



**HAL**  
open science

# Performance des Modèles de Similitude et de Prédiction Appliqués aux Affaiblissements Atmosphériques Mesurés en bande EHF

Louis de Montera, Laurent Barthès, Cécile Mallet, T. Marsault, J.-D.  
Hermant, Peter Golé

► **To cite this version:**

Louis de Montera, Laurent Barthès, Cécile Mallet, T. Marsault, J.-D. Hermant, et al.. Performance des Modèles de Similitude et de Prédiction Appliqués aux Affaiblissements Atmosphériques Mesurés en bande EHF. Journées Scientifiques Propagation et Télédétection, URSI-France, Mar 2009, Paris, France. pp.45-57. hal-00545733

**HAL Id: hal-00545733**

**<https://hal.science/hal-00545733>**

Submitted on 2 Dec 2020

**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.

## **Performance des Modèles de Similitude et de Prédiction Appliqués aux Affaiblissements Atmosphériques Mesurés en bande EHF**

L. De Montera <sup>\*</sup>, L. Barthes <sup>\*</sup>, C. Mallet <sup>\*</sup>, T. Marsault <sup>\*\*</sup>, J.D. Hermant <sup>\*\*</sup>,

<sup>\*</sup> *CETP, 10-12 avenue de l'europe, 78140 VELIZY, France*  
*louis.demontera@cetp.ipsl.fr*

<sup>\*\*</sup> *DGA CELAR, B.P. 7, 35 998 Rennes Armées, France*  
*thierry.marsault@dga.defense.gouv.fr*

### **RESUME**

Une expérience de propagation en bande EHF a été réalisée dans le cadre du programme Syracuse 3, nouvelle génération de système militaire français de SATCOM. L'originalité de l'expérience réside dans les fréquences utilisées (20 GHz /44 GHz) et sur l'angle d'élévation relativement bas de la liaison (17°).

Les données recueillies pendant la période 2006-2008 au CELAR à Rennes sont utilisées pour cette étude qui comprend deux parties. La première est dédiée à l'analyse statistique et la modélisation des affaiblissements, du coefficient de similitude et des durées d'événements. L'utilisation par des services opérationnels de la bande EHF nécessite la mise au point de techniques de lutte contre les affaiblissements (FMT). Parmi celles-ci, cette présentation s'intéresse à l'estimation des conditions de propagation sur la liaison montante (à la fréquence la plus élevée) à partir de l'affaiblissement observé sur la liaison descendante quelques seconde plus tôt (typiquement 3-10s )

### **ABSTRACT**

An Earth-to-satellite propagation experiment operating at EHF band was set up within the framework of the Syracuse 3 program. Syracuse 3 satellites are the new generation of French military SATCOM system. This experiment is a good opportunity to make attenuation measurements and increase our knowledge of tropospheric propagation effects on EHF links at a low elevation angle (17°). This paper presents yearly statistics concerning attenuation level, frequency scaling ratio and fade durations. A comparison with ITU models is given. Fade Mitigation Techniques on Earth – satellite links require the estimation of channel propagation conditions. This is generally done by using downlink measurements at a lower frequency to derive the channel uplink propagation conditions at higher frequencies.

A new short term prediction algorithm, allows an accurate upper-bound of the future attenuation to be estimated in real time, which minimizes the cost of Fade Mitigation Techniques and therefore enables the communication system to reach an appropriate percentage of availability. Its originality is that not only the attenuation level, but also the error conditional distribution are predicted. This new model has been tested on Syracuse 3 attenuation measurements and is shown to outperform significantly other existing models.

Mots clés :

EHF measurement (20/44 GHz), attenuation statistics, frequency scaling ratio, fade duration, Fade Mitigation Technique

Expérience de propagation en bande EHF, statistique d'affaiblissement, coefficient de similitude, durée d'évanouissement, modèle de prédiction

### **INTRODUCTION**

Dans le contexte des systèmes de télécommunication par satellite, le déploiement dans des bandes de fréquences supérieures à 20 GHz (Extremely High Frequencies band – EHF), constitue une nécessité liée à la saturation des bandes L, C et Ku. Cette exploitation permet tout à la fois de disposer de canaux large bande et de réduire les dimensions des équipements. L'exploitation de ces bandes de fréquences s'accompagne de difficultés liées aux conditions de propagation dans l'atmosphère. Le signal reçu peut subir de fortes atténuations suite aux perturbations météorologiques. Par exemple, en bande Ka, l'atténuation peut dépasser une dizaine de dB, suite à de fortes précipitations.

Pour une exploitation optimale des ressources spectrales, mais aussi pour assurer la disponibilité requise, les systèmes satellitaires opérant en bande EHF doivent adopter des techniques qui permettent de lutter contre les affaiblissements du canal (Fade Mitigation Techniques – FMT). Une expérience de propagation au moyen du satellite militaire français, Syracuse 3A, lancé en 2006, est menée par le CELAR en vue de l'amélioration et de la validation des modèles de canal en bande EHF [Marsault et al., 2006]. Cette expérience multi sites permet de recueillir des affaiblissements à 20 GHz sur les liaisons descendantes et à 44 GHz sur les liaisons montantes. L'originalité de cette expérience réside dans les fréquences utilisées (20 GHz sur la liaison descendante et 44 GHz sur la liaison montante) et sur l'angle d'élévation relativement bas de la liaison (17°). Les données recueillies pendant la période 2006-2008 au CELAR à Rennes sont utilisées pour cette étude.

La première est dédiée à l'analyse statistique et la modélisation des affaiblissements, du coefficient de similitude et des durées d'événements. Les statistiques mensuelles et annuelles des affaiblissements mesurés pendant une période de deux ans sont présentées et comparées aux modèles UIT.

La seconde partie présente et valide un nouveau modèle de calcul de marges dynamiques sur la liaison montante à partir des affaiblissements observés aux instants précédents sur la liaison descendante.

Concernant la similitude en fréquence, en bande EHF la contribution des gaz et des nuages ne peut être négligée. Un modèle de similitude en fréquence utilisant des coefficients de similitude distincts pour les différents constituants de l'atmosphère (gaz, nuage, pluie) est présenté. Les performances de ce nouveau modèle basé sur l'utilisation d'un réseau de neurone pour la séparation des effets [Barthes 2006], sont évaluées sur une année complète de données Syracuse.

L'analyse statistique des durées d'événements est réalisée avec différentes tailles de fenêtres glissantes pour la suppression des scintillations. Cette étude met en évidence l'importance du choix du filtre. L'analyse statistique des durées d'événements réalisées sur les données brutes échantillonnées à 1 Hz conduit à un nouveau modèle. Le modèle de la probabilité que l'affaiblissement moyen  $A$  sur une seconde soit supérieur à un niveau  $T$  pendant une durée  $d$  supérieure à  $D$  ( $P(d>D/A>T)$ ) est plus adapté aux besoins des opérateurs que le modèle UIT qui modélise des durées d'événement pour des affaiblissements moyennés sur 50s.

Etant donné les caractéristiques de la liaison les affaiblissements dus à la troposphère sont extrêmement importants ( $>$  à 10 dB pendant 1% du temps à 44 GHz). L'utilisation par des services opérationnels de la bande EHF ne peut être rendue possible que par l'amélioration des connaissances relatives à la dynamique du canal de propagation. Différents modèles de prédiction de l'affaiblissement  $A(t+h)$  à un horizon  $h$  à partir des affaiblissements observés dans le passé proposés dans la littérature ont été implémentés [Marsault et al., 2007]. En dépit de leur complexité les modèles présentent des performances pratiquement identiques à celles de la persistance. Le double modèle (pluie/non pluie) de type TARIMA/GARCH [de Montera 2008] permet de plus d'estimer une marge adaptative à partir de la modélisation de la variance conditionnelle de l'erreur de prédiction. Les performances des différents modèles sont évaluées sur une année complète de données Syracuse en terme de cout/disponibilité pour un horizon de 10s.

Les performances obtenues pour prédire l'affaiblissement sur la liaison à 44 GHz à partir des affaiblissements à 20 GHz sont évaluées en combinant les modèles de similitude et de prédiction optimisés, associés à la mise en œuvre d'une marge adaptative pour des horizons de prédiction compris entre 3 et 30s. Les performances sont comparées avec celles obtenues par le modèle de similitude de l'UIT associé à un modèle de prédiction et une marge fixe. On obtient dans le cas du nouveau modèle proposé pour un horizon de prédiction de 5s une disponibilité du système de 99,8 % pour un coût moyen de  $X$  dB.

## 1. Analyse statistique

### 1.1 Statistique d'affaiblissement

La Figure 1 présente les statistiques d'affaiblissement obtenues à 20 et 44 GHz pendant les années 2007 et 2008. Ces histogrammes cumulés indiquent le pourcentage de temps pendant lequel l'affaiblissement total indiqué en abscisse est dépassé. La disponibilité des données est de 75 % pour les deux canaux en 2007 et respectivement égale à 71% et 60 % pour les liaisons à 20 GHz et 44 GHz en 2008. A 20 GHz les

statistiques obtenues sont conformes au modèle UIT [ITU, 2007]. La comparaison avec le modèle UIT montre qu'en 2007 (courbe noire pointillée) les statistiques sont légèrement au dessus du modèle UIT au-delà de 7 dB alors que les statistiques 2008 (courbe noire) se situent en dessous de l'UIT et donnent ainsi une idée de la variabilité inter-annuelle. A 44 GHz la comparaison avec le modèle UIT est rendue plus délicate en 2007 à cause d'un problème de mesure lié à la présence de gouttes d'eau sur le radome de l'antenne de M1 [Marsault, 2007]. Ce problème a été définitivement réglé en octobre 2007. Il en résulte une surestimation des pourcentages d'affaiblissement au-delà de 5-7 dB, c'est-à-dire lorsqu'il pleut. Malgré cela, les résultats obtenus sont cohérents avec ceux de l'UIT et valident ainsi l'ensemble des procédures d'étalonnage et de prétraitement des données [Mallet, 1992 ; OPEX, 1994] Les courbes rouges des statistiques mensuelles de Novembre 2007 à Novembre 2008 mettent en évidence la grande variabilité des situations.

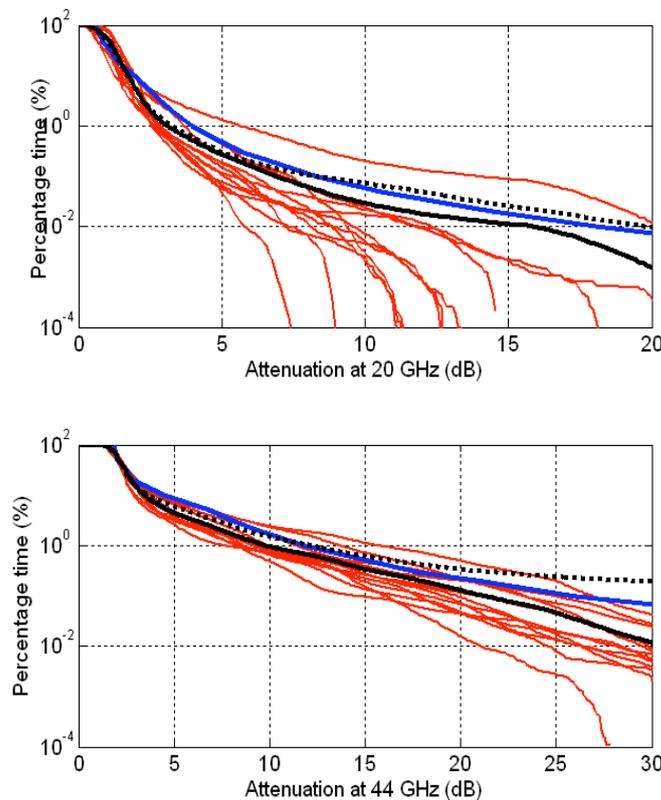


Figure 1 - Statistique d'affaiblissement à 20 GHz (en haut) et 44 GHz (en bas) à Rennes en 2007 (courbe pointillée noire) et 2008 (courbe continue noire). Les courbes rouges sont des statistiques mensuelles de Novembre 2007 à Novembre 2008. La courbe bleue correspond au modèle UIT.

### 1.2 Similitude en fréquence

Deux types de rapports de similitude peuvent être considérés.

Le rapport de similitude à long terme qui correspond au rapport entre affaiblissements équiprobables à différentes fréquences:

$$K_{equ}(P) = \frac{A_{44}(P)}{A_{20}(P)} \quad (1)$$

Le rapport de similitude à court terme ou instantanée qui correspond au rapport entre affaiblissements instantanés à deux fréquences :

$$K_{inst}(t) = \frac{A_{44}(t)}{A_{20}(t)} \quad (2)$$

où  $A_f(P)$  désigne l'affaiblissement qui a la probabilité P d'être dépassé et  $A_f(t)$  désigne l'affaiblissement à l'instant t.

Ces rapports de similitude empiriques, calculés à partir des affaiblissements mesurés, sont à comparer avec les modèles de similitude en fréquence. Les différentes contributions de l'atmosphère (précipitation, nuages, gaz) ont des comportements différents en fonction de la fréquence, ce qui induit un rapport de similitude propre à chacun des constituants de l'atmosphère. Lorsque qu'une composante contribue majoritairement à l'affaiblissement total le coefficient de similitude global est équivalent à celui de cette seule composante. Durant les événements précipitants intenses le rapport de similitude est celui des précipitations. Pour les événements peu intenses au contraire l'effet des gaz et des nuages ne peut être négligé, leur contribution provoque des affaiblissements de l'ordre de 7 dB pour une élévation de 17° à 44 GHz. Dans ce cas la séparation des effets est nécessaire pour prendre en compte le comportement en fréquence des différents constituants. Un réseau de neurone a été développé par le CETP à cet effet [Barthes 2006] Les données d'entrées sont l'affaiblissement à 20 GHz et les données météorologiques (pression, température, et humidité) mesurées au sol. Les sorties sont les contributions relatives des différents constituants à l'affaiblissement total ( $W_{gas}$ ,  $W_{clouds}$  and  $W_{rain}$ ) définies par les équations suivantes:

$$\begin{cases} A_{rain} = W_{rain} \times A_{total} \\ A_{clouds} = W_{clouds} \times A_{total} \\ A_{gas} = W_{gas} \times A_{total} \end{cases} \quad (3)$$

Ce réseau de neurone a été développé à partir de profils atmosphériques fournis par le centre européen de prévision météorologiques (ECMWF). Ces profils ont permis de réaliser une base de données synthétiques pour l'apprentissage du réseau de neurones. L'affaiblissement par les gaz  $A_{gas}$  est calculé par le modèle de Liebe (Liebe et al., 1993). Le modèle de diffusion de Rayleigh est utilisé pour calculer l'affaiblissement dû aux nuages  $A_{clouds}$ . L'affaiblissement dû à la pluie est calculé avec le modèle de diffusion de (Mie, 1908) en considérant plusieurs distributions de tailles des gouttes (Marshall Palmer, Joss convective et Joss stratiforme).

Les coefficients de similitude des différents constituants pondérés par les contributions relatives permettent de déterminer le coefficient similitude global à partir des coefficients de similitude spécifiques à chaque composant :

$$K_{mod} = W_{gas} \cdot K_{gas} + W_{clouds} \cdot K_{clouds} + W_{rain} \cdot K_{rain} \quad (4)$$

Le coefficient de similitude des gaz, donné par l'expression ci-dessous, varie entre 1.5 et 2:

$$K_{gaz} = \frac{A_{O2,44} + A_{H2O,44}}{A_{O2,20} + A_{H2O,20}} \quad (5)$$

$A_{O2,f}$ , l'affaiblissement linéique de l'oxygène et  $A_{H2O,f}$ , l'affaiblissement linéiques de la vapeur d'eau, sont estimés avec les modèles UIT [ITU-R 2007] fonction des paramètres météorologiques mesurés au sol et pour des profils météorologiques standards.

Le coefficient de similitude des nuages  $K_{clouds}$ , est calculé comme le rapport des affaiblissements spécifiques. Il se simplifie en éliminant la quantité d'eau liquide nuageuse, ce qui est particulièrement intéressant, car cette dernière n'est pas connue. Le coefficient de similitude est finalement une constante pour un couple de fréquence donné. Pour le couple de fréquence 20/44 GHz il est de l'ordre de 4.5. Pour le coefficient de similitude de la pluie  $K_{rain}$  le modèle UIT [ITU-R 2007] noté  $K_{ITU}$ , est utilisé, il donne des valeurs comprises entre 3.8 et 3.

La figure 2 compare les coefficients de similitude empiriques moyens ( $K_{inst}$  et  $K_{EQU}$ ) avec les modèles ( $K_{mod}$  et  $K_{ITU}$ ) en fonction des valeurs de l'affaiblissement à 20 GHz.

Considérons  $K_{inst}$  (courbe bleu). Aux faibles affaiblissements (< 1.5 dB) le coefficient de similitude est principalement dû aux gaz ce qui explique sa faible valeur. En présence de nuages, ceux-ci apportent une

contribution importante et fait remonter le coefficient à des valeurs pouvant aller jusqu'à 3.65 pour des affaiblissements de 4 dB. Au-delà, la pluie va apporter l'essentiel de la contribution et fait redescendre le coefficient à des valeurs proches de 3.2.

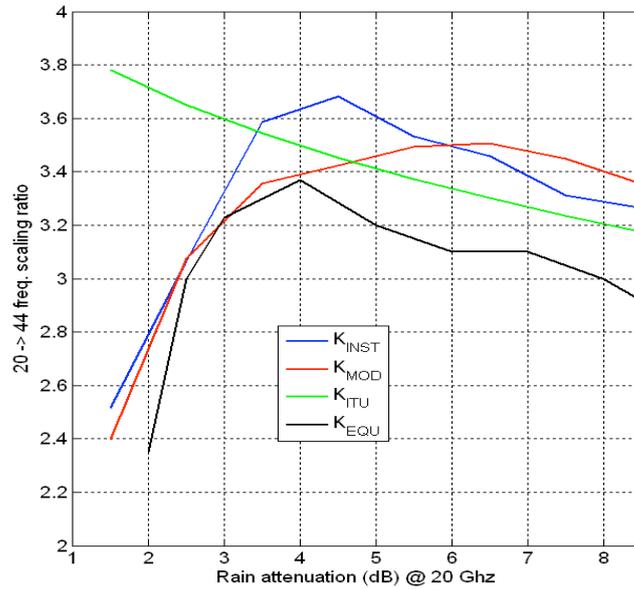


Figure 2 - Coefficient de similitude 44/20 GHz en fonction de l'affaiblissement à 20 GHz Courbe noir coefficient de similitude à long terme ( $K_{EQU}$ ), courbe bleu coefficient de similitude instantané ( $K_{inst}$ ), courbe verte modèle ITU ( $K_{ITU}$ ), courbe rouge combinaison des coefficients de similitude des gaz, des nuages et de la pluie ( $K_{mod}$ ).

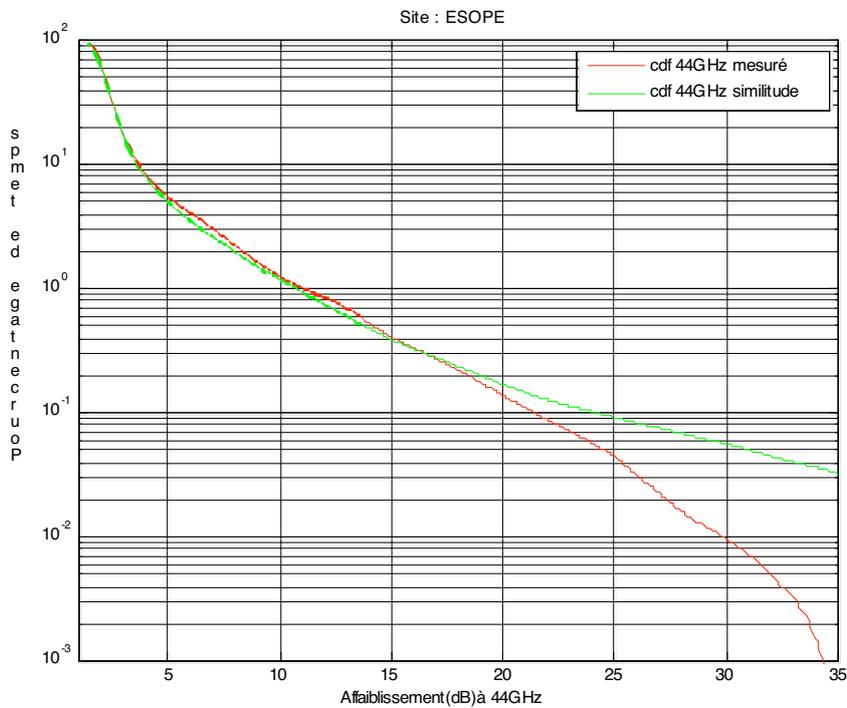


Figure 3 – Statistiques de l'affaiblissement mesuré à 44 GHz comparé aux statistiques de l'affaiblissement à 44 GHz obtenu par similitude en fréquence de l'affaiblissement à 20 GHz.

La figure 2 montre que le modèle de l'UIT de la pluie seule  $K_{ITU}$  peut donner lieu à des erreurs importantes en dessous de 5 dB. Le modèle prenant en compte la séparation des effets permet quant à lui d'estimer relativement bien  $K_{inst}$ . Il est à noter que le coefficient estimé par équiprobabilité est toujours inférieur à la valeur instantanée.

La figure 3 montre que les statistiques déduites par similitude sont cohérentes avec celles obtenues à partir des mesures à 44 GHz. Ceci met en évidence la possibilité à partir des mesures recueillies à 20 GHz d'obtenir des informations sur le comportement du canal en bande EHF. Une différence notable est observée pour les affaiblissements au dessus de 20 dB, la raison peut être une saturation progressive des instruments (la saturation se produit à 35 dB à 44 GHz). On montre de plus que l'erreur de prédiction du modèle  $K_{mod}$  peut être représentée par une loi Gaussienne d'écart-type 0.65

### 1.3 Durée des évanouissements

La durée d'un évanouissement, notée  $d$ , indique le temps pendant lequel l'affaiblissement dépasse un certain seuil  $T$ . La durée d'un évanouissement dépend du seuil, de la fréquence, de l'angle d'élévation et de la manière dont les données sont filtrées. Les statistiques de durées d'évanouissement obtenues à partir des mesures à 20 GHz ont été réalisées en filtrant les données avec un filtre passe bas. Quatre largeurs de fenêtre différentes ( $L=1, 10, 50$  et  $100$  secondes) ont été considérées.

La figure 4 montre les distributions cumulées des durées d'évanouissements  $F(d > D / A > T)$  obtenues entre Février 2007 et Décembre 2008 pour un seuil  $T$  de 4 dB. Les courbes bleues correspondent aux différentes largeurs de filtres, la courbe rouge correspond au modèle ITU1623 model [ITU, 2003]. Pour un filtre, consistant en une moyenne glissante sur une fenêtre de largeur  $L=50s$  on obtient pour la distribution cumulée des durées d'évanouissements une loi log-normale très similaire au modèle UIT. Un tel filtre passe bas (fréquence de coupure à 0.02 Hz) est souvent utilisé pour supprimer les scintillations. Cependant on peut constater sur la figure 3 que suivant la fréquence de coupure  $1/L$  du filtre, une cassure à  $L$  secondes apparaît, la pente après cette cassure reste identique. Ceci indique que le filtrage des scintillations n'est pas pertinent et introduit une complexité inutile dans la distribution cumulée des durées d'évanouissements. Si on ne filtre pas les données brutes (ce qui correspond dans le cas de l'expérience SYRACUSE à des données filtrées à 1 seconde), la distribution cumulée peut être représentée par une simple loi de puissance (courbe bleu labellisée 1 sec.).

La figure 5 correspond aux distributions cumulées obtenues avec un filtrage sur une seconde pour trois seuils différents ( $T=2, 4$  et  $8$  dB). La loi de puissance est valide sur 5 décades, de 2 secondes à 55 heures. L'exposant de la loi de puissance  $k$  dépend du seuil. Le modèle suivant est proposé :

$$F(d > D / A > T) = 0.53 \left( \frac{D}{L_o} \right)^{-k} \quad (6)$$

Avec  $D > 1$  s et  $L_o=1$  s et  $k = 1.57 \times T^{-0.66}$ ,  $T$  en dB.

A partir de l'équation 6, la prise en compte d'un filtre moyenneur de longueur  $L$  quelconque conduit à un modèle de la forme :

$$F(d > D / A > T) = \frac{1}{\left(1 + \frac{D}{L}\right)^k} \quad (7)$$

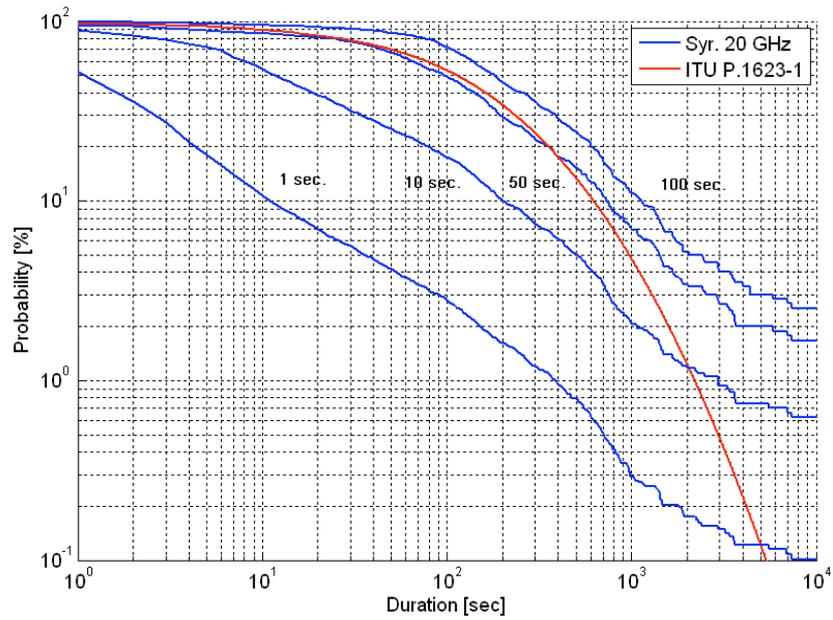


Figure 4 : Distributions cumulées des durées d'évanouissements obtenues à 20 GHz pour différentes largeurs de filtre (courbes bleu  $L=1, 10, 50$  et  $100$  secondes) modèle ITU1623 (courbe rouge) et pour un seuil de 4 dB.

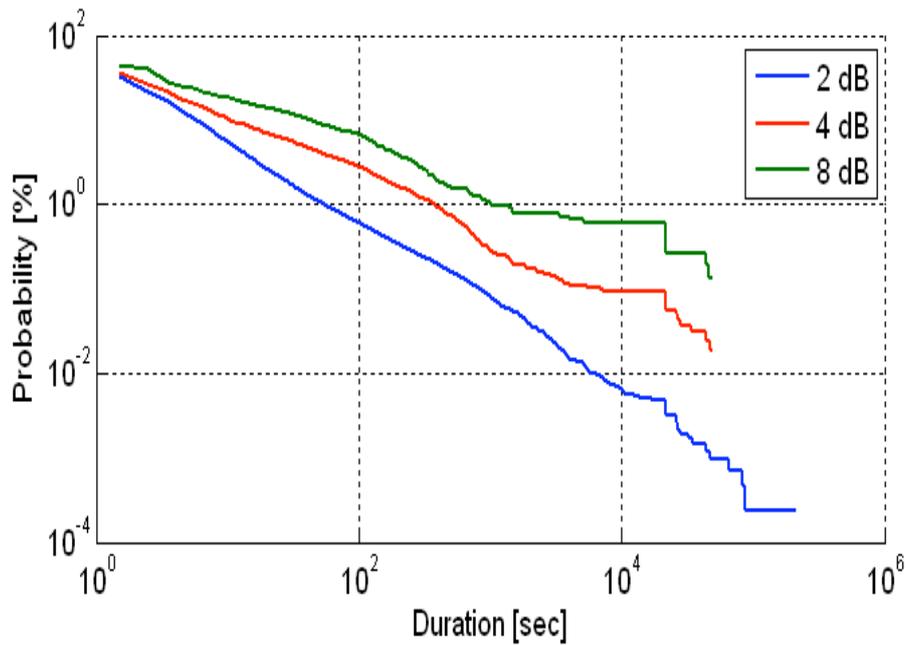


Figure 5 : Distributions cumulées des durées d'évanouissements obtenues à 20 GHz pour différents seuils ( $T=2, 4, 8$  dB) en utilisant les données brutes (moyennées sur 1 seconde).

## 2. Prédiction d'une marge dynamique à 44 GHz à partir des mesures à 20 GHz

### 2.1 Modèle de prédiction à 20 GHz

Ce modèle de prédiction de l'affaiblissement à 20 GHz, développé à partir des affaiblissements à 20 GHz mesurés pendant l'expérience Olympus [Golé, 1994] est décrit en détail dans l'article de Montera [de Montera, 2008]. Nous en rappellerons succinctement les principes avant de donner les performances obtenues à partir des affaiblissements recueillis pendant l'expérience Syracuse à la même fréquence mais pour une élévation de 17° (au lieu de 30°).

#### 2.1.1 Seuillage et différenciation

Un prétraitement est nécessaire en raison de l'intermittence des phénomènes précipitants et de la non-stationnarité du signal d'affaiblissement. Un seuil  $T$  égal à 2.5 dB est utilisé pour distinguer les périodes de variabilité différentes. En situation de ciel clair ou faiblement nuageux, l'affaiblissement est inférieur à 2.5 dB, et présente une faible variabilité, ces périodes sont appelées 'calmes' par la suite. Lorsqu'il pleut l'affaiblissement est supérieur à 2.5 dB et présente une grande variabilité, ces périodes sont appelées 'volatiles'. D'autre part, la série chronologique des affaiblissements doit être différenciée pour obtenir un processus stationnaire. La série différenciée est notée  $\Delta A_t = A_t - A_{t-1}$ .

#### 2.1.2 Le modèle de prédiction ARIMA

L'identification des ordres du modèle ARMA conduit à l'équation (7) dans laquelle  $\Delta \hat{A}_t$  est l'affaiblissement différencié prévu dans une seconde et  $\varepsilon_{t-k} = \Delta A_{t-k} - \Delta \hat{A}_{t-k}$  est l'erreur du modèle à l'instant  $t-k$ . Les paramètres du modèle ARMA sont  $\phi_1', \phi_2', \theta_1', \theta_2'$  si  $A_t \geq T$  et  $\phi_1'', \phi_2'', \theta_1'', \theta_2''$  si  $A_t < T$ . Ce modèle combinant la différenciation et la modélisation ARMA est appelée ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average). La série d'affaiblissement est ainsi modélisée par 2 modèles ARIMA(2,1,2) avec une transition en biseau pour les valeurs de l'affaiblissement proches du seuil.

$$\Delta \hat{A}_t = \phi_1 \Delta A_{t-1} + \phi_2 \Delta A_{t-2} + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \phi_1' = 0.8803 \\ \phi_2' = -0.2213 \\ \theta_1' = -1.2224 \\ \theta_2' = 0.4223 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \phi_1'' = 0.3013 \\ \phi_2'' = -0.0162 \\ \theta_1'' = -0.8347 \\ \theta_2'' = -0.0350 \end{cases} \quad (8)$$

#### 2.1.3 Le modèle GARCH de prédiction de la variance

La variance conditionnelle des erreurs du modèle ARIMA n'est pas constante et présente des périodes de forte variation. Un intervalle de confiance des prédictions de largeur constante n'est donc pas judicieux. Le modèle GARCH modélise la variance de l'erreur du modèle de prédiction en fonction des carrés des erreurs passées. Dans l'expression ci-dessous,  $\sigma_t$  est l'écart type de l'erreur de prédiction du modèle ARMA et  $\eta_t$  l'erreur normalisée. Les paramètres du modèle ARMA sont  $\omega', \alpha', \beta'$  si  $A_t \geq T$  et  $\omega'', \alpha'', \beta''$  si  $A_t < T$

$$\varepsilon_t = \eta_t \cdot \sigma_t$$

$$\sigma_t^2 = \omega + \alpha \cdot \varepsilon_{t-1}^2 + \beta \cdot \sigma_{t-1}^2 \quad \begin{cases} \omega' = 1.8 \cdot 10^{-5} \\ \alpha' = 0.0535 \\ \beta' = 0.9465 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \omega'' = 5.2 \cdot 10^{-6} \\ \alpha'' = 0.0362 \\ \beta'' = 0.9638 \end{cases} \quad (9)$$

Ce modèle permet d'utiliser l'information contenue dans l'auto corrélation des erreurs aux carrés. La principale hypothèse utilisée est que l'erreur de prédiction est un bruit blanc gaussien dont la variance est modulée par un écart type variant temporellement (conditionnellement)

#### 2.1.4 Comparaison avec les modèles existants

Plusieurs modèles de la littérature ainsi que la persistance sont considérés pour cette comparaison.

Le modèle le plus simple considéré est la persistance qui consiste à supposer que l'affaiblissement reste constant sur l'intervalle de prédiction. Les autres modèles sont ceux de la littérature :

Le modèle de prédiction ARMA adaptatif Ce modèle utilise une modélisation ARMA adaptative (Auto-Regressive Moving average) ainsi qu'une marge variable pour tenir compte des scintillations (Grémont et al., 1999).

Le modèle de prédiction par filtrage Markovien non-linéaire (NASA). L'affaiblissement est modélisé par un processus markovien décrit par une équation différentielle stochastique du premier ordre (Manning, 1990, 1991). Le paramètre de bruit a été fixé de même à 0.1 dB.

Le modèle de processus Markovien à deux échantillons (ONERA-DEMR). ce modèle donne la probabilité conditionnelle de l'affaiblissement à partir de la connaissance de deux échantillons précédents (van de Kamp, 2002a, 2002b, 2003, 2006 ; Bolea-Alamañac et al., 2003). Ce modèle est présenté avec un pré-filtrage de fréquence de coupure 0.1 Hz, cependant, ce prétraitement n'est pas adapté à une application temps-réel en raison du retard induit par le déphasage du filtre. Pour cette raison, ce modèle est directement appliqué aux données non filtrées.

Le modèle de prédiction par réseau de neurone adaptatif ADALINE. ce modèle utilise trois échantillons précédents pour prédire l'affaiblissement grâce à un neurone linéaire (Chambers & Otung, 2005). Le paramètre de vitesse d'apprentissage a été optimisée empiriquement à  $10^{-4}$ .

Concernant les modèles qui ne sont pas dotés d'une marge d'erreur variable, on supposera cette dernière constante. Seuls les modèles ARMA et ONERA à deux échantillons possèdent une marge d'erreur variable. Dans le modèle ONERA, l'erreur a une distribution 'hyperbolic secant' avec un paramètre d'échelle qui dépend du niveau de l'affaiblissement. Dans le modèle ARMA adaptatif, la marge d'erreur est liée à la variance des scintillations qui est estimée sur les 60 premiers échantillons passés.

Les performances du modèle de prédiction ARIMA avec seuil sont comparées en terme de biais et d'écart-type de l'erreur de prédiction pour un horizon de 10s. De même que sur les données Olympus [de Montera , 2008], les performances du modèle ARIMA avec seuil sont comparables à celles des modèles existants et il est difficile de dire lequel est le meilleur. Cependant, le pouvoir prédictif des modèles est globalement faible, car leurs performances sont comparables à celles de la simple persistance.

Les performances sont ensuite analysées en termes de coût moyen en fonction de la disponibilité (Figure 6a et 6b). Étant donné que les coupures de liaison ont lieu quand l'affaiblissement atmosphérique dépasse l'affaiblissement maximum prévu par le système, le critère définissant les performances d'un modèle de prédiction doit prendre en compte la marge qu'il faut ajouter à la prédiction pour obtenir la borne supérieure de l'affaiblissement prédit. L'affaiblissement maximum prévu à l'instant  $t+k$  est obtenu en ajoutant à l'affaiblissement prédit, une marge d'erreur adaptative  $\bar{M}_{t+k}(P)$  qui dépend de la disponibilité souhaitée P (pourcentage de temps pendant lequel la liaison n'est pas coupée).

$$\bar{A}_{t+k}(P) = \hat{A}_{t+k} + \bar{M}_{t+k}(P) \quad (10)$$

Le coût moyen de la liaison C est défini en dB comme la surestimation moyenne de l'affaiblissement réalisé par rapport à l'affaiblissement maximum prévu :

$$C(P) = \frac{1}{N} \int H(\bar{A}_{t+k}(P) - A_{t+k}) (\bar{A}_{t+k}(P) - A_{t+k}) dt \quad (11)$$

où N en, seconde est la durée totale de la série chronologique et H(.) la fonction de Heaviside

En termes de coût/disponibilité, On observe une nette amélioration des performances par rapport aux autres modèles de prédiction. Il est d'ailleurs intéressant de remarquer que les performances avec les données SYRACUSE3 sont remarquablement similaires à celle obtenues avec les données OLYMPUS.

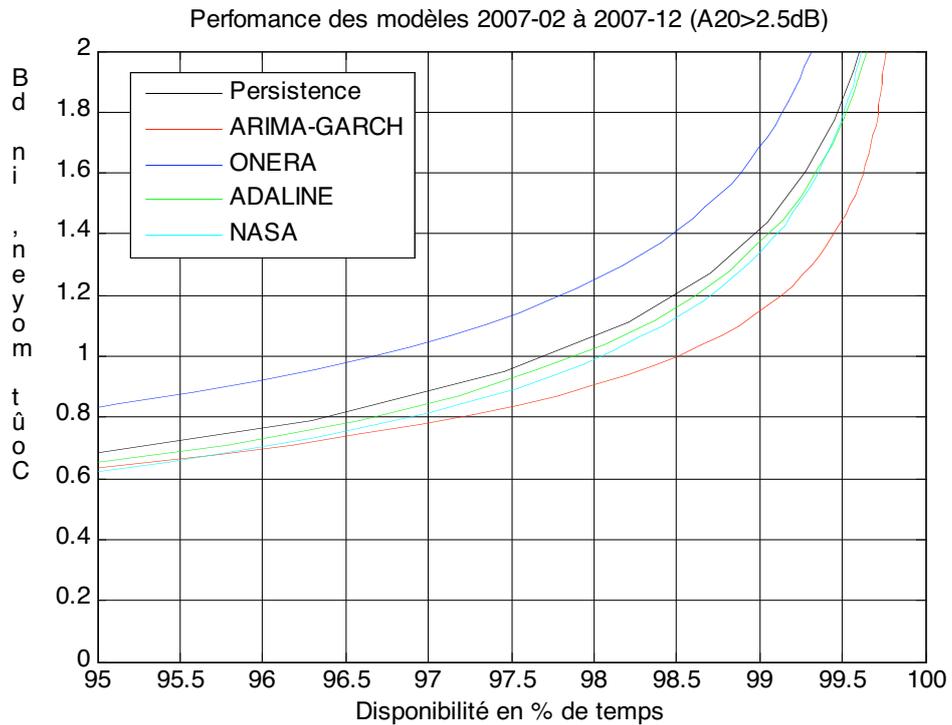


Figure 6a – Performances des modèles de prédiction en terme de coût/disponibilité calculées à partir des données SYRACUSE3 20 GHz. Données recueillies en 2007

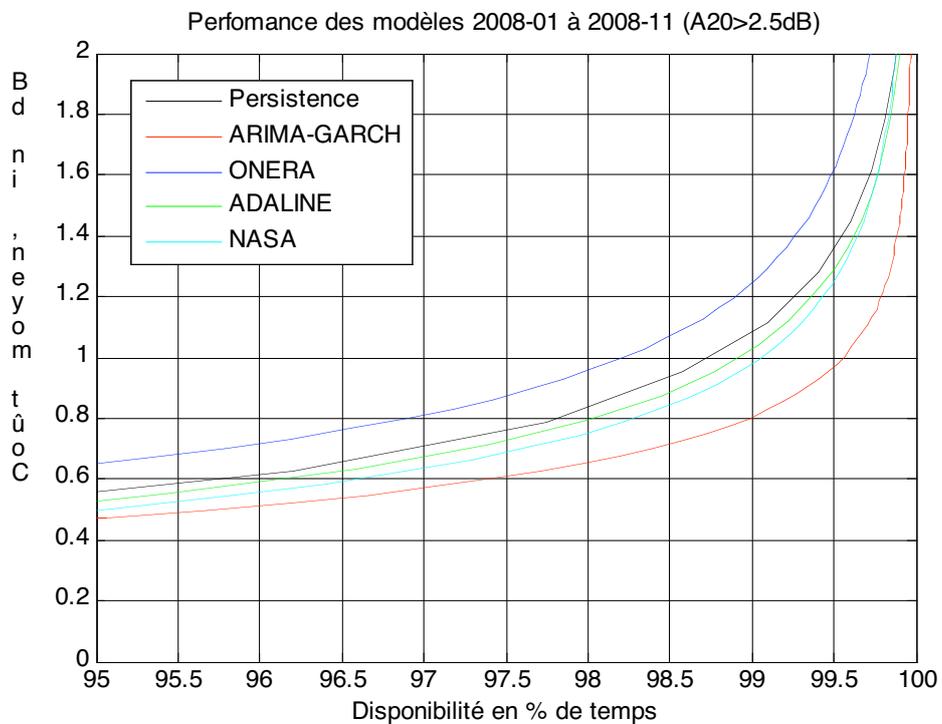


Figure 6b – Performances des modèles de prédiction en terme de coût/disponibilité calculées à partir des données SYRACUSE3 20 GHz. Données recueillies en 2008

## 2.2 Prédiction avec similitude en fréquence

Le modèle de similitude décrit précédemment  $K_{mod}$  (§ 1.2) est utilisé pour prévoir l'affaiblissement sur la liaison montante à 44 GHz à partir de la liaison descendante à 20 GHz.

$$\hat{A}_{t+k}(F_2) = \hat{K}_t \cdot \hat{A}_{t+k}(F_1) \quad (8)$$

### 2.2.1 Performance en fonction de l'intervalle de prédiction

La figure 7 montre que les performances de l'algorithme sur des données SYRACUSE3 20/44 GHz mesurées par ESOPE du 01/11/2007 au 15/04/2008. Cette base de données comprend une trentaine d'évènements intenses et correspond à une durée de 50 heures de précipitations. Nous avons calculé les courbes coût – disponibilité pour différents horizons de prédiction compris entre 5 et 60 secondes. Les performances sont proches pour des horizons entre 5 et 15 secondes. Le modèle de prédiction avec similitude en fréquence a été testé. En revanche comme on pouvait s'y attendre, les performances commencent à se dégrader pour un horizon de 30 secondes et la dégradation s'accroît pour  $h=1$  minute. Ces performances sont moins bonnes que celles obtenues avec les données OLYMPUS 20/30 GHz [de Montera 2008], ce qui est logique puisque l'erreur de similitude est plus importante dans le cas des données SYRACUSE3 20/44 GHz (car les fréquences sont plus éloignées).

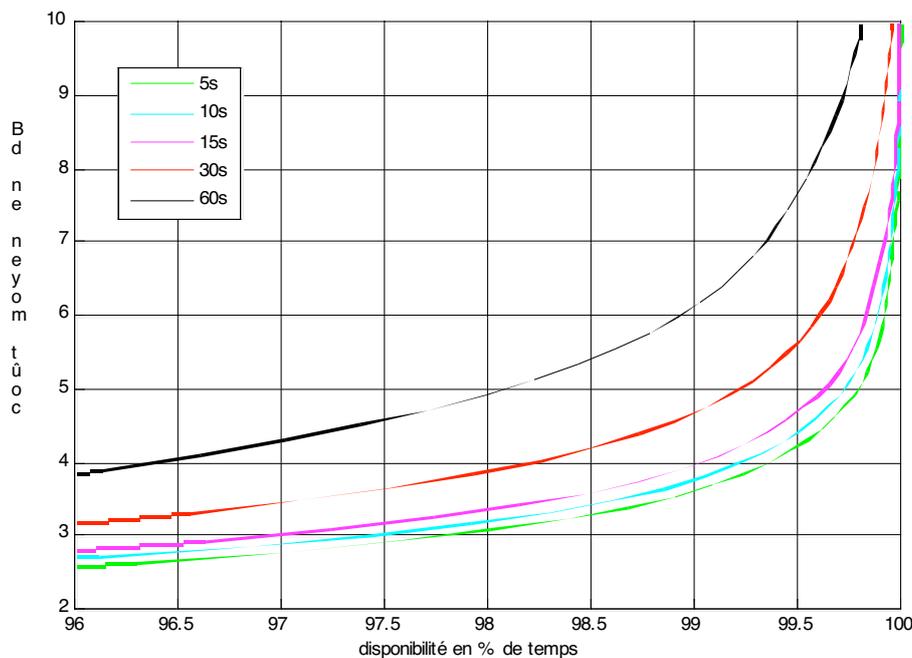


Figure 7 - Performances en terme de coût/disponibilité du modèle ARIMA-GARCH avec similitude en fréquence calculées avec les données SYRACUSE3 20/44 GHz pour différents horizons de prédiction.

Les erreurs de prédiction à 44 GHz sont dues non seulement à l'erreur de prédiction à 20 GHz, mais aussi à l'erreur de similitude commise. La figure 8 permet de se rendre compte du poids relatif de ces deux sources d'erreur sur une base d'évènement sélectionnés. La courbe bleue représente l'erreur de similitude, elle du même ordre de grandeur que l'erreur de prédiction à 60 secondes. Cet aspect est important car il montre clairement que l'amélioration du modèle de prédiction 20-44 GHz à l'horizon de quelques secondes ( $< 15$  s) passe obligatoirement par l'amélioration des modèles de similitude en fréquence plutôt que par l'amélioration des modèles de prédiction. Il faut cependant noter que des

oscillations présentes sur les données à 44 GHz augmentent artificiellement l'erreur d'estimation du coefficient de similitude, surtout lorsque l'affaiblissement est faible ('bosse' sur la courbe pour les affaiblissements faibles).

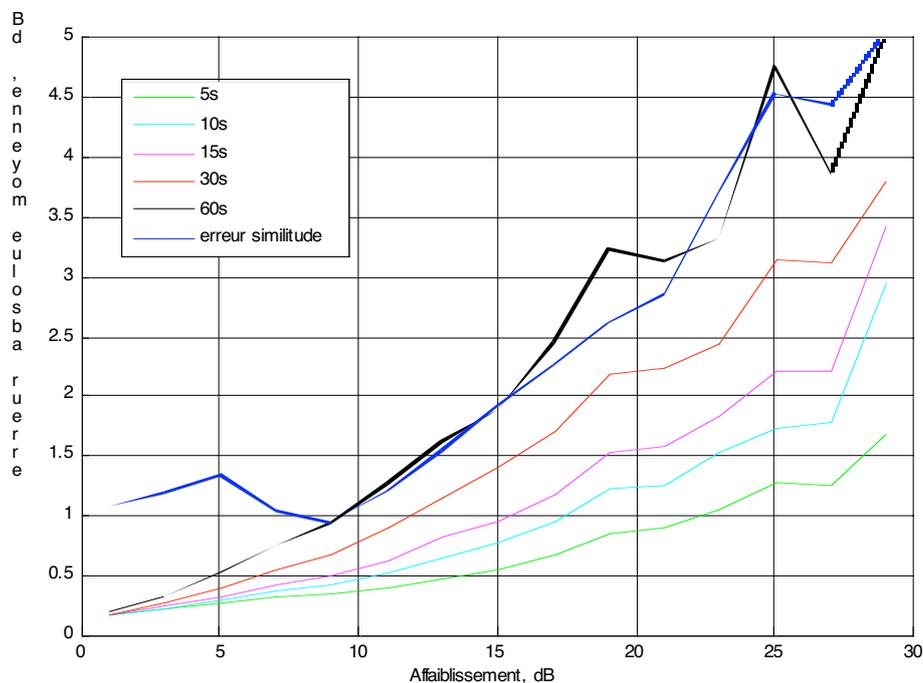


Figure 8 - Contribution de l'erreur de prédiction à 20GHz à l'erreur totale pour différents horizons de prédiction et contribution de l'erreur de similitude.

## CONCLUSION

La qualité des données recueillies à l'occasion de l'expérience de propagation SYRACUSE réalisée au CELAR à Rennes en Bande EHF depuis fin 2006 permet de valider ou d'améliorer la modélisation statistique de la dynamique du canal de propagation en bande EHF

Les statistiques d'affaiblissement ont été calculées sur une période de deux ans. On observe des différences mineures avec le modèle UIT. D'autre part, la similitude en fréquence de l'affaiblissement à 20 GHz permet d'obtenir des statistiques proches de celles obtenues en utilisant les mesures à 44 GHz. Cela montre qu'il est possible d'obtenir des statistiques en bande EHF simplement à partir de mesures à 20 GHz. Un nouveau modèle de statistiques de durées d'évanouissement a pu être proposé.

De même que sur les données Olympus utilisées pour développer le modèle, les performances de prédiction obtenues sur les données SYRACUSE3 20 GHz en termes de coût/disponibilité ont pu être grandement améliorées par rapport aux modèles existants.

Concernant la prédiction avec similitude à un horizon de 10s, le modèle surestime en moyenne de 4 dB l'affaiblissement à 44 GHz pour une disponibilité de 99% pendant les périodes de pluie, soit 99.95% du temps. Les performances sont dégradées par rapport à celle obtenues avec une similitude 20/30 GHz sur les données Olympus. D'une part, l'angle d'élévation plus faible (17° au lieu de 30°) conduit à des affaiblissements plus importants, d'autre part les fréquences sont plus éloignées. Ce modèle est le premier à combiner prédiction et similitude en fréquence. On peut remarquer que la contribution de l'erreur de similitude est environ deux fois plus importante que celle de la prédiction à 20 GHz, ce qui montre que les études futures devront se focaliser sur l'amélioration de l'estimation du coefficient de similitude.

Etant donné les différences importantes entre les expériences OLYMPUS et SYRACUSE3 (localisation, angle d'élévation, fréquence), le fait que le modèle ARIMA-GARCH soit pertinent dans les deux cas montre sa capacité de généralisation.

## REFERENCES

- Barthès L., C. Mallet, O. Brisseau : A Neural network model for the separation of atmospheric effects on attenuation: application to frequency scaling, Radio Science RS4012, vol. 41, n°4, 10.1029/2005RS003310, 2006
- Bolea-Alamañac, A., M. Bousquet, L. Castanet, et M.M.J.L. Van de Kamp, 2003. Implementation of short-term prediction models in fade mitigation techniques control loops. *COST 272/280 Workshop*, Noordwijk, The Netherlands, PM5-067
- Chambers, A.P., et L.E. Otung, 2005. Neural network approach to short-term fade prediction on satellite links. *Electronics Letters*, **41**(23).
- Delahaye, J.-Y., L. Barthès, P. Golé, J. Lavergnat, and J.P. Vinson, 2006. A dual-beam spectropluviometer concept. *J. Hydrol.*, **328**, 110-120.
- de Montera L., Mallet C., L. Barthes and P. Golé "Short-term prediction of rain attenuation level and volatility in Earth-to-Satellite links at EHF band , Nonlin. Processes Geophys., **15**, 631-643, 2008.
- Gibbins C. J.: Improved algorithms for the determination of specific attenuation at sea level by dry air and water vapor, in the frequency range 1-350 GHz, Radio science, vol. 21(6), pp. 949-954, 1986
- Golé P., Lavergnat J., Ulmer-Moll A.-M., Vernet M. : Les résultats de l'expérience OLYMPUS France Telecom FTR& D, technical report NT/CETP/001, 1994
- Grémont, B., M. Philip, P. Galois et S. Bate, 1999. Comparative analysis and Performance of two Predictive Fade Detection Schemes for Ka-band Fade Countermeasures. *IEEE Journal on selected areas in communications*, **17**(2).
- ITU-R: Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems, Recommendations of the ITU-R, Rec., 618-8, 2003.
- ITU-R P. 1623, "Prediction method of fade dynamics on Earth-space paths", ITU, Geneva, Switzerland, 2003.
- ITU-R 618-9, International Telecommunication Union Radiocommunication Bureau, Geneva, 2007.
- Joss J., Thams J.C. and Walvoguel A., The variation of rain drop-size distributions at Locarno, Proc. Of the Intern. Conf. On clouds Physics, Toronto, pp 369-373, 1968.
- Liebe H. J; Hufford G. A. et Cotton M. G., Propagation modeling of moist air and suspended water/ice particles below 1000 GHz, Proceedings, of AGARD 52nd Specialists Meeting of Electromagnetic Wave propagation Panel, pp 3-1-3.10, 1993.
- Mallet, C., and J. Lavergnat, 1992: Beacon calibration with multifrequency radiometer. *RadioScience*, **27**(5), pp. 661-680.
- Marsault, T., J.D. Hermant, F. Bouyer et al., 2006. EHF Propagation Experiment with Syracuse 3 satellite. EUCAP (ESA SP-626), p. 357.1, Nice, France.
- Manning, R.M., 1990. A Unified statistical Rain Attenuation Model for Communication Link Fade Predictions and Optimal Stochastic Fade Control Design Using a Location Dependent Rain Statistic Database. *Int. J. Satellite Commun.*, **8**, pp. 11-30.
- Manning, R.M., 1991. A statistical rain attenuation prediction model with application to the Advanced Communication Technology Satellite Project, part III: a stochastic rain fade control algorithm for satellite link power via nonlinear Markov filtering theory. *NASA TM-100243*.
- Marshall, J. S. and W M K Palmer, 'The distribution of rain drops with size', *J. Meteor.*, **5**, 165-166, 1948.
- Marsault T., L. de Montera, J.D. Hermant, J.C. Penn, L. Barthes, C. Mallet, and P. Golé : "EHF propagation experiment with Syracuse 3 satellite: first results", Proceed. of the European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Edinburgh, UK, November 2007
- OPEX, Second workshop of the OLYMPUS propagation experimenters, vol. 1: reference book on attenuation measurement and prediction, Noordwijk, 8-10 Nov. 1994.
- Van de Kamp: "'Short-term prediction of rain attenuation using two samples', *Electronics Letters*, vol.38 (23), pp.1476-1477, 2002.