Utilisation des photos panoramiques pour la compréhension des phénomènes physiques du canal de propagation

On the use of panoramic photograph for the understanding of the propagation channel physical phenomena

Jean-Marc Conrat*, Albin Dunand **, Patrice Pajusco ***
*Orange Labs Belfort, jeanmarc.conrat@orange-ftgroup.com
** Délégation Générale de l'armement, albin.dunand@dga.defense.gouv.fr
*** Télécom Bretagne, patrice.pajusco@telecom-bretagne.eu

Résumé

L'estimation des performances des systèmes MIMO nécessite une modélisation spatio-temporelle du canal de propagation, généralement réalisée à partir de mesures large bande multi-capteurs. Ces campagnes de mesure ainsi que les techniques d'estimation mises en œuvre sont complexes et peuvent parfois être corrompues par des défauts de l'instrument de mesure. Lorsque les mesures sont valides, la très grande quantité d'information apportée par ces mesures est parfois difficile à interpréter. Cet article montre une méthode d'analyse permettant une interprétation facile et rapide des mesures. Les directions d'arrivée sont juxtaposées sur des photos panoramiques 3-D. L'ensemble est appelé radiophoto. La corrélation entre les résultats des estimateurs et l'environnement est immédiate, les phénomènes physiques ou erreurs de mesure sont facilement identifiés. L'article décrit la mise en œuvre de cette technique et donne quelques exemples représentatifs d'un canal urbain macrocellulaire.

Canal de propagation, photographies panoramiques, mesures, macrocellulaire urbain

Summary

Multi-sensor measurement campaigns are performed to generate directional wideband propagation channels. These measurements are complex and errors caused by the operator or by the device system can occur. A reliable validation method is thus required before the channel modelling step. Furthermore, multi-sensor measurement campaigns provide multidimensional information which has to be interpreted. The traditional method based on the power profile visual inspection correlated with environment photos is time-consuming and not necessary efficient due to the large amount of information to be analysed. This paper presents a simple and efficient method to validate and interpret directional results. Directions of arrival are superimposed on 3-D panoramic photographs. This new representation is called radiophoto. The interactions between EM waves and the environment are immediately identified. The paper also gives some examples in macrocell urban environment at 2.2 GHz.

Propagation channel, panoramic photograph, measurement, urban macrocell

1 Introduction:

La demande croissante pour des réseaux de télécommunication sans fil à haut débit conduit à développer de nouvelles interfaces radio toujours plus performantes. La qualité de ces nouvelles interfaces radio est généralement évaluée par des simulations logicielles ou matérielles qui nécessitent l'apport d'un modèle de propagation. Il existe une très grande diversité de modèles. Dans le cadre de cet article, nous nous intéressons essentiellement aux modèles physiques large bande destinés principalement à l'évaluation des systèmes multi-antennaires [1]. Un modèle physique comporte une description d'un ensemble de rayons caractérisés par un retard, des directions à la station de base et au mobile et une matrice de polarisation donnant les gains complexes pour les polarisations verticales et horizontales [2]. La modélisation est toujours précédée par une phase de caractérisation du canal de propagation. En effet, il est délicat de définir des lois mathématiques décrivant le canal sans avoir au préalable interpréter les résultats, par exemple en essayant de comprendre l'origine des étalements des retards ou de mettre en évidence les réflexions/diffractions sur les bâtiments. Cette interprétation des résultats est parfois longue et laborieuse: comparer simultanément résultats de mesure, notes de campagnes de mesure, plans de ville ou de bâtiments, photographies classiques prend beaucoup de temps et est source d'erreur. Tout le monde a au moins connu une fois dans sa vie l'expérience douloureuse d'un plan mal orienté conduisant à une navigation des plus hasardeuses. Disposer de moyens d'interprétation simples et fiables est donc une préoccupation constante pour les scientifiques impliqués dans l'analyse des phénomènes de propagation.

Par ailleurs, les résultats du travail de caractérisation doivent être présentés de manière claire et didactique dans les communications orales ou écrites. Cette recommandation sonne comme une évidence: à qualité scientifique égale, un travail clairement présenté aura toujours un impact plus important. Pourtant, dans le domaine de la caractérisation du canal de propagation, certains travaux remarquables ne sont pas toujours faciles à lire. Par exemple [3] et [4] présentent des résultats de caractérisation en milieu urbain. Plusieurs pages sont consacrées à une description textuelle détaillée des interactions entre les ondes et le milieu de propagation. La qualité scientifique du travail présentée est évidente mais malheureusement l'excès de détails textuels nuit à la compréhension globale des phénomènes de propagation. Des méthodes d'interprétation plus visuelles auraient certainement rendu ces deux contributions encore plus attractives.

De la triple nécessité de disposer de moyens d'interprétation à la fois simples, fiables et didactiques est née l'idée de mélanger des résultats de mesure avec des photographies de l'environnement. Cette idée n'est pas nouvelle, puisque le premier article (à la connaissance des auteurs) qui a présenté de tels résultats datent de 2002 [5]. Sur une photographie réalisée avec une optique standard était superposée des impacts représentant les rayons détectés par l'algorithme SAGE. Cette méthode n'est pas simple car il n'est pas évident de recaler les systèmes de coordonnées de la photographie et du mécanisme de mesure. Par ailleurs, la photographie standard ne permet pas d'avoir une vision globale en 3-D ce qui est indispensable lorsqu'on analyse le canal dans un environnement très diffus (indoor ou urbain). Plus récemment, [6] a présenté une méthode de superposition de mesure sur des images panoramiques construites à partir de flux vidéo provenant de 6 caméras différentes. Cette méthode permet une visualisation 3-D mais la synchronisation des flux vidéo est complexe à mettre en œuvre.

Le but de cet article est de montrer une technique d'interprétation basée sur la superposition de photos panoramiques avec des résultats de direction d'arrivée au mobile. Dans le cadre de cet article, ce type de représentation est appelée radiophoto. La première partie décrit l'expérimentation et les traitements de mesure qui ont permis de déterminer les directions d'arrivée au mobile. La deuxième partie porte sur la réalisation des photos panoramiques (matériel, logiciel) et sur la superposition des résultats de mesure sur ces photographies. Enfin, la troisième partie présente différents exemples qui mettent en évidence les principaux phénomènes physiques intervenant dans le canal de propagation.

2 Description et analyse des mesures

La campagne de mesure a été réalisée dans le centre ville de Mulhouse. L'émetteur est situé sur le toit d'un bâtiment. Le récepteur est situé dans un véhicule de mesure qui reste immobile pendant la mesure. Le principe de la mesure consiste à collecter la réponse impulsionnelle du canal de propagation sur un réseau virtuel d'antennes 21*21. Le rail X-Y qui déplace l'antenne de réception est monté sur le toit du véhicule de mesure (Figure 1). Les points de mesure dont les résultats sont contenus dans cet article sont présentés sur

la Figure 2. La réponse impulsionnelle est mesurée grâce au sondeur large bande "Americc" [7] sur une largeur de bande de 62.5 MHz et autour d'une fréquence centrale de 2.2 GHz. Les antennes utilisées à l'émission et la réception étaient doublement polarisée (V/H) mais dans le cadre de cet article, nous nous intéressons seulement à la polarisation verticale. Les premiers résultats d'analyse de cette campagne et en particulier les ratios de dépolarisations (XPD) ont été publiés dans [8-10].

Figure 1 : Emetteur et récepteur sur site

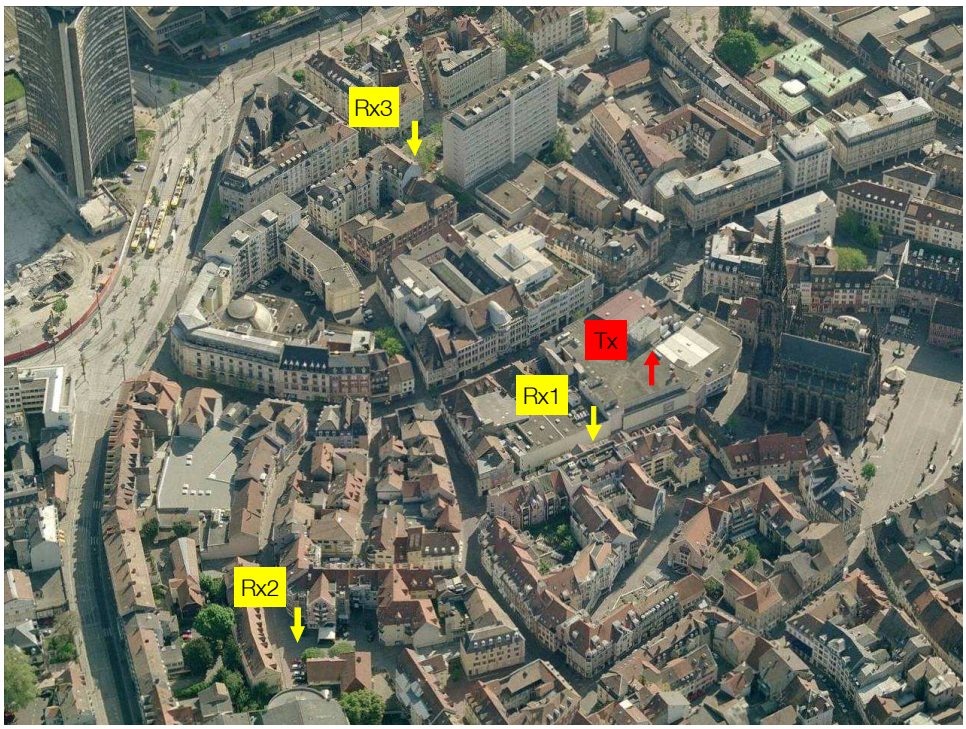

Figure 2: Position des points de mesure

Pour déterminer les angles d'arrivée, à chaque retard de la réponse impulsionnelle, on forme à partir du réseau 21*21, une antenne synthétique qui pointe dans une direction particulière et permet donc de déterminer la puissance des trajets arrivant dans cette direction. Cette technique est aussi nommée formation de faisceaux (ou beamforming en anglais). On note $h_{m,n}(\tau)$ la réponse impulsionnelle mesurée sur le capteur d'indice (m,n) et $h(\theta,\varphi,\tau)$ la réponse spatio-temporelle calculée par l'algorithme du beamforming. θ, φ, τ représentent respectivement l'élévation au mobile, l'azimut au mobile et le retard de la réponse spatio-temporelle. $h(\theta,\varphi,\tau)$ est donnée par la formule:

$$h(\theta,\varphi,\tau)=\frac{\sum_m\sum_n\left(h_{mn}(\tau).\times\overline{B_{mn}(\theta,\varphi)}.\times W\right)}{antGainBS.antGainMS(\theta,\varphi).\sum\sum W}$$

Avec

antGainBS :	gain de l'antenne à la station de base
antGainMS(θ, φ):	gain de l'antenne mobile dans la direction *(θ, φ)*
$B_{mn}(\theta, \varphi)$:	réponse de l'antenne réseau dans la direction *(θ, φ)*
W :	fenêtre de pondération
.x:	produit terme à terme

La symétrie planaire du réseau introduit une ambigüité haut/bas dans l'estimation de l'élévation. Deux rayons possédant un même azimut mais avec des élévations complémentaires de 180° ne peuvent être résolus. Dans la réalité, la carrosserie de la voiture masque les trajets arrivant par le bas, on peut donc considérer que le système de mesure estime sans ambiguité les élévations comprises entre 0° et 90°. La fenêtre de pondération permet de réduire les lobes secondaires.

Le résultat obtenu après application de l'algorithme de beamforming est une matrice tridimensionnelle $h(\theta,\varphi,\tau)$ contenant l'énergie reçue au mobile dans toutes les directions et pour chaque temps de retard. Il n'est bien sûr pas possible de visualiser directement les résultats issus de l'algorithme. La caractérisation spatio-temporelle d'une liaison est donc généralement représentée par des profils de puissance où une ou plusieurs dimensions sont moyennées en puissance (Tableau 1).

Des exemples de profils de puissance sont représentés sur la Figure 4 . Les profils de puissance fournissent une grande quantité d'informations sur le canal de propagation mais il est très difficile d'interpréter les informations et surtout de les corréler à des interactions entre l'onde électromagnétique et des objets urbains. Cela montre bien la nécessité de méthodes rapides et visuelles d'interprétation des résultats.

3 Generation des radiophotos

La photographie panoramique est un style de photographie qui consiste à créer des images avec des champs larges. Lorsque l'angle de prise de vue atteint 180° en vertical et 360° en horizontal, on parle de photos panoramiques 3-D. La manière la plus simple pour obtenir de telles photographies est la méthode par assemblage. Le principe consiste à prendre un ensemble de photographies qui se chevauchent légèrement afin de les assembler avec un logiciel spécifique. Cette technique permet d'utiliser du matériel photographique grand public. Par contre, le temps d'acquisition est relativement long, environ une dizaine de minutes, ce qui interdit toutes applications temps réel. Le dispositif d'acquisition est composé d'un appareil photographique classique, d'un objectif fish-eye, d'un trépied et d'une tête panoramique. L'objectif fish-eye est un objectif très grand angle. La tête panoramique permet d'orienter l'appareil en 3-D (Figure 3).

Figure 3: Appareil photographique monté sur sa tête panoramique

CIR mesurée sur le capteur (m,n)	$h_{m,n}(\tau)$
Power Delay Profil (PDP)	$PDP(\tau)=\sum_{\theta}\sum_{\varphi}\lvert h(\theta,\varphi,\tau)\rvert^2$
Azimuth Elevation Power Spectrum (AEPP)	$AEPP(\theta,\varphi)=\sum_{\tau}\lvert h(\theta,\varphi,\tau)\rvert^2$
Azimuth Delay Power Spectrum (ADPP)	$ADPP(\varphi,\tau)=\sum_{\theta}\lvert h(\theta,\varphi,\tau)\rvert^2$
Elevation Delay Power Spectrum (EDPP)	$EDPP(\theta,\tau)=\sum_{\varphi}\lvert h(\theta,\varphi,\tau)\rvert^2$
Azimuth Power Spectrum (APP)	$APP(\varphi)=\sum_{\theta}\sum_{\tau}\lvert h(\theta,\varphi,\tau)\rvert^2$
Elevation Power Spectrum (EPP)	$EPP(\theta)=\sum_{\varphi}\sum_{\tau}\lvert h(\theta,\varphi,\tau)\rvert^2$

Tableau 1 : Définitions des différents profils

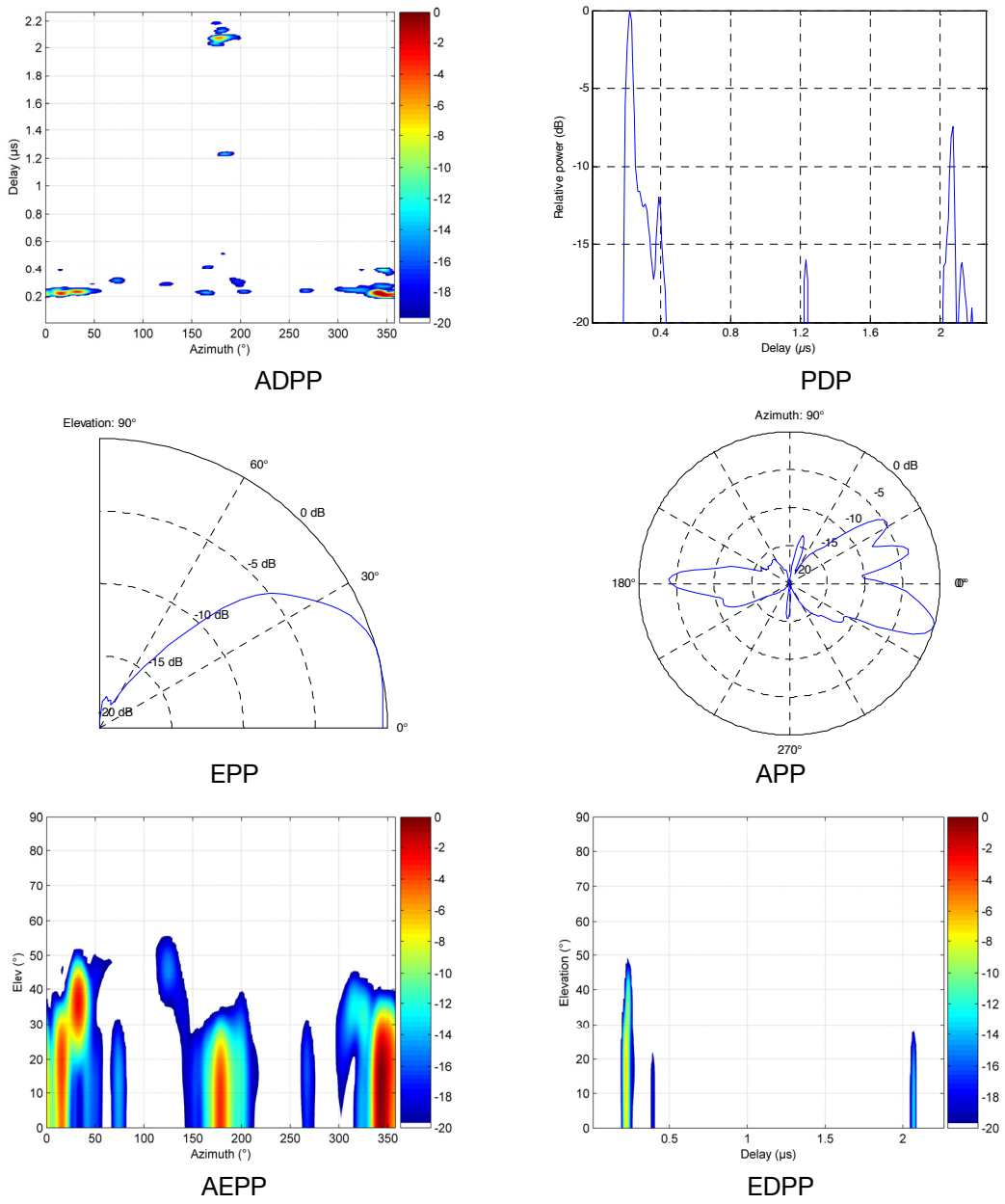

Figure 4 : Exemples de profils de puissance

Les photos panoramiques sont réalisées en trois étapes:

- Réglage de la tête panoramique: La tête panoramique doit être réglée de manière à faire coïncider la pupille d'entrée de l'objectif (appelée aussi point nodal) avec le centre de rotation de la tête panoramique. Si ces points sont différents, on introduit des erreurs de parallaxe qui réduisent la qualité de l'assemblage. Ce problème se rencontre avec des objets proches de l'appareil photographique, donc essentiellement en environnement indoor. La pupille d'entrée se situe sur l'axe de rotation de l'objectif mais sa position exacte est inconnue, les fabricants d'optique refusant de communiquer cette donnée jugée confidentielle. Heureusement, il existe des méthodes très simples pour régler la tête panoramique [11].
- Acquisition des photos: Dans un premier temps, le nombre de photographies nécessaires pour recouvrir la zone de champ est calculé. Il faut tenir compte des ouvertures angulaires de l'objectif et d'un taux de recouvrement d'au moins 20/25 %. En effet, le logiciel d'assemblage utilise les zones de recouvrement pour déterminer des points de reconnaissance communs et ajuster les photos entre elles. Dans un deuxième temps, les photographies sont réalisées. En environnement indoor, la prise de vue ne pose pas de problème particulier. Par contre en Outdoor, les niveaux de luminosité peuvent varier fortement, certaines photographies sont réalisées en plein contre-jour. Dans ce cas, l'augmentation de la zone de recouvrement aide le logiciel d'assemblage à réaliser une photographie panoramique ayant une luminosité uniforme.
- L'assemblage des photos: La qualité de cette étape dépend grandement du logiciel utilisé. Nous avons utilisé le logiciel Sticher Unlimited qui réalise de manière automatique et efficace l'ensemble des opérations. La partie la plus longue du traitement est le calcul des points de reconnaissance communs entre deux photographies voisines, puis le lissage des luminosités. Une fois ces étapes réalisées, la photographie panoramique est générée suivant la projection définie par l'utilisateur. Celle qui nous intéresse est la projection sphérique, où l'axe des X est proportionnel aux azimuts et l'axe des Y proportionnel aux élévations.

La Figure 5 donne un exemple de 24 prises de vues réalisées à deux élévations (0° et 45°) et 12 azimuts par pas de 30°. Le taux de recouvrement est de 50 % en horizontal et 70 % en vertical. Cette configuration permet d'obtenir une photographie panoramique d'ouverture 360° en azimut et 155° en élévation (Figure 6).

La superposition des photos panoramiques avec l'AEPP est réalisée sous Matlab. Le principe est de considérer les photos panoramiques et l'AEPP comme des matrices de couleurs (rouge, vert, bleu). Les colonnes représentent l'azimut, les lignes l'élévation. Dans un premier temps, on suréchantillonne l'AEPP pour obtenir une résolution identique à celle de la photographie panoramique. Dans un deuxième temps, les matrices couleurs sont additionnées avec un coefficient de pondération de manière à régler la transparence. La Figure 7 donne un exemple de radiophotos. L'azimut 0° représente l'axe BS-MS. On remarque la remarquable correspondance entre la répartition de l'énergie et l'environnement, les réflexions sur les façades des bâtiments ou les diffractions sur les arêtes des bâtiments sont clairement identifiables. Le principe des radiophotos peut être étendu à la vidéo ce qui permet de visualiser dynamiquement l'évolution des directions d'arrivée en fonction du retard.

Figure 5: Ensemble de photos prises avec l'appareil fish-eye

Figure 6: Photo panoramique résultant de l'assemblage,

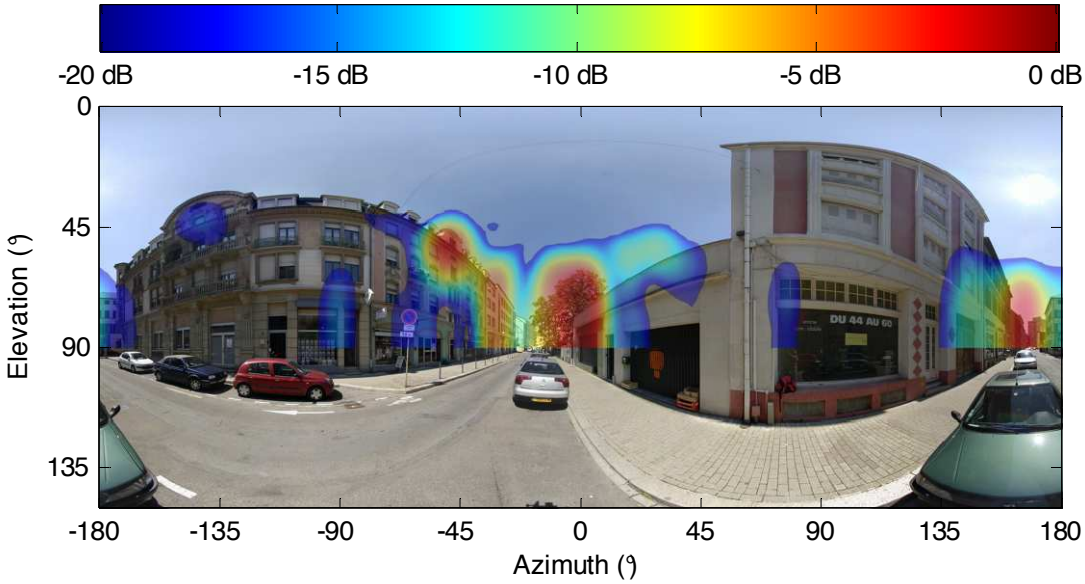

Figure 7: Radiophoto résultant de la superposition de l'AEPP et de la photo panoramique

4 Quelques exemples de canaux

4.1 Position Rx1: Les phénomènes élémentaires:

Cet exemple est un cas d'école qui met en évidence les deux phénomènes élémentaires prépondérants: la réflexion et la diffraction. Cet exemple est aussi représentatif des situations quasi-LOS. Lorsqu'on classifie les canaux de propagation, on sépare généralement les situations où l'émetteur et le récepteur sont en visibilité (LOS) des situations où le récepteur ne voit pas l'émetteur (NLOS). Dans la réalité, les cas de visibilité pure sont très rares mais beaucoup de situations classifiées sous l'appellation quasi-LOS présentent des caractéristiques similaires à la situation LOS: un trajet fort prépondérant dans l'axe BS-MS et quelques trajets secondaires.

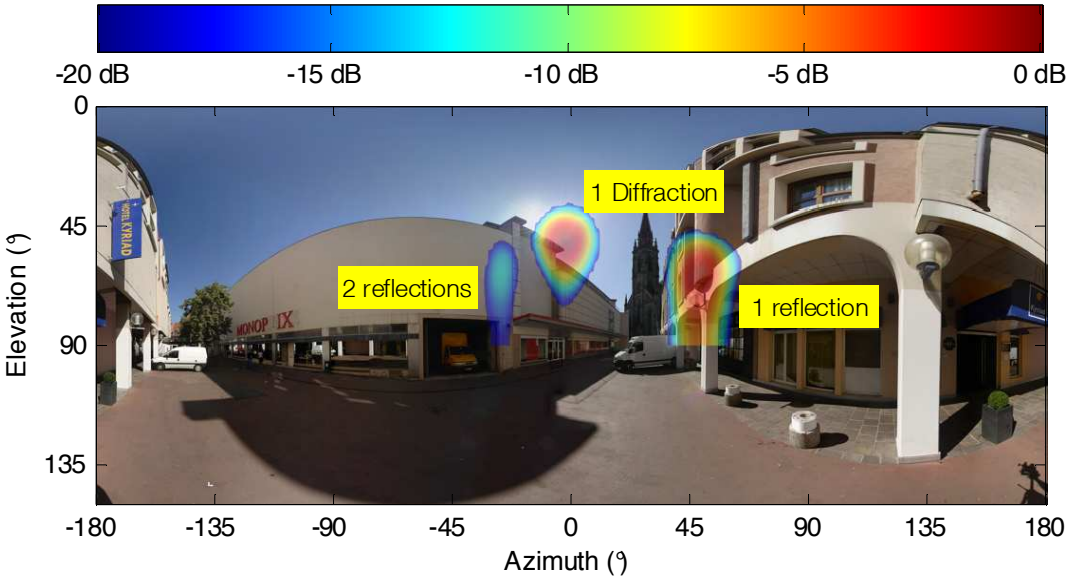

Figure 8: Radiophoto position Rx1

4.2 Position Rx 2: Les différents régimes de propagation:

Cet exemple montre les quatre types de régime de propagation en situation de NLOS:

- Diffraction par-dessus les toits ou "Over-rooftop diffraction": l'onde se propage de toit en toit par diffractions successives. Les trajets sont courts et en général puissants. Le chemin de propagation est proche de la ligne BS-MS.
- Effet conduit de rue ou "Street canyoning". L'axe des rues étant dégagé, les ondes peuvent s'y propager plus facilement, créant ainsi quelques directions de réception privilégiées. Dans certaines configurations, les rues se comportent comme des guides d'onde.
- Réflexions sur des objets lointains ou "Far scatterer". Il s'agit en général de réflexions sur des tours dont la hauteur dépasse largement la hauteur moyenne des toits. Des retards de plusieurs µs peuvent être observés.
- Réflexions/diffraction multiples. Cette catégorie rassemble les rayons qui se réfléchissent ou se diffractent sur les façades des bâtiments, sur le mobilier urbain, sur les voitures, ou sur tout autre objet de l'environnement.

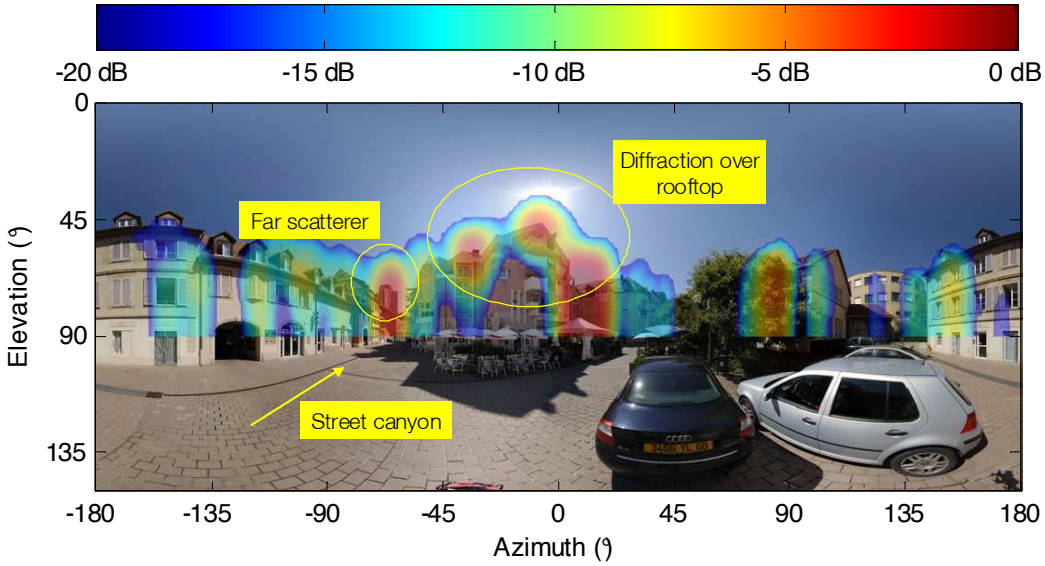

Figure 9: Radiophoto position Rx2

4.3 Position Rx3: un cas particulier de Street canyon

Dans cet exemple, l'axe de la rue correspond à l'axe BS-MS. Généralement, dans ces situations, les différents régimes de propagation décrits ci-dessus se conjuguent pour concentrer toute la puissance dans l'axe de la rue.

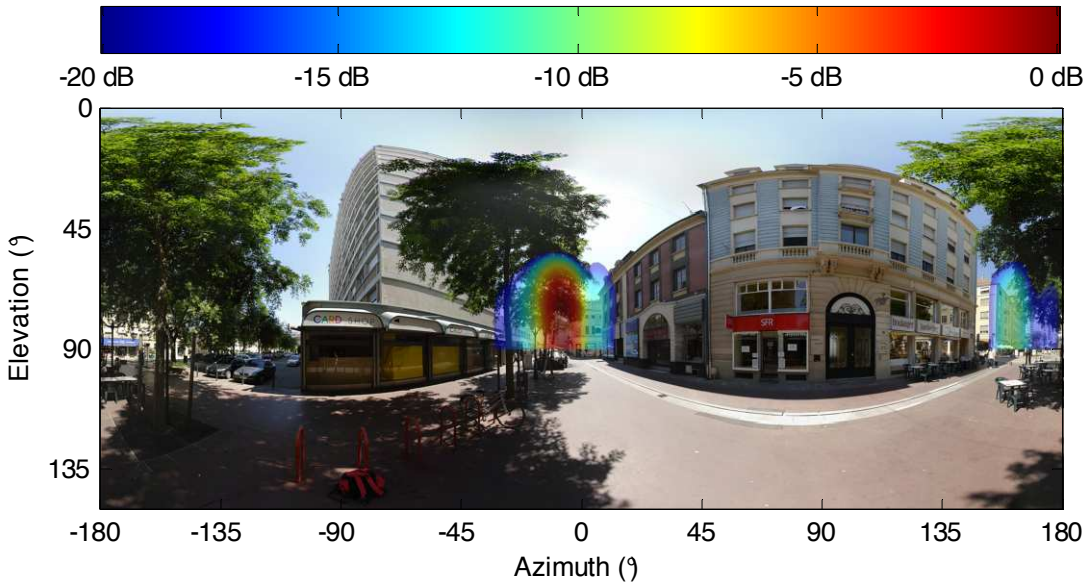

Figure 10: Radiophotos, position Rx3

4.4 Validation des points de mesure:

Les données issues d'un système de mesure incluent de manière plus ou moins importante les défauts du système. Des méthodes simples de validation des données sont nécessaires pour supprimer les points de mesure qui auraient été corrompus par les défauts de l'instrumentation. L'exemple donné sur la Figure 11 montre l'intérêt des radiophotos pour la validation des points de mesure. Une partie de l'énergie est reçue dans une direction venant du ciel. Ce phénomène est physiquement impossible. Il convient donc d'accorder une attention particulière à ces points de mesure avant de les intégrer dans le processus de modélisation. Dans notre configuration de mesure, l'erreur peut provenir soit de la non-stationnarité du canal pendant la mesure qui remonte le niveau de bruit, soit d'une réflexion sur le sol ou sur une partie de la voiture.

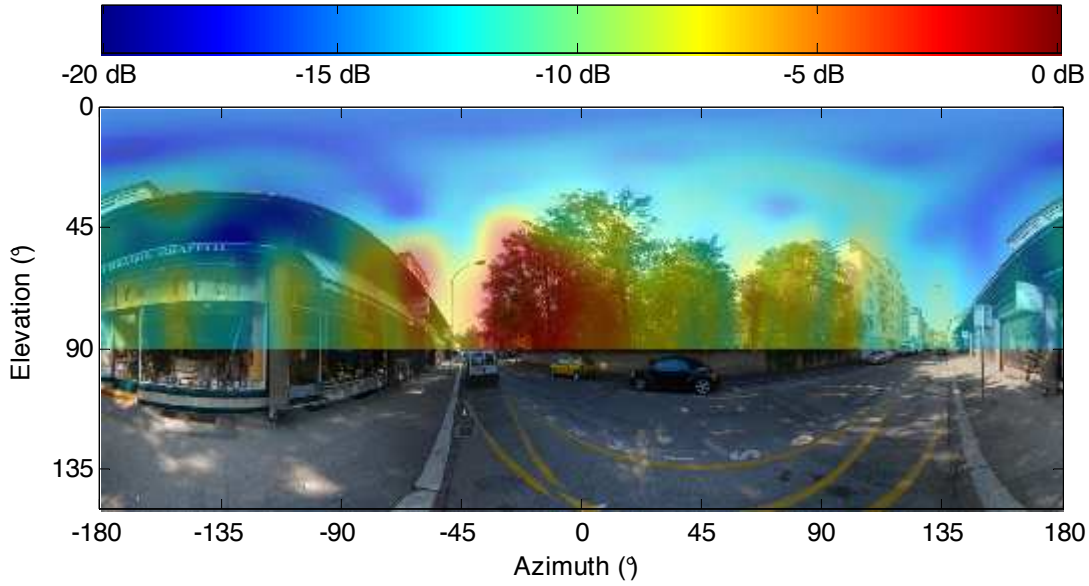

Figure 11: Radiophotos indiquant un défaut potentiel dans la chaine de traitement des mesures

5 Conclusion

Les quelques exemples proposés dans cet article ont montré le grand intérêt des radiophotos pour la validation des campagnes de mesure et l'analyse des données. Les radiophotos permettent une analyse rapide et efficace des phénomènes de propagation. En particulier, l'impact de l'environnement sur les caractéristiques spatio-temporelles du canal de propagation est immédiatement identifiable. Les travaux futurs basés sur cette technique porteront sur la validation des techniques de simulation large bande du canal de propagations telles que le tracé de rayons ou le lancer de rayons. Les résultats de simulation seront ajoutés à la radiophoto ce qui devrait permettre de mieux comprendre l'influence de la précision des bases de données géographiques sur la qualité des simulations.

6 References

[1] P. Almers, E. Bonek, A. Burr, and others, "Survey of Channel and Radio Propagation Models for Wireless MIMO Systems," *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2007, pp. Article ID 19070, 19 pages, 2007.

[2] J. M. Conrat and P.Pajusco, "A Versatile Propagation Channel Simulator for MIMO Link Level Simulation," *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. special issue "Space-Time Channel Modeling for Wireless Communications", 2007.

[3] M. Landmann, K. Sivasondhivat, J. I. Takada, I. Ida, and R. Thomä, "Polarization Behavior of Discrete Multipath and Diffuse Scattering in Urban Environments at 4.5 GHz," *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2007, pp. Article ID 57980, 16 pages, 2007.

[4] J. Laurila, K. Kalliola, M. Toeltsch, K. Hugl, P. Vainikainen, and E. Bonek, "Wideband 3D characterization of mobile radio channels in urban environment," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 50, pp. 233, 2002.

[5] B. H. Fleury, P. Jourdan, and A. Stucki, "High-resolution channel parameter estimation for MIMO applications using the SAGE algorithm," International Zurich Seminar on Broadband Communications, Zurich, 2002.

[6] M. Kwakkernaat, Y. de Jong, R. Bultitude, and M. Herben, "High-Resolution Angle-of-Arrival Measurements on Physically-Nonstationary Mobile Radio Channels," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, pp. 2720, 2008.

[7] J.-M. Conrat, P. Pajusco, and J. Y. Thiriet, "A Multibands Wideband Propagation Channel Sounder from 2 to 60 GHz," IMTC, Sorrento, 2006.

[8] A. Dunand and J.-M. Conrat, "Dual-Polarized Spatio-temporal Characterization in urban macrocells at 2 GHz," Vehicular Technology Conference (VTC2007 Fall), Baltimore, 2007.

[9] A. Dunand and J.-M. Conrat, "Polarization behaviour in urban macrocell environments at 2.2 GHz," European Conference on Antenna and Propagation (EuCap 2007), Edinburgh, 2007.

[10] A. Dunand and J.-M. Conrat, "Etude spatio-temporelle de la Dépolarisation des Ondes en environnement urbain macrocellulaire à 2 GHz," Journée Nationale Micro-ondes (JNM 2007), Toulouse, 2007.

[11] A. Dunand, "Contribution à la caractérisation du canal de propagation en environnement macrocellulaire urbain à 2.2 GHz", Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2008