



HAL
open science

Description du projet PACEM d'étude de propagation en air clair

C. Klapisz, B. Nutten, M. Sylvain

► **To cite this version:**

C. Klapisz, B. Nutten, M. Sylvain. Description du projet PACEM d'étude de propagation en air clair. [Rapport de recherche] Centre de recherches en physique de l'environnement terrestre et planétaire (CRPE). 1982, 43 p., figures. hal-02191790

HAL Id: hal-02191790

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02191790>

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.

RP 182
(50)

**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 / 111**

**DESCRIPTION DU PROJET PACEM
D'ETUDE DE PROPAGATION EN AIR CLAIR**

145
120

Par

C.KLAPISZ B.NUTTEN & M.SYLVAIN.

B

- 2 JUI



DIFFUSION

CNET

DIRECTION

VINCENT CARREFOUR

PARIS A

PAA-ATR
TWAL

PAA-CLC
LUPORSI

PAA-DIR
GUIBERT

PARIS B

PAB-DIR
DUBOS
BOITHIAS
EYMARD
SOULIER

PAB-ETR
LOMBARD
BENOIT-GUYOD
DELMAS (3)
FERNANDEZ

PAB-STC
LECLERC
SARTRE
SECRETARIAT (2)

PAB-RPE

REVAH
BAUER
BAUDIN
BLANC
BERTHELIER
DECHAMBRE
DELAHAYE
DUHAMEL
GENDRIN
JUY
KLAPISZ
LAVERGNAT

MAYRARGUE
MON
MOUPFOUMA
NUTTEN
OLIVIER
ROORYCK
SAUVAGET (11)
SPANJAARD
SYLVAIN
TESTUD
TIFFON
TRESSENS
VIDAL MADJAR

BIBLIOTHEQUES
ISSY (5)
ST MAUR (2)

LANNION A

LAA-ELR
CARON
DJEBARI
FOURNIER

LANNION B

LAB-DIR
BLANQUART

LAB-ICM
MOTTET

LAB-MER
DUPUIS
MARTIN
RENAN
TRAMBLAY
SECRETARIAT (TSF) (4)
SECRETARIAT (MLS)

LAB-ROC
CHOUAN

LAB-SEB
ARCHAMBAULT
KERSALE

GRENOBLE

DEMOULIN

BIBLIOTHEQUE

SDI ISSY (2)
EDB LANNION

EXTERIEUR

BIBLIOTHEQUE

CNRS
INAG

DTRN-BLAGNAC

ESPINASSE (3)
PIGNAL

SERVICE D'AERONOMIE

BLAMONT
MEGIE (3)

DTRN-VILLECRESNE

GRAND GERRARD (5)

CENTRE EDF CHATOU

CAHEN (3)
DESSUS
LESNE

DTR

SECRETARIAT
BERCENAY EN OTHE

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

NOTE TECHNIQUE CRPE/111

**DESCRIPTION DU PROJET PACEM
D'ETUDE DE PROPAGATION EN AIR CLAIR**

par

C. KLAPISZ, B. NUTTEN et M. SYLVAIN

RPE/BAP
Echelon Issy
3 Avenue de la République
92131 Issy-les-Moulineaux

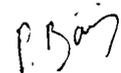
Le Directeur Adjoint



I. REVAH

Le Responsable de l'Echelon

CRPE/Issy



P. BAUER

Février 1982



EXPERIENCE PACEM

Propagation en air clair et météorologie

La présente note décrit le programme d'études du CRPE concernant les perturbations apportées aux propagations hertziennes en l'absence de précipitations. Du fait de l'influence décisive des conditions météorologiques dans l'apparition de ces perturbations, ce programme a été dénommé

Propagation en Air Clair Et Météorologie

(P A C E M).

1. OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

1.1. Généralités

Il est connu depuis les années 40 (CRAWFORD and SHARPLESS, 1946 ; DE LANGE, 1952 ; CRAWFORD and JAKES, 1952) que la propagation en visibilité directe à des fréquences supérieures ou égales à 1 GHz s'accompagne parfois d'évanouissements rapides et très profonds. Ces perturbations sont généralement interprétées par l'existence, du fait de la structure de l'indice de réfraction de l'air dans les premières centaines de mètres d'altitude, de plusieurs trajets simultanés entre l'émetteur et le récepteur. Il en résulte d'une part des distorsions de l'affaiblissement et du temps de groupe en fonction de la fréquence, d'autre part une diminution du découplage de polarisation. Les études du CRPE que nous décrivons ici ne prennent pas en compte pour l'immédiat l'aspect polarisation.

L'intérêt suscité par ce type de phénomène n'a fait que croître au cours des dernières années pour trois raisons essentielles :

- la tendance des organismes de télécommunications à utiliser des fréquences toujours plus élevées, et de ce fait plus affectées par ce type de perturbation.

- le développement des transmissions numériques qui s'avèrent beaucoup plus vulnérables que les transmissions analogiques à des effets sélectifs.

- la recherche de transmissions à haut débit d'information, donc à grande longueur de bande, ce qui contribue à aggraver encore la situation.

Il est donc très important de bien comprendre le phénomène afin de pouvoir d'une part prévoir ses effets dans le cadre d'une liaison hypothétique dont les paramètres diffèrent de celles déjà étudiées, d'autre part rechercher les moyens les plus efficaces d'en corriger les conséquences.



1.2. Etudes antérieures. (Pour une synthèse, cf. STEPHANSEN, 1981).

1.2.1. Statistiques des niveaux reçus.

Un premier type d'étude du phénomène consiste en une analyse de ses propriétés statistiques (LIN, 1971 ; BARNETT, 1972 ; DERENNES, 1979 ; BOITHIAS, 1981 ; BERGMANN, 1981).

- probabilité d'occurrence des niveaux d'affaiblissement
- variations diurnes et saisonnières
- fonctions de répartition du nombre et de la durée des événements
- influence des autres paramètres tels la fréquence, la longueur du trajet.

Toutefois, si ces études conduisent à des résultats permettant certaines prévisions, elles sont insuffisantes dans le cas des transmissions numériques car elles ne rendent pas compte du phénomène de sélectivité.

1.2.2. Modélisation de la fonction de transfert.

Une seconde approche consiste à déterminer la fonction de transfert $H(\omega)$ dont la connaissance complète caractériserait entièrement le canal de transmission. En pratique celle-ci n'est jamais déterminée que sur une bande de fréquence limitée. Il est possible de la représenter par des fonctions mathématiques comportant un nombre réduit de paramètres. On peut ensuite, à l'aide de mesures relatives à une liaison particulière, déterminer les propriétés statistiques des paramètres du modèle. On peut enfin, pour des valeurs des paramètres et un type donné de modulation, calculer ou simuler la probabilité d'erreur de détection à la réception (ROORYCK, 1979 ; RUMMLER, 1979 et 1980 ; LUNDGREN et RUMMLER, 1979 ; GREENSTEIN et CZEKAJ, 1980 et 1981).

Malgré un intérêt indéniable, cette approche présente quelques faiblesses :

Les situations de propagation anormales résultent donc d'"anomalies" de la structure de l'indice qui peuvent elles-mêmes provenir d'anomalies de température ou/et d'humidité. On souhaite en conséquence obtenir simultanément la fonction de transfert du milieu et la structure de l'indice de réfraction afin d'établir la cohérence des deux représentations. Il convient ensuite d'étudier les caractéristiques du milieu durant les périodes d'affaiblissement sélectif, de vérifier en particulier s'ils ont pour origine un effet de température ou d'humidité. Il faut enfin comprendre les mécanismes physiques responsables de cette situation en les intégrant dans un modèle d'évolution de la très basse atmosphère. On peut alors escompter obtenir une représentation statistique des conditions de propagation basée non pas sur des paramètres mathématiques mais sur des paramètres physiques (en particulier météorologiques) du lieu de la liaison. Un tel résultat, s'il était atteint, permettrait facilement à l'aide d'une campagne de mesures météorologiques préliminaire de tester "in situ" un projet de liaison.

Si les expériences sont a priori orientées vers l'étude des situations présentant des couches réfractives, généralement considérées comme la cause des affaiblissements sélectifs, le dispositif expérimental devrait également permettre de caractériser l'effet d'une structure turbulente à l'altitude de la liaison et de confirmer (ou d'infirmer) son peu d'impact sur la qualité des transmissions (STEPHANSEN, 1981).

1.4. Impératifs expérimentaux.

1.4.1. Moyens radioélectriques.

Du point de vue radioélectrique, l'étude poursuivie exige de toute évidence la disponibilité d'une liaison hertzienne équipée d'un analyseur de canal

microonde (MLA) permettant d'obtenir la fonction de transfert du milieu. Il est de plus nécessaire de pouvoir installer l'ensemble des moyens de mesure météorologiques associés au voisinage immédiat de la liaison. L'INAG disposant d'un site aménagé à VILLEAU (Eure-et-Loir), qui présente de plus l'intérêt d'être assez proche de Paris, nous avons recherché une liaison passant à proximité : celle reliant les tours de VIABON et MARCHEVILLE est de ce point de vue acceptable.

Du fait que la fonction de transfert n'est mesurée que dans une bande de fréquence de largeur B , on n'obtient pas par transformation de Fourier la réponse impulsionnelle pure mais son produit de convolution avec la transformée de Fourier de la fenêtre utilisée ; par suite, deux trajets correspondant à une différence de temps de propagation τ inférieure à environ $1/B$ ne sont plus clairement discernables et ne se manifestent plus que par un élargissement du lobe principal de la réponse impulsionnelle calculée. Il est donc d'une très grande importance de pouvoir mesurer la fonction de transfert dans une bande très large, si possible supérieure ou égale à 1 GHz, pour atteindre les rayons dont le retard est inférieur à 1 ms et qui joueraient un rôle fondamental selon des études antérieures (SANDBERG, 1978).

1.4.2. Mesure de l'indice de réfraction.

L'indice de réfraction est généralement obtenu à partir de mesures de P , T et e en appliquant la formule (1). Il est nécessaire de disposer de ces valeurs jusqu'à environ 400 m d'altitude ; le mât de l'INAG ayant une hauteur de 100 m, il est nécessaire pour les altitudes supérieures de recourir à un ballon captif. Dans un premier temps, nous admettrons que les variations verticales des divers paramètres jouent le rôle principal, mais l'emploi de plusieurs stations de mesure au sol devrait donner une première indication

quant à l'existence éventuelle de gradients horizontaux.

L'inconvénient du calcul de n par la formule (1) est la grande difficulté de mesures précises de la pression partielle de vapeur d'eau. C'est pourquoi il serait souhaitable d'obtenir une mesure indépendante de l'indice au moyen purement électrique d'un réfractomètre à cavité résonante, du genre de celui décrit par CHAN et COLE (1978).

Une autre solution consiste en l'utilisation d'un lidar. Cet appareil fournit un profil d'humidité à l'aide d'une mesure différentielle sur deux longueurs d'onde voisines situées dans l'infra rouge et dont l'une est beaucoup plus absorbée que l'autre par la vapeur d'eau.

Un tel appareil qui consiste essentiellement en un laser d'émission fournissant les impulsions de la longueur d'onde souhaitée, et un récepteur optique, constitué d'une lentille de Fresnel, ainsi que l'électronique associée, a été développé en collaboration par le Service d'Aéronomie du CNRS à Verrières et la Division des Applications de l'optique du centre EDF de Chatou. Sa participation à la campagne de l'été 1982 (cf. partie 2) dont les modalités pratiques sont à l'étude entre les services intéressés semble d'ores et déjà acquise.

Une comparaison des profils verticaux d'humidité obtenus par trois moyens de mesure différents (psychromètre du ballon, capteur à déformation du mâât, lidar) devrait permettre d'obtenir des profils satisfaisants.

Mais le plus intéressant serait d'effectuer des profils horizontaux à partir d'une des tours de la liaison afin d'obtenir une idée des gradients horizontaux. La faisabilité de cette expérience est en cours d'étude.

1.4.3. Autres mesures météorologiques.

Les mesures de pression, de température et d'humidité, destinées

en premier lieu à calculer l'indice de réfraction, ont aussi par elles-mêmes un certain intérêt météorologique. Cependant, elles décrivent l'état des basses couches de l'atmosphère plus qu'elles ne permettent d'en comprendre l'évolution. C'est pourquoi il est souhaitable de définir des moyens de mesure plus ambitieux.

En premier lieu le mât et le ballon seront munis de capteurs fournissant la vitesse et la direction du vent, donnant ainsi une description de la structure dynamique du milieu.

On sait qu'il existe la nuit et le matin une couche d'inversion de température due au comportement thermique différent du sol et de l'atmosphère. Il y a tout lieu de penser que cette couche joue un rôle fondamental dans un grand nombre de cas d'affaiblissements sélectifs. Un sodar simple permettra d'en mesurer la position avec une résolution tant spatiale que temporelle très supérieure aux autres moyens de mesure. Cet appareil a de plus l'avantage de pouvoir fonctionner en permanence de manière automatique, ce qui n'est pas le cas du ballon captif.

On utilisera aussi un minisodar Doppler actuellement en cours de mise au point, et qui doit être opérationnel pour la campagne projetée. L'emploi de cet instrument répond à plusieurs objectifs. Tout d'abord, il permettra de suivre la couche d'inversion de température aux très basses altitudes auxquelles le sodar simple n'est plus utilisable (inférieures à 50 m). Sur-tout, il donnera les profils de vent et de vitesse verticale de l'air entre le sol et 100 m.

A partir de la variance de la vitesse verticale, on peut déduire les flux de chaleur et de quantité de mouvement ; ces quantités sont elles-mêmes les données d'un modèle semi théorique du comportement des basses couches de l'atmosphère permettant de calculer l'évolution de l'altitude de la couche

d'inversion de température et celle du profil d'indice de réfraction.

Une dernière mesure d'un grand intérêt météorologique est celle du facteur de structure de température C_T , qui sera obtenue à l'aide d'une sonde emportée par le ballon. Si $T(r)$ et $T(r+dr)$ sont les températures mesurées simultanément en deux points à la même altitude et à une distance horizontale dr , on a :

$$\langle (\delta T(r) - \delta T(r+dr))^2 \rangle = \alpha_T C_T^2 dr^{2/3}$$

où le premier membre est la moyenne quadratique des fluctuations spatiales de température (égale sous l'hypothèse d'ergodicité à une moyenne temporelle), α_T est une constante connue et C_T est le facteur de structure.

La connaissance de ce paramètre permet idéalement de déterminer les flux de chaleur par deux méthodes indépendantes :

- d'une part, C_T est lié au gradient de température $\nabla_Z T$

$$C_T^2 = k_T (\nabla_Z T)^2$$

A partir de C_T et $\nabla_Z T$, on peut donc déduire la diffusivité k_T , et de là le flux de chaleur.

- d'autre part, la connaissance de C_T doit permettre d'étalonner les mesures de réflectivité du minisodar, et de remonter ainsi également au flux de chaleur.

Ainsi, en plus de ses objectifs essentiels de propagation, l'étude prévue doit permettre de remplir divers autres objectifs d'un grand intérêt pour la connaissance du milieu de propagation :

- . qualification du minisodar,
- . mesures de la distribution horizontale d'humidité,
- . collecte de données complémentaires permettant de valider les modèles du comportement de la très basse atmosphère.

1.5. Mise en oeuvre de l'expérience.

La mise en oeuvre des moyens expérimentaux propres à atteindre l'ensemble des objectifs décrits ci-dessus nécessite une infrastructure lourde tant en équipements qu'en personnel et implique la coopération de plusieurs divisions du CNET (outre le CRPE, la division ETR assure la gestion des liaisons et MER fournit l'analyseur de liaison). Il n'est donc pas envisageable de la réaliser sur une très longue période. C'est pourquoi on a prévu de porter l'effort maximum sur une campagne relativement courte, et de la faire suivre à des fins statistiques par des mesures plus légères sur une durée de l'ordre de 3 ans.

1.5.2. Campagne été 82.

La période statistiquement la plus favorable à l'observation des trajets multiples en air clair est formée des nuits d'été. On a donc retenu pour une première campagne de mesure la période mai-juillet 1982, le mois de mai étant réservé à l'étalonnage des divers instruments et les mois de juin et juillet aux mesures proprement dites.

La liaison, entre les tours de Marchéville (émission) et de Viabon (réception) sera équipée de l'analyseur de liaison à large bande développé à Lannion par L. Martin. Les moyens météorologiques, regroupés sur le site INAG de Villeau comporteront le mât instrumenté, un ballon captif, le sodar et le minisodar Doppler.

Le ballon et le minisodar, qui nécessitent une présence humaine ne fonctionneront que durant certaines périodes définies à l'avance à l'aide de critères (météorologiques) à déterminer. Les autres instruments fonctionneront en permanence.

L'objectif de cette campagne (dont les détails expérimentaux sont décrits

dans la 2ème partie) est d'obtenir un nombre suffisant de cas particuliers permettant l'étude fine des relations entre les conditions de propagation et l'état physique du canal de transmission.

Au vu des résultats une seconde campagne pourrait être mise sur pied pour une année future.

1.5.2. Campagne statistique.

Si la campagne de l'été 1982 doit apporter des indications précieuses sur la physique des phénomènes, elle est beaucoup trop courte pour permettre la mise au point d'un modèle statistique à paramètres physiques comme annoncé au § 1-3. Dans ce but, une étude sur trois ans a été définie.

Du fait de la numérisation progressive déjà programmée du réseau hertzien, il n'est pas possible de rester trois ans sur la liaison Marchéville-Viabon. Parmi les possibilités offertes par la DTRN, on a retenu une liaison entre la tour de LISSES et le site de Audeville où sera installé un pylône de réception. On se contentera cette fois-ci comme liaison d'un canal de la bande des 11 GHz équipé d'un analyseur à bande étroite du commerce. Le pylône de réception sera instrumenté en capteurs météorologiques semblables à ceux placés à Villeau pour l'été 1982.

De plus, on placera deux antennes de réception afin d'étudier l'amélioration apportée par la diversité d'espace.

Les détails de cette expérience font l'objet de la troisième partie.

1.6. Soutien logiciel.

Pour que les données de l'expérience puissent être rapidement exploitées, les outils informatiques nécessaires doivent être développés parallèlement à la préparation des expériences proprement dites.

Il s'agit tout d'abord de l'ensemble des programmes d'acquisition et de visualisation des données ; un problème particulièrement important est celui de leur synchronisation, nécessaire à des comparaisons fructueuses (cf. § 2-3).

Il faut aussi préparer un certain nombre de programmes de traitement plus mathématiques : dans la plupart des cas, il s'agit d'ailleurs plus de recenser les programmes et sous-programmes existants et de choisir les mieux adaptés que d'en écrire de nouveaux.

Les trois principaux sont :

1/ Un programme de tracés de rayons

Celui-ci fournit, sous les hypothèses de validité de l'optique géométrique, le trajet de l'énergie électromagnétique (rayon) dans un milieu d'indice connu. Le problème est mathématiquement simple (se ramenant à un calcul d'intégrale) si on se limite à un milieu à symétrie sphérique (indice fonction de la seule altitude) car la loi de Descartes donne alors directement un invariant du problème. Il est toutefois préférable, ne serait-ce que dans un but de simulation, de disposer d'un programme acceptant un indice $n(\vec{r})$ quelconque : la méthode la plus adaptée semble alors une formulation Hamiltonienne du genre de celle de Haselgrove qui se ramène du point de vue calcul à l'intégration de six équations aux dérivées partielles du premier ordre.

2/ Un programme d'ajustement par les moindres carrés pour problème non-linéaire.

Du fait de la convolution avec le filtre de réception, la transformée de Fourier de la fonction de transfert mesurée ne donne pas directement les différents rayons. Les paramètres de ceux-ci doivent donc être obtenus à partir d'un ajustement approximant au mieux les résultats de mesure.

3/ Un programme de calcul de taux d'erreur.

Le paramètre pertinent pour juger de la qualité d'une liaison numérique est le taux d'erreur ("bit error rate ou BER"). La modélisation du canal de

transmission revenant à en donner la fonction de transfert, il faut donc pouvoir en déduire le taux d'erreur dans le cas d'une liaison pour laquelle on aura spécifié le code et la modulation utilisés. Il s'agit-là d'un problème compliqué ; des programmes de calcul existent, qui s'appuient sur des hypothèses explicites ou implicites. Il convient donc de vérifier leur applicabilité au cas des trajets multiples.

Cet aspect du programme devrait bénéficier des résultats de l'étude de la liaison expérimentale Meudon-Bois de Môle à 216 M bits/s. On dispose en effet pour cette liaison simultanément d'une mesure du taux d'erreur, et d'une analyse du signal reçu dans une bande de 100 MHz. On souhaite en particulier identifier les critères pertinents de déformation du spectre corrélés au taux d'erreur.

2. LA CAMPAGNE 82

2.1. Les moyens radioélectriques : Analyseur de liaison à bande large.

A. Description de l'appareillage

L'appareil est décrit dans la note technique LAB/MER/15. La figure 1 illustre le principe de fonctionnement de l'instrument dans sa version B de bande passante la plus large.

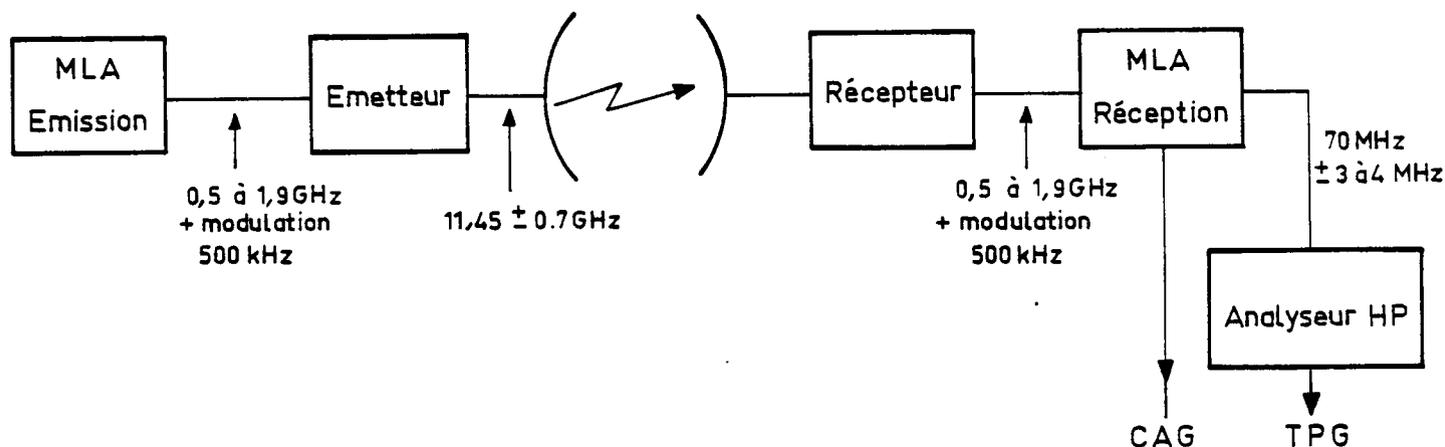


Figure : 1 Schéma général de l'ensemble analyseur à bande large

Le MLA/émission fournit une porteuse pure dont la fréquence est modulée sinusoidalement (avec une amplitude allant de ± 20 à ± 700 MHz) autour de la fréquence centrale 1,2 GHz. La fréquence de modulation est égale à 17,5 Hz dans le mode le plus fréquent.

Le pilote alimente un sous-ensemble émetteur qui transpose la fréquence autour de 11.45 GHz. Le récepteur réalise l'opération inverse et ramène la porteuse reçue dans la gamme de fonctionnement du MLA/réception, soit entre 0,5 et 1,9 GHz. Celui-ci effectue une compression du spectre de fréquence dans une bande de quelques mégahertz autour de 70 MHz. Le même sous-ensemble ramène la dynamique des échos reçus à un niveau nominal au moyen d'une commande automatique de gain (CAG) linéaire sur une dynamique étendue (70 dB). Cette commande de gain fournit, en interprétant la tension de CAG, une mesure de l'affaiblissement de la liaison, et est également utilisée pour le déclenchement de l'enregistrement.

En outre le signal délivré par le MLA/émission est affecté d'une modulation de fréquence à 500 kHz qui, après passage dans la liaison, se traduit par

la modulation de la fréquence finale voisine de 70 MHz. Un analyseur Hewlett-Packard de type HP3712 interprète cette raie de modulation en termes de temps de propagation de groupe en fonction de la fréquence de la porteuse.

B. Les performances

L'ensemble du dispositif permet la mesure simultanée, en fonction de la fréquence, dans une bande de largeur théorique égale à 1,4 GHz, de l'affaiblissement et de la distorsion de temps de groupe d'une liaison hertzienne à 11 GHz. Néanmoins, l'excursion de fréquence mentionnée est autorisée par la bande passante maximale des seuls sous-ensembles que constituent le MLA/émission, l'émetteur, le récepteur et le MLA/réception. Ces valeurs théoriques doivent en fait être réduites en raison de la distorsion de temps de propagation de groupe due aux guides d'onde et également par la bande passante de l'amplificateur à tube à ondes progressives (TOP).

En conséquence, il est nécessaire de prévoir un cycle de mesures préliminaire à l'expérience proprement dite dans le but de connaître la distorsion de temps de groupe apportée par les guides aux deux extrémités de la liaison. Le résultat de cette mesure, demandée au département ETR/PHZ qui assurera le montage des antennes, servira à déterminer la bande passante la plus grande compatible avec un fonctionnement satisfaisant de l'analyseur, l'objectif étant d'atteindre une bande de 1 GHz. L'opération correspondante d'ajustement des filtres de bande est demandée aux services techniques du centre Lannion B sous le contrôle de Louis Martin.

C. Mise en oeuvre et acquisition.

Les sites pour l'implantation des émetteur et récepteur ont été déterminés en collaboration avec le Centre d'Etude des Moyens Spéciaux. Ce sont respectivement :

- pour l'émission, la tour de Marchéville au niveau inférieur (58 m)
- pour la réception, la tour de Viabon au niveau inférieur (80 m). Ces deux sites sont distants de 36,3 km.

La figure 2 montre la géométrie et la coupe de la liaison et illustre le fort dégagement (> 50 m) du faisceau par rapport au sur-sol.

Les matériels radioélectriques hyperfréquences seront installés le plus près possible des antennes afin de rendre minimale l'influence des guides d'onde (voir aux figures 3 et 4 les schémas d'implantation sur les plates-formes).

Les signaux reçus à Viabon sont envoyés par un guide rectangulaire dans le local alloué au CNET pour la durée de l'expérience (Fig. 3). Les figures 5 et 6 illustrent la répartition des équipements sur les sites de Viabon et Marchéville. Il est à noter que ce dernier site ne dispose ni d'un ascenseur ni d'une salle de travail au sommet de la tour et que le secteur doit y être secouru au moyen d'un onduleur placé au rez-de-chaussée.

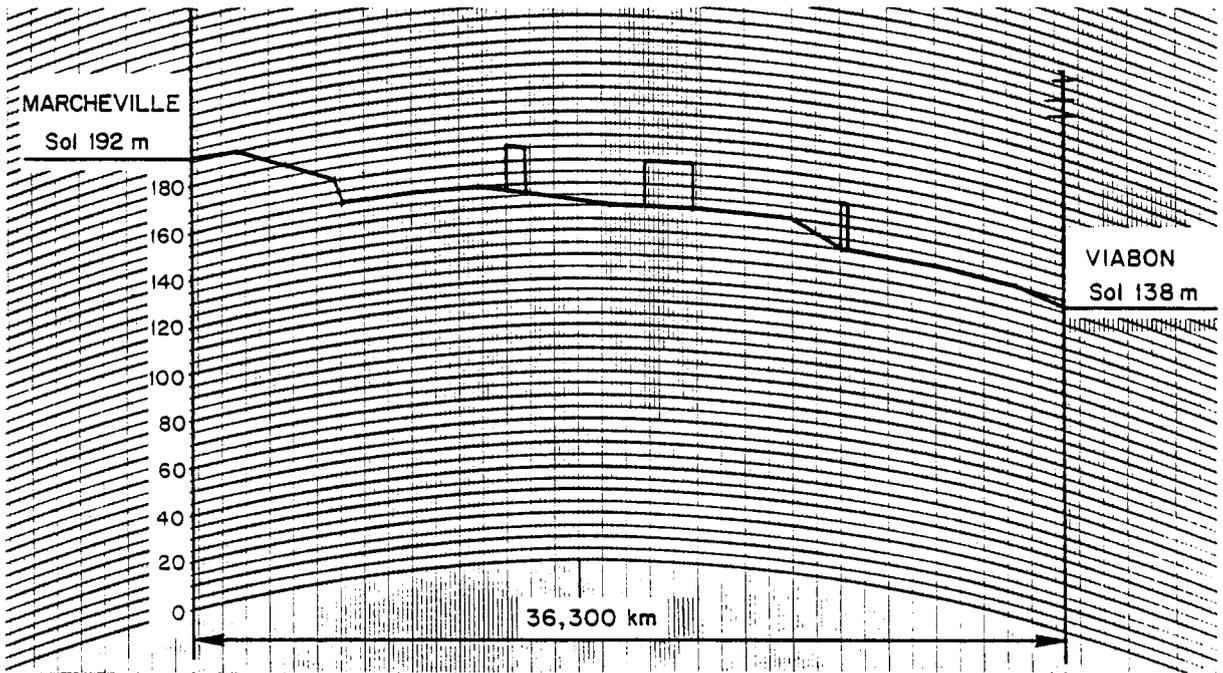
D. Contraintes d'exploitation et acquisition.

Le signal de commande automatique de gain (CAG) délivré par le MLA récepteur à bande large est enregistré sur papier en permanence.

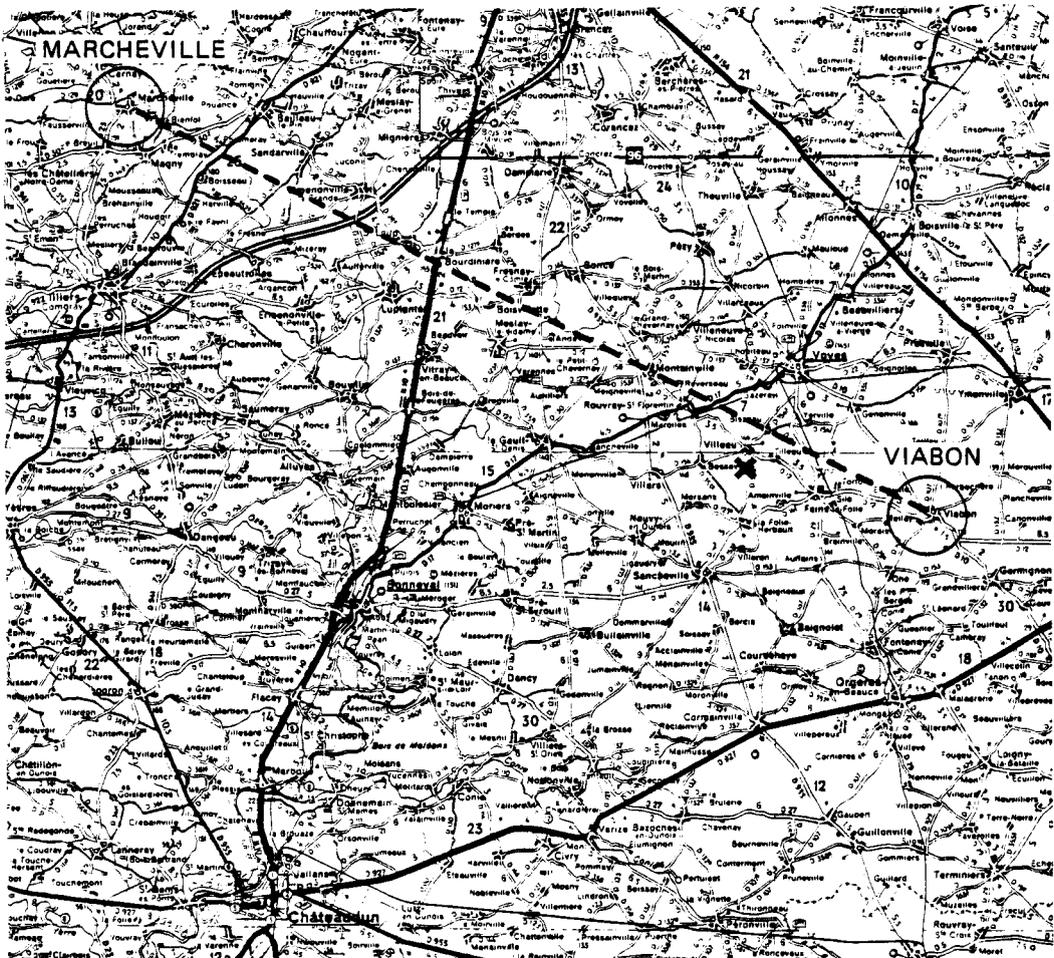
Par ailleurs, la tension de CAG est utilisée, dans un organe de décision fourni par LAB/MER, pour démarrer l'enregistrement en cas d'atténuation supérieure à un seuil donné. Une fois déclenchée, l'acquisition dure 4 ms qui sont prolongées d'autant en cas de redéclenchement au cours de cette période.

Le magnétophone analogique de type Enertec MT 5529 est équipé des 5 voies FM suivantes :

- tension de CAG représentant l'affaiblissement,
- distorsion du temps de propagation de groupe,



a)



b)

Figure 2 . Liaison Marchéville Viabon a) profil du terrain
b) carte de la région

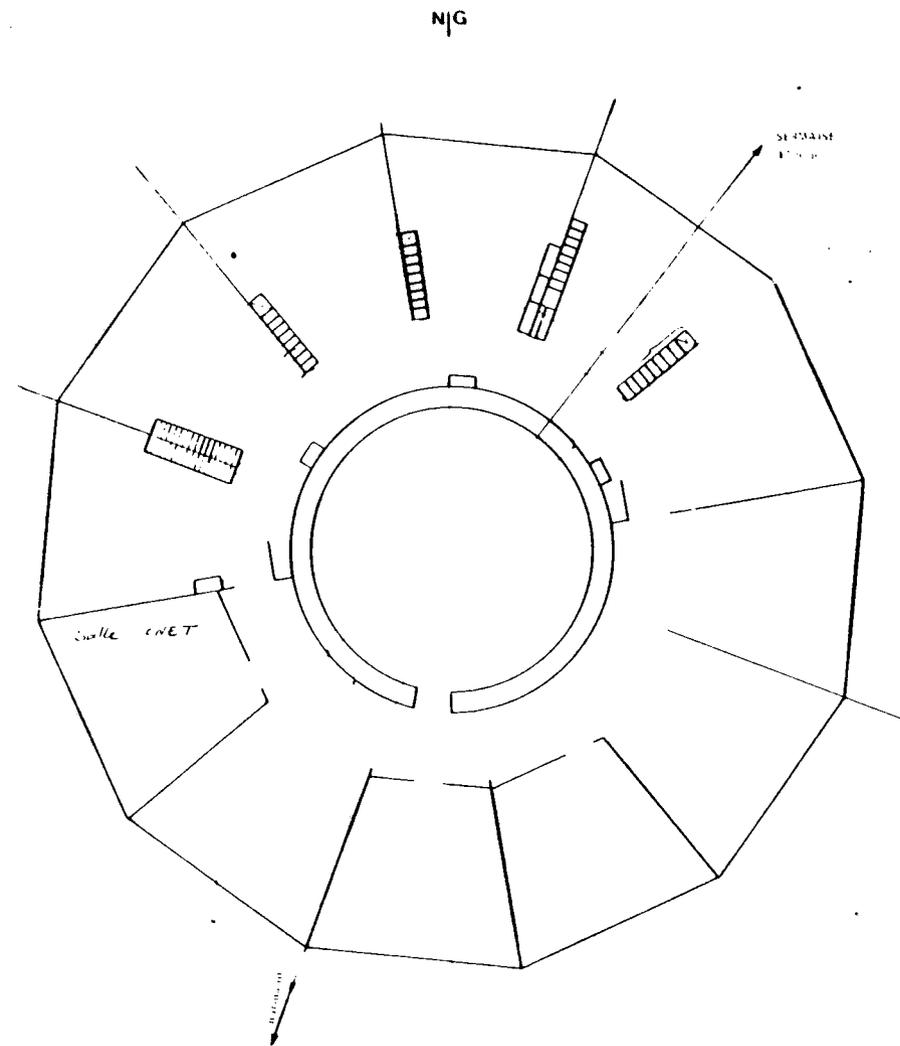
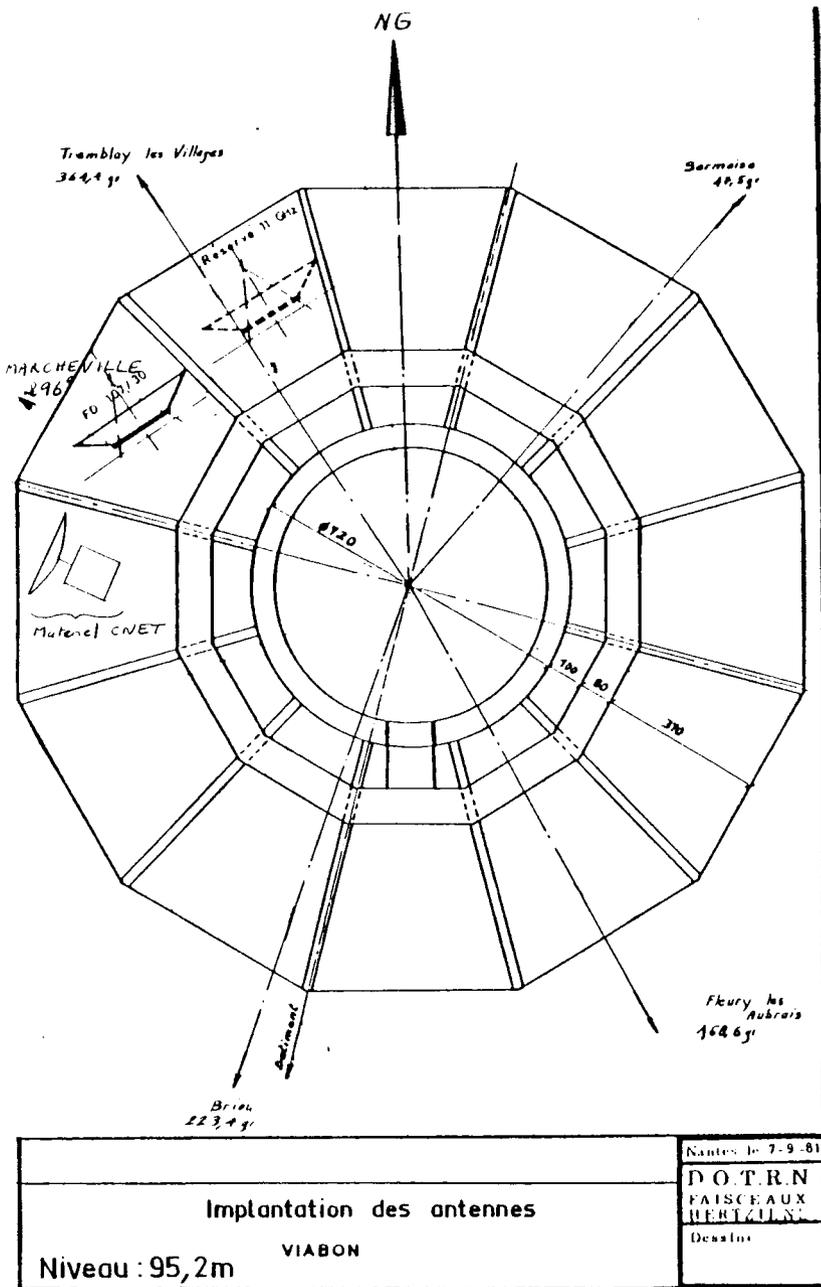


Figure : 3 Site de Viabon: Implantation des antennes (a) et plan du niveau 73 mètres (b)

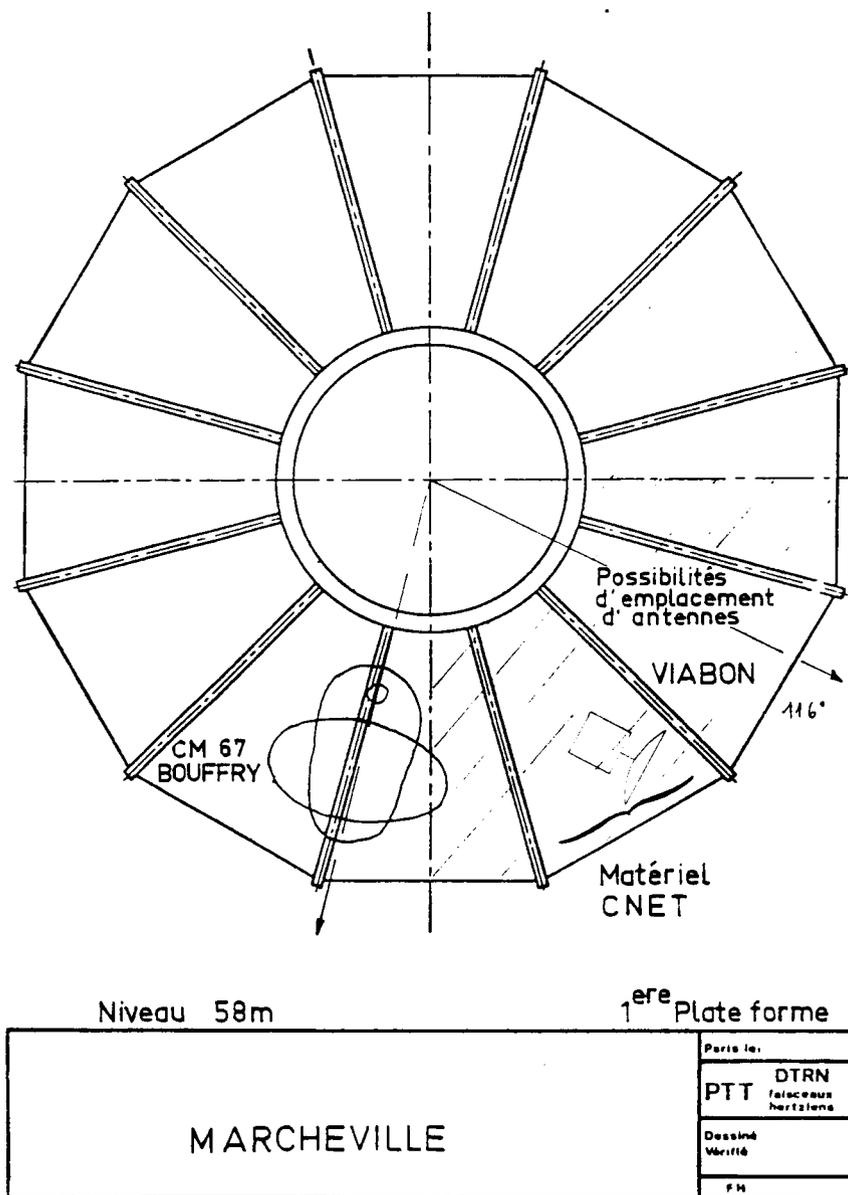


Figure: 4 Site de Marcheville : Implantation des antennes

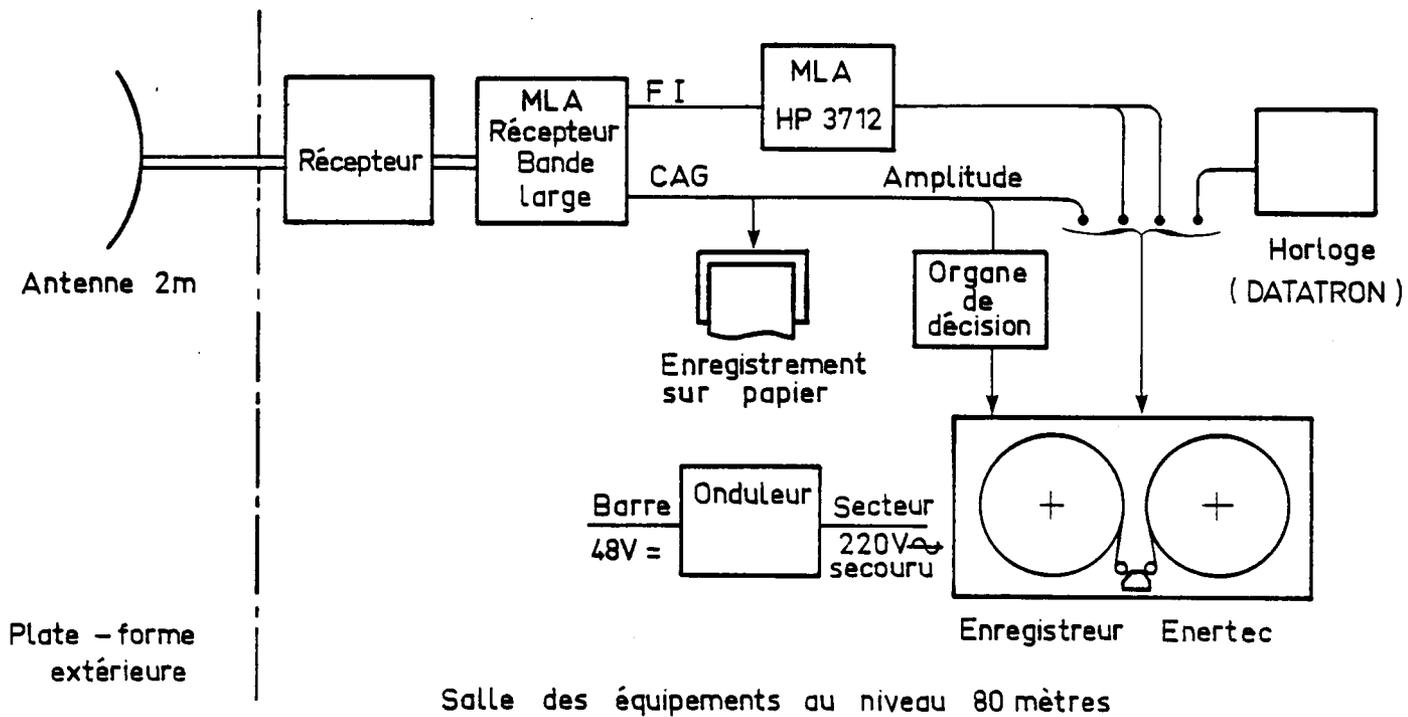


Figure : 5 Répartition des équipements sur le site de Viabon

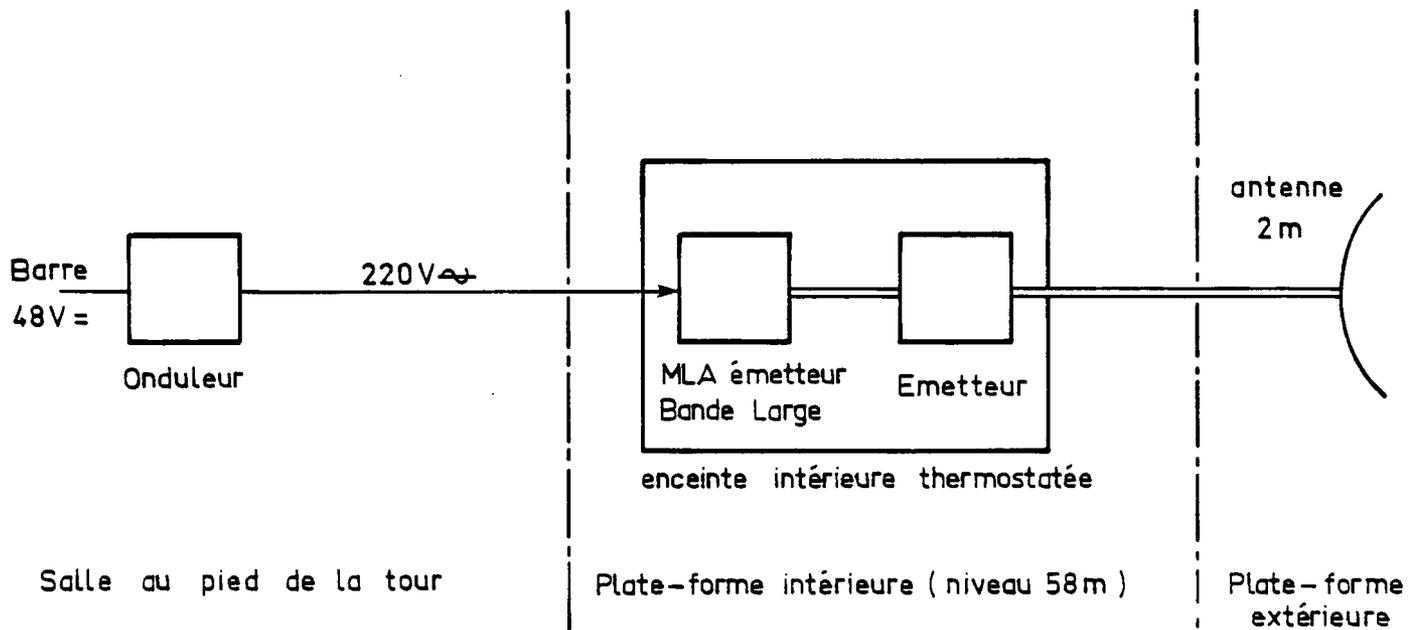


Figure : 6 Répartition des équipements sur le site de Marcheville

- sinusoïde de modulation,
- signal de validation délivré par le MLA,
- signal de datation délivré par une horloge de type Datatron (fournie par le CRPE).

L'autonomie de cet enregistreur est de 6 à 12 heures d'enregistrement continu suivant le type de bande utilisé (3600 ou 7200 pieds). L'autonomie réelle est dépendante du seuil de déclenchement et de la fréquence d'apparition des événements.

2.2. Les moyens météorologiques.

Un ensemble partiellement redondant de moyens de mesures météorologiques est mis en oeuvre sur le site de Villeau près de Voves (Eure-et-Loir) à 30 km au S.-E. de Chartres (Fig. 2). Ce site, particulièrement bien adapté à l'étude de la météorologie à échelle moyenne en raison de l'absence de relief, est connu des expérimentateurs depuis 1976 (Rapport INAG 79-01). Il sera réactivé pour la période mai-juillet 1982 afin d'y mettre en service certains instruments classiques d'observation de la couche limite planétaire (mât de 100 m, sodar simple en visée verticale, ballon captif). D'autre part, un nouvel équipement (mini sodar) fournissant des profils de vent tridimensionnel sera expérimenté.

De plus, un réfractomètre de type ancien, obtenu auprès des services de la Météorologie Nationale de Mérignac, sera remis à niveau sans que l'on puisse actuellement garantir que ses performances (précision et fiabilité) seront acceptables.

Ces divers instruments, et les contraintes opérationnelles qui s'y rattachent, sont passés en revue ci-après.

2.2.1. Le mât instrumenté du site "couche limite".

Le site de recherches atmosphériques mis en oeuvre par l'INAG est équipé d'un mât de mesure de 100 m de hauteur. L'instrumentation de ce pylône a été confiée à la Société EUROPAVIA, qui assure également la maintenance des capteurs. Les paramètres mesurés seront les suivants :

- température, vitesse et direction du vent aux niveaux 4, 6, 12, 24, 48, 72 et 96 mètres,
- humidité relative aux niveaux 4, 24, 48, 72 et 96 m,
- rayonnement solaire, pression et précipitations au niveau du sol.

Nous souhaitons activer le fonctionnement de cet équipement pendant les mois de mai, juin et juillet 1982.

L'ensemble du dispositif expérimental est résumé dans le tableau 1.

Le système d'acquisition des mesures du mât est constitué :

- d'un multiplexeur analogique développé par l'INAG,
- d'un enregistreur analogique Geotek (CRPE).

Le multiplexeur réduit le nombre de voies à enregistrer à un nombre compatible avec la capacité du Geotek. Il est cependant nécessaire d'enregistrer en plus la rampe de multiplexage et un signal de datation fourni par une horloge Datatron (typiquement 5 voies + 1 voie + 1 voie). Un logiciel de dépouillement de données semblables a déjà été utilisé au CNET et comporte :

- i - un logiciel de numérisation implanté sur le centre hybride PDP11 du CRPE,
- ii - un logiciel de tri de données, opérationnel sur le centre HP du CRPE.

Un ajustement de ce second programme est à prévoir afin de tenir compte du plus grand nombre des capteurs.

Paramètre mesuré	Type de capteur	Caractéristiques	Altitudes des capteurs
Température	Thermistances dans abris sous ventilation forcée	Ininterchangeables à 0,055°C près	4, 6, 12, 24, 48, 72 et 96 mètres
Vitesse du vent	Anémomètres à coupelles	Seuil de démarrage à 0,3 m.s ⁻¹	idem
Direction du vent	Girouettes	idem	idem
Pression	Baromètre à coupelles anéroïdes	Gamme de mesure 950 à 1050 mb	1 m
Intensité du rayonnement solaire	Pyrodiomètre différentiel	Mesure des rayonnements direct et réfléchi	1 m
Hauteur de précipitation	Pluviomètre à augets basculeurs	Incrémentation de 0,25 mm	1 m
Humidité	Hygromètre hydro-mécanique à jauges de contrainte	Précision ±2% HR Temps de réponse inférieur à 3 mn	4, 24, 48, 72 et 96 mètres

Tableau 1. Description des capteurs du mât de 100 mètres mis en place pour l'expérience PACEM.

2.2.2. Ballon captif instrumenté.

Une nacelle équipée de capteurs est suspendue à un ballon captif effectuant des montées et descentes de 0 à 300 m d'altitude selon une procédure en cours d'étude.

Les caractéristiques de ce ballon sont données dans le tableau 2 qui suit.

Volume : 3 m³ (longueur 4,9 m, diamètre : 1,1 m.)

Forme aérodynamique autostable.

Poids de la nacelle : 1 kg.

Charge maximale au niveau de la mer : 1,8 kg.

Constructeur : Atmospheric Instrumentation Research Inc. (Boulder)

Tableau 2. Caractéristiques du ballon captif.

L'exploitation du dispositif, mise à part l'opération d'installation et de gonflage du ballon, ne nécessite l'intervention que d'une seule personne, essentiellement pour la manoeuvre du treuil.

Le remplacement des batteries de la nacelle impose une intervention manuelle toutes les quatre heures.

Il est à noter que c'est la mesure de la pression au niveau de la nacelle qui caractérise l'altitude. Il est donc nécessaire de disposer, à proximité du treuil, d'un report de la pression de référence au sol délivrée par le mâât.

Les paramètres mesurés, de même que les précisions de mesure sont décrits dans le tableau 3.

Paramètre mesuré	Dynamique	Précision	Résolution	Caractéristique	Type de capteur
Températures des thermomètres sec et mouillé	-50 à 50°C	± 0,5°C	0,1°C	Const. de temps : 5s (15 s ther. mouillé)	Réseau de thermistances.
Pression barométrique	0-100 mb (au-dessus du niveau du sol)	± 1 mb	0,1 mb		capacité anéroïde
Vitesse du vent	0,5 à 20m.s ⁻¹	± 0,25 m.s ⁻¹	0,1 m.s ⁻¹	seuil 0,4 m.s ⁻¹	anémomètre à coupelles
Direction du vent	0 - 360°	± 5°	1°		Compas magnétique

Tableau 3 : Description des capteurs du ballon captif.

En plus de ces paramètres classiques, la fonction de structure C_T de la turbulence de température est mesurée in situ au moyen d'un capteur spécifique constitué de deux sondes de température distantes de 1 mètre, et qui donne une mesure de C_T évaluée sur 30 secondes.

Les données fournies par les capteurs sont envoyées par un dispositif de télémesure à un organe de réception qui les traduit en mesures météorologiques et les rend disponibles, en mode "caractère", sur une voie de sortie au standard RS 232-C. Il est prévu de récupérer ces valeurs sur un système à micro-processeur, le logiciel de relecture étant déjà développé au CRPE.

La mise en oeuvre du ballon est autorisée par le Centre d'Essais en Vol de Bretigny, gestionnaire de la zone D 113, sous la réserve d'un balisage satisfaisant. Néanmoins le ballon devra être maintenu au sol dans les créneaux ouverts au parachutisme.

2.2.3. Sodar simple.

Le sodar simple fournit des profils verticaux de réflectivité qui renseignent sur l'altitude de la couche d'inversion. Sa portée est de 600 m avec une résolution théorique de 17 m.

Son fonctionnement est entièrement automatique et ne nécessite qu'une surveillance légère d'un opérateur.

L'enregistrement est effectué en continu sur papier (fac-similé) avec une autonomie de 12 jours.

Une chaîne d'acquisition numérique (R2E) enregistre en parallèle les données de réflectivité avec une autonomie de deux semaines. Les programmes de dépouillement de ces données numériques existent et sont opérationnels.

2.2.4. Mini-sodar.

Le mini-sodar est un sondeur acoustique à discrimination Doppler, fonctionnant à une fréquence élevée (6000 Hz), et d'une portée de 100 m environ.

Il permet d'obtenir en fonction de l'altitude des profils du vent horizontal et de la vitesse verticale dans la couche de surface avec une résolution temporelle de 2 secondes et spatiale de 4 mètres.

Cet appareil en cours de développement doit être achevé début mai 1982. Un cycle de mesures spécifiques est nécessaire pour le qualifier et consistera en des comparaisons des données de vent avec celles délivrées par le mât et le ballon instrumenté.

Le système d'acquisition est constitué d'un micro-calculateur de type Z80 couplé à un dérouleur numérique Pertec. Le support magnétique doit être changé toutes les deux heures en utilisation continue.

2.2.5. Lidar.

L'exploitation du Lidar développé en collaboration par l'EDF et le Service d'Aéronomie de Verrières est envisagée en deux phases :

i. Phase 1 : Installation en pointage vertical sur le site de Villeau.

Au cours de cette phase préliminaire, l'appareil est configuré pour atteindre une précision de 5% d'humidité relative dans une gamme d'altitude de 20 à 300 m. Dans ce mode la résolution spatiale est de 15 mètres, ce qui autorise la comparaison des données d'humidité avec celles délivrées par le mâât et le ballon captif.

A cet titre l'exploitation du lidar est donc prometteuse car elle accroît la redondance des mesures d'humidité qui sont les plus imprécises.

ii. Phase 2 : Installation en visée horizontale sur la tour de Viabon.

L'objectif visé, qui est d'obtenir des mesures d'humidité relative le long du trajet du faisceau hertzien avec une précision de l'ordre de 5% dans une gamme de distance de 10 à 30 km typiquement, est ambitieux. Sa faisabilité technique, liée entre autres contraintes au choix d'une raie de fonctionnement du lidar qui soit peu atténuée, est à l'étude au service d'Aéronomie.

Par ailleurs, l'exploitation du Lidar au sommet de la tour de Viabon peut être remise en question en cas de parasitage des liaisons opérationnelles de la DTRN.

Contraintes de mise en oeuvre et d'exploitation.

L'installation du Lidar sur le site de Villeau nécessite de disposer d'un local temporaire au pied du mâât (conteneur "Algeco") alimenté par secteur triphasé 5 kVA. L'installation d'un circuit de refroidissement du laser d'émission (circuit fermé d'eau réfrigérée à 12°C environ) est réalisé par le CNET.

La mise en place des matériels est assurée par l'EDF et le service d'Aéronomie sur un site préparé par le CNET. L'exploitation est envisagée sur alertes, au même titre que celle du mini-sodar et du ballon, et est également assurée par des techniciens de l'EDF et du service d'Aéronomie en alternance. Les données d'humidité sont acquises en temps réel sur disque souple associé à un micro calculateur LSI 11-23. Le service d'Aéronomie assurera le transfert de ces données sur bandes magnétiques standard en unités physiques.

2.3. Synchronisation des divers instruments.

La synchronisation des équipements, et la datation correcte des mesures, doivent être envisagées avec une attention particulière compte tenu de la dispersion des instruments et de la longue durée de l'expérimentation.

Nous prévoyons de prendre les précautions suivantes pour assurer cette synchronisation :

a. L'enregistreur analogique des données du mât sera équipé d'un système de codage de temps (DATATRON). L'ensemble sera secouru par un onduleur fourni par le département TSS du CRPE.

b. Le sodar simple sera également branché sur l'onduleur afin d'éviter toute perte de synchronisme.

c. Le mini-sodar est équipé d'une horloge interne. Celle-ci devra être synchronisée manuellement avec l'horloge DATATRON lors des mesures.

d. Le système d'acquisition des données du ballon captif édite le temps qui sépare l'instant de mesure de l'instant initial de mise en service du processeur.

Il faudra donc qu'un logiciel conversationnel supplémentaire interroge l'opérateur du ballon au début de chaque expérience pour restituer le temps absolu.

e. L'enregistreur du MLA à bande large sera, comme celui du mâât, équipé d'une horloge DATATRON qui devra être régulièrement comparée à l'autre.

La synchronisation des diverses horloges se fera par liaison radio avec une précision de deux secondes.

2.4. Les procédures d'expérimentation.

L'expérience PACEM en été 1982 s'apparente, quant à son déroulement, à des campagnes antérieures d'observation de la couche limite.

Elle exige, au cours de la période opérationnelle prévue, l'intervention du personnel sur alertes. Les déclenchements de ces cycles de mesure sont définis au moyen de critères de prévision dont le plus déterminant est la présence d'une situation anticyclonique. La décision de démarrer chaque expérience sera prise cas par cas en tenant compte des informations disponibles auprès de la Météorologie Nationale.

Au cours de ces périodes d'activation, tous les instruments sont mis en service. Deux à trois techniciens sont alors nécessaires pour la manoeuvre du ballon, le changement de bande magnétique du micro-sodar et la surveillance des capteurs météorologiques du mâât.

En dehors de telles périodes, un fonctionnement de routine est assuré grâce à l'automatisation du mâât, de l'analyseur de liaison et du sodar simple. Un contrôle quotidien effectué par un seul technicien est suffisant pour l'ensemble des instruments de veille (liaison, sodar simple, mâât) et consiste dans le remplacement éventuel des bandes analogiques et dans la surveillance des horloges Datatron.

L'analyseur de liaisons à bande large, situé sur la tour de Viabon est équipé d'un dispositif de déclenchement automatique de son enregistreur analogique lorsqu'un évanouissement supérieur à 12 dB apparaît sur la liaison.

Le maintien ou la réduction de cette valeur pour le fonctionnement de routine, et la possibilité d'enregistrement permanent pendant les opérations sur alerte doivent être discutés avec MER.

3. LA CAMPAGNE STATISTIQUE.

3.1. Moyens radioélectriques.

A. Description de l'appareillage.

Le schéma d'implantation des équipements est décrit aux figures 7 (émission) et 8 (réceptions 1 et 2).

Un analyseur de ligne de type Hewlett-Packard HP 3711 commande le balayage en fréquence d'un émetteur à 11 GHz. La porteuse est récupérée par deux antennes de réception disposées à deux altitudes voisines. Chacune de ces antennes alimente un ensemble de réception comprenant :

- un amplificateur à bande étroite pour détermination de la commande automatique de gain (CAG) caractérisant l'affaiblissement du faisceau à une fréquence donnée,

- un ensemble amplificateur logarithmique / analyseur de ligne de type HP 3712 pour calcul de la distorsion de temps de propagation de groupe (TPG) et restitution de la sinusoïde de balayage (Référence).

Le système d'acquisition est constitué, dans une phase préliminaire, d'un enregistreur analogique Enertec de type MT 5529. Un organe spécialisé décide du déclenchement de l'enregistrement lors de l'apparition d'affaiblissements sur l'un des deux canaux de réception.

Cet appareil enregistre simultanément les sept voies suivantes :

- . CAG du canal 1
- . TPG - -
- . Référence -
- . CAG du canal 2
- . TPG - -
- . Référence -
- . Signal de datation (Datatron)

On rappelle néanmoins que la durée prévue pour cette expérience est de trois ans et que l'entretien du système d'acquisition (changement de bande, maintenance), comme du reste le dépouillement des bandes analogiques constitueraient des charges rédhibitoires si l'on effectuait un enregistrement continu.

Aussi est-il envisagé, passé une phase préliminaire de trois mois au maximum, de mettre en place un dispositif numérique et automatique de transfert de données (cf. § 3.3).

B. Les performances.

Les analyseurs de liaisons HP 3711 et HP 3712 permettent d'analyser des liaisons de largeur de bande égale à 50 MHz à la fréquence intermédiaire choisie (70 MHz).

L'allocation d'un canal de 120 MHz dans la bande 10,7 à 11,7 GHz a été demandée aux autorités compétentes responsables du réseau national. Les émetteurs utilisés limitent la bande effective à 40 MHz.

La dynamique des signaux en sortie des récepteurs est réduite, au moyen d'amplificateurs logarithmiques, à une valeur compatible avec l'étendue de mesure de TPG de l'analyseur.

Une incertitude demeure cependant quant aux performances réelles des

ensembles de mesure (effet de saturation des signaux en cas d'évanouissement sélectif, effet de variation du TPG en fonction de la commande automatique de gain). Ces points sont en cours d'examen au département PHZ.

C. Mise en oeuvre.

Les sites pour l'implantation de l'émetteur et des récepteurs ont été déterminés en collaboration avec le Centre d'Etude des Moyens Spéciaux de la DTRN sous la double contrainte :

- i. de ne pas perturber l'équipement du réseau national en liaisons 11 GHz/140 Mbit s⁻¹,
- ii. de s'assurer de l'uniformité du terrain sousjacent à la liaison.

Ces sites sont respectivement

- pour l'émission : la tour de Lisses,
- pour la réception : Audeville où nous demandons à la DTRN l'érection d'un pylône provisoire.

La répartition des équipements, telle que l'on peut l'imaginer à ce jour, est décrite aux figures 7 et 8.

La figure 9 illustre la géométrie et la coupe de la liaison de même que la carte de la région.

3.2. Moyens météorologiques.

Le pylône d'Audeville sera instrumenté, conformément aux techniques employées au mât de Villeau, en mesures météorologiques.

Pour l'essentiel, il est prévu d'assurer la mesure ininterrompue pendant 3 ans de :

- 5 mesures de température,
- 5 mesures d'humidité relative (capteurs récupérés à Villeau),
- Une mesure de pression au sol.

L'adjonction éventuelle d'un petit nombre de capteurs spécifiques est à l'étude.

3.3. Acquisition des mesures et procédure d'expérimentation.

Au cours de la phase opérationnelle (janvier 83 à décembre 1985), le système d'acquisition employé sera constitué d'un ensemble de deux calculateurs interconnectés via le réseau Transpac.

Le premier installé à Audeville sera chargé :

- i. de l'acquisition en temps réel des spectres déduits des mesures de CAG et de TPG,
- ii. du stockage temporaire de ces spectres sur un support magnétique local au cours des périodes d'évanouissement,
- iii. de la redistribution des données, à cadence réduite, vers le deuxième ordinateur au cours des périodes calmes.

A ce titre, il est à noter que le débit de données à l'entrée du calculateur est trop important pour un fonctionnement correct de la mémoire temporaire. En effet un choix raisonnable des paramètres (dynamique des signaux : 8 bits - durée des spectres : 14 ms - nombre de points des spectres : 64) conduit à un débit initial de 144 kbit s^{-1} pour l'ensemble des deux canaux de réception.

Il est en conséquence très souhaitable de mettre à l'étude un algorithme utilisant les redondances du signal pour diminuer le flux des données qui doivent être stockées en mémoire temporaire, puis transmises par le système Transpac.

Ce même ordinateur transmettra les mesures des capteurs météorologiques. Le flux de données correspondant (typiquement 16 mots de 8 bits toutes les 3 ms soit moins de 1 bit s^{-1}) est négligeable en regard du précédent.

Le second ordinateur installé à RPE sera chargé de la récupération des mesures de Audeville. Son système d'exploitation de type multi-traitements lui permettra en outre :

- de pré-dépouiller et de visualiser les données dans un but de contrôle de leur qualité,
- d'assurer à distance la surveillance du ordinateur et des capteurs de Audeville (télé-diagnostic).

L'objectif visé, basé sur la fiabilité des équipements concernés, est donc de limiter au maximum les mouvements de personnel vers Lisses et Audeville. La procédure d'expérimentation consistera donc en une surveillance étroite des éditions fournies par le ordinateur de réception.

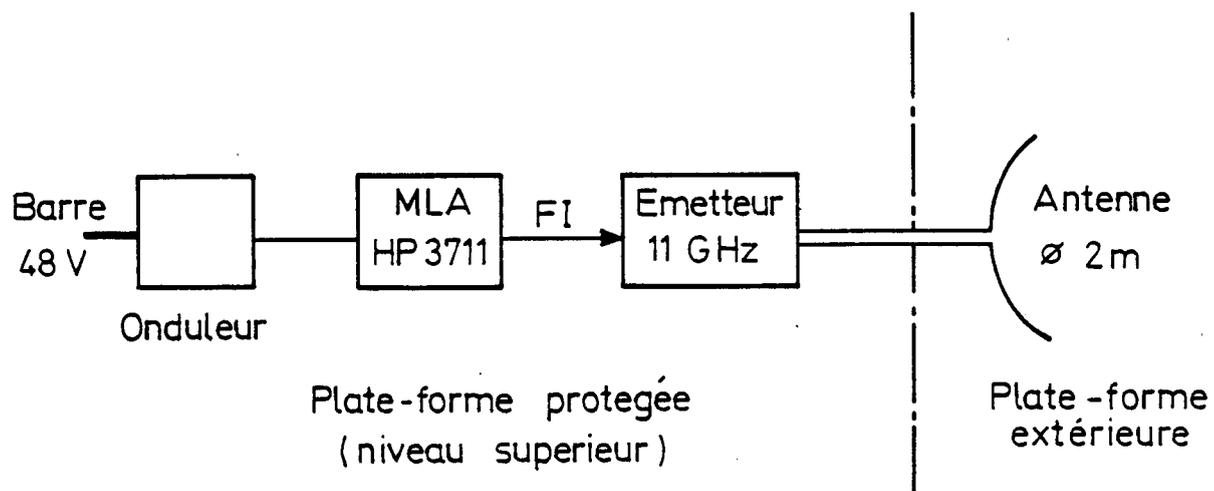


Figure 7 - Diagramme des équipements d'émission sur la tour de Lisses

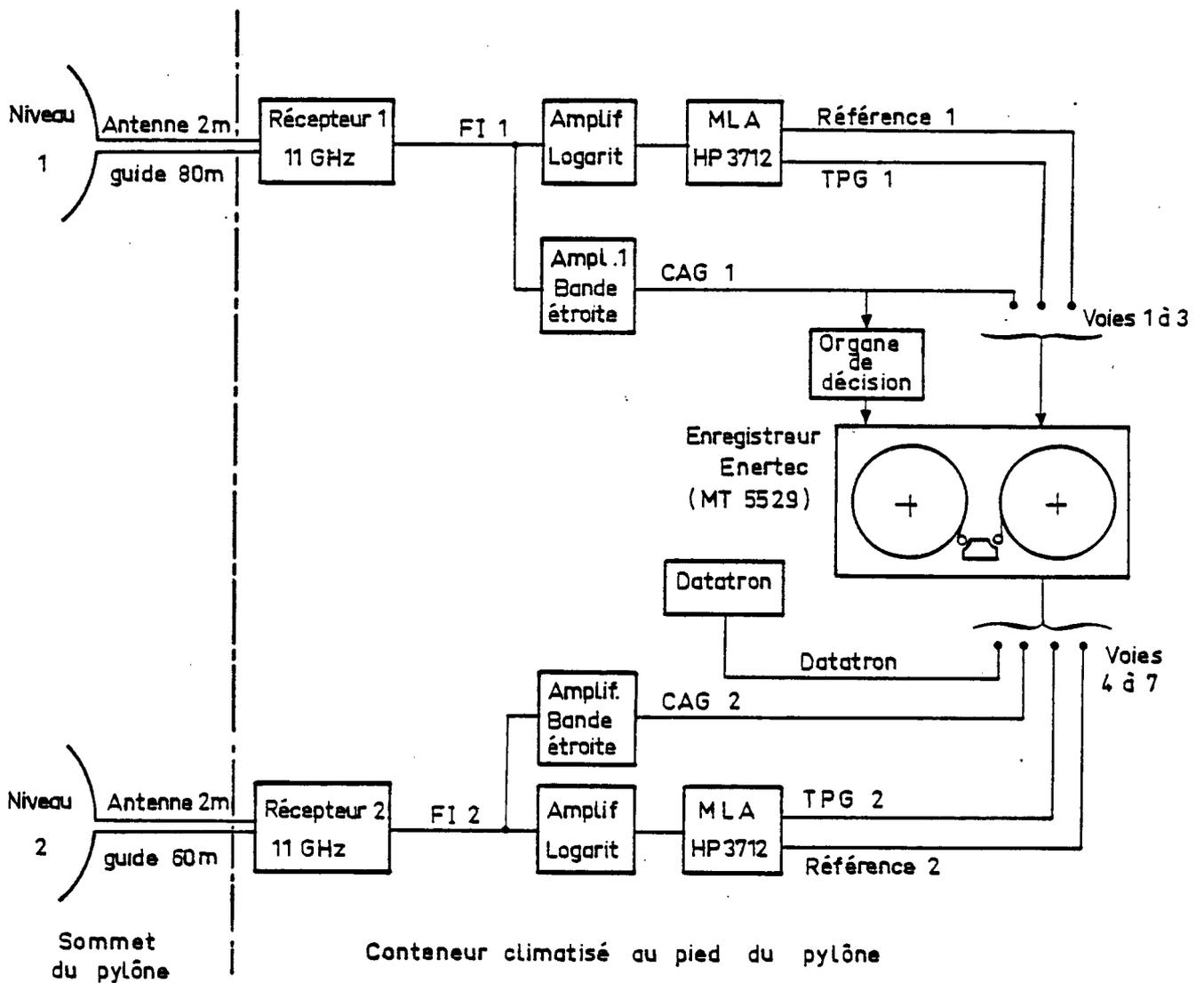
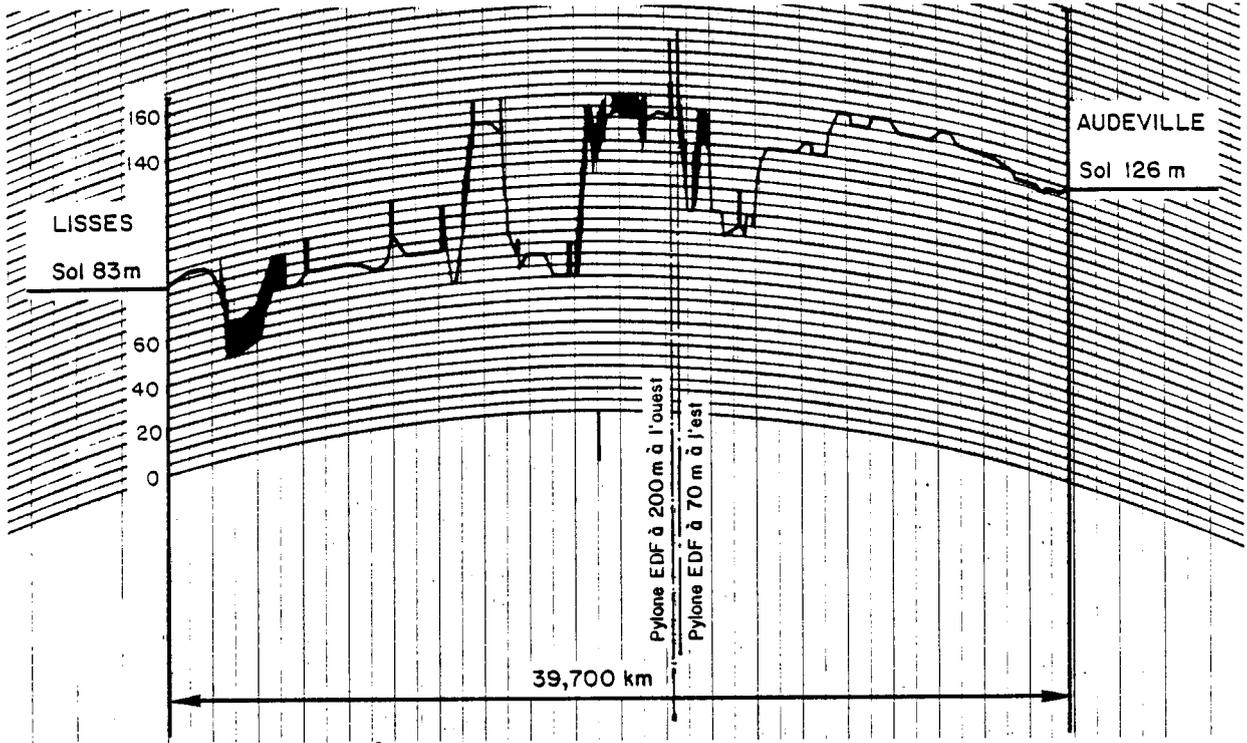
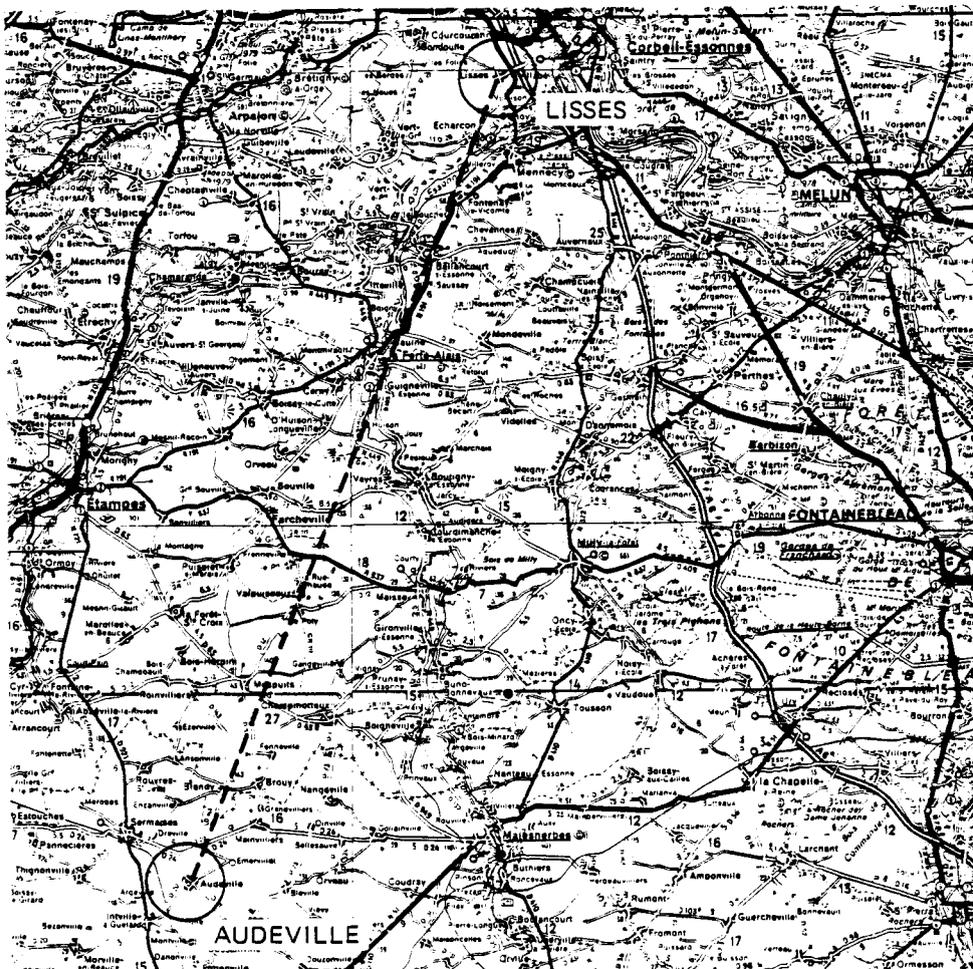


Figure. 8 - Expérience statistique : Diagramme des équipements radioélectriques de réception et du dispositif d'acquisition en phase préliminaire

(pylône de Marchéville)



a)



b)

Figure 9. Liaison Lisses Audeville a) profil du terrain
b) carte de la région

REFERENCES

BARNETT, W.T., Multipath propagation at 4, 6 and 11 GHZ.

B.S.T.J., 51, n° 2, pp. 321-361 (1972).

BEAN, B.R. and E.J. DUTTON, Radio Meteorology.

National Bureau of Standards Monograph 92 (1966).

BERGMANN, H.J., An experimental study of the path length dependence of multipath fading, ICC 81, pp. 6814/1 à 6814/5 (1981).

BOITHIAS, L., Distribution statistique des niveaux reçus en propagation par trajets multiples troposphériques.

Ann. Telecom., 36, n° 5, 6, pp. 329-337 (1981).

CHAN, C.K., and R.S. COLE, An expandable lightweight microwave radio refractometer.

J. Phys. E. Sci. Instrum., 11, pp. 1104-1108 (1978).

CRAWFORD, A.B., and W. C. JAKES, Selective fading of microwaves.

B.S.T.J., 31, n° 1, pp. 68-90 (1952).

CRAWFORD, A.B., and W.M. SHARPLESS, Further observations of the angle of arrival of microwaves.

Proc. IRE, 34, pp. 845-848 (1946).

DELANGE, O.E., Propagation studies at microwave frequencies by means of very short pulses.

B.S.T.J., 31, n° 1, pp. 91-103 (1952).

DERENNES, J., Etudes statistiques relatives à la propagation par trajets multiples.

Note technique CNET, NT/TCR/APH/60 (1979).

GREENSTEIN, L.J., and B.A. CZEKAJ, A polynomial model for multipath fading channel responses.

B.S.T.J., 59, n° 7, pp. 1197-1225 (1980).

GREENSTEIN, L.J. and B.A. CZEKAJ, Modeling multipath fading responses using multitone probing signals and polynomial approximation.

B.S.T.J., 60, n° 2, pp. 193-214 (1981).

LIN, S.H., Statistical behavior of a fading signal.

B.S.T.J., 50, n° 10, pp. 3211-3270 (1971).

LUNDGREN, C.W. and W.D. RUMMLER, Digital radio outage due to selective fading observation versus prediction from laboratory simulation.

B.S.T.J., 58, n° 5, pp. 1073-1100 (1979).

MARTIN, L., Etude de la sélectivité des évanouissements dus aux trajets multiples.

Ann. Telecom., 35, n° 11, 12, pp. 482-487 (1980).

ROORYCK, M., Validity of two paths model for calculating quality of digital radio links ; determination of model from measurements on analogue links.

Electronics Letters, 15, n° 24, pp. 783-84 (1979).

RUMMLER, W.D., A new selective fading model : application to propagation data.

B.S.T.J., 58, n° 5, pp. 1037-1071 (1979).

RUMMLER, W.D., Time and frequency domain representation of multipath fading on line of sight microwave paths.

B.S.T.J., 59, n° 5, pp. 763-796 (1980).

SANDBERG, J., Multipath parameters and multipath propagation related to PSK communication.

Technical University of Denmark at Lyngby, Report LD 34 (1978).

STEPHANSEN, E.T., Clear air propagation on line-of-sight radio paths. A review.

Radio Science, 16, n° 5, pp. 609-629 (1981).

