II).

Si l'on représente les variations verticales du module M (figure 23), on voit que les deux couches superréfractantes forment un seul conduit de guidage entre le sol et 110 mètres. L'émetteur situé à une hauteur de 70 mètres se trouve dans ce conduit et le profil vertical d'indice peut, à lui seul, expliquer l'existence d'une zone de trajets multiples.

Notons que ce résultat qualitatif, bien qu'intéressant, ne permet pas de montrer que la zone d'interférences englobe bien le point de réception du signal. Dans le chapitre VII, l'utilisation d'un programme de simulation nous permettra de connaître, pour une distribution d'indice donnée, la zone

théoriquement affectée par les trajets multiples.

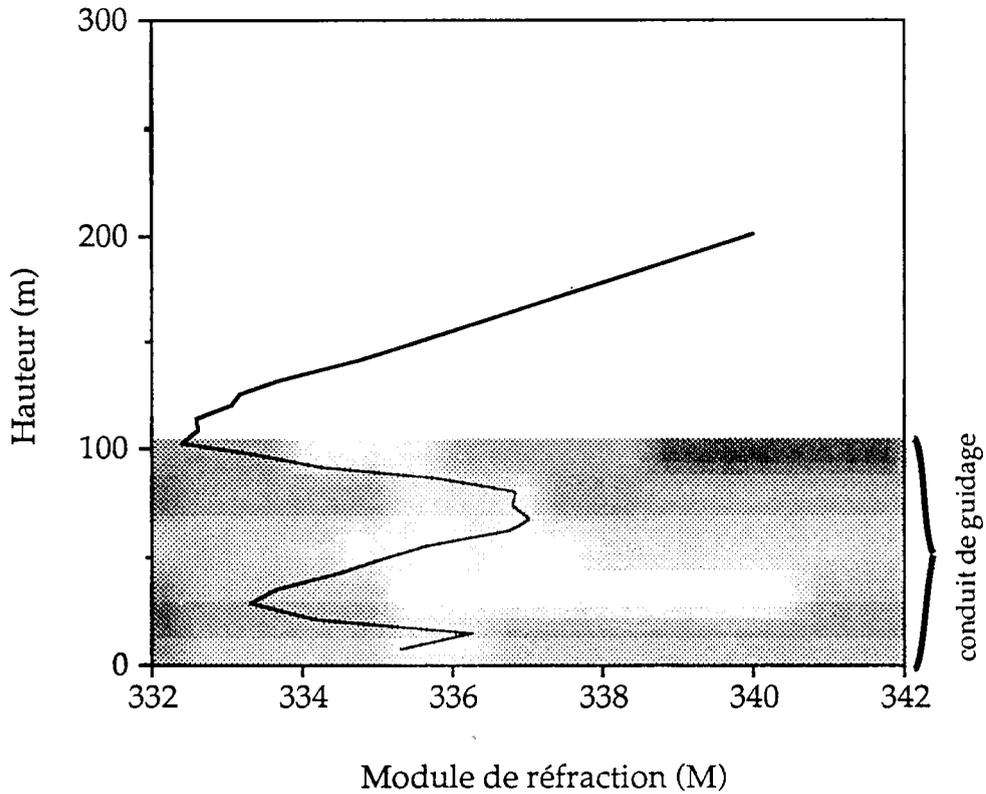


Figure 23 : Profil vertical de module de réfraction correspondant au profil d'indice de la figure précédente. Les deux couches superréfractantes (en gris plus foncé) qui ont été mises en évidence sur la figure 22 forment un conduit de guidage entre le sol et environ 100 mètres de hauteur (en gris). L'émetteur se trouve à une hauteur de 70 mètres.

Avant d'étudier les éventuelles variations horizontales d'indice mesurées par les capteurs de l'avion, il est nécessaire d'évaluer l'ordre de grandeur de l'erreur commise sur la valeur de référence $N_{\text{ballon}}(x_0, y_0, z, t)$ du fait de l'imprécision de 5% sur la hauteur de l'avion z . L'avion volait à des hauteurs comprises entre 100 et 300 mètres. Le profil vertical d'indice (figure 22) montre qu'à ces hauteurs le gradient vertical d'indice est égal à $-0,06$ unités/m et qu'il conduit à une erreur maximale de $0,6$ unités- N sur $N_{\text{ballon}}(x_0, y_0, z, t)$. La suite de l'étude montrera que cette valeur est très faible vis à vis des variations horizontales mesurées et qu'elle ne gêne absolument pas l'interprétation des phénomènes observés.

3 - Structures horizontales mises en évidence par l'avion

Au vu des événements radio importants, l'avion qui attendait à l'aéroport de Toulouse, a été appelé vers 02:00. Il est arrivé à la verticale de la liaison aux alentours de 03:40 et a survolé cette dernière selon le plan de vol suivant :

Maillas		Le Caloy
03:49	→	03:57
04:07	←	03:59
04:10	→	04:18
04:36	←	04:27

et une transversale entre 04:19 et 04:26.

Les figures 17 et 18, présentées au chapitre précédent, pour illustrer le bon accord entre les données avion et ballon, ont été enregistrées cette nuit-là et correspondent au profil vertical de référence de la figure 22. Ainsi, nous avons ajusté par simple translation les valeurs fournies par les capteurs de l'avion à celles mesurées par les capteurs du ballon. L'écart entre les deux ensembles de mesures de température est d'environ 0,7 °C, ce qui est acceptable vues les incertitudes de 0,5°C et 0,3°C dues aux capteurs. En ce qui concerne les valeurs d'humidité, le décalage observé d'environ 2,5% entre tout à fait dans l'intervalle d'erreur dû aux différents capteurs. Ces corrections effectuées sur la température et sur l'humidité correspondent, sur la valeur d'indice calculée, à une translation d'approximativement 6 unités-N, qui, nous le repétons, est sans conséquence sur l'interprétation future des conditions de propagation.

Un dépouillement grossier des données recueillies par les capteurs de l'avion permet de voir que, par endroit, les valeurs d'indice relevées sont nettement supérieures à ce que donne le ballon à la verticale du point (x_0, y_0) .

De façon à introduire correctement l'indicatrice I, il nous faut connaître la distribution statistique des ΔN . Le graphe de cette distribution (figure 24), obtenu à partir de 2500 points de mesure d'indice faits pendant le vol, à raison de un par seconde, est nettement bimodal. Il y apparaît la superposition de deux distributions grossièrement triangulaires : la première (en grisé), centrée autour de la valeur zero, correspond, aux fluctuations près, à une situation sans gradient horizontal ; la seconde, dont la valeur modale se situe aux environ de

8 unités-N, traduit l'existence de variations horizontales. L'écart type de la distribution centrée sur zéro est de 3 unités-N. C'est cette valeur σ_N qui sera utilisée comme seuil pour définir l'indicatrice I. Les fluctuations autour de la valeur zéro peuvent être dues, soit à des fluctuations d'indice traduisant des phénomènes physiques (Le paragraphe 3.2 en donnera un exemple), soit à des erreurs de mesures ; à ce stade de l'analyse, il est impossible de séparer les unes des autres.

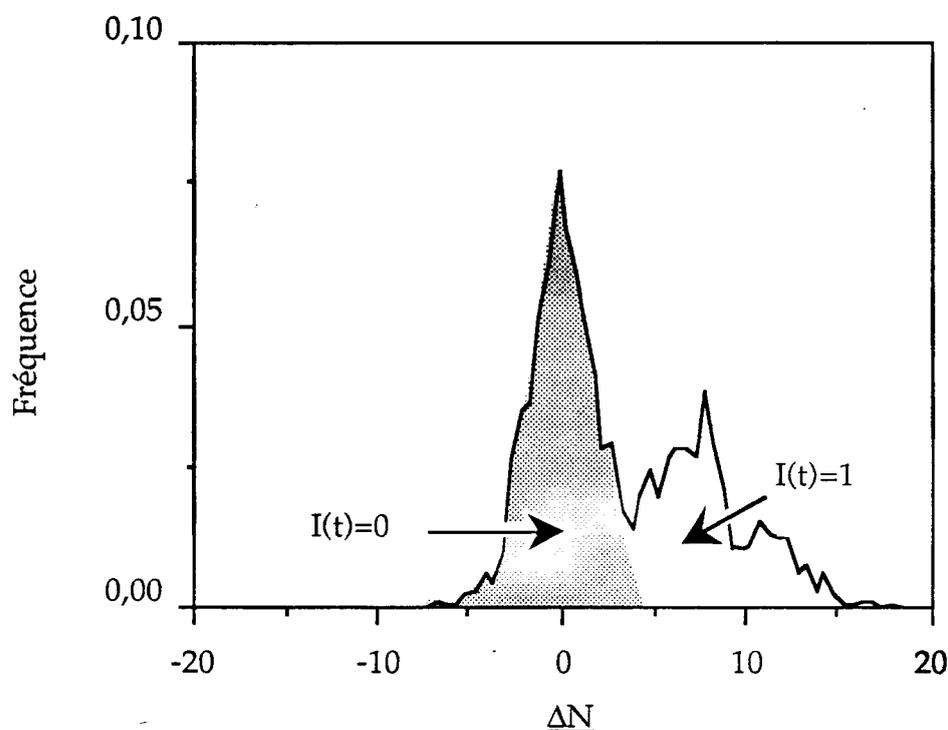


Figure 24 : Distribution statistique des valeurs de ΔN calculée à partir des données avion recueillies le long de la liaison entre 03:49 et 04:36 le 14 Juin.

La distribution des valeurs de ΔN pendant la durée des observations nous permet de distinguer deux types de variations horizontales d'indice de réfraction : d'une part, des petites fluctuations autour de la valeur zéro, et, d'autre part, des écarts plus importants qui forment le pic de droite. Dans un premier temps c'est à ces derniers que nous allons nous intéresser.

3.1 - Gradients horizontaux à l'échelle de la liaison

De par sa définition même, l'indicatrice I ne permet de rendre compte que des variations importantes d'indice puisqu'elle ne prend pas en compte les faibles fluctuations.

Les valeurs prises par $I(x,z,t)$ lors des passages successifs de l'avion mettent en évidence, quelle que soit la hauteur de vol de l'appareil, l'existence de deux zones avec, pour chacune d'elles, un comportement bien distinct de l'indice de réfraction : la première ($I = 0$), au Nord-Est (vers Maillas), où l'indice de réfraction est en bon accord avec le profil vertical enregistré par le ballon captif en un point et la seconde ($I = 1$), au Sud-Ouest (vers Le Caloy) où la valeur d'indice mesurée est supérieure à ce qu'elle devrait être d'après ce même profil. Ce net découpage en deux zones est illustré figure 25 .

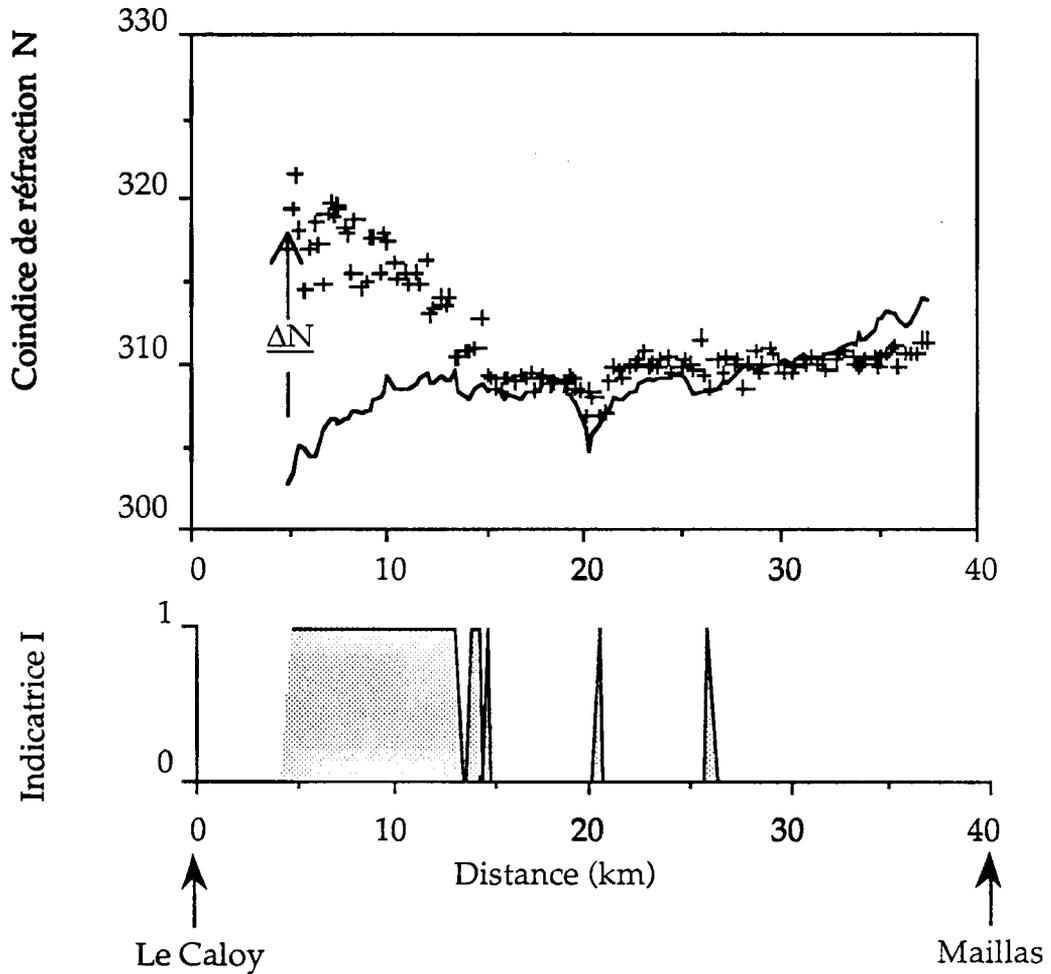


Figure 25 : Illustration de la situation rencontrée pendant la nuit du 13 au 14 Juin sur les données recueillies par l'avion entre 03:49 et 03:53 .

Globalement, la situation ainsi décrite n'évolue pas de façon sensible au cours de la période étudiée, ce qui suggère l'existence d'une situation stationnaire cette nuit-là. Cela nous autorise, dans un premier temps, à négliger la dépendance en temps de l'indice $N(x,y,z,t)$. Dans ces conditions, il est possible de restituer l'allure des contours d'iso-indice (figure 26).

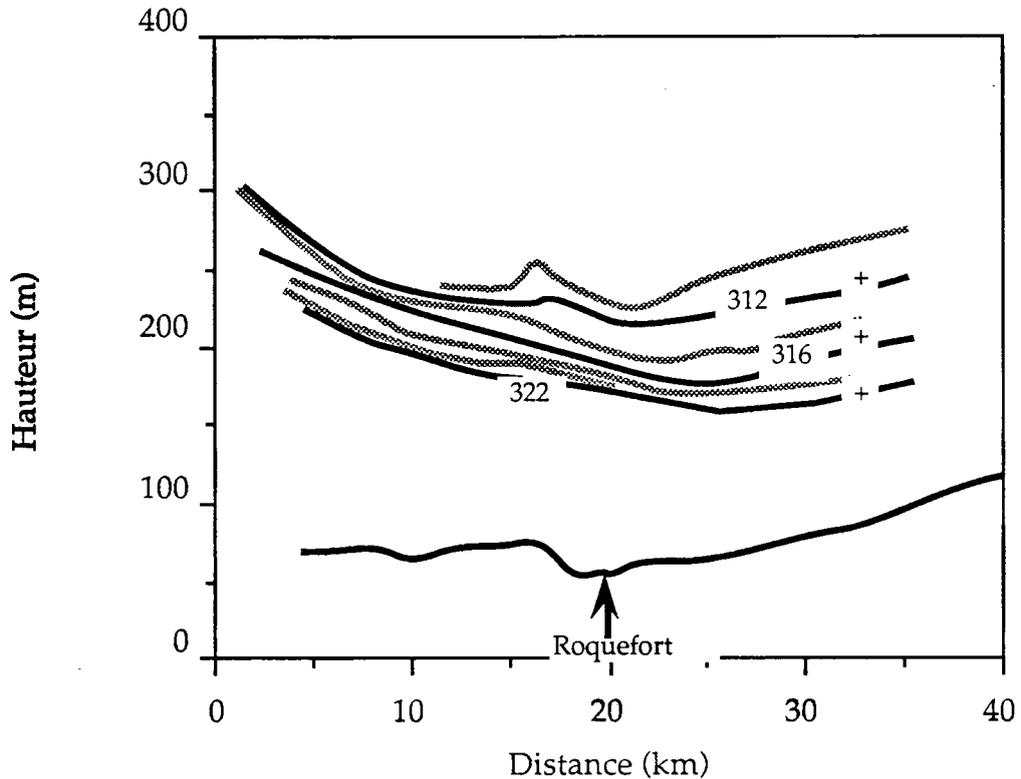


Figure 26 : Courbes d'iso-indice tracées à partir des données avion et ballon (+) relevées la nuit du 13 au 14 Juin.

Sur la figure 26, les croix représentent les points du profil ballon qui correspondent aux isocontours (312, 316, 322) dessinés en trait noir.

Nous avons procédé de la manière suivante : nous avons tout d'abord lissé les données avion par des moyennes sur 20 points successifs. De cette façon, nous avons obtenu un échantillonnage horizontal d'un point tous les 1,3 kilomètres environ. Le quadrillage vertical était quant à lui entièrement déterminé par les quatre passages de l'avion au dessus de la liaison. Ceci fait, les isocontours ont été tracés en reliant entre eux tous les points qui correspondaient quasiment à la même valeur d'indice (Ainsi, pour la courbe $N = N_0$, les points retenus étaient tous compris entre $N_0 - 0,25$ et $N_0 + 0,25$).

De toute évidence, le plan de vol de l'avion ne permettait pas un échantillonnage vertical suffisant et les isocontours obtenus ne reflètent que grossièrement la réalité mais permettent tout de même de décrire qualitativement la situation. Nous retrouvons de façon très nette le découpage en deux zones déjà mentionné : sur la figure 26, à droite de Roquefort (Nord-Est), l'indice de réfraction suit la pente ($I = 0$) ; par contre, sur la gauche

de la figure (Sud-Ouest de Roquefort) les courbes d'iso-indice s'éloignent nettement du sol et, pour une même hauteur par rapport au terrain, les valeurs d'indice rencontrées sont plus élevées que dans l'autre zone ($I = 1$). Ces résultats sont présentés de façon différente à la figure 27 dans laquelle nous avons tenté de restituer en divers points de la liaison le profil vertical d'indice.

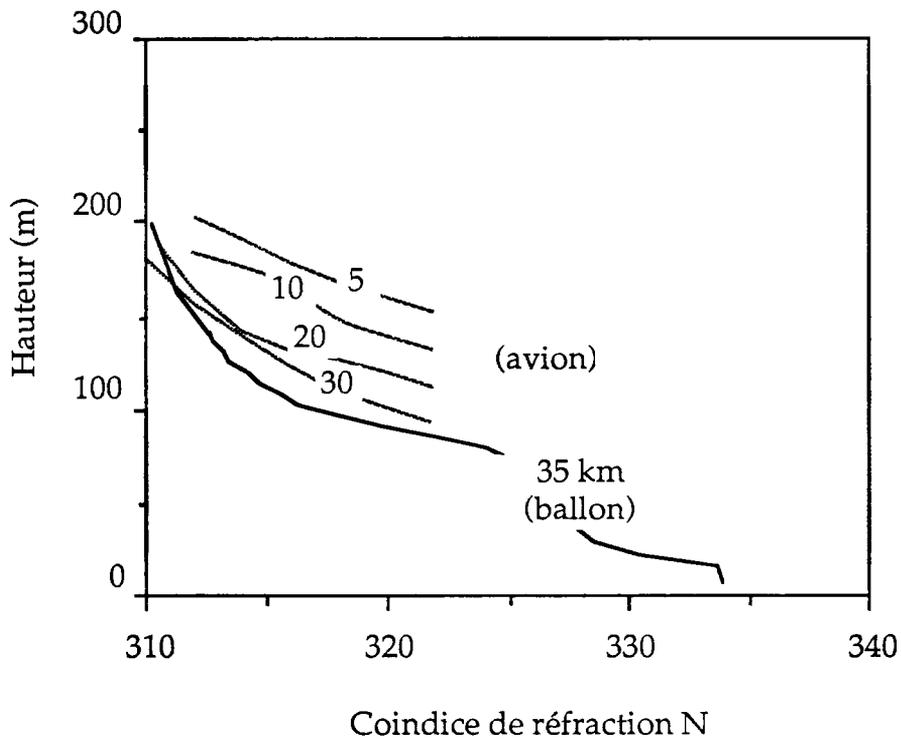


Figure 27 : Le profil vertical de coindice mesuré par le ballon (en noir) est comparé aux portions de profils verticaux restituées à partir des données-avion en divers points de la liaison (à 5, 10, 20 et 30 km de le Caloy). La figure met en évidence une élévation de la couche superréfractante quand on se rapproche de le Caloy.

D'après les portions de courbes construites à partir des données de l'avion (en gris), l'augmentation des valeurs d'indice semble due plus à une élévation de la couche superréfractante supérieure qu'à un décalage de l'ensemble du profil vers des valeurs d'indice plus élevées. De Maillas vers le Caloy, la hauteur de cette couche s'élève progressivement et passe de 75 mètres à environ 175 mètres au dessus du sol.

La figure 26 suggère une certaine corrélation entre l'allure des isocontours et le relief porté au bas de la figure. En effet, la transition entre les deux zones décrites un peu plus haut se produit à la hauteur de Roquefort et

deux zones décrites un peu plus haut se produit à la hauteur de Roquefort et coïncide avec une brusque rupture de pente du relief. De plus, le petit nombre de valeurs de ΔN comprises entre 2 et 5 unités-N dans l'histogramme de la figure 24, c'est-à-dire entre les deux pics qui correspondent aux deux parties observées, suggère bien que la transition de l'une à l'autre est brutale ce que confirme la figure 25. Si un lien de cause à effet existe réellement entre le relief et la structure de l'indice de réfraction, il doit s'expliquer par la circulation de l'air au dessus du sol. Afin de vérifier cette hypothèse, nous allons maintenant nous intéresser au champ du vent sur la liaison.

3.1.1 - Etude de la circulation de l'air au dessus de la liaison

Pendant la nuit, le vent soufflait dans une direction quasiment parallèle à la liaison du Nord-Est vers le Sud-Ouest. Les mesures faites par les capteurs de l'avion montrent que la vitesse horizontale du vent varie sensiblement le long de la liaison. En se déplaçant en direction de Le Caloy, la composante horizontale du vent approximativement constante sur les 20 premiers kilomètres, décroît brusquement au niveau de la vallée de la Douze (à Roquefort). Elle est donc plus faible entre Roquefort et Le Caloy, précisément dans la zone repérée plus haut où $I = 1$. La corrélation entre l'indicatrice et la variation de vitesse du vent est très bonne. Ceci confirme l'hypothèse d'un changement dans la circulation de l'air au niveau de Roquefort. Afin d'aller un peu plus loin dans la discussion, nous allons tenter de retrouver le champ du vent à partir des valeurs mesurées par l'avion.

L'équation de continuité du milieu donne :

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \text{div } \vec{w} = 0 \quad (1)$$

Où ρ est la densité de l'air et w sa vitesse d'écoulement. Supposant que $d\rho/dt = 0$, ce qui correspond à l'hypothèse d'incompressibilité de l'air, on aboutit à une relation qui relie les variations de la composante verticale w_z à celles de la composante horizontale w_h :

$$\frac{\partial w_z}{\partial z} = - \text{div} (w_h) = - \frac{\partial w_x}{\partial x} - \frac{\partial w_y}{\partial y} \quad (2)$$

La formule précédente et la nette décroissance de w_x avec x (Rappelons que l'axe des x est colinéaire à la liaison) sur une partie de la liaison nous

permettent de prévoir que, dans cette zone-là, la composante verticale w_z augmente avec la hauteur. Nous allons tenter de quantifier le phénomène à l'aide des mesures de vent effectuées par l'avion.

L'avion donne d'une part la composante horizontale w_h de la vitesse du vent et sa direction α et d'autre part son propre cap β et sa vitesse v par rapport au sol. Ces informations nous permettent de calculer les composante w_x et w_y de la formule (2) :

$$\begin{aligned} w_x &= w_h \cos (\alpha - \beta) \\ w_y &= w_h \sin (\alpha - \beta) \end{aligned} \quad (3)$$

Le calcul numérique montre que la composante w_y perpendiculaire à la liaison est quasiment nulle partout et ses variations horizontales sont négligeables devant celles de la composante w_x . Par la suite, donc, pour des raisons de commodité de calcul, nous ne tiendrons pas compte du deuxième terme dans le calcul de la divergence (2).

Un calcul rigoureux des dérivées partielles ne peut être fait puisque l'avion ne nous fournit pas une valeur de w_x pour chaque hauteur z . Les valeurs de vent enregistrées l'ont été, tout comme pour l'indice de réfraction, uniquement au cours des 4 passages de l'avion. Nous allons tenter d'obtenir à l'aide de ces données une estimation de la vitesse verticale de l'air au dessus de la liaison.

Pour trouver un modèle de vent vertical qui soit en accord avec les valeurs recueillies, nous divisons la liaison en trois parties :

-Dans la première, ($20 < x < 40$ km) vers Maillas, la vitesse du vent est constante pour une hauteur donnée au dessus du sol.

-Pour la deuxième, (pour $10 < x < 20$ km) qui comprend Roquefort et la vallée de la Douze, la vitesse horizontale du vent décroît brusquement (elle diminue environ de moitié sur ces 10 kilomètres).

-Pour la dernière, au voisinage de Le Caloy (pour $0 < x < 10$ km), la vitesse du vent diminue encore mais très légèrement lorsque l'on se rapproche de Le Caloy.

Il est alors possible de procéder comme nous l'avons fait avec l'indice de réfraction, de façon à associer à certains points de l'espace des valeurs moyennées du vent. Finalement, nous avons pour $x = 5, 10, 15, \dots, 40$ km, plusieurs valeurs de w_x correspondant à des hauteurs de passages différentes. Faisant l'hypothèse qu'au niveau du sol, la vitesse du vent tant horizontale

au résultat suivant, illustré par la figure 28 : pour l'ensemble de la liaison, la relation entre w_x et z peut être modélisée par une fonction de la forme :

$$w_x(z) = a(x) z^{b(x)} \quad \text{avec } b(x) < 1 \quad (4)$$

Le profil vertical de vent enregistré par le ballon à peu près au même instant (représenté en gris figure 28) montre une assez bonne cohérence avec les points mesurés par l'avion à une distance de 20 kilomètres de l'émetteur.

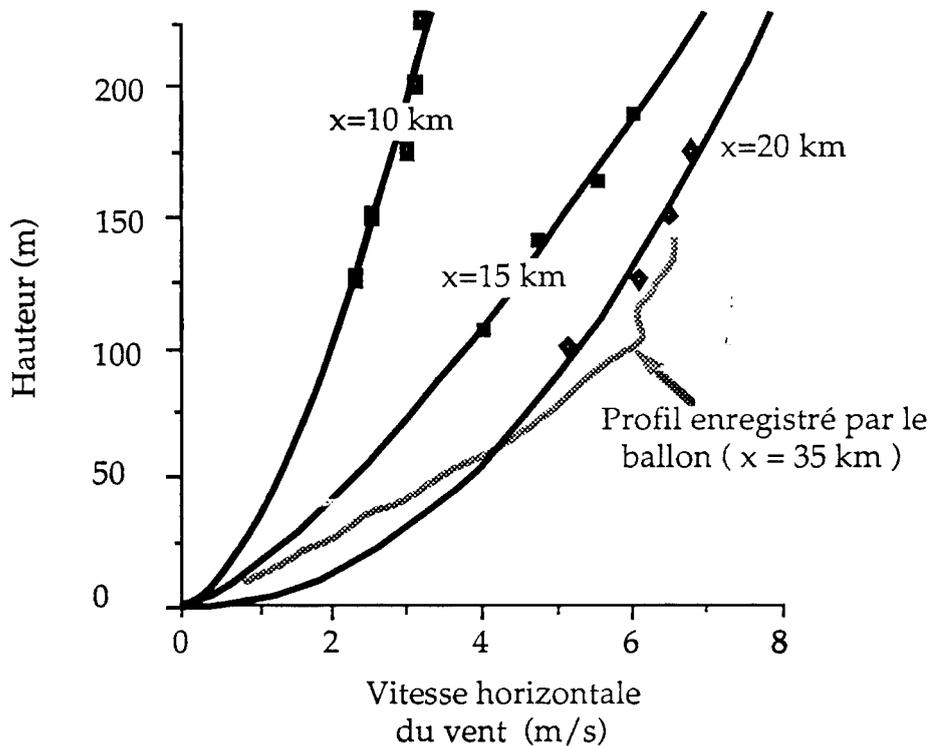


Figure 28 : Profils verticaux de vitesse horizontale du vent en divers points de la liaison (points expérimentaux et courbes ajustées) obtenus à partir des données de l'avion. Le profil enregistré par le ballon captif est représenté en gris.

Pour la première zone de la liaison précisée plus haut (entre Roquefort et Maillas), l'avion n'avait pas mesuré de variations sensibles de la vitesse du vent et, en conséquence, les coefficients a et b de la formule (4) sont indépendants de x et il est possible d'en déduire que dans cette zone, l'écoulement de l'air se fait en suivant le sol. Pour les deux autres zones, les

deux coefficients dépendent comme prévu de la distance à l'émetteur x .

L'interpolation ainsi effectuée entre les points de mesures nous permet d'estimer la valeur de la vitesse horizontale du vent en tout point. Ensuite, la formule (2) appliquée à ces valeurs de $w_x(x,z)$ donne $\partial w_z(x,z)/\partial z$. La vitesse verticale est nulle au niveau du sol et ceci nous fournit la condition supplémentaire qui permet de trouver $w_z(x,z)$. Grâce à ces calculs, il est possible de se faire une idée de la circulation du vent au voisinage de la liaison. Le résultat est présenté figure 29. On note que, partant de Maillas, l'air s'écoule en suivant la pente douce du sol jusqu'au niveau de Roquefort où, la vitesse verticale du vent changeant de signe, les filets d'air s'éloignent du sol.

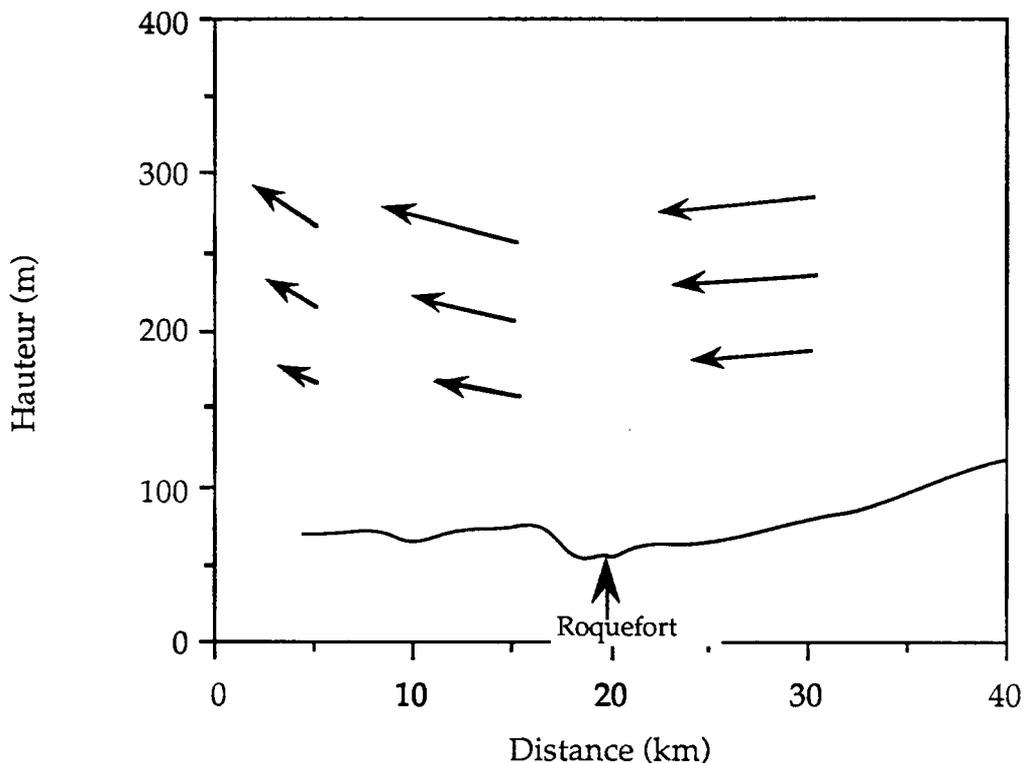


Figure 29 : Circulation du vent au dessus de la liaison (nuit du 13 au 14 Juin).

L'écoulement le long de la pente entre Maillas et Roquefort est tout à fait explicable par le refroidissement nocturne de l'air. Quant au changement aux environs de Roquefort, il se produit aux environs de la rupture de pente provoquée par la Douze : à cet endroit, le sol s'élève d'environ 40 mètres en l'espace de 2 kilomètres. Cette élévation de l'air au Sud-Est de ce point pourrait être due à la présence de la chaîne des Pyrénées (située à 100 kilomètres au

Sud) ou à un phénomène plus local de brise thermique qui fait circuler l'air.

3.1.2 - Interprétation des gradients horizontaux observés à l'échelle de la liaison

Le changement noté dans la circulation de l'air a lieu au niveau de Roquefort et correspond, si l'on considère l'indice de réfraction, à la transition remarquée précédemment entre la zone où $I = 0$ et celle où $I = 1$. Nous avons fait ressortir le fait que là où l'air circule en suivant le relief, l'indice de réfraction se comporte de la même façon ($I = 0$) et que là où le vent a une composante verticale dirigée vers le haut, $I = 1$. Il semble clair que dans cette deuxième zone, le vent, dans sa montée, transporte vers le haut de l'air plus humide et plus froid provenant des couches plus basses. En effet, les profils verticaux de température et d'humidité des figures 17 et 18 montrent que, cette nuit-là, l'air est plus humide et plus froid au niveau du sol (ce qui est cohérent avec l'existence d'une couche d'inversion). Ceci permet d'expliquer les valeurs d'indice plus élevées qui ont été observées dans cette zone.

Les différentes hypothèses et simplifications qui ont été faites dans ce paragraphe pour retrouver le champ de vent sont a posteriori justifiées par la bonne corrélation obtenue entre la composante verticale du vent et l'indicatrice I qui ont été estimées à partir de mesures indépendantes et par la cohérence de l'interprétation donnée.

En résumé, à l'échelle de la liaison hertzienne, la structure de l'indice de réfraction peut être schématisée de la façon suivante : entre Maillas et Roquefort, le flux d'air suit le sol et l'indice de réfraction est en accord avec le profil vertical mesuré par le ballon captif ; entre Roquefort et le Caloy, nous avons mesuré des valeurs d'indice plus élevées qui ont été interprétées par la circulation du vent. Il est clair d'après ces résultats que les variations de pression n'ont pas d'effet discernable sur la structure de l'indice, du moins dans la gamme d'altitude considérée. Les gradients horizontaux qui en résultent sont d'environ une dizaine d'unités-N sur 5 kilomètres.

3.2 - Structure à petite échelle ($\approx 1\text{km}$)

Superposées à la structure décrite dans le paragraphe 1.3.1, dans la zone

où $I = 1$, des fluctuations particulièrement régulières des divers paramètres météorologiques ont été enregistrées par l'avion. Ce phénomène, très net en ce qui concerne la température, affecte également, comme on peut le voir sur la figure 30, la vitesse horizontale du vent et l'humidité. Les traits verticaux de la figure mettent en évidence une certaine périodicité de ces oscillations. On peut déjà noter qu'à un minimum de la température correspond un maximum de la pression de vapeur d'eau. Le phénomène est moins évident sur la mesure de la composante horizontale du vent qui de façon générale fluctue beaucoup.

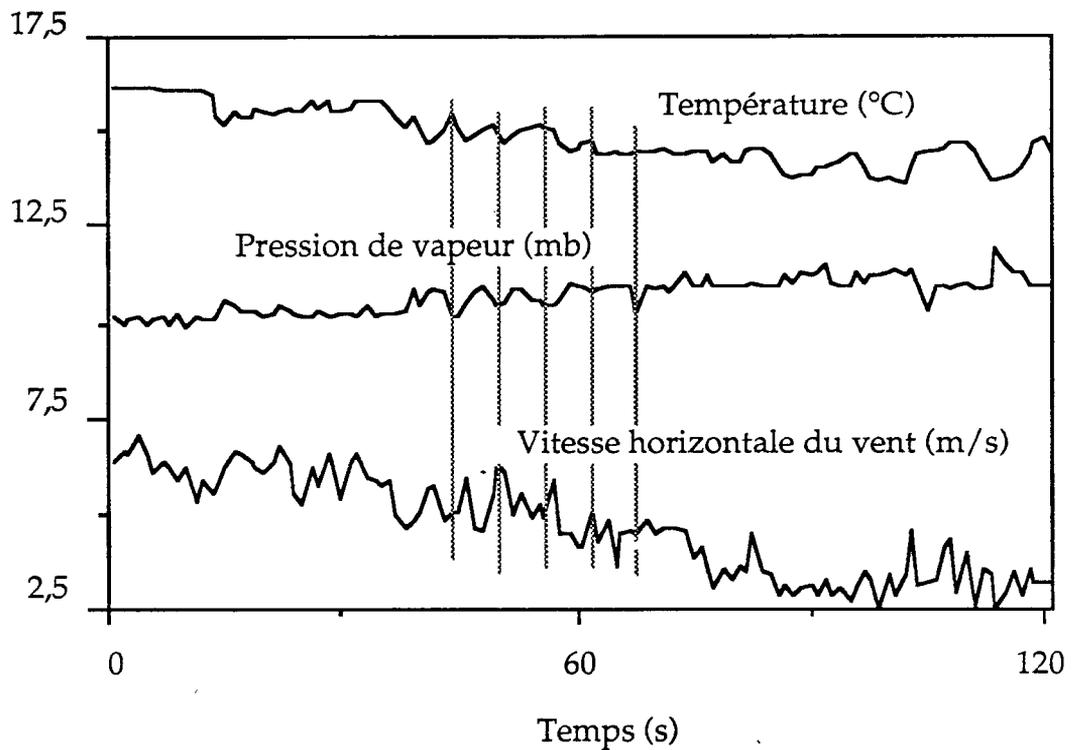


Figure 30 : Fluctuations des différents paramètres météorologiques enregistrées entre 03:55 et 03:57 le 14 Juin, aux environs de Le Caloy.

Nous retrouvons, figure 31, l'effet de ces oscillations sur l'indice N qui est le principal objet de notre étude. Les traits verticaux correspondent exactement à ceux de la figure 30 et montrent que la périodicité sur l'indice est la même que celle sur les paramètres T et e . A un maximum de la température et un minimum simultané de la pression de vapeur d'eau correspond un minimum marqué de l'indice de réfraction, comme il résulte de la formule (1) du chapitre III.

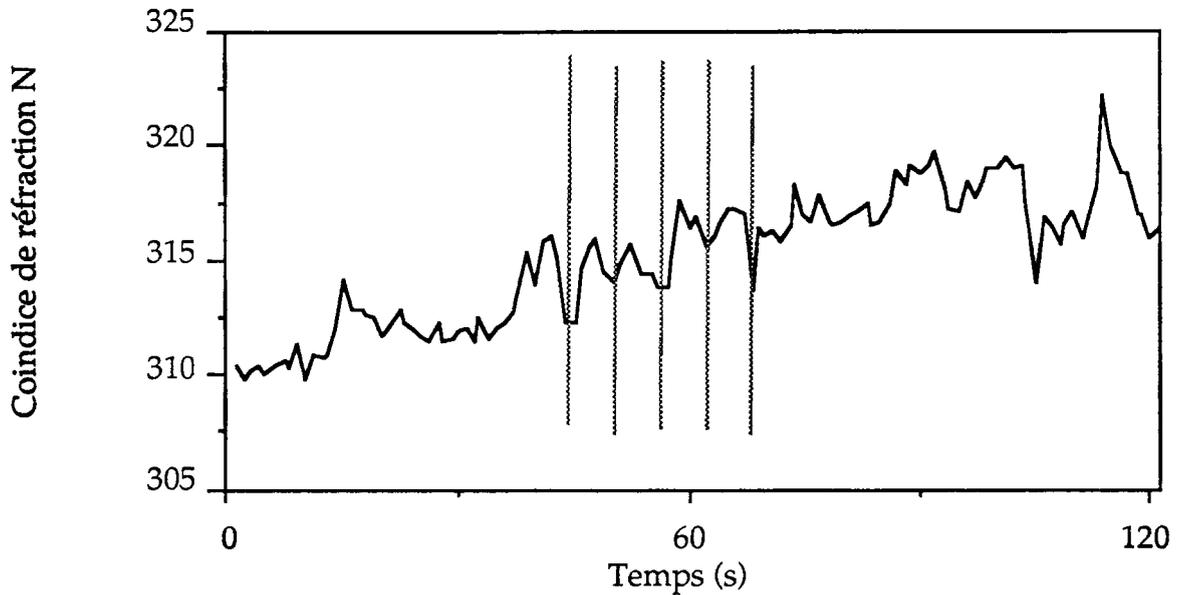


Figure 31 : Fluctuations sur les valeurs du coindice de réfraction de l'air

Les figures 30 et 31 donnent à penser que si les valeurs de température et d'humidité ont une certaine périodicité, alors il en est de même pour l'indice de réfraction. L'indice de l'air dépend en réalité d'un troisième paramètre : la pression atmosphérique. Cependant, le capteur de pression installé sur l'avion avait une sensibilité d'environ 1 mb et les éventuelles fluctuations de pression étaient difficilement observables. Par conséquent le fait qu'aucune fluctuation marquée sur la pression atmosphérique n'ait été enregistrée ne permet pas de conclure que de telles oscillations n'existent pas.

La formule (1) du chapitre I qui donne l'expression de N en fonction de T , P et e permet de montrer, au premier ordre, l'impact de petites perturbations sinusoïdales de ces trois grandeurs sur l'indice. En effet, si on note a_0 la valeur moyenne du paramètre a et a_1 l'amplitude de la perturbation, faible devant a_0 , on peut écrire pour les trois grandeurs qui nous intéressent :

$$\begin{aligned}
 T &= T_0 + T_1 e^{-i\sigma t} \\
 P &= P_0 + P_1 e^{-i(\sigma t + \psi)} \\
 e &= e_0 + e_1 e^{-i(\sigma t + \varphi)}
 \end{aligned} \tag{5}$$

où ψ et φ sont les déphasages des perturbations de pression et de pression de vapeur par rapport à celles de température.

Utilisant les notations précisées en (5), on obtient la perturbation au premier ordre sur l'indice N:

$$N = N_o - e^{-i\sigma t} \left\{ 77,6 \frac{P_o}{T_o} \left(\frac{T_1}{T_o} - \frac{P_1}{P_o} e^{-i\psi} \right) - 3,73 \cdot 10^{+5} \frac{e_o}{T_o^2} \left(2 \frac{T_1}{T_o} - \frac{e_1}{e_o} e^{-i\varphi} \right) \right\} \quad (6)$$

On peut calculer l'ordre de grandeur des coefficients de e_1/e_o , T_1/T_o et P_1/P_o (pour une situation typique); on trouve respectivement 340, 40 et 250 en unités-N. Les variations relatives observées des différents paramètres sont de l'ordre de grandeur des valeurs données au (7).

$$\frac{\Delta e}{e} (\approx 10\%) \gg \frac{\Delta T}{T} (\approx 0,5\%) \gg \frac{\Delta P}{P} (\approx 0,1\%) \quad (7)$$

Ces valeurs conduisent respectivement à des variations d'indice de l'ordre de grandeur de 4, 1,7 et 0,25 unités-N.

Quant au déphasage, son expression compliquée (donnée par la formule 6) ne permet pas de déduire quoi que ce soit a priori. Dans le cas particulier correspondant à ces figures, P_1/P_o est négligeable devant T_1/T_o et $\varphi = -\pi$; le calcul permet de retrouver le déphasage observé de π entre l'indice et la température.

Dans la mesure où ces fluctuations affectent l'indice de réfraction qui est l'objet de cette étude, les considérations précédentes nous amènent à en faire une analyse spectrale de façon à les caractériser plus précisément.

3.2.1 - Analyse spectrale

Cherchant à mettre en évidence des pics qui pourraient correspondre à des modes spectraux, nous avons procédé à des analyses séparées des différentes variables : température, pression de vapeur, pression et vitesse horizontale du vent.

Nous avons tout d'abord calculé la fonction d'autocorrélation du signal traité (de façon à avoir un résultat statistiquement fiable) et nous avons fait subir au résultat obtenu une transformation de Fourier discrète. Une fenêtre en \cos^3 a été utilisée pour le calcul, l'emploi de fenêtres plus compliquées n'améliorant pas les résultats obtenus. La figure 32 montre les résultats obtenus

à partir des données enregistrées entre 03:55 et 03:57 le 14 Juin.

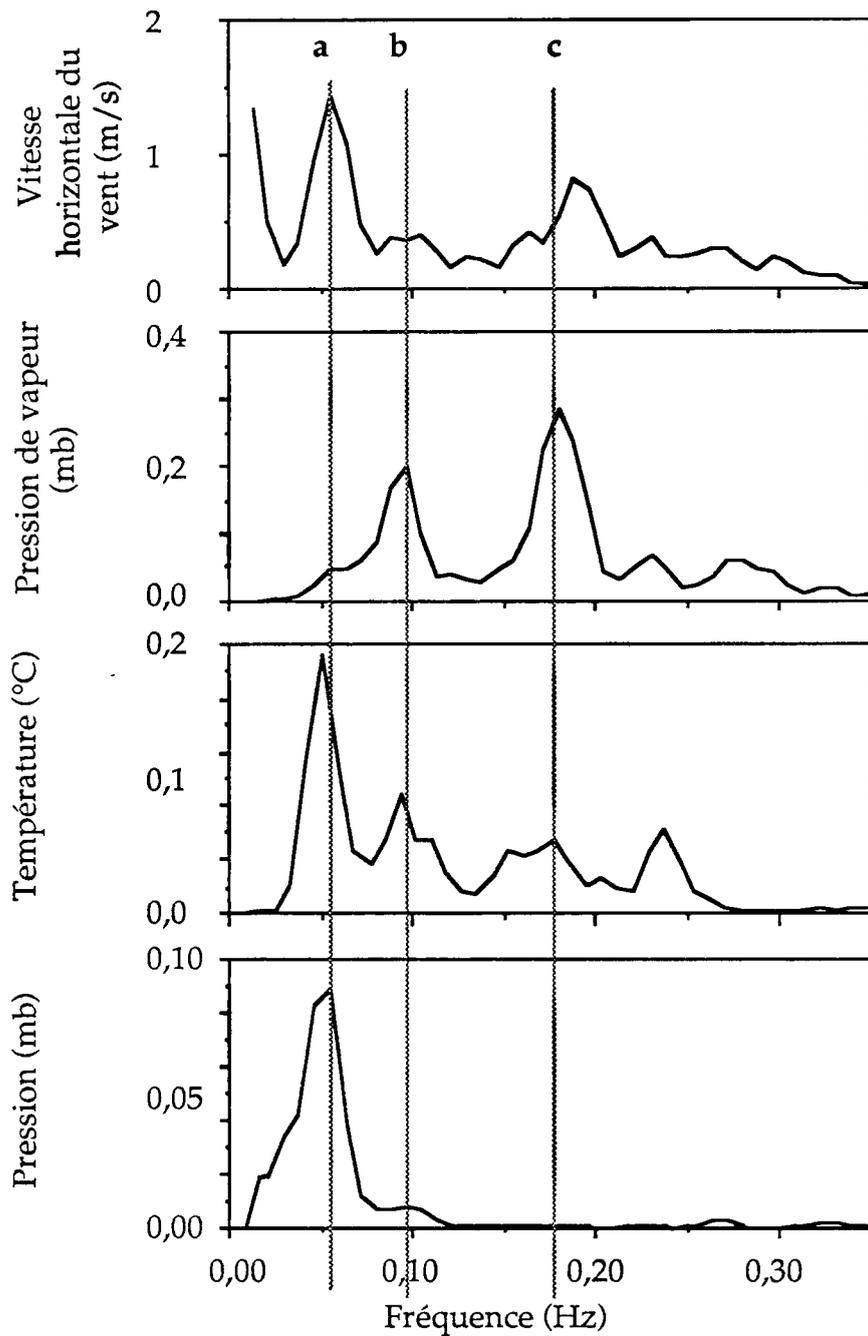


Figure 32 : Résultats de l'analyse spectrale effectuée sur les fluctuations de la figure 30 (entre 03:55 et 03:57 le 14 Juin).

Le même traitement a été appliqué aux diverses périodes d'enregistrement. Les fréquences des différents pics trouvés sur la température (θ), la pression de vapeur (e) et la vitesse horizontale du vent (w_h), ainsi que leurs amplitudes sont rassemblées dans le tableau IV.

Heure	α (°)	v (m/s)	w (m/s)	β (°)	z (m)	Pics observés Fréquence (Hz) Amplitude			
03:53	220,6	74,4	6,7	-6,0	184	pas de pics			
03:55	216,8	73,4	4,6	18,8	235	N°1	N°2	N°3	
						0,058	0,100	0,175	
						0,19	0,08	0,05	θ (°C)
						0,06	0,19	0,28	e (mb)
						1,90	0,33	0,50	wh (m/s)
03:57	178,9	66,5	3,5	14,3	230	N°4	N°5		
						0,067	0,125		
						0,38	0,41		
						0,28	0,26		
						0,39	0,66		
03:59	57,6	69,4	2,6	29,6	164	N°6	N°7		
						0,083	0,125		
						0,15	0,28		
						0,22	0,13		
						0,81	0,52		
04:02	39,15	66,9	4,6	15,0	130	N°8	N°9		
						0,125	0,158		
						0,19	0,20		
						0,08	0,09		
						0,46	0,47		
04:15	218,4	72,4	6,0	7,3	167	N°10	N°11		
						0,125	0,183		
						0,49	0,62		
						0,15	0,31		
						0,70	0,37		

Tableau IV : Caractéristiques des pics trouvés pour différentes périodes d'enregistrement. w représente la vitesse du vent et β sa direction, v la vitesse par rapport au sol de l'avion et α son cap. Toutes ces grandeurs sont moyennées sur les deux minutes d'observation. Les pics ont été numérotés de 1 à 11.

Comme prévu, l'analyse des variations de pression atmosphérique n'a rien donné de significatif dans la plupart des cas ; la figure 32 n'est pas, de ce point de vue, représentative de ce que nous avons observé de façon générale.

Avant tout calcul complémentaire, il est important de noter que l'analyse spectrale n'a donné de pics significatifs que lorsque l'avion se trouvait dans la zone où $I = 1$ (dans la portion de la liaison près de Le Caloy). Dans cette partie de la liaison géographiquement délimitée, chaque passage de l'avion a permis, quelle qu'en soit la hauteur, de mettre en évidence des modes spectraux. Il paraît légitime d'en déduire la présence d'ondes, pendant toute la durée de l'observation, dans une couche comprise entre au moins 150 et 235 mètres de hauteur.

Les analyses décrites plus haut nous ont permis de montrer l'existence de modes spectraux. Nous allons chercher à savoir s'ils sont caractéristiques d'ondes qui se propagent dans le milieu.

3.2.2 - Restitution de la longueur d'onde et de la vitesse de propagation des ondes

Supposons donc que nous soyons en présence d'ondes se propageant dans l'air, la fréquence (σ') vue par un observateur mobile (l'avion) diffère donc de la fréquence réelle de l'onde du fait de l'effet Doppler. Si l'on considère qu'entre deux observations de l'onde la vitesse (v) et le cap (β) de l'avion ont changé, il est alors théoriquement possible, à partir du décalage entre les deux fréquences vues depuis l'avion, de calculer la fréquence (σ) et la longueur de l'onde (λ). Un tel calcul suppose bien entendu que la longueur de l'onde ne change pas et que sa vitesse de propagation reste constante en grandeur et en direction pendant le temps des observations. Ceci posé, nous sommes amenée à faire une hypothèse quant à la direction de propagation de l'onde. L'étude faite par Eymard et Weill (1979) sur les ondes de petite échelle dans la couche limite planétaire a montré que, dans la majorité des cas, l'onde se propageait approximativement dans le sens du vent avec une vitesse de l'ordre de grandeur de celle du vent. Nous appuyant sur ces résultats expérimentaux, nous avons supposé que, dans notre cas, les ondes observées se propageaient également parallèlement au vent. Il faudra nous assurer par la suite que les résultats obtenus sont bien compatibles avec une telle hypothèse.

Nous avons donc considéré une onde se propageant horizontalement dans le sens du vent.

$$A = A_0 \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} (s - ct) \right) \quad (8)$$

Où s est l'abscisse dans la direction du vent. Il est important de noter que le vent soufflait cette nuit-là dans une direction très proche de celle définie par la liaison (axe des x) et que par conséquent, l'avion se déplaçait quasiment parallèlement au vent.

λ est la longueur d'onde horizontale et c la vitesse de propagation de l'onde.

Si l'on note v la composante de la vitesse de l'avion dans la direction du vent, la fréquence vue par l'avion s'exprime de la façon suivante :

$$\sigma' = \frac{1}{\lambda} (c - v) \quad (9)$$

Par conséquent, si nous avons accès à deux mesures de σ' pour deux valeurs différentes de v , nous pouvons retrouver les valeurs de λ et c .

$$\lambda = \frac{v_1 - v_2}{\sigma_2' - \sigma_1'} \quad (10)$$

$$c = \frac{\sigma_2' v_1 - \sigma_1' v_2}{\sigma_2' - \sigma_1'} \quad (11)$$

En différentiant les expressions (10) et (11), il est également possible d'estimer la précision obtenue sur λ et c :

$$\Delta\lambda = \frac{2\Delta v}{|\sigma_1' - \sigma_2'|} + \frac{2\Delta\sigma |v_1 - v_2|}{(\sigma_1' - \sigma_2')^2} \quad (12)$$

$$\Delta c = \Delta\sigma \frac{|v_2 - v_1|}{|\sigma_1' - \sigma_2'|} + \Delta v \quad (13)$$

Les expressions des incertitudes montrent que lorsque σ_1' est proche de σ_2' (c'est-à-dire lorsque les deux passages de l'avion ont lieu dans le même sens), les valeurs calculées de λ et de c sont entachées d'une incertitude très grande et n'ont pas beaucoup de sens. Par contre lorsque les deux fréquences σ_1' et σ_2' ont été mesurées lors de deux passages en sens opposés, σ_1' et σ_2' sont de signes contraires et c'est dans ce cas uniquement que nous pourrions calculer raisonnablement les valeurs de λ et c .

L'essentiel de notre problème consiste à savoir si les deux fréquences σ_1' et σ_2' correspondent bien à deux observations différentes du même mode. Comme il n'est pas possible de répondre à cette question a priori, nous avons associé deux à deux les pics observés à des instants différents et, supposant que ceux-ci correspondent à un même mode, nous avons calculé systématiquement la longueur de l'onde correspondante.

Sans faire d'hypothèse sur le type d'onde rencontrée, nous sommes amenée à éliminer un grand nombre de possibilités qui ne donnent pas de résultats cohérents. Cette discrimination faite, il ressort trois modes : le premier (a), correspondant à une longueur d'onde d'environ 500 mètres, apparaît sur les pics 2, 5, 7, 8, 10. Le deuxième (b), de longueur d'onde 400 mètres, est mis en évidence par les pics 3, 9 et 11. Enfin, le mode (c) de longueur d'onde de l'ordre de 900 mètres est obtenu à partir des pics 1, 4, 6.

Les longueurs d'onde restituées sont représentées figure 33 avec leurs barres d'erreur. Nous avons représenté sur cette figure uniquement les couples de pics permettant de retrouver l'un des mode (a), (b) ou (c). Nous retrouvons comme prévu que l'incertitude est extrêmement grande lorsque les deux pics associés ont été observés lors de passages dans le même sens : (1,4), (3,11) et (2,10).

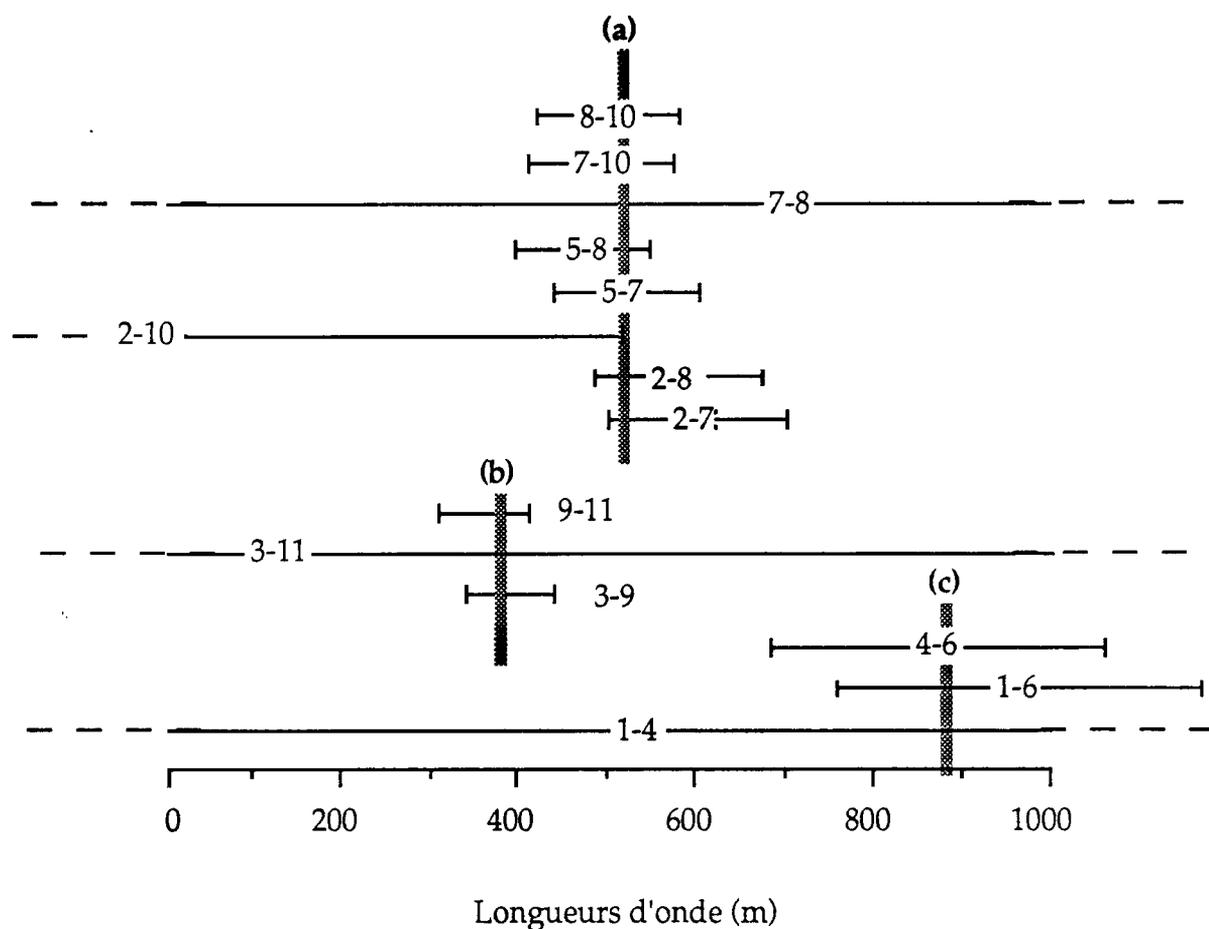


Figure 33 : Longueurs d'onde restituées. Chaque longueur d'onde est calculée à partir de deux pics. le trait horizontal représente la barre d'erreur. Les trois ondes (a), (b) et (c) matérialisées par les traits verticaux épais ont été retrouvées à partir des ensembles de pics suivants (2, 7, 8, 10), (3, 9, 11) et (1, 4, 6).

Il est possible d'obtenir une estimation grossière de la vitesse de propagation et de la fréquence des modes (a), (b) et (c) :

onde	Longueur d'onde (m) λ	Vitesse de propagation (m/s) c	Période (s) T
(a)	520 ± 50	8 ± 3	65 ± 25
(b)	380 ± 50	4 ± 3	95 ± 70
(c)	900 ± 150	6 ± 3	150 ± 100

Tableau VI : Caractéristiques principales des trois ondes observées.

L'incertitude relative sur la vitesse de propagation calculée est de l'ordre de grandeur de l'unité. Elle nous permet cependant de conclure que les ondes observées se propagent dans le sens du vent à une vitesse légèrement supérieure à celle du vent.

Les résultats sur les longueurs d'onde, les périodes et les vitesses de propagation des modes calculés sont en accord avec les observations citées précédemment et peuvent justifier a posteriori l'hypothèse qui a été faite sur la direction de propagation des ondes.

Bien que l'expérience PACEM 3 ne visât pas à l'étude d'ondes se propageant dans l'atmosphère, nous avons pu en montrer l'existence. Dans la partie qui suit, nous allons tenter de confronter ces résultats expérimentaux, si imprécis soient-ils, avec quelques résultats théoriques.

3.2.2 - Comparaison avec quelques résultats théoriques - interprétation

L'étude précédente a montré des ondes de longueurs comprises entre 400 et 1000 mètres et de périodes légèrement supérieures à la minute qui se propagent avec une vitesse proche de celle du vent.

Classiquement, on répartit les mouvements atmosphériques en plusieurs catégories en fonction de l'ordre de grandeur des dimensions horizontales mises en jeu (pour des ondes, il s'agit de la longueur d'onde). On distingue :

- la petite échelle : inférieure à un kilomètre
- la moyenne échelle : de 1 à 10 kilomètres
- deux grandes échelles : la première, synoptique, de 20 à 100 kilomètres et la seconde, planétaire, de 500 à 10 000 kilomètres.

De toute évidence, les ondes que nous avons détectées appartiennent à la catégorie des phénomènes de petite échelle.

Nous pouvons essayer de les caractériser davantage en mettant en évidence les forces qui, pour de tels mouvements, deviennent prépondérantes.

Pour ce faire, nous considérons que l'onde introduit des petites perturbations des différents paramètres physiques. Nous nous intéressons à l'équation du mouvement perturbé, dans laquelle seuls les termes d'ordre un ont été conservés.

L'équation ainsi obtenue s'écrit (Gossard et Hooke , 1975):

$$\rho_0 \left(\frac{\partial \vec{W}_1}{\partial t} + (\vec{W}_0 \cdot \vec{\nabla}) \vec{W}_1 \right) + \rho_1 \vec{g} + \vec{\nabla} P_1 - 2 \rho_0 \vec{\Omega} \wedge \vec{W}_1 - \mu \nabla^2 \vec{W}_1 = \vec{0} \quad (14)$$

(1) (2) (3) (4) (5)

Ω est la fréquence angulaire de rotation de la terre et μ le coefficient de viscosité de l'air. Les valeurs indicées 1 correspondent aux perturbations, elles sont faibles devant les grandeurs d'ordre zéro qui décrivent la situation non perturbée. Dans ce paragraphe, nous notons W_0 la vitesse du vent et w_x sa composante horizontale prise selon l'axe des x .

Si l'on considère des perturbations proportionnelles à $\exp i(-\sigma t + kx + nz)$, on peut alors évaluer les importances relatives des différents termes de l'équation (14). Pour l'estimation du terme inertiel (1), il est commode de faire apparaître la pulsation intrinsèque $\omega = k(c - w_x)$, où c est la vitesse de propagation de l'onde et w_x celle du vent horizontal. L'équation vectorielle (14) résume alors les trois équations scalaires :

$$\rho_0 \omega u_1 - k P_1 - i 2 \rho_0 \Omega v_1 - \mu(k^2 + n^2) u_1 = 0 \quad (15)$$

$$\rho_0 \omega v_1 - i 2 \rho_0 \Omega u_1 - \mu(k^2 + n^2) v_1 = 0 \quad (16)$$

$$\rho_0 \omega w_1 - n P_1 + \rho_1 g - \mu(k^2 + n^2) w_1 = 0 \quad (17)$$

Les ondes que nous avons observées ont des nombres d'onde horizontaux de l'ordre de 10^{-2} m^{-1} , leurs pulsations intrinsèques ω de l'ordre de 10^{-2} rd/s ont été déterminées avec des incertitudes de l'ordre de 100%.

Dans la partie de l'atmosphère qui nous intéresse, le rapport μ/ρ_0 est d'environ $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Dans ces conditions, le rapport du terme de viscosité (5) sur le terme inertiel (1) : $\mu k^2/\rho_0 \omega$ est de l'ordre de grandeur de $10^{-9}/\omega$; dès que ω est supérieur à 10^{-7} rd/s , la viscosité du milieu ne joue pratiquement plus aucun rôle. L'incertitude sur ω des ondes observées est très grande mais il semble réaliste de supposer que nous nous trouvons dans le cas où la viscosité est effectivement négligeable.

La vitesse angulaire de rotation de la terre est d'approximativement

$7 \cdot 10^{-5}$ rd/s. Le rapport $2\Omega/\omega$ qui représente l'importance de la force de Coriolis (4) par rapport au terme inertiel est d'environ 10^{-2} pour un ω de 10^{-2} rd/s. Pour de telles ondes, la rotation de la terre n'intervient que très faiblement et peut donc être négligée, tout du moins en première approximation.

Quant au terme de gravité, il n'intervient que dans l'équation projetée selon la verticale (17). Pour un ω suffisamment élevé, celui-ci peut devenir négligeable devant le terme inertiel (1). C'est le cas des ondes acoustiques. Pour les ondes dites "de gravité" les fréquences sont telles que la force de gravité est prépondérante. En conclusion, l'ordre de grandeur des fréquences trouvées permet de négliger la rotation de la terre et la viscosité du milieu. Par contre, il est difficile d'estimer a priori l'effet de la gravité.

Nous pouvons tenir compte des remarques précédentes pour simplifier les trois équations (15), (16) et (17). Cependant, elles restent insuffisantes pour déterminer les 5 inconnues ($u_1, v_1, w_1, P_1, \rho_1$). L'équation de conservation de la masse et l'hypothèse selon laquelle les mouvements se font de façon adiabatique fournissent les deux relations qui manquent. Nous aboutissons alors à un système de 5 équations à 5 inconnues sans second membre, les solutions non nulles sont obtenues lorsque le déterminant est égal à zéro. Ceci fournit la relation de dispersion de l'onde qui relie les nombres d'onde à la pulsation intrinsèque.

$$n^2 = \frac{(N^2 - \omega^2) k^2}{\omega^2} + \frac{\omega^2}{c_s^2} - \frac{(N^2 + c_s^2 \Gamma^2)}{c_s^2} \quad (18)$$

L'onde est caractérisée par son nombre d'onde vertical n , son nombre d'onde horizontal k et sa pulsation intrinsèque ω ; le milieu de propagation par la fréquence de Brünt-Väisälä N , la vitesse du son c_s et le coefficient d'Eckart Γ .

$$N = \sqrt{\frac{g}{T_p} \frac{dT_p}{dz}} \quad (19)$$

T_p est la température potentielle exprimée en Kelvin. Elle correspond à la température d'un petit volume d'air, initialement à la température T et pression P , porté adiabatiquement à un niveau où la pression est 1000 mb. La formule (20) en donne l'expression.

$$T_p = T (1000/P)^{R/C_p} \quad (20)$$

$$c_s = \sqrt{\gamma R T} \quad (21)$$

$$\Gamma = \frac{1}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} + \frac{g}{c_s^2} \quad (22)$$

Typiquement, dans les basses couches, N est de l'ordre de $10^{-2} \text{ rd s}^{-1}$, c_s de 340 m s^{-1} et Γ de $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$.

Afin de comprendre les conséquences de la forme de l'équation de dispersion, nous allons raisonner sur un cas simplifié mais réaliste. Considérons une onde de longueur d'onde 500 mètres se propageant selon l'axe des x , c'est-à-dire k de l'ordre de $0,01 \text{ m}^{-1}$ et n nul. Avec les valeurs typiques des coefficients, l'équation (18) admet deux solutions :

Pour la première, ω est de l'ordre de 3 rd s^{-1} . L'onde est acoustique.

Pour la seconde, ω est légèrement inférieure à $0,01 \text{ rd s}^{-1}$. Il s'agit d'une onde de gravité.

La pulsation intrinsèque obtenue dans le cas de l'onde de gravité est du même ordre de grandeur que celle trouvée dans notre expérience ; tout semble indiquer que les ondes que nous avons observées la nuit du 13 au 14 Juin étaient des ondes de gravité.

De telles ondes sont fréquemment observées de nuit. Les phénomènes physiques qui peuvent leur donner naissance sont très variés : passage d'un système frontal, cisaillement de vent, phénomène de convection. Dans notre cas précis, nous avons constaté (§ 3.1.1) que le flux d'air avait une composante verticale non nulle précisément dans la zone où les ondes ont été observées. Il est possible que cette arrivée d'air par le bas excite les couches situées au dessus et engendre ainsi les ondes observées.

4 - Conclusion

La couche d'inversion nocturne de température associée à un fort gradient négatif de l'humidité a conduit à la formation d'un conduit de guidage entre le sol et une centaine de mètres. Les mesures effectuées par l'avion ont montré l'existence de gradients horizontaux sur deux échelles spatiales différentes : à l'échelle de la liaison, la circulation particulière de l'air au dessus du sol provoquait des variations horizontales de température et

d'humidité qui se répercutaient sur l'indice de réfraction (10 à 15 unités-N sur 5 kilomètres); à une échelle plus petite, de l'ordre du kilomètre, la présence d'ondes de gravité dans le milieu était à l'origine de petites fluctuations d'indice de réfraction (environ 5 unités-N sur des distances de l'ordre du kilomètre).

En outre, nous avons noté le caractère quasi-stationnaire des caractéristiques du signal radioélectrique transmis, d'une part, et de la situation météorologique à l'échelle de la liaison, d'autre part.

Nous utiliserons l'ensemble de ces informations pour interpréter au mieux (chapitre VIII) la propagation anormale constatée cette nuit-là.

VI - Nuit du 23 au 24 Juin

1 - Données radioélectriques

Dès 23:49, le M.L.A. a détecté des affaiblissements sélectifs en fréquence qui correspondent à l'existence de trajets multiples. L'activité radioélectrique de cette nuit-là s'est traduit par une succession d'affaiblissements intenses (- 40 dB) et très rapides (quelques secondes) entrecoupés de périodes de surchamp (> 5 dB). Sur la figure 34, les périodes au cours desquelles nous avons détecté des affaiblissements, dans la bande de 1 GHz analysée, sont représentées en grisé.

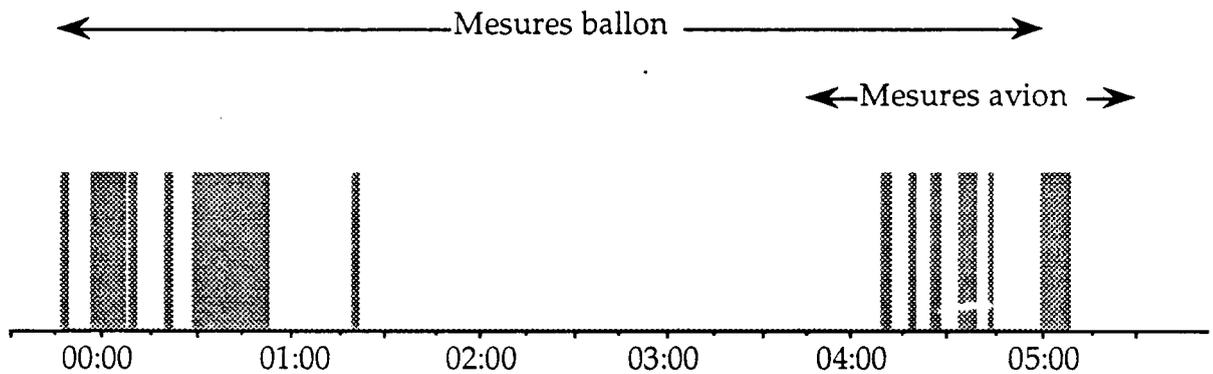


Figure 34 : Description de la nuit du 23 au 24 Juin. Les périodes d'affaiblissements sélectifs sont représentées en grisé.

Cette rapide description du type d'événements observés montre un comportement du canal de propagation très différent de celui de la première nuit. Rappelons qu'au cours de la nuit du 13 au 14 Juin, les événements étaient très longs (plusieurs dizaines de minutes).

La figure 35 représente l'évolution temporelle du niveau de signal reçu dans la bande de 1 GHz pendant une période de 1 mn représentative de l'activité enregistrée durant les observations de l'avion. On note, effectivement, la présence de deux affaiblissements d'environ 40 dB pendant un temps très court de l'ordre de la seconde. A ces deux phénomènes particulièrement intenses, s'ajoutent plusieurs périodes de quelques secondes présentant un affaiblissement sélectif mais moins important. Entre les événements, on observe des surchamps affectant toute la bande de 1GHz.

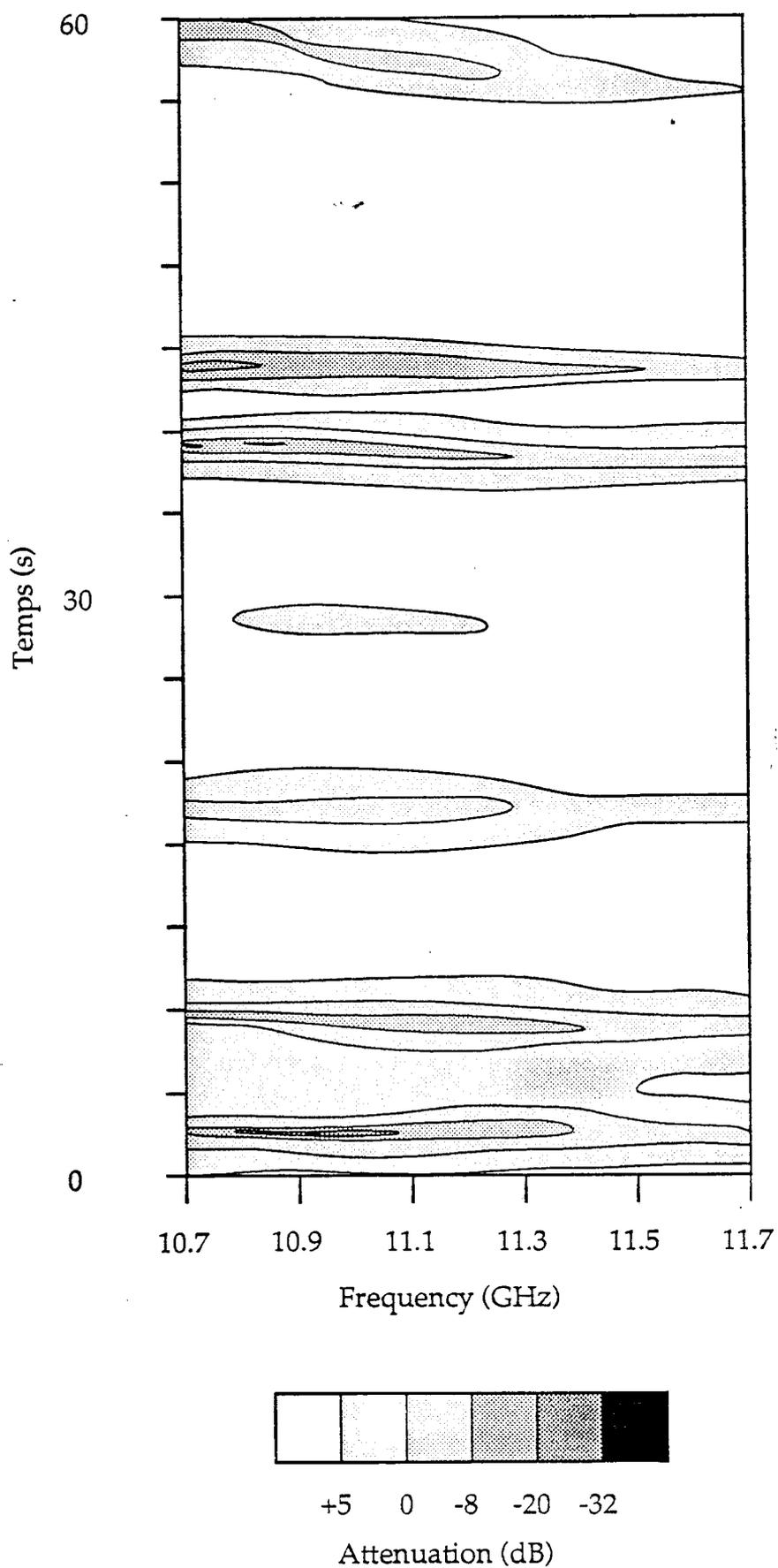


Figure 35 : Evolution temporelle de l'amplitude du signal dans la bande de 1 GHz sur une période d'une minute (24 Juin).

2 - Profil vertical de l'indice de réfraction

Le ballon captif a effectué 6 montées-descentes entre 23:40 et 04:56. Les profils de température successifs montrent une élévation très progressive de la hauteur d'inversion qui passe de 50 à 100 mètres. En ce qui concerne l'humidité, très importante au niveau du sol, elle décroît très fortement avec la hauteur dans la première centaine de mètres ; plus haut son gradient est beaucoup plus faible, avec cependant une forte variabilité dans le temps. Au cours de la nuit, la situation évolue donc très peu entre le sol et 150 mètres. Cependant, à partir de 04:10, les mesures d'humidité mettent en évidence au dessus de 200 mètres un accroissement local de l'humidité relative (figure 36).

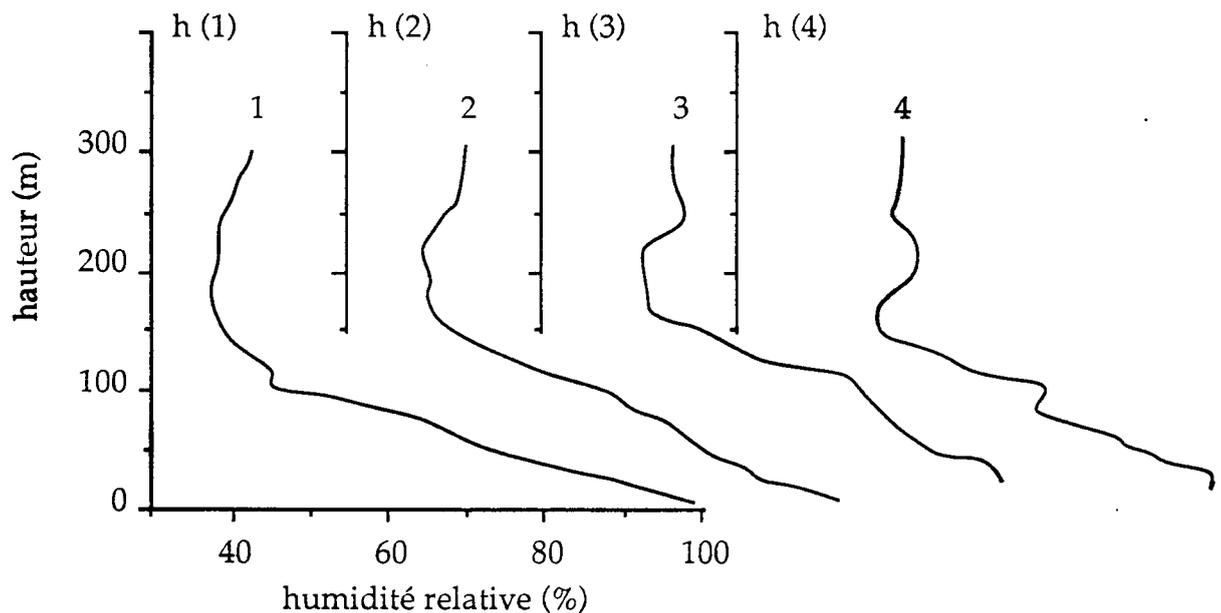


Figure 36 : Evolution du profil d'humidité relative entre 03:30 et 04:51 le 24 Juin

profil 1 : entre 03:30 et 03:49

profil 2 : entre 03:49 et 04:12

profil 3 : entre 04:12 et 04:31

profil 4 : entre 04:31 et 04:51

Cet accroissement d'humidité relative est uniquement dû à une augmentation de la teneur en vapeur d'eau de l'air, puisque la température ne présente aucun changement aux hauteurs concernées.

Sur les profils verticaux de vent enregistrés aux mêmes instants (figure 37), on trouve à l'endroit de la couche d'air plus humide une légère augmentation de la vitesse horizontale (d'environ 0,5 m/s).

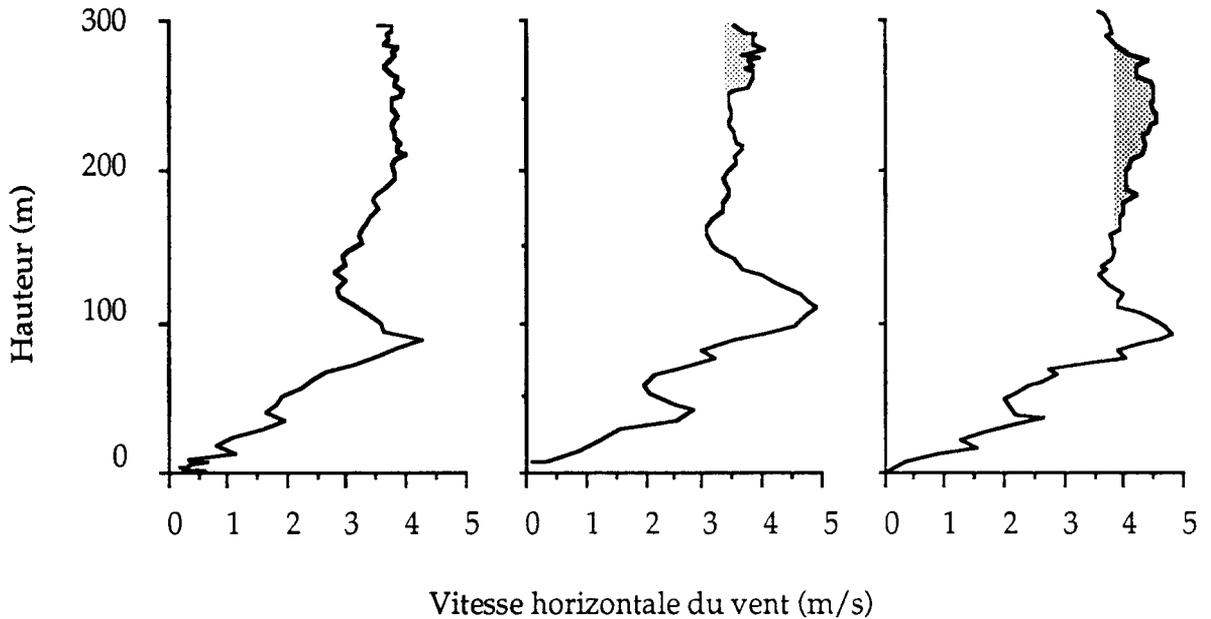


Figure 37 : Evolution au cours du temps du profil vertical du vent horizontal. On note une légère augmentation de la vitesse horizontale du vent aux hauteurs pour lesquelles on a observé un accroissement d'humidité.

Le phénomène observé semble, par conséquent, correspondre à l'arrivée d'une masse d'air plus humide dans la zone de la liaison. Notons au passage l'accroissement brutal du vent aux environs de 100 mètres, typique d'un jet de basse couche.

En conclusion, les données recueillies par les capteurs du ballon captif montrent une évolution sensible de certains paramètres physiques au cours de la partie de la nuit qui nous intéresse. Après ces quelques remarques sur les conditions météorologiques, nous focalisons notre attention sur l'indice de réfraction.

Cette advection d'air plus humide au niveau de la liaison modifie les valeurs de l'indice de réfraction et donc les conditions de propagation. Les trois derniers profils d'indice de réfraction sont représentés figure 38. Ils présentent tous une couche superréfractante aux environs de 100 mètres. Le phénomène décrit plus haut se traduit sur le profil d'indice par la naissance d'une petite couche superréfractante en altitude. D'après les profils de la figure 38, il semble

que cette couche descende et augmente simultanément en intensité au cours du temps. Le dernier profil interrompu qui n'a pas été représenté sur cette figure, semble confirmer cette tendance.

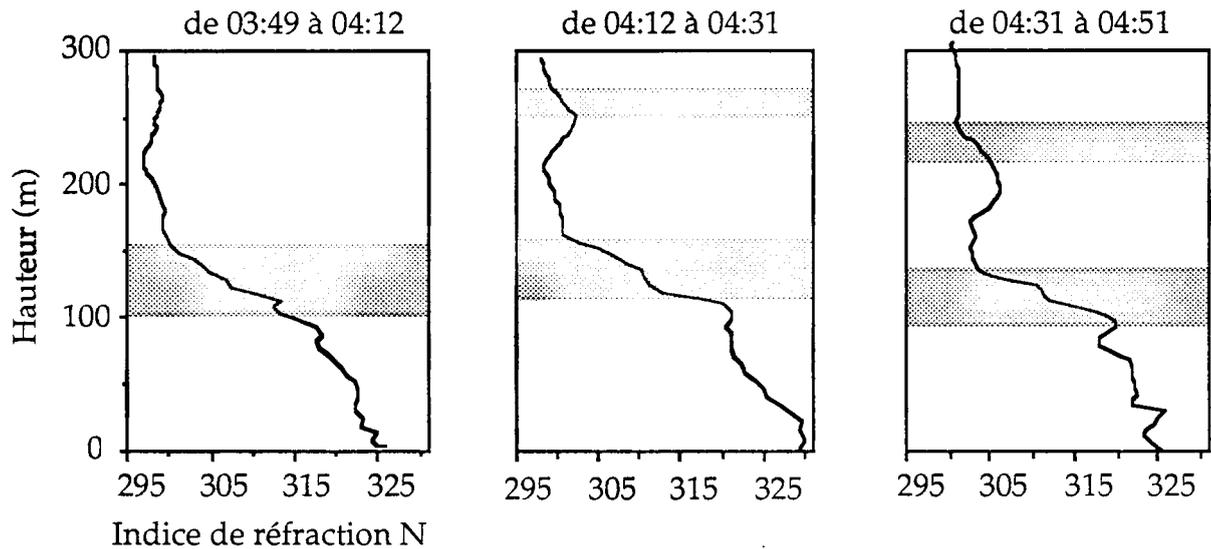


Figure 38 : Evolution au cours du temps du profil vertical d'indice mesuré par le ballon captif. Les couches superréfractantes sont représentées en grisé.

Schématiquement, le profil vertical d'indice est caractérisé par la présence d'une couche superréfractante à une hauteur de 100 mètres, liée à l'inversion nocturne de température, et d'une autre plus élevée. Les mesures de l'avion vont nous permettre d'estimer l'extension horizontale de cette seconde couche et de suivre son évolution temporelle.

Du point de vue de la propagation, nous pouvons déjà remarquer que la présence d'une couche superréfractante située vers 100 mètres peut tout à fait être responsable des trajets multiples observés puisque l'émetteur se trouve à 70 mètres au dessus du sol et donc dans le conduit de guidage. Quant à l'effet du second conduit de guidage plus élevé, il sera étudié dans la partie consacrée plus précisément aux simulations numériques.

Avant tout, nous allons procéder comme pour la première nuit et comparer les valeurs d'indice mesurées par les capteurs de l'avion à celles du profil-ballon. Il nous faut choisir le profil qui servira de référence par la suite. Les changements observés dans le profil vertical d'indice pendant le temps de vol de l'avion rendent le choix de la référence un peu délicat. Globalement, les

trois profils enregistrés pendant le survol de la liaison par l'avion ne se distinguent que par l'importance et la position de la couche supérieure qui est donc considérée comme une perturbation locale du profil initial. Nous choisissons comme état de référence la situation non perturbée (profil enregistré de 03:49 à 04:12) ; de cette façon, la zone où s'étend l'air plus humide sera caractérisée par des valeurs de ΔN positives (La grandeur ΔN définie précédemment correspond à la différence entre la valeur d'indice mesurée par l'avion et la valeur donnée par le profil de référence pour la même hauteur - Voir chapitre III).

Le profil vertical d'indice de la figure 38 montre entre 100 et 150 mètres une forte décroissance d'indice d'environ 15 unités-N, ce qui correspond à un gradient vertical de 0,3 unités/m. (Le gradient vertical observé à la même hauteur la nuit du 13 au 14 Juin était à peu près 5 fois plus faible). L'incertitude sur la hauteur de l'avion est de 5% et conduit donc, pour cette nuit-là, à une incertitude sur la valeur de référence $N_{\text{ballon}}(x,y,z,t)$ d'environ 1,5 unités-N. Pour cette nuit, nous ne retiendrons que les différences d'indice supérieures à 1,5 unités.

3 - Mesures d'indice effectuées par l'avion

Le M.L.A. a enregistré des affaiblissements sélectifs du signal radio dès minuit. L'avion a été appelé vers 02:00 et a procédé à des mesures au dessus de la liaison entre 03:47 et 05:27 selon le plan de vol suivant.

Maillas		Le Caloy
03:56	←	03:47
03:57	→	04:06
04:17	←	04:08
04:18	→	04:27
05:27	→	05:36
05:45	←	05:37

La comparaison des mesures de température avion et ballon montre que l'écart entre les mesures effectuées à partir de l'avion et du ballon au même instant et à peu près au même endroit est inférieur à 0,3°C, ce qui est tout à fait satisfaisant vues les incertitudes de chacun des capteurs. Quant aux

mesures d'humidité, la présence d'une zone plus humide d'extension a priori inconnue aux environs de la liaison gêne un peu la comparaison des capteurs avion et ballon. En effet, les mesures d'avion à elles seules suffisent à voir qu'il y a des zones où l'humidité augmente localement de façon importante. Cependant, si nous comparons les valeurs d'humidité mesurées par le ballon avant l'apparition de la couche plus humide (profil de référence) à celles mesurées par l'avion dans les zones moins humides, nous constatons un très bon accord. Nous considérons donc que, pour cette nuit, les mesures effectuées par les capteurs de l'avion ne nécessitent aucune correction. Rappelons que pour la nuit du 13 au 14 Juin, les écarts en température et humidité entre les capteurs ballon et avion étaient tels qu'il avait fallu procéder à un ré-étalonnage a posteriori. Ceci illustre la nécessité de procéder à des étalonnages fréquents et si possible en dynamique.

Le problème de la cohérence entre les mesures avion et ballon étant résolu, nous utilisons les mêmes fonctions qu'au chapitre précédent : la différence ΔN et l'indicatrice I.

La première étape consiste à déterminer en fonction des valeurs de ΔN rencontrées le seuil en deçà duquel l'indicatrice est nulle. Pour ce faire, nous utilisons, comme pour la nuit précédente, la distribution statistique des ΔN . Pour une situation sans variation horizontale, nous nous attendons à trouver un pic centré sur zéro dont l'écart type est lié aux imprécisions de mesure et aux hétérogénéités à petite échelle de l'atmosphère.

Cette fois, cependant, la situation météorologique est telle que la fréquence d'apparition des valeurs de ΔN dépend fortement de la période considérée entre 03:47 et 05:36, ainsi que le montre la figure 39.

Pour chacune des périodes, une partie des mesures forme la distribution centrée sur zéro (représentée en gris) et l'autre correspond à des valeurs de ΔN allant schématiquement de 5 à 15 unités qui traduisent l'existence de variations horizontales d'indice.

La première distribution (a) présente effectivement un pic (en grisé) très prononcé aux alentours de la valeur zéro ; c'est l'écart type σ_N de cette distribution qui nous sert de seuil pour définir l'indicatrice I. Nous trouvons pour σ_N une valeur d'environ 1,5 unités-N. Rappelons que l'incertitude maximale sur N_{avion} provenant des instruments de mesures est d'environ 1,8 unités-N (§ III-3.2.4). D'autre part, nous avons vu (§ VI-2) que l'incertitude de 5% sur la hauteur de l'avion nous conduisait à ne pas tenir compte de variations d'indice inférieures à 1,5 unités-N. En conclusion, tenant compte de toutes ces contraintes, nous fixons à 2 unités-N le seuil au delà duquel I sera

prise égale à l'unité.

Par contre, les histogrammes des deux autres périodes montrent que l'écart entre les mesures d'indice effectuées par l'avion et celles faites à partir du ballon a statistiquement augmenté de façon significative par la suite. Le faible nombre de points aux alentours de zéro des distributions (b) et (c) nous permet de voir que, pour ces périodes, les valeurs d'indice ont augmenté sur presque toute la zone sondée.

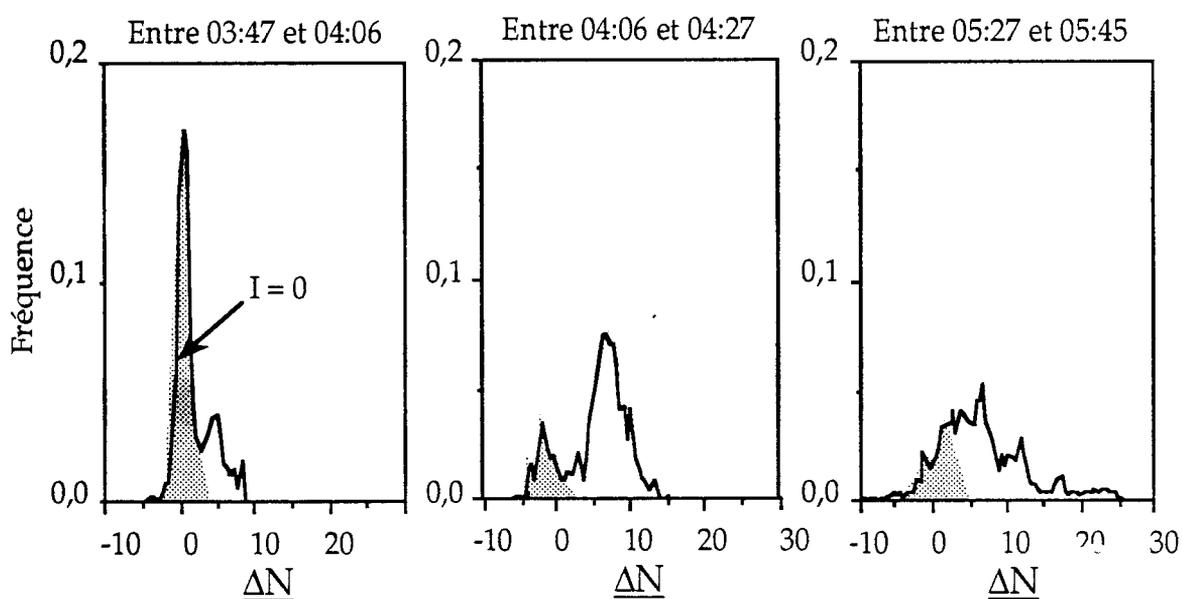


Figure 39 : Evolution au cours du temps de la distribution statistique de ΔN pour le 24 Juin.

Chaque passage de l'avion au dessus de la liaison met en évidence une zone où $I = 1$. Au cours du temps, cette zone se déplace le long de la liaison, ce qui explique les changements notés dans les distributions statistiques des valeurs de ΔN . Les figures qui suivent illustrent chacune des trois périodes de la figure 39 par les valeurs d'indice relevés par l'avion lors d'un passage au-dessus de la liaison.

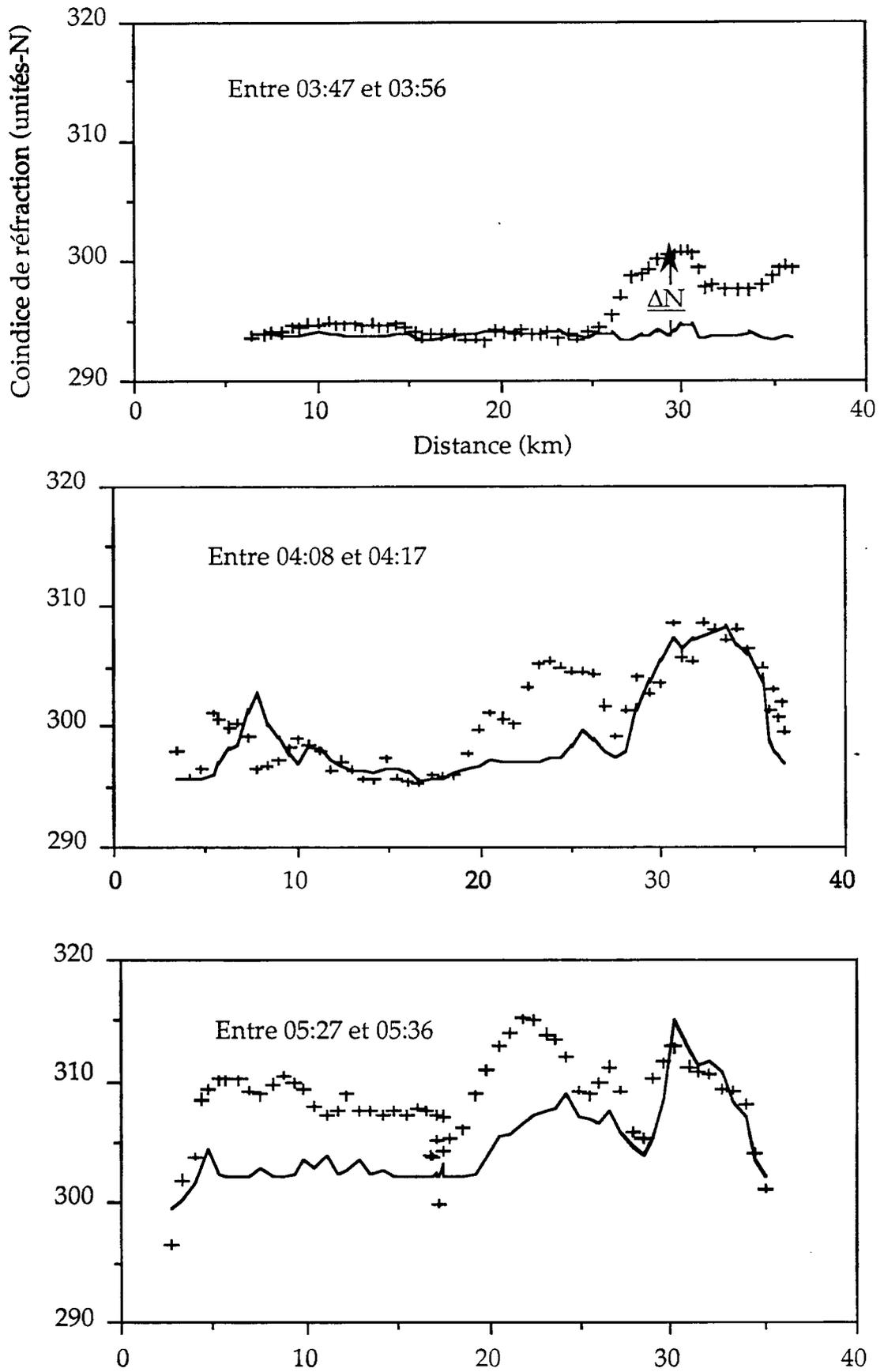


Figure 40 : Illustration des situations rencontrées lors de différents passages de l'avion.

La valeur de référence fournie par le profil vertical-ballon qui varie en fonction de la hauteur considérée, est représentée en trait plein, les points de mesure fournis par l'avion par des croix. On voit très nettement la progression du phénomène en direction de Le Caloy (vers la gauche des figures), c'est à dire, dans le sens du vent.

Nous avons observé, à partir des données du ballon, l'arrivée d'une masse d'air plus humide qui se traduisait par une augmentation locale des valeurs d'indice. L'examen des données-avion nous a permis de confirmer ceci en montrant l'existence de zones où la valeur de l'indice est effectivement plus élevée qu'ailleurs. En outre les données recueillies par l'avion ont mis en évidence la progression de cette perturbation le long de la liaison. Nous allons tenter avec les informations dont nous disposons de la caractériser par son extension horizontale et verticale et sa vitesse de déplacement.

4 - Interprétation du phénomène

L'utilisation de l'indicatrice I permet de visualiser l'arrivée et le passage de la masse d'air plus humide sur la liaison. Les valeurs de I enregistrées lors des différents passages de l'avion sont rassemblés dans la figure 41.

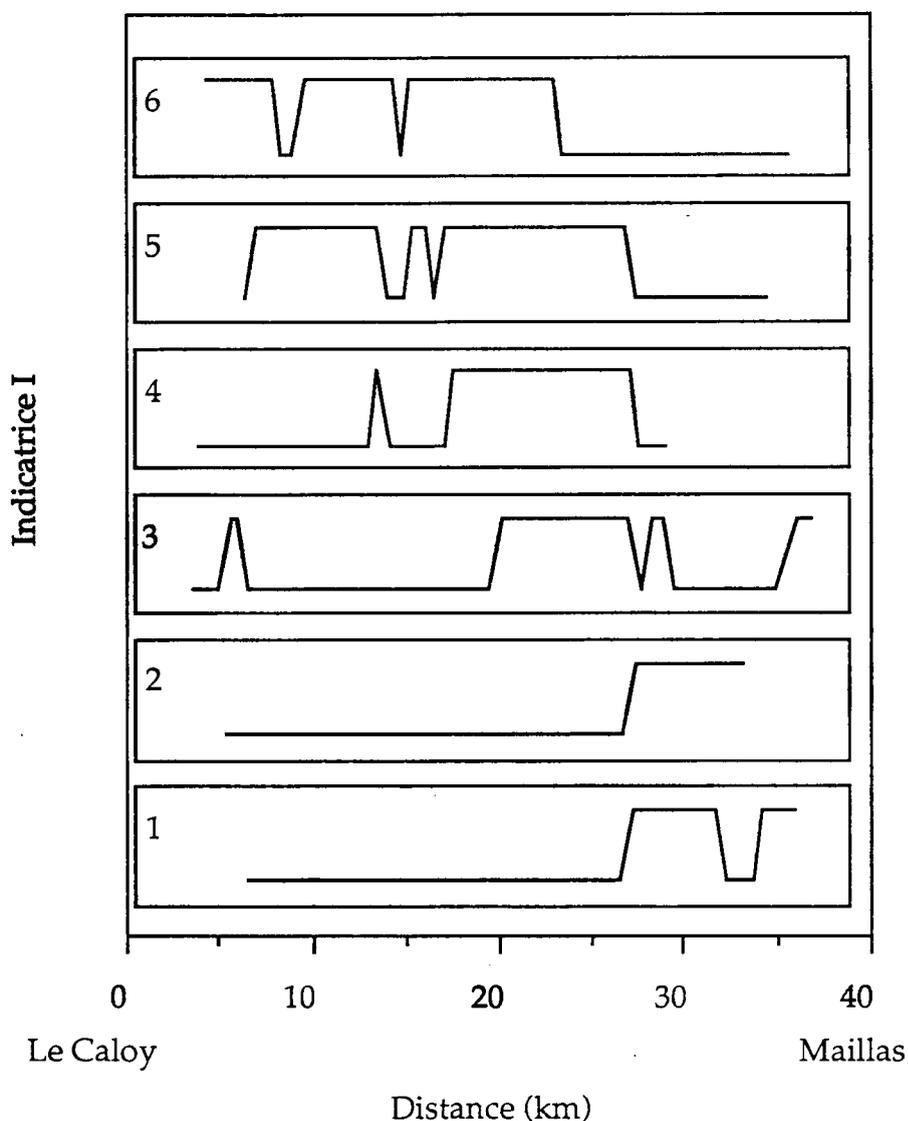


Figure 41 : Mise en évidence du passage de la perturbation le long de la liaison. Les zones affectées par la perturbation correspondent à la valeur unité de l'indicatrice.

- 1 : de 03:47 à 03:56
- 2 : de 03:57 à 04:06
- 3 : de 04:08 à 04:17
- 4 : de 04:18 à 04:27
- 5 : de 05:27 à 05:36
- 6 : de 05:37 à 05:45

Le premier survol de la liaison (1) a trouvé la perturbation dans la zone Nord-Est de la liaison. Lors du passage (3) le phénomène s'est étendu et englobe la zone du site ballon. Le ballon a, en effet, enregistré l'arrivée de la perturbation à partir de 04:00, ce qui est cohérent avec les mesures avion. Les vols suivants montrent une progression du phénomène en direction de Le

Caloy. Les derniers passages (5) et (6) ont permis d'observer un retour à la normale dans la zone de Maillas qui traduit la fin du passage de la perturbation.

Quelle que soit la hauteur de survol par l'avion (comprise entre 150 et 250 mètres), les capteurs ont décelé à chaque passage la présence d'une zone plus humide. La perturbation s'étend donc au moins entre 150 et 250 mètres par rapport au sol. Sur les profils ballons, la masse d'air plus humide apparaît approximativement aux mêmes hauteurs. Par ailleurs, nous avons cherché sur les données recueillies au sol par les stations de l'expérience HAPEX MOBILHY des traces du passage de cette perturbation. Aucune discontinuité sur l'humidité n'a été trouvée au niveau du sol. En conclusion, l'ensemble de toutes ces données montre de façon cohérente que l'arrivée de la masse d'air plus humide s'est faite dans une couche située approximativement entre 150 et 200 mètres.

Les données-avion permettent d'estimer très approximativement son extension horizontale à une vingtaine de kilomètres. La vitesse de déplacement du phénomène projetée selon l'axe de la liaison est d'environ 4 à 5 m/s dans le sens Maillas - Mont-de-Marsan. Or, cette nuit-là, le vent soufflait parallèlement à la liaison dans le même sens. Par conséquent, la masse d'air se déplaçait parallèlement à la liaison à la vitesse du vent.

5 - Conclusion

Sur les profils verticaux d'indice, en plus de la couche superréfractante liée à l'existence de la couche d'inversion nocturne, est apparue une autre couche plus élevée et moins épaisse. Les mesures effectuées par l'avion ont montré que l'extension horizontale de cette couche était inférieure aux cinquante kilomètres de la liaison et que cette perturbation s'est déplacée le long de la liaison pendant la période des observations. Les gradients horizontaux qui en résultaient étaient de l'ordre de grandeur de 10 à 20 unités-N sur une distance d'environ 4 kilomètres.

L'enregistrement du M.L.A. a permis d'observer des événements radio qualitativement très différents, du point de vue dynamique, de ceux de la première nuit. La prise en compte de l'évolution des conditions météorologiques devrait permettre d'interpréter cette différence.

VII - Description du programme de simulation par tracé de rayons

L'ensemble des données météorologiques a permis de retrouver grossièrement la structure bi-dimensionnelle de l'indice de réfraction pendant deux périodes d'observation.

Lorsque l'on connaît l'indice de réfraction en tout point et les caractéristiques du signal émis, on peut par des calculs théoriques retrouver le signal qui parvient en un point quelconque de l'espace. Ce problème de propagation est solution des équations de Maxwell auxquelles on impose des conditions initiales et aux limites (définies par les caractéristiques du signal à l'émission et par la présence du sol). Cependant la solution ondulatoire rigoureuse ne peut être calculée analytiquement que dans quelques rares cas particulièrement simples et ne peut être envisagée si l'on souhaite tenir compte du relief de la liaison et des gradients horizontaux d'indice. Dans notre cas, donc, nous allons nous contenter d'une solution numérique approchée qui fait appel uniquement aux notions de rayon et d'indice de réfraction.

1- Principe de la théorie des rayons

Nous adoptons donc un point de vue similaire à celui de l'optique géométrique mais pour des ondes électromagnétiques de fréquence beaucoup plus basse (11GHz) (Born et Wolf, 1964).

Nous nous intéressons à des ondes de faible longueur d'onde (de l'ordre du centimètre) et, à cette échelle, le milieu de propagation peut être localement considéré comme homogène. Les solutions sont recherchées sous une forme qui rappelle celle d'une onde plane, dans laquelle cependant l'amplitude et la phase sont fonctions de la position r :

$$\begin{aligned} E &= e(r) e^{-ik_0 S(r)} \\ H &= h(r) e^{-ik_0 S(r)} \end{aligned} \quad (1)$$

où $k_0 = \omega/c$ est le nombre d'onde.

On introduit ces expressions dans les équations de Maxwell pour une région sans source rappelées ci-dessous en (2).

$$\begin{aligned}
 \vec{\text{rot}} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\
 \frac{1}{\mu_0} \vec{\text{rot}} \vec{B} &= \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\
 \text{div} \vec{B} &= 0 \\
 \epsilon_0 \text{div} \vec{E} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Ceci fait, il est possible de montrer que si $e(r)$ et $h(r)$ varient peu sur des dimensions de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, les seconds termes des équations de (2) deviennent négligeables ainsi que les variations du milieu. On rappelle que les ondes qui nous intéressent sont des ondes centimétriques et, par conséquent, la condition précédente est vérifiée dans presque tout l'espace, sauf au voisinage de l'émetteur, des caustiques et à la réflexion sur le sol.

On montre finalement que les solutions non triviales vérifient l'équation de l'eikonale :

$$(\text{grad } S)^2 = n^2
 \tag{3}$$

Le milieu étant très peu absorbant, nous pouvons le considérer comme non dissipatif ; alors, n est réel et $S(r)$ également. Les solutions $S(r)$ définissent les surfaces équiphases. Le vecteur de Poynting $E \wedge H$ qui est en tout point orthogonal à celles-ci, donne la direction des trajectoires d'énergie. Les rayons sont assimilés à ces trajectoires d'énergie et sont par conséquent orthogonaux aux surfaces équiphases.

L'équation (3) permet donc de calculer l'équation des rayons recherchée. La géométrie et les notations que nous allons utiliser par la suite sont précisées figure 42. Chaque point courant d'un rayon est défini par son vecteur position r et son abscisse curviligne s le long du rayon.

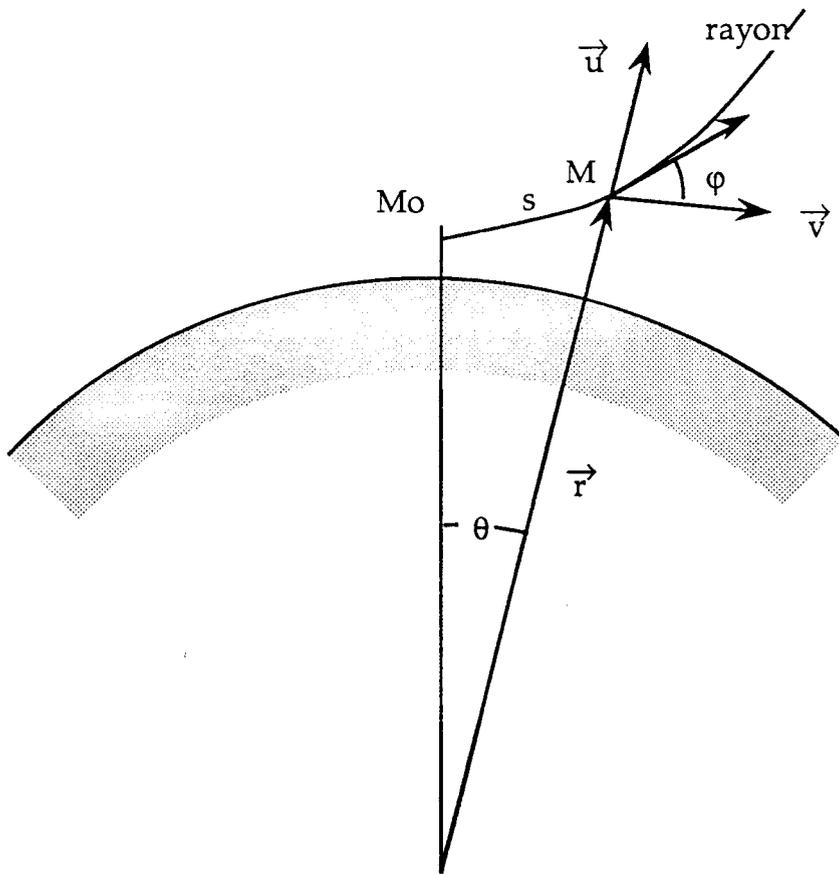


Figure 42 : Géométrie utilisée pour le tracé de rayons :

Le point courant M est défini par son vecteur position r qui fait un angle θ par rapport à une origine arbitraire Mo (émetteur).

u : Vecteur unitaire selon la verticale en M

v : Vecteur unitaire suivant l'horizontale locale

φ : angle entre le rayon et l'horizontale locale

s : abscisse curviligne le long du rayon comptée à partir de Mo

On aboutit finalement à la forme vectorielle de l'équation des rayons :

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\vec{r}}{ds} \right) = \vec{\text{grad}} n \quad (4)$$

En développant la dérivée, on obtient l'équation (4) sous une forme qui permet de mettre en évidence le fait que ce sont principalement les variations d'indice qui agissent sur la propagation:

$$\frac{dn}{ds} \frac{d\vec{r}}{ds} + n \frac{d^2\vec{r}}{ds^2} = \vec{\text{grad}} n \quad (5)$$

En effet, l'indice n , très proche de l'unité, peut s'écrire sous la forme : $n = 1 + \varepsilon$, où ε est de l'ordre de $300 \cdot 10^{-6}$. En première approximation, il est possible de négliger ε devant 1 dans le terme $n \frac{d^2r}{ds^2}$ et l'indice de réfraction n'apparaît dans l'équation (5) que par l'intermédiaire de ses dérivées spatiales. Bien que négligeable devant l'unité, c'est le terme ε (ou $N = \varepsilon \cdot 10^6$) qui, par ses variations spatiales (typiquement de l'ordre de grandeur de 0,1 unités/m), donne la courbure des rayons.

Pratiquement, notre programme de tracé de rayons utilise comme variable d'intégration l'abscisse curviligne, notée s , du point courant. Nous aboutissons en fin de compte à un système de quatre équations différentielles du premier ordre qui permet, connaissant l'indice de réfraction n en tout point, de calculer pas à pas la trajectoire des rayons et le temps de propagation :

$$\frac{dr}{ds} = \sin \varphi \quad (6)$$

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{\cos \varphi}{r} \quad (7)$$

$$\frac{d\varphi}{ds} = \frac{d\theta}{ds} + \frac{1}{n} \left(\frac{\partial n}{\partial \theta} \frac{d\theta}{ds} + \frac{\partial n}{\partial r} \frac{dr}{ds} \right) \operatorname{tg} (\beta - \varphi) \quad (8)$$

où β est l'angle entre l'horizontale locale et le gradient d'indice

$$\frac{dt}{ds} = \frac{n}{c} \quad (9)$$

Remarquons au passage que, dans le cas particulier où l'indice n ne dépend que de la variable r , l'angle β est égal à $\pi/2$ et nous retrouvons la loi de Snell-Descartes précédemment citée (chapitre II - § 2.2).

Notre programme calcule, pas à pas, la hauteur, le temps de propagation et l'inclinaison du rayon sur l'horizontale à l'aide du système d'équations (6) à (9).

L'amplitude des rayons ne peut être obtenue directement : nous utilisons, pour l'estimer, le fait que, pour une portion de l'espace ne comportant pas de source d'énergie, le flux d'énergie est conservatif. Ainsi,

lorsqu'au fur et à mesure de leur trajet, deux rayons émis dans des directions voisines s'éloignent l'un de l'autre (faisceau divergent), la densité d'énergie diminue avec la distance et il en est de même pour l'amplitude des rayons considérés. Au contraire, lorsque les rayons se rapprochent (faisceau convergent), l'amplitude augmente. Concrètement, si pour une différence d'angle à l'émission de $d\alpha$, l'écart en hauteur à la réception est de dh , l'amplitude des rayons sera proportionnelle à $(d\alpha/dh)$. Cette méthode fournit un ordre de grandeur de l'amplitude relative des rayons. Il faudrait, en toute rigueur, tenir compte également de l'absorption par le milieu. Cependant, puisque le milieu est très peu absorbant (nous avons en effet pris un indice n réel) et que les trajectoires ont des longueurs égales à 2.10^{-3} % près, le terme dû à l'absorption ne changerait quasiment pas les amplitudes relatives des rayons.

Le problème de la réflexion des rayons par le sol est certainement trop complexe pour que notre programme puisse décrire de façon satisfaisante (déphasage à la réflexion, coefficient de réflexion, rugosité du sol,...) le comportement du rayon après réflexion. On sait, par exemple, qu'une réflexion par un plan introduit un déphasage d'environ π dont la valeur exacte dépend de la longueur de l'onde, de sa polarisation, de l'angle d'incidence et de la nature du sol. Il en est de même du coefficient de réflexion. En conclusion, nous garderons présent à l'esprit le fait que les rayons réfléchis obtenus lors de nos simulations ne sont qu'indicatifs et, de façon générale, nous n'en tiendrons pas compte. Car notre propos est surtout d'évaluer les effets dus à l'atmosphère.

Notre programme a été amélioré par rapport à sa première version (Sylvain et Jouveau, 1985) et permet désormais de tenir compte de gradients horizontaux d'indice de réfraction ou de prendre un modèle d'indice qui suit le relief de la liaison.

2 - Illustration sur un exemple du type de résultats obtenus

Nous commençons par illustrer, sur un exemple simple (sans relief, ni gradient horizontal), les résultats qui peuvent être obtenus à partir du programme de simulation. Pour ce faire, nous partons d'un profil type à une couche superréfractante, introduit par A. Webster (Webster, 1982).

Nous avons déjà dit que l'indice de réfraction tend globalement à décroître avec un gradient vertical de l'ordre de -4 unités-N par centaine de mètres et que les écarts par rapport à cette décroissance se traduisent par la présence de couches à l'intérieur desquelles le gradient vertical d'indice est

présence de couches à l'intérieur desquelles le gradient vertical d'indice est différent. En pratique, il est possible de schématiser un profil expérimental à n couches par une fonction analytique de la forme suivante :

$$N = N_o - kz + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta N}{2\pi} \arctan \left(12,63 \left(\frac{z - h_o}{\Delta h} \right) \right) \quad (10)$$

On retrouve évidemment la partie $N_o - kz$ qui correspond à la décroissance normale. Chaque couche (i) est caractérisée par sa hauteur (h_o), son extension verticale (Δh) et l'importance de sa variation d'indice (ΔN). Le facteur 12,63 a été choisi pour que la variation d'indice entre les hauteurs ($h_o - \Delta h/2$) et ($h_o + \Delta h/2$) soit égale à 90% de ΔN .

Les profils d'indice observés en présence d'une couche d'inversion nocturne se représentent très aisément par un modèle à une couche. Ceci rend cette modélisation particulièrement commode pour l'utilisation que nous voulons en faire.

Le profil que nous allons utiliser pour notre exemple comporte une seule couche située légèrement au dessus de l'émetteur.

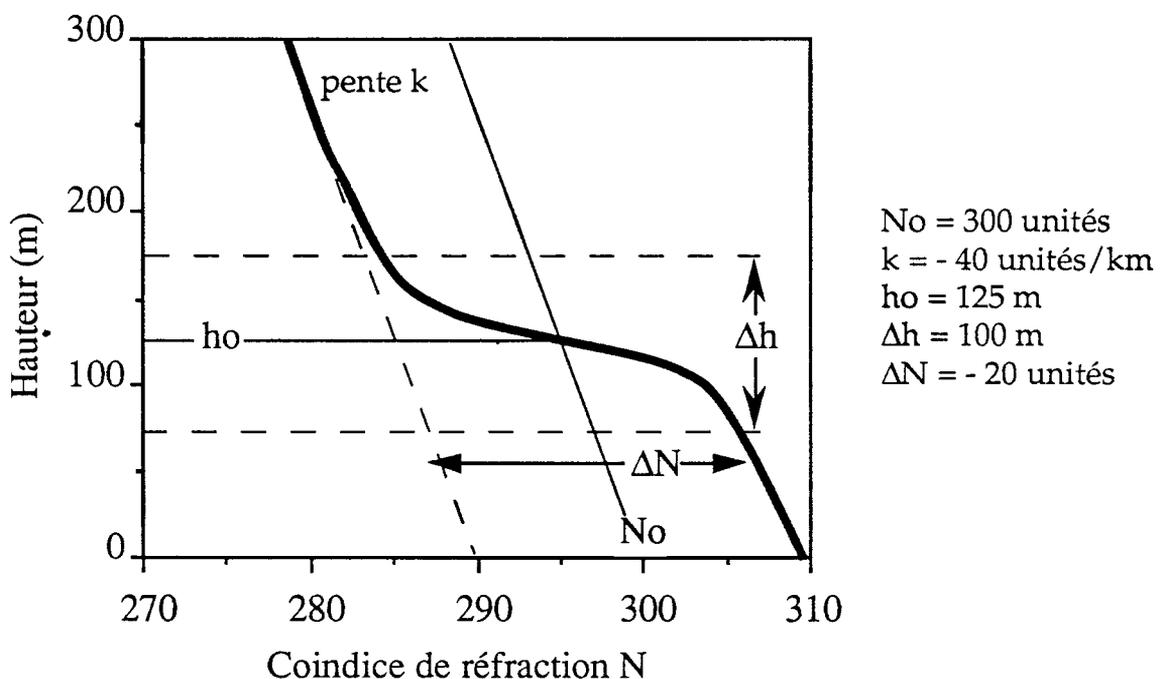


Figure 43 : Profil vertical d'indice de réfraction avec une couche superréfractante située au dessus de l'émetteur.

Les valeurs de ΔN et Δh ont été choisies pour donner à l'intérieur de la couche un gradient vertical d'indice inférieur à -157 unités/km ; le profil (tracé figure 43) présente donc une couche superréfractante qui est susceptible de provoquer des trajets multiples.

Notre programme de tracé de rayons nous permet de connaître la trajectoire de n'importe quel rayon, défini au niveau de l'émetteur par son angle avec l'horizontale ; de là, il nous est possible, entre autres, de déterminer la zone affectée par les trajets multiples (figure 44).

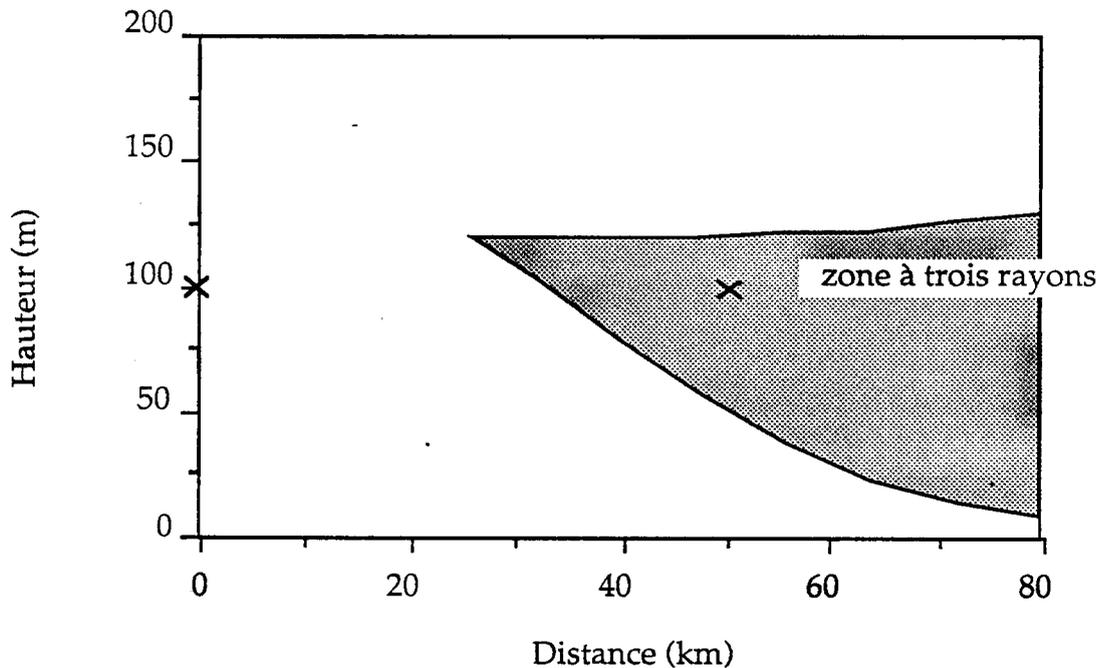


Figure 44 : Resultats de la simulation effectuée à partir du profil de la figure 43. La zone en gris matérialise la portion de l'espace où plusieurs rayons interfèrent. Dans le cas présent, il n'y a que trois rayons .

Il est possible de décrire les rayons qui parviennent en un point déterminé (récepteur) par leur amplitude relative, leur retard et leur angle d'arrivée.

D'après la figure 44, trois rayons différents arrivent sur le récepteur situé à 50 kilomètres de l'émetteur et à une hauteur de 100 mètres par rapport au sol. Ces trois rayons sont représentés dans la figure qui suit. Le rayon 1 est très voisin du rayon unique obtenu en situation de propagation normale, c'est-à-dire lorsque dans le profil vertical d'indice il n'y a plus de couche superréfractante et que $N(z) = N_0 - kz$. Prenant ce rayon comme référence, les

deux autres sont caractérisés par leur amplitude relative et leur temps de retard par rapport à celui-ci. Les valeurs numériques obtenues pour le profil de la figure 43 sont :

$$\text{Rayon 2 : } A_2 = + 4 \text{ dB, } \tau_2 = - 0,04 \text{ ns}$$

$$\text{Rayon 3 : } A_3 = - 20 \text{ dB, } \tau_3 = + 0,71 \text{ ns}$$

On remarque que deux des rayons (1) et (2) sont très proches par leur amplitude et leur temps de propagation et que le rayon (3), beaucoup plus affaibli, présente un retard plus important.

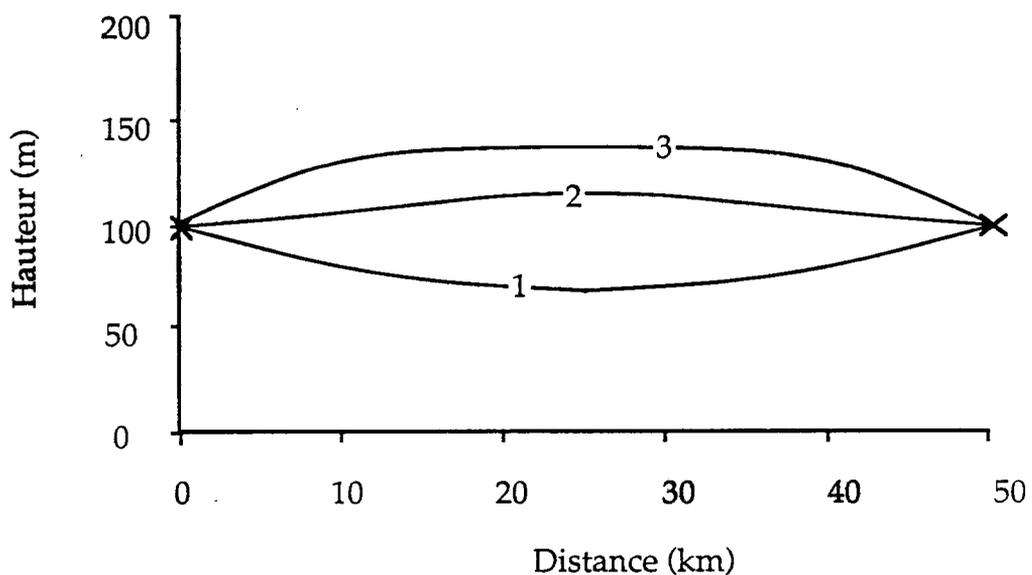


Figure 45 : Tracé des trois rayons qui parviennent directement au récepteur.

L'ensemble de ces informations permet de calculer la fonction de transfert du canal de propagation modélisé. Le signal (S) reçu par l'antenne de réception est la somme des termes correspondant aux n rayons qui y parviennent.

$$S = \sum_{i=1}^n a_i \exp^{i(\omega\tau_i + \psi_i)} \quad (10)$$

On introduit l'amplitude (A) et la phase (Ψ) du signal radio.

$$S = A \exp^{-i\Psi} \quad (11)$$

avec :

$$A = |S| = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n a_i \cos(\omega\tau_i + \psi_i)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n a_i \sin(\omega\tau_i + \psi_i)\right)^2} \quad (12)$$

$$\Psi = \text{arctg} \frac{\sum_{i=1}^n a_i \sin(\omega\tau_i + \psi_i)}{\sum_{i=1}^n a_i \cos(\omega\tau_i + \psi_i)} \quad (13)$$

Le M.L.A. caractérise le signal reçu par son amplitude $A(\omega)$ et le temps de propagation de groupe (T.P.G.) qui est défini comme la dérivée de $\Psi(\omega)$ par rapport à ω .

$$\text{T.P.G.} = \frac{d\Psi}{d\omega} \quad (14)$$

Dans le cas général, l'amplitude et le T.P.G. dépendent de la fréquence. Les formules précédentes permettent de montrer que si A est extrémale pour une fréquence, il en est de même pour le T.P.G. Bien entendu si un seul rayon parvient sur le récepteur ($n=1$), $A = a_1$, la phase est égale à $\omega\tau_1 + \psi_1$ et donc le T.P.G. est constant et confondu avec le temps de propagation τ_1 du rayon.

Dans notre exemple, le nombre n de rayons est égal à 3. L'amplitude de la fonction de transfert A calculée d'après (12) est représentée entre 9 et 13 GHz figure 46 ; elle met en évidence des affaiblissements sélectifs en fréquence caractéristiques de trajets multiples. Les extrémums du T.P.G. tracé en gris correspondent bien aux minimums d'amplitude.

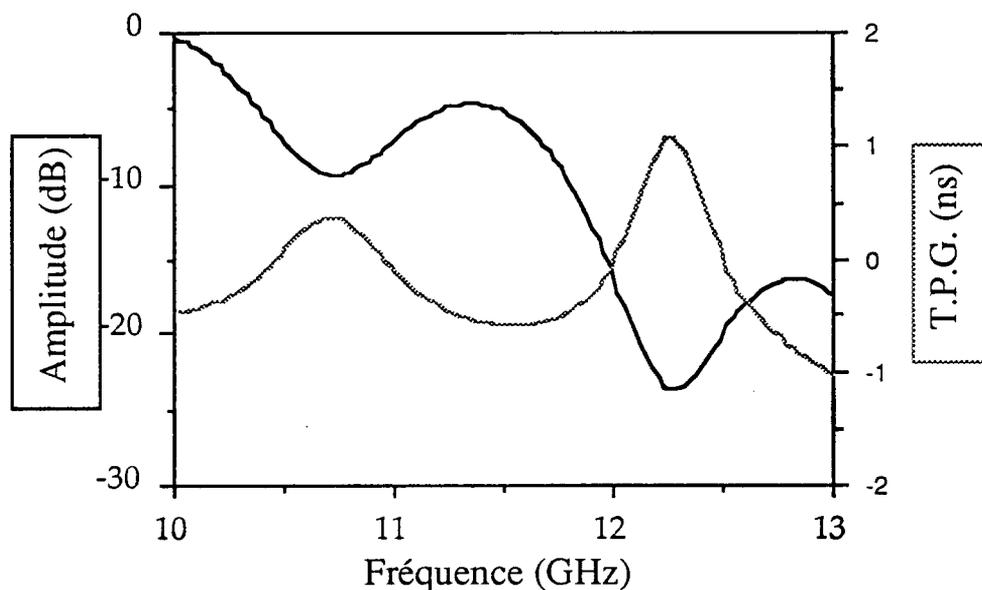


Figure 46 : Amplitude et temps de propagation de groupe du signal radioélectrique simulés entre 9 et 13 GHz correspondant à la situation à trois rayons des figures précédentes.

Remarquons au passage la pseudo-périodicité des courbes. Le minimum de l'amplitude se produit à peu près tous les 1,5 GHz. Le décalage entre les deux rayons 1 et 2 est d'environ 0,04 ns. Si l'on néglige la contribution du rayon 3, on obtient une amplitude qui oscille en fonction de la fréquence avec une période de $1/\tau_2$, soit 25 GHz. Les variations observées dans une bande de 1 GHz de large ne peuvent être imputées à l'association de ces deux rayons. Par contre, les rayons 1 et 3 donnent une périodicité de 1,4 GHz ($1/\tau_3$) qui correspond effectivement à la valeur de la figure 46. Lors de l'expérience PACEM 3, le M.L.A. fonctionnait sur une bande large de 1 GHz. Or, les données recueillies n'ont quasiment jamais montré la présence de plus d'un minimum d'amplitude dans la bande. Il est possible d'en conclure que typiquement, pour une longueur de bond de 50 kilomètres, l'écart maximal entre deux rayons est inférieur à 1 ns.

Notre programme de tracé de rayons nous permet donc, à partir d'un modèle d'indice avec (ou sans) gradients horizontaux, de simuler la réponse du canal de propagation qui peut être également obtenue de façon complètement indépendante grâce au M.L.A.. Cependant, il n'est pas raisonnable d'espérer retrouver par simulation les valeurs effectivement enregistrées par le M.L.A. En effet, ne connaissant pas la valeur de l'indice en tout point, nous ne pouvons utiliser que des modèles simplifiés qui rendent

compte globalement de la situation réelle.

VIII - Interprétation des événements radio observés lors des deux nuits

D'une part, l'analyse des données météorologiques nous a permis de restituer approximativement, pour les deux nuits étudiées, la structure de l'indice de réfraction en deux dimensions. D'autre part, nous connaissons avec précision, grâce aux enregistrements du M.L.A., les événements radio. Nous disposons donc de deux ensembles de données recueillis de façons indépendantes qui caractérisent les causes et les effets d'un même phénomène. Notre tâche consiste à faire le lien entre les unes les autres.

Pour chacune des nuits, nous effectuerons d'abord des simulations en ignorant volontairement les informations sur la structure horizontale d'indice apportées par l'avion. De cette façon, nous nous placerons volontairement et momentanément dans une situation analogue à celle de PACEM 1 où seul le profil vertical enregistré par le ballon captif était disponible.

Dans un second temps, nous introduirons dans nos simulations les informations complémentaires obtenues grâce à l'avion instrumenté afin de voir si la prise en compte des variations horizontales observées permet de mieux interpréter les mesures du M.L.A..

1 - Nuit du 13 au 14 Juin

Pendant cette nuit-là, nous avons enregistré, à l'aide du ballon, des gradients verticaux d'indice qui a eux seuls expliquent l'existence d'une zone d'interférence. En outre, nous disposons, grâce aux mesures effectuées par l'avion, d'informations complémentaires sur les variations horizontales d'indice. Cependant, afin de mettre en évidence combien il est important d'avoir accès à la structure bi-dimensionnelle de l'indice, nous nous plaçons dans un premier temps dans une situation où seul le profil vertical en un point est pris en compte.

1.1 - Simulations à partir du profil vertical seul

N'ayant alors aucune information sur les variations horizontales de l'indice de réfraction, deux modèles d'indice peuvent être raisonnablement envisagés :

- Dans le premier, le profil vertical mesuré par le ballon est valable sur

toute la liaison et le relief ne joue aucun rôle sur la structure d'indice (les courbes d'iso-indice sont horizontales ou plus exactement suivent la courbure de la terre).

• Dans le second, nous partons toujours du profil vertical du ballon mais nous faisons l'hypothèse que les courbes d'iso-indice suivent le relief.

Nous essayons au maximum de nous rapprocher de la situation réelle. Nous prenons pour notre simulation, un relief qui correspond dans les grandes lignes au relief réel de la liaison Maillas - Mont-de-Marsan et nous plaçons les antennes de réception et d'émission à 70 mètres du sol comme lors de l'expérience sur le terrain.

Les résultats obtenus à partir de ces deux hypothèses sont représentés figures 47 et 48. Les rayons réfléchis par le sol sont tracés en gris. La zone de trajets multiples est représentée en grisé.

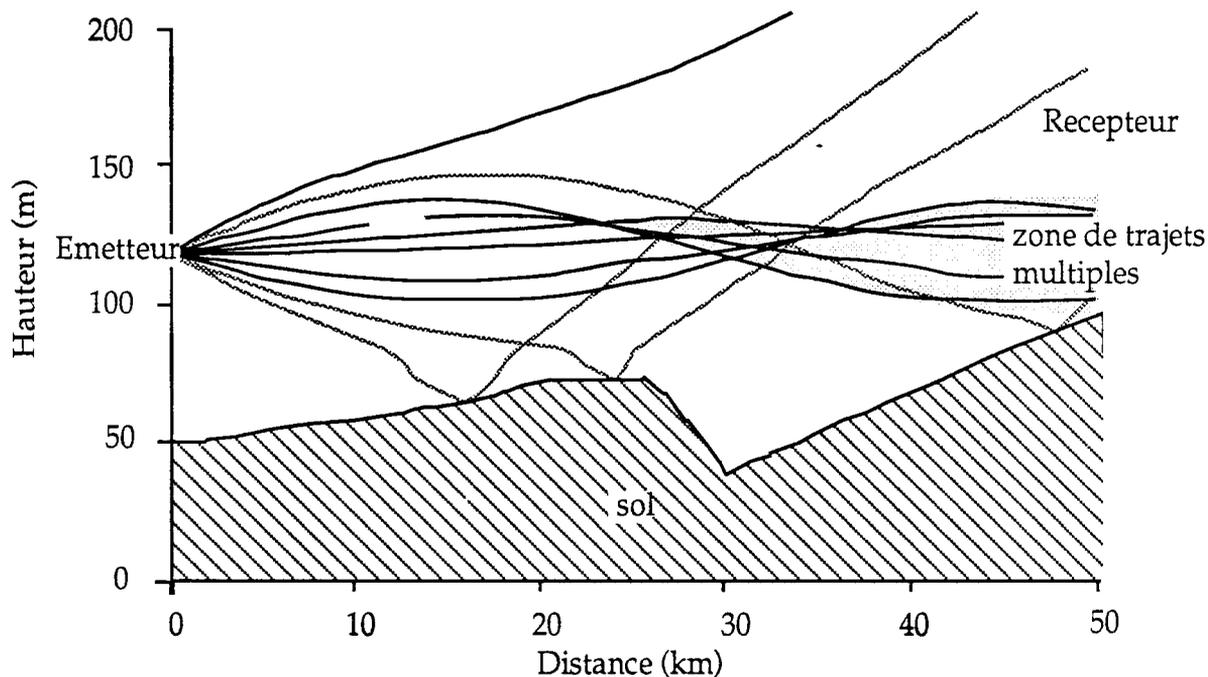


Figure 47 : Résultat de simulation numérique représentant les trajectoires de quelques rayons. Le profil vertical du ballon (représenté figure 22) a été utilisé pour toute la liaison en faisant l'hypothèse que les courbes d'isoindice sont horizontales.

Dans la première hypothèse, une zone de trajets multiples est mise en évidence (en gris) mais le récepteur se trouve environ cinquante mètres plus haut.

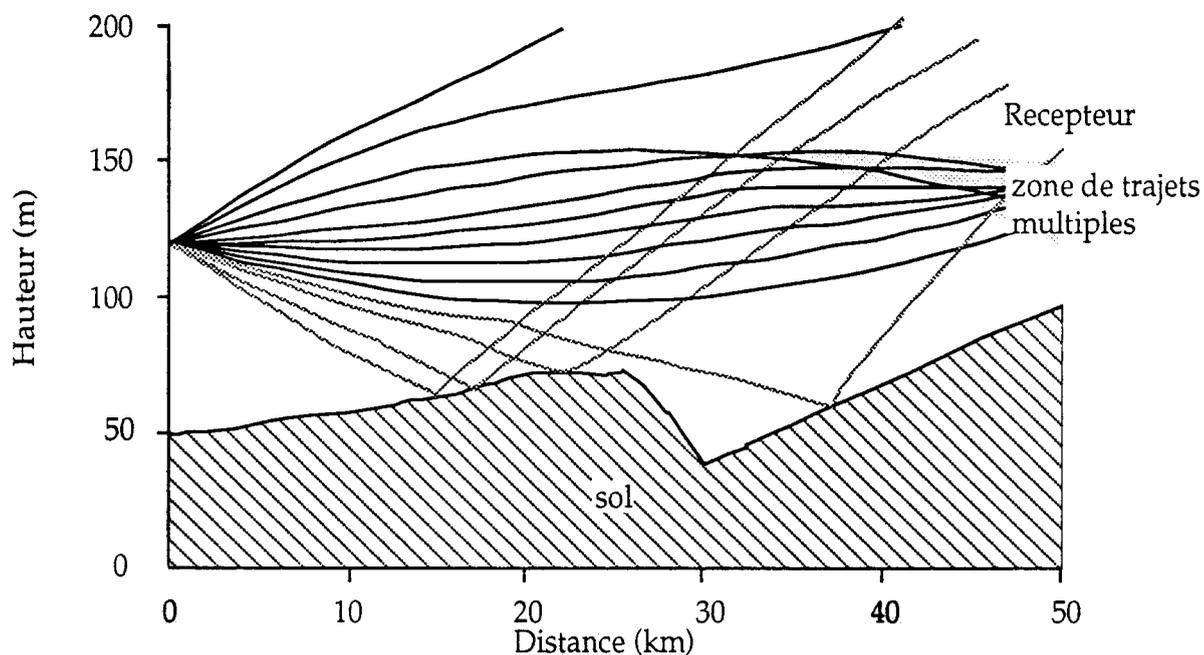


Figure 48 : Comme pour la figure 47, la simulation a été faite à partir du profil d'indice mesuré par le ballon, mais dans le modèle choisi cette fois, les courbes d'isoindice suivent le relief.

Si l'on fait suivre à l'indice de réfraction le relief, on voit que la zone de trajets multiples est plus haute mais le récepteur est encore 25 mètres au dessus.

Les deux hypothèses font apparaître une zone où plusieurs rayons peuvent interférer, résultat que nous avons annoncé auparavant à la vue du profil vertical d'indice de réfraction. Cependant, ces résultats, qui prennent en compte uniquement le profil vertical enregistré en un point de la liaison, ne permettent pas d'interpréter correctement les affaiblissements sélectifs du signal radio observés cette nuit-là au niveau du récepteur.

Les mesures d'indice de réfraction effectuées à bord de l'avion le long de la liaison vont nous permettre d'avoir une idée de la vraie structure bidimensionnelle de l'indice de réfraction et ainsi d'améliorer le modèle d'indice de réfraction utilisé pour les simulations numériques.

1.2 - Modèle bi-dimensionnel d'indice

Il s'agit maintenant de prendre également en compte dans notre modèle d'indice les variations horizontales mesurées par l'avion.

Les figures 26 et 27 du chapitre IV nous autorisent à penser que le gradient horizontal observé par l'avion entre 100 et 200 mètres est dû à un changement de hauteur de la couche superréfractante supérieure. Par conséquent, nous pouvons, pour cette nuit-là, simuler la structure d'indice de la façon suivante : entre le kilomètre 25 et Maillas, nous faisons suivre le relief au profil vertical mesuré par le ballon, ensuite jusqu'à l'émetteur, la hauteur (h_0) de la couche superréfractante supérieure par rapport au sol augmente progressivement pour passer de 75 à 125 mètres vers le Caloy. Faute de données entre le sol et 100 mètres, nous sommes amenés à faire des hypothèses quant au comportement de la couche qui a été observée près du sol vers Maillas.

- Dans la première (a), nous supposons que cette couche s'élève de la même manière que la couche supérieure.

- Dans la seconde (b), nous considérons que cette couche basse est liée au sol et suit le relief sur les cinquante kilomètres de la liaison, demeurant ainsi à 25 mètres du sol.

Les deux modèles (a) et (b) proposés ne sont peut-être pas conformes à la situation réelle mais présentent l'avantage de s'en rapprocher davantage que le modèle horizontalement homogène, et, au moins, d'être vraisemblables. Cependant, l'hypothèse (a) semble plus conforme à l'interprétation physique des gradients horizontaux que nous avons donnée au chapitre IV. En effet, il est vraisemblable que l'influence de la composante verticale de la vitesse du vent se fait sentir sur tout le profil d'indice.

L'hypothèse (a) conduit à des courbes d'iso-indices (figure 49) qui sont, dans la zone sondée, en assez bon accord avec celles de la figure 26 restituées à partir des observations.

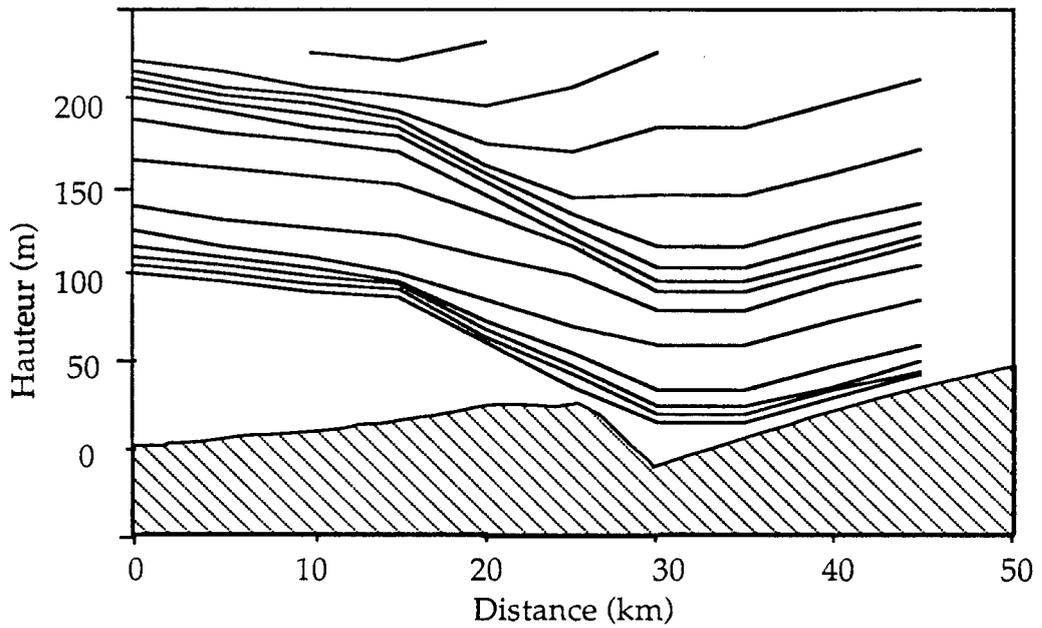


Figure 49 : Essai de modélisation de la structure bi-dimensionnelle d'indice pour le 14 Juin. Les courbes d'iso-indice sont dans la zone où des mesures ont été effectuées en bon accord avec celles-ci. Ailleurs, des hypothèses ont été nécessaires.

Le résultat de la simulation (figure 50) montre l'existence d'une zone de trajets multiples qui, cette fois-ci, englobe le récepteur.

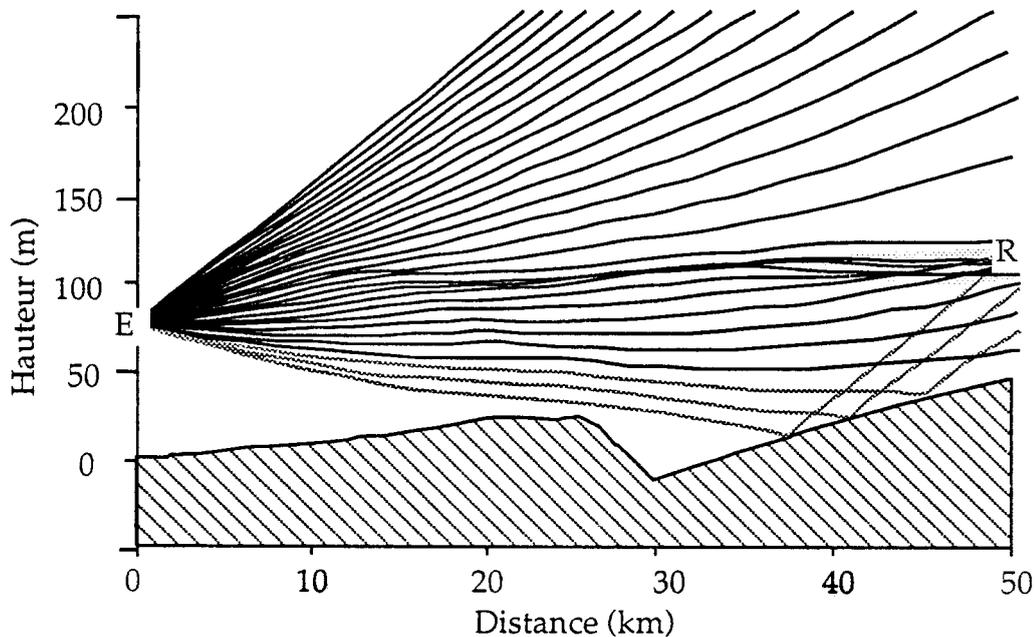


Figure 50 : Résultat de la simulation effectuée à partir du modèle d'indice de la figure précédente.

Le modèle bi-dimensionnel d'indice utilisé pour obtenir le résultat de la figure 50 permet donc d'interpréter les événements radio enregistrés cette nuit-là par le M.L.A.. Ce résultat est encourageant mais ne prouve absolument pas que nous ayons su reconstituer la situation réelle. Il montre simplement que la prise en compte de gradients horizontaux de l'ordre de ceux observés peut être nécessaire à l'interprétation de l'activité radioélectrique puisque, rappelons le, le profil vertical à lui seul n'a pas donné un résultat tout à fait satisfaisant.

L'hypothèse (b), par contre, déplace la zone de trajets multiples bien au delà des cinquante kilomètres de la liaison. Nous en déduisons donc que le modèle bi-dimensionnel (b) ne correspond pas, même très schématiquement, à la situation de cette nuit-là.

A partir des données d'indice dont nous disposons, nous pouvons, moyennant d'autres hypothèses, procéder à d'autres simulations qui grossièrement sont intermédiaires entre les hypothèses (a) et (b). Les résultats montrent que, si la couche superréfractante inférieure se situe, à Mont-de-Marsan, en dessous de l'émetteur, il n'y a pas de trajets multiples au niveau du récepteur. La prise en compte de variations horizontales en accord avec les mesures effectuées permet d'interpréter les affaiblissements sélectifs observés par le M.L.A..

Il est clair que le profil vertical (mesuré par le ballon dans notre cas) explique l'existence de trajets multiples. Cependant, nous avons montré qu'il est nécessaire de faire intervenir des variations horizontales d'indice (mesurées par l'avion) pour que plusieurs rayons se rencontrent au niveau de l'antenne de réception.

L'ordre de grandeur des gradients verticaux (0,2 unités/m) est bien supérieur à celui des variations horizontales que nous avons observées (10^{-3} unités/m) mais ces derniers agissent sur des distances beaucoup plus grandes (plusieurs kilomètres contre quelques dizaines de mètres) et leur effet, intégré sur la trajectoire, n'est de ce fait pas négligeable.

2 - Nuit du 23 au 24 Juin

Nous allons procéder en deux temps comme pour la nuit précédente : d'abord, en tenant compte exclusivement du profil vertical d'indice enregistré par le ballon, puis en ajoutant l'information complémentaire fournie par

l'avion.

2.1 - Simulations effectuées à partir du profil vertical seul

L'évolution des conditions météorologiques à l'échelle de la liaison nous oblige, cette fois, à faire une analyse dynamique de la situation. Nous avons noté au chapitre V, consacré à l'étude de la situation météorologique de cette nuit-là, la naissance et le développement en hauteur d'une petite couche superréfractante. Nous avons simulé l'effet de chacun des trois profils verticaux enregistrés lors du passage de l'avion (représentés figure 38) sur la propagation, supposant, dans un premier temps, que la couche supérieure s'étend sur les cinquante kilomètres de la liaison.

Les résultats de simulation ont montré l'existence d'une large zone de trajets multiples qui englobe le récepteur. La position et la forme de cette zone ne varie quasiment pas d'un profil à l'autre. Nous avons représenté figure 51 celle qui correspond au dernier profil mesuré.

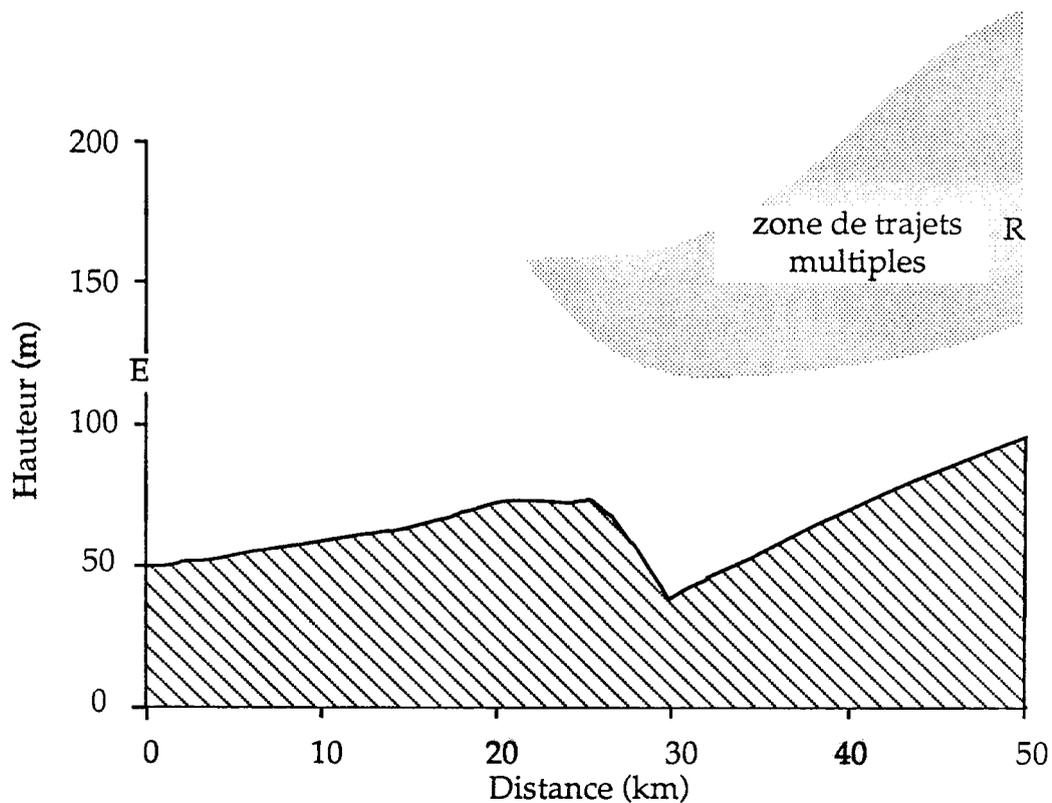


Figure 51 : Résultats des simulations numériques effectuées à partir du dernier profil vertical d'indice relevé le 24 Juin.

Cette fois-ci, le profil vertical d'indice permet à lui seul d'expliquer la

propagation anormale observée au niveau du récepteur.

Cependant, nous savons grâce aux mesures effectuées par l'avion que la couche superréfractante supérieure ne couvre pas toute la liaison et que, par ailleurs, elle se déplace le long de cette dernière. Nous allons dans la partie qui suit tenter d'exploiter ces informations supplémentaires.

2.2 - Modèle bi-dimensionnel d'indice

L'étude des données ballon et avion a montré l'arrivée et le passage le long de la liaison d'une masse d'air plus humide modifiant localement les valeurs d'indice. Nous allons reconstituer la progression de cette perturbation, en suivant l'évolution qu'elle induit sur la zone affectée par des trajets multiples et sur la fonction de transfert restituée.

Partant du profil d'indice non perturbé, nous introduisons sur une partie de la liaison une modification du profil qui correspond à la perturbation observée aux alentours de 200 mètres. Puis, nous déplaçons la zone de transition à une vitesse de 5m/s.

Nous n'espérons pas retrouver les valeurs d'amplitude mesurées par le M.L.A.. Cependant, il semble possible de restituer qualitativement la dynamique de la situation.

En effet, déplaçant de 5 mètres en 5 mètres la position de la perturbation (ce qui correspond à un point par seconde), nous calculons pour chaque situation, les caractéristiques des rayons qui parviennent au récepteur.

Le rayon 1 qui sert de référence est pratiquement le même pour chacune des situations. En effet, sa trajectoire se situe en dessous du niveau des antennes et ce rayon n'est donc pas perturbé par les changements qui interviennent plus haut.

Ces informations nous permettent de connaître l'évolution de la fonction de transfert du canal de propagation. L'ordre de grandeur du retard le plus important entre les rayons est d'environ 1 ns, nous nous contenterons donc de représenter l'amplitude du signal sur 1 GHz (cf. la remarque à la fin du chapitre VII sur la plus petite échelle de périodicité de l'amplitude). La figure 52 représente l'évolution temporelle de l'amplitude du signal obtenue par simulation.

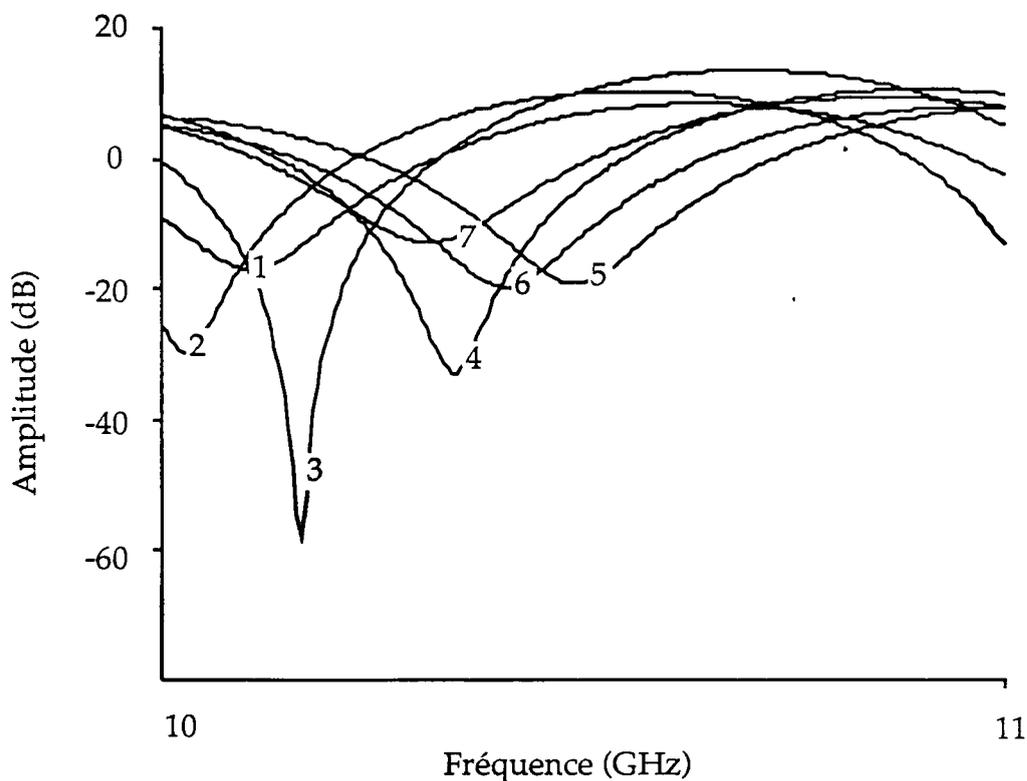


Figure 52 : Evolution temporelle de l'amplitude du signal transmis. Les différentes courbes sont espacées de 1 seconde, soit un déplacement de 5 mètres de la perturbation.

Le creux le plus marqué correspond à la courbe 3 pour laquelle l'amplitude est atténuée de 60 dB. Les amplitudes obtenues juste avant et juste après montrent un affaiblissement de 30 dB. On observe donc un changement de 30 dB sur une période de 3 secondes. Les similitudes entre ce résultat et les valeurs enregistrées par le M.L.A. (figure 35) sont frappantes. Dans un cas comme dans l'autre, nous observons l'existence d'affaiblissements intenses de courte durée, de l'ordre de la seconde.

Il semble donc que l'évolution des conditions météorologiques permette d'interpréter qualitativement la dynamique particulière des événements radioélectriques observés cette nuit-là.

IX - Etude systématique de l'influence des gradients horizontaux sur la propagation

Pour les deux nuits étudiées, la combinaison des gradients verticaux et horizontaux d'indice a rendu possible l'interprétation des événements radio observés. L'influence des variations horizontales a été mise en évidence sur deux cas particuliers; une étude plus systématique peut permettre de connaître un peu mieux l'importance de ce facteur.

Pour cette étude à caractère plus général, nous utilisons des profils simplifiés d'indice à une seule couche. Nous rappelons que les cinq paramètres (N_0 , k , h_0 , ΔN , Δh) qui définissent un profil à une seule couche ont été introduits au chapitre VII (§ 2.1). Notre profil type de référence (Pro) correspond aux valeurs numériques suivantes :

$$N_0 = 300 \text{ unités}$$

$$k = -40 \text{ unités/km}$$

$$h_0 = 125\text{m}$$

$$\Delta h = 125\text{m}$$

$$\Delta N = -20 \text{ unités.}$$

Les gradients horizontaux sont obtenus par la variation horizontale d'un des paramètres de la couche. Nous allons tour à tour étudier l'influence d'une variation horizontale de la hauteur de la couche (h_0) et de son intensité (ΔN). Nous utilisons, pour ce faire, deux profils Pro et Pr. Entre l'émetteur et le kilomètre x_0 , l'indice de réfraction est conforme à Pro, à partir du kilomètre ($x_0 + \Delta x$) et jusqu'au récepteur, nous utilisons le profil Pr. La transition qui se fait sur Δx kilomètres correspond à une variation linéaire de h_0 ou ΔN . Nous faisons varier x_0 (position du gradient horizontal le long de la liaison) et Δx (étendue horizontale du gradient). L'émetteur est situé à 70 mètres du sol.

Nous avons choisi d'étudier l'impact de ces gradients horizontaux sur la zone de l'espace où plusieurs rayons arrivent simultanément. Ce n'est qu'une mesure incomplète de l'effet des variations d'indice modélisées puisqu'elle n'inclue pas les amplitudes et temps de propagation des différents rayons. Cependant, elle est suffisante pour savoir si, en un point donné, il y a trajets multiples ou non et , par conséquent, si le signal transmis est perturbé ou non.

Les résultats expérimentaux des chapitres V et VI sont utilisés pour donner aux gradients horizontaux des ordres de grandeurs raisonnables.

1 - Gradient horizontal dû à un changement dans la hauteur de la couche (h_0)

Nous appuyant sur ce qui a été observé lors de la nuit du 13 au 14 Juin, nous considérons tout d'abord une variation horizontale d'indice due à une variation de la hauteur de la couche superréfractante. Partant du profil typique (Pro) pour lequel $h_0 = 125\text{m}$, nous utilisons un deuxième profil (Pr1) qui ne diffère du précédent que par la hauteur de sa couche qui se situe à 150 mètres du sol. La variation horizontale d'indice est effective entre 75 et 200 mètres de hauteur et atteint son maximum de 7 unités-N à 137,5 mètres. Pour chaque situation, nous avons représenté les différentes zones de trajets multiples et nous avons indiqué le nombre de rayons interférant.

A condition de ne pas tenir compte des rayons réfléchis par le sol, nous obtenons toujours un nombre impair de rayons (3, 5 ou 7, pour les situations analysées). On comprend en effet que, pour un angle d'émission suffisamment faible, le rayon parvient dans le plan récepteur au niveau du sol et que, pour des angles très grands, les trajectoires atteignent des hauteurs de plus en plus élevées. Un exemple particulier, qui correspond à ce qui est obtenu figure 54 pour $x_0 = 25 \text{ km}$, nous permet d'illustrer ces propos. Pour une situation donnée, nous avons observé ce qui se passe dans un plan vertical perpendiculaire à l'axe de la liaison. Pour chacun des plans (défini par sa distance à l'émetteur), nous avons représenté, figure 53, la hauteur d'arrivée des rayons en fonction de leur angle de départ.

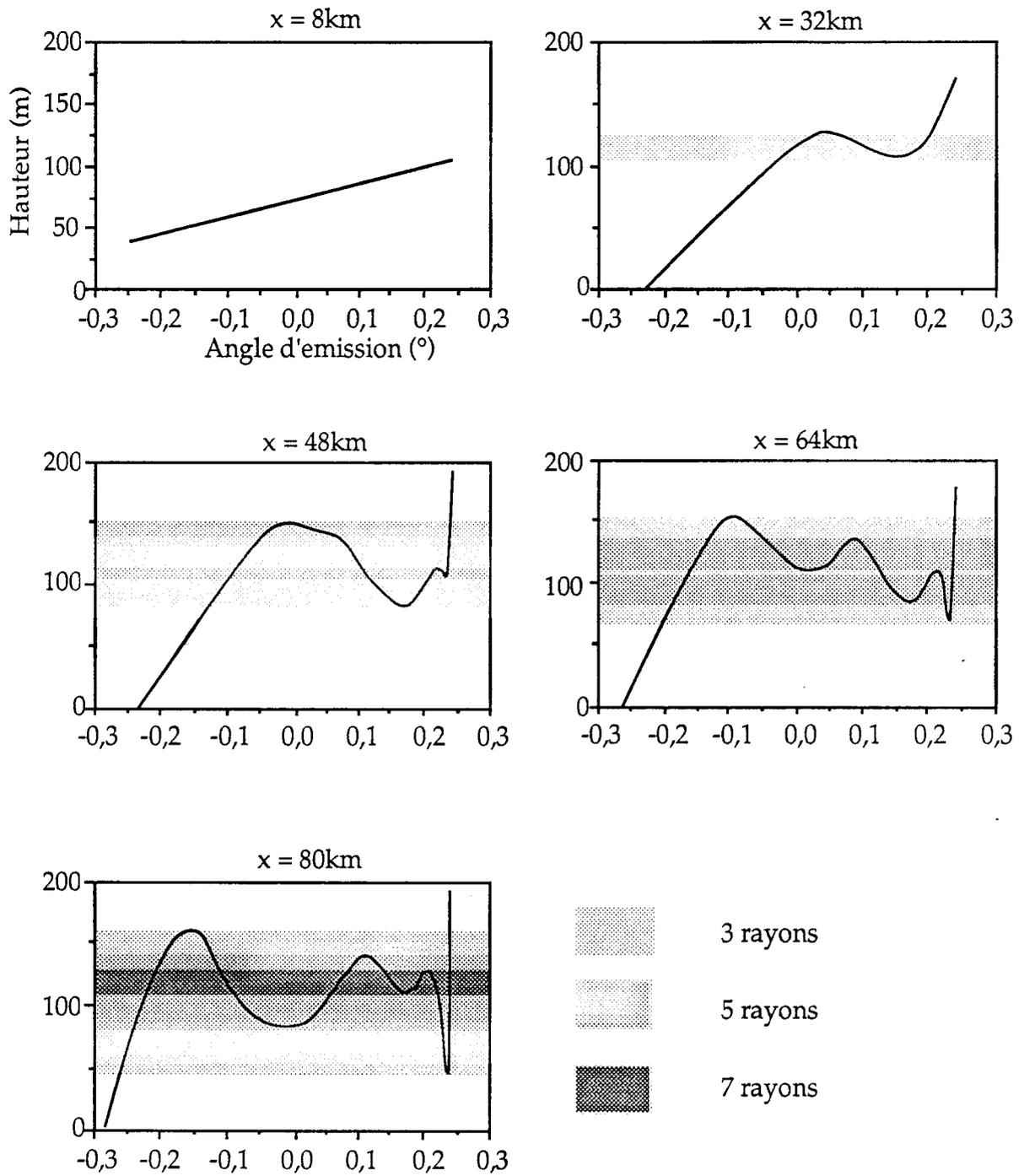


Figure 53 : Hauteur d'arrivée du rayon en fonction de son angle de départ, la distance x représente la distance entre le plan d'observation et l'émetteur.

1.1 - Influence de la position du gradient (x_0).

Nous faisons varier la position x_0 de la transition entre les deux profils en conservant l'extension horizontale du gradient constante $\Delta x = 5\text{km}$.

L'ensemble des graphes de la figure 54 montre que, lorsque le gradient se déplace, la forme et la position de la zone affectée par les trajets multiples évoluent.

Selon la valeur de x_0 , le nombre de rayons interférant peut passer de 3 à 7, alors que chacun des deux profils considéré séparément sur toute la longueur de la liaison ne génère, dans la même portion de l'espace, qu'une zone à trois rayons. De façon générale, pour un bond hertzien d'une cinquantaine de kilomètres, un profil vertical d'indice réaliste à une couche ne donne que trois trajets différents entre l'émetteur et récepteur. Or, les expériences de mesures d'angle d'arrivée montrent parfois l'existence de 5, 7, voire 9 rayons au niveau du récepteur. Les résultats que nous avons obtenus en faisant intervenir des gradients horizontaux fournissent une interprétation possible de ces résultats expérimentaux.

Nous avons porté, comme repère, sur chacun des graphes le point X situé à 50 kilomètres de l'émetteur et à 70 mètres du sol. Ce point se trouve à l'intérieur ou à l'extérieur de la zone de trajets multiples selon la valeur prise par x_0 . On voit que le déplacement d'une discontinuité de ce genre peut rapidement déformer la zone de trajets multiples et expliquer l'alternance entre des moments de propagation normale et des périodes de trajets multiples.

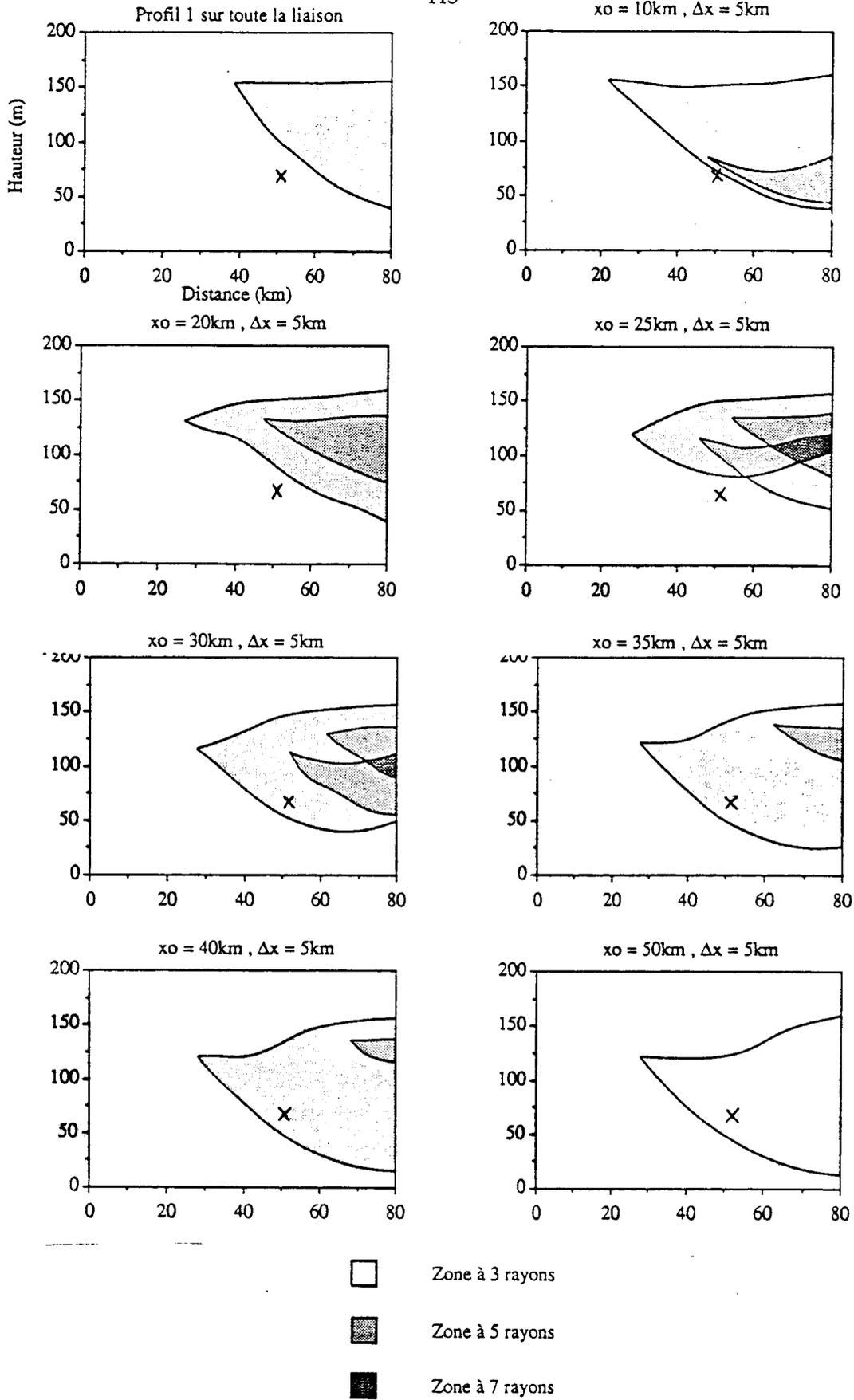


Figure 54 : Influence de position du gradient horizontal d'indice provoqué par une élévation de la couche superréfractante entre les kilomètres x_0 et $x_0 + \Delta x$.

1.2 - Influence de l'étendue du domaine de variations horizontales d'indice (Δx)

Nous plaçant a x_0 fixé, nous faisons maintenant varier la distance Δx sur laquelle a lieu la transition. Les zones de trajets multiples obtenues en faisant varier Δx de 2,5 à 17,5 kilomètres sont regroupées sur la figure 55. Les changements très faibles d'une figure à l'autre, semblent n'intervenir que sur l'importance de la zone à 5 rayons. La portion de l'espace où il y a des trajets multiples reste quasiment inchangée.

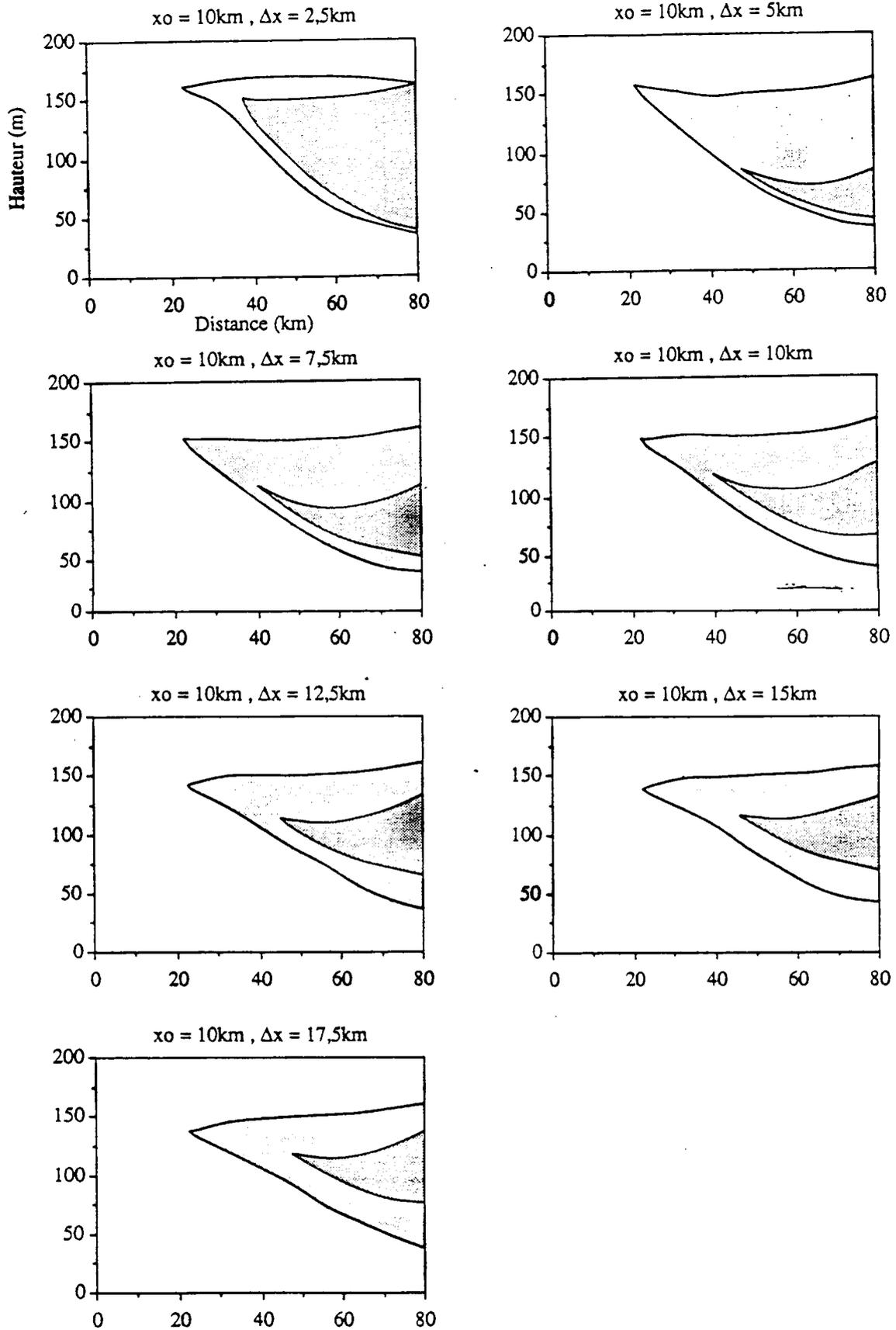


Figure 55 : Influence de l'extension horizontale du gradient provoqué par un changement de hauteur de la couche superréfractante.

2 - Influence d'un gradient horizontal dû à une variation dans l'intensité de la couche (ΔN)

Nous avons étudié l'influence d'un gradient horizontal d'indice provoqué par l'élévation de la hauteur de la couche. Nous nous intéressons maintenant à l'effet produit par un changement de l'intensité (ΔN) de la couche.

Nous partons du profil (Pr0) utilisé dans le paragraphe précédent. Le profil (Pr2) se différencie de celui-ci par sa valeur $\Delta N = -40$ unités-N (contre -20 pour Pr0). La variation horizontale d'indice qui correspond à la transition entre les deux profils est localisée entre 75 et 175 mètres et atteint sa valeur maximale de 20 unités-N au centre de la couche, soit à 125 mètres.

Les résultats des simulations sont présentés figure 56. On remarque que la zone affectée par les trajets multiples est quasiment la même que l'on considère une situation horizontalement homogène sur toute la liaison donnée par le profil Pr0 ou le profil Pr2. Il va de soi que le signal transmis n'est cependant pas le même dans les deux cas, car il dépend non seulement du nombre des rayons mais surtout de l'amplitude et du temps de propagation de ceux-ci.

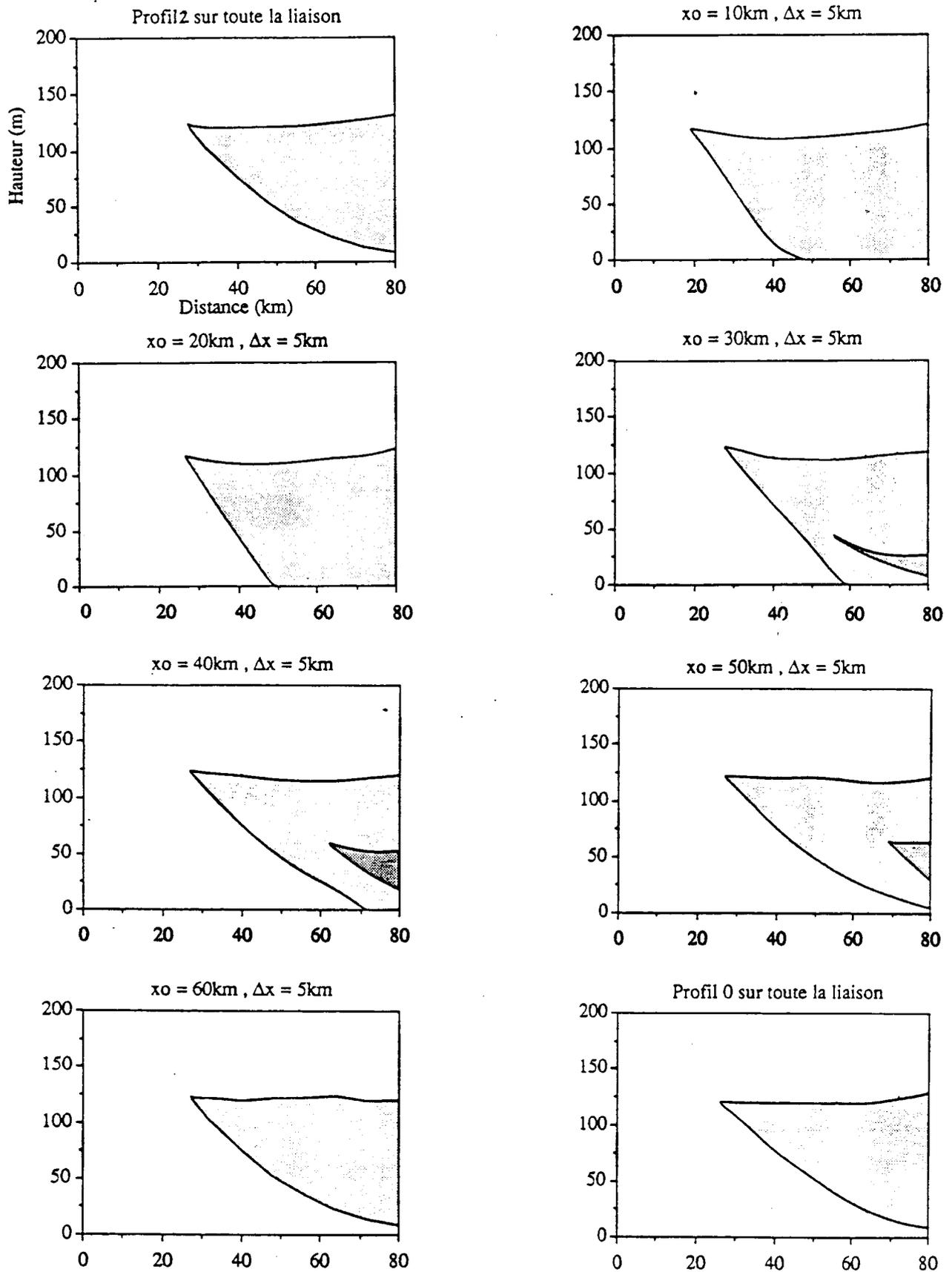


Figure 56 : Influence de la position du gradient horizontal d'indice provoqué par un changement d'intensité de la couche superréfractante entre x_0 et $x_0 + \Delta x$.

On voit qu'entre les situations extrêmes qui donnent la même zone de trajets multiples, la zone intéressée se déforme faisant même apparaître pour certaines valeurs de x_0 une portion de l'espace où 5 rayons interfèrent. Si nous focalisons notre attention sur ce qui se passe à cinquante mètres de l'émetteur, nous nous apercevons que, pour des valeurs de x_0 comprises entre 10 et 20 kilomètres, il y a trajets multiples entre le sol et 125 mètres environ alors que les autres valeurs de x_0 ne donnent de trajets multiples qu'à partir de 50 mètres au dessus du sol.

L'étude de l'influence Δx n'a pas fait apparaître de changements sensibles dans la zone de trajets multiples.

3 - Conclusion

De façon très générale, les simulations effectuées avec ou sans gradient horizontal d'indice de réfraction montre que l'extension verticale de la zone de trajets multiples augmente avec la distance à l'émetteur. Ce qui est conforme avec les lois statistiques qui ont été établies d'après des données d'affaiblissement du signal radioélectrique. Les formules obtenues montrent que la probabilité d'avoir un affaiblissement d'une certaine profondeur est proportionnelle à la distance émetteur - récepteur à une puissance proche de 3 (CCIR, 1986). Les quelques résultats présentés dans ce chapitre montrent qu'un gradient horizontal de l'ordre de ceux que nous avons observés, peut déformer la zone de trajets multiples et même augmenter le nombre de rayons parvenant en un point.

D'après les simulations faites, un changement de hauteur de la couche superréfractante a plus de conséquences sur l'extension de la zone de trajets multiples qu'un changement d'intensité. Nous avons montré également que la forme de la zone est plus sensible à la position du gradient horizontal d'indice qu'à son extension horizontale.

Nous avons déjà vu, au cours de nos deux études de cas, (chapitre VIII) que la prise en compte des variations horizontales d'indice était nécessaire pour donner une interprétation la plus complète possible des phénomènes radio observés. Les résultats obtenus dans ce chapitre à l'aide de modèles simples ont globalement confirmé le rôle que peuvent jouer de tels gradients.

IX - Conclusions et perspectives

Au cours de l'expérience PACEM 3, nous avons sélectionné deux nuits qui présentaient de longues périodes de propagation anormale et pour lesquelles nous disposons de mesures météorologiques aéroportées permettant d'aborder l'analyse de la structure à deux dimensions de la réfraction atmosphérique.

Pendant la première nuit (celle du 13 au 14 Juin), les conditions de propagation déduites des fonctions de transfert mesurées sur 1 GHz, se modifient relativement lentement, à l'échelle de la dizaine de minutes : on observe en effet des périodes d'affaiblissement de plusieurs dizaines de minutes au cours desquelles le minimum d'atténuation dans la bande et la fréquence à laquelle il se produit évoluent très peu. Au contraire, la seconde nuit (23 au 24 Juin) se caractérise par une succession d'évanouissements sélectifs très profonds et très brefs (quelques secondes), séparés par des périodes de surchamp.

Pour chacune des deux nuits, nous avons schématiquement restitué, à l'aide des données recueillies par le ballon captif et l'avion instrumenté, la structure d'indice de réfraction de l'air en deux dimensions. Outre les gradients verticaux d'indice observés qui étaient tout à fait en accord avec les profils que l'on trouve dans la littérature associés à la présence de trajets multiples, nous avons mis en évidence des variations horizontales d'indice. Dans les deux cas étudiés, l'ordre de grandeur de celles-ci étaient de 10 à 15 unités-N sur environ 5 kilomètres. L'ensemble des données météorologiques a permis de décrire les conditions météorologiques à l'échelle de la liaison et de découvrir les mécanismes physiques à l'origine des variations horizontales observées (circulation du flux d'air au dessus de la liaison pour la première nuit et passage d'une masse d'air plus humide que l'air ambiant pour la seconde). Lors de la première nuit, nous avons également remarqué des fluctuations d'indice de petite échelle, vraisemblablement liées à l'existence d'ondes de gravité.

Ces résultats sont importants car si l'influence des variations horizontales d'indice sur la propagation a été souvent invoquée, en particulier pour expliquer que la mesure du profil vertical en un point ne rende pas compte des phénomènes radioélectriques, les difficultés expérimentales rendent le nombre de données expérimentales disponibles particulièrement

faible.

Pour étudier l'influence des structures observées sur la propagation des ondes, nous avons utilisé un programme qui, à partir d'une distribution d'indice bi-dimensionnelle, simule la propagation des ondes hertziennes dans le milieu. Les résultats obtenus ont montré que la connaissance du profil vertical en un point permet de prévoir, en fonction de la position de l'émetteur, si il y a possibilité ou non de trajets multiples. Bien que les gradients horizontaux soient beaucoup moins intenses, le fait qu'ils agissent sur des portions plus longues de la trajectoire des ondes rend nécessaire leur prise en compte lorsqu'on veut rendre compte de façon plus détaillée des effets observés sur un bond donné.

La structure bidimensionnelle de la réfractivité atmosphérique nous a permis d'interpréter les observations radioélectriques effectuées durant les deux nuits de manière beaucoup plus satisfaisante que si nous n'avions eu que la seule connaissance du profil vertical d'indice fourni par le ballon.

Pour la seconde nuit, qui s'y prêtait particulièrement bien nous avons pu faire une étude dynamique des phénomènes. Nous avons reconstitué le déplacement de la perturbation et nous avons calculé pas à pas par simulation numérique l'évolution de l'amplitude du signal reçu. Le résultat des simulations a montré d'importantes similitudes avec les données recueillies par le M.L.A.

De manière plus générale, disposant grâce à nos mesures de valeurs réalistes pour l'intensité et l'extension des régions à gradients horizontaux d'indice, nous avons pu aborder plus systématiquement l'étude des effets de telles structures sur la propagation.

Nos résultats ne sont que préliminaires, dans la mesure où nous n'avons étudié que l'effet de quelques paramètres d'un modèle d'indice très simple, et où nous nous sommes concentrée sur les variations de l'étendue de la zone de l'espace où il y a des trajets multiples. Nos résultats ont cependant montré que dans la zone en question le nombre de rayons observés varie notablement et qu'ils sont particulièrement sensibles à la position le long de la liaison d'un changement de hauteur d'une couche superréfractante. Cette étude demande évidemment à être poursuivie mais il serait bon de disposer d'un plus grand nombre de cas d'expériences afin d'avoir une idée des variations possibles de situations réelles.

L'étape suivante est de caractériser les conséquences de ces situations sur la fonction de transfert du canal, en généralisant l'étude ébauchée au § VIII-2.2 dans l'analyse d'un cas particulier.

En ce qui concerne la réalisation pratique des expériences, nous avons vu dans les chapitres consacrés à la description de l'expérience et au traitement des données, les nombreux problèmes rencontrés. Le premier concerne l'utilisation de deux ensembles de capteurs différents (ballon et avion). Les recalages auxquels nous avons dû procéder ne sont pas tout à fait satisfaisants. Si ce genre de difficultés est inhérent à tout emploi de capteurs multiples, nous devons faire face à une situation particulièrement critique du fait de la précision désirée pour notre étude, qui est à la limite de ce que peuvent fournir les capteurs existants. Le problème des constantes de temps trop longues de certains capteurs est également pénalisant, surtout quand les phénomènes considérés sont très sensibles aux gradients des quantités mesurées.

Un second ensemble de problèmes concerne le recours à un avion instrumenté. L'avion, surtout de nuit, peut difficilement voler à des hauteurs inférieures à une centaine de mètres. Or, les profils verticaux mesurés par le ballon ont montré que l'humidité comme la température variaient de façon importante précisément dans la première centaine de mètres. Il serait donc intéressant d'avoir accès à des mesures horizontales dans ce domaine, d'autant plus que la propagation des ondes y a lieu en grande partie. Même si les couches superréfractantes responsables des trajets multiples sont plus hautes, la simulation de la figure 1 du chapitre VIII montre l'effet manifeste d'une couche superréfractante basse sur les rayons réfléchis par le sol. Les hypothèses que nous avons été amenée à faire pour prendre un modèle d'indice raisonnable (chapitre VIII) mettent en évidence les lacunes de l'expérience sur ce point.

Par ailleurs, le fonctionnement sur alerte d'un avion localisé à plus d'une heure de vol du site expérimental s'est avéré d'une mise en œuvre assez lourde et explique en partie le petit nombre de cas enregistrés.

Ainsi, malgré le caractère prometteur des résultats de PACEM 3, qui ont bien permis de mettre en évidence les variations horizontales d'indice et leur importance potentielle sur les liaisons, des développements instrumentaux semblent maintenant nécessaires pour pouvoir étudier ces phénomènes de façon plus systématique.

Le problème des constantes de temps trop longues de certains appareils

et celui de l'incertitude importante sur la valeur d'indice pourraient être résolus par l'utilisation d'un réfractomètre hyperfréquence, qui fournit directement l'indice de réfraction de l'air à partir de la mesure de la fréquence de résonance d'une cavité hyperfréquence. Un tel appareil fait actuellement l'objet d'un contrat entre le CNET et l'ONERA-CERT.

D'un point de vue plus logistique, nous envisageons actuellement d'utiliser un hélicoptère instrumenté qui nous permettrait d'obtenir le long de la liaison des points de mesures même très près du sol, dans des conditions d'emploi beaucoup plus souples que celles d'un avion.

Nous avons d'ores et déjà procédé à des essais de faisabilité au voisinage d'un mât instrumenté, en particulier pour vérifier que le mouvement des pales de l'hélicoptère ne perturbe pas les mesures. Les résultats partiels semblent montrer qu'avec certaines précautions (vitesse de l'hélicoptère par rapport au vent, vitesse verticale de l'hélicoptère, ...) les mesures de température et d'humidité sont correctes. Le suivi de ces développements instrumentaux, en particulier la mise en œuvre du réfractomètre sur hélicoptère, puis la définition, le suivi et l'interprétation des prochaines campagnes de mesure constitue donc la suite logique de notre travail.

Bibliographie

- ANDRE M. (1985). L'avion plateforme de mesures atmosphériques. Note de travail de l'Etablissement d'Etudes et de Recherches Météorologiques, n° 130.
- BORN er WOLF (1964). Principles of optcs. Ch. 3. Pergamon.
- CLAVERIE J. et KLAPISZ C. (1985). Meteorological features leading to multipath propagation observed in the PACEM experiment. Ann. Télécomm., 40, n° 11-12, pp. 660-671.
- CRAIG K. H. et G. R. KENNEDY (1987). Studies of multipath propagation on a microwave line-of-sight link. Proc. European Conference, Rome, Italy, pp. 523-528.
- CRAIN C. M. (1955). Survey of airborne refractometer measurements. Proc. I.R.E., 43, pp. 1405-1411.
- CRAWFORD A. B. et W. C. JAKES (1952). Selective fading of microwaves. B.S.T.J., 31, n° 1, pp. 68-90.
- CRAWFORD A. B. et W.M. SHARPLESS (1946). Further observations of the angle of arrival of microwaves. Proc. I.R.E., 34, pp. 845-848.
- DOUGHERTY H. T. (1968). A survey of microwave fading mechanisms, remedies and applications. ESSA Technical Report ERL-69-WPL-4.
- EYMARD L. et A. WEILL (1979). A study of gravity waves in the planetary boundary layer by acoustic sounding. Boundary Layer Meteorology, 17, pp.231-245.
- GOLE P., M.SYLVAIN et T. GHAHREMANI (1988). Long-term multipath effects on a space-diversity channel. Proc. ISRP., Beijing, pp.464-467.
- GOSSARD E.E. et W.H. HOOKE (1975). Developments in atmospheric science 2-

Waves in the atmosphere, pp. 66-69 et 111-116.

IKEGAMI F. (1967). Analyses of microwave fading due to laminar structure of atmospheric refractive index. Rev. of the Elec. Comm. Lab., 15, n°7-8, pp.483-506.

KLAPISZ C. et A. WEILL (1985). Modélisation semi-empirique de la couche limite nocturne. Application au calcul du profil d'indice de réfraction. Ann. Télécommun., 40, n°11-12, pp.672-679.

SHARPLESS W.M. (1946). Measurement of the angle of arrival of microwaves Proc. I.R.E., 34, pp. 837-845.

SYLVAIN M. et al. (1983). The PACEM experiment on line-of-sight multipath propagation, Eur. Space Agency Spe. Publ., ESA SP-194, pp. 13-23.

SYLVAIN M. et J.P. JOUVEAU (1985). mise en œuvre d'un programme de tracé de rayons. Note technique C.R.P.E. /139.

YAMADA T. (1978). Prediction of the nocturnal surface inversion height. Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 35.

VICKERS W.W. et M.E. LOPEZ (1975). Low angle radar tracking errors induced by nonstratified atmospheric anomalies. Radio Science, 10, n° 5, pp. 491-505.

WEBSTER A.R. (1982). Raypath parameters in tropospheric multipath propagation. IEEE Trans. on Ant. and Propag., AP 30, n° 4, pp. 796-800.

WONG M. S. (1958). Refraction anomalies in airborne propagation. Proceedings of the IRE, September, pp. 1628-1638.