

Rôle des précipitations dans l'interaction ondes atmosphère dans la bande 10-50 GHz

Laurent Barthès

▶ **To cite this version:**

Laurent Barthès. Rôle des précipitations dans l'interaction ondes atmosphère dans la bande 10-50 GHz . Météorologie. Université Versailles Saint Quentin en Yvelines, 2010. tel-01591115

HAL Id: tel-01591115
https://insu.hal.science/tel-01591115

Submitted on 20 Sep 2017

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.

Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines
Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales

Habilitation à diriger des recherches

Discipline

Electronique & Sciences de l'Environnement

Ecole doctorale

Sciences

Présentée par

Laurent Barthés

Titre

Rôle des précipitations dans l'interaction ondes atmosphère dans la bande 10-50 GHz

Soutenue le 26 Mai 2010 devant le jury composé de :

Mme Valérie Ciarletti	**Présidente**
Mme Picon Odile	**Rapporteuse**
Mr Remko Uijlenhoet	**Rapporteur**
Mr Fouad Badran	**Rapporteur**
Mr Bruce Denby	**Examinateur**
Mr Tullio Joseph Tanzi	**Examinateur**

SOMMAIRE

1. CURRICULUM VITAE 7
1.1. Etat civil 7
1.2. Formation 7
1.3. Situation professionnelle 7
2. DEROULEMENT DE CARRIERE 8
2.1. Préambule 8
2.2. Déroulement de carrière en enseignement 8
Enseignement à l'IUT de Vélizy (1992-2006) 8
Enseignement à l'université de Versailles (depuis 2006) 10
Responsabilités administratives en enseignement 12
2.3. Déroulement de carrière en recherche 12
Contrats de recherche, appel d'offres et campagnes de mesure (depuis 1998) 12
Activités d'encadrement et d'animation (depuis 2002) 14
3. PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES 17
3.1. Revues internationales à comité de lecture 17
3.2. Conférences internationales 18
3.3. Workshop, GDR 19
3.4. Revues nationales & notes 20
3.5. Conférences nationales (avec actes) 20
3.6. Conférences nationales (sans actes) 20
3.7. Séminaires 21
3.8. Rapports 21
4. ACTIVITES DE RECHERCHE PASSEES (PERIODE 1993 – 1998) 25
5. TRAVAUX DE RECHERCHE DEPUIS 1998 25
5.1. Contexte général 25
5.2. Interaction onde – atmosphère dans la bande 10-50 GHz 26
Problématique 26
Travaux de recherche 30
5.3. Axe 1: Modélisation inverse par réseaux de neurones en vue de l'estimation de l'affaiblissement atmosphérique, application à la diversite de pointage 31
5.4. Axe 2: Microphysique de la pluie, interaction onde - pluie 35
T1 - Mesure de la microphysique de la pluie 36
T2 - Influence de la microphysique de la pluie sur l'affaiblissement 37
T3 - Modèle physique d'évolution du profil vertical de la microphysique des précipitations 42
Axe 3: Propriétés du canal de propagation, modèles de prédiction du canal 43
Axe 4: Modélisation de la variabilité spatio-temporelle de la pluie à petite échelle 48
6. BILAN DE MES TRAVAUX 52
7. PROSPECTIVES ET PROJETS DE RECHERCHE 56
7.1. Cadre 56
7.2. Mesure et caractérisation des précipitations 57
7.3. Prospectives et projets à venir 59
Etude de l'invariance d'échelle des champs de pluie et de leurs microphysiques 59
Mise au point d'un nouveau capteur de pluie 61
8. CONCLUSION 67
9. ANNEXE 1 : ARTICLE EN COURS DE RE-SOUMISSION 69
10. ANNEXE 2 : CINQ ARTICLES 79

Articles fournis en annexe

1. L. BARTHES, C. MALLET, P. GOLE, Neural Network model for atmospheric attenuation retrieval between 20 and 50 GHz by means of dual beam radiometers, Radio Science , Vol. 38 n°5, 2003

2. J.-Y. Delahaye, L. Barthès, P. Golé, J. Lavergnat, J.P. Vinson, A dual beam spectropluviometer concept, Journal of Hydrology, 2006, vol. 328, issues 1-2, pp110-120, ISSN 0022-1694

3. L. Barthès, C. Mallet, O. Brisseau , A Neural network model for the separation of atmospheric effects on attenuation: application to frequency scaling, Radio Science, vol. 41, n°4, 2006

4. L. de Montera, C. Mallet, L. Barthès and P. Golé, Short-term prediction of rain attenuation level and volatility in Earth-to-Satellite links at EHF band. Nonlin. Processes in Geophys, 15, 631-643, 2008.

5. L. de Montera, L. Barthès, C. Mallet, and P. Golé, The effect of rain no-rain intermittency on the estimation of the Universal Multifractal model Parameters, J. of Hydrometeorology, 2009.

NOTICE

1. CURRICULUM VITAE

1.1. ETAT CIVIL

Laurent Barthès

Né le 04 mai 1964 à Paris

Vie maritale, deux enfants

Laboratoire d'accueil : Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS, ex CETP, UMR8190).

Adresse : 10-12 avenue de l'europe, 78140 VELIZY

Tél. : 01 39 25 47 79

Adresse électronique : laurent.barthes@latmos.ipsl.fr

1.2. FORMATION

1988 **Diplôme d'ingénieur** en automatique, électronique et informatique de l'Institut National des Sciences Appliquées, INSA TOULOUSE.

1989 **D.E.A.** d'automatique et traitement du signal des universités de PARIS VII-XI (Mention bien)

1993 **Doctorat d'électronique** de l'université de PARIS XI (Mention très honorable avec les félicitations du jury).

1.3. SITUATION PROFESSIONNELLE

1993-2006 **Maître de conférences** à l'IUT de Vélizy, département génie électrique et informatique industrielle (GEII), section 63 (électronique, optronique, systèmes).

1994-1998 **Recherche au CETP**, département EMI (Etude des Milieux Ionisés)

1998-2009 **Recherche au CETP,** département EMA (Electromagnétisme et Méthodes d'Analyse)

2006 **Maître de conférences** à l'université de Versailles Saint Quentin en Yvelines, département de physique, section 63

2009 **Recherche au LATMOS,** département SPACE (Statistique, Processus, Aérosols, Cycle de l'Eau).

2. DEROULEMENT DE CARRIERE

2.1. PREAMBULE

J'ai soutenu mon doctorat en 1993 au Laboratoire d'Etude des Transmission Ionosphériques (LETTI) de l'université d'ORSAY, et intégré l'IUT de Vélizy la même année suite à la création du département Génie électrique et informatique industrielle et à ma nomination en tant que maîtres de conférences. Mes travaux de recherche au Centre d'études des Environnements Terrestre et Planétaires (CETP) ont débuté en 1994. Après quatorze années passées à l'IUT, j'ai demandé et obtenu en 2006 une mutation à l'université de Versailles-Saint-Quentin en Yvelines. J'ai continué mes activités de recherche au sein du même laboratoire, devenu entre temps le LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales).

2.2. DEROULEMENT DE CARRIERE EN ENSEIGNEMENT

ENSEIGNEMENT A L'IUT DE VELIZY (1992-2006)

La totalité de mon enseignement statutaire a été effectué à l'IUT. Mon enseignement comportait deux volets : l'informatique industrielle et les systèmes numériques d'une part, l'électronique et la propagation des ondes d'autre part. Les IUTs sont des formations technologiques dans lesquelles l'enseignement pratique occupe une place importante. Ainsi, jusqu'en 2005 (12 ans), mon service comprenait environ 120 heures par an d'enseignement technologique (TP + travaux de réalisation), comptant pour 80 heures équivalent TD. Cet enseignement nécessite un investissement personnel important de préparation, de mise au point et de correction.

Ma nomination ayant fait suite à la création du département Génie Electrique et Informatique industrielle (GEII), j'ai participé à la mise en place de l'année 2, notamment en créant durant les deux premières années la totalité des travaux pratiques d'électronique, soit 22 TPs. Par la suite, j'ai partagé cette tâche avec Madame Gauthier jusqu'en 1997. Entre temps, je suis devenu responsable de l'enseignement de l'informatique industrielle, j'ai développé des cartes microprocesseurs et mis en place les travaux pratiques relatifs à cet enseignement. Pour cela, j'ai dû créer une douzaine de nouveaux TPs en systèmes temps réels et programmation de circuits programmables. Par la suite, j'ai partagé cette tâche avec Monsieur Vincent Hugel.

Parallèlement à ces activités, j'ai encadré de 1995 à 2005 de nombreux projets sur le thème de la robotique mobile. Il s'agissait d'utiliser les compétitions de robotique mobile pour motiver les étudiants autour d'un projet faisant appel aux savoirs enseignés à l'IUT. L'aspect ludique du projet associé à l'attrait de la compétition est un moteur puissant pour stimuler le travail des étudiants. La construction d'un robot mobile présente de mon point de vue un grand intérêt pédagogique car de nombreuses disciplines du domaine de l'EEA[1] sont abordées telles que l'électronique de puissance, l'optronique (capteur infrarouge), l'électronique petit signaux, le traitement du signal, l'informatique embarquée temps réel. Un autre aspect très positif pour les étudiants est la notion de

[1] *Electronique, Electrotechnique, Automatique*

gestion de projet. En effet, chaque binôme doit réaliser une partie du robot, il est alors primordial que chaque module soit en adéquation avec les autres parties (alimentation, encombrement sur la plate-forme, compatibilité des signaux, de la connectique, …). L'ensemble prend ainsi l'allure d'un petit projet industriel où les problèmes à résoudre s'apparentent à ceux auxquels les étudiants seront confrontés au cours de leur vie professionnelle. Ces projets, à l'origine en dehors des heures d'enseignement obligatoires, m'ont demandé un investissement personnel important tant du point de vue des heures passées avec les étudiants que du temps passé à rechercher des financements ou à l'organisation des séjours. J'espère qu'ils ont contribué à donner goût aux sciences à un certain nombre d'étudiants.

J'ai mis en place durant cette période les enseignements suivants :

- Cours et TD d'informatique industrielle (IUT GEII deuxième année): systèmes programmés, circuits numériques programmables (FPGA, CPLD). Production: deux polycopiés (80 et 30 pages), réalisation de maquettes à base de microprocesseur 68000, cartes d'extension PC.

- Travaux pratiques d'informatique industrielle (IUT GEII deuxième année): En tant qu'enseignant du cours d'informatique industrielle et des travaux dirigés, j'ai pris la responsabilité de ces travaux pratiques. Production: 12 nouveaux TP, responsabilité de cet enseignement jusqu'en 2005.

- Travaux pratiques d'électronique (IUT GEII deuxième année): Mise en place de maquettes de TP en électronique analogique, filtrage numérique, analyse spectrale. Production: création de 22 TPs et développement de nombreuses cartes électroniques.

- Cours, TD et TP d'hyperfréquence (IUT GEII deuxième année): mécanismes de base de la propagation en milieu ouvert (onde radio) et en milieu fermé (transmission sur une ligne). Production: d'un polycopié de 40 pages

- Projets tutorés, travaux de réalisation et concours de robotique mobile (IUT GEII deuxième année) avec comme objectif : mise en œuvre d'un projet technique industriel, réinvestir les savoir et savoir-faire du GEII pour satisfaire un cahier des charges, sensibiliser à la démarche systémique : approche fonctionnelle, opératoire, technologique d'un système, sensibilisation à la démarche qualité et à la gestion d'un projet. J'ai encadré et participé à 8 manifestations nationales et 5 manifestations internationales (Moscou, Lisbonne).

- Cours, TD et TP de télécommunication numérique (licence professionnelle AII): Il s'agissait d'aborder les principaux aspects liés à la transmission de données numériques. Production: un polycopié de cours de 36 pages, un TP de 8 heures.

- Cours, TD d'introduction aux réseaux informatiques, rédaction d'un polycopié de 27 pages.

J'ai toujours veillé à ce que mon enseignement comprenne à la fois des cours, des TD et des TP, il me semble en effet primordial d'imbriquer fortement ces enseignements afin d'assurer pour les étudiants une continuité dans l'acquisition des savoirs, de la compréhension des phénomènes et de la théorie, à la mise en œuvre.

Je me suis beaucoup investi dans l'animation et le développement du département GEII de l'IUT notamment par l'animation du projet robotique du département durant une dizaine d'année. Je suis intervenu en moyenne à plus de 60% dans le domaine de l'informatique industrielle (cours, TD et TP). Durant la période Septembre 1993 à juin 2006, et compte tenu du volume important d'heures en enseignement technologique en IUT, j'ai enseigné en moyenne 260 heures effectives par an devant les étudiants, auquel s'ajoutent les tâches habituelles comme les visites de stage en entreprise. Cet important volume horaire passé devant les étudiants rend difficile un travail de recherche soutenu. De plus, il n'est pas facile lorsque l'enseignement statutaire est effectué quasi exclusivement en premier cycle (et sur un site diffèrent de l'université) d'avoir des liens avec des étudiants 3ième cycle et opérer ainsi une passerelle avec la recherche, notamment pour le recrutement de stagiaires ou de doctorants. La volonté de renouveler mes enseignements, de diminuer significativement mon enseignement en informatique, et d'assurer un meilleur équilibre entre cours, TD et TP ont été les principales raisons de ma demande de mutation au département de physique de l'université de Versailles.

ENSEIGNEMENT A L'UNIVERSITE DE VERSAILLES (DEPUIS 2006)

J'interviens depuis septembre 2006 en master Réseaux de Radiocommunications avec les Mobiles (R2M), en cycle de prépa intégrée GEIPI (Groupement d'Ecoles d'Ingénieurs Publiques à Parcours Intégré) dans lequel se trouve l'ISTY, et en électronique L3 depuis septembre 2008. Mes enseignements sont les suivants:

- Cours, TD et TP de « Conception et systèmes » (Master Réseaux de Radiocommunications avec les Mobiles, R²M, UVSQ). Il s'agit d'étudier les systèmes d'accès multiples dans le cadre des systèmes cellulaires, notamment pour les systèmes 3G. Production: un polycopié de 50 pages, un TP de 8 heures.

- Cours, TD et TP de programmation en langage C++ (Master Réseaux de Radiocommunications avec les Mobiles, R²M, UVSQ). Concept de programmation orientée objet (POO). Production: Un polycopié de 38 pages, 3 TPs de 8 heures remis à jour.

- Cours, TP électronique (cycle préparatoire ISTY, UVSQ). Electronique des signaux et systèmes de deuxième année du programme national d'enseignement de la physique dans les classes préparatoires option physique et sciences de l'ingénieur (PSI). Production: un polycopié de 33 pages, 2 TPs de 9 heures et deux TPs de 4 heures.

- Cours, TD, TP électronique licence L3, reprise du cours de Mr Luc Chassagne, il s'agit de détailler un certain nombre de fonctions électroniques telles que l'amplification, le filtrage, la conversion analogique-numérique, la modulation. Production : remise à jour du cours et TD.

- Formation par la recherche :

  - Accueil d'étudiants en projet long, le travail proposé doit être en relation avec un sujet de recherche.

• L'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL) qui regroupe cinq laboratoires (dont le LATMOS) abrite des groupes de travail. Le groupe Neuratel a pour objectif de développer l'utilisation des méthodes neuronales en géophysique à l'attention des chercheurs et des doctorants. Dans le cadre des activités de ce groupe, j'ai été amené à présenter des études basées sur des méthodes neuronales aux doctorants et aux chercheurs de l'institut. Ce groupe fait maintenant partie du groupe de travail SAMA (Statistiques pour l'Analyse, la Modélisation et l'Assimilation) dans lequel j'interviens également.

Tableau récapitulatif des activités d'enseignement :

Enseignements	Volume annuel (heures)	Période	Formation, Lieu
Cours d'informatique industrielle	20	1993 – 2006	DUT GEII-2
Cours d'introduction aux réseaux informatiques	6	1994-1996	DUT GEII-2
Cours électronique des signaux et systèmes	27	2007	Cycle prépa UVSQ
Cours et TD d'hyperfréquence	15	2000-2006	DUT GEII-2
Cours et TD conception et systèmes	27	2003-2006	Master2, R2M, UVSQ
Cours et TD conception et systèmes	27	2007	Master2 R2M, UVSQ
Cours et TD electronique système Si234	15	2008-2009	L3, UVSQ
Cours et TD de C++	30	2006-2007	Master2 R2M, UVSQ
Cours et TD Télécommunication	22	2006-2007	Licence AII
Travaux dirigés d'informatique industrielle	120 80 40	1993-2003 2004-2005 2005-2006	DUT GEII-2
Travaux pratiques d'électronique	224	1992	DUT GEII-2
Travaux pratiques d'électronique	108	1993-1997	DUT GEII-2
Travaux pratiques d'électronique	15	2006, 2009	L3
Travaux pratiques d'informatique industrielle	44	1997-2005	DUT GEII-2
Travaux pratiques Télécommunications	8	2006	Licence AII
Travaux de réalisation	44	1998-2006	DUT GEII2, IUT Vélizy
TP C++	30	2006	Master2 R2M, UVSQ
TP électronique des signaux et systèmes	27	2007	Cycle prépa, UVSQ
Projets tutorés	Au moins l'équivalent de 50 heures /an (non comptabilisé)	1994-1997	DUT GEII-2
Travaux dirigés de traitement du signal	24	1998-1999	EPF, Sceaux
Travaux pratiques de traitement du signal	12	1994-1995	EPF, Sceaux
Cours et TD, systèmes informatiques temps réels	20	2003	ISTY, Mantes

RESPONSABILITES ADMINISTRATIVES EN ENSEIGNEMENT

- Membre de la commission de spécialiste sections 61-63 de l'Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines, 1998-2008.
- Directeur des études en deuxième année IUT GEII (1999-2001).
- Membre du Conseil d'administration de l'IUT de VELIZY, 2001-2004.
- Commission de recrutement PRAG, IUT Vélizy dép. R&T
- Organisation de plusieurs séjours étudiants en France et à l'étranger dans le cadre de concours de robotique mobile : France (8 séjours), Moscou (3 séjours), Portugal (2 séjours).
- Membre au conseil de département GEII 1998-2004.
- Commission de validation des acquis de l'expérience (VAE), UVSQ en licence et master.
- Commission validation des équivalences
- Membre de l'équipe pédagogique du Master Réseaux de Radiocommunication avec les Mobiles).

2.3. DEROULEMENT DE CARRIERE EN RECHERCHE

CONTRATS DE RECHERCHE, APPEL D'OFFRES ET CAMPAGNES DE MESURE (DEPUIS 1998)

Mes travaux de recherche s'intègrent dans divers contrats de recherche et campagnes de mesure. J'ai eu notamment la responsabilité scientifique de plusieurs instruments (radiomètres micro ondes sol, spectropluviomètres) et la responsabilité de ces instruments au cours de diverses campagnes nationales et internationales (CONSTELLATION, DEVEX, VAPIC 1 & 2, AMMA). Au total, je suis intervenu dans seize projets dont onze avec des responsabilités directes :

1 - (1998-2001) Projet CONSTELLATION de satellites, financé par le Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Projet labellisé par le RNRT (Réseau National de Recherche en Télécommunication). Mon travail de recherche se rattachait à la thématique propagation. J'ai été le responsable scientifique pour la partie CETP. A ce titre j'ai obtenu une dotation de 250 KF. L'objectif était d'estimer le gain de diversité de pointage vers une constellation de satellites à basse ou moyenne altitude à partir de radiomètres sols.

2 - (1999) Système d'acquisition et modélisation de données météorologiques utiles aux prévisions des conditions de propagation de signaux hertziens, contrat CTI-CNET Belfort, responsable CETP J. Lavergnat. J'ai développé une méthode de détection optimale et d'estimation de gouttes de pluie pour un spectropluviomètre optique bi-faisceaux

3 - (1999) Contrat de licence exclusive "spectropluviomètre bi-faisceaux" de brevet et de savoir faire entre le CNRS et la société CIMEL, n° L98049 signé le 7 janvier 1999 (responsable de la partie traitement en 2000, responsable de l'ensemble à partir de 2006).

4 - (1999-2001) Contrat DGA, intitulée : « Expérimentations de Propagation en EHF avec le satellite STENTOR ». Montant 50 k€/ an. Responsable CETP Jacques Lavergnat. Marché 98-42-541. Participation active au groupe international EXPRESS (EXperimentation of PRopagation in the EHF-band from the Satellite Stentor): définition des cahiers des charges, mission d'expertise auprès de la DGA.

5 - (2001-2002) Contrat CELAR intitulée : « Prestations pour le soutien au groupe de travail EXPRESS » Marché 01-42-521 lancé en 2001. Responsable Jacques Lavergnat. Une tranche ferme de durée 1 an (35 k€), et 2 tranches conditionnelles de durée 1 an chacune. Les deux tranches conditionnelles (39 k€ chacune) n'ont jamais été effectives (échec du lancement du satellite STENTOR, vol 157 ESCA Ariane 5).

6 - (2000-2002) Participation au projet européen CLIWANET soutenu par la Commission Européenne dont l'intitulé était "*BALTEX Cloud Liquid Water Network* ", Responsable CETP Cécile Mallet. Traitement de données radiométriques issues des radiomètres DRAKKAR et RESCOM.

7 - (2002) Expérience DEVEX (Disdrometer EValuation EXperiment), IOWA city 05/2002 au 09/2002, responsable CETP Laurent Barthés. Campagne d'intercomparaison de disdromètres de différents types en collaboration avec IIHR–Hydroscience & Engineering University of Iowa City (USA), University of Ferrara (Italy), Department of Civil and Environmental Engineering University of Connecticut (USA), Laboratoire d'Étude des Transferts en Hydrologie et Environnement, Grenoble (France).

8. (2004) Amélioration des capacités instrumentales au SIRTA : un soutient de 5k€ m'a été accordé dans le cadre d'un appel d'offre de l'IPSL pour la valorisation du spectropluviomètre bi faisceaux installé sur le site expérimental du SIRTA.

9 - (2004) Expérience VAPIC. Campagne d'inter comparaison de mesures de la vapeur d'eau atmosphérique à partir d'instruments de télédétection au sol et embarqués sur satellite. Cette campagne regroupait des instruments de six instituts et laboratoires de recherche : CETP, IGN, LMD, LOA, Météo France, Service d'Aéronomie. Responsable du radiomètre micro-onde RESCOM et du spectropluviomètre bi-faisceau. L'ensemble du projet a été soutenu par le PNTS (Programme National en Télédétection Spatiale) à hauteur de 20 k€.

10 - (2005) Expérience VAPIC 2 (Soutenue également par le PNTS)

11 - (2005) Mise au point des instruments pour la mesure de la variabilité spatiale et temporelle des précipitations dans le cadre de la préparation au projet AMMA, BQR 2005, responsable des crédits BQR Cécile Mallet, 10 k€.

12 - (2005) Projet européen AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine). Etude de la mousson africaine soutenue par la Commission Européenne. Resposable de la campagne de mesure des distributions des tailles de gouttes de pluie au Sénégal (DAKAR) durant la saison des moussons. Organisation de la campagne de mesure, installation du matériel et formation du personnel sur place.

13 - (2006-2007) Projet européen AMMA soutenu par la Commission Européenne (**15 k€)**, J'ai été responsable des deux spectropluviomètres lors des campagnes de mesures au Bénin en 2006 et 2007. Installation et participation à la campagne. Objectif : Mesure de la variabilité spatiale et temporelle de la microphysique des précipitations en période de mousson.

14 - (2006-2007) Responsable d'un contrat de recherche CELAR/DGA, n°0642207 (tranche ferme), Modélisation du canal Terre – satellite en bande EHT, durée 15 mois, 87k€.

15 - (2008-2009) Responsable d'un contrat de recherche CELAR/DGA, n°0642207 (tranche conditionnelle), Modélisation du canal Terre – satellite en bande EHT, durée 12 mois, 63k€.

16 - (2008-2009) Analyse multifractale de série temporelles 1D et 2D : application à la modélisation statistique des champs de pluie, financement BQR 2008 de l'Université de Versailles Saint Quentin (8,65 k€).

ACTIVITES D'ENCADREMENT ET D'ANIMATION (DEPUIS 2002)

J'ai encadré trois doctorants en co-direction (50%), et durant 4 mois j'ai encadré une doctorante italienne invitée, Mlle Clelia Caracciolo. Chaque année je forme à la recherche en moyenne deux étudiants de 3eme cycle par l'intermédiaire de stages (master ou ingénieur). J'interviens activement dans l'encadrement des projets longs de recherche pour les étudiants de 3eme cycle du master TRIED (Traitement de l'Information et Exploitation des Données) à raisons de deux étudiants en moyenne par an (14 étudiants pour la période 2002 - 2009). Ces projets se déroulent, pour l'essentiel, au sein des différents laboratoires de l'IPSL et permettent aux étudiants de mettre en œuvre les outils et les méthodes enseignées à l'université, en travaillant avec des chercheurs sur des problèmes concrets de traitement des données. Par ailleurs en tant qu'ancien enseignant en IUT génie électrique, j'ai proposé et encadré une dizaine d'étudiants d'IUT en stage de fin d'étude. Ces stages se sont déroulés en relation avec l'équipe du département ITS (Instrumentation Terrestre et Spatiale) du laboratoire et permettent ainsi de faire découvrir aux étudiants le fonctionnement d'équipes développant des instruments de pointe dans le domaine de la télédétection.

- **ENCADREMENT DE THESES**

(2003) Clelia Caracciolo, Doctorante invitée de l'université de Ferrara, Italie (4 mois): Reconsideration of the analysis methods and measuring instruments for the raindrops size distributions investigations, thèse soutenue en février 2004.

(2001 – 2005) Mr. Olivier Brisseau : Développement de modèles de similitude en fréquence pour les liaisons terre-espace en EHF, école doctorale MATISSE, université de Rennes 1, spécialité traitement du signal et télécommunications. Financement DGA.

(2006 – 2008) Mr. de Montera Louis : Etude de la variabilité micro-échelle des précipitations: Application à la propagation des ondes millimétriques en SATCOM, soutenue le 01/12/08, école doctorale n°440, Matière, Milieux réactifs et Méthodes de la

Modélisation (M2RM2) de l'université de Versailles Saint Quentin. Financement contrat DGA.

(2008 -) Mr. Verrier Sébastien : Modélisation multifractale des champs de pluie, École Doctorale des Sciences de l'Environnement d'Ile de France (ED N129). Financement bourse ministérielle.

- **ENCADREMENT DE STAGES**

J'ai participé depuis 2002 à l'encadrement (à 50% ou 100%) de 15 stagiaires de niveau Master ou ingénieur (dont 7 pour l'obtention d'un M2 recherche), de 6 stagiaires de L3 SPI et d'une dizaine de stage en IUT option génie électrique, ainsi qu'un encadrement de 14 projets longs en M2 TRIED:

- **Master ou ingénieur**

(2002) Mlle Durcos Sabrina, stage DEA télécom + ingénieur ENST: Statistiques d'atténuation en bande Ka et Q.

(2002) Mr. Wolyniec David, stage DESS TRIED, Elaboration d'un algorithme neuronal de caractérisation des gouttes de pluie pour un spectropluviomètre.

(2002-2003) Mr. Pierre Courtois, stage ingénieur + CDD (6 mois): Estimation des affaiblissements d'une liaison Terre – satellite en bande Ka à l'aide d'un modèle neuronal

(2003) Aymeric Chazottes, stage DEA méthode physique en télédétection université de Versailles et Paris 6+ CDD, Etude de l'inhomogénéité spatio-temporelle de la pluie

(2004) Ibnouzahir Youssef stage DEA statistique UPMC, génération de champs de pluie 2D à l'aide d'une méthode de stéréologie.

(2004) Mr. Adil El Gazzouzi, stage DESS TRIED , Développement d'algorithmes statistiques pour l'étude du cycle de l'eau au moyen de Radiomètre terrestre

(2005) Eugène Gning, Ingénieur électronique université Dakar (UCAD) encadrement de la campagne de mesure 2005 de la distribution des tailles de gouttes de pluie à Dakar

(2005) Mr. M'Hand KEDJAR, master SPI Versailles, Analyse statistiques des précipitations à partir d'un spectropluviomètre

(2005) Mr. Diogo Barry, master 1 , sciences et technologies UPMC, Pré-traitement et analyse de données d'affaiblissement d'une liaison Terre satellite

(2006) Mr. Zakaria Darfaoui, Master 2 recherche électronique et systèmes de communication, UPMC Etude de la microphysique de la pluie à l'aide d'un spectropluviomètre.

(2006) Mr. Foudil benkerrou, Master 2 recherche TRIED UVSQ, Méthodes de prévisions de séries temporelles d'affaiblissement en bande Ka.

(2007) Mr. Slim Karkar Master 2 recherche TRIED UVSQ, Prédiction de séries temporelles d'affaiblissement, méthodes neuronales.

(2008) Mr. Sébastien Verrier, Ingénieur SUPELEC, stage de fin d'études et équivalence M2 recherche.

(2008) Mr. Houssem Bentemime, Master 1 physique puis CDD 1 mois, traitement de données de la campagne de mesure EHF SYRACUSE 3.

(2009) Mr. Amarouche, Master 2 pro R2M UVSQ (4 mois), Analyse de données d'affaiblissement en bande Ku pour l'estimation des précipitations.

- **Projets longs Master TRIED de l'université de Versailles-Saint-Quentin en Yvelines**

14 étudiants

- **Stage de premier cycle**

(1996-2006) >10 Stages de deuxième année IUT GEII.

(2007-2009) 6 stagiaires de licence (L3 SPI).

3. PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES

3.1. REVUES INTERNATIONALES A COMITE DE LECTURE

[1] L. Barthès, R Andre, JC Cerisier, JP Villain, Separation of multiple echoes using a high-resolution spectral analysis for SuperDARN HF radars, Radio Science, vol. 33, n°4, July/August 1998.

[2] R. André, J.P. Villain, C. Senior, L. Barthès, C. Hanuise, J.C. Cerisier, A. Thorolfsson, Toward resolving small-scale structures in ionospheric convecting from SuperDARN, Radio Science, vol. 34, n°5, Sept/Oct. 1999, pp. 1165-1176.

[3] K. Hocke, A.G. Pavelyev, O.I. Yakovlev, L. Barthès, N. Jakowski, Radio occultation data analysis by the radioholographic method, Journal of Atmospheric And Solar-Terrestrial Physics 61 (1999) pp. 1169-1177.

[4] B. Denby, J.-C. Prévotet, P. Gardal, B. Granado, L. Barthes, P. Golé, J.Y. Delahaye, Combining signal processing and machine learning techniques for realtime measurement of raindrops, *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. 50, No. 6, 1717-1724, December, 2001.

[5] L. Barthès, C. Mallet, P. Golé, Neural Network model for atmospheric attenuation retrieval between 20 and 50 GHz by means of dual frequency microwave radiometers, Radio Science, 2003, vol.38 n°5.

[6] J.-Y. Delahaye, L. Barthès, P. Golé, J. Lavergnat, J.P. Vinson, a dual beam spectropluviometer concept, Journal of Hydrology, 2006, vol. 328, issues 1-2, pp110-120, ISSN 0022-1694.

[7] Haeffelin, M., L. Barthès, O. Bock, C. Boitel, S. Bony, D. Bouniol, H. Chepfer, M. Chiriaco, J. Cuesta, J. Delanoë, SIRTA, a ground-based atmospheric observatory for cloud and aerosol research." Annales Geophysicae (2005), 23, pp 253-275.

[8] W.F. Krajewski, A. Kruger, C. Caracciolo, P. Golé, L. Barthes, J.-D. Creutin, J.-Y. Delahaye, E.I. Nikolopoulos, F. Ogden, J.-P. Vinson, DEVEX-Disdrometer Evaluation Experiment: Basic results and implications for hydrologic studies, *Advances in Water Resources*, 29, 311-325, 2006.

[9] L. Barthès, 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, 2006.

[10] O. Brisseau, C. Mallet, L. Barthes, Frequency Scaling of rain attenuation based on microphysical characteristics for SatCom link, IEE Proc. Microwaves, Antennas & Propagation,vol 153, Issue 6, p 523-532, 2006.

[11] C. Mallet, L. Barthès, A. Chazottes and P. Golé, Simulation of rain attenuation time series, Space Communications, vol. 20, numbers 1&2, pp.61-68, 2006, IOS Press.

[12] De Montera Louis, C. Mallet, L. Barthès and P. Golé, 2008 "Short-term prediction of rain attenuation level and volatility in Earth-to-Satellite links at EHF band. Nonlin. Processes in Geophys, 15, 631-643.

[13] L. de Montera, L. Barthès, C. Mallet, and P. Golé : "The effect of rain no-rain intermittency on the estimation of the Universal Multifractal model Parameters", J. of Hydrometeorology, 10(2), pp. 493–506, 2009

[14] Mallet C., L. Barthés L., Estimation of Gamma Raindrop Size Distribution Parameters: Statistical Fluctuations and Estimation Errors, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology (American Meteorological Society), vol. 26, pp. 1572-1584, 2009.

[15] H AL-Sakka, A. Weill, C. Le Gac, R. Ney, L. Chardenal, J.P. Vinson, L. Barthès, E. Dupont., CURIE: a low power X-band, low atmospheric Boundary Layer Doppler radar. 2009, Meteorologische Zeitscherift, vol.18, No. 3, 001-010.

[16] L. de Montera, L. Barthès, C. Mallet, P. Golé and T. Marsault, Assessment of rain fade mitigation techniques at EHF band with Syracuse3 20/44 GHz low elevation link, Comptes-rendus Physiques de l'Académie des sciences, in press.

[17] S. Verrier, L. de Montera, C. Mallet, L. Barthès, Multifractal analysis of African monsoon rain fields, taking into account the zero rain rates problem, J. of Hydrology, Hydrol8798, soumis en juillet 2009, en cours de révisions modérées.

Soumis

[18] L. de Montera, S. Verrier, C. Mallet, L. Barthès, passive scalar-like model for rain applicable up to storm scale, Atmospheric research, janvier 2010.

En cours de soumission

[19] L. Barthes, C. Mallet, Vertical evolution of rain drop size distribution: impact on the shape of the DSD.

3.2. CONFÉRENCES INTERNATIONALES

[20] J. Mokrzycki, L. Barthes, J. Caratori, C. Goutelard, New method of modelling the mesoscale structure of the ionosphere with a single sensor. Impact on H.F. radio-location. Congrès AGARD, Londres, 1-5 juin 1992. Paper AGARD conference proceedings 528, pp. 5-1, 5-13.

[21] C. Goutelard, J. Caratori, L. Barthès, Comportement temporel et spatial des trajets multiples dans les propagations ionosphériques en incidence oblique. Mesure fractale des perturbations., Electromagnetic Wave Propagation Panel Symposium, Rotterdam, 4-7 octobre 1993, AGARD conference proceedings 543 Multiple Mechanism Propagation Paths, pp.34.1-34.16.

[22] C. Goutelard, J. Caratori, L. Barthès, STUDIO : Monostatic backscatter sounder father of NOSTRADAMUS french O.T.H. radar project. New results., IEEE International Conference on Acoustics, Speech & Signal Processing (ICASSP), vol. 4 S (Statistical Signal & Array Processing), 19-22 april 1994, Australia.

[23] J.Y., Delahaye, L. Barthes, P. Golé, J. Lavergnat and J.P. Vinson, The new Dual-Beam Spectropluviometer Concept, European Geophysical Society (EGS), XXVII General Assembly, HSA4.01, 2002EGSGA..27.1874D Nice, France, April, 2002

[24] P. Golé, C. Caracciolo, J.Y. Delahaye, L. Barthes, Preliminary comparison results of four different types of disdrometer in the DEVEX experiments, European Geophysical Society, EGS-AGU-EUG Joint Assembly , oral session HS13-1FR2O-002 & vol. 5, 10509, Nice 6-11 avril 2003.

[25] O. Brisseau, L. Barthès, C. Mallet, Effect of microphysical characteristics of rain on frequency scaling in microwave band, IGARSS (International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Proceedings of the IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 4121- 4125 vol.7, 21-25 juillet 2003, Toulouse.

[26] C. Mallet, L. Barthès, A. Chazottes, P.Golé, Simulation of rain attenuation time series, propagation workshop, CNES, 13-15 october 2004.

[27] O. Brisseau, C. Mallet, L. Barthès, T. Marsault, A rain frequency scaling model using the normalized DSD concept, European Conference on Propagation and Systems (ECPS'05), 15-18 mars 2005, Brest.

[28] C. Mallet, L. Barthès, T. Marsault, Validation of a neural network model for the separation of atmospheric effects on attenuation, proceeding of EUCAP 2006, Nice 6-10 nov.

[29] L. de Montera, C. Mallet, L. Barthès : " Short-term prediction of rain attenuation using financial time series models", Proceed. of the Int. Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Niigata, Japan, August 2007.

[30] T. Marsault, L. de Montera, J.D. Hermant, J.C. Penn, L. Barthes, C. Mallet, 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.

[31] L. de Montera, C. Mallet, L. Barthès : "Multifractal properties of rain at high resolution derived from Earth-to-satellite links fading", Ninth International. Precipitation Conf.(IPC09), Marne la vallée, Nov. 2007.

[32] S. Verrier, L. de Montera, L. Barthes, C. Mallet, Multi-scale Analysis of Radar Reflectivity Maps, American Geophysical Union (AGU), 17-20 Nov. 2008, San Francisco, USA.

[33] T. Marsault, L. De Montera, J.D. Hermant, C. Mallet, L. Barthes, P. Gole, Statistical analysis of the Syracuse 3 satellite EHF propagation experiment, proceed. of the European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Dublin, 2009.

[34] L. De Montera, L. Barthes, P. Gole, T. Marsault, C. Mallet, Short-term prediction of atmospheric attenuation in Q band from ka-band measurements on Earth-to-Satellite links, Proceed. of the European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Dublin, 2009.

[35] L. de Montera, S. Verrier, L. Barthes, and C. Mallet, Rain rate time series as an integrated multiplicative process, EGU, 19-24 avril 2009, Vienne, Autriche.

3.3. WORKSHOP, GDR

[36] C. Goutelard, J. Caratori, L. Barthès, Recent ionospheric studies done with the new concep backscatter sounder : STUDIO., Second South Pacific Step Workshop, University of Newcastle, Australie, 5-9 july 1993.

[37] L. Barthès, Use of the MUSIC method to fit ACFS with multi-source, SuperDARN workshop, Cambridge, may 1995.

[38] L. Barthès, Analyse spectrale haute résolution appliquée à l'analyse du décalage Doppler des signaux de rétrodiffusion, , GdR PLASMAE, Tournon, avril 1995.

[39] L. Barthès, Séparation d'échos par analyse spectrale haute résolution : application aux radars de la chaîne SuperDARN. Poster, GdR PLASMAE, chantilly, 2-5 décembre 1996.

[40] L. Barthès, R. André, J.C. Cerisier, High resolution spectral analysis for SuperDARN, SuperDARN workshop, Afrique du Sud, 12-14 mai 1997.

[41] R. André, J.P. Villain, L. Barthès, A. Thorolfsson, J.C. Hanuise, A high resolution merging algorithm designed to study small scale structures in the ionospheric convection, SuperDARN workshop, Afrique du Sud, 12-14 mai 1997.

[42] L. Barthès et al, Diversité au moyen de radiomètres commandés (DIRAC), Atelier CNES 2000, décembre 2000, Toulouse.

[43] L. Barthès, P. Golé, J. Lavergnat, T. Marsault, a coordinated approach of microwave propagation in an equatorial climate, CEPIT-EXPRESS meeting, Baveno (Italie), 2002.

[44] J. Lavergnat, P. Golé, L. Barthés, EXPRESS: EXperiment of PRopagation in the EHF band with Stentor Satellite, Setting-up of the EXPRESS workgroup, EXPRESS 2nd MEETING, September 25th, Rennes, septembre 2002.

[45] L. de Montera, C. Mallet, L. barthès, The effect of the on-off intermittency on rain multifractal parameters, conference on Statistical modeling of extremes in data assimilation and filtering approaches, IRMA Université Louis Pasteur, Strasbourg, 23-26 Juin 2008.

3.4. REVUES NATIONALES & NOTES

[46] Barthes L., C. Mallet, A M.L.P. model to measure attenuation in Ka and Q band by means of ground based microwave radiometers, Notes des Activités Instrumentales de l'IPSL (NAI), n°29, 01/2003, ISSN 1626-8334.

3.5. CONFERENCES NATIONALES (AVEC ACTES)

[47] L. Barthes, C. Mallet, P. Golé, J. Lavergnat and J.Y. Delahaye, Etude statistique de l'atténuation dans la bande 20 - 50 GHz au moyen de radiomètres : application à la diversité de pointage et à l'étalonnage de l'expérience EXPRESS, in Proc 'Fourth Journees d'etudes on Propgation. Electromagnetique dans L'atmosphere du Decametrique a. L'angstrom', Rennes University, France, March 2002.

[48] De Montera L., L. Barthes, C. Mallet, T. Marsault, J.D. Hermant, Performance des Modèles de Similitude et de Prédiction Appliqués aux Affaiblissements Atmosphériques Mesurés en bande EHF, colloque Propagation et télédétection, URSI, 24-25 mars 2009, Paris

[49] Verrier S., L. de Montera, C. Mallet, L. Barthès, Multifractalité et non stationnarité du phénomène précipitant: applications aux fonctions de répartition et à la modélisation des événements extrêmes, colloque Propagation et télédétection, URSI, 24-25 mars 2009, Paris.

[50] Louis de Montera, Sébastien Verrier, Cécile Mallet, Laurent Barthès, Pluie, fractales et turbulence, Modélisation spatio-temporelle multifractale des structures précipitantes. TRANS-ERI-COD'2009, Avignon, juin 2009

3.6. CONFERENCES NATIONALES (SANS ACTES)

[51] L. Barthes, C. Mallet, L. De Montera, S. Verrier, Mesure des précipitations micro échelle au moyen de satellites géostationnaires, colloque CNFG2 : L'eau dans tous ses états, visions spatiales, 17-19 Novembre 2008, UNESCO.

3.7. SEMINAIRES

[52] L. Barthès, détection et estimation des caractéristiques des gouttes de pluie à l'aide d'un réseau de neurones, journée Neuratel, Mars 2001 (oral), IPSL, Paris.

[53] L. Barthès, C. Mallet, Restitution de l'affaiblissement atmosphérique dans la bande 20 - 50 GHz au moyen de radiométres terrestres, journée Neuratel, juin 2003 (oral), IPSL, Paris.

[54] Louis de Montera, Cécile Mallet, Laurent Barthès, Perter Golé, Rain, Universal multifractal parameters revisited using Dual-Beam Spectropluviometer measurements, Statistical modeling of extremes in data assimilation and filtering approaches, IRMA, Strasbourg,23-26 juin 2008.

[55] Louis de Montera, Cécile Mallet, Laurent Barthès, Prédiction multi-step de la volatilité: le modèle ARIMA-GARCH appliqué aux séries temporelles d'affaiblissement par la pluie sur les liaisons Terre-Satellite, - Extreme Values Reading Group meeting, SAMA (Statistiques pour l'Analyse, la Modélisation et l'Assimilation), IPSL, Paris, mars 2008.

3.8. RAPPORTS

[56] L. Barthès, Modélisation de l'ionosphère en vue de l'application aux radars transhorizon, rapport final, contrat DRET n°90 34 147 00 470 75 01, 1992.

[57] L. Barthès, J-Y. Delahaye, B. Denby, P. Golé, J. Lavergnat, J-P. Vinson, Acquisition et modélisation de données météorologiques utiles aux prévisions des conditions des conditions de propagation de signaux hertziens. CTI-CNET Belfort, Décembre 1998.

[58] L. Barthès, J.Y. Delahaye, P. Golé, Projet RNRT CONSTELLATIONS de satellites, rapports projet RNRT – Convention 1- Influence de la propagation. Diversité au moyen de RAdiomètres Commandés, juin 2000 & décembre 2001.

[59] Rapport final tranche ferme contrat de recherche DGA/CELAR 06 42 207, janvier 2008.

[60] Rapport final tranche conditionnelle contrat de recherche DGA/CELAR 06 42 207, janvier 2009.

BILAN SCIENTIFIQUE

Activités de recherche

4. ACTIVITES DE RECHERCHE PASSEES (PERIODE 1993 – 1998)

J'ai débuté mes travaux de recherche au LETTI (Laboratoire d'ETudes des Transmissions Ionosphériques, université Paris Sud) dans lequel j'ai effectué ma thèse. Ces travaux m'ont conduit à étudier l'ionosphère du point de vue canal de transmission. En 1994, suite à ma nomination en tant que maître de conférences à l'IUT de Vélizy j'ai intégré le CETP au département EMI (Etude des Milieux Ionisés). Les connaissances acquises sur l'ionosphère durant mon doctorat m'ont conduit vers ce département, et plus particulièrement dans le groupe des radars H.F. du réseau SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network). Mon thème de recherche se rattachait à l'étude de la convection du plasma ionosphérique et plus particulièrement aux problèmes liés à la mesure de la vitesse du plasma au sein d'une cellule radar. Durant cette première période, j'ai publié un article dans la revue Radio Science [Barthes, 1998], et un autre en tant que co-auteur [André, 1999]. J'ai également encadré plusieurs stages.

L'équipe SuperDARN du CETP est largement constituée de spécialistes du plasma dont les préoccupations sont relativement éloignées des thèmes de ma section. Aussi, pour être plus en adéquation avec mon domaine, j'ai intégré en 1998 le département EMA (Electromagnétisme et Méthodes d'Analyse) du CETP.

5. TRAVAUX DE RECHERCHE DEPUIS 1998

5.1. CONTEXTE GENERAL

Le thème général de recherche du département EMA était l'étude des interactions entre les ondes électromagnétiques et la matière (troposphère, surface terrestre, eau, …), ainsi que les méthodes statistiques de traitement et d'analyse des données. A mon arrivée je me suis intégré dans l'équipe de Jacques Lavergnat. En raison des liens étroits qui ont unis le CRPE (ex CETP) et le CNET[1] durant de nombreuses années, les thèmes de recherche de cette équipe concernaient plus particulièrement la propagation des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère appliquée aux télécommunications. Pour cette raison, mes premiers

[1] *Centre National d'Etudes des Télécommunications*

travaux de recherche sont directement liés à la thématique « propagation atmosphérique pour les télécommunications ». Bien que mes travaux actuels au sein du département SPACE[2] du LATMOS comportent toujours un volet « propagation pour les télécommunications », ils s'intègrent dans une thématique plus large de l'interaction des ondes avec l'atmosphère. Les études menées nécessitent une approche pluridisciplinaire faisant intervenir la propagation des ondes, la description et la modélisation statistique du milieu, l'interaction de l'onde avec le milieu.

Les travaux réalisés au travers d'un certain nombre de contrats sont principalement destinés à l'amélioration ou au développement de systèmes de télécommunications dans la bande 20-50 GHz. La pluie est le principal phénomène perturbateur du point de vue de la propagation atmosphérique à ces fréquences. Elle est donc l'élément central de mes travaux. Mon travail repose sur une démarche à quatre volets: (i) la mesure des précipitations, (ii) la modélisation à partir des mesures, (iii) l'utilisation des modèles précédents pour l'étude de l'interaction onde-précipitation, (iv) les retombées éventuelles, notamment dans le domaine des télécommunications.

Au-delà du domaine des télécommunications, mes travaux sur la modélisation des précipitations s'intègrent dans une thématique plus géophysique concernant les précipitations à petite échelle. A terme, ils pourraient contribuer à l'analyse et à l'inversion de données de télédétection hyperfréquence en vue d'estimer des paramètres géophysiques liés à l'atmosphère.

La plupart des études s'appuient sur des validations expérimentales, j'ai donc été conduit à consacrer du temps au développement d'instruments (spectropluviomètre bi-faisceaux), ou à l'amélioration d'instruments existants (radiomètres micro-ondes), ainsi qu'à la participation ou au pilotage de plusieurs campagnes de mesures nationales ou internationales. Il me parait en effet très important de rester proche « du capteur » afin de maîtriser au mieux les conditions expérimentales, minimisant ainsi les erreurs d'interprétation dues à des artefacts de mesure.

5.2. INTERACTION ONDE – ATMOSPHERE DANS LA BANDE 10-50 GHZ

PROBLEMATIQUE

La troposphère qui est la partie inférieure de l'atmosphère (jusqu'à 15 km environ) contient la majeure partie de l'air ainsi que la quasi totalité de l'eau. D'un point de vue de la propagation électromagnétique dans le domaine des micro-ondes, seule cette couche a une influence notable. Les autres couches comme l'ionosphère, dont l'effet sur la propagation est prépondérant à des fréquences plus basses (liaisons transhorizons en HF par exemple), interagissent relativement peu dans la bande de fréquence considérée (10-50 GHz).

La présence d'oxygène, de vapeur d'eau et d'hydrométéores (eau sous forme liquide ou glace) dans la troposphère va entraîner des phénomènes d'absorption et de diffusion. Ces phénomènes sont à l'origine de la dégradation des bilans de liaison pour les systèmes de

[2] *Le département SPACE résulte de la fusion de certaines équipes du CETP et du Service d'Aéronomie au sein d'un nouveau laboratoire : le LATMOS. Les principales thématiques de ce département sont l'observation et la modélisation de l'atmosphère.*

télécommunication appelés à utiliser ces bandes de fréquences. A contrario dans le domaine de la télédétection l'interaction de l'onde avec le milieu va permettre de caractériser ce dernier.

Les molécules d'oxygène et de vapeur d'eau présentes dans la basse atmosphère entraînent des phénomènes d'absorption qui se traduisent par un réchauffement du milieu par effet Joule. Cette perte d'énergie est fortement dépendante de la fréquence et de la concentration respective des molécules d'oxygène et de vapeur d'eau. La variabilité spatio-temporelle de ces deux constituants est extrêmement différente, on peut considérer que la concentration en oxygène dans l'atmosphère est pratiquement constante (21%) se traduisant par une contribution relativement stable de ce gaz à la fois dans le temps et dans l'espace, alors que la concentration en vapeur d'eau est très variable tant du point de vue spatial que temporel. On rencontre des zones géographiques extrêmement sèches où des taux d'humidité relative de 1,7% ont été relevés (zones désertiques), alors qu'en milieu tropical ou au dessus des mers on rencontre fréquemment des taux d'humidité de 100%. De plus, les phénomènes météorologiques vont jouer un rôle prépondérant tant sur la concentration en vapeur d'eau que sur sa variabilité (présence de masses d'air chargées d'humidité, de nuages, de pluie). Du point de vue de l'interaction avec l'onde électromagnétique, l'absorption apportée par les gaz sur l'ensemble de la colonne atmosphérique reste relativement modeste dans la bande de fréquence qui nous intéresse (10 – 50 GHz) excepté aux alentours de la raie d'absorption de la vapeur d'eau (22 GHz) et des raies d'absorption de l'oxygène situées entre 50 et 70 GHz. En télédétection passive (radiométrie) ces bandes de fréquence, très sensibles à la présence de ces composés, sont au contraire utilisées pour estimer les contenus en vapeur d'eau et la température physique du milieu.

Les hydrométéores interagissent eux aussi avec les ondes électromagnétiques. La nature de l'interaction dépend d'une part du rapport entre la taille de l'hydrométéore et la longueur d'onde, et d'autre part de son indice de réfraction. Ce dernier dépend fortement de l'état, phase liquide ou glace dans lequel il se trouve. Lorsqu'il est en phase glacée il interagit relativement peu avec l'onde du point de vue de l'affaiblissement car la partie imaginaire de son indice de réfraction est très faible. Par contre, en raison des formes généralement non sphériques des cristaux de glace (bâtonnets par exemple) ceux-ci peuvent induire une rotation plus ou moins importante du plan de polarisation de l'onde. Au contraire, en phase liquide, la partie imaginaire de l'indice de réfraction étant de deux à trois ordres de grandeur supérieure par rapport à la phase glacée on ne peut plus négliger l'importance des phénomènes d'absorption / diffusion, et l'affaiblissement qui en découle.

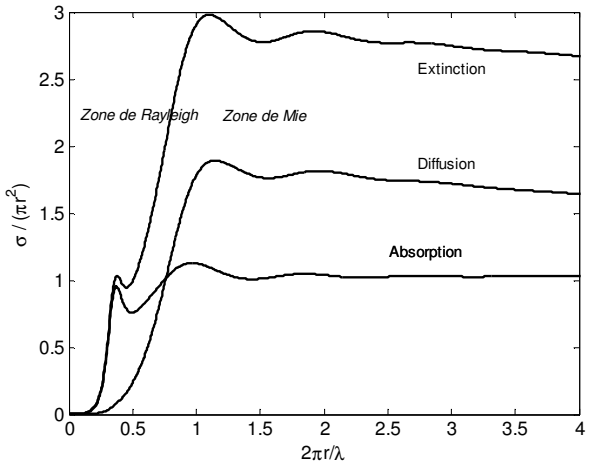


Figure 1 : Rapport des surfaces σ d'absorption/diffusion/extension avec la surface d'une goutte d'eau sphérique en fonction de la longueur électrique équivalente pour une température de 20°C en diffusion avant.

On distingue différentes situations météorologiques suivant le rayon (équivalent) r des gouttes considérées. Ainsi les nuages non précipitants sont constitués de minuscules gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace (<100 microns) dus à la condensation obtenue par la détente de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère autour de minuscules noyaux (cristaux de sel marin, pollens, poussières, …). Le brouillard est lui aussi constitué de minuscules gouttelettes d'eau liquide en suspension dans l'air à proximité du sol, et dont le diamètre peut aller jusqu'à 0,06 mm environ. Lorsque les particules d'eau sont de taille plus importante, leur vitesse de chute n'est plus compensée par les courants ascendants, c'est la pluie. La pluie fine (bruine) est constituée de gouttes dont le diamètre est inférieur à 0.6 mm, alors qu'en présence de précipitations violentes les gouttes peuvent atteindre des diamètres de 5 à 6 mm, voire 8 mm dans des cas extrêmes. De façon générale la taille des gouttes est extrêmement variable en fonction du type de pluie; bruine, pluie stratiforme ou convective avec des tailles de gouttes qui s'étendent de 0.1 mm à 8 mm environ.

Les différentes situations météorologiques énoncées ci-dessus interagissent différemment avec l'onde électromagnétique. Ainsi, pour les nuages, le rapport entre la dimension des gouttes et la longueur d'onde étant inférieur à l'unité (diffusion de Rayleigh) le phénomène de diffusion est négligeable, et seule l'absorption par effet Joule joue un rôle (Fig. 1). Cette absorption sur l'ensemble d'une couche nuageuse peut devenir significative particulièrement à l'extrémité supérieure de la bande qui nous intéresse (50 GHz) où l'affaiblissement peut atteindre dans certain cas jusqu'à 5 dB en incidence oblique

La pluie interagit fortement avec l'onde électromagnétique tant par absorption que par diffusion en raison de la taille des gouttes bien supérieures à celles rencontrées dans les nuages (diffusion de Mie) (Fig.1). Le phénomène de rétrodiffusion qui en résulte est exploité en télédétection par les radars pluie alors que l'affaiblissement provoqué en transmission est un inconvénient dans les systèmes de transmission. A titre d'exemple, un événement pluvieux dont le taux précipitant (R) est de 100 mm par heure[3] entraînera des affaiblissements linéiques de 10 et 30 dB par kilomètre de pluie traversée à 20 et 50 GHz respectivement. L'étude de l'interaction ondes – pluie est un problème complexe car si les mécanismes d'interaction entre l'onde électromagnétique et une goutte isolée sont parfaitement connus depuis longtemps (Théorie de Mie, 1908) la pluie est formée d'un ensemble de gouttes caractérisé par sa distribution de taille (par unité de volume) que l'on notera DSD[4] dans la suite. En présence d'une telle distribution, chaque goutte va jouer

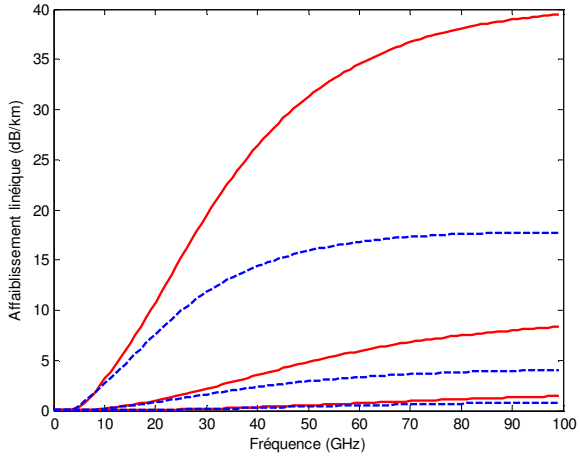


Figure 2 : Affaiblissement linéique (diffusion avant) dû à une couche de pluie supposée homogène en fonction de la fréquence pour deux types de DSD (bleue Marshall Palmer, rouge Joss convectif) et pour trois valeurs de l'intensité de pluie (R=1, 10, 100 mm/h) pour une température de 20°C.

[3] *100 millimètres d'eau par heure (Evénement orageux intense)*

[4] *Drop Size Distribution : nombre de gouttes par mètre cube et par unité de diamètre*

le rôle d'un diffuseur redistribuant l'énergie de l'onde incidente dans toutes les directions de l'espace. L'interaction de l'onde et de la pluie résulte de la composition de l'ensemble des interactions avec les gouttes présentes dans le volume considéré. Seule la connaissance de la microphysique de la pluie (c'est-à-dire de sa DSD) en tout point du volume considéré et à tout moment permettrait de caractériser complètement le milieu et d'en déduire les interactions correspondantes (Fig. 2).

La remarque précédente montre que l'étude de l'interaction onde électromagnétique – pluie est complexe en raison des caractéristiques mêmes de cette dernière. Rappelons notamment le caractère fortement intermittent des précipitations se traduisant par des durées de quelques minutes à plusieurs heures voire à plusieurs jours ainsi que par des fréquences allant de quelques minutes à plusieurs décennies pour les événements extrêmes. Parmi les autres caractéristiques importantes, il faut noter la forte hétérogénéité spatiale (structure spatiale « complexe » pouvant être composée d'un ensemble de cellules plus ou moins grandes, elles mêmes composées d'un ensemble de cellules plus petites) ainsi que la grande variabilité des DSD observées au sein même d'un événement ou inter événement (distribution en forme de loi exponentielle, gamma ou plus complexe du type multi modal).

La prise en compte de cette variabilité tant spatiale que temporelle est primordiale dans bien des domaines. En voici trois exemples :

Dans le domaine des télécommunications, les opérateurs veulent avoir une idée précise de la durée moyenne annuelle de coupure d'une liaison radio (Terre satellite par exemple) afin que le service puisse être assuré au moins durant un certain pourcentage de temps sur une année (typiquement 99,5% ou 99.9%). Ce type de statistique exige une bonne représentativité des événements extrêmes, ce qui implique de réaliser des mesures en continu sur plusieurs années[5].

Dans le domaine de la sécurité civile, il s'agit de savoir si une coupure d'une communication durant un évènement extrême n'excèdera pas une certaine durée (pour une probabilité donnée) afin que les secours puissent s'organiser. La bonne représentation des événements extrêmes est alors primordiale.

En télédétection spatiale la forte hétérogénéité des cellules de pluie nécessite, pour avoir une vision réaliste des précipitations à l'échelle locale, des instruments d'observation placés en orbite basse. Ce choix se fait au détriment de la couverture spatiale et de la répétitivité de la mesure de la scène observée (typiquement 2 fois/jours) et rend ainsi particulièrement difficile l'estimation des bilans d'eau précipités durant une période donnée. A contrario, l'utilisation d'une orbite plus haute permet d'observer le phénomène plus souvent et plus longtemps, mais avec une résolution spatiale dégradée et dans certains cas une mauvaise estimation de l'intensité de pluie moyenne sur le pixel (phénomène de beamfilling en radiométrie).

Les radars météorologiques utilisent pour estimer l'intensité de pluie R à partir de la réflectivité radar Z une relation (appelée relation Z-R dans le jargon des radaristes[6]) faisant appel à une hypothèse sur la distribution des tailles de gouttes. Cependant cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée conduisant à des erreurs importantes sur l'estimation de R.

---

[5] Ce qui suppose tout de même une certaine stationnarité du processus

[6] La plus connue est $Z = 200R^{1,6}$

Signalons enfin que les choix des bandes spectrales utilisées reposent sur des considérations différentes suivant le point de vue. En télédétection ce choix est dicté par la sensibilité de l'onde sur l'objet à étudier, et est dans le cas de la pluie directement liée à la taille des gouttes. En pratique les radars pluies utilisent des fréquences entre 3 et 10 GHz voire plus pour des radars à faible portée. Dans le domaine des télécommunications sans fil, le problème est tout autre. Il ne s'agit pas de rechercher la bande de fréquence optimale permettant de transmettre au mieux l'information, mais d'utiliser les bandes de fréquence attribuées par l'Union Internationale des Télécommunications (UIT). Jusqu'à un passé récent, le spectre radioélectrique utilisé en hyperfréquence n'allait guère au-delà de 18 GHz et était relativement peu sensible aux différents effets liés à la traversée de l'atmosphère. En raison des besoins croissants de débits de données (téléphonie, multimédia, internet, etc), la quasi-totalité du spectre traditionnellement utilisé a été rapidement saturé, et de nouvelles bandes de fréquence ont dû être attribuées. Ces nouvelles bandes de fréquences situées au-delà de 18 GHz et jusqu'à plus de 40 GHz sont extrêmement sensibles aux conditions météorologiques. Nous avons vu en effet que les gaz, les nuages et surtout la pluie peuvent provoquer des affaiblissements importants. De tels affaiblissements sont catastrophiques notamment lorsque la longueur de la liaison sous la pluie est de plusieurs kilomètres (faisceaux hertziens, télécommunications Terre – satellite). Dans ce dernier cas, l'affaiblissement en espace libre est extrêmement important (aux alentours de 200 dB pour un satellite géostationnaire), et même si l'utilisation de fréquences plus élevées permet d'accroître le gain des antennes, les bilans de liaison sont généralement insuffisants pour compenser complètement l'affaiblissement engendré par certains événements pluvieux. Cela est encore plus vrai pour les systèmes installés chez les particuliers ou dans le cas de systèmes portatifs possédant des antennes de faibles dimensions et donc de faible gain ainsi qu'une puissance d'émission forcément limitée tels les systèmes VSAT[7].

Du point de vue des futurs systèmes de télécommunications, les opérateurs n'ont guère le choix des bandes de fréquence et doivent donc faire avec la présence de l'atmosphère (!). Cela a été l'une des principales motivations qui a poussé depuis une vingtaine d'année un certain nombre d'équipes (dont celle du LATMOS - CETP) à se pencher sur ce sujet et à s'intéresser de près aux précipitations.

TRAVAUX DE RECHERCHE

Les travaux présentés ci-après sont scindés en quatre parties :

- La modélisation inverse en vue de l'estimation de l'affaiblissement atmosphérique par radiométrie sol : application à la diversité de pointage

- La mesure et la description de la microphysique de la pluie

- L'étude des propriétés dynamiques du canal de propagation, les modèles de prédiction de l'affaiblissement.

- Modélisation de la variabilité spatio-temporelle de la pluie

[7] *Very Small Aperture Terminal*

Ces travaux s'insèrent dans le cadre de différents contrats (DGA, CNET, RNRT), de projets Européens (AMMA), du programme national PNTS et du BQR de l'université de Versailles-Saint-Quentin en Yvelines.

5.3. AXE 1: MODELISATION INVERSE PAR RESEAUX DE NEURONES EN VUE DE L'ESTIMATION DE L'AFFAIBLISSEMENT ATMOSPHERIQUE, APPLICATION A LA DIVERSITE DE POINTAGE

Cadre : Projet Constellations de satellites LEO, (1999-2002)

Article n°1 fourni en annexe

Contexte – La connaissance d'un point de vue statistique de l'affaiblissement atmosphérique est fondamentale pour le dimensionnement des systèmes de télécommunication, notamment pour les télécommunications spatiales. Cependant, la mesure directe de cet affaiblissement (pour une liaison Terre / satellite) est difficile à réaliser. Elle nécessite en effet la mise en œuvre de moyens importants tels que des balises hyperfréquences à bord de satellites géostationnaires, et des stations de réception terrestres. Pour cette raison, il n'existe que très peu de campagne de mesures, les trois principales ont été réalisées à partir des satellites ITALSAT F2 (Italie), OLYMPUS (Europe), ACTS (USA).

Objectif – Estimation de l'affaiblissement atmosphérique

Travaux – Dans le cadre du projet constellations de satellites LEO soutenu par le RNRT[8], nous avons proposé comme solution de substitution pour l'estimation de cet affaiblissement, pour un coût (nettement) moindre, l'utilisation de radiomètres micro-onde sols. L'idée n'était certes pas nouvelle, mais jusqu'alors, leur utilisation était limitée aux périodes de ciel clair, c'est à dire lorsqu'une hypothèse de linéarité entre les températures de brillance du ciel et les paramètres à restituer peut être faite[9]. Nous avons mis en évidence l'intérêt des réseaux de neurones pour le développement d'un algorithme d'inversion non linéaire. La prise en compte des non-linéarités a ainsi permis d'étendre le domaine de restitution de l'affaiblissement jusqu'alors réservé aux situations non précipitantes, aux situations de pluies moyennes.

Un deuxième avantage de l'utilisation de radiomètres sols est la possibilité de sonder l'atmosphère dans plusieurs directions du ciel alors que la mesure directe à l'aide d'un satellite géostationnaire ne permet qu'une seule direction de sondage en direction du satellite.

Les radiomètres ne fournissent pas directement l'affaiblissement, ce sont des capteurs passifs qui mesurent la température de brillance du ciel à diverses fréquences dans une direction de visée donnée. Cette température de brillance est fonction de l'énergie électromagnétique rayonnée par le milieu. Dans notre cas, ce rayonnement provient de la contribution de chacun des constituants de l'atmosphère (gaz, hydrométéores), à laquelle il faut ajouter la contribution du rayonnement cosmique. Le modèle d'inversion développé permet à partir des mesures de températures de brillance à 21.7 et 31.5 GHz d'estimer l'affaiblissement pour n'importe quelle fréquence comprise entre 20 et 50 GHz.

---

[8] *http://wwww.enseignementsup-recherche.gouv.fr/technologie/reseaux/rnrt.htm*

[9] *OPEX Reference book on 'Radiometry and Meteorological Measurement' - OPEX Reference book on 'Attenuation Measurement and Prediction', ESA WPP-083, 1994.*

De façon générale, les méthodes de régression neuronales estiment l'espérance conditionnelle de la sortie connaissant l'entrée. Pour cela, il est nécessaire de disposer d'une base d'apprentissage représentative des différentes situations météorologiques et contenant à la fois les grandeurs d'entrée et de sortie. Cette base peut être obtenue soit par la mesure directe (dans notre cas il s'agirait de mesurer simultanément les températures de brillance et l'affaiblissement), soit à l'aide d'une base synthétique. Dans notre cas nous disposions de mesures d'affaiblissements à 20 et 30 GHz et de mesures de température de brillance obtenues lors de la campagne Olympus. Cependant, la création de la base directement à partir de ces données présente un certain nombre d'inconvénients (mesure de l'affaiblissement pour seulement deux fréquences, un seul lieu géographique, période d'un an ne reflétant pas la diversité des situations). Nous avons donc opté pour la deuxième solution et avons réservé les données de la campagne Olympus pour valider l'algorithme. Une importante base de données simulée a été calculée à partir de dizaines de milliers de profils verticaux issus du CEPMMT[10]. La principale difficulté a été de réaliser des bases capables de représenter la diversité des situations rencontrées, et de donner un poids suffisant aux événements rares afin qu'ils puissent être appris par le réseau. Pour atteindre cet objectif, les profils utilisés ont été sélectionnés sur 12 jours (1 jours pour chacun des mois de l'année) sur l'ensemble de la planète en zone tempérée. Nous avons sélectionné au moyen d'une méthode adéquate (carte de Kohonen) un sous ensemble de données statistiquement représentatif de l'ensemble de départ dans lequel nous avons ensuite diminué la représentativité des profils en ciel clair, qui sont les plus courants afin d'augmenter le poids relatif des profils contenant de la pluie. Un modèle de transfert radiatif a ensuite été appliqué à cet ensemble de profils. Celui-ci a fourni les mesures radiométriques simulées à 23,8, 31,7 et 36,5 GHz correspondant aux canaux utilisés par les radiomètres, ainsi que les affaiblissements atmosphériques correspondants entre 20 et 50 GHz par pas de 1 GHz. L'étude de la fonction de transfert atténuation / températures de brillance nous a permis de choisir un modèle neuronal adéquat. La mise au point du modèle a été réalisée en deux temps (Fig. 3) :

- Apprentissage et test du réseau à partir de deux sous-ensembles de données simulées.

- Validation à partir de données expérimentales issues de la campagne de mesure OLYMPUS (mesures simultanées des affaiblissements à 20 et 30 GHz à partir de deux balises embarquées à bord du satellite du satellite OLYMPUS et mesures des températures de brillance par un radiomètre sol). Ce modèle a ensuite été appliqué avec succès aux données de la campagne de mesure du projet CONSTELLATION décrit ci-après.

[10] *Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme*

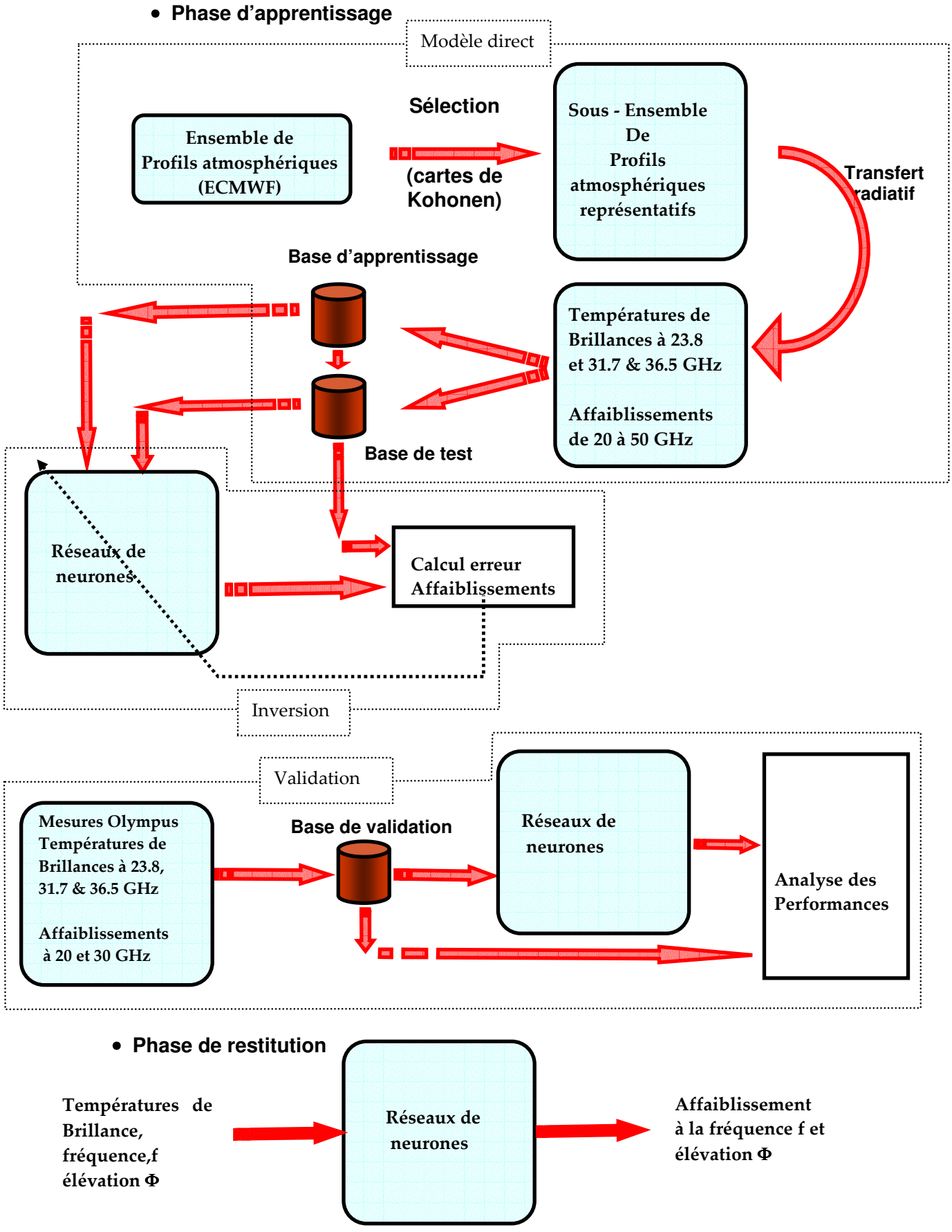


Figure 3 : synoptique du modèle d'estimation de l'affaiblissement atmosphérique par réseaux de neurones

De 1999 à 2002 j'ai mis en place une campagne de mesure dans le cadre du projet RNRT CONSTELLATION. L'objectif de ce projet était de définir les caractéristiques optimales d'un système de télécommunication basé sur une constellation de satellites à basse ou moyenne altitude. En raison de la diversité des compétences nécessaires pour l'aboutissement d'un tel projet (aspects réseaux, codage, radio, …) plusieurs laboratoires français[11] sont intervenus. En tant que responsable CETP de l'aspect propagation, ma mission a été d'évaluer l'apport de la technique dite de diversité de pointage en bande Ka. Cette technique consiste à choisir la meilleure liaison lorsque plusieurs satellites sont visibles simultanément et d'éviter ainsi les perturbations engendrées par la présence d'un système orageux. Le principe de la campagne était de réaliser des mesures de température de brillance simultanées dans plusieurs directions du ciel. Pour cela, nous avons utilisé deux radiomètres, l'un fixe visant en permanence au zénith (radiomètre DRAKKAR) et un second qui effectuait des balayages périodiques suivant plusieurs directions de visée (radiomètre RESCOM)(Fig. 4). La mise en œuvre de cette campagne qui a duré deux ans et demie a nécessité de remettre au goût du jour les deux radiomètres du CETP, j'ai dû notamment réécrire entièrement le logiciel de pilotage du radiomètre RESCOM, ainsi que les logiciels de calibration (tipcurve, pointage sur le soleil). Je suis intervenu de nombreuses fois pour participer à son dépannage, notamment après la tempête de décembre 1999.

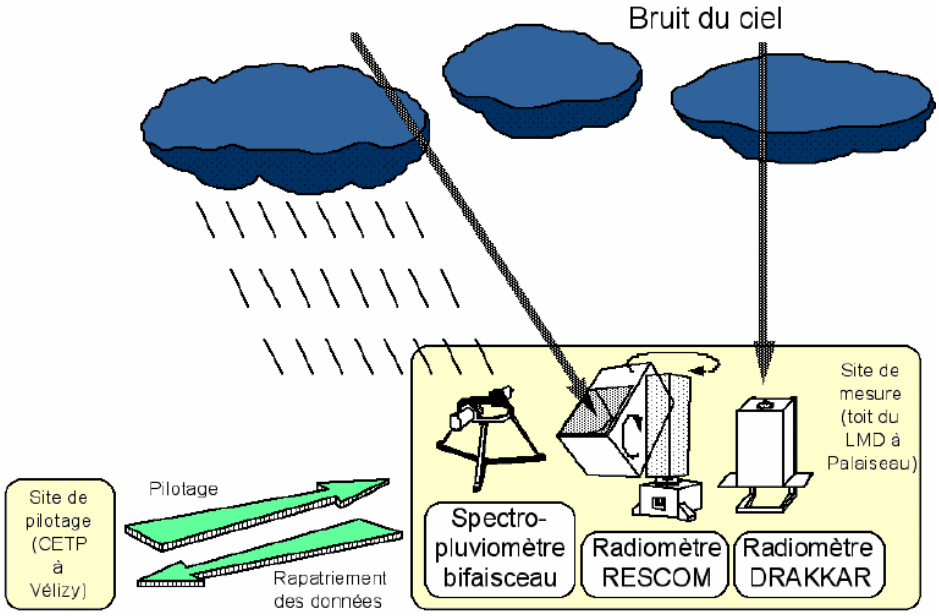


Figure n°4 : Synoptique de la campagne de mesure du projet CONSTELLATION

A partir des températures de brillance issues des deux radiomètres et du modèle neuronal décrit précédemment nous avons estimé les affaiblissements atmosphériques correspondants pour plusieurs fréquences dans la bande 20-50 GHz. Divers types d'études statistiques ont été réalisées. La figure n°5 montre pour les fréquences 20 et 30 GHz le gain en terme de pourcentage de temps d'atténuation cumulée apporté par le fait d'avoir deux satellites simultanément visibles à un point donné (50° élévation dans les directions Est et Ouest)(courbes traits fins), plutôt qu'avec un seul satellite (50° d'élévation en direction de l'ouest)(courbes traits épais). Ces résultats montrent l'intérêt de la diversité de pointage, ainsi à 20 GHz (respectivement 30 GHz) avec un seul satellite, l'atténuation est supérieure ou

[11] *PRISM, LIP6, LSS, CETP*

égale à 7 dB (respectivement 13.5 dB) durant 0.01% du temps, alors qu'elle est ramenée à 4 dB (respectivement 7.5 dB) si on utilise judicieusement les deux satellites.

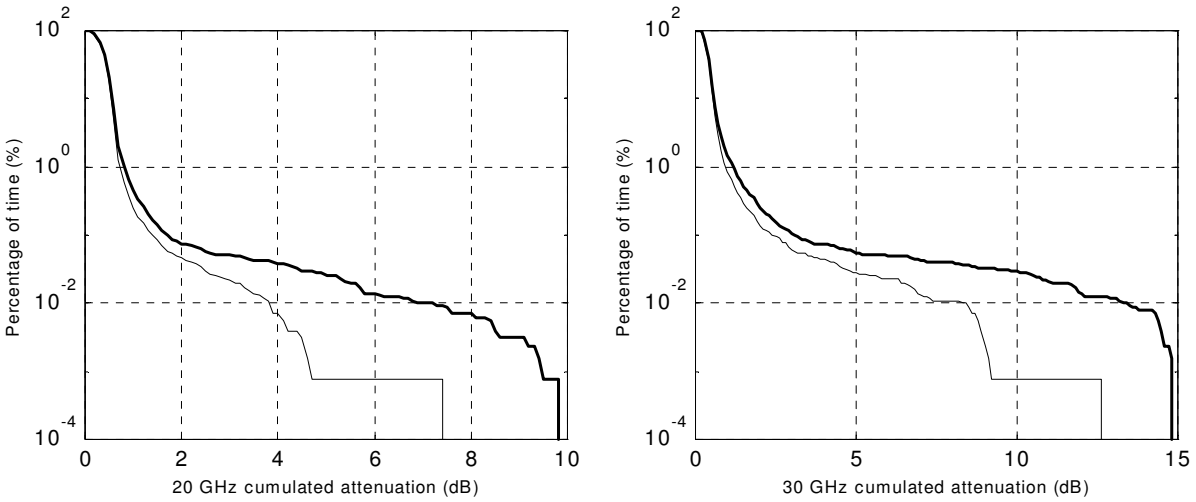


Figure 5 : Gain de diversité de pointage à 20 et 30 GHz

Ces travaux ont fait l'objet d'une publication dans la revue Radio Science [Barthés, 2003] et d'un encadrement d'un CDD durant 6 mois. Les modèles développés ont été utilisés par la suite par la société IPSIS pour le développement du logiciel CALIMERO lors de l'expérience Syracuse décrite plus loin.

Suite à ce projet, ces travaux n'ont hélas pas été poursuivis en raison de l'intérêt décroissant pour les constellations de satellites consécutifs aux récents (en 2001) échecs commerciaux des systèmes déjà en place, tel Globalstar qui était pratiquement en cessation de paiement à la fin de l'année 2001, et qui a vu le désengagement des actionnaires français (Alcatel et France Telecom). Malgré cela l'intérêt pour les constellations demeure, les systèmes mis en place dans les années 2000 ont fini par trouver un équilibre économique ; et d'autres projets sont à l'étude en bande Ka. Ces travaux pourraient donc être réutilisés à l'avenir.

5.4. AXE 2: MICROPHYSIQUE DE LA PLUIE, INTERACTION ONDE - PLUIE

Contexte général - La connaissance de la microphysique de la pluie est fondamentale dans nombre de domaines : érosion du sol, écoulement des eaux de pluie, transmission de maladie d'une plante à une autre par effet de splash, propagation des ondes dans l'atmosphère, etc[12]. C'est ce dernier domaine qui a motivé les travaux décrits ci-après.

[12] *Voir "Uijlenhoet, R., and D. Sempere Torres : 2006: Measurement and Parameterization of Rainfall Microstructure, J. of Hydrology, 328 , Issues 1-2" pour une bibliographie relative à ces domaines*

T1 - MESURE DE LA MICROPHYSIQUE DE LA PLUIE

Cadre : contrat CTI-CNET, Belfort (1999), Campagne de mesures DEVEX (2002), VAPIC1 & VAPIC2 (2004,2005), AMMA (2006, 2007)

Articlen°2 fourni en annexe

Contexte - La mesure des précipitations in situ est réalisée la plupart du temps par des pluviomètres. Le principe consiste à estimer le volume d'eau capté à travers une surface de collecte et d'en déduire la hauteur d'eau par unité de temps (intensité de pluie en mm/h). Ce type d'instrument très répandu, permet de mesurer les intensités de précipitations intégrées sur des laps de temps généralement de 15 minutes, 1 heures voire 1 journée. Il ne permet pas en revanche de mesurer la microphysique de la pluie dont la connaissance est fondamentale pour l'étude de la propagation des ondes. Des appareils spécifiques ont dû être développés (disdromètre, spectropluviomètre).

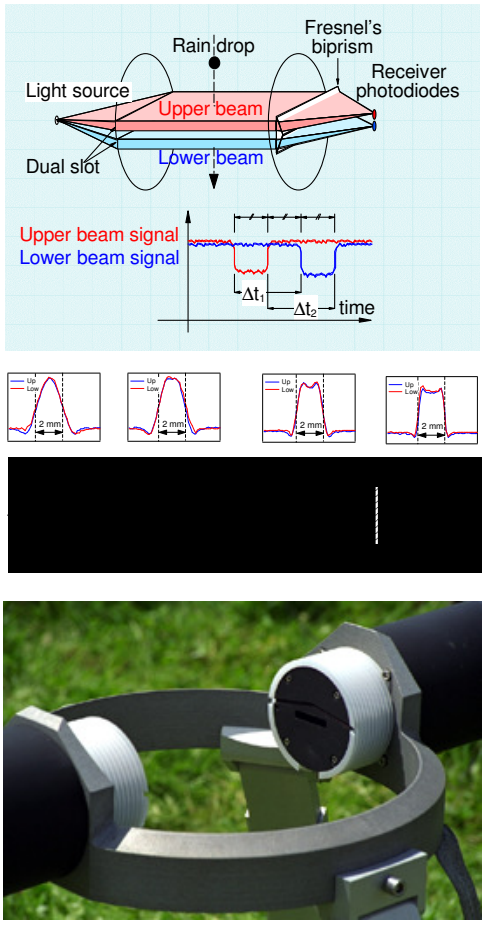


Figure 6 : principe du spectropluviomètre bi-faisceaux du CETP

Travaux - Le CETP développe depuis longtemps de tels instruments. Une première version appelée (OSP : Optical Spectro Pluviometer) a été développée en 1984[13]. Le principe consiste à mesurer les variations du flux lumineux dues au passage des gouttes à travers un faisceau infrarouge. Par la suite, j'ai mis au point la méthode de traitement temps réel de la seconde génération dite à double faisceau (DBS : Dual Beam Spectropluviometer)(Fig. 6). Les principales améliorations souhaitées étaient la détection des gouttes de diamètres inférieures à 0.5 mm, la réduction significative du taux de fausse alarme et une meilleure estimation de la vitesse de chute. La turbulence de l'air ambiant entraîne une variation significative de son indice de réfraction induisant un bruit en $f^{-5/3}$, dégradant le rapport signal sur bruit, notamment pour les gouttes de faible diamètre (<0,5 mm). L'étude des séries temporelles issues des deux faisceaux m'a permis d'estimer un filtre optimal permettant de maximiser le rapport signal sur bruit et d'assurer ainsi la détection optimale du passage de la goutte dans un faisceau. Dans un second temps, le calcul d'une métrique entre les caractéristiques d'une goutte « vue » par chacun des deux faisceaux permet de décider si il s'agit d'une « vraie » gouttes que l'on doit conserver ou si on doit la rejeter (pour un certain niveau de probabilité donné). Ce procédé, dit à double faisceaux, a permis de réduire considérablement les fausses détections, et ainsi de mesurer les gouttes de

[13] *Hauser, D., P. Amayenc, B. Nutten, and P. Waldteufel, 1984: A new optical instrument for simultaneous measurement of raindrop diameter and fall speed distributions. J. Atmos. Oceanic Technol., 1, 256–269*

faible diamètre (0.3 mm). J'ai ensuite implémenté l'ensemble de la méthode dans l'appareil pour une utilisation en temps réel. Les performances de l'instrument ont fait l'objet d'une publication [Delahaye 2006] et d'une communication dans un congrès international à l'EGS[14] [Delahaye 2002]. De plus un contrat de licence exclusif a été signé avec la société CIMEL (cf. rubrique projet, contrat n°3) qui a industrialisé l'instrument. Celui-ci a été acheté par des organismes tels que le CEMAGREF ou la DGA, et est également utilisé par la société NOVIMET pour la calibration de son radar météorologique. Une campagne d'inter comparaison avec d'autres instruments co-localisés basés sur des principes différents a eu lieu en 2002 (cf. Campagne DEVEX). Les résultats se sont avérés concluants pour notre instrument [Krajewski & al. 2006]. L'analyse des données de cette campagne a fait l'objet d'un encadrement d'une doctorante (Clélia Carraciolo) en dernière année de thèse invitée pendant 4 mois. Depuis, cet appareil a participé à de nombreuses campagnes de mesures sur trois continents, ce qui nous permet de disposer d'une importante base de données correspondant à une période trois années repartie de 2001 à 2009.

T2 - INFLUENCE DE LA MICROPHYSIQUE DE LA PLUIE SUR L'AFFAIBLISSEMENT

Cadre :, Thèse de monsieur Olivier Brisseau, contrat SYRACUSE (2006-2009)
Article n°3 fourni en annexe

Objectif - Mieux prendre en compte la microphysique de la pluie dans les systèmes de télécommunications dans la bande 20-50 GHz

Estimation des paramètres microphysiques - Durant les travaux de thèse de Monsieur O. Brisseau nous nous sommes intéressés à l'influence de la microphysique de la pluie sur l'affaiblissement. La distribution des tailles de gouttes (DSD) joue un rôle d'autant plus important sur l'affaiblissement que la fréquence est élevée. Dans le cas de liaisons en EHF[15], l'estimation de l'affaiblissement à partir du seul taux précipitant R conduit à des incertitudes importantes. La normalisation dite de Testud[16], fait apparaître les deux paramètres[17].

$$D_m = \frac{\int_0^\infty DSD(D)D^4 dD}{\int_0^\infty DSD(D)D^3 dD} \quad \text{et} \quad N_o^* = \frac{4^4}{6}\frac{\int_0^\infty DSD(D)D^3 dD}{D_m^4}$$

qui permettent de caractériser la DSD.

Les connaissances acquises durant ces travaux nous ont permis de démontrer qu'il est possible d'estimer les valeurs moyennes de D_m et N_o^* le long d'une liaison hertzienne à partir de la mesure simultanée de l'affaiblissement à deux fréquences différentes. Ce résultat a été corroboré par des mesures simultanées d'affaiblissement à 20 et 30 GHz co-localisées avec les mesures d'un spectropluviomètre. Ces travaux montrent l'intérêt des liaisons point à point

[14] *European Geophysical Society*
[15] *Extremely High Frequency (30-300 GHz)*
[16] *Testud, J., Oury, S., Black, R. A., Amayenc and P. , Dou, X., 2001: The Concept of ''Normalized'' Distribution to Describe Raindrop Spectra: A Tool for Cloud Physics and Cloud Remote Sensing, J. Applied Meteo., 40, 1118-1140.*
[17] *N(D) représente la DSD, D_m est appelé diamètre volumique moyen et No* représente l'intercept pour une distribution exponentielle.*

pour l'étude de la microphysique de la pluie à petite échelle ainsi que de sa variabilité.

Ils permettent également d 'améliorer les méthodes d'estimation de l'intensité de pluie sur une zone localisée avec une grande résolution temporelle (une seconde typiquement). Ces conclusions seront reprises plus loin dans la partie « prospectives » qui présentera les études envisagées dans plusieurs domaines tels que l'hydrologie, la sécurité civile ou la calibration des radars de télédétection.

Modèle de similitude en fréquence - L'étude précédente a été appliquée à un problème de télécommunication. Il s'agissait de développer un modèle permettant d'estimer en bande EHF l'affaiblissement dû à la pluie à une fréquence F_2 connaissant l'affaiblissement à une fréquence F_1 généralement plus basse. Ce type de modèle s'appelle modèle de similitude en fréquence. Le coefficient de similitude est défini comme le rapport de l'affaiblissement à la fréquence la plus forte sur l'affaiblissement à la fréquence la plus faible. Plusieurs modèles de similitude existent, notamment ceux préconisés par l'ITU. Ils sont basés sur une distribution de taille de gouttes fixée à priori du type Marshall Palmer et ne prennent pas en compte pour la plupart la variabilité de la microphysique de la pluie. On montre que le coefficient de similitude en fréquence dépend directement du paramètre D_m. L'estimation de ce paramètre géophysique permet donc de déduire le coefficient de similitude pour n'importe quel couple de fréquence dans la bande considérée.

D'un point de vue opérationnel en télécommunication, il n'est pas toujours possible de disposer de la mesure de l'affaiblissement à deux fréquences différentes. Une étude des propriétés statistiques de D_m et de l'affaiblissement nous a permis d'ajouter des connaissances a priori au modèle permettant ainsi de n'utiliser l'affaiblissement qu'à une seule fréquence. Bien que les performances de ce modèle soient dégradées par rapport à celles du modèle bi-fréquence, elles sont néanmoins meilleures que celle du modèle ITU sur les données dont nous disposions. Ces travaux ont donné lieu à trois publications [Brisseaux 2003, 2005, 2006].

Prise en compte de l'affaiblissement dû aux gaz et aux nuages - En pratique, l'affaiblissement atmosphérique mesuré résulte de la combinaison des contributions des gaz, des nuages et de la pluie. Les modélisations du canal de propagation dans les bandes de fréquence actuellement en usage (<18 GHz) négligent (à juste titre) les contributions des gaz et des nuages devant celle de la pluie. Cette simplification n'est cependant plus possible aux fréquences plus élevées notamment en bande EHF. Il convient donc au préalable d'estimer la contribution de la pluie à partir de l'affaiblissement (total) mesuré afin de pouvoir utiliser les modèles de similitude en fréquence décrits précédemment.

Un modèle neuronal a été développé à cette fin, il permet d'estimer les trois contributions à partir de l'affaiblissement mesuré et des paramètres météorologiques standard co-localisés (pression, température, humidité au sol). Tout comme dans la partie concernant la modélisation inverse de l'affaiblissement à partir des températures de brillances, la principale difficulté a été de réaliser des bases d'apprentissage capables de représenter la diversité des situations rencontrées, et de donner un poids suffisant aux événements rares afin qu'ils puissent être appris par le réseau. Une technique similaire a été utilisée (carte de Kohonen et égalisation des densités de probabilité). Ces bases contiennent les trois contributions à l'affaiblissement de l'atmosphère (gaz, nuage, pluie) et l'affaiblissement total à diverses fréquences entre 20 et 50 GHz ainsi que les grandeurs météorologiques sols. Après

apprentissage, chacune des trois sorties du réseau de neurones permet une estimation des contributions conditionnées aux entrées. De façon plus précise, les sorties sont ici les trois contributions relatives de l'atmosphère à l'affaiblissement total à une fréquence f_i. La figure 7 montre un exemple de séparation des diverses composantes obtenue à 20 GHz et à 17° d'élévation dans lequel il apparaît clairement (sur cet événement) une contribution non négligeable des gaz et des nuages à l'affaiblissement total.

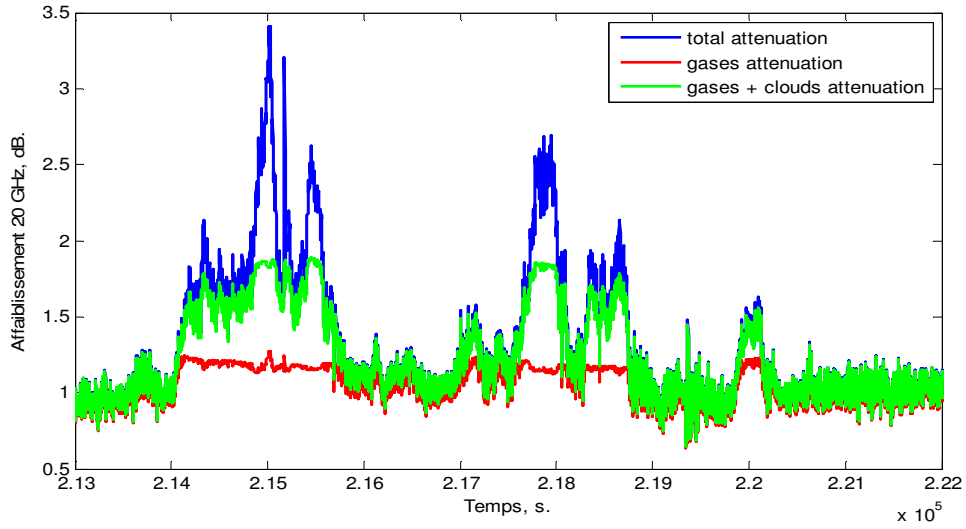


Figure 7: séparation des différentes contributions, affaiblissement par les gaz (rouge), gaz + nuages(vert), total (bleu). Mesure Syracuse à 20 GHz

La figure 8 illustre les performances du réseau réalisées par comparaison des statistiques d'affaiblissement dues à la pluie déduites de mesures de pluie au sol à l'aide d'un spectropluviomètre (courbe bleu) avec celles obtenues par la mesure de l'affaiblissement total (courbe rouge) et celles obtenues après estimation de l'affaiblissement pluie à l'aide du réseau de neurones (courbe verte). La bonne superposition des courbes bleu et verte permet de valider (partiellement) le modèle. Il n'existe pas actuellement à notre connaissance de modèle équivalent dans la littérature. L'utilisation de fréquences aussi élevées (> 20 GHz) pour des liaisons de plusieurs kilomètres reste encore marginale en raison du coût des équipements, ce qui explique sans nul doute le peu d'études consacrées. Cependant les projets utilisant ces bandes de fréquence sont de plus en plus nombreux, voir par exemple Evans & a.[18] ou le rapport de la commission européenne[19]. Il existe d'ores et déjà quelques systèmes satellites comme le satellite militaire français Syrasuse 3 qui utilise des canaux à 20 et 44 GHz. Ce travail a fait l'objet d'une publication dans la revue Radio Science [Barthes, 2006] et d'un congrès international [Mallet, 2006]. Il a ensuite été utilisé dans la thèse de Monsieur Louis de Montera.

[18] *. V. Evans and A. Dissanayake, Prospects for commercial satellite services at Q- and V-bands, Astronautica, vol. 44, 7-12, April-June 1999, pp 737-743.*

[19] *ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/infowin/docs/swg_rep1.doc*

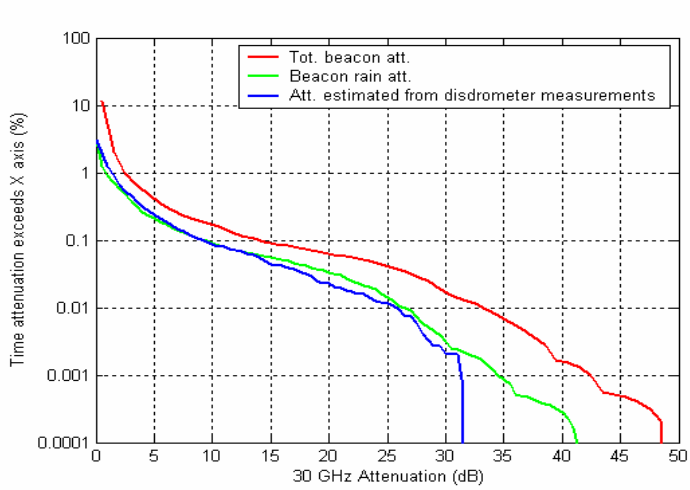


Figure 8: Pourcentage de temps d'atténuation cumulée obtenu sur les données de l'expérience Olympus à 30 GHz: Affaiblissement total (courbe rouge) ; affaiblissement par la pluie estimé par le réseau de neurone à partir de l'affaiblissement total courbe verte; affaiblissement calcué à partir de la mesure au sol de la DSD par un spectropluviomètre.

Application aux systèmes de télécommunications– Les équipements de transmission terrestre émettant à une fréquence F_2 vers un satellite (liaison montante) doivent adapter le débit et/ou leur puissance d'émission en fonction de l'état de l'atmosphère afin d'en compenser son effet. Plus celle-ci sera opaque, plus il conviendra d'augmenter le niveau d'émission ou de façon équivalence de réduire le débit (lorsque cela est possible). En conséquence, des boucles adaptatives permettant de compenser en temps réel l'affaiblissement de l'atmosphère doivent pouvoir évaluer cet affaiblissement. En pratique, l'estimation directe de celui-ci n'est pas toujours possible et il est parfois nécessaire de l'estimer indirectement à partir de l'affaiblissement sur la liaison descendante à la fréquence F1 (généralement plus basse). Les travaux présentés ci-après permettent d'estimer l'affaiblissement total à la fréquence F_2 à partir de l'affaiblissement total à la fréquence F_1. Lorsque la fréquence F_2 est supérieure à 20 GHz environ il est nécessaire d'estimer le coefficient de similitude global K, c'est-à-dire faisant intervenir les trois contributions, et non plus seulement la pluie, et en appliquant à chacune d'elle son propre coefficient de similitude (les trois coefficients étant différents) :

$$K = W_{gaz} \times K_{gaz} + W_{nuage} \times K_{nuage} + W_{pluie} \times K_{pluie}$$

Avec W_i : contribution du constituant i, K_i : coefficient de similitude du constituant i

En ce qui concerne les coefficients de similitude des gaz et les nuages, nous avons utilisé les modèles de similitude existants qui donnent de bonnes performances[20]. La figure ci-dessous résume les différentes étapes permettant d'estimer l'affaiblissement total à une fréquence F_2 à partir de l'affaiblissement total à la fréquence F_1. Il s'agit à notre connaissance du seul modèle permettant le calcul de l'affaiblissement total à une fréquence F_2 à partir de la mesure de l'affaiblissement total à la fréquence F_1.

[20] *Recommendation ITU*

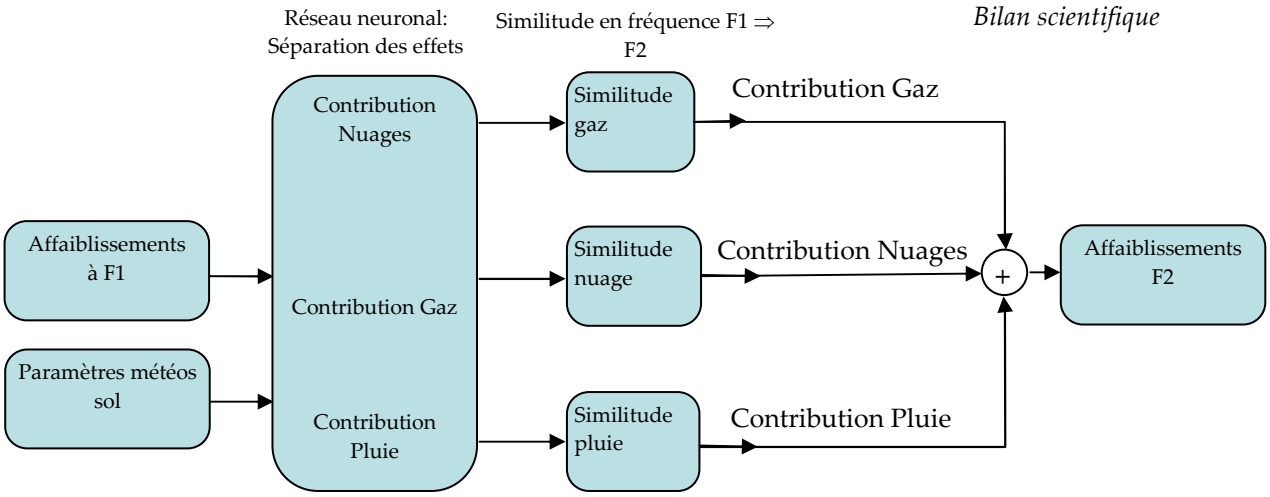


Figure 9: Synopique du modèle de similitude en fréquence

La figure 10 compare en fonction de l'affaiblissement à 20 GHz les valeurs moyennes du coefficient de similitude total (20-44 GHz) mesurées lors de la campagne Syracuse (courbe bleu) avec le coefficient de similitude moyen obtenu à l'aide de la seule mesure à 20 GHz et des paramètres météorologiques (Pression, température et humidité au sol) (courbe rouge). A titre de comparaison le modèle ITU de la pluie seule est représenté (courbe verte), il montre clairement qu'aux faibles affaiblissements, la non prise en compte des effets des gaz et des nuages conduit à des biais importants [Marsault & al., 2009][Montera soumis].

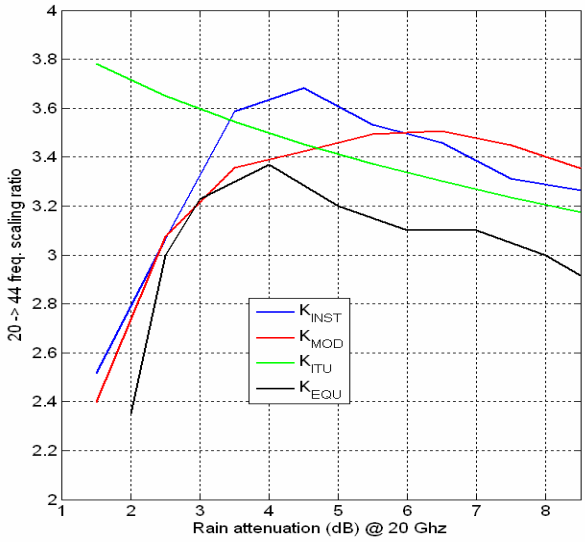


Figure 10: Coefficient de similitude 20/44 GHz en fonction de l'affaiblissement à 20 GHz Courbe bleu coefficient de similitude instantané mesuré, courbe verte modèle ITU pluie, courbe rouge combinaison des coefficients de similitude des gaz, des nuages et de la pluie.

T3 - MODELE PHYSIQUE D'EVOLUTION DU PROFIL VERTICAL DE LA MICROPHYSIQUE DES PRECIPITATIONS

Cadre : campagnes DEVEX, VAPIC, AMMA

Contexte - Durant la chute des gouttes d'eau (liquide), plusieurs phénomènes peuvent entraîner une modification de la DSD. Ainsi lors de la collision de deux gouttes, trois scénarios sont possibles suivant l'énergie cinétique mise en jeu dans le choc: (i) fusion pour ne former qu'une seule goutte (coalescence), (ii) explosion et formation de plusieurs gouttes plus petites (breakup), (iii) rebond. En plus de ces phénomènes, l'évaporation tend à réduire la taille des gouttes, spécialement pour les gouttes de faible diamètre. Des modèles semi-empiriques basés sur des expériences de collisions de gouttes en laboratoire ont été développés depuis de nombreuses années[21,22]. Ces modèles montrent que pour un temps de chute suffisamment grand la DSD tend vers une forme d'équilibre indépendante de la DSD initiale. Cette distribution à l'équilibre fait apparaître deux ou trois pics suivant les modèles. Nous avons montré en comparant des DSD proches de l'équilibre obtenues lors de trois campagnes de mesure (VAPIC, DEVEX, AMMA) que l'allure générale est assez semblable avec les modèles existants excepté pour la queue de la DSD, ce qui revient à dire que la distribution des gros diamètres estimée par ces modèles n'est pas en accord avec l'expérience.

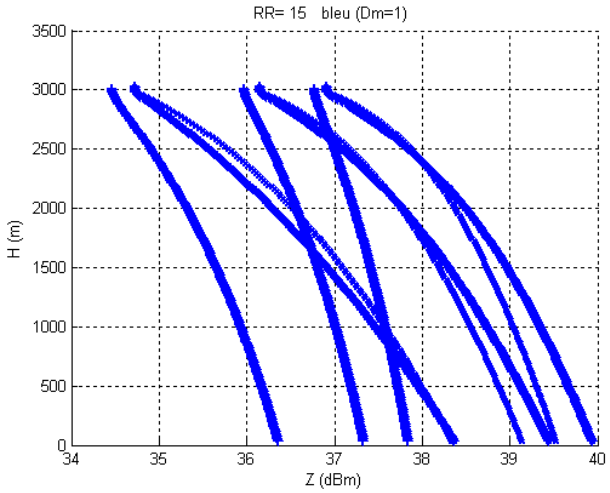


Figure 11 : évolution de la réflectivité radar en fonction de l'altitude pour une intensité de pluie de 15 mm/h pour différents couples (D_m, N_o^*)

Objectif – proposer un modèle en accord avec l'expérience.

Travaux - Nous avons proposé de remplacer le modèle original[23] de calcul de la proportion de choc qui mènent à la coalescence (coalescence efficiency) pour un couple de diamètre (D_i,D_j) donné par un autre modèle[24]. Nous avons

[21] *List, R. and G. M., McFarquhar, 1990: The role of breakup and coalescence in three-peak equilibrium distribution of raindrops. J. Atmos. Sci., 47, 2274–2292.*

[22] *McFarquhar, G. M, 2004: A new representation of collision-induced breakup of raindrops and its implications for the shapes of raindrop size distributions, J. Atmos. Sci., 61(7), 777–794.*

[23] *Low, T. B. and R. List, 1982a: Collision, coalescence, and breakup of raindrops. Part I: Experimentally established coalescence efficiencies and fragment size distributions in breakup. J. Atmos. Sci., 39, 1591–1606.*

____ 1982b: Collision, coalescence, and breakup of raindrops. Part II: Parameterization of fragment size distributions. J. Atmos. Sci., 39, 1607–1618.

[24] *Brazier-Smith, P. R. Jennings and S. G., Latham: 1972: The Interaction of Falling Water drops: Coalescence. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 326, No. 1566 (Jan. 25, 1972), 393-408.*

mis en évidence qu'avec cette modification la queue de distribution à l'équilibre estimée par le modèle est très proche de celle obtenue sur les données expérimentales.

Cette étude est en phase de re-soumission. A terme nous pensons utiliser ce modèle pour étudier l'influence de l'évolution de la DSD sur l'affaiblissement et surtout sur la réflectivité radar. En effet, en fonction de la distance au radar l'altitude de la zone sondée varie ; elle est d'autant plus haute que la distance est grande. Les premières simulations (figure 11) ont montré qu'une différence de plusieurs dB pourrait exister dans certain cas entre un sondage en haut de la couche et un sondage en bas de cette même couche. Nous pensons également utiliser ce modèle pour améliorer les performances du simulateur de pluie [Mallet, 2006] basé sur la génération de gouttes individuelles au sommet de la couche et sur l'évolution du profil vertical de la DSD. Ces travaux feront l'objet d'un approfondissement dans les années à venir.

AXE 3: PROPRIETES DU CANAL DE PROPAGATION, MODELES DE PREDICTION DU CANAL

Cadre: contrat CELAR, thèse de Louis de Montera

Article n°4 fourni en annexe

Contexte - Les caractéristiques du canal de propagation sont extrêmement variables et sont liées en grande partie à celles des précipitations. On s'attend donc à trouver de fortes différences de niveau de l'affaiblissement dues à l'intermittence (pluie / non pluie) et à des variations plus ou moins rapides et importantes dues à l'hétérogénéité à l'intérieur des cellules de pluie (Figure 12). La présence des gaz et des nuages contribue à rendre les caractéristiques du canal encore plus complexe (turbulences, phénomènes de scintillation, hétérogénéité de la couche nuageuse, du profil d'humidité), et ceux d'autant plus que la fréquence est élevée.

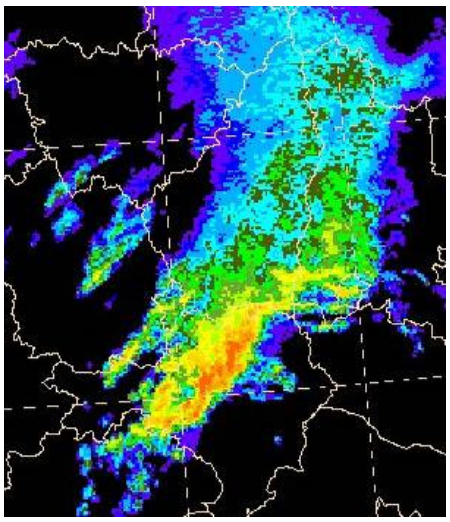


Figure 12: Intensité de pluie mesurée dans la région de Nimes en septembre 2002, les zones en rouge correspondent à R > 365 mm/h

La prédiction de l'affaiblissement est un enjeu important pour assurer le fonctionnement optimal des systèmes de télécommunication Terre –satellite au dessus de 20 GHz. Pour des raisons commerciales, militaires ou autres (sécurité civile par exemple), il s'agit de faire en sorte qu'une liaison soit interrompue le moins longtemps possible à cause des phénomènes météorologiques. En présence d'un événement de pluie intense, nous avons vu que l'affaiblissement peut atteindre des valeurs importante et cela durant plusieurs minutes, voire plusieurs heures dans les situations extrêmes. Il n'est pas envisageable d'émettre de façon continue avec des marges de puissance telles qu'elles permettraient de compenser de tels affaiblissements. Nous avons vu dans la partie précédente qu'il est possible au moyen de boucles adaptatives de modifier la puissance d'émission et/ou du débit d'information afin de garder un rapport signal sur bruit suffisant et ainsi maintenir la liaison opérationnelle.

Objectifs - Afin de permettre le changement de configuration du système, la mise en œuvre de ces techniques nécessite de prédire en temps réel et avec un horizon de quelques secondes une valeur de l'affaiblissement qui ne sera pas dépassée (pour un pourcentage de probabilité donné). De façon plus générale il s'agit d'étudier la dynamique à petite échelle des précipitations.

Travaux – Dans le cadre de la thèse de Monsieur De Montera, nous avons identifié un certain nombre de propriétés intéressantes du canal, qui nous ont conduits à adapter un modèle de prédiction original initialement développé pour des séries financières. Ce modèle a ensuite été appliqué avec succès aux mesures issues des campagnes avec les satellites Olympus et Syracuse.

En présence de précipitations, les séries temporelles d'affaiblissement sont des processus proches d'une marche aléatoires. Elles sont liées aux propriétés statistiques des précipitations, qui sont elles mêmes fortement influencées par les turbulences de l'atmosphère : forte intermittence, non-stationnarité, non-linéarité et invariance d'échelle[25]. On observe une réelle ressemblance (du point de vue statistique) entre les séries temporelles d'affaiblissement et le comportement du cours de la bourse ou des taux de change. Il a été démontré que les séries financières ont des propriétés statistiques proches de celles des processus turbulents[26]. Le modèle ARCH (Autoregressive conditional heteroskedasticity) développé par Engle[27], puis généralisé par Bollerslev[28] (modèle GARCH) est capable de modéliser les propriétés de base de nos séries temporelles telles que la distribution non-Gaussienne des incréments et le regroupement des périodes de forte volatilité. De plus, ce type de modèle statistique a déjà permis de modéliser d'autres processus géophysiques liés aux turbulences, tels que la vitesse du vent[29], le débit des rivières[30], ainsi que le trafic internet[31]. Le principe de base d'un tel modèle est de modéliser la variance de l'erreur de l'estimation à l'aide d'un modèle ARMA.

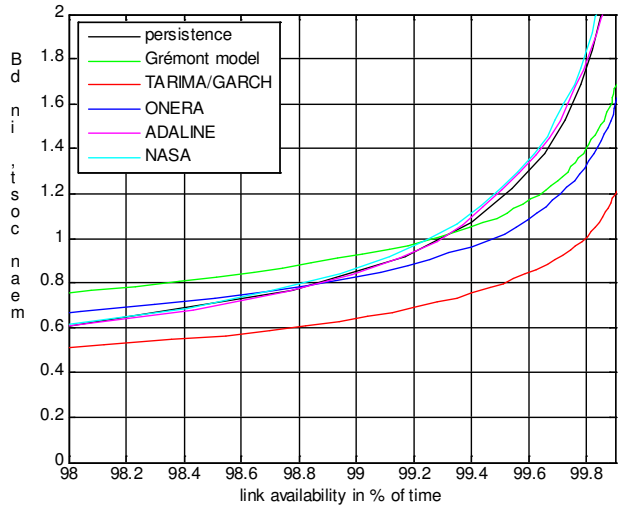


Figure 13 : Marge moyenne en fonction de la disponibilité obtenue pour différents modèles (données Olympus à 20 GHz)

[25] Peters, O., C. Hertlein, et K. Christensen, 2002. A complexity view of rainfall. Phys. Rev. Lett., 88, 018701, 1-4.
[26] Ghashghaie, S., Breymann W., Peinke J., Talkner P., et Dodge Y., 1996. Turbulent cascades in foreign exchange markets. Nature, 381, pp. 767 – 770.
[27] *Robert F. Engle. "Autoregressive Conditional Heteroscedasticity with Estimates of Variance of United Kingdom Inflation", Econometrica 50:987-1008, 1982.*
[28] *Tim Bollerslev. "Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity", Journal of Econometrics, 31:307-327, 1986.*
[29] *Ewing, B.T., B.J. Kruse, et J.L. Schroeder, 2005. Time series analysis of wind speed with time-varying turbulence. Environmetrics, 17(2), pp. 119-127.*
[30] *Wang W., P. Van Gelder, J.K. Vrijling et J. Ma, 2005. Testing and modelling autoregressive conditional heteroskedasticity of streamflow processes. Nonlinear Processes in Geophysics, 12, pp. 55–66.*

Il est alors possible de calculer un majorant de l'affaiblissement pour un niveau de probabilité donné. Finalement, le modèle global est du type TARIMA (Threshold Auto Regressive Integrated Moving Average) – GARCH, dans lequel la partie TARIMA permet d'obtenir une estimation de la valeur prédite de l'affaiblissement et la partie GARCH sa variance. Ce modèle développé initialement pour un horizon de prédiction de un échantillon a ensuite été étendu à un horizon quelconque. L'ensemble du modèle est présenté en détail dans Montera [2007]. La comparaison aux modèles existants (ONERA[32], NASA[33], Adaline[34], ARMA adaptatif[35] à partir de données du canal 20 GHz de la campagne Olympus montre que ce nouveau modèle permet d'améliorer nettement la prédiction par rapport aux modèles existants.

Application – Il s'agit de prédire avec un horizon d'une dizaine de secondes l'affaiblissement de la voie montante d'une liaison Terre – satellite à 44 GHz à partir de la mesure de l'affaiblissement à 20 GHz sur la voix descendante. En télécommunication spatiale, la voix montante utilise toujours une fréquence plus élevée que la voix descendante. En effet, plus la fréquence utilisée est élevée, plus elle est sensible aux conditions météorologiques. Il est plus simple de compenser l'affaiblissement atmosphérique à partir du sol plutôt qu'à bord d'un satellite (source d'énergie « illimitée », taille et poids des équipements moins critiques). Comme cela a été expliqué dans la partie application de la rubrique « T2 influence de la microphysique de la pluie sur l'affaiblissement » les systèmes de transmission peuvent utiliser la mesure de l'affaiblissement de la voix descendante pour estimer celui de la voix montante. A partir des travaux cités précédemment nous avons couplé notre modèle de similitude en fréquence avec le modèle de prédiction décrit ci-dessus. Cet ensemble permet de prédire l'affaiblissement de la voie montante avec un horizon de quelques secondes à partir de celui mesuré sur la voie descendante. Ce modèle est à notre connaissance le seul modèle qui permette en temps réel de prédire l'affaiblissement à une fréquence F_2 à partir de la mesure à une fréquence F_1 en prenant en compte l'ensemble des composants atmosphériques. La comparaison avec d'autres modèles est donc pour l'instant impossible. Il a été testé avec les données Olympus à 20 et 30 GHz [Montera, 2007], puis avec les données de l'expérience Syracuse [Montera 2009] à 20 et 44 GHz qui est détaillée ci-après. Suite à cette étude, j'ai été contacté par la société Thales en vue d'une implantation de la méthode dans un Modem satellite. Une phase de test est en cours.

---

[31] *Zhou B., D. He, et Z. Sun, 2006. Traffic modeling and prediction using ARIMA/GARCH model. Proc. of 2nd EuroNGI Conference on Next Generation Internet Design and Engineering, 2006.*

[32] *M.M.J.L. van de Kamp: "Short-term prediction of rain attenuation using two samples", Electronics Letters, vol.38 (23), pp.1476-1477, 2002.*

[33] *R.M. Manning: "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. Vol. 8, pp. 11-30.*

----------A statistical rain attenuation prediction model with apllication to the Advanced Communication Technology Satellite Project, part III: a stochastic rain fade control algotihm for satellite link power via nonlinear markov filtering theory", NASA TM-100243, 1991.

[34] *A.P. Chambers & L.E. Otung: "Neural network approach to short-term fade prediction on satellite links", Electronics Letters, 10th November 2005, Vol. 41, No. 23.*

[35] *B. Grémont, M. Philip, P. Galois and S. Bate: "Comparative analisys and Performance of two Predictive Fade Detection Schemes for Ka-band Fade Countermeasures", IEEE Journal on selected areas in communications, vol.17, No. 2, Feb. 1999.*

Travaux d'expertise - l'expérience Syracuse 3

Cadre : contrat d'expertise et de recherche avec CELAR/DGA, cf. notice, contrats 14 & 15

J'ai participé de façon active à la préparation de l'expérience EXPRESS destinée à l'étude du canal à 20 et 41 GHz en zone tropicale[36]. Suite à l'explosion au décollage de la fusée Ariane V (vol 157) au mois de décembre 2002, le satellite français STENTOR n'a pu être placé en orbite et l'expérience EXPRESS a été stoppée. Des moyens financiers importants avaient été débloqués par le CELAR/DGA en vue de cette expérience, comme le développement d'une station de réception et l'acquisition d'un radiomètre micro onde. Nous avons proposé au CELAR de réutiliser l'ensemble des équipements pour réaliser une nouvelle expérience à partir du satellite militaire Syracuse 3A. Cette expérience comportait une nouveauté par rapport aux expériences passées (Olympus, ITALSAT) car ce satellite de télécommunication ne possède pas de balises émettrices à différentes fréquences. Nous avons proposé d'utiliser les répéteurs disponibles à bord qui permettent de recevoir des signaux à 44 GHz émis depuis trois sites distants (Rennes, Chartres et Carcassonne) et réémis à 20 GHz par le satellite en direction de ces mêmes sites (fig. 14). Bien que l'usage de répéteurs complique quelque peu la chaîne de traitement (Composition de l'affaiblissement à 44 GHz sur la voie montante et de l'affaiblissement à 20 GHz sur la voie descendante) les données obtenues sont de qualité suffisante. Mon rôle dans ce travail d'expertise a été multiple : (i) validation des différentes méthodes de traitement et de calibration, notamment celles relatives au radiomètre hyperfréquence et au spectropluviomètre, (ii) calibration des appareils précédemment cités, (iii) vérification de la qualité des affaiblissements obtenus et alerte auprès du CELAR si nécessaire, (iv) amélioration des méthodes de calibration. Cette expérience qui va se prolonger jusqu'à décembre 2009 permet ainsi de collecter prés 30 mois de mesures d'affaiblissement, de températures de brillance et de distributions de taille de gouttes, qui seront à termes disponibles pour la communauté scientifique.

[36] *Lemorton J, L. Castanet , V. Huot , T. Marsault, A new opportunity for EHF propagation experiments: the EXPRESS campaign with the satellite STENTOR, International Journal of Satellite Communications, Propagation Special Issue, Volume 19 Issue 3, Pages 347 – 362, May 2001*

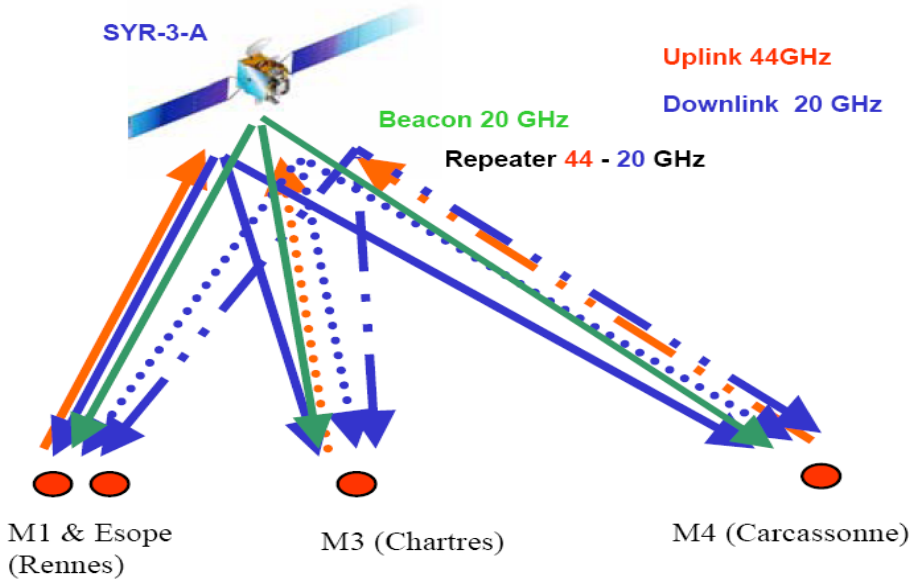


Figure XX : Synoptique de l'expérience Syracuse



Figure 14 : Station Esope et M1, expérience Syracuse

AXE 4: MODELISATION DE LA VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DE LA PLUIE A PETITE ECHELLE

Cadre: Thèse de Louis de Montera, Thèse de Sébastien Verrier

Article fourni n°5

Contexte - Nous avions pris le parti dans l'étude précédente de modéliser directement l'affaiblissement dû à l'atmosphère. La méthodologie adoptée ici est différente, il s'agit de s'intéresser à la variabilité des précipitations à petite échelle en vue de clarifier le lien entre les précipitations et l'affaiblissement ou avec la réflectivité radar. Les travaux entrepris ont donc pour vocation à terme de mieux représenter la variabilité spatio-temporelle de la pluie à petite échelle tant pour des études dans le domaine des télécommunications qu'en télédétection.

L'idée de se focaliser sur la petite échelle provient de notre expérience dans le domaine de la propagation troposphérique pour les télécommunications spatiales. Le volume troposphérique contenant la liaison en présence de pluie est une portion d'ellipsoïde de quelques kilomètres de longueur et dont la section n'excède pas quelques centaines de mètres de diamètre. Une telle géométrie implique une vision spatiale à très petite échelle des précipitations, de l'ordre de la dizaine de mètres si on souhaite représenter correctement les effets de la pluie sur la liaison. Cette remarque en appelle une autre concernant l'évolution temporelle du canal. La présence du vent, des courants verticaux et plus généralement des différentes masses turbulentes implique une évolution temporelle des systèmes pluvieux. En prenant par exemple une vitesse moyenne horizontale de vent de l'ordre de 10 m/s, c'est-à-dire du même ordre de grandeur que la résolution spatiale, on en déduit qu'il est nécessaire de travailler avec une résolution temporelle de l'ordre de la seconde afin de ne pas sous échantillonner le processus et pouvoir ainsi caractériser correctement l'évolution temporelle. Ces remarques sont confirmées par les nombreuses mesures dont nous disposons et celles disponibles dans la communauté, et qui montrent que d'une seconde à l'autre, des variations rapides de l'affaiblissement peuvent avoir lieu au sein même d'un événement. Dans le domaine des radars météorologiques, il arrive fréquemment (pour ne pas dire tout le temps !) que l'intensité de pluie moyenne d'un pixel radar soit très différente de celles observées au sol par des mesures in situ à l'intérieur même du pixel, mettant en évidence la grande inhomogénéité spatiale de certains événements de pluie à petite échelles. Ces remarques impliquent la nécessité de se placer à des résolutions spatio-temporelles très fines et pose le problème crucial de la mesure. En effet, les instruments habituels de télédétection (radars météorologiques terrestres) ne disposent pas d'une résolution spatiale aussi fine, et leur répétitivité temporelle est de plusieurs minutes. Ce problème est bien pire pour les instruments spatiaux qui ne sont pas du tout adaptés à des résolutions spatiales aussi fines.

De façon classique, on peut aborder l'étude de la variabilité de la pluie soit par l'étude de son support, ce qui revient à étudier une suite binaire (il pleut ou il ne pleut pas), soit de façon plus complète en considérant toutes les valeurs possibles de l'intensité de pluie.

A partir de quel critère peut-on affirmer qu'il pleut ? Pour une personne qui se promène dans la rue ce sera lorsqu'elle aura le sentiment de se mouiller ! D'un point de vue scientifique on choisit habituellement un seuil arbitraire d'intensité de pluie (1 mm/h par exemple) au-delà duquel on décrète qu'il pleut. Encore faut-il disposer d'un instrument de

mesure adéquat. Nous venons de voir que les radars et les instruments spatiaux ne sont pas adaptés à une étude à une aussi petite échelle. Pour cette raison nous nous sommes focalisés dans un premier temps sur les instruments sols in situ. Les pluviomètres à auget standard délivrent une impulsion lorsque l'auget est rempli, c'est-à-dire pour une hauteur d'eau tombée de 0,2 mm, soit au bout de 12 minutes pour une intensité de 1 mm/h. De même pour une pluie de 10 mm/h, l'appareil fournira une impulsion toutes les 72 secondes alors que cet intervalle passera à 7,2 secondes pour une pluie de 100 mm/h. Cette résolution temporelle variable n'est pas toujours adaptée à notre problématique. Aussi, nous lui préférerons le spectropluviomètre bi-faisceaux qui permet une résolution temporelle fixe quelle que soit l'intensité de pluie, et dont la résolution temporelle peut être choisie par l'utilisateur.

Durant les dernières décennies les avancées dans le domaine des turbulences et des cascades multiplicatives ont permis de développer de nouveaux modèles basés sur l'invariance d'échelle et les multifractales (cf. Veneziano et al[37], Over & Gupta[38], Mazzarella[39], Deidda[40]). Ces modèles ouvrent la voie à une description plus réaliste de la pluie, car ils prennent en compte le lien étroit entre précipitations et turbulences de l'atmosphère. L'analyse multifractale repose sur l'hypothèse qu'il est possible d'exprimer la probabilité qu'un processus Φ_λ, représenté à une résolution spatiale ou temporelle λ, dépasse un certain seuil λ^γ : $\Pr(\Phi_\lambda > \lambda^\gamma) \propto \lambda^{-c(\gamma)}$, ou de façon analogue en terme de moment d'ordre q (Schertzer et al.[41]) $<\Phi_\lambda^q>=\lambda^{-K(q)}$. L'exposant $c(\gamma)$ est appelé fonction de co-dimension et K(q) fonction d'échelle des moments. Le terme γ est le seuil de singularité, il permet de définir le seuil indépendamment de la résolution λ.

La prise en compte de la non stationnarité du processus nous a conduit à considérer un processus stationnaire Φ intégré fractionnairement à l'ordre H >0. Soit dans le cas d'une série temporelle d'intensité de pluie R à la résolution Δt:

$$\left|\Delta R(\Delta t)\right| \approx \Phi_\lambda \Delta t^H$$

On montre que lorsque H est non entier, le processus est du type mémoire longue. Parmi ces modèles nous avons opté durant la thèse de Monsieur de Montera pour les Multifractales Universelles associées au Fractionally Integrated Flux (FIF) développé par Schertzer & Lovejoy[42-43]. Ce modèle a été choisi pour ses bases théoriques solides. Il a déjà été appliqué à une large variété de phénomènes, tel que la radiance des nuages[44], la couleur de l'océan[45] ou

---

[37] Veneziano, D., R.L. Bras, et J.D. Niemann, 1996. Nonlinearity and self-similarity of rainfall in time and a stochastic model. J. Geophys. Res., 101, 26371–26392.

[38] Over T.M., et V.K. Gupta, 1996. A space–time theory of mesoscale rainfall using random cascades. J. Geophys. Res., 101, 26319–26331.

[39] Mazzarella, A., 1999. Multifractal dynamic rainfall processes in Italy. Theor. Appl. Climatol., 63, 73–78.

[40] Deidda, R., 2000. Rainfall downscaling in a space–time multifractal framework. Water Resour. Res., 36, 1779–1794.

[41] Schertzer, D., S. Lovejoy, et P. Hubert, 2002. An introduction to stochastic multifractal fields. Mathematical Problems in Environmental Science and Engineering, A. Ern and L. Weiping (eds.), Series in Contemp. Appl. Math., vol. 4, Higher Education Press, 106-179.

[42] Schertzer, D., et S. Lovejoy, 1987. Physically based rain and cloud modeling by anisotropic, multiplicative turbulent cascades. J. Geophys. Res., 92, 9692-9714.

[43] Schertzer, D., et S. Lovejoy, 1997. Universal Multifractals do Exist! J. Appl. Meteor., 36, 1296-1303.

[44] Lovejoy, S., et D. Schertzer, 2006. Multifractals, cloud radiances and rain, J. Hydrol., 322, 59-88.

le cours de bourse[46]. En ce qui concerne la pluie, ce modèle a été testé avec des données expérimentales tels que des séries de taux de pluie mesurées avec des pluviomètres, des images radar, et plus récemment avec des données satellitaires[47]. Ce modèle caractérise le processus au moyen de trois paramètres fondamentaux α, C_1, H, représentant respectivement l'indice de multifractalité, la dispersion du niveau moyen, et la non stationnarité du champ.

La principale différence entre les études précédemment citées et la notre réside dans l'échelle avec laquelle sont étudiés les phénomènes. La plupart des études précédentes ont été réalisées dans les domaines de l'hydrologie ou de la météorologie avec des échelles spatiales ou temporelles bien plus importantes (jour, heure, kilomètre ou plus) que celles auxquelles nous nous intéressons. Ce passage à la micro-échelle a nécessité en premier lieu de confronter les nouveaux paramètres avec ceux de la littérature estimés à plus grande échelle.

Travaux –Nous avons mené deux types d'analyse durant les thèses de Louis de Montera et de Sébastien Verrier : des analyses intra événement et des analyses sur des séries longues de plusieurs mois.

Les analyses intra événement correspondent à un seul événement (mesuré en 1D ou 2D) et contiennent peu de valeur nulle de l'intensité de pluie. Elles ne rendent pas compte de support du phénomène. Elles permettent par contre de caractériser l'événement. Les différentes analyses multifractales 1D effectuées à partir du spectropluviomètre ont fourni les valeurs moyennes suivantes: α=1.7, C_1=0.13. H=0.53. Nous avons mis en évidence en comparant les analyses de trois jeux de données géographiquement éloignés les uns des autres (France, USA, Bénin) et mesurés à différentes époques (2001, 2002, 2006), que les valeurs de α et C_1 ont des dispersions très faibles et sont identiques quelque soit le jeu de données. Une dispersion de H entre 0.4 et 0.6 a cependant été observée et il est à l'heure actuelle impossible d'affirmer si H est constant ou non, compte tenu de la difficulté de son estimation et de la variance importante de son estimation qui en découle. On peut toutefois affirmer que le paramètre H est non nul et que le processus correspond bien à un processus de type FIF. Ce résultat est cohérent avec Harris et al.[48] qui ont utilisé des données haute résolution (temps d'intégration de 15 s), mais il est en contradiction avec la plupart des autres études qui ont estimé H=0 avec des données à plus faible résolution (temps d'intégration de 1 jour, Tessier et al.[49],[50], Hubert et al.[51], Ladoy et al.[52], Fraedrich & Larnder[53],

---

[45] Lovejoy, S., D. Schertzer, Y. Tessier, et H. Gaonac'h, 2001. Multifractals and resolution independent remote sensing algorithms: the example of ocean colour. Inter. J. of Remote Sensing, 22, 1191-1234.

[46] Schmitt, F., D. Schertzer, et S. Lovejoy, 1999. Multifractal analysis of foreign exchange data. Appl. Stoch. Models and Data analysis, 15, 29-53.

[47] Lovejoy, S., et D. Schertzer, 2008. Turbulence, rain drops and the l1/2 number density law. New J. Phys. (in press).

[48] *Harris, D., M. Menabde, A. Seed, et G. Austin, 1996. Multifractal characterization of rain fields with a strong orographic influence. J. Geophys. Res., 101, 26405–26414.*

[49] Tessier, Y., S. Lovejoy, et D. Schertzer, 1993. Universal multifractals in rain and clouds: theory and observations. J. Appl. Meteor., 32, 223-250.

[50] Tessier, Y., S. Lovejoy, P. Hubert, D. Schertzer, et S. Pecknold, 1996. Multifractal analysis and modeling of rainfall and river flows and scaling, causal transfer functions. J. Geophy. Res., 101, 26427-26440.

[51] Hubert, P., Y. Tessier, P. Ladoy, S. Lovejoy, D. Schertzer, J.P. Carbonnel, S. Violette, I. Desurosne, et F. Schmitt, 1993. Multifractals and extreme rainfall events. Geophys. Res. Lett. 20, 931–934.

ou de l'ordre de 10mn, Lima & Grasman[54], Hubert et al.[55]). Durant la thèse de Monsieur Sébastien Verrier, une étude similaire en 2D de cartes radars météorologiques nous a permis de montrer que les paramètres α et $C1$ obtenus sont quasiment identiques à ceux estimés dans le cas 1D [Verrier, 2008].

Le second type d'analyse menée a été de considérer des séries temporelles d'intensité de pluie « longues », c'est à dire de plusieurs mois, voire d'une année. La particularité de ce type de séries est de comporter une majorité de valeurs nulles (il pleut environ 5% du temps). Nous avons mis en évidence que les paramètres multifractals étaient modifiés de façon significative et que lorsque la résolution temporelle des mesures est supérieure à une heure, le paramètre H est proche de zéro. Ce constat explique la raison pour laquelle le paramètre H déduit de l'analyse intra événement, c'est-à-dire pour des résolutions temporelles très inférieure à l'heure est différent de celui trouvé dans la plupart des autres travaux qui ont utilisés des mesures ayant une résolution supérieure à l'heure. Ce constat pose la question de la capacité du modèle de Multifractal universel à représenter les processus intermittents [Montera, 2009.].

Un nouveau modèle, appelé TFIF (Thresholded FIF), a été développé à partir du modèle FIF afin de reproduire la variabilité des précipitations à l'échelle de l'événement tout en reproduisant un support en accord avec l'expérience. Il permet de conserver les « bons » paramètres multifractals ainsi que la dimension fractale du support, et donc la cassure de l'invariance d'échelle observée aux alentours d'une heure. Ce modèle qui peut être utilisé aussi bien sur des séries temporelles que sur des cartes de précipitations (fig. 15 et 16) ouvre des perspectives très intéressantes pour l'analyse des champs de pluie sur une large gamme d'échelle temporelle ou spatiale. Ces perspectives seront discutées dans la dernière partie de ce document.

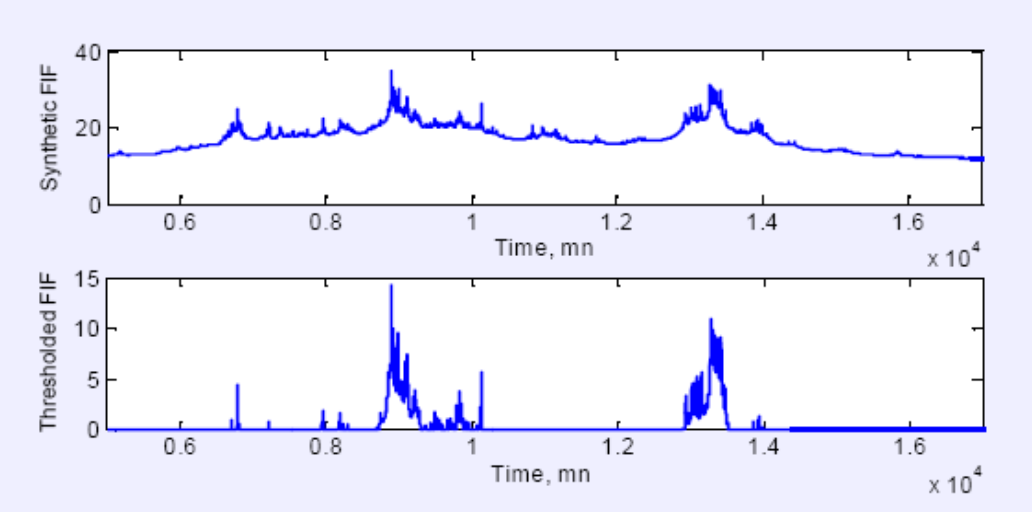


Figure 15 : Exemple de série temporelle d'intensité de pluie générée par le modèle multifractal TFIF 1D

[52] Ladoy, P., F. Schmitt, D. Schertzer, et S. Lovejoy, 1993. Variabilité temporelle des observations pluviometriques à Nîmes. C.R. Acad. Des. Sci. 317 (II), 775–782.

[53] Fraedrich, K., et C. Larnder, 1993. Scaling regimes of composite rainfall time series. Tellus, 45A, 289-298.

[54] de Lima, M.I.P., and J. Grasman, 1999. Multifractal analysis of 15-min and daily rainfall from a semi-arid region in Portugal. J. Hydrol., 220, 1–11.

[55] Hubert, P., A. Biaou, et D. Schertzer, 2002. De la Méso-Echelle à la Micro-Echelle: Désagrégation/Agrégation Multifractale et Spatio-Temporelle des Précipitations. Report, Armines-EdF.

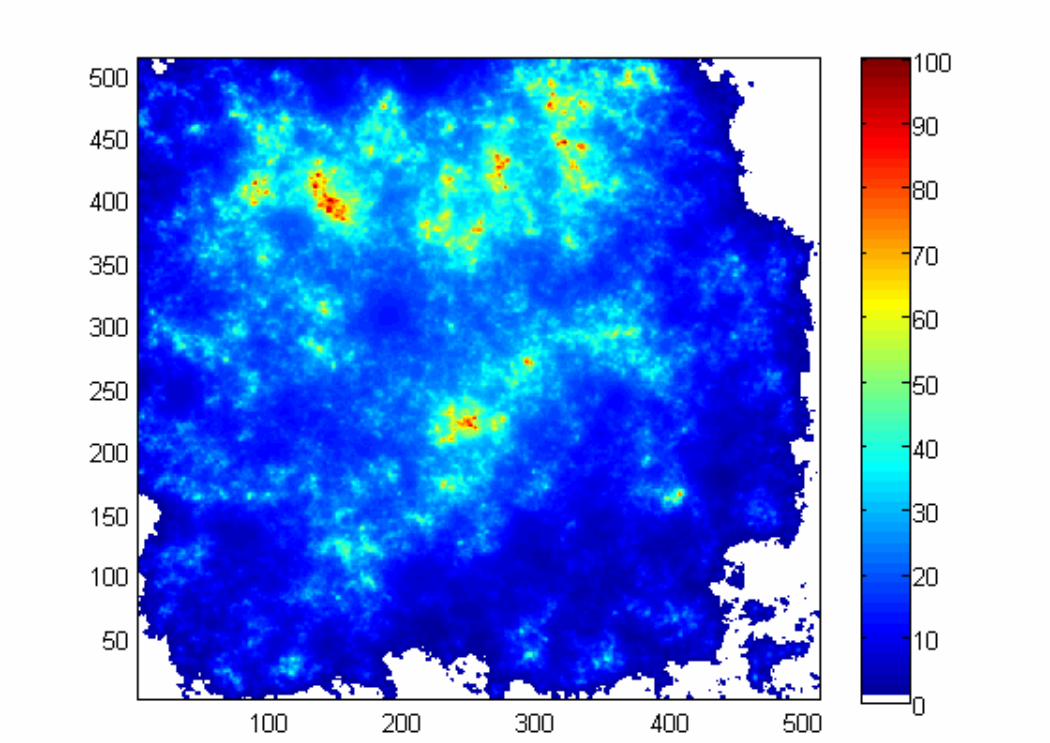


Figure 16 : Exemple de champ de pluie généré par le modèle multifractal TFIF 2D

6. BILAN DE MES TRAVAUX

En tant qu'enseignant chercheur dans un laboratoire à forte composante expérimentale, je me suis efforcé à partager mon activité entre développement expérimental, campagnes de mesure et modélisation statistique en vue d'améliorer ou de développer des modèles liés pour l'essentiel à la thématique propagation des ondes dans l'atmosphère et à l'observation des précipitations in situ.

Je pense avoir apporté ma contribution concernant les modèles de similitude en fréquence instantanés en faisant apparaître les paramètres microphysiques de pluie dans le modèle. De même lorsque je me suis intéressé aux fréquences plus élevées (44 GHz), j'ai mis en évidence la nécessité de prendre en compte les différentes contributions (gaz, nuage et pluie) dans la modélisation du coefficient de similitude, ce qui nous a conduit à développer un modèle neuronal de séparation des effets.

Un autre aspect innovant a été de montrer la faible prédictibilité des séries temporelles d'affaiblissement et qu'en conséquence il est vain d'essayer de prédire l'affaiblissement à l'aide de la seule connaissance des valeurs passées. Nous avons par contre montré que la variance de l'erreur était beaucoup plus prédictible ce qui nous a conduit à introduire des modèles statistiques issus du monde des finances et basées sur une modélisation de type GARCH. Grâce à cette modélisation, des marges de puissance optimales peuvent être estimées.

Enfin, dans le domaine de la modélisation des précipitations, les analyses fines que nous avons pu faire grâce au spectropluviomètre bi-faisceaux ont mis en évidence des différences notables avec certains auteurs concernant l'estimation de certains paramètres multifractals universels. Nous avons identifié que l'intermittence de la pluie est à l'origine de ces différences et avons proposé une modélisation qui la prend en compte.

Les travaux présentés illustrent à quel point les précipitations sont issues de processus complexes. La prise en compte lors de travaux de modélisation de son hétérogénéité et de son intermittence est fondamentale. De même il me semble maintenant évident que d'un point de vue spatial une vision 2D des précipitations (vision dans un plan horizontal) est tout à fait insuffisante compte tenu des échelles que nous considérons et pour lesquelles la turbulence 3D doit être prise en compte[56]. Pour cette raison, je compte compléter la mesure in situ des précipitations avec des mesures radars de profils verticaux co-localisés qui devrait permettre ainsi de mieux cerner l'évolution de la microphysique durant sa chute.

[56] *En effet, l'épaisseur de la couche de pluie n'est pas négligeable devant les dimensions horizontales considérées*

Prospectives et Projets de Recherche

7. PROSPECTIVES ET PROJETS DE RECHERCHE

7.1. CADRE

Cette dernière partie concerne les thématiques que j'aimerais traiter dans les années à venir. Le cadre de travail actuel est le laboratoire LATMOS au sein de l'équipe SPACE. Mes travaux s'insèreront dans diverses collaborations et projets, la liste ci-dessous en énumère quelques uns :

- HYMEX (HYdrological cycle in the Mediterranean Experiment) : Projet international visant à une meilleure compréhension du cycle hydrologique autour du bassin méditerranéen, en particulier en ce qui concerne les événements météorologiques intenses et les crues éclairs. Nous avons proposé le déploiement d'un réseau de capteurs de pluie utilisant les liaisons satellites en bande Ku permettant des mesures en continues avec un échantillonnage temporel de quelques secondes (cf. 7.3 rubrique « mise au point d'un nouveau capteur »).
- Appel à idée CNES « systèmes orbitaux 2010 »
- ANR : Dans le cadre d'un projet de développement d'un système de détection précoce de précipitations intenses des collaborations avec les sociétés BRL ingénierie[58] et DSA[59] ont été initiées. Dans cette optique, un financement a été demandé en 2009 auprès de l'Agence Nationale de la Recherche lors de l'appel d'offre intitulé « risques naturels : compréhension et maîtrise[60] ». A défaut, une demande sera déposée dans le cadre d'une ANR blanche en 2010.
- Transfert de savoir faire avec la société THALES : il s'agit d'implémenter dans un modem pour les liaisons Terre – satellite la méthode de prédiction des « fading » développée durant la thèse de Monsieur de Montera.
- Coopération inter-universitaire franco-tunisienne, « Estimation et Cartographie des événements pluvieux extrêmes du Grand Tunis »
- Je collabore depuis de nombreuses années avec l'équipe MMSA du laboratoire LOCEAN sur le thème de la modélisation statistique et ses applications à l'environnement. Ces collaborations ont pour but de créer une synergie dans ce domaine pour le développement ou l'utilisation de nouvelles méthodes, de logiciels spécifiques, mais aussi de collaborer à la formation d'étudiants ou de chercheurs à certaines méthodes statistiques.

La modélisation des processus s'appuie en grande partie sur la mesure et donc sur le développement instrumental. Pour cette raison, en amont des travaux de modélisation j'ai toujours participé de prés ou de loin à la mise au point d'instruments, au déploiement de campagnes de mesure ainsi qu'au prétraitement des données. Je compte poursuivre cette démarche.

[58] *http://brli.brl.fr/*
[59] *http://www.dsatec.org/*
[60] *Projet DAPPI (Détection et Alerte Précoce des événements Précipitants Intense)*

7.2. MESURE ET CARACTERISATION DES PRECIPITATIONS

Les précipitations sont un maillon important du cycle de l'eau. Elles conditionnent en grande partie la vie sur Terre et jouent de ce fait un rôle important dans nos sociétés. De l'agriculture aux inondations en passant par la planification de projets d'aménagement de zones d'habitation, d'axes routiers, il est primordial de pouvoir estimer la pluviométrie d'une zone géographique sur des échelles spatio-temporelles plus ou moins importantes suivant la problématique à traiter. Les enjeux concernant l'estimation des précipitations et les moyens à mettre en œuvre pour faire face aux conséquences éventuelles sont multiples. Citons par exemples les inondations qui sont certainement les catastrophes les plus dévastatrices tant sur le plan humain que matériel. L'observation des précipitations, phénomènes précurseurs de ces désastres, est donc un des éléments importants des systèmes d'alerte. Il est à noter qu'il existe un grand nombre de zones du globe non équipées de radars météorologiques, du fait des contraintes techniques (relief tourmenté) ou des contraintes économiques (pays émergents), et ne disposant pas des informations à l'échelle locale pourtant essentielles à la prévision des crues.
Un autre exemple montrant l'importance de la mesure des précipitations concerne l'assimilation des informations relatives aux précipitations dans les modèles de prévision météorologique. Ceux-ci sont fortement pénalisés par le manque d'observations disponibles concernant les précipitations. De plus, l'incertitude de la prévision, aussi bien en terme de localisation que d'intensité, est par ailleurs très liée à l'échelle de modélisation.
Enfin, dans le domaine de l'hydrologie, les hydrologues développent depuis longtemps des outils statistiques du type courbes Intensité- Durée – Fréquence (courbes IDF) qui permettent de relier l'intensité des précipitations à leur durée pour un temps de retour[61] donné. Ces courbes estimées pour une zone bien précise peuvent servir en entrée des modèles hydrologiques et permettent par exemple d'estimer des débits de crue. Bien que très utiles elles se révèlent parfois insuffisantes car elles ne prennent pas en compte la variabilité à petite échelle des précipitations. Il est en effet connu que cette variabilité influence de façon importante le comportement hydrologique d'un bassin versant. La difficulté de prendre en compte cette variabilité provient de la difficulté à mesurer avec une échelle suffisamment fine les phénomènes. En effet, la mesure de la pluviométrie en hydrologie est principalement réalisée au moyen de pluviomètres ou de pluviographes, le passage des mesures ponctuelles des précipitations à une estimation spatiale horaire ou journalière est un problème difficile et encore largement ouvert compte tenu de l'hétérogénéité et de l'intermittence des précipitations.

De façon générale, que ce soit du point de vue de l'hydrologie, de la météorologie, des systèmes de télédétection ou des systèmes de télécommunication, la variabilité spatio-temporelle des précipitations se pose quelle que soit l'échelle spatiale (continent, pays, région ou zone localisée) ou temporelle (annuelle, journalière ou « instantanée ») considérée. Mes futurs projets porteront directement sur cette problématique appliquée aux différents domaines cités ci-dessus, on pourrait l'intituler : « caractérisation des précipitations à petite

[61] *Temps de retour : intervalle de temps moyen entre un événement d'une certaine intensité et l'événement suivant ayant une intensité au moins égale*

échelle pour la télédétection, les télécommunications et l'hydrologie ». Cette thématique implique une approche pluridisciplinaire faisant appel à la modélisation et à l'observation, mais aussi au développement instrumental ou à la fusion de données. Il est à noté que l'observation des événements extrêmes est particulièrement délicate en raison de leur violence même et de leur rareté, impliquant des observations sur des laps de temps importants avec des instruments adaptés à ce type d'événements qui sont la plupart du temps associés à des conditions de mesures difficiles (vent violent, coupure d'électricité par exemple).

Ma première approche de la caractérisation des précipitations a concerné la mesure et l'étude de sa microphysique dans un contexte télécom afin d'étudier les relations entre les affaiblissements à différentes fréquences. Cette approche faisait l'hypothèse d'une certaine stationnarité spatio-temporelle du processus dans le volume sondé, et durant le temps d'intégration de la mesure. Cependant, les caractéristiques des précipitations telles que son intermittence ou sa forte inhomogénéité font que cette hypothèse n'est pas forcément vérifiée. Des études ont mis en évidence qu'en régime fortement non stationnaire les relations habituelles reliant les divers moments de la DSD (intensité de pluie, réflectivité radar, …) ne sont pas valides[62]. Pour cette raison nous avons ensuite développé dans le cas de l'intensité de pluie un modèle stationnaire intégré fractionnairement auquel on applique un seuil (modèle TFIF[63])[Montera 2009] et qui permet de prendre en compte la non stationnarité et l'intermittence des précipitations. Il s'agit alors d'identifier le processus stationnaire sous jacent ainsi que son « niveau » d'intégration fractionnaire. Le processus sous jacent présente des propriétés d'invariance d'échelles et peut être modélisé à l'aide de cascades multiplicatives. Comme la quasi totalité des modèles, cette modélisation rend compte de l'intensité de la pluie R mais ne fournit aucune information sur les paramètres microphysiques. Il serait intéressant de poursuivre cette démarche en considérant non plus R, qui est un paramètre intégré du processus, mais directement le processus, c'est-à-dire sa distribution volumique de taille de gouttes.

L'étude des propriétés d'invariance d'échelle de R ou de la DSD nécessite de disposer de données sur de larges échelles temporelle ou spatiale. Il nous a paru intéressant de compléter la mesure ponctuelle (pluviomètre ou disdromètre) ou la mesure à plus grande échelle (radar météorologique) par une mesure « intermédiaire ». Le second volet de cette prospective est donc consacré au développement d'un capteur hyperfréquence permettant d'estimer les précipitations avec une haute résolution temporelle (quelques secondes) pour une résolution spatiale « intermédiaire ». Le premier prototype développé au laboratoire a permis de valider le concept. A terme, plusieurs prototypes seront élaborés en relation avec les projets d'ANR et HYMEX. Les mesures fournies serviront à l'étude des précipitations à petite échelle en complément des mesures fournies par des spectropluviomètres et les radars météorologiques présents (projet HYMEX). Ce capteur est également testé dans un tout autre contexte qui concerne la détection précoce des événements intenses pouvant provoquer des inondations du type crue éclair (projet ANR) sur des zones à risque dépourvues de couverture radar. Enfin, j'envisage également d'utiliser ce type de capteur dans le domaine

[62] *Jameson A.R. & al., When rain is steady ?, Journal of Applied Meteorology, vol. 41, 1, 2002*
[63] *Threshold Fractionally Integrated Flux*

des télécommunications spatiales afin de prédire à l'horizon de quelques minutes la dégradation apportée par la pluie d'une liaison satellite.

7.3. PROSPECTIVES ET PROJETS A VENIR

ETUDE DE L'INVARIANCE D'ECHELLE DES CHAMPS DE PLUIE ET DE LEURS MICROPHYSIQUES

Les cascades multiplicatives permettent de représenter des processus possédant des propriétés d'invariance d'échelle multifractales. Elles ont été développées dans le cadre de la théorie des turbulences dans laquelle on décrit le passage d'une échelle de turbulence vers une échelle plus petite jusqu'à arriver à l'échelle de dissipation. Cette représentation conduit à une hiérarchie de tourbillons imbriqués de plus en plus petits[64] et donne un processus qui ne dépend pas de l'échelle considérée, induisant ainsi des propriétés d'invariance d'échelle. Dans le cas des précipitations, celles-ci sont soumises aux turbulences et possèdent elles aussi des propriétés d'invariance d'échelle. Les cascades multiplicatives nous paraissent donc adaptées pour la modélisation des précipitations aussi bien en 1D, 2D ou 3D car elles permettent de bien représenter la variabilité des précipitations en fonction de l'échelle considérée.
L'analyse multifractale avec des cascades multiplicatives de séries de taux de pluie à haute résolution collectées à l'aide du spectropluviomètre nous a conduit durant les travaux de thèse de Monsieur de Montera à développer un modèle capable de reproduire la variabilité temporelle des précipitations à des échelles allant de quelques secondes à quelques semaines. Ce modèle inclut une brisure de l'invariance d'échelle provoquée par l'intermittence pluie-non pluie à une échelle de l'ordre d'une heure. La prise en compte de l'intermittence pluie-non pluie, dont l'influence a longtemps été sous-évaluée par la communauté scientifique dans la modélisation multifractale, est essentielle afin que la modélisation et l'analyse des précipitations soient réellement indépendantes de l'échelle considérée. Les travaux en cours de Monsieur Verrier sur la modélisation multifractale des champs de pluie à partir d'images radars ont permis d'étendre cette modélisation au cas 2D (horizontal). Par ailleurs, des travaux antérieurs sur les temps d'arrivée des gouttes d'eau[65] ont montré des propriétés intéressantes qui ont conduit à la mise au point d'un simulateur de série temporelle de pluie faisant intervenir la dimension spatiale suivant un plan 2D (vertical) permettant ainsi de représenter la microphysique des précipitations[66]. Plus récemment, une autre étude sur la probabilité que le nombre moyen de gouttes sur un laps de temps donné dépasse un certain seuil a montré des propriétés d'invariance d'échelle[67]. Tous ces éléments tendent à démontrer qu'une modélisation permettant de décrire la variabilité de la microphysique sur une large gamme d'échelle temporelle et/ou spatiale à l'aide de modèles multifractals semble adéquate. Il s'agirait de ne plus considérer l'intensité de pluie comme étant la grandeur principale caractérisant les précipitations mais de

[64] *Richardson, L. F.: Atmospheric diffusion shown on a distanceneighbour graph, Proc. Roy. Soc., A 110, 709–737, 1926.*
[65] *J. Lavergnat and P. Golé , A Stochastic Raindrop Time Distribution Model, Journal of Applied Meteorology, vol.37, 8, 1998?*
[66] *J. Lavergnat and P. Golé, A stochastic model of raindrop release: Application to the simulation of point rain observations Journal of Hydrology, vol. 328, Issues 1-2, 30 August 2006*
[67] *M. Ignaccolo a al., The droplike nature of rain ans its invariant statistical properties, Journal of Hydrometeorology, vol.10, 2009*

considérer, soit les distributions de tailles des gouttes à différentes échelles, soit de se placer directement à l'échelle même de la goutte. Dans les deux cas, cette approche permet de disposer de la DSD à différentes échelles spatiale et/ou temporelle et donc d'en déduire n'importe quel moments de la DSD à ces mêmes échelles, c'est-à-dire d'en déduire les grandeurs usuelles telles que l'intensité de pluie, le facteur de réflectivité radar, le contenu intégré en eau liquide ou l'affaiblissement. Il s'agirait dans un premier temps d'étudier le cas 1D temporel, puis de s'intéresser au cas 2D et 3D spatial. Dans ce dernier cas, on pourrait envisager de prendre en compte les phénomènes de breakup et de coalescence des gouttes durant leur chute tels qu'ils ont été décrits dans le paragraphe « Modèle physique d'évolution du profil… » de la partie « Bilan » du document.
Cette modélisation me permettrait de réaliser diverses études, notamment :

- L'amélioration de 'estimation des précipitations au moyen de radars polarimétriques : Les nouveaux radars polarimétriques mesurent les réflectivités en polarisation horizontale et verticale ainsi que la phase différentielle, elles sont toutes trois sensibles à la microphysique. Des algorithmes spécifiques ont été développés ces dernières années par la communauté scientifique[68]. L'étude et la modélisation de la relation entre ces trois paramètres et l'intensité de pluie R à l'échelle d'un pixel radar[69] à l'aide de cette nouvelle modélisation pourraient certainement contribuer à améliorer les algorithmes de restitution des précipitations.
- Estimation des précipitations aux moyens de radiomètres spatiaux : Les relations qui lient les températures de brillance à l'intensité de pluie ne sont pas linéaires. Cette non linéarité des équations complique notablement les choses en présence d'hétérogénéité spatiale. Cela est d'autant plus vrai que le pixel est grand[70] ce qui est généralement le cas en télédétection spatiale (phénomène de beam filling). La prise en compte des propriétés d'invariance d'échelle des températures de brillance à diverses fréquences dans les algorithmes de restitution devrait permettre d'améliorer leurs performances. Cette étude est liée à la précédente dans la mesure où les propriétés d'invariance d'échelle sur la microphysique pourraient être introduites dans la présente étude.
- Etude de la propagation en bande EHF : l'influence de la microphysique sur l'affaiblissement est d'autant plus importante que la fréquence est élevée. Ainsi pour une intensité de pluie R=50 mm/h on constate une différence d'affaiblissement linéique de 1,4 dB/km à 20 GHz entre une distribution de Marshal-Palmer et une distribution de Joss convective alors que cette différence passe à 6,4 dB/km à 40 GHz. On voit ici aussi toute l'importante que revêt l'étude de la microphysique à ces fréquences pour les systèmes de télécommunications ou des systèmes opportunistes[71] liés à la prévention des catastrophes naturelles.

Une première approche pourrait consister à considérer les deux paramètres de la DSD normalisée de Testud D_m, N_o^* et de répondre aux questions suivantes : est-ce que les paramètres D_m et N_o^* possèdent des propriétés d'invariance d'échelle ? Peut-on les représenter par des cascades multiplicatives universelles ? Dans l'affirmative, quels sont leurs paramètres ? Dans l'hypothèse où les deux paramètres peuvent être représentés par des

[68] *Testud J., E. Le Bouar, E. Obligis, and M. Ali-Mehenni, 1999: The rain profiling algorithm applied to polarimetric weather radar, Journal of Atmosphere and Oceanic Technology, 17, 332-356*
[69] *Typiquement 1x1 km pour un radar météorologique terrestre, 5x5 pour le « Precipitation Radar » de TMI*
[70] *Vis-à-vis de la taille de la cellule de pluie*
[71] *Il faut l'interpréter ici comme un système utilisant une liaison radio à une autre fin que celle prévue initialement*

cascades multiplicatives universelles, existe-t-il un processus sous jacent permettant de générer simultanément les deux paramètres et qui préserve leur corrélation partielle ? L'objectif serait alors de déterminer qu'elles doivent être les propriétés de ces paramètres sachant que l'intensité de pluie déduite à partir de ces mêmes paramètres possède des propriétés d'invariance d'échelle bien précises. Les séries temporelles issues du spectropluviomètre se prêteraient bien à ce type d'étude car elles permettent de mesurer à la fois les paramètres microphysiques D_m, N_o^* mais aussi l'intensité de pluie. Dans un second temps on pourrait étendre l'étude au cas spatial (champ de pluie). Il se posera alors le problème de la mesure des paramètres microphysiques. En effet les radars météorologiques mesurent une réflectivité qui permet de remonter plus ou moins au seul paramètre intensité de pluie. L'estimation précise de la microphysique est pour l'instant un problème difficile même si les radars polarimètriques le permettent en théorie. Il s'agirait plutôt dans ce cas de vérifier si les champs de pluie générés avec les paramètres mutifractals de la microphysique estimés en 1D permettent de conserver les propriétés d'invariance d'échelle spatiale de l'intensité de pluie.
Une autre possibilité consisterait à disposer de la mesure simultanée de la microphysique en divers points géographiques. Pour cela, je compte mettre sur pied une campagne de mesure constituée d'un réseau de plusieurs spectropluviomètres placés à des distances judicieusement choisies. En complément, cette étude pourrait s'appuyer sur les mesures de plusieurs radars (CURIE [Al-Sakka 2009], version sol du radar BASTA[72]) présents sur la plateforme d'expérimentation du SIRTA[73] permettant ainsi de disposer de mesures précises des précipitations à petite échelle. Enfin, une vision à plus large échelle utilisant le radar de Météo France de Trappes complétera le dispositif.

MISE AU POINT D'UN NOUVEAU CAPTEUR DE PLUIE

Une échelle d'observation intermédiaire : L'estimation des précipitations avec la résolution spatiotemporelle souhaitée n'est pas toujours possible en raison des caractéristiques mêmes des précipitations (hétérogénéité spatiale, grande variabilité en terme de durée, de fréquence et de microphysique). Les études concernant les propriétés d'invariance d'échelle des précipitations nécessitent un nombre important d'échelles d'observation qui implique à la fois une vision globale des phénomènes sur plusieurs centaines voire milliers de kilomètres, mais aussi une vision à très petite échelle. Il va de soit qu'il n'est pas envisageable d'utiliser un seul type d'instrument couvrant un nombre aussi important d'échelle, et qu'en pratique chaque instrument possèdent sa propre gamme d'échelle d'observation, tant du point de vue spatial que temporel, plus ou moins adaptée au problème à résoudre. A titre d'exemple, l'observation des grandes échelles spatiales à l'aide des satellites d'observation permet d'obtenir des informations sur les précipitations[74] avec une échelle spatiale comprise entre quelques kilomètres et plusieurs milliers de kilomètres. Il présente cependant un inconvénient majeur à cause de sa mauvaise répétitivité temporelle (2 à 3 fois par jour)[75]. Un second exemple, choisi à l'autre bout de l'échelle concerne les pluviographes et les disdromètres qui à l'opposé des satellites possèdent une bonne résolution temporelle, mais ont une vision très ponctuelle des précipitations. Il est alors

[72] *http://www.dt.insu.cnrs.fr/rali/rali_rasta.php*
[73] *Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique : http://sirta.ipsl.polytechnique.fr/*
[74] *La mesure fiable des précipitations depuis l'espace reste pour l'instant un sujet ouvert*
[75] *On pourrait cependant améliorer la répétitivité en augmentant le nombre de satellite en orbite*

nécessaire de déployer des réseaux de pluviomètre afin d'estimer la variabilité des précipitations à petite échelle, entraînant des coûts importants dus à la location des sites et à la maintenance d'un parc d'appareil important[76]. Au delà de cet inconvénient, les cartes de précipitations obtenues à partir de tels réseaux associés à des méthodes d'interpolation plus ou moins élaborées de type krigeage présentent un aspect « lisse », c'est-à-dire qu'elles ont tendance à gommer la variabilité à petite échelle notamment les zones de fortes précipitations, inhérent au sous échantillonnage. La façon dont se comporte le ruissellement des eaux est très différente selon l'intensité des précipitations, on comprend donc que les modèles hydrologiques permettant d'estimer les débits des cours d'eau à partir du ruissellement des eaux, eux-mêmes déduits de cartes un peu trop « lisse », engendre des erreurs d'estimation importantes.

L'objectif du capteur envisagé est de permettre une observation en temps réel des précipitations en continu avec une résolution spatiale de quelques kilomètres et une répétitivité de quelques secondes. Ce système complémentaire aux moyens d'observation actuels fournira des informations pour des échelles spatiotemporelles qui ne sont pas accessibles avec les instruments d'observation traditionnels. En terme de résolution spatiale, il se situe entre la mesure ponctuelle du pluviomètre et un pixel radar (1x1 km). Il permettra donc de compléter la « panoplie » des instruments d'observation traditionnels.
Nous envisageons d'utiliser ce type de mesure en complément avec les observations traditionnelles pour approfondir l'étude de la variabilité des précipitations, et de façon plus générale l'étude des propriétés d'invariance d'échelle présentée dans la partie bilan du document.
Outre l'aspect scientifique pour l'étude des précipitations, un tel dispositif pourrait être utilisé en vue d'améliorer l'estimation des cartes de précipitation sur des zones localisées et identifiées comme à risque de quelques dizaines à une centaines de kilomètres carrés (bassin versant, zones urbaines) et de permettre ainsi de mieux de détecter d'éventuels risques de crue (crue éclair notamment). C'est dans ce contexte que nous avons des projets de collaboration avec les deux sociétés présentées au §7.1, et avons répondu à cet effet aux appels d'offre de l'ANR. De même, un projet de coopération franco-tunisienne sur ce thème à été initié.

Principe de la mesure : Les différentes études et les campagnes expérimentales de propagation Terre satellites que nous avons menées ces dernières années montrent qu'il est possible d'estimer l'intensité de pluie moyenne sur une liaison Terre satellite à l'aide de la mesure de l'affaiblissement troposphérique. De façon plus précise, il s'agit de mesurer l'affaiblissement d'une onde électromagnétique émise depuis un satellite géostationnaire et reçue en un lieu géographique donné. Cet affaiblissement permet de rendre compte de l'intensité de pluie moyenne dans un volume correspondant plus ou moins à un cône dont le sommet serait situé au niveau de l'antenne de réception et dont la base, de diamètre 100-300 mètres, serait définie par l'intersection du lobe de rayonnement de l'antenne du terminal de réception avec le sommet de la couche pluvieuse (fig. 17). La longueur au sol L de la liaison est comprise entre 0 et 8 Km en fonction de l'angle d'élévation et de l'altitude de l'isotherme zéro degré.

[76] *1 emploi technicienpour 18 à 20 stations – Ref Charte qualité de l'hydrométrie – MATE - 1998*

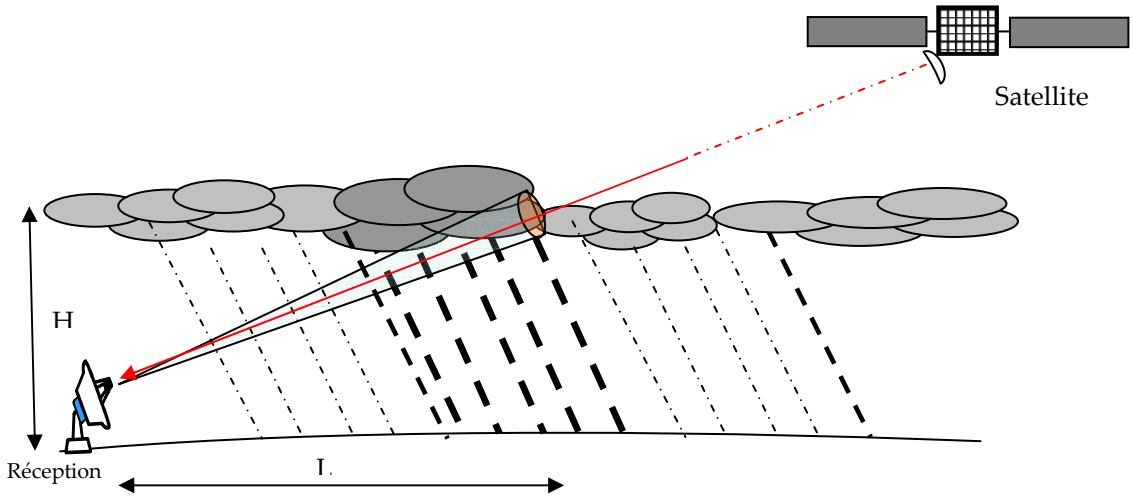


Figure 17 : Volume sondé par le capteur de pluie

Nous avons vu dans la partie bilan que les gaz et les nuages intervenaient également dans l'affaiblissement de l'onde électromagnétique. Cette remarque est particulièrement vraie pour des fréquences supérieures à 20 GHz, tandis que leur contribution reste relativement modeste aux fréquences plus basses. Il s'agit donc de choisir une bande de fréquence qui soit à la fois assez sensible à la pluie sans être trop sensible aux gaz et aux nuages, c'est-à-dire supérieure à 10 GHz et inférieure à 20 GHz. Par chance, les satellites commerciaux de télédiffusion émettent en bande Ku de 10,7 à 12,7 GHz et sont donc de bons candidats à ce projet. De plus, ils en existent un grand nombre, plus de 250, répartis (presque) tout autour de la planète (figure 18). Les premiers essais que j'ai menés sur le site même du laboratoire montrent qu'il est possible même avec un matériel de faible coût[77] (Matériel grand public en partie) de développer un capteur permettant la mesure des précipitations.

Plusieurs satellites sont visibles depuis un lieu géographique donné, il est donc possible de réaliser simultanément N mesures dans différentes directions correspondant aux N satellites considérés. Enfin le déploiement d'un tel capteur sur un nombre K (limité) de sites (2 à 3 sites) permettrait d'estimer le bilan hydrique sur

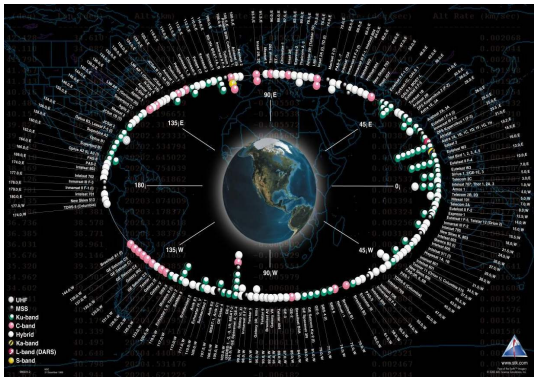


Figure 18 : Position des satellites géostationnaires

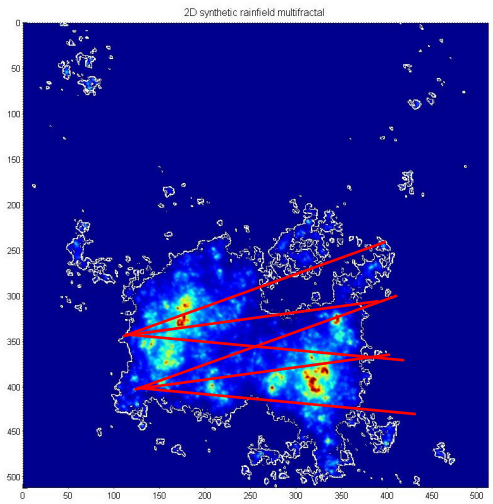


Figure 19 : Synoptique avec K=2 sites et N=3 satellites

[77] Dans le projet d'ANR risque naturel, il s'agit de développer un capteur à faible coût pouvant être déployés dans les pays dépourvus de Radars météorologiques

une zone géographique donnée (Figure 19). Il convient enfin de signaler qu'une campagne de mesure a été menée en Inde sur ce même principe[78]. Les auteurs ont bien montré la forte corrélation entre l'intensité de pluie mesurée au pied de l'antenne de réception avec celle estimée sur la liaison. Ils ont noté cependant qu'au delà de 30 mm/h la corrélation diminuait sans pour autant donner d'explication. Ce résultat parait cependant tout a fait logique dans la mesure où plus les précipitations sont intenses, plus elles sont localisées. Il est donc normal que l'intensité de pluie sur une liaison de plusieurs kilomètres soit de plus en plus différente de l'intensité mesurée en un point au fur et à mesure de l'augmentation de cette dernière.

- *Projets plus ou moins liés au capteur*

Projet de coopération franco tunisienne

Cadre : partenariat Hubert Curien (PHC) UTIQUE

Il s'agit dans un premier temps de dresser des cartes de précipitations pour des événements pluvieux extrêmes sur la région du Grand Tunis. La situation du Grand Tunis (climat méditerranéen, zone côtière, faible relief avec quelques sommets, zone urbaine) rend complexes les champs pluvieux extrêmes qui s'y développent surtout en cas de pluies convectives. Le deuxième objectif sera d'estimer les probabilités d'occurrence de ces pluies et d'élaborer des courbes Intensité- Durée – Fréquence spatialisées. Pour mener à bien ce projet, nous comptons mettre à profit l'expérience en hydrologie de l'équipe tunisienne avec celle de l'équipe de française sur l'analyse des propriétés d'invariance d'échelle et sur la mesure en hyperfréquence.
Nous prévoyons de mettre en place un ou deux capteurs hyperfréquence afin d'améliorer l'estimation des cartes de précipitation. Il s'agira de développer des méthodes combinant les données hétérogènes issues des pluviomètres et des capteurs hyperfréquence. Nous envisageons également de prendre en compte les propriétés d'invariance d'échelle des précipitations pour la mise au point de ces méthodes.
Des courbes intensité – durée – fréquence ont été élaborées à l'aide de méthodes de krigeage par l'équipe tunisienne. L'étude de la variabilité des précipitations à l'aide du formalisme multifractal nous conduira ensuite à l'estimation de nouvelles courbes IDF. Il sera ensuite intéressant de comparer ces courbes avec les courbes existantes.

Détection précoce des événements extrêmes et alerte

Cadre : ANR Risknat/ ANR blanche

Les précipitations font parties des événements naturels pouvant entraîner des catastrophes dans des laps de temps très courts (crues éclairs notamment). On montre que dans la plupart des cas les zones de précipitations très intenses sont aussi extrêmement localisées. La nécessité de détecter en temps réel de tels évènements sur les zones à risques est un enjeu

[78] *Maitra Animesh and Kaustav Chakravarty, KU-BAND RAIN ATTENUATION OBSERVATIONS ON AN EARTH-SPACE PATH IN THE INDIAN REGION, XXVIIIth General Assembly of URSI – Proceedings, 2005.*
Maitra Animesh and Kaustav Chakravarty, Studies on Ku-band Propagation over Earth-Space Paths and Related Rain Parameters at a Tropical Location, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RAINFALL RATE AND RADIO WAVE PROPAGATION (ISRR '07); DOI:10.1063/1.2767008.

majeur dans la gestion de l'aléa. Un constat dressé par Météo France montre que sur une période s'étalant de 1958 à 1999, dans une zone comprise entre Perpignan, Nice et la Corse, les climatologues ont relevé 142 précipitations à 190 mm, réparties pour 78 en Languedoc Roussillon, 33 en Corse et 31 en région Paca. Pour anticiper ces phénomènes, le territoire Français est couvert par Aramis, un réseau de radars de précipitations répartis sur l'ensemble du territoire métropolitain. Les données recueillies et traitées par Aramis sont disponibles 24 heures sur 24 et renouvelées toutes les quinze minutes sur l'ensemble du territoire. Mais qu'en est-il des territoires qui ne peuvent être équipés de radar météorologiques, pour des contraintes techniques (relief tourmenté) ou des contraintes économiques (pays émergents). Ainsi en Haïti pour la seule saison cyclonique 2008 en l'espace de trois semaines, le pays a été touché par quatre phénomènes cycloniques : la tempête tropicale Fay, puis les cyclones Gustav et Hanna et enfin par l'ouragan Ike. Cumulées au long du 20ème siècle, cyclones, tempêtes tropicales y ont fait des milliers de victimes et plus de 6 millions de sinistrés. Les évènements pluvieux des 08 et 09 septembre 2002 (P.Huet, 2003), sont parmi les plus violents mesurés en Languedoc-Roussillon et en Provence-Alpes-Côte d'Azur, mais aussi l'un des plus meurtriers. Il s'est caractérisé à la fois par des cumuls ponctuels mesurés allant jusqu'à 687 mm en 24 heures, et des intensités extrêmes avec au plus fort de l'épisode des précipitations supérieures à 365 mm/h, mais aussi par la disparité spatiale des précipitations: 635 mm à St Christol d'Ales et à 40 km, Gallargues n'a enregistré que 60 mm.
Déjà préconisée par le rapport LEFROU , une réforme de la surveillance et l'alerte de crues a été engagée avec la création d'un centre national hydrométéorologique (le SCHAPI) et à une réorganisation des services d'annonce de crues (SAC) en services de prévision de crues (SPC).

Pour permettre de mieux détecter les risques liés à de tels phénomènes, nous avons proposé d'utiliser ce type de capteur qui pourrait permettre d'estimer en temps réel le bilan hydrique sur des zones non couvertes par les radars météorologiques. Notre objectif est en réalité double : proposer un système original de détection et d'alerte en temps réel grâce à l'utilisation conjointe de deux types de satellites : des satellites géostationnaires en bande Ku permettant d'évaluer en continu les hauteurs d'eau tombée sur une zone géographique donnée, des satellites défilants en orbite basse ou moyenne permettant de transmettre, si nécessaire, une alerte lorsque les moyens de communication au sol ne le permettent pas. Concernant ces derniers, il s'agit dans ce cas d'utiliser au contraire des bandes de fréquence aussi peu sensibles à la pluie que possible. En effet, quel intérêt y aurait-il à mesurer en temps réel des précipitations intenses, si par ailleurs il n'est pas possible de transmettre cette information ? Pour cette raison, nous orienterons notre choix sur des liaisons en bande L utilisées notamment pour les constellations de satellites de type IRRIDIUM[79].
La réalisation d'un tel projet nécessite à la fois des efforts de recherche et de développement tant sur le plan technologique que méthodologique. La validation d'un tel système ne pouvant se concevoir que par une vérité terrain, il est prévu de faire une large place à la validation expérimentale sur au moins deux sites pilotes (sud de la France, Haïti).

A plus long terme …

[79] *IRRIDIUM : 1,616 à 1,626 GHz. L'affaiblissement linéique est de seulement 0,03 dB/km pour des intensités de 500 mm/h*

Bien que l'utilisation des signaux en bande Ku des satellites commerciaux soit une formidable opportunité pour l'estimation en temps réel des précipitations, il serait néanmoins plus judicieux d'utiliser un système dédié et donc mieux adapté. En effet, si par chance la bande Ku est relativement sensible aux précipitations, sa sensibilité reste relative aux faibles précipitations. Le capteur décrit précédemment est donc mal adapté à la mesure d'événement de type pluie fine. Pour permettre une mesure correcte quelle que soit l'intensité de pluie, il conviendrait de disposer de canaux supplémentaires à des fréquences plus élevées (aux alentours de 30 GHz par exemple). Par ailleurs, afin d'améliorer l'estimation de R, on montre qu'il est possible d'utiliser en complément de l'affaiblissement le déphasage introduit par les gouttes d'eau entre deux ondes de fréquences différentes. Une étude (non publiée) réalisée dans le cadre d'un système de sondeur de pluie terrestre propose l'utilisation de 3 fréquences 5, 10 et 35 GHz. La première fréquence, peu sensible à la pluie servant de référence tandis que les deux autres fréquences sont dédiées respectivement aux précipitations intenses et aux précipitations faibles.
On peut donc imaginer dans le futur des systèmes dédiés à bord de satellites géostationnaires d'observation ou de télécommunications permettant d'estimer les précipitations en temps réel. Il serait alors possible de créer un véritable réseau de capteur permettant d'estimer les précipitations sur les zones à surveiller.

8. CONCLUSION

La modélisation des précipitations est difficilement concevable sans s'intéresser au préalable à son observation. La synergie entre développement expérimental, mesure et modélisation restera le socle de mes travaux à venir. Les projets de recherche que j'envisage de mener sont pluridisciplinaires et restent de ce point de vue dans la continuité des travaux passés. Je compte m'investir fortement sur les aspects liés de la variabilité de la microphysique des précipitations, que ce soit d'un point de vue temporel ou spatial, notamment en prenant en compte les trois dimensions de l'espace. Cette approche bien plus complexe est néanmoins indispensable à la bonne représentation des phénomènes turbulents à petite échelle. Parallèlement à cela, je compte appliquer les résultats de ces travaux aussi souvent que possible à l'étude de l'interaction ondes – atmosphère que ce soit dans le domaine de la télédétection ou des télécommunications.

La diversité des thématiques abordées m'a conduit à avoir une approche plurielle de la modélisation statistique, notamment par le biais des réseaux de neurones, des carte de Kohonen, de la modélisation multi fractale 1D et 2D, des modèles fractionnairement intégrés, GARCH, …. Ces méthodes ne sont pas spécifiques à l'étude des précipitations, elles trouvent également leur place dans d'autres domaines des sciences de l'environnement. Je compte développer des collaborations au travers de ces outils dans le domaine de l'environnement, notamment en hydrologie.

Mes travaux sont au carrefour de deux univers, les sciences de l'univers (SDU) et les Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (STIC). J'ai dû tout au long de ces années lutter afin d'être identifié de façon claire à ces disciplines. Pour l'instant mes travaux ont été largement supportés par le monde des télécommunications, principalement pour des raisons historiques. Gageons que dans un proche avenir le décloisonnement ne soit pas une gageure, comme cela est annoncé dans « le plan stratégique du CNRS horizon 2020[80]. De fait, le monde des télécommunications et celui de la télédétection ont de réels points communs sur le plan des infrastructures et des équipements qu'il conviendrait de mieux exploiter (sites communs, plateformes spatiales communes, liaison radios dédiées à la transmission des données et à la mesure de paramètres géophysiques). D'un point de vue plus général, il apparaît de plus en plus que les systèmes « opportuns », auront à l'avenir un rôle de plus en plus important. Le projet de mesure des précipitations en bande Ku présenté dans la dernière partie en est un exemple.

[80]« …. *L'objectif de faire avancer sans cesse le front de la connaissance se décline à la fois au sein des disciplines et par des approches intégrées et pluridisciplinaires. Les approches transdisciplinaires, qui s'amorcent aujourd'hui, y contribueront demain de façon décisive….(www.cnrs.fr/fr/organisme/docs/ Plan_Strategique_CNRS_CA_080701.pdf)*

9. ANNEXE 1 : ARTICLE EN COURS DE RE-SOUMISSION

Vertical evolution of rain drop size distribution: impact on the shape of the DSD

Laurent Barthes
Université de Versailles-Saint-Quentin en Yvelines (UVSQ)
CNRS, Centre d'Etude des Environnements Terrestre et Planétaires (LATMOS) , Vélizy, France

Cécile Mallet
Université de Versailles-Saint-Quentin en Yvelines (UVSQ)
CNRS, Centre d'Etude des Environnements Terrestre et Planétaires (LATMOS) , Vélizy, France

---

Corresponding author address: Laurent Barthés

LATMOS

10-12 avenue de l'europe

78140 VELIZY, France

E-mail: Laurent.barthes@cetp.ipsl.fr

ABSTRACT

Models of coalescence and breakup lead to equilibrium of the raindrop size distribution (DSD) after a fall through sufficient vertical height. At equilibrium, the DSD no longer evolves, and its shape is unique whatever the rain rate or LWC. This implies that the DSD is known, to within a multiplication constant. In the past, numerous measurements using disdrometers revealed that the slope of the DSD tail is close to 20-22 cm^{-1} when equilibrium is reached, whereas models based on the Low and List experiment predict values around 65 cm^{-1}. The present paper proposes a simple modification of the Low and List parameterization, leading to a DSD tail with a slope of 23 cm^{-1}. In order to evaluate the relevance of this modification, some of the DSD parameters such as slope, mean volume diameter, and relation between moments are calculated, and comparisons with experimental DSD are made. The modified parameterization is then used to study the evolution of an initially gamma-like DSD in a 1D vertical rain shaft. Our simulations give results relevant to the evolution and correlation of the DSD parameters.

1. Introduction

The study of the vertical evolution of raindrop size distributions (DSDs) during rainfall, from the freezing level isotherm to ground level, is a key to improving our understanding of the microphysics of rain. In numerous domains such as remote sensing, telecommunications, soil erosion, and the study of the rain's efficiency in "washing" the atmosphere, the DSD plays an important role. Among the different processes affecting the evolution of DSD, breakup and coalescence are two of the most significant. Various models based on experimental measurements have been developed over the past 40 years. The Low and List (1982a,b) parameterization (hereinafter LL82) and the Greg M. McFarquhar (2004) model are both based on the same laboratory experiments, which lead to an equilibrium drop size distribution (EDSD) with two or three peaks, and an exponential tail with a slope of approximately Λ=65 cm^{-1}. However, numerous measurements have shown that for high rain rates, close to a state of equilibrium, this slope lies between Λ=20 - 22 cm^{-1}. Hu & Srivastava (1995) suggested that the Low and List parameterization may underestimate the effects of coalescence and/or overestimate the breakup processes.

The starting point of the present paper is the LL82 parameterization, in which the coalescence efficiency Ecoal, given by Low and List, is replaced by the Brazier (1972) and O'Rourke (1981) models. In section 2 we compare the three models for Ecoal, and outline their major differences. In section 3 we briefly present the main equations used to compute the evolution of the DSD, in the case of a 1D vertical rain shaft. The EDSD are computed for the 3 models, and the parameters characterizing each of their features, such as the number and position of the peaks, the slope of the tail, and normalization parameters such as mean volume diameter Dm and No*, are estimated and discussed. In section 4 we compare these parameters with those obtained from measured DSD using a dual beam spectropluviometer. We show that the LL82 parameterization associated with the Brazier model leads to parameters, which are in good agreement with experimental data. In section 5, three simulations made for a one dimensional rain shaft are presented. The first gives general results relevant to DSD obtained at ground level, and discusses the shape of the DSD for the case of an initially gamma-like distribution. Some comments are made concerning the use of the gamma distribution to represent DSD. The second simulation is used to discuss the DSD shape parameter, μ, and results related to its variability, due to breakup and coalescence processes, are presented. In the last simulation we present results related to the correlation between the μ and Λ parameters, induced by breakup and coalescence, and draw comparisons with the existing model. Finally, section 6 provides a summary and our conclusions.

2. The Coalescence- Breakup efficiency model

To our knowledge, there are only two parameterizations which take into account the effects of both coalescence and breakup: the Low and List model (Low 1982a,b), and a more recent model proposed by Greg M. McFacquhar (2004), which is also based on the experimental dataset of Low and List. The following study focuses on the original parameterization described by LL, to which some modifications have been introduced. It should be noted that the LL and the McFacquhar parameterizations both give the same slope. The LL parameterization, based on laboratory experiments, was made by colliding droplets, using numerous pairs of drop diameters. These authors proposed new models of fragment size distribution for filaments, sheets and disk breakup, and also proposed a new coalescence efficiency model. Much research has been done on this parameterization, in order to study the evolution of raindrop size distributions (Brown 1986, 1987, 1988, List 1987, 1990, Young 2005, Pratt 2007a,b and others), and has led to a three peak equilibrium distribution, called 3PED. However, as has been pointed out by several authors, the slope of the EDSD tail is close to 65 cm^{-1} when using the original

LL82 parameterization, which is much higher than that measured in various rainfall events near to equilibrium (Hu 1995, Zawadzki 1988, Blanchar, Sauvageot 1995, Brown 1997, Atlas 2000). Hu & Srivastava (1995) provided a very detailed list of measurements for which a lower slope is obtained (20-22 cm^{-1}). They suggested in their conclusion that coalescence and breakup processes may be respectively underestimated and overestimated. If this observation is correct, any improvements to the parameterization should pertain to the Low and List model of coalescence efficiency E_{coal} (equ. 1), rather than to the fragment size distribution models themselves. The coalescence efficiency model derived by Low and List is:

$$E_{coal} = \begin{cases} a[1+\frac{D_s}{D_L}]^{-2}\exp[-\frac{b\sigma E_T^2}{S_c}] & \text{if } E_T < 5\ \mu J \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

where D_S and D_L are respectively the small and large diameters of the colliding droplets, E_T is the total energy of coalescence (equation 4.4 in LL82a), S_c is the surface energy (equation 4.3 in LL82a) and σ is the surface tension of water.

In order to verify the Hu & Srivastava hypothesis, we decided to successively replace this model by two well known models: those of Brazier-Smith (1972), and of O'Rourke (1981), i.e.:

$$E_{coal} = \min(1, e_{coal})$$

with

$$e_{coal} = 2.40\frac{\sigma}{U^2\frac{D_s}{2}\rho}\frac{[1+R^2-(1+R^3)^{2/3}](1+R^3)^{11/3}}{R^6(1+R)^2} \quad \text{for Brazier's model} \quad (2)$$

where $R = \frac{D_L}{D_S}$, and U is the relative velocity of the two droplets, and

$$e_{coal} = 2.40\frac{\sigma}{U^2 D_s\rho}(R^3 - 2.4R^2 + 2.7R) \quad \text{for O'Rourke's model} \quad (3)$$

Figures 1a, 1b and 1c show E_{coal} for diameters up to 5 mm, given by these three models. One can show that these models are quite different, especially for diameters smaller than 1 mm, where the Brazier-Smith model tends to favour the coalescence process. For D_S less than 0.5 mm, the coalescence efficiency for the latter model is equal to unity whatever the value of D_L, whereas this value is never reached with the LL82 model, and is reached only for D_S=0.25 mm with O'Rourke's model. Globally, the region within which E_{coal} comes close to unity is much greater with the Brazier model, than with the others.

3. The three-peak equilibrium distribution (3PED)

The parameterization of LL82 gives the fragment distribution function P(m;x,y), which corresponds to the mean number of droplets with a mass lying in the range between m and $m+\Delta m$, produced by the collision between a pair of droplets of mass x and y. As with some other authors, various changes were made to the initial formulation, in order to take mass conservation into account, and to improve the convergence of the iterative procedure used to estimate the standard deviation of the different normal and lognormal distributions (Brown 1986). The model we used for the present study deals with coalescence and breakup only, and all other processes such as evaporation are not considered.

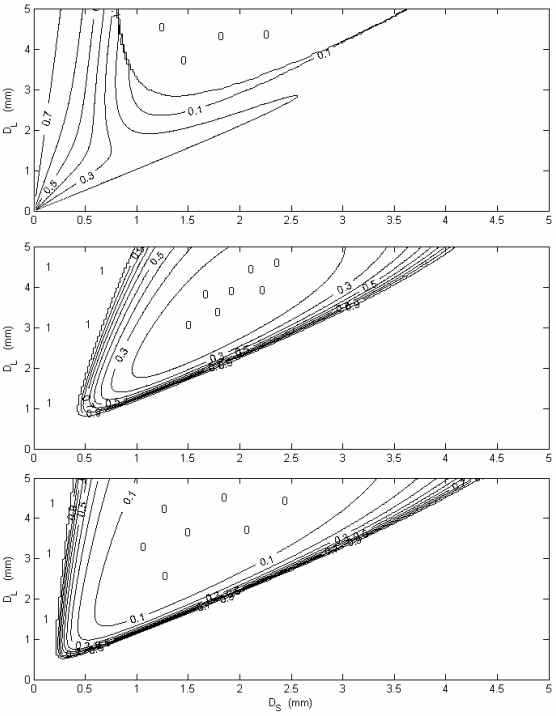


FIG. 1. Coalescence efficiency E_{coal} for drop pairs, with dimensions DL and DS between 0 and 5 mm; a. LL82 parameterization, b. Brazier-Smith parameterization, c. O'Rourke parameterization

We use exactly the same formalism as that proposed by List (1987), of which the principle formulae are recalled for the one-dimensional rain shaft. If the drop number density is expressed by $n(m,t,z)$ for drops of mass m at time t, at a height z, the evolution of $n(m,t,z)$ can be written as:

$$\frac{\partial n(m,t,z)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(v(m)n(m,t,z)) = \int_{m/2}^{\infty}\int_{m-x}^{x} K(m;x,y)n(x,t,z)n(y,t,z)dydx \quad (4)$$

*W*here *v(m)* (assumed to be independent of z) is the vertical velocity of a droplet of mass *m. K(m;x,y)* is called the kernel, and represents the mean number of fragments, ranging in size between *m* and *m+dm*, produced or lost by a collision between two droplets of mass *x* and *y*:

$$K(m;x,y) = \left[(1-E_{coal})P(m;x,y) + E_{coal}\delta(x+y-m) - \delta(m-x) - \delta(m-y)\right]C(x,y) \quad (5)$$

where *C(x,y)* represents the fractional interaction rate between a drop of mass *x* and diameter D_x, and a drop of mass *y* and diameter D_y:

$$C(x,y) = \frac{\pi}{4}(D_x + D_y)^2 |U| E_{colli} \quad (6)$$

E_{colli} is the collision efficiency and is equal to unity in the case of the range of raindrop diameters considered in this paper.

Various methods can be used for the numerical computations. The most common is that proposed by Bleck (1970), which was used by List and Gillespie (1976) to solve the coalescence breakup equation. G. Feingold et al. (Feingold 1988) proposed a method based on moments, in which they showed that for the LL82 kernel, the solution using Bleck's method and that based on second order moments give similar results. More recently, a new algorithm was proposed by P. Prat and A.P. Barros (Prat 2007), based on a coalescence extension of the fixed-pivot technique introduced by Kumar and Ramkrishma (1996). In the present study the Bleck method was used, because Feingold's approach is computationally far more expensive. Prat's algorithm had not been published when the study began. Let the DSD *n(m)* be divided into N bins, such that for each bin k=1 ..N, the quantity Q_k corresponding to the mass present between m_k and m_{k+1} is defined as:

$$Q_k = \int_{m_k}^{m_{k+1}} x n(x) dx \quad (7)$$

Assuming sufficiently narrow classes (List 87), *n(m)* can be considered constant in each class, *k*, and is thus expressed by :

$$n_k = \frac{2Q_k}{m_{k+1}^2 - m_k^2} \quad (8)$$

Under these conditions, List showed that equation 4 becomes:

$$\frac{\partial Q_k(t,z)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(v(m)Q_k(t,z)) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{i} Q_i Q_j X_{ijk} \quad (9)$$

where

$$X_{ijk} = \lambda \frac{2}{m_{i+1}^2 - m_i^2} \frac{2}{m_{j+1}^2 - m_j^2} \int_{m_i}^{m_{i+1}} \int_{m_j}^{m_{j+1}} \int_{m_k}^{m_{k+1}} wK(w;x,y) dw dy dx \quad (10)$$

and λ=1 if $i \neq j$, and λ=0.5 if $i=j$.

Many authors have discussed the issue of the number of bins *N* and their width, because the accuracy of the solution depends on the degree of resolution of the discretization grid. Brown (Brown 1991, 1993, 1995) used a 34-bin model, whereas List used a 40-bin model (List 1990). The outcome of our simulations reveals that significant differences can arise when using these different models. Numerical problems were also pointed out by Valdez and Young (1985), who found a steeper slope when using a very high-resolution model. Similarly, Brown (1995, section 4) reported that the computed slope of the tail increased when the model's resolution was increased (55-60 bins), resulting in a poorer agreement between observations and results predicted by the models. The resolution used by List & Brown corresponded to raindrop diameter bins greater than 0.5 mm in width for the widest bins, and may have led to numerical problems. In order to avoid this type of difficulty, as recommended by Feingold (1988) in the case of one-moment methods, we limited the maximum width of the raindrop width classes to 0.1 mm, by using logarithmically spaced bins for the smallest diameters, centered at 0.06 mm (as done by List (1990) for diameters up to 0.9 mm), and linear spacings of 0.1 mm for bins between 0.9mm and 6 mm. A total of 76 bins was thus defined, covering droplet diameters ranging between 0.06 mm and 6mm. It should be noted that the finest resolutions were tested and no significant changes were observed. To solve the advection equation (9), we used the simple positive definite advection scheme of Smolarkiewicz (1983), with a time increment of ΔT=1 second and a spatial resolution of ΔZ= 20 meters. Assuming a maximum speed of 12 ms^{-1}, these parameters lead to a stable advection scheme.

Previous work has shown that there is only one stable steady state (Brown 1992). The equilibrium distribution can be derived using the zero spatial dimension model of List and McFacquhar (1990):

$$\frac{dn(m)}{dt} = \int_{m/2}^{\infty} \int_{m-x}^{x} K(m;x,y) n(x,t) n(y,t) dy dx \quad (11)$$

When steady state equilibrium is reached, the right side of (11) is equal to zero. List (1987) showed that if *n'(m)* is a solution of equation (11), then any DSD multiple of *n'(m)* is also a solution. Let *n(m)* be parameterized in terms of the rainfall rate:

$$n(m) = R \times F(m) \quad (12)$$

The above equation shows that, at equilibrium *dF(m)/dt* =0, such that the shape *F* is the same whatever the rainfall rate. All moments are proportional to each other and can therefore be expressed as a function of one specific moment such as the rainfall rate, as proposed by List (1988). The mean volume diameter D_m is defined (see Ulbrich 1983 or Testud 2001) as:

$$D_m = \frac{\int_0^\infty n(D)D^4 dD}{\int_0^\infty n(D)D^3 dD}$$

which, in the present case, becomes:

$$D_m = \frac{\int_0^\infty n(m)m^{1.33} dm}{\int_0^\infty n(m)m dm} = \left(\frac{6}{\rho\pi}\right)^{0.33} \frac{\int_0^\infty F(m)m^{1.33} dm}{\int_0^\infty F(m)m dm} = D_{m0} \quad (13)$$

The above expression is equal to a constant value, D_{m0}. Moreover, in a situation where equilibrium has been established, the parameter N_o* defined by (Testud 2001):

$$N_0^* = \frac{4^4}{\pi\rho}\frac{LWC}{D_{m0}}$$

becomes:

$$N_0^* = \frac{\int_0^\infty F(m)m dm}{D_{m0}} R = K \times R \quad (14)$$

Thus, N_o* must be proportional to R, as pointed out by Valdez & Young (Valdez 1985).

The equilibrium solution (3PED) was calculated using the three parameterizations of E_{coal} (original LL82, Brazier and O'Rourke models). Figure 2 shows the equilibrium DSD for an initial Marshall Palmer distribution with a fall rate of 50 mm/h (MP50). It can be seen that the positions of the peaks (0.25, 0.8 and 2.5 mm) do not vary significantly, from one model to another. On the other hand, the slope of the tail is very different, especially with the Brazier parameterization. We first considered two features in order to characterize these EDSD: the slope of the tail Λ, and the mean volume diameter D_m. Table 1 provides the values obtained for the three cases studied here:

Models	Λ (cm^{-1})	D_m (mm)
LL82	66	2.68
LL82 + O'Rourke	63	2.09
LL82 + Brazier	23	2.5

TABLE 1. Mean volume diameter (D_m) and slope Λ of the DSDE, for the three E_{coal} parameterizations:

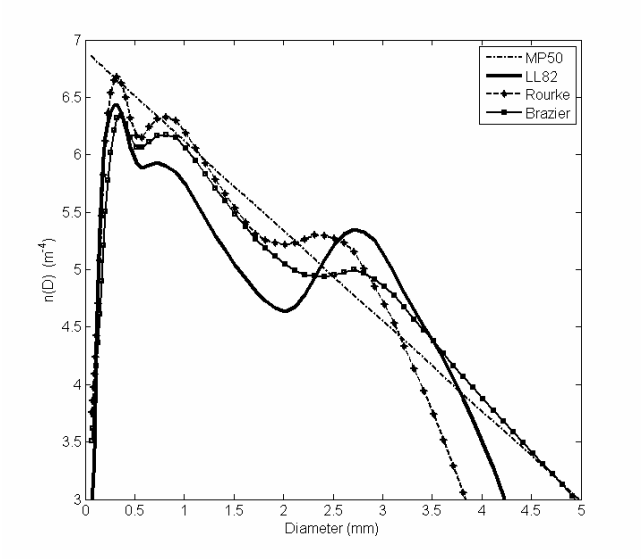


FIG. 2. Equilibrium drop size distribution (EDSD) for an initial MP50 DSD: a: LL82 parameterization, b: LL82 with O'Rourke's model, c: LL82 with Brazier's model

The O'Rourke parameterization gives the smallest mean volume diameter, because the coalescence efficiency used in this model is globally smaller, when the small drop diameter D_s lies between 0.5 and 1 mm. The slope remains the same as that found for LL82 (63-66 cm^{-1}), because E_{coal} is of the same order of magnitude for the two models, when D_s is greater than 1 mm (except when D_s is close to D_L). However, in this case the relative velocity U is close to zero and the fractional interaction rate $C(x,y)$ is very weak. The Brazier model gives a smaller slope (22 cm^{-1}), because it privileges the number of large droplets produced by the coalescence process.

The relationship between N_o* and R (equation 14) is used to derive the coefficient K for the three E_{coal} models. Table 2 gives the resulting values:

Model	K (m^{-5} s)
LL82	0.017
LL82 + O'Rourke	0.074
LL82 + Brazier	0.022

TABLE 2. Values of K for the three E_{coal} parameterizations, when equilibrium has been reached

The original parameterization and the modified version based on the Brazier model give values which are very close to each other, whereas the O'Rourke parameterization gives a higher value. In the next section, the results from tables 1 and 2 are compared with experimental DSD.

4. Comparison of simulated an measured DSD

The experimental dataset is comprised of several da subsets, collected in different climatic areas: Par France (Mars to October 2000), Iowa-City (April October 2002), and Djougou (Benin June to Septemb 2006). The measurements were made using a dual bea optical disdrometer (Delahaye 2006). This device is ab to measure drops with a diameter as small as 0.3 m and as large as 10 mm. For each drop, the diamet velocity and time of arrival are stored. An integrati time of 60 seconds was chosen, in order to compute t DSD, leading to a total of 32 250 DSD (537 hours). figure 3a, the slope of each measured DSD is plotted a function of the corresponding rainfall rate. The slo data is very scattered for low values of R, lying betwe 10 and 100 cm^{-1}, whereas the dispersion decreases when R increases. For R > 60 mm/h, the dispersion is significantly reduced and the mean slope is 25 cm^{-1}. Equations (4) and (12) show that the DSD converges more quickly towards equilibrium, when the rainfall rate is high. Under these conditions it can be assumed that, for high rainfall rates, the DSDs are not too far from equilibrium (see section 5, simulation 2). In fact, in figure 3a, the mean slope found for R > 60 mm/h is consistent with the value given in table 1 above (23 cm^{-1}) when the Brazier model is chosen, instead of the original model, for the calculation of E_{coal}.

Expression (13) shows that the parameter D_m tends towards a constant value, D_{mo}, when equilibrium is reached, i.e., for high rainfall rates. In figure 3.b, the mean of D_m tends effectively towards a constant value of 2.54 mm. This value is exactly the same as that found in section 3 (Table 1), when the Brazier model is used.

By assuming that those DSD for which $D_m = D_{mo}$ are close to equilibrium, figure 3.c represents N_o^* as a function of R for the corresponding experimental subset (in practice, all of the DSD, for which $2.4 < D_m < 2.6$ mm, were selected). A linear fit to this subset gives K=0.023 m^5 s. K has also been computed using the three models, leading to the values given in Table 2. Again, the Brazier model gives a result closer to the experimental data than that given by the other models.

Finally, the above comparisons show that the LL82 parameterization, modified in accordance with the Brazier model, leads to an EDSD in agreement with experimental data. For these reasons, only this model will be considered in the following analysis and discussions.

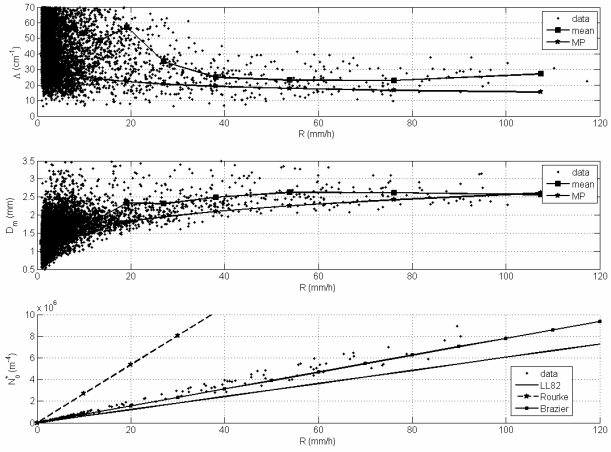


FIG. 3. a. Slope versus Rain Rate (points: experimental data, continuous line + square: mean value of experimental data, continuous line + pentagram: Marshall Palmer).
b. Mean volume diameter versus Rain Rate
c. N_o versus Rain rate for equilibrium DSD*

5. Simulations

In this section, the modified LL82 parameterization is used to study the behaviour of the DSD, for different types of rainfall situations. Three simulations are presented for the case of a one dimensional shaft of rain. Rainfall rates lower than 10-15 mm/h are not considered here, because in such cases coalescence and breakup processes induce no significant changes to the DSD.

a. Simulation n°1

The aim of this simulation was to study the evolution of stratiform rain conditions. We choose the following parameters:

- Gamma-type initial DSD at the zero degree isotherm: $N(D) = N_0 D^{\mu} e^{-\Lambda D} = N_0 D^{\mu} e^{-\frac{4+\mu}{D_m} D}$
- Rainfall rate: R=15 mm/h
- D_m = 1 and 1.5 mm.
- μ = -1,0,5
- Fall distance: H=3 000 m
- Vertical wind velocity w_o= -3, 0, 3 m/s

We assumed the vertical wind velocity w to vary linearly from a ground level value of zero, up to a maximum of w_o at the top of the rain layer. Figure 4 shows the DSD obtained at ground level, in which the continuous lines correspond to an initial value of D_m equal to 1 mm, and the continuous lines with crosses correspond to D_m equal to 1.5 mm. In these cases, the DSDs have not reached equilibrium, their shape is quite

different to that shown in figure 2, and they are bimodal instead of trimodal. However, the position of the first two peaks remains the same (0.25 & 0.8 mm). Similar shapes are regularly observed in our measured data, but with the first peak close to 0.4 mm, and the second one between 0.8 and 1 mm. Moreover, if we look at higher diameters only (i.e. $D > 0.5$ mm), which are less sensitive to air motion and turbulence and are accurately measured by classical disdrometers, the shape of the DSD has a single peak and remains more or less of the gamma type.

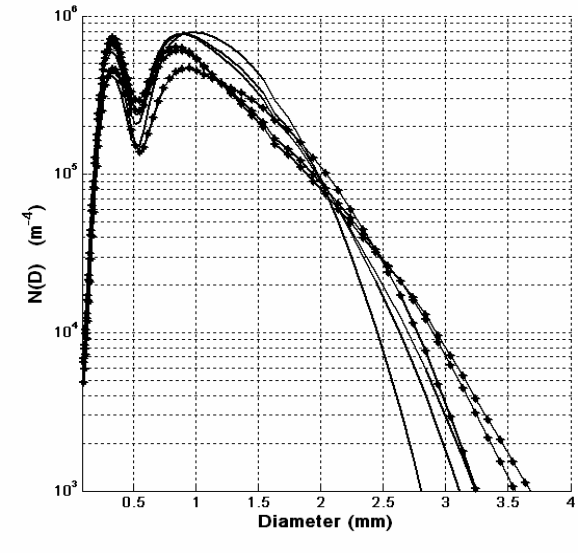


FIG. 4. : DSD obtained at ground level for various values of μ (-3, 0, 3) and vertical wind (-3, 0, 3 m/s), for H =3000m and R=15 mm/h. Continuous lines correspond to an initial value of D_m = 1 mm, and continuous lines with crosses correspond to D_m = 1.5 mm.

b. Simulation n°2

In this simulation we studied the evolution of the parameters D_m, μ and Λ. The initial DSDs were gamma shaped, and two rainfall rates (R=10 and 100 mm/h), three values of μ (-3, 0, 3), and 12 values of D_m between 1 and 2.8 mm were considered. We studied the trajectories of parameters D_m, Λ and μ during a hypothetical fall of 10 000 meters. It should be noted that in this simulation (and the following), only those diameters greater than 0.5 mm were considered, such that the final DSD could be considered to have a gamma shape, and consequently valid estimations of μ could be made.

Figure 5a presents the evolution of the slope, Λ, as a function of D_m, and figure 5b shows the evolution of the parameter μ as a function of D_m, for R=10 mm/h. The circles indicate the initial values of these two parameters, at the top of the layer, and the squares represent their final values at ground level. The small intermediate circles indicate the values at fall heights corresponding to multiples of 1 000 m. Figure 6 contains the same types of curve as figure 5, but for R=100 mm/h. It can be seen that the general behaviour is quite different for the two rainfall rates. For the higher rate, the DSDs approach equilibrium very quickly, after a fall of 2 000 - 3 000 meters, whereas the final values remain very far from equilibrium for RR=10 mm/h. Theses results are in agreement with recent simulations obtained by Prat and Barros (Prat, 2007), who concluded that equilibrium is reached only for significant fall distances, greater than 3 000 meters, and for high rainfall rates (50mmh^{-1}). For R=15 mm/h, the slope of the tail varies slightly during fall, even after a hypothetical distance of 10 000 meters, whereas D_m can change significantly, suggesting that the coalescence process dominates. For a gamma distribution, the parameter μ is related to D_m and Λ by the following relationship: $\Lambda = \frac{4+\mu}{D_m}$

The parameter μ thus changes as a consequence of variations in D_m. In the present example, with initial values of μ between -3 and 3 at the top of the rain shaft, the final values are spread between -0.9 and 10. Although this simulation is not representative of all possible cases, the observed trajectories nevertheless show that fairly similar values of μ at the top of the rain shaft can lead to very different values at ground level, in the range between -0.9 and 10. This result is in good agreement with measured data (see for example Zhang 2003), which gives the same value of dispersion. Conversely, at high rainfall rates, the values of μ are much closer to their equilibrium value (1.58), even after the rain has fallen through a vertical distance of 3 000 meters.

c. Simulation n°3

In this simulation, we compared the evolution of the pair of parameters (μ, Λ), for various initial conditions and three fall heights. We used the following values: μ = -3, 0, 3, various values of D_m, between 0.7 and 2.8 mm, and three rainfall rates: R = 15, 50, 100 mm/h, leading to a total of 81 parameter triplets. In figures 7a, b and c, the fall height is set respectively to 2 000, 4 000 and 10 000 meters. Initial values are represented by white circles, and final values by black squares. As expected, the equilibrium state (μ=1.58, Λ=22) is reached only for triplets corresponding to R=100 mm/h and H = 4 000 or 10 000 meters. It is interesting to note that as the fall height increases, the final parameters become more strongly correlated, until they finally appear to be located on a single curve.

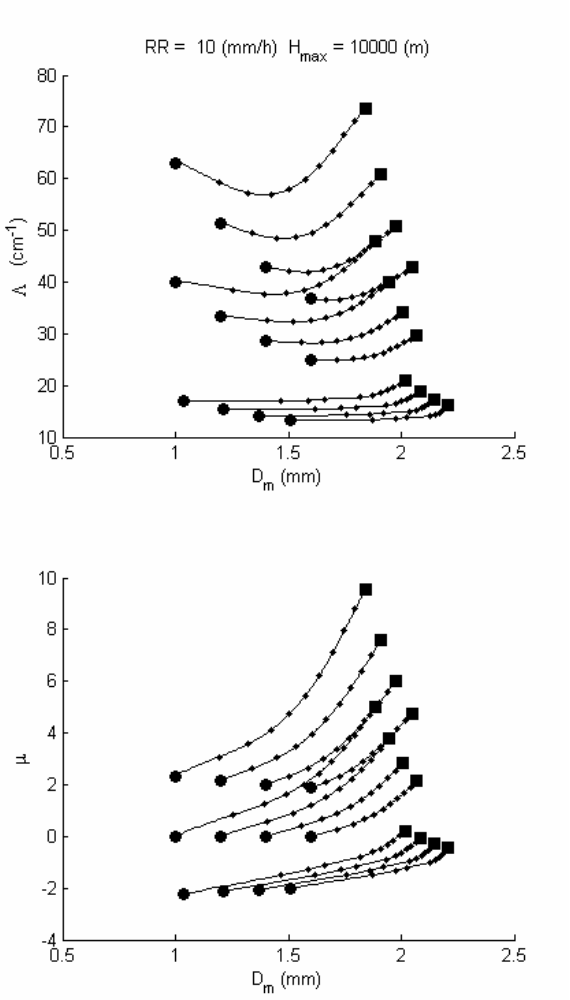


FIG. 5. a. Trajectories of the (D_m, Λ) parameter pair, during a hypothetical fall through 10000 m, for R=10 mm/h. Circles show initial values at the top of the layer, squares indicate final values at ground level, and small points indicate values for fall distances equal to multiples of 1000 m.

Zhang et al. (2003) suggested the following fit, based on measurements made in Florida:

$$\Lambda = 0.365\mu^2 + 7.35\mu + 19.35 \qquad (\text{cm}^{-1})$$

The continuous lines in figures 7a, b and c correspond to this expression. It can be seen in figures 7.a and 7.b that there is a good agreement between the above expression and a good proportion of the final values. Figure 7d shows values of μ and Λ, estimated from our measurements, which appear to be well matched to the Zhang model, and for which the dispersion is similar to that given by final coalescence values and a breakup model with H=2 000 and 4 000 meters (Fig.7a and 7.b). We conclude from these simulations that the coalescence/breakup process is (at least partially) responsible for the correlation between the three parameters D_m, μ and Λ. This result could explain why, under certain meteorological conditions (sufficiently elevated drop heights), these parameters become strongly correlated.

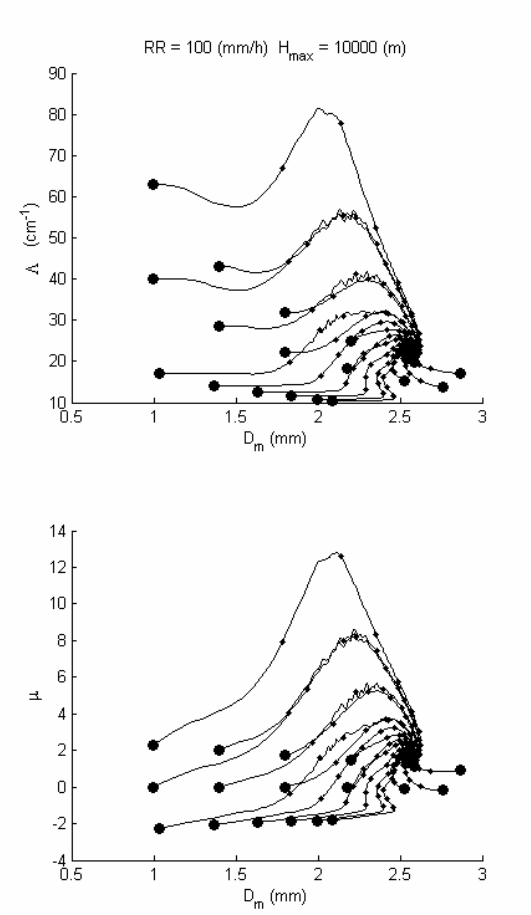


FIG. 6. Same as figure 5, but for R=100 mm/h

6. Summary and conclusions

We have considered a modified version of the Low and List parameterization (LL82), in order to study the evolution of raindrop spectra during their fall from the top of the rain layer to the ground. Three parameterizations were tested: LL82 , LL82 + Brazier model, LL82 + O'Rourke model, and were compared with experimental DSD. At equilibrium, the LL82 + Brazier model gives results which are better matched to experimental data than those given by the by LL82 model: the slope of the tail is found to be 23 cm^{-1}, which is in very good agreement with our experimental

measurements as well as with those found in literature, as opposed to the slope of 65 cm^{-1} giver the original model. Similarly, we found a mean volu diameter equal to 2.5 mm, which is also in very g agreement with experimental data. Moreover, equilibrium, the linear relationship between N_o^* and rainfall rate is also in good agreement with experime results. Simulations with a one dimensional rain s confirm that for low rainfall rates, the DSD is gener far from equilibrium. On the other hand, if the in DSD is of the gamma type, the final DSD will still b the gamma type, provided droplets smaller than 0.5 are not taken into account. We show that in this case, slope does not vary significantly, whereas the m volume diameter D_m and the shape parameter μ can v quite rapidly during the fall of the droplets. Thus, shape parameter is sensitive to fall height, and in simulations could vary throughout the fall, from -0. 10. The study of the final value of these parameters, many configurations at ground level in the μ - Λ pl shows that the greater the fall distance, the n strongly they are correlated and they tend to conv onto a single curve. Some configurations are in g agreement with the least squares fit derived by Zh (2003). The dispersion of these parameters is also in good agreement with our experimental data.

In our study, the atmosphere was assumed to be uniform, with no horizontal wind. Although these hypotheses could apply to a stratiform rainfall situation, in which the atmosphere is more or less stable and uniform, the situation is much more complex in the case of convective rain, due to the presence of strong winds and possible wind shear effects. Under these conditions, the DSD measured at ground level results from more complex mechanisms involving not only breakup and coalescence processes, but also evaporation, strong turbulence, and the possible interaction of several neighbouring rain cells with different characteristics (Sauvageot 2000).

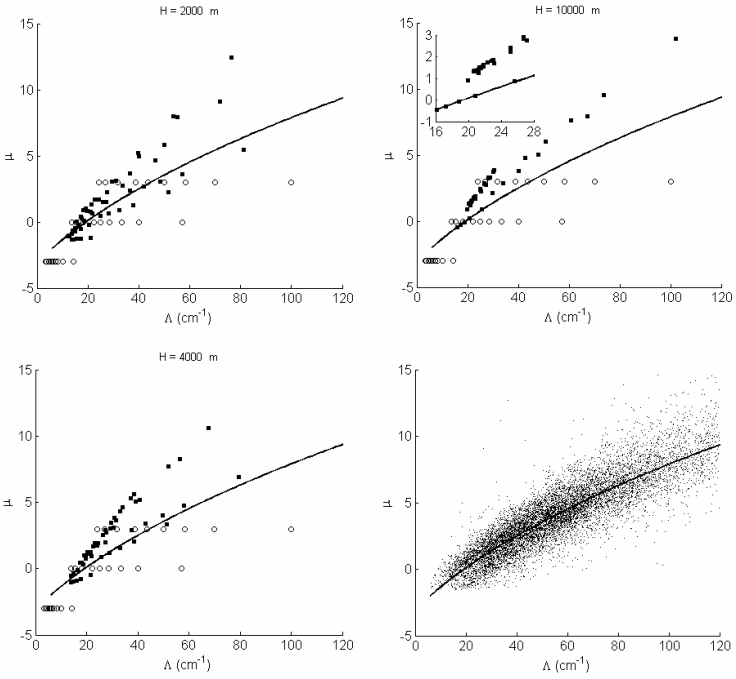


FIG. 7. a, b, c : Initial and final values in the μ - Λ plane, for three different values of H: a: 2000 m, b: 4000 m, c:10000 m. Initial values are represented by circles, and final values by squares. Continuous lines correspond to the Zhang model. d: μ - Λ obtained from the experimental data set

References

Atlas, D., 2000: An observationally based conceptual model of warm oceanic convective rain in the tropics, J. Applied meteorology, **39**, 2165-2181.

Beard, K. V. and H. T. Ochs III: 1995: Collisions between small precipitation drops. Part II: Formulas for coalescence, temporary coalescence, and satellites. J. Atmos. Sci., **52**, 3977–3996.

Becker, E. and G. Schmitz: 2003: Climatological effects of orography and land–sea heating contrasts on the gravity wave–driven circulation of the mesosphere. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 103–118.

Bleck, R., 1970: A fast, approximative method for integrating the stochastic coalescence equation, J. Geophys. Res., **75**, 5165-5171.

Brazier-Smith, P. R. Jennings and S. G., Latham: 1972: The Interaction of Falling Water drops: Coalescence. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. **326**, No. 1566 (Jan. 25, 1972), 393-408.

Brown, P. S., 1986: Analysis of the Low and List Drop-breakup formulation, J. Climate and Applied meteorology., **25**, 313-321.

Brown, P. S., 1987: Parameterization of drop-spectrum evolution due to coalescence and breakup, J. Atmos. Sci., **44**(1), 242–249.

Brown, P. S.,1988: The effects of filament, sheet, and disk breakup upon the drop spectrum, J. Atmos. Sci., **45**(4), 712–718.

Brown, P. S., 1997: Mass conservation considerations in analytic representation
of raindrop fragment distributions, J. Atmos. Sci., **54**, 1675–1687.

Feingold, G., Tzivion (Tzitzvashvili) and S., Leviv, 1988: Evolution of Raindrop Spectra. Part I: Solution to the Stochastic Collection/Breakup Equation Using the Method of Moments, J. Atmos. Sci., **45** (22), 3387–3399.

Gillespie, J. R. and R.List, R., 1978: Effects of collision-induced breakup on drop size distributions in steady-state rainshafts. Pure Appl. Geophys., **117**, 599–626.

Hu, Z., and R. C. Srivastava: 1995: Evolution of raindrop size distribution by coalescence, breakup, and evaporation: Theory and observations. J. Atmos. Sci., **52**, 1761–1783.

Kumar, S. and D. Ramkrishma, 1996: On the solution of population balance equations bydiscretization-I. A fixed pivot technique. Chem. Eng. Sci., **51**, 1311-1332.

List, R. and J.R., Gillespie, 1976: Evolution of Raindrop Spectra with Collision-Induced Breakup, J. Atmos. Sci., **33** (10), 2007-2013.

List, R., N.R., Donaldson, R.E., Stewart, 1987: Temporal evolution of drop spectra to collisional equilibrium in steady and pulsating rain, J. Atmos. Sci., **44**,362-372.

List, R., 1988: A linear radar reflectivity–rainrate relationship for steady tropical rain. J. Atmos. Sci., **45**, 3564–3572.

List, R. and G. M., McFarquhar, 1990: The role of breakup and coalescence in three-peak equilibrium distribution of raindrops. J. Atmos. Sci., **47**, 2274–2292.

Low, T. B. and R. List, 1982a: Collision, coalescence, and breakup of raindrops. Part I: Experimentally established coalescence efficiencies and fragment size distributions in breakup. J. Atmos. Sci., **39**, 1591–1606.

____ 1982b: Collision, coalescence, and breakup of raindrops. Part II: Parameterization of fragment size distributions. J. Atmos. Sci., **39**, 1607–1618.

McFarquhar, G. M.and R.., List, 1991: The evolution of three-Peak Raindrop size Distribution in One-Dimensional Shaft Models. Part II: Multiple Pulse Rain, J. Atm. Sci.,**48** (13), 1587-1595.

McFarquhar, G. M, 2004: A new representation of collision-induced breakup of raindrops and its implications for the shapes of raindrop size distributions, J. Atmos. Sci., **61**(7), 777–794.

Smolarkiewicz, P.K., 1983: A simple positive definite positive advection scheme with small implicit diffusion. Mon. Wea. rev.,**11**,479-486.

Testud, J., Oury, S., Black, R. A., Amayenc and P. , Dou, X., 2001: The Concept of ‘‘Normalized’’ Distribution to Describe Raindrop Spectra: A Tool for Cloud Physics and Cloud Remote Sensing, J. Applied Meteo., **40**, 1118-1140.

Ulbrich C.W., 1983: Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution, J. Clim. & App. meteorology, **22**, 1764-1775.

Prat, O. P. and A. P. Barro: 2007a, Robust Numerical Solution of the Stochastic Collection–Breakup Equation for Warm Rain, J. Apl. Meteo. & Clim, **46**, 1480-2014.

Prat, O. P. and A. P., Barros, 2007b: Exploring the use of a column model for the characterization of microphysical processes in warm rain: results from a homogeneous
rainshaft model, Adv. Geosci., **10**, 145–152.

Sauvageot, H.and M., Koffi, 2000: Multimodal Raindrop Size Distributions, J. of the atmos. Sci., **57**, 2480-2492.

Valdez, M. P. and K. C. Young, 1985: Number fluxes in equilibrium raindrop size distributions: A Markov chain analysis. J. Atmos. Sci., **42**, 1024–1036.

Zhang, G., J., Vivekanandan and Edward A., Brandes, 2003: the Shape-Slope Relation in Observed Gamma Raindrop Size Distributions: Statistical Error or Useful Information ?, J. atm. & oceanic tech., **20**, 1106-1119.

10. ANNEXE 2 : CINQ ARTICLES

1. L. BARTHES, C. MALLET, P. GOLE, Neural Network model for atmospheric attenuation retrieval between 20 and 50 GHz by means of dual beam radiometers, Radio Science , Vol. 38 n°5, 2003

2. J.-Y. Delahaye, L. Barthès, P. Golé, J. Lavergnat, J.P. Vinson, A dual beam spectropluviometer concept, Journal of Hydrology, 2006, vol. 328, issues 1-2, pp110-120, ISSN 0022-1694

3. L. Barthès, C. Mallet, O. Brisseau , A Neural network model for the separation of atmospheric effects on attenuation: application to frequency scaling, Radio Science, vol. 41, n°4, 2006

4. L. de Montera, C. Mallet, L. Barthès and P. Golé, Short-term prediction of rain attenuation level and volatility in Earth-to-Satellite links at EHF band. Nonlin. Processes in Geophys, 15, 631-643, 2008.

5. L. de Montera, L. Barthès, C. Mallet, and P. Golé, The effect of rain no-rain intermittency on the estimation of the Universal Multifractal model Parameters, J. of Hydrometeorology, 2009.