

Partie 1 - Propagation dans des milieux inhomogène et aléatoire

1 Introduction

L'environnement complexe est caractérisé par de nombreux obstacles importants distribués ci et là entre les antennes ou autour de ces antennes qu'elles soient émettrice ou réceptrice. N'oublions pas la réciprocité du canal de propagation. Un obstacle est considéré important lorsqu'il est susceptible d'affecter le signal reçu. Il devient alors difficile d'évaluer le niveau du signal dans de tels environnements de manière déterministe car :

- il peut y avoir beaucoup d'ondes réfléchies sur les obstacles qui se combinent au récepteur ;
- les obstacles ne permettent pas toujours de dégager la première zone de *Fresnel* causant ainsi de la diffraction.

En fait, il y a quatre phénomènes physiques à considérer : les réflexions sur des objets lisses, des dispersions sur des objets rugueux, des réfractions sur des objets non opaques, et des diffractions sur les coins ou pointes. La sommation des signaux reçus doit cependant tenir compte de :

- de l'amplitude de chacun qui varie selon l'importance de l'obstacle, son orientation spatiale, la nature de ses surfaces, la disposition des arêtes ;
- de leur phase qui dépend surtout de la différence de longueur des trajets ;
- leur orientation vectorielle car les champs sont des vecteurs et les phénomènes physiques mentionnés ci-dessus entraînent souvent une dépolarisation.

Aux basses fréquences, la plupart des obstacles sont relativement transparents ou sont de faible importance étant donnée la longueur d'onde. Il en va autrement aux hautes fréquences, là où se trouve l'intérêt pour l'essentiel des télécommunications. S'il s'agit d'une communication point-à-point fixe, on dégage le lien et la directivité élevée des antennes élimine tout sauf le signal direct.

Pour des communications mobile ou point-à-multipoint, toutes les contributions doivent être considérées. Comment donc réussir à donner l'expression du champ reçu dans de tels environnements puisque la manière déterministe ne peut y arriver. Il faut recourir à des modélisations statistiques par des processus stochastiques, ou des modélisations empiriques à partir de mesures expérimentales.

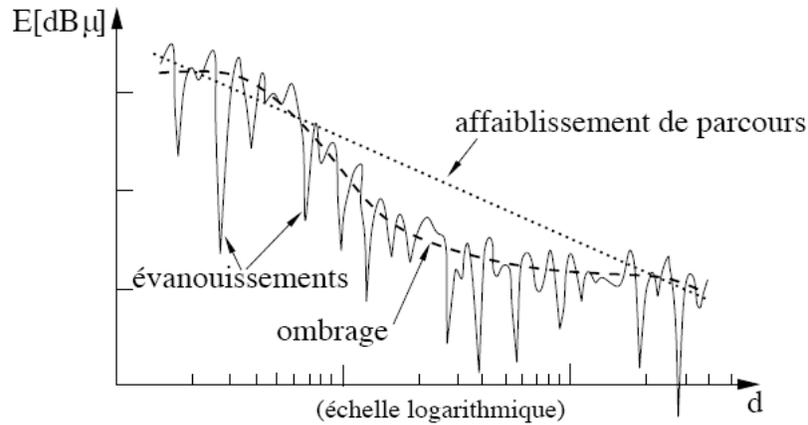
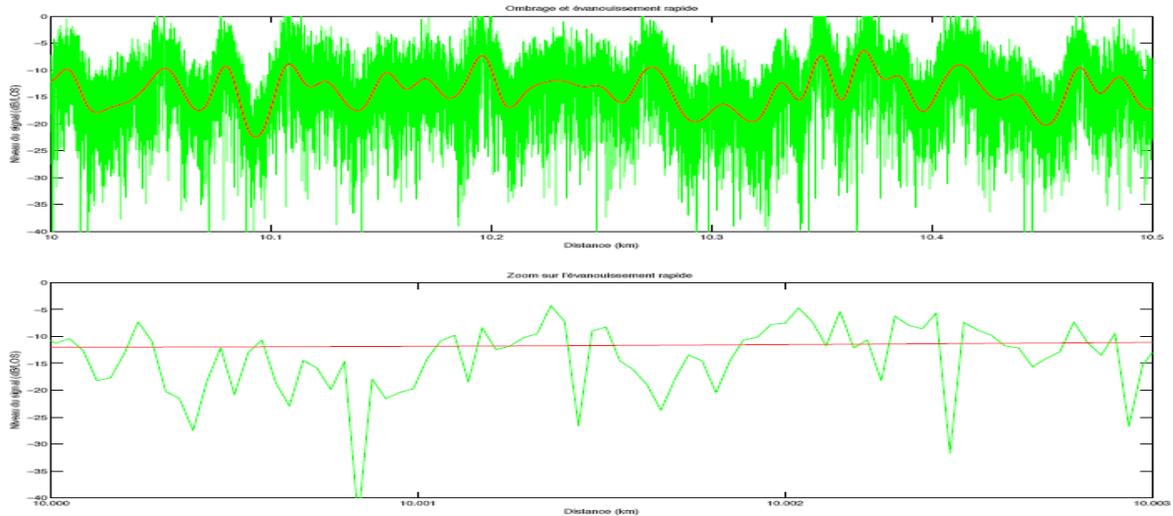


Figure.1 – Affaiblissement du champ électrique dans un canal avec environnement complexe.

On regroupe les effets dans trois types d'affaiblissement d'un signal montrés sur la figure .1 :

- **l'affaiblissement de parcours** ("pathloss") du a la dispersion par éloignement, lequel peut se calculer de manière déterministe, par science exacte ou avec un modèle empirique lorsque l'environnement se complique ;
- **l'ombrage** ("shadowing") lequel est une variation lente de l'amplitude due aux atténuations successives produites par de gros obstacles locaux qui causent de la diffraction ; selon le nombre et le type d'obstacles, on calcule l'ombrage de façon déterministe ou, ce qui est plus souvent le cas, par le biais d'une variable aléatoire.
- **l'évanouissement** ("fading"), aussi appelé évanouissement rapide, est une variation brusque de l'amplitude due à l'addition constructive ou destructive des signaux qui ne peut être modélisé que par un processus stochastique.

La figure .2 montre comment se comporte le rapport du niveau du signal reçu par un mobile qui se déplace, comparativement à celui en espace libre. Il s'agit d'un signal de téléphonie cellulaire à 1.8 GHz . On y remarque la présence de fluctuations rapides superposées à une variation plus lente produite par l'ombrage qui est aussi tracée. Un zoom plus fort fait voir les évanouissements qui ont une période minimale de l'ordre de la demi-longueur d'onde du signal (ici " " 16.6 cm).



2. Processus stochastiques reliés à la propagation

Il a été mentionné que l'ombrage et l'évanouissement sont des phénomènes si complexes qu'il vaut mieux les modéliser par des processus stochastiques à partir de variables aléatoires. Les processus stochastiques impliqués ne sont pas quelconques mais bien spécifiques à ce qu'ils doivent représenter physiquement. Il est donc fortuit d'introduire les notions de processus stochastique en se limitant aux plus utiles d'entre eux pour la propagation.

Un processus stochastique représente l'évolution temporelle d'une variable aléatoire (laquelle est toujours identifiée par un caractère majuscule tel que X). Cette variable aléatoire possède une fonction de répartition définie comme étant la probabilité de l'événement $\{X \leq x\}$ soit :

$$F_X(x) = P[X \leq x] \text{ pour } -\infty < x < +\infty$$

La fonction de densité de probabilité (pdf) de X , notée $f_X(x)$, représente la "densité" de probabilité au point x dans le sens qu'elle indique la probabilité de X dans un petit intervalle autour de x .

2.1 Théorème central limite, pdf gaussienne

Le théorème central limite montre que la somme d'un grand nombre de variables aléatoires converge vers la loi normale (densité de probabilité gaussienne) en autant que ces variables aléatoires soient *iid* (Variables indépendantes et identiquement distribuées), c'est-à-dire :

1. indépendantes – chaque variable aléatoire X_k exerce aucune influence sur les autres ;
2. et identiquement distribuées – les variables aléatoires ont la même densité de probabilité.

La démonstration de ce théorème se réalise de plusieurs manières mais on dit que *Laplace* est le premier à l'avoir fait en 1812.

Ayant :

$$S = \sum_{k=1}^N X_k$$

$$f_s(s) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2N\pi}} e^{-(s-N\mu_x)^2/(2N\sigma_x^2)} = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2N}} e^{-(s-\mu_s)^2/(2\sigma_s^2)}$$

Où μ_x est la moyenne (moment du premier ordre) de chacune des variables iid X_k , et σ_x^2 est leur variance (moment central du second ordre). On remarque que la moyenne de S devient $\mu_s = N\mu_x$ puisque le moment du premier ordre d'une somme de variables aléatoires correspond à la somme des moments du premier ordre de chacune des variables ; les X_k étant ici iid (donc de même moyenne), le résultat était prévisible. De plus, la variance augmente aussi selon $\sigma_s^2 = N\sigma_x^2$.

La fonction de répartition s'écrit :

$$F_S(s) = 0.5 \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{s - \mu_s}{\sigma_s \sqrt{2}} \right) \right)$$

ou $\operatorname{erf}(\cdot)$ est la fonction d'erreur définie ainsi :

$$\operatorname{erf}(x) = \int_0^x e^{-u^2} du$$

Il existe une autre fonction créée spécifiquement pour faciliter les calculs de probabilité avec une densité gaussienne (moyenne nulle, écart-type unitaire) :

$$Q(x) = P[X_{Gauss} > x] = 1 - F_x(x) = \int_x^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2} du = 0.5 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right) \right)$$

2.2 Pdf log-normale, de Rayleigh, et de Rice

On a vu à la sous-section précédente, qu'une somme de variables aléatoires iid converge rapidement vers une variable aléatoire de pdf normale (gaussienne). Le produit de ces mêmes variables aléatoires iid, quant à lui, converge vers une loi log-normale car :

$$P = X_1 X_2 \cdots X_N$$

$$S = \log(P) = \log X_1 + \log X_2 + \cdots + \log X_N$$

ou les variables aléatoires Y_k sont iid. En conséquence, la variable S suit la loi normale et P suit la loi log-normale $P = e^S$ de moyenne $\mu_p = (e^{\mu_s - \sigma_s^2/2})$ et de variance $\sigma_p = (e^{\sigma_s^2} - 1)e^{2\mu_s + \sigma_s^2}$; cette loi s'écrit :

$$f_p(p) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \frac{e^{-(\ln p - \mu_s)^2 / 2\sigma_s^2}}{p}$$

La fonction de répartition de la densité log-normale s'écrit :

$$F_p(p) = 0.5 \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(p) - \mu_s}{\sigma_s \sqrt{2}} \right) \right)$$

3. Modèles empiriques de l'affaiblissement de parcours

Dans les chapitres sur la propagation, différents modèles physiques ont été considérés car on supposait un environnement simple avec un ou deux écrans diffractant, une réflexion unique sur le sol et en considérant un seul phénomène physique à la fois.

Dans un centre urbain, tous les mécanismes se retrouvent en même temps. Comme l'affaiblissement de parcours n'est pas vraiment aléatoire, il convient de procéder par une modélisation empirique. L'inconvénient des modèles empiriques provient surtout de leur domaine de validité. Ces modèles ne sont effectivement valables que pour un ensemble limité de paramètres. De plus, ces modèles ne montrent pas réellement comment chacune des variables intervient de sorte qu'il devient difficile d'extrapoler si on se retrouve dans une situation entre deux états considérés. Différents modèles ont été proposés mais on se limitera ici à quelques uns.

3.1 Modèle par ajustement du coefficient de puissance

On a vu que dans le champ lointain, la puissance reçue décroît normalement en $1/d^2$. Le coefficient de puissance γ_p de l'atténuation selon la distance vaut donc $\gamma_p = 2$.

Ce coefficient varie cependant selon la nature du canal. Par exemple, pour une incidence rasante sur le sol, il atteint $\gamma_p = 4$ car le champ électrique s'atténue en $1/d^2$ à cause de la dispersion et en $1/d^2$ également de par la réflexion rasante. Dans une zone urbaine, il faut ajouter à cela les phénomènes de diffraction et d'interférences multiples qui produisent des fluctuations rapides selon la distance allant jusqu'à $\gamma_p = 6$ et même davantage. Dans les bandes VHF et HF, le sol et l'ionosphère agissent comme les parois d'un guide d'onde à plaques parallèles. La dispersion ne se fait qu'en azimut ; la puissance décroît alors en $1/d$ par effet de guidage, d'où un coefficient $\gamma_p = 1$. Il suffit donc d'ajuster la valeur du coefficient de puissance selon les mesures expérimentales faites sur le canal considéré. On obtient :

$$\frac{\langle p_r \rangle}{\langle p_t \rangle} = \frac{c_0 F_P}{d^{\gamma_p}}$$

Où $C_0 = d_0^{\gamma_p} 10^{-L_0/10}$ est une constante multiplicative à une distance de référence d_0 de l'émetteur ; $L_0 = L_s(d_0)$ est l'affaiblissement de parcours à la distance de référence. On ajoute au modèle une variable aléatoire X_p pour considérer un effet d'ombrage. L'ombrage sur une échelle logarithmique, possède les statistiques d'une densité normale de moyenne nulle et variance σ_p^2 . Ainsi $F_p = 10^{-X_p/10}$ suit une densité log-normale. Sinon, on remplace $X_p = 0$ et $F_p = 1$.

Ce modèle est souvent exprimé en *dB* de cette manière :

$$L_S(d)[dB] = L_S(d_0)[dB] + 10\gamma_p \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_p$$

Des mesures effectuées pour une propagation intérieure fournissent les valeurs de γ_p (Le coefficient de puissance de l'atténuation) et de σ_p (un écart-type) du tableau.

Edifice	f [MHz]	γ_p	σ_p [dB]
Vide, espace libre		2.0	0
Magasin aux détails	914	2.2	8.7
Marche d'alimentation	914	1.8	5.2
Bureau densément rempli	1500	3.0	7
Bureau dégagé	900	2.4	9.6
Bureau dégagé	1900	2.6	14.1
Industrie textile ou chimique	1300	2.0	3.0
Industrie textile ou chimique	4000	2.1	7.0 à 9.7
Métallurgie	1300	1.6	5.8

Table 1 – Paramètres des coefficients de la loi de puissance selon le type d'edifice.

3.2 Modèle d'Okumura

Le modèle de *Okumura* a été produit à la fin des années 1960 à partir d'une grande quantité de mesures faites à Tokyo au début de cette décennie.

Ce modèle incorpore autant que possible les effets de diffraction, de réflexion et de diffusion provenant des structures d'une ville sans toutefois prendre en considération l'ombrage ou l'évanouissement par le biais de processus stochastiques. Un moyennage est plutôt fait donnant ainsi un affaiblissement de parcours médian (50-ème percentile). Pour être plus fidèle aux mesures, le modèle s'ajuste en fonction d'une variété d'environnement :

- allant de la zone urbaine dense qui comprend beaucoup d'obstacles importantes ;
- en passant par la banlieue dans laquelle il n'y a que peu d'obstacles importantes et des habitations ;
- à la zone ouverte qui, comme son nom l'indique, est dégagée d'obstacles comme à la campagne.

Les conditions de validité sont les suivantes :

- fréquence d'opération f entre 150 MHz et 1.920 GHz ;
- hauteur de la station de base h_b entre 30 à 200 m ;
- hauteur du mobile h_m entre 1 et 10 m par rapport au sol moyen ;
- distance séparant les antennes d entre 1 et 100 km .

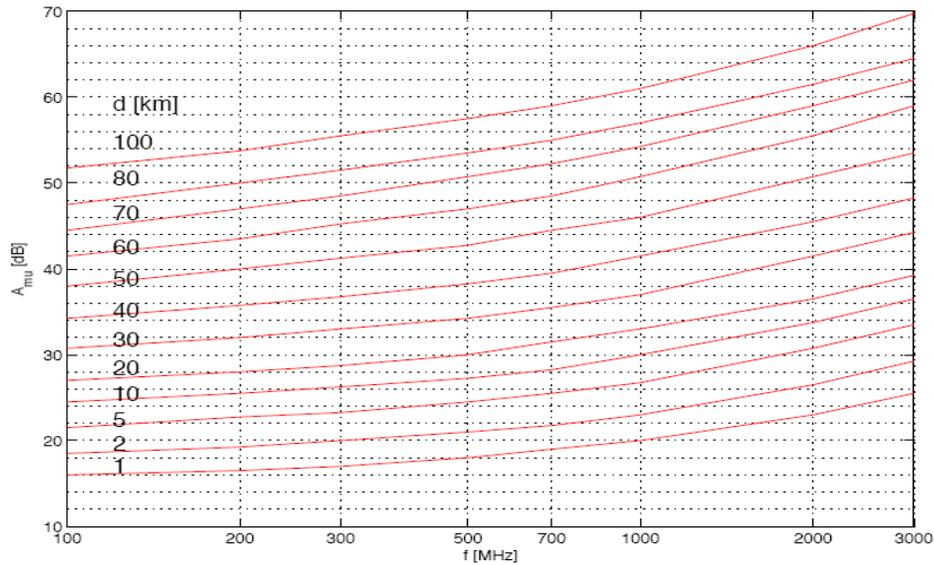


Figure 3. Courbes de A_{mu} du modèle de *Okumura* au dessus d'un terrain assez plat.

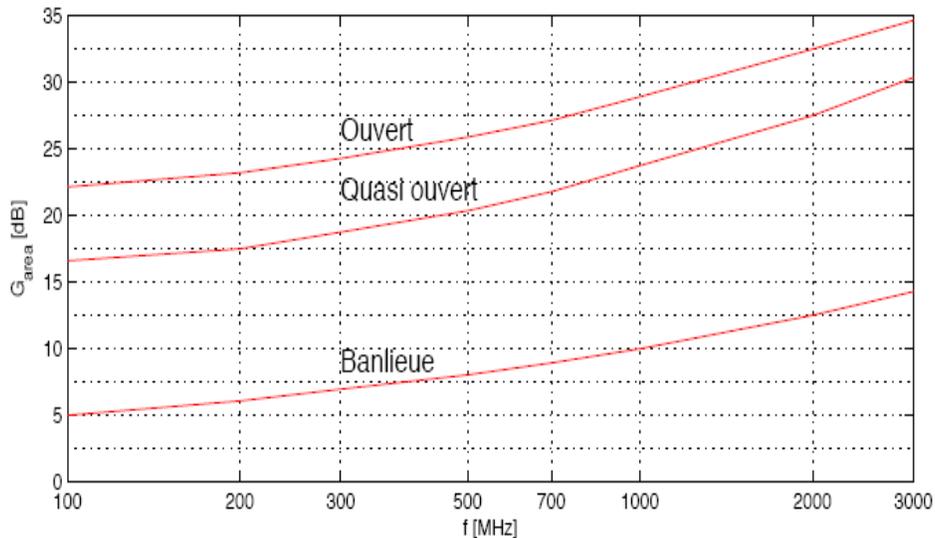


Figure 4. Courbes de G_{area} du modèle de *Okumura* selon l'environnement.

C'est un modèle bien adapté au calcul d'affaiblissement de parcours dans les villes. Il s'exprime ainsi :

$$L_{Oku}[dB] = L_s + A_{mu}(f, d) - G(h_b) - G(h_m) - G_{area}(f, env)$$

$$G(h_d) = 20 \log(h_b/200)$$

$$G(h_m) = \begin{cases} 10 \log(h_m/3) & h_m < 3 \text{ m} \\ 20 \log(h_m/3) & 3 \text{ m} < h_m < 10 \text{ m} \end{cases}$$

ou L_s est l'affaiblissement de parcours en espace libre tel que donné par l'équation (12.18).

Les fonctions A_{mu} (atténuation médiane relative à l'espace libre) et G_{area} (gain du a l'environnement) ont été mises sous forme des graphiques qui sont reproduits aux figures 3 et 4. De plus, *Okumura*'est aperçu que la hauteur des antennes affectaient les mesures selon des taux de 10 ou 20 dB/décade d'où les expressions pour $G(h_b, m)$.

17.3.3 Modèle de Okumura-Hata

Le défaut du modèle de *Okumura* est qu'il faut avoir accès à deux graphiques pour extraire certaines valeurs. Le modèle de *Okumura-Hata* fait suite au modèle de *Okumura* qui a été mis en équations par *Hata* pour donner le modèle largement utilisé en communication sans-fil pour prédire le comportement dans une transmission de téléphonie cellulaire. Mais il est aussi utilisé pour les transmissions de radiodiffusion et de télédiffusion.

Il y a cependant des conditions de validité, lesquelles sont un peu plus limitées sur certains paramètres comparativement à celles prévues pour le modèle de *Okumura*:

- fréquence d'opération f entre 150 MHz et 1.5 GHz ;
- distance séparant les antennes d entre 1 et 20 km.

L'expression obtenue est très complexe mais peut se résumer plus facilement en définissant des variables intermédiaires

$$L_{OH}[dB] = A_{OH} + B_{OH} \log d[km] - \alpha_{OH}(h_m) + C_{OH}$$

Avec

$$A_{OH} = 69.55 + 26.16 \log f[\text{Mhz}] - 13.82 \log h_b$$

$$B_{OH} = 44.9 - 6.55 \log h_b$$

$$\alpha_{OH}(h_m)$$

$$= \begin{cases} 8.29(\log(1.54h_m))^2 - 1.1 & \text{grandes villes, } 150 < f[\text{Mhz}] < 300 \\ 3.2(\log(11.75h_m))^2 - 4.97 & \text{grandes villes, } 300 < f[\text{Mhz}] < 1500 \\ (1.1 \log f[\text{Mhz}] - 0.7)h_m - (1.56 \log f[\text{Mhz}] - 0.8) & \text{zone ouverte, banlieues, moyennes villes.} \end{cases}$$

$$C_{OH} = \begin{cases} 0 & \text{moyennesetgrandesvilles} \\ -2\log(f[\text{Mhz}]/28)^2 - 5.4 & \text{banlieues} \\ -4.78\log(f[\text{Mhz}])^2 + 18.33\log f[\text{Mhz}] - 40.94 & \text{zoneouvert.} \end{cases}$$

3.4 Modèle de COST-Hata

Le modèle COST-Hata est plus souvent connu sous le nom de modèle COST231. Il s'agit d'une extension du modèle de *Okumura-Hata* couvrant une bande plus haute en fréquence. L'acronyme COST provient de "COoperation européenne dans le domaine de la recherche SCientifique et Technique".

Le modèle est applicable dans des zones urbaines de villes seulement. Outre, la fréquence d'opération, le modèle reprend les mêmes conditions de validité que le modèle *Okumura-Hata* énumérées dans la sous-section précédente. Cependant, le modèle requiert de plus que la station de base soit aussi plus haute que les toitures environnantes.

Le modèle COST-Hata est formulé de cette manière :

$$L_{C231}[\text{dB}] = A_{C231} + B_{C231} \log d[\text{km}] - a_{C231}(h_m) + C_{C231}$$

$$B_{C231} = B_{OH} \text{ et } A_{C231} = a_{OH}$$

$$A_{C231} = 46.3 + 33.9 \log f[\text{MHz}] - 13.82 \log h_b$$

$$C_{C231} = \begin{cases} 0 \text{ db pour moyennes villes et banlieues} \\ 3 \text{ db pour grandes villes} \end{cases}$$

$$\text{Pour } = 1.5 \text{ GHz, on trouve que } A_{C231} = A_{OH}$$

3.4 Modèle statistique de l'ombrage

La modélisation statistique du phénomène d'ombrage se réalise assez bien par atténuations successives L_{sh_k} . L'atténuation totale de l'ombrage L_{sh} correspond donc au produit des atténuations successives donc :

- L_{sh} suit une loi log-normale donnée
- L_{sh} exprimée en dB , suit la loi normale

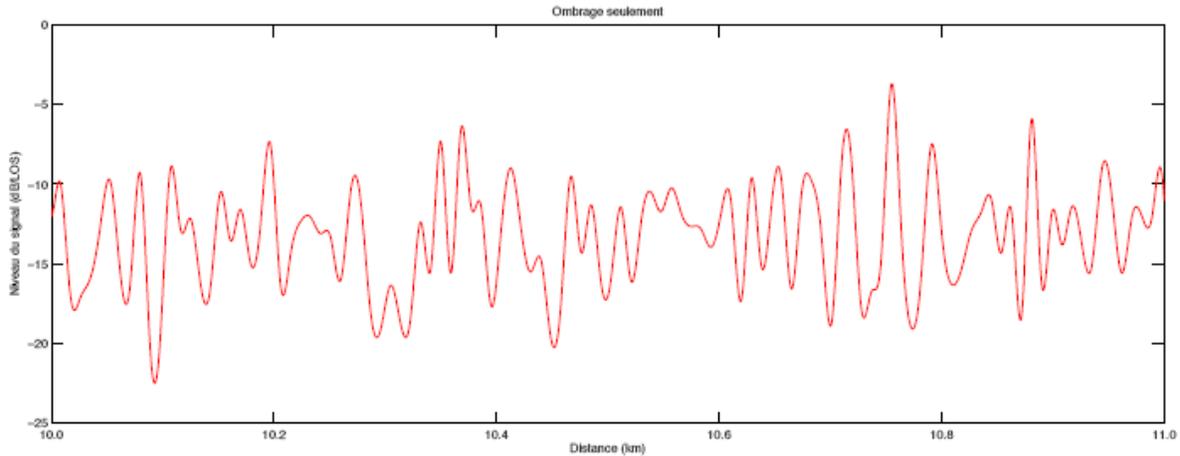


Figure 5. Effet de l'ombrage seulement en fonction d'un déplacement local de l'une des deux antennes.

Le principal paramètre à ajuster dans la loi normale (en dB) est l'écart-type σ_{sh} . Cet écart-type donne une idée de la variabilité locale ; il dépend de la fréquence, de la directivité des antennes et, évidemment, de la densité de l'environnement autour des antennes. Plus les édifices proches de l'une ou l'autre des antennes seront imposants, plus la variation sera énorme d'où un écart-type élevé. La moyenne doit aussi être ajustée selon la perte produite par les multiples diffractions. Dans un système de communication cellulaire, c'est l'environnement autour du mobile qui importe car normalement, la station de base élevée permet de dégager correctement la première zone de *Fresnel*.

L'ombrage contribue à une chute parfois importante du signal reçu ce qui oblige à avoir des frontières floues quant aux zones assurant un rapport signal-à-bruit (SNR) minimal.

Sur la figure 5, un écart-type de $\sigma_{sh} = 3.5 \text{ dB}$ et une moyenne $\mu_{sh} = -13 \text{ dB}$ ont été utilisés pour produire la densité gaussienne (le signal reçu est exprimé en dB).