



**HAL**  
open science

# Propagation radioélectrique à 900 MHz en milieu urbain : modélisation à fréquence fixe et résultats expérimentaux

P. Olivier, J. Tiffon

## ► To cite this version:

P. Olivier, J. Tiffon. Propagation radioélectrique à 900 MHz en milieu urbain : modélisation à fréquence fixe et résultats expérimentaux. [Rapport de recherche] Centre de recherches en physique de l'environnement terrestre et planétaire (CRPE). 1984, 66 p. hal-02191507

**HAL Id: hal-02191507**

**<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02191507v1>**

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 (63)

**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 / 136**



B

**PROPAGATION RADIOELECTRIQUE  
A 900 MHz EN MILIEU URBAIN:  
MODELISATION A FREQUENCE FIXE  
ET RESULTATS EXPERIMENTAUX**

Par

**P. OLIVIER et J. TIFFON**

**RPE / ETP**

**38-40 rue du Général Leclerc**

**92131 ISSY-LES-MOULINEAUX, FRANCE**

30 OCT. 1985

INF

CENTRE NATIONAL D'ETUDES  
DES TELECOMMUNICATIONS  
Centre PARIS B

CENTRE NATIONAL DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
Département TOAE

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

NOTE TECHNIQUE CRPE/136

[ PROPAGATION RADIOÉLECTRIQUE À 900 MHz  
EN MILIEU URBAIN : MODÉLISATION À FREQUENCE FIXE  
ET RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ]

par

P. OLIVIER et J. TIFFON

RPE/ETP  
38-40 rue du Général Leclerc  
92131 ISSY-LES-MOULINEAUX  
FRANCE

Le Directeur

  
R. GENDRIN

Le Directeur Adjoint

  
M. BLANC

Septembre 1984

## LISTE DE DIFFUSION NT/CRPE/136 -

## 1) Liste de diffusion systématique

## CNET

MM. POITEVIN            Directeur du CNET  
DU CASTEL            Directeur Adjoint  
                             du CNET  
COLONNA              Adjoint militaire  
                             au Directeur du CNET  
VINCENT-  
CARREFOUR            Directeur des programmes  
BLOCH                  DICET  
LEMEZEC               DICET  
THUE                   DICET  
LOMBARD              PAB

MM. GENDRIN            PAB/RPE  
BAUER  
AMAYENC  
BAUDIN  
BERTHELIER  
BERTIN  
BLANC  
CANU

Mme CORNILLEAU

MM. DE JAVEL  
DE LA PORTE

Mme ETCHETO

MM. ETCHETO  
HIGEL  
LAVERGNAT  
MEYER  
MON  
NUTTEN

Mme PERRAUT

MM. ROUX A.  
SALIOU  
SAUVAGET  
TESTUD  
VIDAL MADJAR  
WEILL

Bibliothèques            SDI (3)  
                             EDB  
                             RPE (7)

## CNRS

Bibliothèques            PARIS  
                             LPCE (Orléans)

## 2) Liste complémentaire

## CNET

MM. CONIL              PAA/RDS (2)  
DE BRITO              PAA/RDS (2)  
GHILLEBAERT        PAA/RDS  
MOULY                PAA/RDS  
Mle PAUTET            PAA/RDS  
MM. VERHULST        PAA/RDS  
BRUNSCHWIG        PAA/TPA  
GRANIER              PAA/TPA  
MAZZIOTTO         PAA/TIM

MM. BOITHIAS           PAB  
LANGER               PAB  
RAMAT                PAB/ETR  
AZOULAY             PAB/ETR  
BATESTI              PAB/ETR  
BERTHOUMIEUX     PAB/ETR  
BIC                    PAB/ETR  
BROSSARD            PAB/ETR  
DUPONTEIL          PAB/ETR (2)  
FERNANDEZ         PAB/ETR  
HAVEL                PAB/ETR  
HENRY                PAB/ETR  
MALOBERTI          PAB/ETR (2)  
MONNOT              PAB/ETR  
THIRIET              PAB/ETR  
VERNET               PAB/ETR

M. CLAVERIE           PAB/RPE  
Mle DECHAMBRE      PAB/RPE  
MM. DELAHAYE        PAB/RPE  
DUHAMEL             PAB/RPE  
Mme GLOAGUEN       PAB/RPE  
MM. GOLE              PAB/RPE  
HOLLMANN           PAB/RPE  
JOUVEAU             PAB/RPE  
LAURENT             PAB/RPE  
LEVY                  PAB/RPE  
Mle MAYRARGUE      PAB/RPE  
MM. MOUPFOUMA     PAB/RPE  
OLIVIER              PAB/RPE  
OUAMRI              PAB/RPE  
SPANJAARD          PAB/RPE  
SYLVAIN              PAB/RPE  
TIFFON               PAB/RPE  
Mme TRESSENS       PAB/RPE

MM. BAILLY            PAB/STC  
DUFOR                PAB/STC  
DETAINT              PAB/BAG

## Liste complémentaire (suite)

MM.	CAMBORDE BOJARSKI	LAA/ELR LAA/ELR
	COMBESURE SOUBIGOU	LAA/TSS LAA/TSS
	DUPUIS DAUTREY LE LIGNE MEREL MUTZIG OUDART PERON RENAN	LAB/MER LAB/MER LAB/MER LAB/MER LAB/MER LAB/MER LAB/MER LAB/MER
	BARDOUIL LE GARS	LAB/ICM LAB/ICM
	LE COQUIL	LAB/ROC
MM.	DASCAUD FAVRE	CCETT/ERV (2) CCETT/ERV (5)
	MEILHOC	CCETT/MDD
	Documentation	CCETT

## DAII

M. DUPUIS DTM

## EXTERIEURS

M. CUVIER DTRE  
HOUSSIN DTRE

M. RENARD TRT

**SOMMAIRE :**

L'objet de cette note est de présenter les premiers résultats de propagation à 900 MHz en milieu urbain issus d'une campagne de mesures en région parisienne menée par le CNET en collaboration avec la DTRE. Dans une première partie, une analyse de la propagation radioélectrique à fréquence fixe est proposée, introduisant et justifiant les divers traitements effectués sur les mesures, lesquels seront exposés dans la seconde partie de la note. Dans l'ensemble, il se dégage des résultats suffisamment significatifs et conformes à ceux publiés ailleurs, même lorsque, s'agissant des phénomènes de petite échelle, les conditions expérimentales n'étaient pas vraiment adaptées au type de résultat recherché.

Nous remercions le département PAB/ETR/CEM d'avoir bien voulu mettre à notre disposition les données collectées lors de la campagne de mesures CNET-DTRE.

**TABLE DES MATIERES****1 - INTRODUCTION****2 - MODELISATION DE LA PROPAGATION A FREQUENCE FIXE****2.1. Une modélisation à trois niveaux****2.2. Fluctuations rapides du champ instantané**

2.2.1. Modèle statistique

2.2.2. Cohérence spatiale du processus

**2.3. Variations du champ moyen local****2.4. Variations du champ moyen cellulaire**

2.4.1. Paramètres non liés au milieu urbain

2.4.2. Paramètres liés au milieu urbain

2.4.3. Le modèle de la terre plate

**3 - TRAITEMENT DES DONNEES DE LA CAMPAGNE CNET-DTRE****3.1. Campagne de mesures CNET-DTRE****3.2. Fluctuations rapides du champ**

3.2.1. Normalisation du champ instantané

3.2.2. Statistique du champ normalisé

3.2.3. Cohérence des fluctuations rapides

**3.3. Variations du champ moyen local**

3.3.1. Loi statistique

3.3.2. Fonction d'autocorrélation

**3.4. Variations du champ moyen cellulaire**

3.4.1. Affaiblissement de propagation entre antennes isotropes

3.4.2. Résultats expérimentaux

3.4.3. Comparaison avec d'autres résultats expérimentaux

**4 - CONCLUSION**

## 1 - INTRODUCTION

Il est apparu nécessaire de faire évoluer le réseau public français de radiotéléphone mobile qui fonctionne actuellement en modulation de fréquence dans la gamme des ondes métriques et dont le développement est assez limité. C'est dans ce but qu'a été lancé fin 1982 au CNET le projet "MARATHON" ; l'objectif en est de définir un système de communications avec les mobiles utilisant un réseau terrestre cellulaire, incluant la téléphonie et la transmission de données et fonctionnant en modulation numérique dans la bande des 900 MHz.

Le département RPE/ETP est associé à ce projet dans le cadre d'une étude de la propagation radioélectrique en milieu urbain.

Les problèmes spécifiques posés par la propagation conditionnent certains choix lors de l'élaboration d'un tel système de communications.

- définition de la taille des cellules à partir de l'évaluation des zones de couverture.

- lutte contre les effets des masques urbains (contrôle de puissance ou diversité des stations de base).

- choix de la modulation en fonction des nuisances causées par les trajets multiples.

Dans le but d'obtenir des premiers résultats de propagation en milieu urbain, les départements ETR/CEM et RPE/ETP ont mis conjointement au point les modalités d'une campagne de mesures en région parisienne ; l'objet de cette note est de présenter les résultats obtenus à partir de ces mesures, effectuées par PAB/ETR en collaboration avec la DTRE durant le deuxième semestre 1983.

Cependant, avant d'aborder le traitement proprement dit des données recueillies, nous ferons dans un premier temps le point sur la modélisation de la propagation à fréquence fixe (c'est-à-dire sur les caractéristiques de l'enveloppe du signal reçu lorsque l'on émet une porteuse pure) : nous verrons en particulier que les effets de propagation permettent de structurer



l'étude en trois niveaux selon les échelles de distance mises en jeu.

Dans un deuxième temps, après avoir rappelé brièvement les conditions expérimentales de la campagne de mesures, nous exposerons de manière détaillée les résultats obtenus à partir de ces données ainsi que les méthodes de traitement employées ; des comparaisons seront faites avec les principaux résultats publiés dans la littérature. Certains calculs un peu lourds pour figurer dans le corps du texte seront développés en annexes.

## 2 - MODELISATION DE LA PROPAGATION A FREQUENCE FIXE

### 2.1. Une modélisation à trois niveaux.

La propagation radioélectrique en zone urbaine dans la gamme des ondes décimétriques est caractérisée par un phénomène principal : la présence sur le trajet radioélectrique de divers obstacles naturels (ondulations du terrain, végétation) ou artificiels (constructions urbaines), fixes (immeubles, ponts...) ou mobiles (véhicules). Ceci constitue pratiquement la seule cause de perturbation du signal ; en effet, l'influence des phénomènes atmosphériques (affaiblissements causés par les précipitations par exemple) est négligeable, compte-tenu des distances mises en jeu (à peine quelques kilomètres) et de la gamme de fréquence considérée, par rapport à l'ampleur des perturbations causées par les obstacles évoqués précédemment.

Ce phénomène prépondérant donne lieu à différents types de perturbations dont les effets sont à prendre en compte dans l'élaboration des services de communications avec les mobiles :

- les affaiblissements importants du signal, dus à l'absence quasi-générale du trajet direct et à la présence de masques de tailles variables, conditionnent l'évaluation des zones de couverture et donc la définition du motif cellulaire ; pour lutter contre ces affaiblissements, des notions telles que le contrôle de puissance ou la diversité de stations de base doivent être introduites.

- les trajets multiples, issus des diverses réflexions et diffractions de l'onde électromagnétique sur les obstacles, se manifestent par des évanouissements profonds et des interférences inter-symboles, dans le cas d'une liaison numérique, dues au caractère dispersif du canal.

Ainsi, l'intensité du champ reçu en un point résulte-t-elle de la superposition de divers effets dont les échelles de variations en distance ont des ordres de grandeur différents (de quelques cm pour les évanouissements rapides à plusieurs centaines de mètres pour les affaiblissements dus au relief par exemple). Il n'est donc guère possible de modéliser cette intensité de manière globale, il paraît plus raisonnable d'établir une séparation entre les différents phénomènes étudiés en utilisant un modèle à trois niveaux :

- phénomènes de petite échelle ou fluctuations rapides du champ instantané, étudiés sur un intervalle de quelques dizaines de longueur d'onde (10-20 m).

- phénomènes de moyenne échelle ou variations du champ moyen local (défini comme étant la moyenne sur 10-20 m du champ instantané) à l'intérieur d'une cellule de l'ordre de 500 x 500 m.

- phénomènes de grande échelle ou variations du champ moyen cellulaire, moyenne sur une cellule du champ moyen local.

C'est selon ce schéma, sur lequel s'accordent la plupart des auteurs [1] [2], que nous allons étudier plus en détail les variations de l'enveloppe du champ reçu lorsque l'on émet une porteuse pure aux environs de 900 MHz.

Dans tout ce qui suit, on se placera implicitement dans le cas de figure suivant :

- l'émission se fait depuis une station de base élevée (hauteur d'antenne comprise entre 20 et 100 m par rapport au sol),

- la réception est effectuée dans un véhicule (hauteur d'antenne entre 1 et 5 m) circulant dans un milieu urbain,

- la distance émetteur-récepteur n'est pas trop grande (inférieure à 15 km ),

- la fréquence est voisine de 900 MHz (d'où une longueur d'onde comprise entre 30 et 35 cm).

## 2.2. Fluctuations rapides du champ instantané.

### 2.2.1. Modèle statistique

Dès 1968, Clarke [3] propose une théorie statistique de la réception d'un signal dans une liaison station de base-mobile, basée sur un modèle de diffusion de l'onde électromagnétique : les trajets multiples sont créés par des réflexions et des diffractions respectivement sur les surfaces planes et sur les angles des différents obstacles.

Ainsi, le signal reçu en tout point résulte-t-il de la superposition d'un certain nombre  $N$  de rayons arrivant sur l'antenne de réception avec une incidence horizontale selon un angle azimutal  $\alpha_i$  (figure 1) ; la polarisation du champ est supposée verticale, ce qui permet d'additionner algébriquement les champs électriques (à noter que cette polarisation se conserve de manière satisfaisante au cours de la diffusion de l'onde sur les obstacles, ceux-ci ayant généralement des directions verticales privilégiées [4]).

Le champ électrique s'écrit donc, en notation complexe et en omettant le terme  $\exp(j\omega_0 t)$  ( $\omega_0$  = pulsation d'émission) :

$$E = \sum_{i=1}^N E_i \exp(j\varphi_i) \quad (1)$$

Lorsque le trajet direct est absent, ce qui constitue le cas général, les hypothèses suivantes peuvent être faites sur les amplitudes et phases des rayons incidents :

- les phases  $\varphi_i$ , provenant des retards de trajet et des déphasages subis lors des réflexions et réfractions, sont des variables aléatoires indépendantes entre elles, et des autres variables, et uniformément réparties

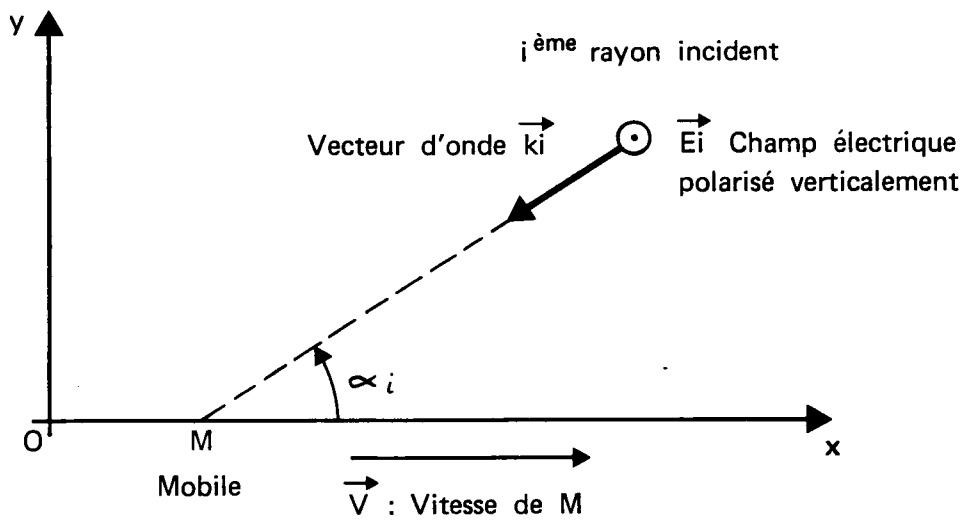


Figure 1 – Incidence d'un rayon dans le plan horizontal Oxy

sur  $(0, 2\pi)$ .

- les amplitudes  $E_i$ , affaiblies par rapport à l'amplitude d'émission à cause de la propagation en espace libre et des divers coefficients de réflexion des obstacles, sont des variables aléatoires de même loi (tant que l'on se limite à une zone de réception peu étendue).

Si  $N$  est suffisamment grand,  $E$  est la somme de variables aléatoires complexes indépendantes de même loi et peut donc être considéré, par application du théorème Limite Centrale, comme une variable complexe gaussienne centrée. Ses parties réelle et imaginaire sont elles aussi gaussiennes centrées de moyenne quadratique  $\frac{E_0}{\sqrt{2}}$ , en notant :

$$E_0^2 = \left\langle \sum_{i=1}^N E_i^2 \right\rangle$$

L'enveloppe d'un tel processus (l'amplitude du champ  $E$ ) possède alors une distribution de Rayleigh de paramètre  $\sigma = \frac{E_0}{\sqrt{2}}$  et la phase résultante est équidistribuée sur  $(0, 2\pi)$ .

Dans le cas où le trajet direct est présent (ou, de manière plus générale, un trajet déterministe de forte intensité), son amplitude et sa phase ne sont évidemment plus des variables aléatoires mais ont des valeurs précises ; l'amplitude du champ résultant suit alors une loi de Rice dont le paramètre "a" mesure l'amplitude du rayon déterministe. La densité de probabilité associée à la loi de Rice est :

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{a^2 + x^2}{2\sigma^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{ax}{\sigma^2}\right) \quad (2)$$

où  $I_0$  est la fonction de Bessel modifiée de première espèce, d'ordre zéro.

- Pour  $a = 0$ , on retrouve la densité de probabilité de la loi de Rayleigh.
- Pour  $a \gg \sigma$ , la loi de Rice s'assimile à une loi de Gauss centrée en  $a$ , et d'écart type  $\sigma$  (la phase évolue elle aussi vers une gaussienne centrée).

Ce modèle aboutit au résultat que l'amplitude du signal reçu possède généralement une distribution de Rayleigh, ce qui est confirmé par la plupart des publications de résultats expérimentaux. Cependant, cette approche est purement statistique et ne tient pas compte en particulier du fait que le récepteur se déplace dans une figure d'interférences, produite par les  $N$  rayons, qui reste stable au moins sur une petite distance (les obstacles provoquant la diffusion de l'onde restant les mêmes durant ce parcours élémentaire).

Afin de rendre compte de ce dernier phénomène, on peut, sur une courte distance où les paramètres  $(E_i)$ ,  $(\varphi_i)$  et  $(\alpha_i)$  seront considérés comme constants, calculer la puissance reçue, en fonction de la position du mobile (ou du temps dans le cas d'une translation uniforme).  $M$  représentant le mobile à l'instant  $t$ , et avec les notations de la figure 1, on a :

$$\vec{OM} = \begin{pmatrix} x (=Vt) \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{k}_i = \begin{pmatrix} -\cos\alpha_i \\ -\sin\alpha_i \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} E &= \sum_{i=1}^N E_i \exp \left[ j(\varphi_i + \vec{k}_i \cdot \vec{OM}) \right] \\ &= \sum_{i=1}^N E_i \exp \left[ j(\varphi_i - \cos\alpha_i \cdot kVt) \right] \end{aligned}$$

d'où la puissance reçue s'écrit :

$$P = EE^* = \sum_{i=1}^N E_i^2 + 2 \sum_{i < k} E_i E_k \cos \left[ kVt (\cos\alpha_k - \cos\alpha_i) + \varphi_i - \varphi_k \right] \quad (3)$$

Si la puissance reçue, donnée par la formule (3), est exprimée en dB, on obtient les fluctuations caractéristiques de l'enveloppe du signal

en "arches de Rayleigh", tout à fait conformes à celles que l'on peut relever expérimentalement; la distance entre les évanouissements successifs est au minimum égale à  $\lambda/2$  (car la valeur maximale de  $|\cos \alpha_k - \cos \alpha_i|$  est égale à 2). Des résultats de simulation montrent que, lorsque le nombre de rayons est grand, la répartition de l'enveloppe se rapproche d'une loi de Rayleigh ; on retrouve ainsi le résultat de la description statistique exposée précédemment.

### 2.2.2. Cohérence spatiale du processus

A partir de la formule :

$$E = \sum_{i=1}^N E_i \exp \left[ j (\varphi_i - \cos \alpha_i \cdot k x) \right] \quad (4)$$

les calculs d'autocorrélation du champ seront repris dans un cadre plus général que celui considéré par Clarke, dans lequel il était supposé que les N champs possédaient une même amplitude fixe.

L'autocorrélation de E est définie par :

$$R_E(\xi) = \langle E^*(x) \cdot E(x + \xi) \rangle ,$$

la notation  $\langle \rangle$  désignant la moyenne d'ensemble sur la statistique conjointe de toutes les variables aléatoires  $(E_i)_{i=1,N}$ ,  $(\varphi_i)$  et  $(\alpha_i)$  ; on suppose pour simplifier que le nombre N de rayons est constant.

D'après (4) :

$$E^*(x) \cdot E(x + \xi) = \sum_{i,k=1}^N E_i E_k \exp j \left[ (\varphi_k - \varphi_i) + (\cos \alpha_k - \cos \alpha_i) kx - \cos \alpha_k \cdot k \xi \right]$$

d'où

$$\langle E^*(x) \cdot E(x + \xi) \rangle = \sum_{i,k=1}^N \langle E_i E_k \exp j (\varphi_k - \varphi_i) \exp j \left[ (\cos \alpha_k - \cos \alpha_i) kx - \cos \alpha_k \cdot k \xi \right] \rangle$$

Les trois familles de variables aléatoires étant supposées indépendantes les unes des autres, la moyenne des produits est égale au produit des moyennes dans chaque terme de l'expression précédente ; ainsi

$$\langle E^*(x) \cdot E(x + \xi) \rangle =$$

$$\sum_{i,k=1}^N \langle E_i E_k \rangle \langle \exp j(\varphi_k - \varphi_i) \rangle \langle \exp j \left[ (\cos\alpha_k - \cos\alpha_i) kx - \cos\alpha_k \cdot k \xi \right] \rangle$$

$\langle \exp j(\varphi_k - \varphi_i) \rangle = 0$  dès que  $i \neq k$  puisque  $\varphi_k$  et  $\varphi_i$  sont indépendantes entre elles et équiréparties sur  $(0, 2\pi)$ , d'où

$$\langle E^*(x) \cdot E(x + \xi) \rangle = \sum_{i=1}^N \langle E_i^2 \rangle \langle \exp(-jk \xi \cdot \cos\alpha_i) \rangle$$

Les  $N$  rayons possèdent les mêmes propriétés statistiques, donc

$$\langle E^*(x) \cdot E(x + \xi) \rangle = N \langle E_i^2 \rangle \langle \exp(-jk \xi \cdot \cos\alpha_i) \rangle$$

pour  $\xi = 0$ , on a

$$\langle |E|^2 \rangle = N \langle E_i^2 \rangle$$

d'où

$$R_E(\xi) = \langle |E|^2 \rangle \langle \exp(-jk \xi \cdot \cos\alpha_i) \rangle$$

Faisant l'hypothèse supplémentaire que la densité de probabilité de chaque  $\alpha_i$  est uniforme sur  $(0, 2\pi)$ , on obtient finalement :

$$\langle \exp(-jk \xi \cdot \cos\alpha_i) \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(-jk \xi \cdot \cos\alpha) d\alpha = J_0(k \xi)$$

et

$$R_E(\xi) = \langle |E|^2 \rangle \cdot J_0(k \xi) \quad (5)$$

L'autocovariance normalisée du champ est donc égale à la fonction de Bessel de première espèce, d'ordre zéro ; ses variations sont représentées sur la figure 2 : en particulier, sa première annulation se situe aux environs de  $\lambda/3$  et sa valeur maximale aux environs de  $3\lambda$  ( $\simeq 1$  m aux fréquences considérées) est de l'ordre de 0,2 (à comparer avec la décorrélation observée expérimentalement, voir paragraphe 3.2.3).



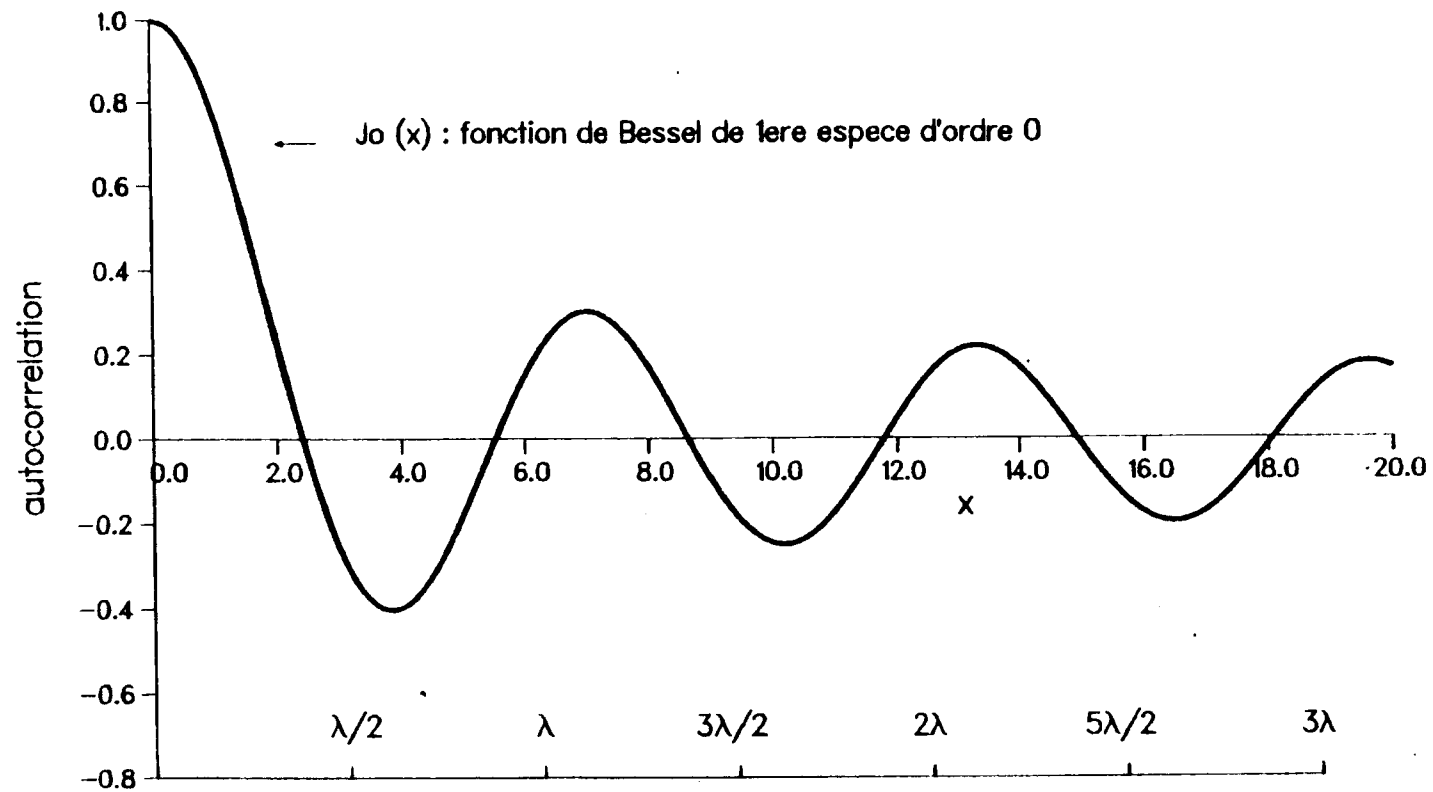


Figure 2 – Fonction d'autocorrelation normalisee du champ electrique

A des fins de comparaison avec des mesures expérimentales, (lesquelles ne donnent souvent que l'enveloppe du champ reçu), il est utile de connaître l'autocovariance de  $|E|^2$  ; Clarke a montré que celle-ci, normalisée par rapport à la moyenne de  $|E|^2$ , était pratiquement égale au carré de l'autocovariance du champ, c'est-à-dire :

$$R_{|E|^2}(\xi) = J_0^2(k\xi)$$

De plus, toujours d'après Clarke, l'enveloppe du champ possède la même fonction d'autocovariance :  $R_{|E|}(\xi) \cong R_{|E|^2}(\xi)$

### 2.3. Variations du champ moyen local

La modélisation des fluctuations rapides du signal par un processus de Rayleigh, telle qu'elle a été décrite précédemment n'est valable que sur une courte distance de parcours du mobile ; au-delà se superposent des variations plus lentes dues à des changements dans la nature des masques situés sur le trajet. On définit donc le champ moyen local  $E_1$  comme la moyenne sur 10-20 m des valeurs instantanées du champ ; cet ordre de grandeur de distance de moyennage est justifié par les raisons suivantes :

- quelques dizaines de longueurs d'ondes sont nécessaires à la définition d'une statistique du champ instantané.
- cette distance doit être suffisamment petite pour que les effets produits par les masques puissent y être considérés comme constants.

Les variations de  $E_1$  sont étudiées dans les limites d'une zone (ou cellule) de diamètre de l'ordre de 500-1000 m dans laquelle on peut supposer que le milieu urbain est homogène et que les variations de la distance à l'émetteur sont faibles.

De nombreux résultats expérimentaux relatifs aux variations de  $E_1$  ont été rapportés dans la littérature (Okumura, Black et Reudink, Parsons [5],[6],[2]) ; tous s'accordent sur une distribution de  $E_1$  selon une loi lognormale (c'est-à-dire gaussienne en dB) dont l'écart-type  $\sigma_1$  se situe généralement entre 4 et 8 dB.

Les caractéristiques de la moyenne de  $E_1$  dans une cellule faisant l'objet du paragraphe suivant, nous ne nous intéresserons ici qu'aux variations de  $\sigma_1$  ; l'écart-type est un paramètre important car il donne un ordre de grandeur des amplitudes de variations de  $E_1$  (on peut en effet considérer avec une très bonne approximation qu'une variable possédant une distribution gaussienne de paramètres  $m$  et  $\sigma$  prend ses valeurs dans l'intervalle  $(m-3\sigma, m+3\sigma)$ ).

Selon Okumura et Parsons,  $\sigma_1$  est une fonction croissante de la fréquence utilisée (de 0,5 à 1dB par doublement de  $f$ ) ; par contre, la distance  $d$  à l'émetteur ne semble pas influencer significativement sur la valeur de  $\sigma_1$  : en effet, les résultats présentés aboutissent soit à une influence nulle (Okumura et al. [5], Kozono et Watanabé [1]), soit à une influence légèrement marquée mais avec des tendances contradictoires (Reudink [6], Parsons [2]). En fait, les variations observées sont certainement dues à des changements de densité urbaine selon le lieu de l'expérience plutôt qu'à la distance elle-même (les émetteurs se situant en général au centre de grandes villes, le milieu urbain est beaucoup moins dense à des distances de 5 à 10 kms qu'à des distances inférieures). Parsons a mesuré une augmentation de 1 dB pour un milieu urbain très dense par rapport à un milieu plus clairsemé. Cependant, Kozono et Watanabé, qui ont étudié beaucoup plus systématiquement l'influence du degré d'urbanisation, n'ont observé en moyenne aucune variation de  $\sigma_1$  en fonction de ce paramètre.

Ces désaccords entre résultats expérimentaux d'origines diverses montrent que le comportement de  $\sigma_1$  en fonction de la distance ou de la densité urbaine n'est pas encore bien caractérisé ; il est donc important de continuer les études dans cette voie. Dans le chapitre 3 de cette note, il sera rapporté des résultats concernant l'influence de  $d$  mais il n'a malheureusement pas été possible de caractériser de manière quantitative le degré d'urbanisation.

## 2.4. Variations du champ moyen cellulaire

### 2.4.1. Paramètres non liés au milieu urbain

$E_c$  est défini comme le champ moyen à l'intérieur d'une cellule

dont le diamètre est d'environ 500-1000 m. Son étude sera déterministe, contrairement à celle de  $E$  et de  $E_1$  pour lesquels les paramètres déterminant leur comportement n'étaient guère appréhendables directement (nombre et nature des masques, coefficients de réflexion, etc.) et où une approche statistique était nécessaire. Nous dressons donc dans ce qui suit une liste de paramètres ayant une influence sur la valeur de  $E_c$ , les points présentés dans ce paragraphe se référant aux résultats acquis par Okumura[5] lors de campagnes de mesures extensives effectuées dans la région de Tokyo. Nous noterons  $Pr$  la puissance reçue, proportionnelle au carré du champ  $E_c$ .

(i) La puissance reçue est une fonction décroissante de la fréquence dans la bande des ondes décimétriques :

$$Pr \propto f^{-n} \text{ avec } n \simeq 2,6 \\ (n = 2 \text{ en espace libre})$$

(ii)  $Pr$  croît en fonction de la hauteur d'antenne  $h_b$  de la station de base selon une loi approchée en  $h_b^2$  (de légères variations de l'exposant de  $h_b$  sont dues à la distance), ce qui constitue un effet important ; un écart de 18 dB est par exemple occasionné par des hauteurs de 10 et 80 m.

(iii) L'effet de la hauteur d'antenne mobile  $h_m$  est plus difficile à représenter par une loi simple (voir plus loin la formule empirique de Hata). Okumura a, par exemple, mesuré une augmentation de 3 dB pour une hauteur de 3 m par rapport à une hauteur de 1,5 m. Toutefois, des écarts beaucoup plus importants peuvent être enregistrés en utilisant des valeurs plus élevées de  $h_m$ .

(iv) L'effet de la distance émetteur-récepteur se traduit par la relation

$$Pr \propto d^{-k}$$

où  $k$  est généralement compris entre 3 et 4 (pour des distances de 0 à 15 km ; la puissance reçue décroît beaucoup plus vite pour des valeurs supérieures de  $d$ ) selon la hauteur  $h_b$  ( $k$  décroît et tend vers 2, valeur de l'espace libre, lorsque  $h_b$  augmente indéfiniment).

Les variations de  $Pr$  en fonction de ces différents paramètres peuvent être rassemblées en une seule expression empirique telle la formule d'Okumura-Hata, qui a été adoptée par le CCIR [7] : à partir des mesures effectuées par Okumura [5], Hata [8] a proposé un modèle de prédiction empirique de l'affaiblissement cellulaire dont la formulation est :

$$A(\text{dB}) = 69,55 + 26,16 \log f - 13,82 \log h_b - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \log h_b) \log d \quad (6)$$

Dans cette formule,  $A$  désigne l'affaiblissement de propagation entre antennes isotropes et est donc relié à  $Pr$  par :

$$A(\text{dB}) = - 10 \log Pr(W) + \text{constante}$$

(en 3.4.1. est détaillé le passage de  $Pr$  à  $A$ )

Le domaine de validité de (6) est plus étendu que celui considéré implicitement dans cette note :

- $450 \leq f \leq 1000$  MHz,
- $1 \leq d \leq 20$  km,
- $30 \leq h_b \leq 200$  m,
- $1 \leq h_m \leq 10$  m.

$a(h_m)$  est un coefficient de correction dû à la hauteur d'antenne mobile, il s'annule pour  $h_m = 1,5$  m et a pour expression :

$$- a(h_m) = (1,1 \log f - 0,7) h_m - (1,56 \log f - 0,8) \quad (7)$$

pour des villes petites ou moyennes et  $f$  de 150 à 1500 MHz.

$$- a(h_m) = 3,2 (\log 11,75 h_m)^2 - 4,97 \quad (7\text{bis})$$

pour des grandes villes et  $f \geq 400$  MHz.

L'introduction, par Hata, de la distinction "petite" ou "grande ville" souligne l'importance du milieu urbain dans lequel se déplace le véhicule et dont il est question au paragraphe suivant.

### 2.4.2. Paramètres liés au milieu urbain

La configuration urbaine a évidemment une grande influence sur l'affaiblissement cellulaire mais est difficile à paramétrer et à quantifier ; divers éléments peuvent entrer en jeu : l'orientation et la largeur des rues, la concentration d'immeubles au voisinage du récepteur, etc.

(i) L'orientation de la rue dans laquelle se déplace le mobile peut occasionner des écarts importants, jusqu'à 10 ou même 20 dB entre deux directions radiale et transversale par rapport à la direction de l'émetteur [9], les valeurs fortes du champ dans le cas d'une rue à direction radiale pouvant s'expliquer par un meilleur dégagement du trajet direct et par un phénomène de conduit de l'onde radioélectrique.

(ii) Afin de mesurer l'effet de la concentration urbaine, celle-ci doit être caractérisée par un certain paramètre  $\alpha$  ; des relations empiriques peuvent alors être établies entre  $E_c$  et  $\alpha$  à partir de mesures expérimentales. En 1977, Kozono et Watanabé [1] ont les premiers tenté de définir un tel paramètre, ils en ont étudié quatre variantes :

- $\alpha$  = pourcentage de surface occupée par des bâtiments dans la zone de réception.
- $\alpha'$  = même coefficient que  $\alpha$  mais dans une zone agrandie en direction de l'émetteur.
- $\beta$  = volume des bâtiments dans la zone de réception ( $\beta$  prend donc en compte, en plus de  $\alpha$ , la hauteur des immeubles).
- $\beta'$  = même coefficient que  $\beta$ , dans la zone agrandie.

Les auteurs ont déduit de leurs mesures des lois empiriques du type :

$$E(\text{dB } \mu\text{V/m}) = A \log \alpha + B \quad (8)$$

avec :  $A \simeq -25$  pour  $\alpha$  et  $\alpha'$  (décroissance en puissance 2,5 de la puissance reçue).

$A \simeq -20$  pour  $\beta$  et  $\beta'$ .

La formule (8) représente d'autant mieux les résultats expérimentaux que le paramètre choisi est plus fin (de  $\alpha$  vers  $\beta'$ ), mais cette amélioration n'est pas suffisamment importante pour compenser l'inconvénient d'un volume de calcul beaucoup plus grand pour évaluer  $\beta'$  ;  $\alpha$  est donc, selon les auteurs, un paramètre tout à fait satisfaisant pour caractériser le degré d'urbanisation.

### 2.4.3. Le modèle de la Terre-Plate

Outre le modèle d'Okumura-Hata présenté en 2.4.1., une autre formulation couramment utilisée de l'affaiblissement de propagation cellulaire est donnée par un modèle semi-empirique dérivé du modèle théorique de la "propagation sur une terre-plate" et qui fut proposé par Egli [10] dès 1957. Ce modèle repose sur des hypothèses beaucoup trop simplistes pour être conforme à la propagation en milieu urbain ; cependant sa formule résultante rend bien compte des effets de la hauteur d'antenne de la station de base et de la distance émetteur-récepteur et permet des comparaisons aisées entre des résultats présentés par des auteurs différents, c'est pourquoi nous le présentons succinctement dans ce qui suit.

Le modèle de la terre-plate, dont les caractéristiques géométriques sont explicitées sur la figure 3, suppose que le signal reçu résulte de la superposition du rayon direct et d'un rayon réfléchi par le sol, le coefficient de réflexion étant pris égal à - 1 (ce qui correspond à un déphasage de  $\pi$ , sans affaiblissement, de l'onde).

Le champ électrique à la réception peut alors s'écrire :

$$E = E_0 R_0 \left[ \frac{1}{R} \exp \left( j 2\pi \frac{R}{\lambda} \right) + \frac{1}{R_1 + R_2} \exp j \left( \pi + \frac{2\pi}{\lambda} (R_1 + R_2) \right) \right]$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde,  $R_0$  une distance de référence arbitraire et  $E_0$  l'amplitude du champ émis.

En supposant l'angle  $\alpha$  petit, on obtient l'expression de la puissance reçue ( $P_r = \vec{E} \cdot \vec{E}^*$ ) en fonction de  $\lambda$ ,  $D$  et des hauteurs d'antenne  $h_1$  et  $h_2$  :

$$P_r \simeq P_0 \cdot 4 \sin^2 \left( \frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda D} \right)$$

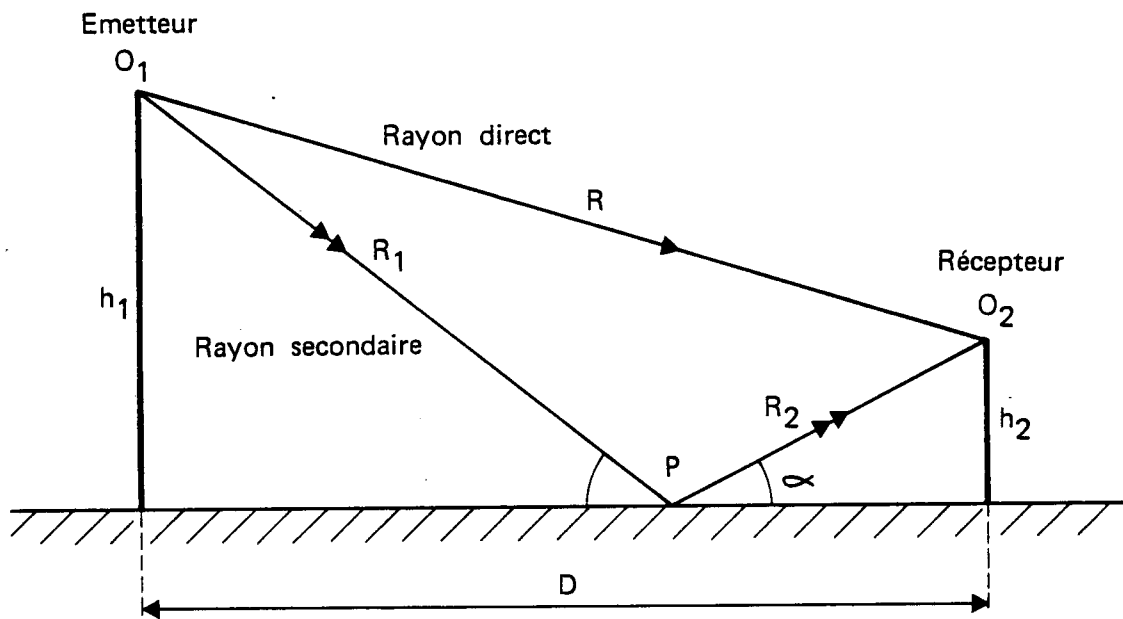


Figure 3 – Géométrie du modèle de la " Terre plate "



où  $P_o = E_o^2 \frac{R_o^2}{R^2}$  est la puissance reçue en espace libre.

Lorsque la condition  $h_1 \cdot h_2 \ll \lambda D$  est réalisée (ce qui est le cas général :  $\lambda \simeq 0,3$  m,  $D \simeq$  quelques km et  $h_1 \cdot h_2 \simeq$  quelques dizaines de m<sup>2</sup>), l'expression précédente se simplifie :

$$P_r = P_o (4\pi h_1 h_2 / \lambda D)^2$$

Ce qui donne finalement, compte tenu de la loi de propagation en espace libre :

$$P_r = P_e \left( \frac{h_1 h_2}{D^2} \right)^2 \cdot G_1 G_2 \quad (9)$$

où  $P_e$  est la puissance émise et  $G_1, G_2$  sont les gains des antennes par rapport à l'antenne isotrope.

La relation (9) entraîne donc une décroissance en puissance 4 de la puissance reçue en fonction de la distance et une croissance en puissance 2 en fonction de chacune des hauteurs d'antenne, ce qui est une représentation acceptable des résultats présentés en 2.4.1. en ce qui concerne la distance émetteur-récepteur et la hauteur d'antenne de la station de base.

Cependant, la formule (9), si elle traduit de façon correcte les pentes (en valeurs logarithmiques) des variations de  $P_r$  en fonction des paramètres  $D$  et  $h_b$ , nécessite l'introduction d'un facteur multiplicatif afin de représenter le mieux possible les résultats expérimentaux obtenus en milieu urbain.

On utilisera donc souvent une formule du type :

$$P_r = \beta P_e \left( \frac{h_b h_m}{D^2} \right)^2 G_e G_r \quad (10)$$

où  $\beta$  est un facteur correctif, lié au milieu urbain.

### 3 - TRAITEMENT DES DONNEES DE LA CAMPAGNE CNET-DTRE

#### 3.1. Campagne de mesures CNET-DTRE

Les mesures de champ de la campagne CNET-DTRE ont été effectuées en 1983-1984 à des fréquences voisines de 855 MHz à partir de trois sites d'émission répartis dans PARIS : ARCHIVES, GOBELINS et SEGUR [11]. Les caractéristiques de ces émissions en fréquence pure sont indiquées sur le tableau 1.

NOM DU SITE	URBANISME	HAUTEUR D'EMISSION	ANTENNE	P.I.R.E.	FREQUENCE
ARCHIVES	Dense-rues étroites	40 m	perche 7 dBi	250 W	855,5 MHz
GOBELINS	Moyennement dense	31 m	perche 11 dBi	250 W	854,65 MHz
SEGUR	Peu dense - Larges avenues	24 m	perche 7 dBi	140 W	855,0 MHz

**TABLEAU 1 :**

Caractéristiques des sites d'émission de la campagne de mesures CNET-DTRE.

La réception et l'enregistrement des données ont été effectués à bord de véhicules légers avec une hauteur d'antenne  $h_m$  de 1,5 m au dessus du sol.

Les données -mesures instantanées de champ- sont groupées en fichiers. A chaque fichier correspond un des trois émetteurs et une zone géographique de mesure. La zone de mesure (figure 4) est soit une cellule rectangulaire de dimension 620 m x 550 m soit une portion de trajet approximativement circulaire autour d'un émetteur.

Pour les mesures faites à partir d'un seul émetteur, le pas d'acquisition est de 1 m et les fichiers sont appelés "fichiers à acquisition simple".

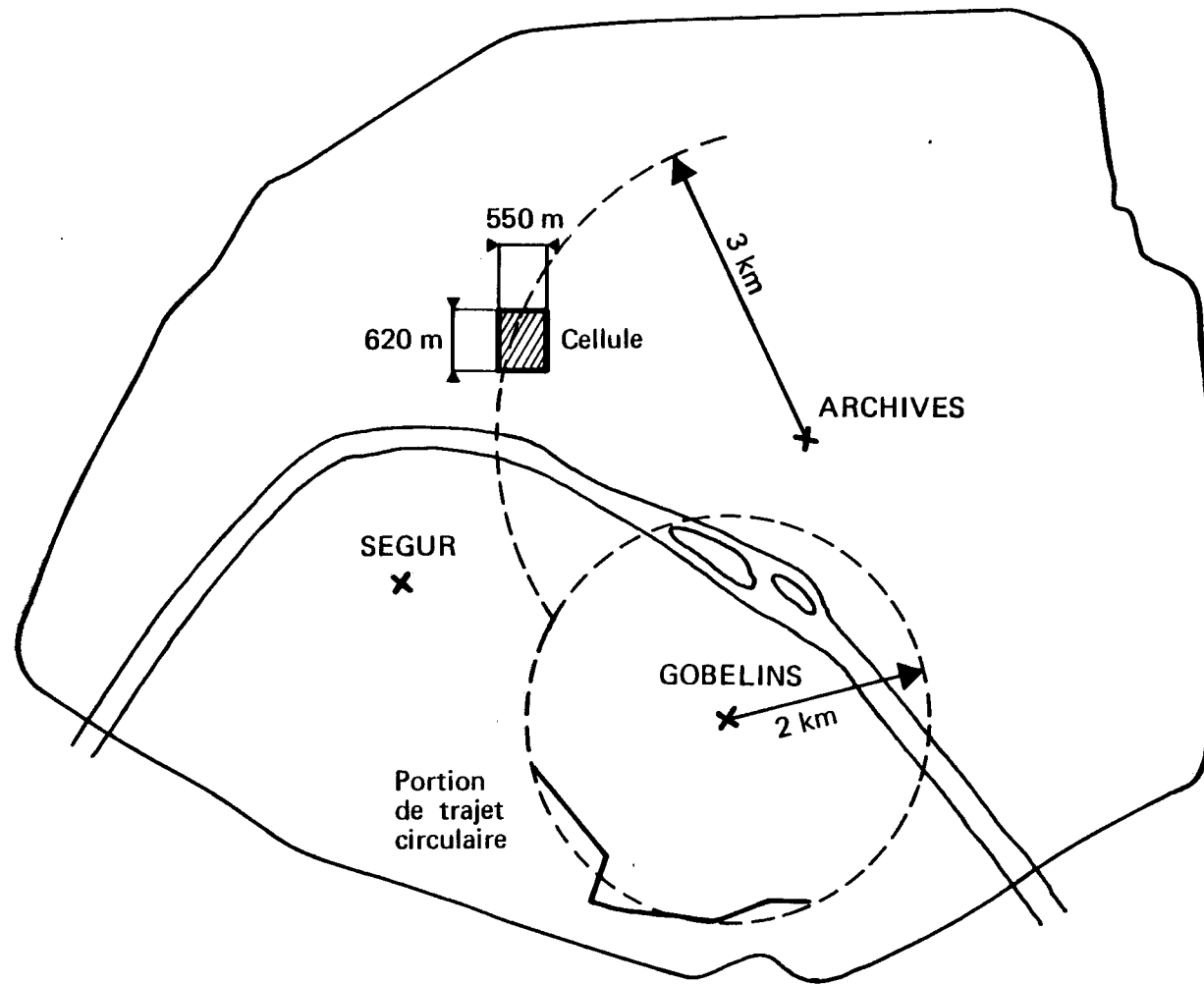


Figure 4 — plan de PARIS indiquant l'emplacement des émetteurs ARCHIVES , GOBELINS , et SEGUR et les types de zones de mesure ( cellule ou portion de trajet circulaire )

Pour les mesures faites séquentiellement à partir des trois émetteurs dans une même zone (cellule ou portion de trajet circulaire), le pas d'acquisition est de 5 m et les fichiers sont appelés "fichiers à acquisition triple". Il y a alors trois fichiers par zone (un pour chaque émetteur).

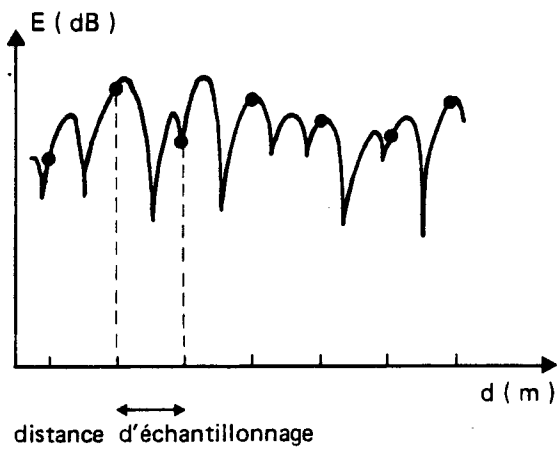
Dans chaque zone, les mesures ont été effectuées sur des distances variant de 2 à 5 km ce qui correspond à un nombre de mesures variant de 2000 à 5000 pour les fichiers à acquisition simple et de 400 à 1000 pour les fichiers à acquisition triple.

Dans les cellules rectangulaires, les trajets ont été choisis de manière à emprunter toutes les largeurs de voies existant dans la cellule ainsi que les diverses orientations possibles des voies par rapport à la direction de l'émetteur ; ceci afin d'éliminer statistiquement les configurations particulières et de pouvoir considérer que chaque cellule est homogène du point de vue de sa densité urbaine.

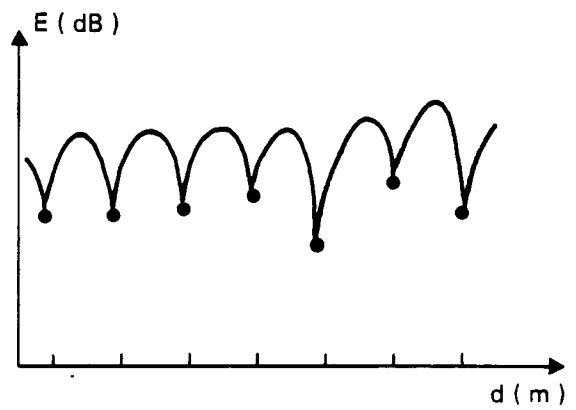
### **3.2. Fluctuations rapides du champ**

#### **3.2.1. Normalisation du champ instantané**

La campagne de mesures CNET-DTRE ne s'est effectuée qu'avec des pas d'acquisition de 1 ou 5 m et ne semble donc pas à priori se prêter à une caractérisation des fluctuations rapides du signal (la longueur d'onde à 855 MHz est voisine de 35 cm). Cependant, on peut surmonter cette difficulté de la manière suivante : les résultats des mesures sont des valeurs instantanées du champ reçu, c'est-à-dire des échantillons de ses fluctuations rapides, et doivent donc se répartir, sur un grand nombre de données, selon la loi statistique qui est celle des fluctuations rapides. Ce raisonnement n'est justifié que si la distance de cohérence des fluctuations rapides est inférieure au pas d'échantillonnage (la figure 5 visualise dans les deux cas extrêmes l'effet de cette distance de cohérence), nous verrons plus loin que cette hypothèse est bien vérifiée par les données expérimentales dont nous disposons.



a - Cas favorable



b - Cas défavorable

Les valeurs du champ sont corrélées d'un point d'échantillonnage à l'autre.

Figure 5 - Echantillonnage lent du champ par rapport à la vitesse de fluctuation

Il est évident que pour procéder de cette manière, c'est-à-dire utiliser les mesures de champ sur une longue distance, il est nécessaire au préalable d'éliminer les variations lentes dues aux phénomènes de moyenne et grande échelle ; les traitements qui seront faits dans ce paragraphe seront donc relatifs au champ normalisé (= champ instantané - champ moyen local) que l'on notera  $E_n$ .

La modélisation du champ reçu selon une superposition des effets à diverses échelles conduit à la notation suivante :

$$E = F + A \text{ (valeurs en dB),}$$

où  $E$  = champ reçu en chaque point,  
 $F$  = fluctuations rapides (que l'on cherche à caractériser),  
 $A$  = variations lentes (phénomènes de moyenne et grande échelle).

En notant  $\langle \dots \rangle_1$  l'opération de moyennage sur le voisinage  $[-1;+1]$  du point considéré, on obtient :

$$\langle E \rangle_1 = \langle F \rangle_1 + \langle A \rangle_1$$

$A$  étant à variations lentes (par rapport à 1), on approxime  $\langle A \rangle_1$  par  $A$  ; d'où :

$$E_n \stackrel{\text{def}}{=} E - \langle E \rangle_1 = F - \langle F \rangle_1 \quad (11)$$

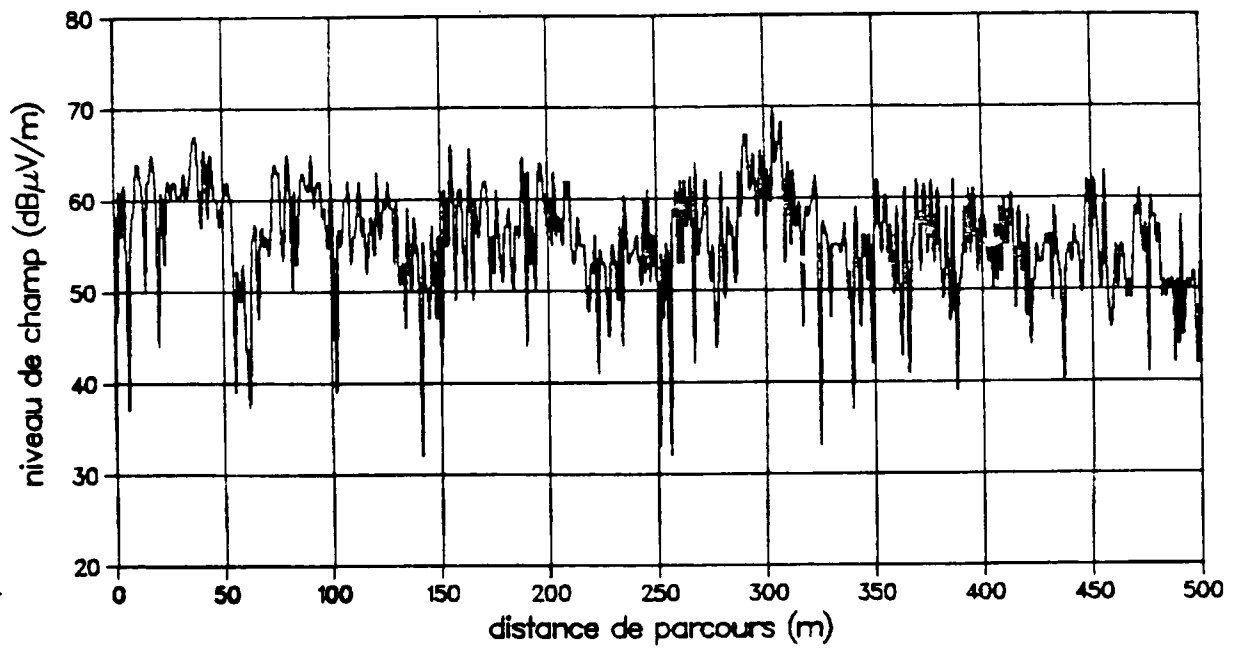
$E_n$  est directement relié à  $F$  par l'expression (11) dans laquelle a été éliminé le terme correspondant aux variations lentes.

$E_n$  est une variable centrée, (car  $\langle F \rangle = \langle \langle F \rangle_1 \rangle$ ) comme on peut le vérifier sur la figure 6.

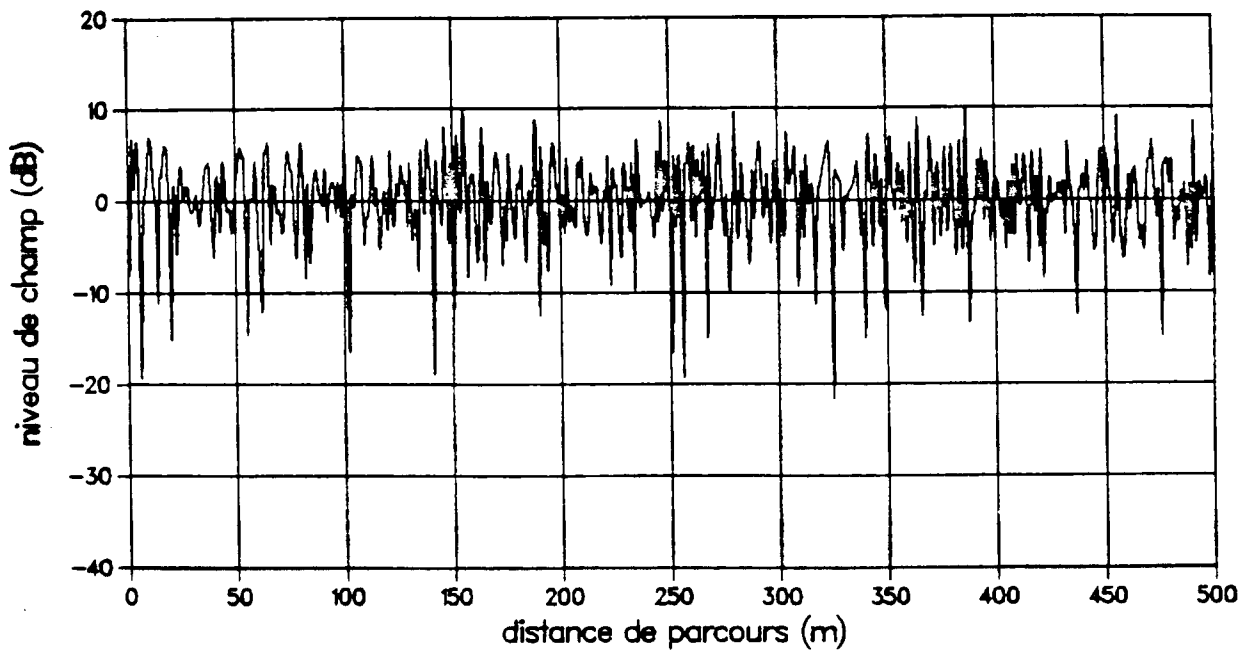
Si l'on suppose que  $10^{E_n/20}$  suit une loi de Rayleigh de paramètre  $\sigma$ , la loi de probabilité de  $E_n$  s'écrit :

$$P_{E_n}(x) = \frac{M}{2\sigma^2} \exp\left(Mx - \frac{1}{2\sigma^2} e^{Mx}\right) \quad (12)$$

avec :  $M = \frac{\text{Log } 10}{10}$



a - Variations du champ instantane , pas d'acquisition = 1 m



b - Variations du champ normalise , rayon de normalisation = 5 pts

Figure 6 - Effet de la normalisation du champ

Le calcul de  $\sigma$  est fait en Annexe 1, utilisant le fait que  $\langle E_n \rangle = 0$ , et aboutit à :

$$\text{Log } 2 \sigma^2 = C \quad (C = \text{constante d'Euler}).$$

d'où

$$\sigma \simeq 0,94$$

On peut reproduire les calculs précédents en utilisant les valeurs réelles du champ (et non les valeurs en dB) ; ceci n'apporte rien de plus en soi mais permettra une confrontation supplémentaire de ce modèle avec les résultats expérimentaux.

Avec les notations précédentes, mais en valeurs réelles, on a successivement :

$$E = F.A$$

$$A \simeq \langle A \rangle_1 \quad \text{d'où} \quad \langle E \rangle_1 = \langle F \rangle_1 . A$$

$$E_n = \frac{E}{\langle E \rangle_1} = \frac{F}{\langle F \rangle_1} \quad \text{et} \quad \langle E_n \rangle = 1$$

Si  $E_n$  suit une loi de Rayleigh :

$$\langle E_n \rangle = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sigma \quad \text{d'où} \quad \sigma = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \simeq 0,80$$

### 3.2.2. Statistique du champ normalisé

Il est important de noter que l'on ne peut remonter efficacement de la loi de  $E_n$  vers celle de  $F$  que lorsqu'il s'agit d'une loi de Rayleigh ; ceci est dû au fait que, si  $x$  suit une loi de Rayleigh de paramètre  $\sigma$ ,  $Ax$  suit une loi de Rayleigh de paramètre  $A\sigma$ .

Ainsi, s'il est vérifié que  $E_n$  suit une loi de Rayleigh, alors on peut dire qu'il en est de même des fluctuations rapides  $F$  (car, localement,  $E_n = F + \text{constante en dB}$ ) ; ce qui ne serait pas vrai pour une autre loi (Rice par exemple).



Le traitement suivant a été appliqué sur treize fichiers à acquisition tous les mètres :

- normalisation du champ par sa moyenne calculée sur  $l$  points de mesure ( $l = 5$ ),
- calcul de la répartition statistique de  $E_n$ ,
- ajustement de cette statistique par une loi de Rayleigh ; régression pour obtenir la valeur optimale de  $\sigma$ .

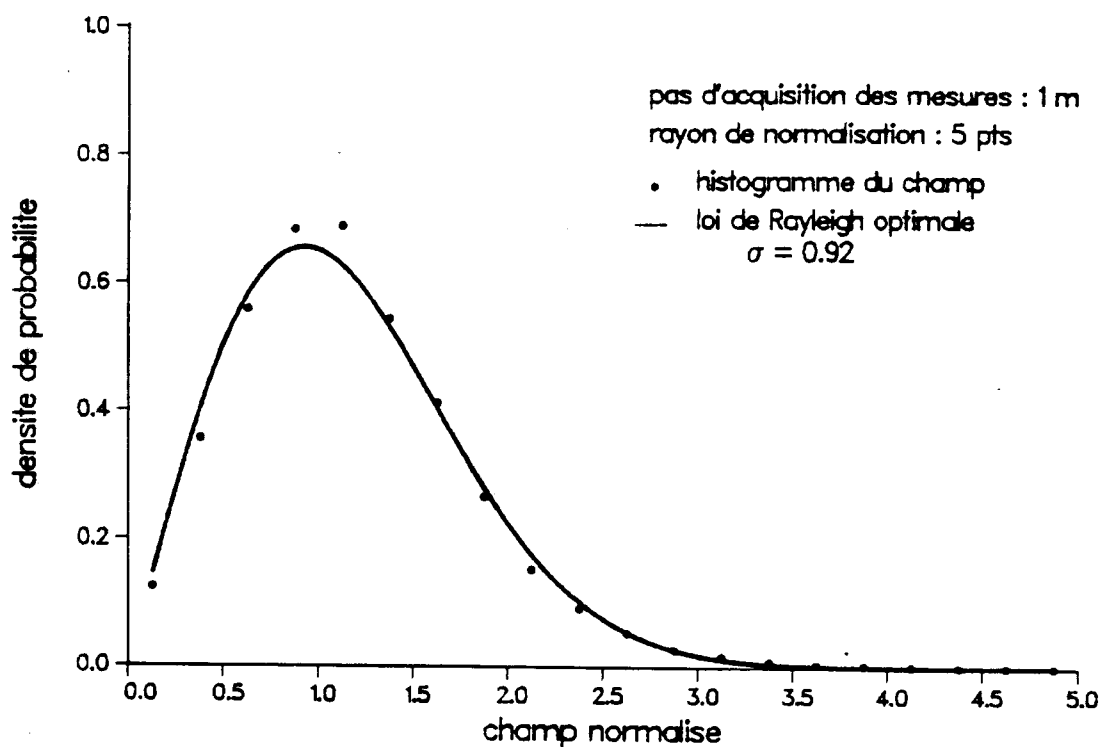
La concordance des résultats avec l'hypothèse d'une loi de Rayleigh est très satisfaisante (figure 7a) et  $\sigma$  est compris entre 0,91 et 0,94 (valeur théorique = 0,94 cf. paragraphe précédent). En ce qui concerne les fichiers à acquisition tous les 5 mètres, les résultats sont presque aussi bons malgré le nombre de points par fichier moins élevé (de l'ordre de 1000).

Dans quelques cas, les calculs ont été menés avec les valeurs réelles de champ afin de vérifier le résultat établi à la fin du paragraphe 3.2.1. : le paramètre  $\sigma$  obtenu est effectivement voisin de 0,8 (figure 7b).

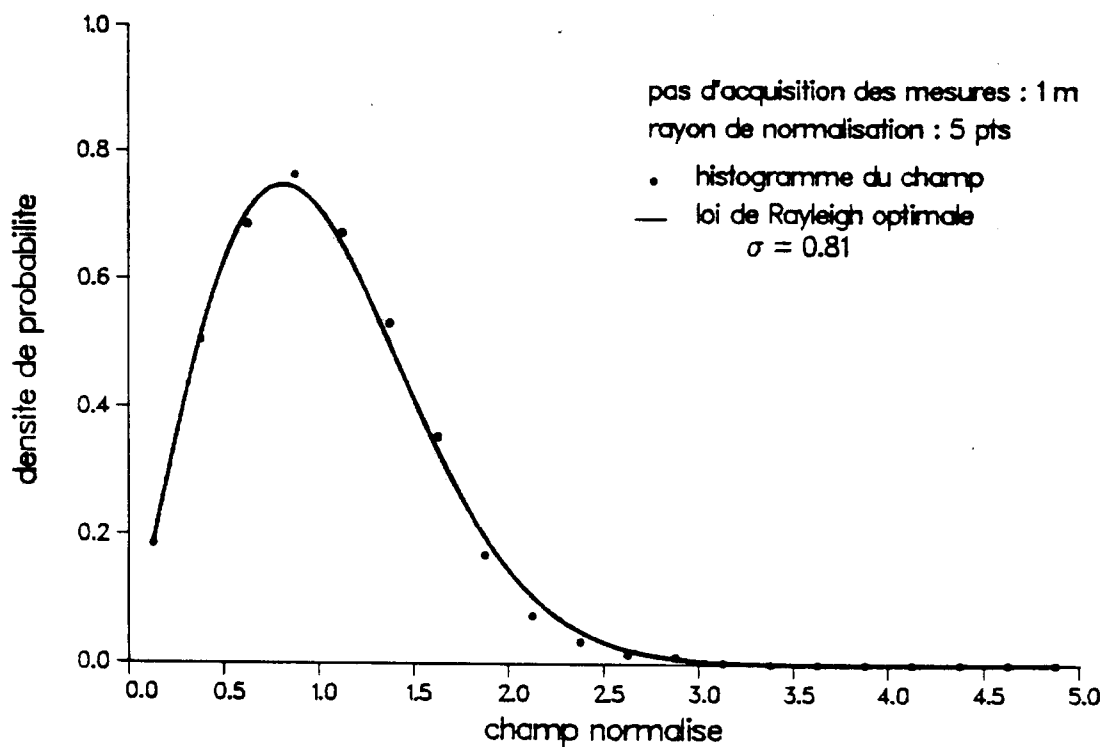
### 3.2.3. Cohérence des fluctuations rapides

De même que pour la loi statistique, le pas d'acquisition des mesures étant trop grand, on ne peut avoir accès directement à la fonction d'autocorrélation des fluctuations rapides  $F$ . Les calculs ne peuvent être faits qu'avec les valeurs de  $E_n$ , le champ normalisé ; ils donnent un résultat remarquablement identique sur tous les fichiers de mesures disponibles, quelle que soit la cadence d'acquisition (1 m ou 5 m) et quelle que soit la valeur de  $l$  (le rayon de l'intervalle sur lequel on calcule en chaque point la moyenne du champ) ; la courbe d'autocorrélation a la forme caractéristique de la figure 8a (nulle pour un décalage supérieur à  $2l$ , négative entre  $l$  et  $l$  et positive entre  $l + l$  et  $2l$ ).

Le fait que le comportement de l'autocorrélation de  $E_n$  soit indépendant du fichier de mesures et, surtout, celui que l'intervalle de non nullité de cette autocorrélation soit directement lié à la longueur de l'intervalle de moyennage du champ tendent à montrer que les fluctuations rapides



a - ensemble des fichiers a acquisition simple , normalisation en dB .



b - un seul fichier a acquisition simple , normalisation en champ .

Figure 7 - Loi statistique du champ normalise

n'apportent aucune contribution à la cohérence du signal, du moins avec la résolution minimum de 1 m qui est celle des mesures. En d'autres termes il semble que la distance de cohérence des fluctuations rapides soit inférieure à 1 m ; c'est ce qui va être montré de manière plus précise dans ce qui suit en effectuant de manière théorique le calcul de l'autocorrélation de  $E_n$ .

Les variables  $x$  et  $y$  représentent les champs  $E_n$  et  $F$  précédemment définis, on a donc :  $x = y - \langle y \rangle_l$

Le but du calcul est d'obtenir l'autocorrélation de  $x$ , afin de la comparer aux courbes expérimentales, moyennant l'hypothèse que les échantillons de  $x$  et  $y$  sont suffisamment espacés pour que l'autocorrélation de  $y$  soit nulle en dehors de l'origine.

Les conditions précédentes se traduisent par les relations :

$$x(i) = y(i) - \frac{1}{2l+1} \sum_{k=i-l}^{i+l} y(k)$$

et

$$C_y(p) = \frac{\langle y(i) \cdot y(i+p) \rangle - \langle y \rangle^2}{\sigma_y^2} = 0 \quad \text{si } p \neq 0$$

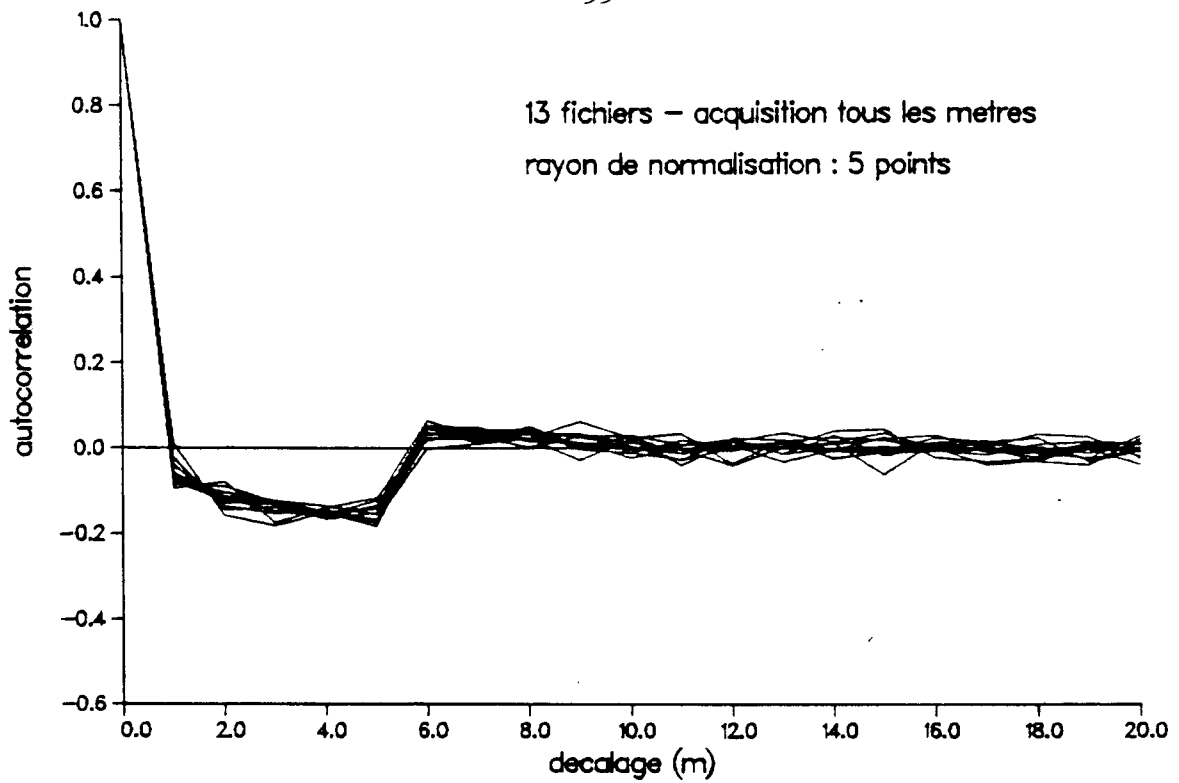
Le calcul de  $C_x(p) = \frac{\langle x(i) \cdot x(i+p) \rangle - \langle x \rangle^2}{\sigma_x^2}$

(développé dans l'annexe 2) donne les résultats résumés dans le tableau 2.

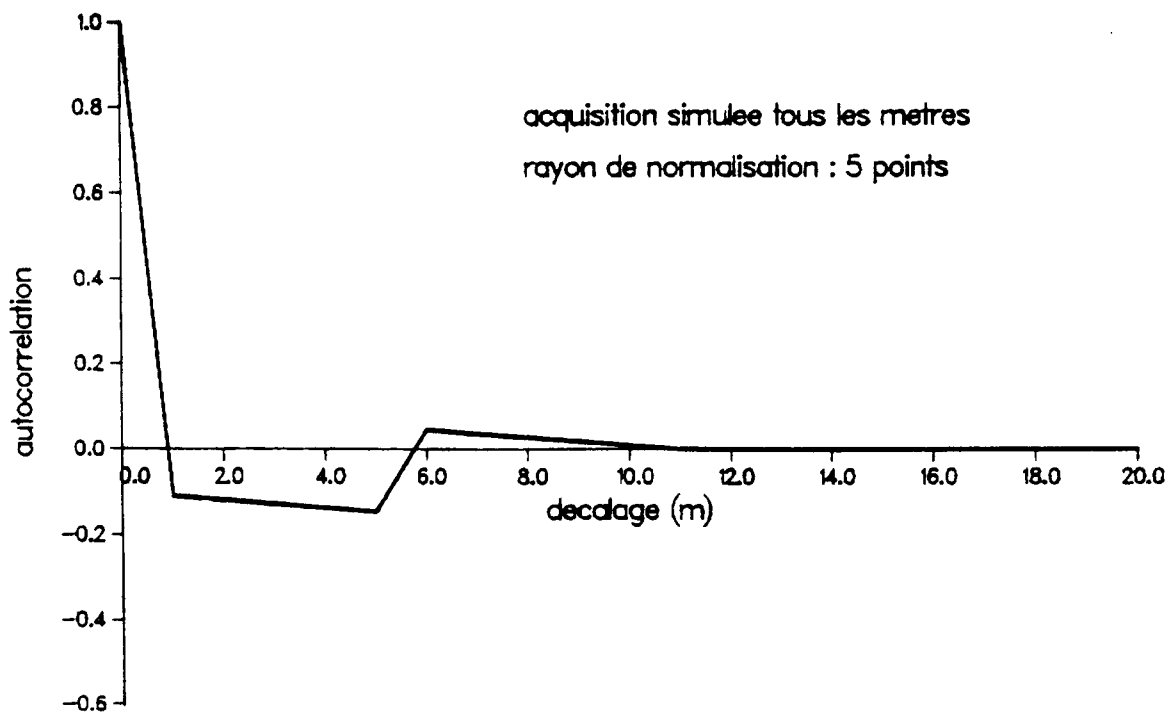
	$P = 0$	$0 < P \leq l$	$l < P \leq 2l$	$P > 2l$
$C_x(P)$	1 $\left( \sigma_x^2 = \frac{2l}{2l+1} \sigma_y^2 \right)$	$\frac{-1}{2l} \left( 1 + \frac{P}{2l+1} \right)$	$\frac{1}{2l} \left( 1 - \frac{P}{2l+1} \right)$	0

**TABLEAU 2**

La courbe associée à ce tableau pour  $l = 5$  (figure 8b) se superpose exactement à celles obtenues expérimentalement, ce qui conduit à l'interprétation que la composante "fluctuation rapide" du champ reçu est totalement décorrélée d'un point de mesure à l'autre (pour des pas d'échantillonnage supérieurs à 1 m).



a - Graphes experimentaux



b - Graphe theorique

Figure 8 - Autocorrelation du champ normalise

Les conséquences de ce résultat sont :

- une justification de la méthode employée précédemment pour établir la statistique des fluctuations rapides (l'hypothèse de décorrélation de point à point de mesure était nécessaire).
- une possibilité d'obtenir des résultats de corrélation relatifs aux phénomènes de plus grande échelle à partir des données brutes recueillies (voir paragraphe suivant).

### 3.3. Variations du champ moyen local

#### 3.3.1. Loi statistique

La répartition statistique du champ moyen local peut être évaluée pour chaque fichier correspondant à un quartier rectangulaire puisque la taille d'un tel quartier correspond à celle que l'on s'est fixée au paragraphe 3.3.  $E_1$  a été calculé par moyennage des valeurs mesurées sur un intervalle de 20 m, puis sa répartition statistique a été ajustée par une loi lognormale (en fait une loi normale puisque tous les calculs sont faits en dB) dont les paramètres  $m$  et  $\sigma$  ont été optimisés par une régression selon le critère des moindres carrés.

L'interprétation de la statistique de  $E_1$  par une loi lognormale semble raisonnable sur l'ensemble des fichiers traités (la figure 9 en est un exemple typique), quoique la concordance entre les histogrammes empiriques et les courbes de régression correspondantes ne soit pas aussi bonne que celle obtenue en 3.2.2., concernant les fluctuations rapides du champ. L'écart-type  $\sigma$  varie dans la majorité des cas entre 4 et 8 dB (des valeurs plus élevées, allant jusqu'à 11 ou 12 dB, n'étant qu'assez rares). Les plus grandes valeurs de  $\sigma$  s'observent généralement pour des fichiers correspondant à un trajet circulaire du véhicule récepteur autour d'un émetteur ; le mobile se déplace alors dans une zone beaucoup plus étendue que celle définie précédemment pour une cellule ; dans ces cas là, l'ajustement par une loi lognormale se révèle d'ailleurs assez mauvais. Ce dernier point tend à justifier les ordres de grandeur que nous avons choisis pour la définition du champ moyen local et cellulaire (500 à 1000 m pour ce dernier).

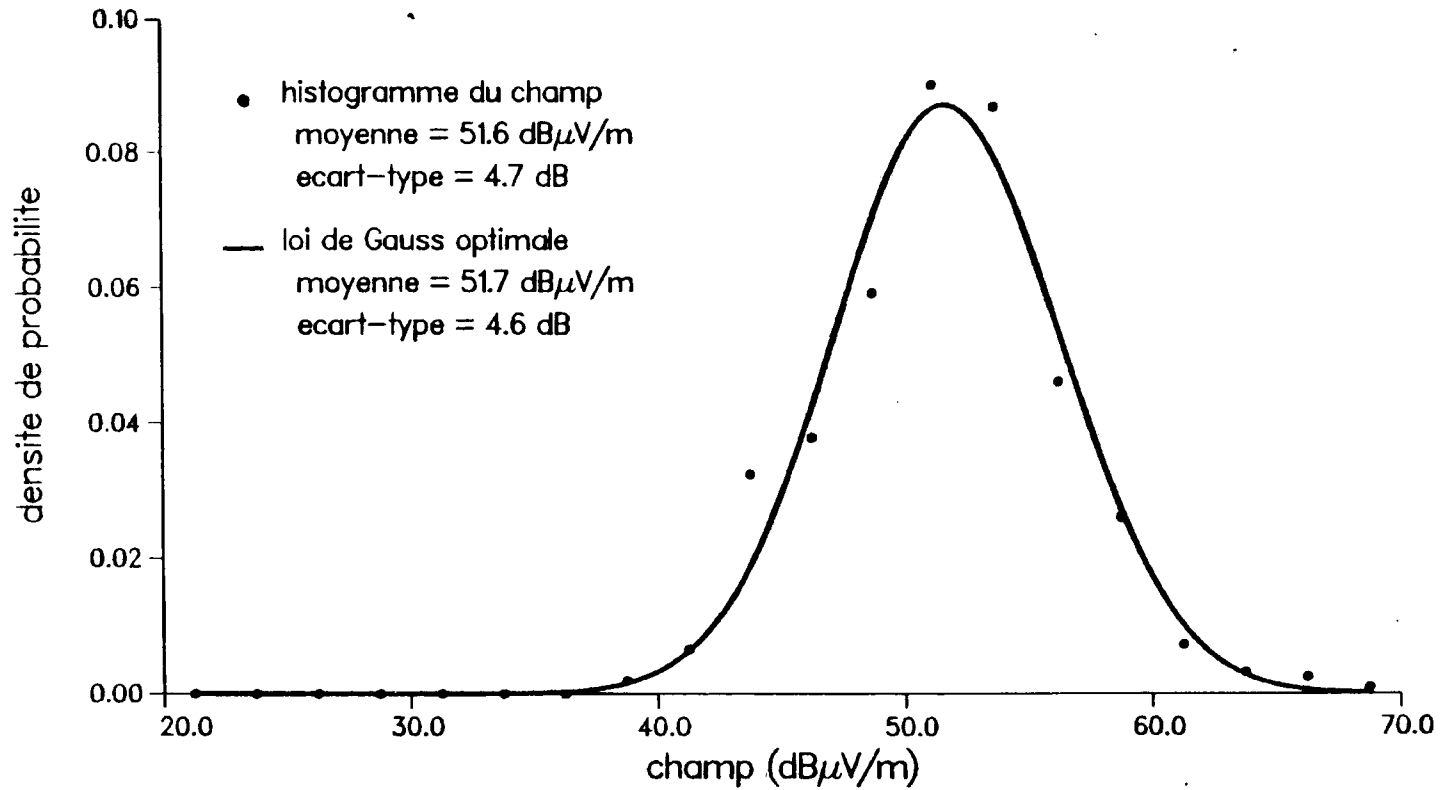
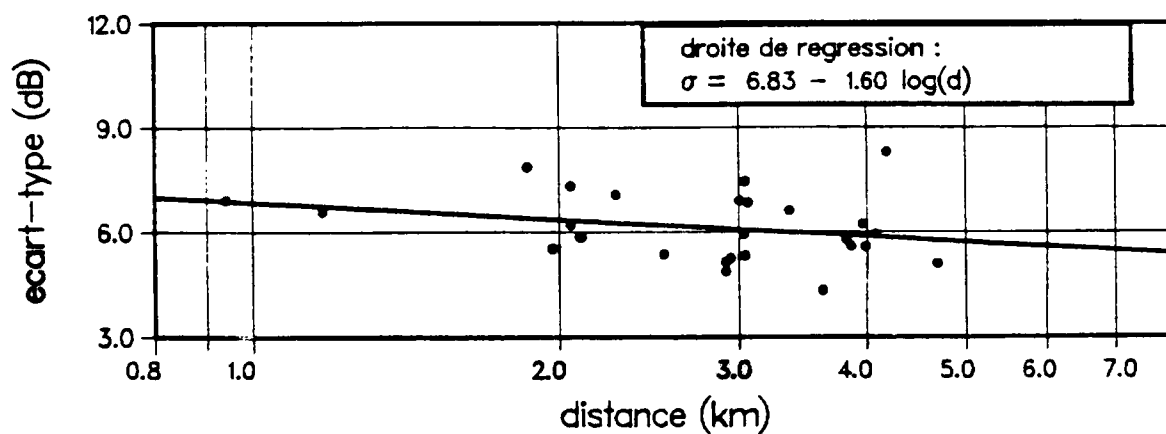
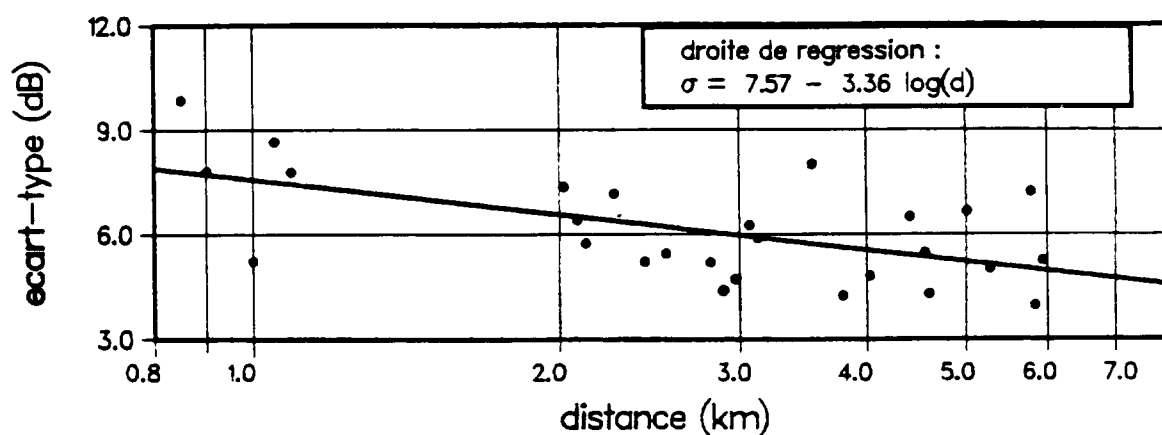


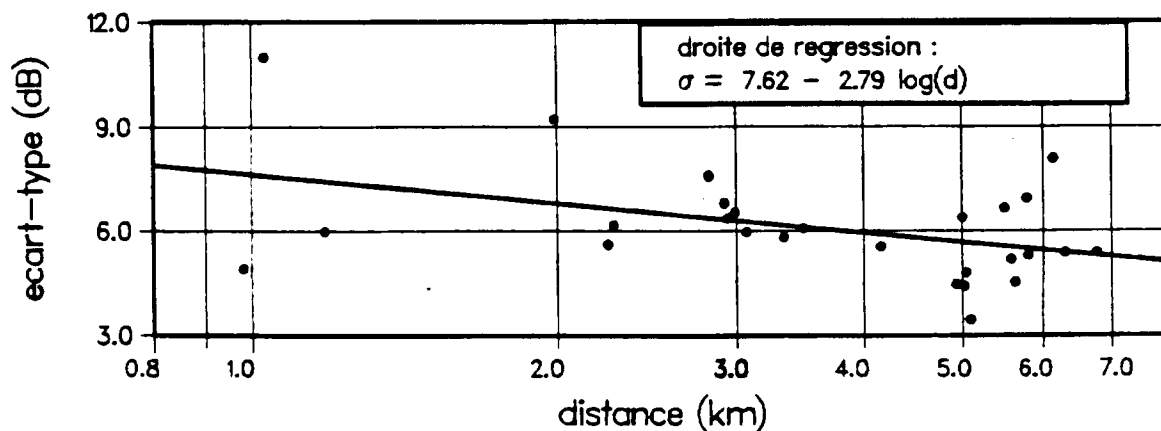
Figure 9 – Loi statistique du champ moyen local , calcule par moyennage sur 20 m , pour un fichier a acquisition simple



a - emetteur Archives



b - emetteur Gobelins



c - emetteur Segur

Figure 10 - Ecart-type du champ moyen local en fonction de la distance à l'émetteur

Le comportement de  $\sigma$  en fonction de la distance à l'émetteur est visualisé sur la figure 10 où les résultats ont été portés sur trois graphes différents selon l'émetteur utilisé : les droites respectives de meilleure approximation ont été calculées dans chacun des trois cas. Il apparaît que  $\sigma$  est une fonction légèrement décroissante de  $d$ , avec cependant une disparité de valeurs numériques concernant l'émetteur d'Archives par rapport à celles sensiblement identiques de Ségur et Gobelins.

L'influence de la hauteur d'antenne (respectivement 40, 30 et 24 m), seul paramètre permettant à priori de distinguer les sites d'émission, est très probablement à l'origine de ces différences : il semble logique de supposer que les effets de masque ont d'autant moins d'amplitude que la hauteur d'antenne d'émission est plus grande ; les valeurs plus faibles de  $\sigma$  dans le cas de l'émetteur Archives apparaissent ainsi comme normales.

La comparaison de ces derniers résultats avec la littérature est difficile car, comme indiqué au paragraphe 2.3., les quelques résultats qui y figurent sont relativement vagues ou bien contradictoires. Par contre, il serait plus intéressant de corrélérer les variations de  $\sigma$  avec celles de la densité urbaine de chaque quartier, mais cela nécessite l'utilisation de données de sur-sol (hauteur des immeubles par exemple) dont nous ne disposons pas actuellement.

### 3.3.2. Fonction d'autocorrélation

L'évaluation de la distance de cohérence des affaiblissements produits par les masques a son importance car l'ordre de grandeur de cette distance peut influencer directement sur certains choix lors de l'élaboration des systèmes de communication avec les mobiles ; notamment les possibilités d'un contrôle de puissance ou de l'utilisation de la diversité d'antennes d'émission sont liées à ce facteur.

C'est dans ce but que doivent être effectués des calculs d'autocorrélation du champ  $E_1$ , qui représente le produit de ces effets de masques. On peut montrer dans un premier temps que le calcul de l'autocorrélation de  $E_1$  se ramène de manière simple à celui de l'autocorrélation du champ instantané, celui auquel on a accès directement dans les fichiers de mesures.



En effet, comme il est établi en Annexe 3, les courbes d'autocorrélation de  $E$  et  $E_1$  sont proportionnelles, sauf, bien sûr, à l'origine, si l'on suppose que la composante fluctuations rapides du signal reçu est totalement décorrélée d'un point de mesure à l'autre, ce qui a été vérifié en 3.2.3. pour les résultats expérimentaux dont nous disposons. La relation de proportionnalité entre les deux autocorrélations est :

$$C_{E_\ell}(p) = C_E(p) \cdot \frac{\sigma_{E_\ell}^2 + \sigma_f^2}{\sigma_{E_\ell}^2} \quad (13)$$

pour  $p \neq 0$ .

L'écart-type  $\sigma_f$  des fluctuations rapides mesurées en dB est une constante lorsque leur distribution de probabilité est une loi de Rayleigh :  
 $\sigma_f \simeq 5,6$  dB dans ce cas.

La validité de la relation (13) a été testée sur les fichiers de mesures à acquisition simple ; sur la figure 11 sont représentées les trois courbes d'autocorrélation concernant un fichier type :

- la courbe d'autocorrélation du champ instantané,
- cette même courbe multipliée sauf à l'origine par le coefficient de la formule (13),
- la courbe d'autocorrélation du champ moyen local correspondant à un moyennage sur 20 m.

La bonne superposition de ces deux dernières courbes traduit l'exactitude de (13) et, en conséquence, constitue une nouvelle vérification de l'hypothèse faite au départ : la décorrélation totale des fluctuations rapides du signal sur deux points de mesure distants de 1 m.

Cette vérification étant faite, la principale caractéristique de ces courbes d'autocorrélation de  $E_1$  est leur grande distance de première annulation, laquelle peut constituer une définition de la distance de cohérence ; cette distance varie beaucoup d'un fichier à l'autre, il est donc difficile d'en tirer une valeur caractéristique, mais elle est dans tous les cas supérieure

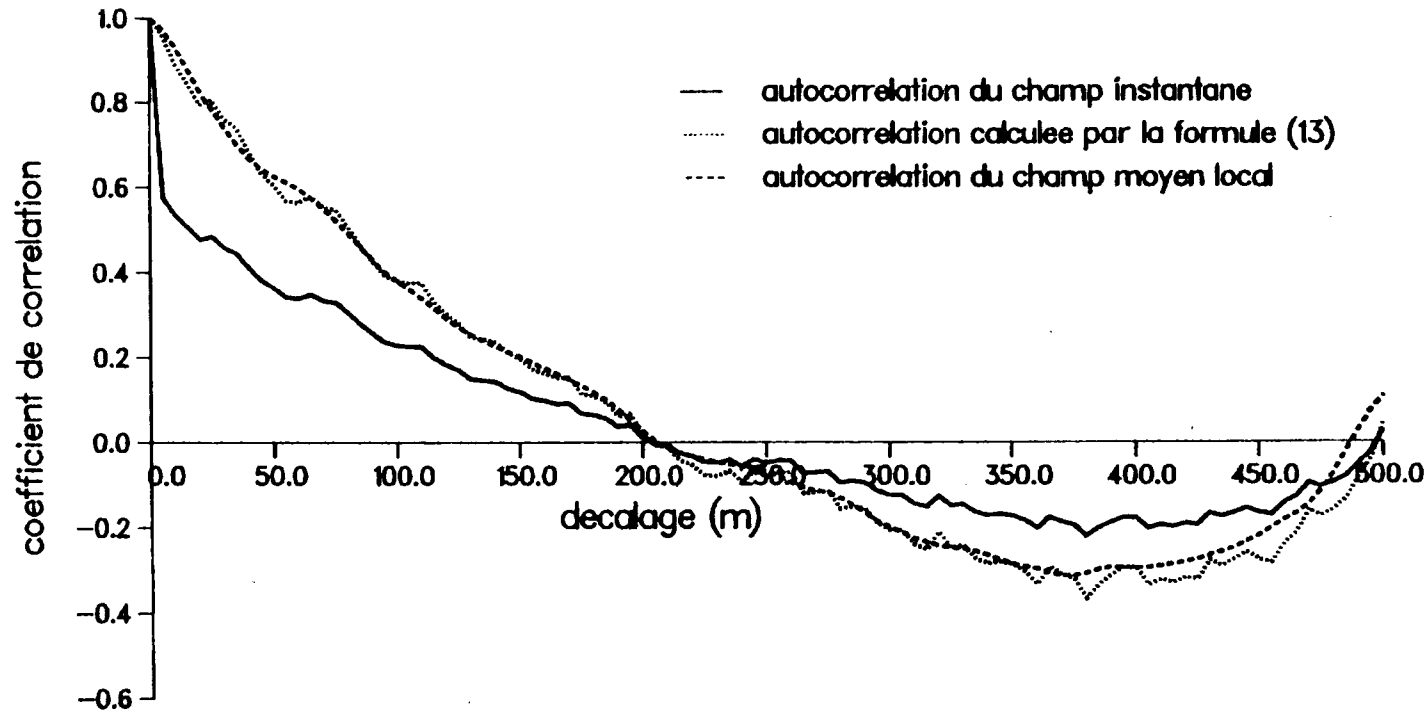


Figure 11 – Comparaison de l'autocorrelation du champ moyen local ,  
 resultant d'un moyennage sur 20 m ,  
 avec l'autocorrelation calculee par la formule (13)

à la centaine de mètres. L'ordre de grandeur ainsi obtenu de la distance de cohérence des effets de masque est certainement supérieur à ce que l'on aurait pu attendre (un ordre de grandeur de quelques dizaines de mètres semblerait plus intuitif) ; il favorise cependant, d'un point de vue pratique, l'installation, dans les systèmes futurs, de dispositifs de lutte contre les effets de masques.

Enfin, dernier point significatif concernant l'autocorrélation de  $E_1$ , les courbes obtenues sont relativement bien représentées par des droites dans l'intervalle compris entre l'origine et la première annulation, partie la plus significative d'une courbe d'autocorrélation. La forme de ces courbes est importante à connaître, à des fins de simulation entre autres ; Glance [12] a, par exemple, utilisé des expressions exponentielles comme représentation de la fonction d'autocorrélation des affaiblissements dus aux masques pour effectuer des calculs de taux d'erreurs dus à des commutations de stations de base.

### **3.4. Variations du champ moyen cellulaire**

#### **3.4.1. Affaiblissement de propagation entre antennes isotropes**

Dans la littérature on présente généralement les résultats de mesures de champ sous forme de champ ( $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ ) reçu au voisinage de l'antenne de réception ou sous forme de puissance ( $\text{dBm}$ ) reçue au niveau du récepteur. Ces grandeurs dépendent des caractéristiques de la propagation (affaiblissement entre antennes isotropes) et de certaines caractéristiques des équipements (puissance émise, gain des antennes...) qui varient largement d'une expérience à l'autre. C'est pourquoi, dans la suite, nous présenterons les résultats expérimentaux sous forme d'affaiblissement de propagation entre antennes isotropes pour s'affranchir des caractéristiques des équipements et faciliter ainsi la comparaison des résultats expérimentaux entre eux. Pour les valeurs instantanées et les moyennes locales du champ, la référence à l'affaiblissement de propagation entre antennes isotropes n'était pas utile puisqu'on ne s'intéressait alors qu'aux variations du champ et non pas à sa valeur absolue.

L'affaiblissement de propagation  $A(\text{dB})$  entre antennes isotropes est la différence entre la puissance  $P_e(\text{dBm})$  alimentant une antenne isotrope et la puissance  $P_r(\text{dBm})$  reçue sur une antenne isotrope.

$$A(\text{dB}) = P_e(\text{dBm}) - P_r(\text{dBm})$$

En espace libre :

$$P_r(\text{dBm}) = P_e(\text{dBm}) - 10 \log (16 \pi^2 d^2 / \lambda^2).$$

L'affaiblissement de propagation  $A_0$  entre antennes isotropes en espace libre a pour expression :

$$A_0(\text{dB}) = 10 \log (16 \pi^2 d^2 / \lambda^2), \quad (14)$$

$$A_0(\text{dB}) = 32,45 + 20 \log F(\text{MHz}) + 20 \log d(\text{km}).$$

Lorsque les conditions de propagation ne sont pas celles de l'espace libre, l'affaiblissement entre antennes isotropes est augmenté d'un terme  $A_1(\text{dB})$  qui dépend de la fréquence et des caractéristiques du milieu de propagation.

$$A(\text{dB}) = A_0(\text{dB}) + A_1(\text{dB}).$$

Lorsque l'antenne d'émission a un gain  $G_e(\text{dB})$  par rapport à l'antenne isotrope, dans la direction du récepteur, la puissance  $P_e$  est remplacée par la puissance isotrope rayonnée équivalente PIRE (dBm).

$$\text{PIRE (dBm)} = P_e(\text{dBm}) + G_e(\text{dB})$$

Expérimentalement, on mesure la puissance  $P(\text{dBm})$  reçue au niveau du récepteur. Pour une antenne de réception de gain  $G_r(\text{dB}_i)$  par rapport à l'antenne isotrope et pour une perte  $L(\text{dB})$  entre l'antenne et le récepteur, l'affaiblissement entre antennes isotropes est :

$$A(\text{dB}) = \text{PIRE}(\text{dBm}) - (P(\text{dBm}) + L(\text{dB}) - G_r(\text{dB}_i))$$

Les données expérimentales de la campagne de mesures CNET-DTRE sont les valeurs du champ électrique  $E(\text{dB}\mu\text{V}/\text{m})$  au voisinage de l'antenne de réception. Pour une impédance d'entrée de  $50\Omega$ , le champ électrique  $E$  est lié à la puissance  $P$  reçue au niveau du récepteur par la relation :

$$E(\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}) = P(\text{dBm}) + 107 + K(\text{dB}) + L(\text{dB})$$

où  $K$  est le facteur d'antenne :

$$K(\text{dB}) = 20 \log F(\text{MHz}) - G_r(\text{dB}) - 29,8$$

On calcule l'affaiblissement entre antennes isotropes en fonction du champ électrique  $E$  au voisinage de l'antenne de réception pour la relation

$$A(\text{dB}) = \text{PIRE}(\text{dBm}) - E(\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}) + 20 \log F(\text{MHz}) + 77,2 \quad (15)$$

### 3.4.2. Résultats expérimentaux

Dans la campagne de mesures CNET-DTRE les trois fréquences utilisées sont très proches les unes des autres, l'écart relatif entre les extrêmes  $F_1 = 854,65 \text{ MHz}$  et  $F_2 = 855,5 \text{ MHz}$  est de 0,1 %. A cette variation de fréquence correspond une variation d'affaiblissement cellulaire que l'on peut estimer à l'aide du modèle empirique d'Okumura-Hata. Dans ce modèle l'affaiblissement dépend de la fréquence par le terme additif  $26,16 \log F$ . A une variation de fréquence de 0,1 % correspond une variation d'affaiblissement négligeable (0,01 dB). Il en résulte que pour les affaiblissements déduits des mesures, on peut considérer que les trois fréquences sont identiques. De même la hauteur d'antenne  $h_m$  de réception sur les mobiles a toujours été de 1,5m au dessus du sol. Les résultats issus de cette expérimentation ne sont valables que pour cette hauteur d'antenne  $h_m = 1,5 \text{ m}$ .

Par contre, les effets de la hauteur d'antenne de la station de base  $h_b$ , qui varie de 24 m à 40 m, et les effets de la structure urbaine au voisinage des émetteurs ne peuvent pas être considérés comme négligeables. C'est pourquoi, nous séparerons les résultats de mesure en trois groupes correspondant chacun à un site d'émission.

Pour chaque fichier de données qui contient les valeurs instantanées du champ dans une cellule rectangulaire ou sur une portion de trajet circulaire, on a calculé l'affaiblissement moyen c'est-à-dire la moyenne arithmétique des affaiblissements instantanés.

A l'affaiblissement moyen dans une cellule on associe la distance du centre de la cellule au site d'émission. Quand le fichier de données se rapporte à une portion de trajet circulaire, la distance à l'émetteur est égale au rayon nominal du cercle.

Dans le cas d'un trajet circulaire en acquisition triple, on ne retient que les fichiers contenant les données issues de l'émetteur placé au centre du cercle. On ne tient pas compte des fichiers pour lesquels les émetteurs ne sont pas centrés et donc auxquels on ne peut pas associer de distance caractéristique entre l'émetteur et la zone de réception.

Les distances ainsi associées aux zones de mesure varient de 0,8 à 7 km pour l'ensemble des trois sites d'émission.

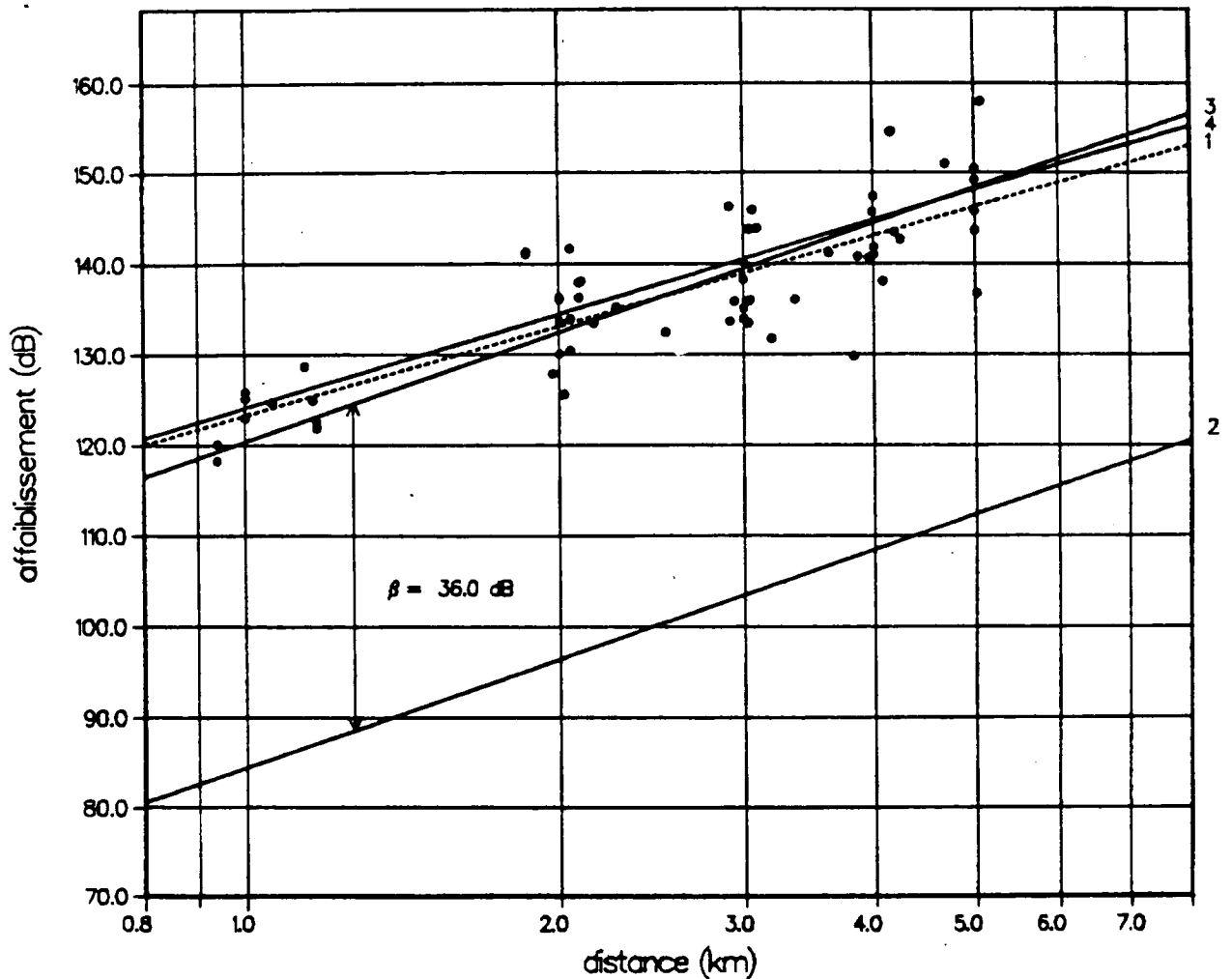
Le nombre d'affaiblissements cellulaires calculés, c'est-à-dire le nombre de fichiers traités, varie avec le site d'émission. Il est respectivement égal à 61, 34 et 33 pour les émetteurs ARCHIVES, GOBELINS et SEGUR.

Sur les figures 12 à 14, on a porté pour chacun des trois sites d'émission :

- des points qui représentent les valeurs d'affaiblissements cellulaires déduits des mesures en fonction du logarithme décimal de la distance.

- une droite de régression 1, établie à partir des points expérimentaux, qui donne un affaiblissement de la forme :

$$A(\text{dB}) = a + b \log d$$



Nombre de fichiers : 61

Nombre total de mesures du champ instantané : 89 562

● Points expérimentaux (un point par fichier)

1 - Régression linéaire sur les points expérimentaux

$$A(\text{dB}) = 123,3 + 32,9 \log d$$

$$\text{écart-type } \sigma = 4,91 \text{ dB}$$

$$\text{coefficient de corrélation} : 0,82$$

2 - Affaiblissement théorique sur terre plate

$$A(\text{dB}) = 84,4 + 40 \log d$$

3 - Formulation d'EGLI à partir des points expérimentaux

$$A(\text{dB}) = 120,4 + 40 \log d$$

$$= A \text{ terre plate} + 36$$

$$\text{écart-type } \sigma = 5,14 \text{ dB}$$

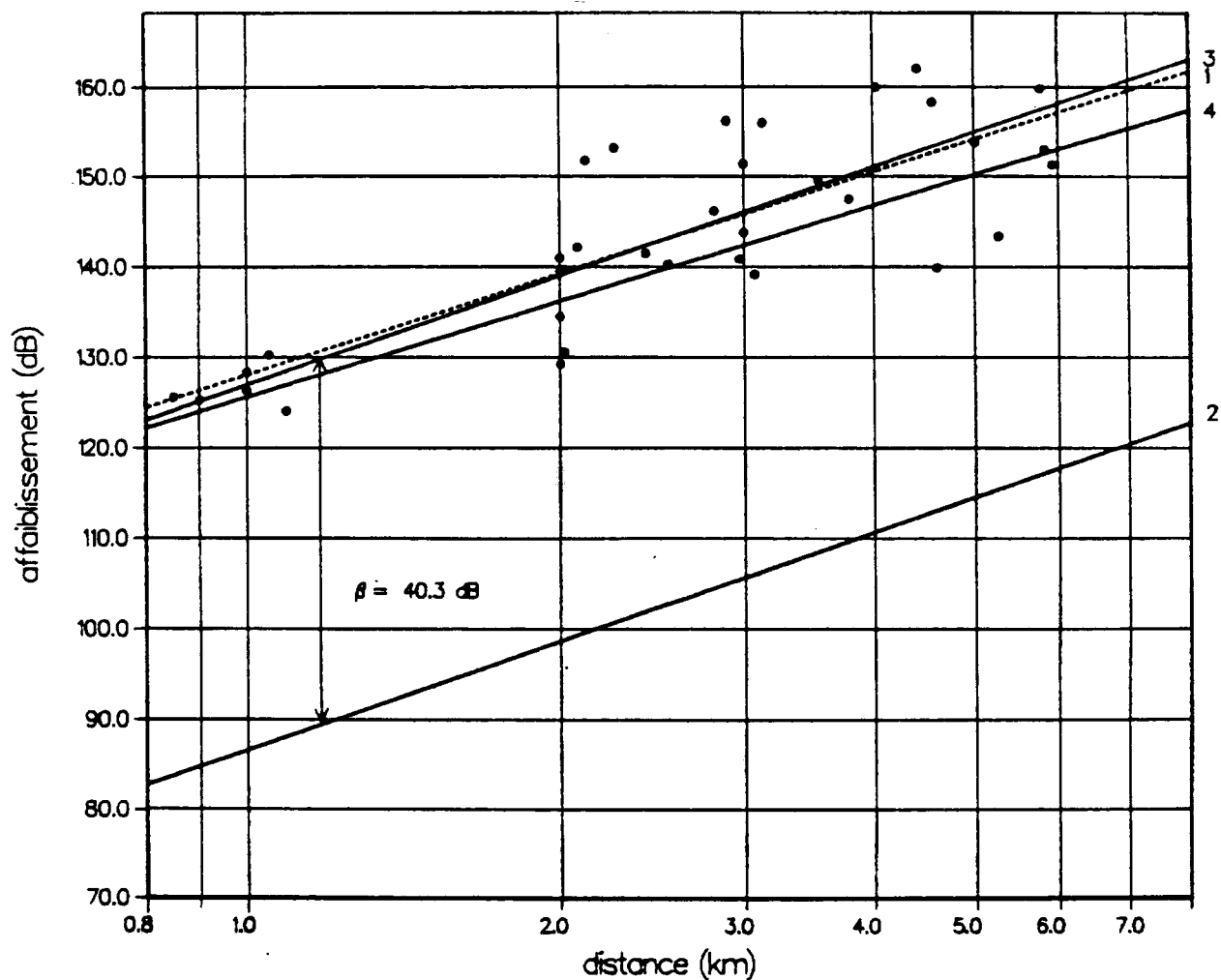
$$\text{coefficient de corrélation} = 0,82$$

4 - Modèle d'OKUMURA-HATA

$$A(\text{dB}) = 124,1 + 34,4 \log d$$

$$\text{écart-type } \sigma = 5,13 \text{ dB}$$

FIGURE 12 : Affaiblissement moyen cellulaire en fonction de la distance à l'émetteur ARCHIVES.



Nombre de fichiers : 34

Nombre total de mesures du champ instantané : 26 453

● Points expérimentaux (un point par fichier)

1 - Régression linéaire sur les points expérimentaux

$$A(\text{dB}) = 128,1 + 37,3 \log d$$

$$\text{écart-type } \sigma = 6,48 \text{ dB}$$

$$\text{coefficient de corrélation} : 0,81$$

2 - Affaiblissement théorique sur terre plate

$$A(\text{dB}) = 86,7 + 40 \log d$$

3 - Formulation d'EGLI à partir des points expérimentaux

$$A(\text{dB}) = 127 + 40 \log d$$

$$= A \text{ terre plate} + 40,3$$

$$\text{écart-type } \sigma = 6,51 \text{ dB}$$

$$\text{coefficient de corrélation} = 0,81$$

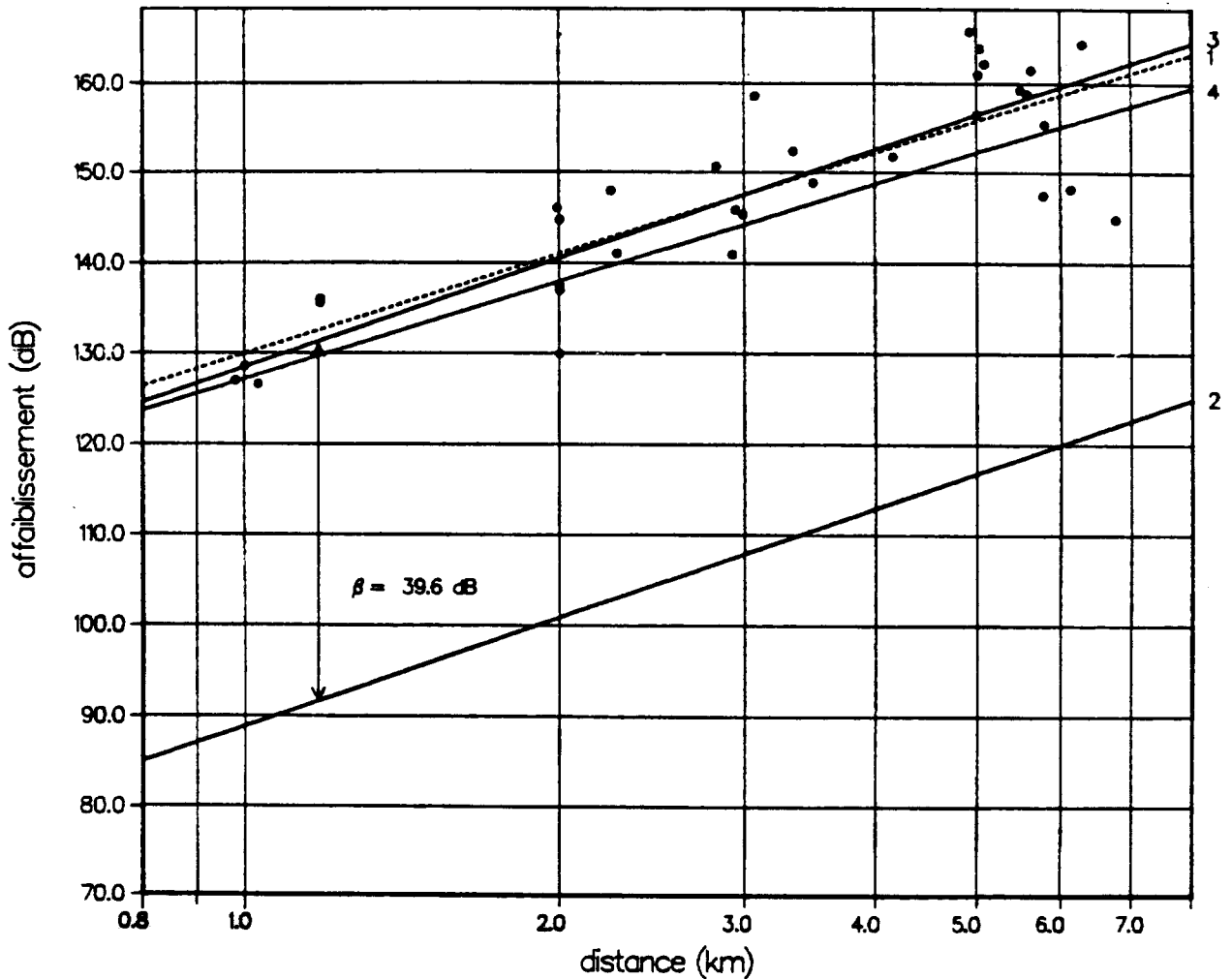
4 - Modèle d'OKUMURA-HATA

$$A(\text{dB}) = 125,6 + 35 \log d$$

$$\text{écart-type } \sigma = 7,31 \text{ dB}$$

FIGURE 13 : Affaiblissement moyen cellulaire en fonction de la distance à l'émetteur Gobelins.





Nombre de fichiers : 33

Nombre total de mesures du champ instantané : 26 448

● Points expérimentaux (un point par fichier)

1 - Régression linéaire sur les points expérimentaux

$$A(\text{dB}) = 130 + 36,9 \log d$$

écart-type  $\sigma = 6,08$  dB

coefficient de corrélation : 0,84

2 - Affaiblissement théorique sur terre plate

$$A(\text{dB}) = 88,9 + 40 \log d$$

3 - Formulation d'EGLI à partir des points expérimentaux

$$A(\text{dB}) = 128,5 + 40 \log d$$

$$= A_{\text{terre plate}} + 39,6$$

écart-type  $\sigma = 6,13$  dB

coefficient de corrélation = 0,84

4 - Modèle d'OKUMURA-HATA

$$A(\text{dB}) = 127,2 + 35,9 \log d$$

écart-type  $\sigma = 6,93$  dB

FIGURE 14 : Affaiblissement moyen cellulaire en fonction de la distance à l'émetteur SEGUR.

- une droite 2 qui représente l'affaiblissement théorique sur la terre plate.

$$A(\text{dB}) = -20 \log (h_b \cdot h_m) + 40 \log d$$

- une deuxième droite de régression 3, établie à partir des points expérimentaux, avec une pente de valeur imposée  $b = 40$  et qui représente l'affaiblissement moyen cellulaire selon le modèle d'Egli :

$$A(\text{dB}) = -20 \log (h_b \cdot h_m) + 40 \log d + \beta$$

où  $\beta$  est le facteur de terrain caractéristique de la structure urbaine c'est-à-dire l'écart d'affaiblissement par rapport à l'affaiblissement théorique sur la terre plate.

- une droite 4 qui représente l'affaiblissement en milieu urbain selon la formulation d'Okumura-Hata :

$$A(\text{dB}) = 69,55 + 26,16 \log F - 13,82 \log h_b + (44,9 - 6,55 \log h_b) \log d$$

Le coefficient de correction  $a(h_m)$  pour la hauteur d'antenne  $h_m$  du mobile, donné par la formule (7bis), est nul dans le cas des mesures de la campagne CNET-DTRE puisque cette hauteur d'antenne était égale à 1,5 m.

Les hauteurs d'antenne  $h_b$  de la station de base variaient entre 24 m et 40 m. A ces hauteurs correspondent des pentes de la loi d'affaiblissement variant de 35,9 à 34,4.

Pour chacun des sites d'émission, on a reporté sur le tableau 3 la hauteur d'antenne d'émission  $h_b$ , l'expression de l'affaiblissement cellulaire obtenu par régression linéaire et l'écart type associé, l'expression de l'affaiblissement obtenu par régression linéaire avec une pente imposée  $b = 40$  (modèle d'Egli), l'écart type associé et la valeur du facteur de terrain  $\beta$ .

	SITES D'EMISSION		
	ARCHIVES	GOBELINS	SEGUR
<b>Hauteur d'antenne d'émission</b>	40 m	31 m	24 m
<b>Régression linéaire écart-type</b>	123,3 + 32,9 log d $\sigma = 4,91$ dB	128,1 + 37,3 log d $\sigma = 6,48$ dB	130,0 + 36,9 log d $\sigma = 6,08$ dB
<b>Modèle d'Egli écart-type</b>	120,4 + 40 log d $\sigma = 5,14$ dB	127,0 + 40 log d $\sigma = 6,51$ dB	128,5 + 40 log d $\sigma = 6,13$ dB
<b>Facteur de terrain</b>	$\beta = 36,0$ dB	$\beta = 40,3$ dB	$\beta = 39,6$ dB

**TABLEAU 3 :**

Affaiblissements moyens cellulaires obtenus par régression linéaire sur les points expérimentaux.

A partir des résultats expérimentaux, on peut faire les remarques suivantes :

- les points expérimentaux sont relativement dispersés, leur écart-type par rapport à la droite de régression l varie de 4,9 à 6,5 dB. La valeur la plus faible correspond au site d'émission ARCHIVES. Le coefficient de corrélation entre les points expérimentaux et la droite de régression est compris entre 0,81 et 0,84 suivant l'émetteur (figures 12 à 14).

- Les affaiblissements obtenus par régression linéaire (courbe 1) sont très voisins pour les sites d'émission GOBELINS et SEGUR alors qu'ils sont plus faibles pour le site d'émission ARCHIVES. Cet écart pourrait être dû à l'effet de la hauteur d'antenne d'émission  $h_b$  qui est plus grande à ARCHIVES. Par contre les affaiblissements déduits des mesures de l'émetteur GOBELINS ( $h_b = 31$  m) sont légèrement plus faibles que ceux déduits des mesures de l'émetteur SEGUR ( $h_b = 24$  m).

- La pente de la loi en  $\log d$  (courbes 1) est comprise entre 33 et 37.

- Les écarts-types des points expérimentaux par rapport aux droites de régression en  $40 \log d$  (courbes 3, modèle d'Egli) ne sont que très légèrement supérieurs aux écarts-types précédents. Il en résulte que dans la gamme des distances testées (0,8 à 7 km), la représentation de l'affaiblissement cellulaire par une loi en  $40 \log d$  (modèle d'Egli) n'est guère moins bonne que la représentation obtenue par régression linéaire (courbes 1). L'affaiblissement cellulaire est alors caractérisé par le facteur de terrain  $\beta$  dont la valeur est comprise entre 36 et 40 dB.

- Le modèle d'Okumura-Hata (courbes 4) rend bien compte des affaiblissements mesurés à partir du site d'émission ARCHIVES. Pour les deux autres sites d'émission, GOBELINS et SEGUR, le modèle d'Okumura-Hata donne des affaiblissements plus faibles de quelques dB que ceux donnés par les droites de régression 1. Les écarts-types des points expérimentaux par rapport à ce modèle sont supérieurs de quelques fractions de dB par rapport aux deux cas précédents.

#### 3.4.3. Comparaison avec d'autres résultats expérimentaux.

Il existe de nombreuses publications étrangères concernant la propagation en milieu urbain dans différentes bandes de fréquences. Nous considérerons celles qui concernent la bande des 900 MHz pour comparer

les lois expérimentales d'affaiblissement moyen cellulaire en fonction de la distance.

Les résultats expérimentaux ne sont pas toujours représentés sous la forme d'affaiblissement entre antennes isotropes mais souvent sous la forme de puissance reçue (dBm) ou de champ au voisinage de l'antenne de réception (dB  $\mu$ V/m). A partir de ces données on peut trouver la pente  $b$  de la loi d'affaiblissement  $A = a + b \log d$  mais le terme  $a$  d'affaiblissement à 1 km est souvent impossible à calculer par manque de données sur les caractéristiques des équipements. Il en est de même pour le facteur de terrain  $\beta$  du modèle d'Egli qu'il n'est pas toujours possible d'évaluer lorsqu'il n'est pas donné explicitement.

En conséquence, la comparaison des résultats expérimentaux d'une étude à l'autre portera sur la valeur de la pente  $b$  de la loi d'affaiblissement en  $\log d$  et quand cela est possible sur la valeur du facteur de terrain  $\beta$ .

On a représenté sur le tableau 4 les valeurs de ces coefficients  $b$  et  $\beta$  pour différentes séries de mesures dont les résultats ont été publiés [13 à 18]. Les valeurs suivies d'un astérisque sont des estimations déduites des résultats publiés. On a également porté sur le tableau 4 les principales caractéristiques expérimentales : ville, fréquence, hauteurs d'antenne, distances. Ces paramètres varient d'une série de mesures à l'autre. Il en résulte que la comparaison ne peut être faite que globalement, il n'est pas possible par exemple de faire apparaître l'effet des variations de structure urbaine d'une ville à l'autre. Cependant il est possible d'estimer les variations de l'affaiblissement moyen cellulaire en fonction des variations de certains paramètres en se référant au modèle d'Okumura-Hata.

Ainsi, à l'écart entre les fréquences extrêmes  $F_1 = 820$  MHz et  $F_2 = 936$  MHz figurant sur le tableau 4, le modèle d'Okumura-Hata fait correspondre une variation d'affaiblissement moyen cellulaire :

$$A_2 - A_1 = 26,16 \log F_2/F_1$$

AUTEUR	VILLE	FREQUENCE MHz	HAUTEUR D'ANTENNE		DISTANCES km	A(dB)=a+b logd pente b	A(dB) = -20 log(h <sub>b</sub> h <sub>m</sub> ) + 40 logd + β facteur de terrain β dB
			h <sub>b</sub> m	h <sub>m</sub> m			
BLACK et REUDINK [6]	Philadelphie	836	152	3		30	
COX [13]	New-York	910	120	2,5	1,5 à 3,5	33	
OTT et PLITKINS [14]	Philadelphie	821	14 à 22	1,3 à 2,3	0,8 à 10	36,8	
HUGHES [15]	Londres	936	3	2	0,7 à 4	43	22*
HUGHES [15]	Londres	936	3	2	0,3 à 2	43	38*
HUGHES [15]	Londres (suburbain)	936	3	2	0,1 à 4	36	25*
IBRAHIM et PARSONS [16]	Londres	896,5	46	2,5	2 et 5	37	45
IBRAHIM et PARSONS [16]	Birmingham	896,5	30	2,5	2 et 5	50,4	40
CHESTER [17,18]	Auckland	927	50	2,4	0,8 à 5	41,5	45,6
CNET-DTRE	Paris	855	40	1,5	0,9 à 5	32,9	36,0
CNET-DTRE	Paris	855	31	1,5	0,8 à 6	37,3	40,3
CNET-DTRE	Paris	855	24	1,5	1 à 7	36,9	39,6

\* Valeurs déduites des résultats publiés.

**TABLEAU 4 :**

Affaiblissement moyen cellulaire à 900 MHz en fonction de la distance.

Comparaison entre divers résultats expérimentaux.

qui est égale à 1,5 dB. Cette variation ne concerne que la position relative de la droite  $A = a + b \log d$  c'est-à-dire le terme  $a$  (affaiblissement à une distance 1 km). Cette variation de 1,5 dB est négligeable devant la valeur de  $a$  qui est typiquement de l'ordre de 120 dB. D'autre part, et toujours selon le modèle d'Okumura-Hata, la pente  $b$  de la formulation linéaire de l'affaiblissement est indépendante de la fréquence. Pour ces deux raisons, on peut considérer que les écarts entre les fréquences citées dans le tableau 4 sont négligeables.

Les hauteurs d'antenne mobile  $h_m$  varient de 1,3 m à 3 m, il leur correspond, selon le modèle d'Okumura-Hata, une variation de  $a$  de - 0,5 dB à + 2,7 dB. Ces variations restent faibles devant la valeur de  $a$  et n'affectent pas la pente  $b$ .

Par contre, les hauteurs d'antenne  $h_b$  de la station de base varient de 3 m à 152 m. Dans le modèle d'Okumura-Hata le domaine de validité de ces hauteurs est de 30 m à 200 m. Quand la hauteur  $h_b$  est doublée, le terme  $a$  de la loi d'affaiblissement diminue de 4,2 dB et la valeur de la pente  $b$  diminue de 2. Donc en dehors des variations dues aux différences de structure urbaine, qu'il n'est actuellement pas possible d'évaluer, les plus importantes variations de la pente  $b$  sont certainement dues aux écarts de hauteur d'antenne  $h_b$  de la station de base entre les différentes séries de mesures.

On a représenté sur la figure 15 les valeurs de la pente  $b$  en fonction de la hauteur  $h_b$  pour les séries de mesures mentionnées sur le tableau 4. On a également représenté la valeur de la pente  $b$  selon le modèle d'Okumura-Hata dans son domaine de validité c'est-à-dire de  $h_b = 30$  m à  $h_b = 200$  m.

Pour les hauteurs d'antenne  $h_b$  comprises entre 20 et 150 m, les pentes  $b$  déduites des mesures sont assez proches de celles données par la formulation d'Okumura-Hata, sauf pour les mesures faites à Auckland et surtout à Birmingham pour lesquelles les valeurs de  $b$ , respectivement égales à 41,5 et à 50,4 sont particulièrement élevées.

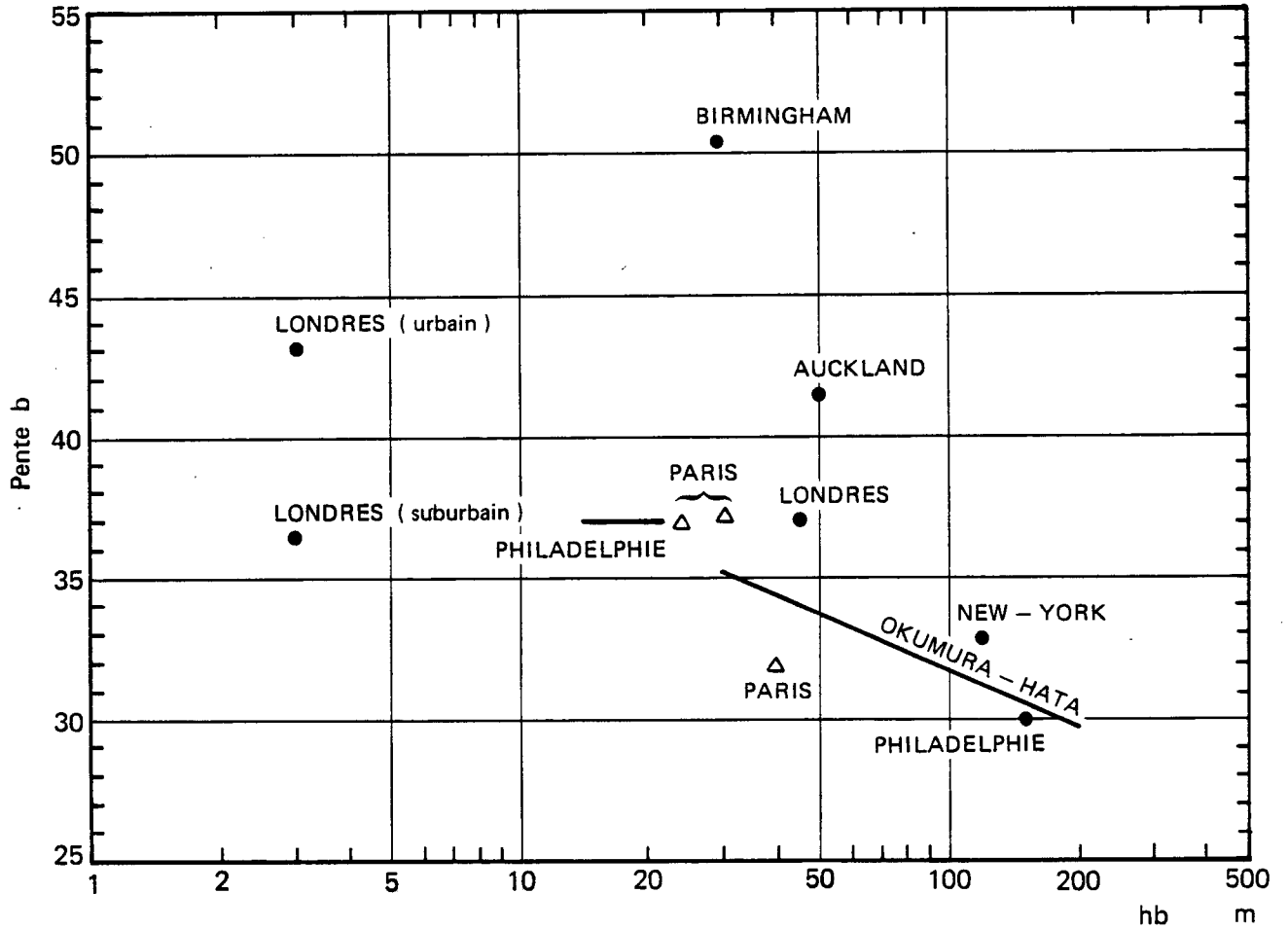


Figure 15 — Pente  $b$  de la loi d'affaiblissement  $A = a + b \log d$  en fonction de la hauteur d'antenne  $h_b$  de la station de base.  
 Comparaison entre différentes séries de mesure et le modèle d'OKUMURA - HATA



Les valeurs de la pente  $b$  obtenues à Londres pour de faibles hauteurs  $h_b$  sont plus élevées que pour les grandes hauteurs  $h_b$ , sauf pour les zones suburbaines [15] où l'effet de masque de l'environnement est moins important qu'en zone urbaine.

Les valeurs du facteur de terrain  $\beta$  portées sur le tableau 4 sont comprises entre 36 dB et 46 dB pour les hauteurs d'antennes  $h_b$  supérieures à 20 m. Pour les faibles valeurs de  $h_b$  utilisées par Hughes [15], les valeurs du facteur de terrain  $\beta$  sont plus faibles mais aussi beaucoup plus dispersées notamment en zone urbaine ( $\beta = 22$  dB et  $\beta = 38$  dB). Hughes explique ces écarts par les différences d'environnement urbain autour de la station de base.

On ne dispose pas des valeurs du facteur de terrain  $\beta$  pour les grandes hauteurs d'antennes  $h_b$  utilisées à Philadelphie ( $h_b = 152$  m) et à New-York ( $h_b = 120$  m).

La valeur du facteur de terrain  $\beta$  semble augmenter avec la hauteur d'antenne  $h_b$  et dépendre fortement de la structure urbaine.

#### 4 - CONCLUSION

La campagne de mesures CNET-DTRE effectuée à Paris a permis d'obtenir une première série de résultats de propagation en zone urbaine dans la bande 900MHz. Ces résultats relatifs au niveau de champ reçu à fréquence fixe ont été présentés selon un schéma à trois niveaux développé dans la première partie de cette note ; ils sont dans l'ensemble conformes à ceux publiés par d'autres auteurs :

- les fluctuations rapides du signal sont tout à fait bien représentées par un processus de Rayleigh, ce qui signifie une absence quasi-géné-

rale du trajet direct entre l'émetteur et le récepteur ; d'autre part, il a été vérifié que la distance de cohérence de ce processus était inférieure à 1 m.

- la répartition statistique du champ moyen local selon une loi normale est correcte ; l'écart-type de cette loi décroît globalement avec la distance émetteur-récepteur. Les variations de ce champ, dues aux effets de masques, se révèlent assez lentes : on note des distances de cohérence toujours supérieures à 100 m.

- l'affaiblissement moyen cellulaire suit en dB avec une bonne approximation une loi en  $\log d$  dont la pente est comprise entre 33 et 37 selon l'émetteur. Si l'on compare avec une loi en  $40 \log d$  (issue du modèle de la terre-plate), on doit rajouter un terme, dit facteur de terrain, compris entre 36 et 40 dB. Enfin, le modèle empirique de prédiction d'Okumura-Hata "colle" de manière satisfaisante à cette série de résultats expérimentaux.

Cependant, il est clair que des vérifications et des précisions doivent être apportées en complément de ces résultats : en particulier, ceux relatifs aux fluctuations rapides et établis un peu artificiellement à partir des données de cette campagne demandent à être validés par des mesures effectuées à une cadence beaucoup plus rapide ; ensuite, les caractéristiques des effets de masques et de leur cohérence nécessitent des approfondissements car c'est peut-être dans ce domaine que les résultats sont les moins significatifs (ici comme dans d'autres publications !).

Enfin, il est nécessaire d'étudier de manière détaillée l'effet du milieu urbain proprement dit à l'aide de données de sur-sol : certains paramètres bien choisis de la configuration urbaine peuvent être des facteurs déterminants dans l'évaluation quantitative de grandeurs telles que le champ moyen cellulaire ou l'écart-type du champ moyen local.

## ANNEXE 1

Calcul du paramètre  $\sigma$  d'une loi de Rayleigh dont la moyenne est nulle lorsque la variable aléatoire est exprimée en dB.

Soit  $y$  une variable aléatoire suivant une loi de Rayleigh de paramètre  $\sigma$ , et soit  $x = 20 \log(y)$ ; la densité de probabilité de  $x$  s'écrit

$$p(x) = \frac{M}{2\sigma^2} \exp\left(Mx - \frac{1}{2\sigma^2} e^{Mx}\right) \quad (\text{A.1})$$

avec 
$$M = \frac{\log 10}{10}$$

A partir de (A.1), on peut calculer, en fonction de  $\sigma$ , la valeur moyenne de  $x$ .

$$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} v \cdot p(v) dv = \frac{M}{2\sigma^2} \int_{-\infty}^{+\infty} v \cdot \exp\left(Mv - \frac{1}{2\sigma^2} e^{Mv}\right) dv$$

En effectuant le changement de variable  $u = Mv$

$$\langle x \rangle = \frac{1}{2\sigma^2 M} \int_{-\infty}^{+\infty} u \cdot \exp\left(u - \frac{1}{2\sigma^2} e^u\right) \cdot du$$

D'après Gradshteyn et Ryzhik [19], on a la formule générale, pour  $\text{Re}(\mu) > 0$  et  $C$  étant la constante d'Euler :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} u \cdot e^u \cdot \exp(-\mu e^u) \cdot du = \frac{-1}{\mu} (C + \text{Log } \mu) \quad (\text{A.2})$$

En appliquant (A.2) à  $\mu = 1 / 2\sigma^2$ , on obtient :

$$\langle x \rangle = \frac{1}{2\sigma^2 M} \left[ -2\sigma^2 \left( C + \text{Log } \frac{1}{2\sigma^2} \right) \right]$$

d'où finalement :

$$\langle x \rangle = \frac{1}{M} \left( \text{Log}(2\sigma^2) - C \right) \quad (\text{A.3})$$

Lorsque  $\langle x \rangle = 0$ , on obtient :  $C = \text{Log } 2\sigma^2$

d'où une valeur numérique approchée de  $\sigma$  :  $\sigma = 0,94$ .

## ANNEXE 2

Calcul de l'autocorrélation du signal normalisé lorsque le signal d'origine est d'autocorrélation nulle.

Reprenant les notations de 3.2.3.,  $y$  est le signal d'origine et  $x$  le signal normalisé par moyennage sur  $\pm l$  points (on suppose que l'on dispose d'échantillons des signaux sur  $n$  points).

$$x = y - \langle y \rangle_l \text{ se traduit par :}$$

$$x(i) = y(i) - \frac{1}{2l+1} \cdot \sum_{i-l}^{i+l} y(k) \quad , \quad 1 \leq i \leq n \quad (\text{A.4.})$$

$y$  est supposé d'autocorrélation nulle, sauf à l'origine :

$$C_y(p) = \frac{\langle y(i) \cdot y(i+p) \rangle - \langle y \rangle^2}{\sigma_y^2} = 0 \quad , \quad p \neq 0 \quad (\text{A.5})$$

et

$$C_y(0) = 1$$

On pourrait supposer que  $\langle y \rangle = 0$ ,  $y$  n'étant défini qu'à une constante près, mais il est préférable de garder ce terme et de vérifier qu'il s'élimine dans les calculs.

Dans les calculs qui suivent (ainsi que dans ceux de l'Annexe 3), des effets de bords apparaissent, lors de certains réajustements de sommes selon les indices (dus au fait que l'on ne dispose que d'échantillons finis de taille  $n$ ), et seront négligés en supposant que l'on se place toujours dans l'hypothèse  $p \ll n$  ; les étapes du calcul seront alors notées  $\simeq$  au lieu de  $=$ .

Vérification que  $x$  est de moyenne nulle.

$$\langle x \rangle = \frac{\sum_1^n x(i)}{n} = \frac{1}{n} \sum_1^n \left[ y(i) - \frac{1}{2l+1} \sum_{i-l}^{i+l} y(k) \right]$$

En posant  $k = i + j$  :

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_1^n y(i) - \frac{1}{2l+1} \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=-l}^{+l} y(i+j)$$

$$= \langle y \rangle - \frac{1}{2l+1} \sum_{j=-l}^{+l} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y(i+j) \right]$$

$$\simeq \langle y \rangle - \frac{1}{2l+1} \sum_{-l}^{+l} \langle y \rangle$$

d'où

$$\langle x \rangle = 0$$

(A.6)

Calcul de  $\langle x(i) \cdot x(i+p) \rangle$  dans le cas général ( $0 \leq p \ll n$  et  $C_y(p)$  quelconque).

$$\langle x(i) \cdot x(i+p) \rangle = \frac{1}{n-p} \sum_i^{n-p} x(i) \cdot x(i+p)$$

$$= \frac{1}{n-p} \sum_i^{n-p} \left[ y(i) - \frac{1}{2l+1} \sum_{-l}^{+l} y(i+k) \right] \cdot \left[ y(i+p) - \frac{1}{2l+1} \sum_{-l}^{+l} y(i+p+k) \right]$$

$$= \frac{1}{n-p} \sum_i^{n-p} y(i) \cdot y(i+p) - \frac{1}{2l+1} \cdot \frac{1}{n-p} \sum_i^{n-p} \left[ \sum_{-l}^{+l} (y(i) y(i+p+k) + y(i+k) \cdot y(i+p)) \right]$$

$$+ \frac{1}{(2l+1)^2} \cdot \frac{1}{n-p} \sum_i^{n-p} \left[ \sum_{-l}^{+l} y(i+k) \cdot \sum_{-l}^{+l} y(i+p+k) \right]$$

$$= \langle y(i) \cdot y(i+p) \rangle - \frac{1}{2l+1} \sum_{-l}^{+l} \left[ \frac{1}{n-p} \sum_i^{n-p} (y(i) y(i+p+k) + y(i+k) \cdot y(i+p)) \right]$$

$$+ \frac{1}{(2l+1)^2} \sum_{j,k=-l}^{+l} \left[ \frac{1}{n-p} \sum_{i=1}^{n-p} y(i+j) \cdot y(i+p+k) \right]$$

Si  $k$  est fixé, 
$$\sum_{i=1}^{n-p} y(i+k) \cdot y(i+p) \simeq \sum_{i=1}^{n-p} y(i) \cdot y(i+p-k)$$

en posant  $i' = i + k$  puis en remplaçant  $i'$  par  $i$  ;

de même, à  $j$  et  $k$  fixés :

$$\sum_{i=1}^{n-p} y(i+j) \cdot y(i+p+k) \simeq \sum_{i=1}^{n-p} y(i) \cdot y(i+p+k-j)$$

Ainsi on obtient :

$$\langle x(i) \cdot x(i+p) \rangle \approx \langle y(i) \cdot y(i+p) \rangle - \frac{1}{2l+1} \sum_{-l}^{+l} (\langle y(i) \cdot y(i+p+k) \rangle + \langle y(i) \cdot y(i+p-k) \rangle) \\ + \frac{1}{(2l+1)^2} \sum_{j,k=-l}^{+l} \langle y(i) \cdot y(i+p+k-j) \rangle$$

Les moyennes  $\langle y(i) \cdot y(i+p) \rangle$  s'expriment en fonction des autocorrélations  $C_y(p)$ , on a :

$$\langle x(i) \cdot x(i+p) \rangle = \langle y \rangle^2 + \sigma_y^2 C_y(p) - \frac{1}{2l+1} \sum_{-l}^{+l} (2 \langle y \rangle^2 + \sigma_y^2 C_y(p+k) + \sigma_y^2 C_y(p-k)) \\ + \frac{1}{(2l+1)^2} \sum_{j,k=-l}^{+l} (\langle y \rangle^2 + \sigma_y^2 C_y(p+k-j))$$

Le terme  $\langle y \rangle^2$  s'élimine et on obtient finalement, compte-tenu du fait que

$$\sum_{-l}^{+l} C_y(p+k) = \sum_{-l}^{+l} C_y(p-k) \quad ;$$

$$\langle x(i) \cdot x(i+p) \rangle = \sigma_y^2 \left[ C_y(p) - \frac{2 \sum_{k=-l}^{+l} C_y(p+k)}{2l+1} + \frac{\sum_{j,k=-l}^{+l} C_y(p+k-j)}{(2l+1)^2} \right] \quad (A.7)$$

Application de (A.7) selon les valeurs de p en utilisant l'hypothèse (A.5).

i) p = 0 (on obtient dans ce cas la variance de x) :

$$\langle x^2 \rangle = \sigma_y^2 \left[ C_y(0) - \frac{2 \sum_{-l}^{+l} C_y(k)}{2l+1} + \frac{\sum_{j,k=-l}^{+l} C_y(k-j)}{(2l+1)^2} \right]$$

$C_y(k-j)$  n'est non nul que pour  $k=j$  (soit  $(2l+1)$  valeurs du couple  $(k,j)$ ), d'où :

$$\langle x^2 \rangle = \sigma_y^2 \left[ 1 - \frac{2}{2l+1} + \frac{2l+1}{(2l+1)^2} \right] = \sigma_y^2 \left( 1 - \frac{1}{2l+1} \right)$$

D'après (A.6)

$$\sigma_x^2 = \langle x^2 \rangle = \frac{2l}{2l+1} \cdot \sigma_y^2 \quad (A.8)$$

ii)  $p \neq 0$ 

$$C_x(p) = \frac{\langle x(i) \cdot x(i+p) \rangle - \langle x \rangle^2}{\sigma_x^2} = \frac{2l+1}{2l} \cdot \frac{\langle x(i) \cdot x(i+p) \rangle}{\sigma_y^2}$$

$$= \frac{1}{2l} \cdot \left[ -2 \sum_{k=-l}^{+l} C_y(p+k) + \frac{\sum_{j=-l}^{+l} C_y(p+k-j)}{2l+1} \right]$$

•  $p > 2l$  :  $p+k$  et  $p+k-j$  sont toujours non nuls quels que soient  $j$  et  $k$  entre  $-l$  et  $+l$ , donc :

$$C_x(p) = 0 \quad (\text{A.9})$$

•  $1 < p \leq 2l$  :  $p+k$  est toujours non nul, d'autre part  $p+k-j$  est nul pour les couples  $(k, j)$  suivant :

$$(-l, p-l), (-l+1, p-l+1), \dots, (l-p, l)$$

qui sont au nombre de  $2l-p+1$ , d'où :

$$C_x(p) = \frac{2l-p+1}{2l(2l+1)} = \frac{1}{2l} \left( 1 - \frac{p}{2l+1} \right) \quad (\text{A.10})$$

•  $0 < p \leq 1$  :  $p+k$  s'annule une fois, seule différence avec le cas précédent :

$$C_x(p) = \frac{1}{2l} \left( -2 + 1 - \frac{p}{2l+1} \right)$$

d'où

$$C_x(p) = \frac{-1}{2l} \left( 1 + \frac{p}{2l+1} \right) \quad (\text{A.11})$$

Les formules (A.8) à (A.11) sont rassemblées dans le tableau 2 du paragraphe 3.2.3.

## ANNEXE 3

Relation entre les fonctions d'autocorrélation du champ instantané et du champ moyen local

Avec les notations de 3.2.1., on a la relation :

$$E = F + A \text{ (dB } \mu\text{V/m)} \quad (\text{A.12})$$

où E, F et A représentent respectivement le champ instantané, la composante "fluctuations rapides" et la composante "fluctuations lentes" assimilée au champ moyen local.

Pour établir la relation entre les autocorrélations  $C_E$  et  $C_A$ , on suppose que A et F sont statistiquement indépendants et que F est d'autocorrélation nulle hors de l'origine :

$$C_F(p) = 0 \quad \text{si } p \neq 0 \quad (C_F(0) = 1)$$

On peut supposer que  $\langle F \rangle = 0$ , F n'étant défini qu'à une constante près. On a donc :

$$\langle E \rangle = \langle A \rangle$$

Calculons l'expression  $\langle E(i) \cdot E(i+p) \rangle$  pour p quelconque :

$$\begin{aligned} \langle E(i) \cdot E(i+p) \rangle &= \langle [F(i) + A(i)] \cdot [F(i+p) + A(i+p)] \rangle \\ &= \langle F(i) \cdot F(i+p) \rangle + \langle F(i) \cdot A(i+p) \rangle \\ &\quad + \langle F(i+p) \cdot A(i) \rangle + \langle A(i) \cdot A(i+p) \rangle \end{aligned}$$

F et A étant indépendants, on a :

$$\begin{aligned} \langle F(i) \cdot A(i+p) \rangle &= \langle F(i+p) \cdot A(i) \rangle \\ &= \langle F \rangle \cdot \langle A \rangle = 0 \quad (\text{car } \langle F \rangle = 0). \end{aligned}$$



De plus,  $\langle F(i) \cdot F(i+p) \rangle = \sigma_F^2 \cdot C_F(p)$ , d'où :

$$\langle E(i) \cdot E(i+p) \rangle = \sigma_F^2 \cdot C_F(p) + \langle A(i) \cdot A(i+p) \rangle \quad (\text{A.13})$$

Appliquons (A.13) selon les valeurs de  $p$  :

$p = 0$  :

$$\langle E^2 \rangle = \sigma_F^2 + \langle A^2 \rangle$$

d'où, puisque  $\langle E \rangle = \langle A \rangle$  :

$$\sigma_E^2 = \sigma_F^2 + \sigma_A^2$$

$p \neq 0$  :  $\langle E(i) \cdot E(i+p) \rangle = \langle A(i) \cdot A(i+p) \rangle$

Par conséquent :

$$\begin{aligned} C_E(p) &= \frac{\langle E(i) \cdot E(i+p) \rangle - \langle E \rangle^2}{\sigma_E^2} \\ &= \frac{\langle A(i) \cdot A(i+p) \rangle - \langle A \rangle^2}{\sigma_F^2 + \sigma_A^2} \end{aligned}$$

D'où le résultat :

$$C_E(p) = C_A(p) \cdot \frac{\sigma_A^2}{\sigma_F^2 + \sigma_A^2} \quad (\text{A.14})$$

## REFERENCES

- [1] KOZONO S., WATANABE K., Influence of environmental buildings on UHF land mobile radio propagation. IEEE Trans. COM-25, N°10 Oct. 1977, pp. 1133-1143.
- [2] IBRAHIM M.F., PARSONS J.D., Signal strength prediction in built-up areas, IEE proceedings, Vol. 30, N° 5 Aug. 1983, pp 377-391.
- [3] CLARKE R.H., A Statistical Theory of Mobile Radio Reception, Bell System Technical Journal, 1968, 47, pp 957-1000.
- [4] LEE W.C.Y., Mobile Communications Engineering, Mc GRAW-HILL, 1982 Chap. 5, pp 163-168.
- [5] OKUMURA Y., OHMORI E., KAWANO T., FUKUDA K., Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service. Rev. of the Elec. Comm. Lab. (Jap), vol 16, n°9-10, Sept. Oct. 1968, pp 825-873.
- [6] BLACK D.M., REUDINK D.O., Some characteristics of mobile radio propagation at 836 MHz in the Philadelphia area, IEEE Trans. VT-21, N°2, May 1972, pp 45-51.
- [7] CCIR R567-2, Methodes et statistiques permettant d'évaluer le champ pour les services mobiles terrestres fonctionnant dans les bandes de fréquences comprises entre 30 MHz et 1 GHz.
- [8] HATA M., Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. IEEE Trans. VT-29, N°3, Aug. 1980, pp 317-325.
- [9] JAKES W.C.Jr., Microwave mobile communications, New-York Wiley, 1974, chap 2.

- [10] EGLI J.J., Radio propagation above 40 Mc over irregular terrain, Proc. IRE, 1957, 45, pp 1383-1391.
- [11] HAVEL C. et MALOBERTI A., Mesures de propagation en zone urbaine à 900 MHz pour l'établissement d'un système radiomobile numérique, NT/PAB/ETR/672.
- [12] GLANCE B.S., BER degradations caused by switching in digital mobile radio systems using base station diversity, AT & T, Bell. Lab. Tech. Journ., Vol 63, N°4, April 1984, pp 545-564.
- [13] COX D.C., Multipath delay spread and path loss correlation for 910 MHz urban mobile radio propagation, IEEE Trans VT-26, N°4, Nov 77, pp 340-344.
- [14] OTT G.D., PLITKINS A., Urban path loss characteristics at 820MHz, IEEE Trans. VT-27, N° 4, Nov 78, pp 189-197.
- [15] HUGHES K.A., Mobile propagation in London at 936 MHz, Electronics Letters, 1982, Vol 18, N°3, pp 141-143.
- [16] IBRAHIM H.F. et PARSONS J.D., Urban mobile radio propagation at 900 MHz, Electronics Letters, 1982, Vol 18, N°3, pp 113-115.
- [17] CHESTER J.W., 900 MHz radio propagation in Auckland, ME thesis, University of Auckland, 1983.
- [18] WILLIAMSON A.G., EGAN B., CHESTER J.W., Mobile radio propagation in Auckland at 927 MHz, Electronics letters, 1984, Vol 20, N° 12, pp 517-518.
- [19] GRADSHTEYN J.S., RYZHIK I.M., Table of integrals, series, and products, 1980, Academic Press, p 343.