



HAL
open science

Modélisation statistique appliquée à la propagation atmosphérique des ondes électromagnétiques et à l'observation des précipitations

Cécile Mallet

► **To cite this version:**

Cécile Mallet. Modélisation statistique appliquée à la propagation atmosphérique des ondes électromagnétiques et à l'observation des précipitations. Physique Atmosphérique et Océanique [physics.ao-ph]. Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, 2009. <tel-00672039>

HAL Id: tel-00672039

<https://theses.hal.science/tel-00672039v1>

Submitted on 20 Feb 2012

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.



HAL Authorization

Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines
Thèse d'habilitation à diriger des recherches

Ecole doctorale :
sciences de l'environnement
présentée par

Cécile Mallet

Titre du mémoire :

**Modélisation statistique appliquée à la propagation
atmosphérique des ondes électromagnétiques et à
l'observation des précipitations**

2009

Table des Matières

Curriculum vitae

ETAT CIVIL	3
FORMATION	3
SITUATION PROFESSIONNELLE.....	3
ACTIVITE D'ENSEIGNEMENT	4
CREATION DE FILIERES.....	4
ENSEIGNEMENTS.....	5
DE LA NECESSITE DE LA FORMATION A LA RECHERCHE.....	7
ACTIVITE ADMINISTRATIVE	8
ENSEIGNEMENT ET RECHERCHE	8
ENSEIGNEMENT	8
CONTRATS ET PROJETS DE RECHERCHE	8
ACTIVITE D'ENCADREMENT	11
ENCADREMENT DE THESES.....	11
ENCADREMENT DE STAGES DEA ET MASTER RECHERCHE ANNEE 2.....	12
ENCADREMENT DE STAGES DESS, INGENIEUR ET MASTER PROFESIONNEL ANNEE 2	13
PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	14
ARTICLES DE REVUES INTERNATIONALES A COMITE DE LECTURE	14
ACTES DE CONGRES INTERNATIONNAUX.....	15
COMMUNICATIONS ET POSTERS DANS DES CONFERENCES INTERNATIONNALES.....	16

Bilan scientifique

INTRODUCTION	21
I. TELEDETECTION DE L'ATMOSPHERE AU MOYEN DE RADIOMETRE MICRO_ONDES	25
I.1 INTRODUCTION DE L'APPROCHE NEURONALE	26
I.2 CONTENUS INTEGRES EN VAPEUR D'EAU ET EN EAU LIQUIDE NUAGEUSE AU DESSUS DES OCEANS ESTIMES AU MOYEN DE RADIOMETRES SPATIAUX.....	27
I.3 TAUX PRECIPITANT AU DESSUS DES OCEANS ESTIMES AU MOYEN DE RADIOMETRES SPATIAUX.....	29
I.4 RADIOMETRIE TERRESTRE	32
II MODELISATION DU CANAL DE PROPAGATION ATMOSPHERIQUE	33
II.1 EXPERIENCE DE PROPAGATION SIRACUSE 3	36
II.2 MICROPHYSIQUE DES PRECIPITATIONS ET MODELE DE SIMILITUDE EN FREQUENCE	37
II.3 ANALYSE STATISTIQUE DES SERIES CHRONOLOGIQUES ET PREDICTION.....	38
II.4 PREMIER MODELE GLOBAL.....	41
II.5 ANALYSE MULTIFRACTALE-SIMULATEUR DE SERIE SYNTHETIQUES D'AFFAIBLISSEMENT	42
CONCLUSION	45

Prospective

PREAMBULE	51
THEME.....	52
DE LA PROPAGATION DANS L'ATMOSPHERE A L'OBSERVATION DES PRECIPITATIONS.....	52
LES ENJEUX ACTUELS DE L'OBSERVATION DES PRECIPITATIONS.....	53
HETEROGENEITE DES PRECIPITATIONS ET RESOLUTION DES OBSERVATIONS.....	54
PROJETS	55
ANALYSE MULTIFRACTALE -MODELISATION –SIMULATION DES CHAMPS PRECIPITANTS...	55
PROFIL VERTICAL DE GRANULOMETRIE : ASSIMILATION DES REFLECTIVITE RADAR	57
UN NOUVEAU MOYEN D'OBSERVATION DES PRECIPITATIONS	58
AU DESSUS DES OCEANS : OBSERVATION PAR SATELLITE	60
PROJETS METHODOLOGIQUES	61
CONCLUSION	62

Articles fournis

- [1] MALLET C., MOREAU E., CASAGRANDE L., KLAPISZ C. *'Determination of integrated cloud liquid water path and total precipitable water from SSM/I data using a neural network algorithm*, **International Journal of Remote sensing Vol 23 Issue 4 pp 661-674, Fev. 2002**
- [2] MOREAU E., MALLET C., THIRIA S., MABBOUX X., BADRAN F., KLAPISZ C., *Atmospheric Liquid Water Retrieval Using a Gated Expert Neural Network*, **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology Vol 19**, pp 457-466, 2002.
- [3] BARTHES L., MALLET C., GOLE P., *Neural Network model for atmospheric attenuation retrieval between 20 and 50 GHz by means of dual beam radiometers*, **Radio Science #2002RS002813, Vol 38 N°5 , 2003**
- [4] BRISSEAU O., C. MALLET, BARTHES L., T. MARSAULT, *Frequency scaling of rain attenuation based on microphysical characteristics for SatCom link*, **IEE Microwaves, Antennas & Propagation, Vol 153, Issue 6, p. 523-532 Decembre 2006**
- [5] DE MONTERA L., MALLET C., L. BARTHES and P. GOLE *"Short-term prediction of rain attenuation level and volatility in Earth-to-Satellite links at EHF band* **Nonlinear Processes in Geophysics, , Nonlin. Processes Geophys., 15, 631-643, 2008**

Curriculum vitae

ETAT CIVIL

Cécile MALLET

née le 16 mars 1965 à Désertines (03)

mariée, 4 enfants

Laboratoire : LATMOS , 10-12, Avenue de l'Europe , 78140 Vélizy

N° de téléphone : 01 . 39 . 25 . 48 . 84

e.Mail : Cecile.Mallet@latmos.ipsl.fr

FORMATION

juillet 88 **Diplôme d'ingénieur** du Centre Scientifique et Polytechnique de l'Université de Paris-Nord (13) Spécialité **Télécommunications.**

Juin 88 **DEA** de l'Université Paris 7
Spécialité **Mesures Physiques pour la télédétection**

janvier 91 **Thèse de Doctorat** de l'Université Paris 7 dirigée par le professeur J.Lavergnat
Spécialité **Méthodes Physiques en télédétection**
Titre: Radiométrie multifréquences en ondes millimétriques: Application au programme Olympus

SITUATION PROFESSIONNELLE

1991-1992 Ingénieur contractuel au Centre National d'Etude des Télécommunications

1992-2003 **Maître de Conférence (section 63)** de l' Université de Versailles Saint Quentin
en poste à l'**IUT de Vélizy** Génie des Télécommunications et Réseaux (GTR)

2003- **Maître de Conférence (section 61)** de l' Université de Versailles Saint Quentin
en poste à l'**UFR de Sciences**

1992-2008 **Chercheur au CETP** (Unité mixte CNRS/UVSQ)
département:Electromagnétisme et Méthode d'Analyse (EMA)

2009- **Chercheur au LATMOS** (Unité mixte CNRS/UVSQ)
département: Statistique Processus Aérosols Cycle de l'Eau (SPACE)

ACTIVITE D'ENSEIGNEMENT

CREATION DE FILIERES

En 1991, j'ai participé en tant que vacataire, à la **mise en place du département GEII** au sein du nouvel IUT de Vélizy. Mon recrutement en 1992 au poste de Maître de Conférences a été motivé par la **création du premier département GTR** (devenu R&T) dédié à une nouvelle formation de technicien supérieur dans le domaine alors en pleine expansion des Télécommunications et Réseaux. Responsable de la création des programmes d'électronique et de traitement du signal de première année, j'ai alors dû consacrer une grande partie de mon temps à mes activités d'enseignement. J'ai également pris en charge à cette époque la direction des études de la première année. Cette formation a très rapidement rencontré un vif succès tant auprès des étudiants que des employeurs

A partir de 1996, j'ai abandonné la direction des études de la première année et ainsi pu rétablir l'équilibre entre mes activités de recherche et d'enseignement. La création au sein du CETP du département EMA (Electromagnétisme et Méthodes d'Analyse), ainsi que la mise en place par l'IPSL de groupes de travail communs à plusieurs laboratoires, m'ont amenées à développer l'aspect méthodologique de mon travail. Les méthodes d'analyse statistiques avancées trouvent des applications dans des secteurs d'activités de plus en plus nombreux, étant donné la masse importante de données disponibles. Cette constatation m'a amené à participer à la **création du DESS TICED "Traitement de l'information du Capteur à l'Extraction des Données"**. Cette formation se propose de faire bénéficier les étudiants de l'Université de Versailles des développements effectués au sein des laboratoires de l'IPSL¹ et qui concernent : l'acquisition et le prétraitement des données (capteurs, mesures, numérisation, filtrage), la modélisation mathématique et la simulation statistique du problème, l'interprétation et la validation des résultats de simulation, la conception et la gestion des bases de données.

A l'occasion de la réforme LMD, avec Sylvie Thiria, nous avons mise en place les **parcours professionnel et recherche du master pluridisciplinaire TRIED « TRaitement de l'Information et Exploitation des Données »** au sein de la mention Science Pour l'Ingénieur de l'UVSQ. J'ai pris la responsabilité du parcours professionnel TRIED. Dans la continuité de DESS TICED, son but est de former des ingénieurs d'étude qui doivent être impliqués directement dans des secteurs opérationnels, et d'amener sur le marché du travail des scientifiques capables de concevoir des modélisations complexes dans des domaines divers tels

¹ L'institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) est une fédération des laboratoires de recherche de la région parisienne impliqués dans les sciences de l'environnement terrestre et planétaire.

que le spatial, les télécommunications, la géologie, l'automobile, la finance. Le parcours recherche a pour finalité d'initier aux méthodes d'analyse des données les plus récentes, les étudiants ayant suivi un cursus initial en physique, biologie, informatique, ou mathématiques appliquées. Ce master pluridisciplinaire, co-habilité avec TELECOM&Management SudParis (ex INT) et le CNAM, a su rester suffisamment attractif pour maintenir un effectif moyen d'une vingtaine d'étudiants, et ce malgré un contexte de flux d'étudiant décroissant au sein du département de physique de l'université de Versailles.

ENSEIGNEMENTS

A l'exception du module de méthodes numériques que j'enseigne en Licence. J'ai mis en place tous les cours, travaux dirigés et travaux pratiques mentionnés ci-dessous

1990 -1991 enseignant vacataire

Disciplines :Informatique- Electronique

Informatique

TP 60 h Licence

Electronique :

TP 60 h IUT GEII

1992 - 1995 MCF à l'IUT de Vélizy dept GTR

Disciplines :Physique- Electronique

création du département Génie des Télécommunications et Réseaux (GTR)

direction des études de première année

Physique

CM 12 h TD 30 h TP 30h IUT GTR

Propagation des Ondes

CM 12 h TD 45 h IUT GTR

Electronique

CM 12 h TD 15 h TP 60h IUT GTR

Encadrement divers (projets , stages) :40h

Total annuel équivalent TD \approx 260 heures

1996-1999 MCF à l'IUT de Vélizy

Disciplines :Physique- Electronique-Traitement du signal

Physique

CM 12 h TD 30 h TP 20h IUT GTR

Propagation des Ondes

CM 12 h TD 45 h IUT GTR

Transmission

CM 12 h TD 15 h TP 20h IUT GTR

Signaux et Systèmes

CM 12 h TD 15 h TP 20h IUT GTR

Encadrement divers (projets , stages) :40h

Total annuel équivalent TD \approx 220 heures

1999- 2002 MCF à l'IUT de Vélizy

création du DESS TICED à l'PUVSQ

Disciplines :Physique- Traitement du signal –Analyse de données

Physique	CM 12 h TD 30 h TP 20h	IUT GTR
Propagation des Ondes	CM 12 h TD 45 h	IUT GTR
Signaux et Systèmes	CM 12 h TD 15 h TP 20h	IUT GTR
Réseaux de neurones et reconnaissance des formes en DESS	TD 30 h	DESS
Encadrement projets DESS	TP 10h	DESS

Total annuel équivalent TD ≈ 220 heures

2003-2004 MCF à l'UFR de sciences

Disciplines :Méthodes numériques -Analyse de données- Réseaux de Neurones

Méthodes numériques	CM 12 h TD 48 h TP 24h	Licence 3
Analyse de données	CM 6 h TD 6 h TP 8h	Master 1
Reconnaissance des formes	CM 14h TD 14 h TP 6h	Master 1
Réseaux de neurones et reconnaissance des formes	TD 45 h	Master 2
Encadrement projets	TP 10h	Master 2

Total annuel équivalent TD ≈ 196 heures

2005 -2008 MCF à l'UFR de sciences

Création des parcours recherche et professionnel du Master TRIED

Disciplines :Méthodes numériques- Modélisation statistique –Reconnaissance des formes

Méthodes numériques	CM 9 h TD 36 h	Licence 3
Application des méthodes statistiques	CM 18 h TD 18 h TP 36 h	Master 1
Traitement statistique des données	TD 45 h	Master 2
Encadrement projets Master TRIED année 2	TP 20h	Master 2

Total annuel équivalent TD ≈196 heures

DE LA NECESSITE DE LA FORMATION A LA RECHERCHE

Un important volet de mes activités d'enseignement concerne la formation à la recherche

J'ai participé à la formation des chercheurs et des doctorants, dans le cadre de l'école de printemps « Les réseaux de neurones et leurs applications à l'aéronautique, au spatial et à l'environnement », patronnée par le CEA, le CNES, l'ONERA en 2001. J'ai également participé à la formation des doctorants et les chercheurs de l'école doctorale de l'environnement à l'occasion des cours « Modélisation neuronale appliquée aux données de télédétection spatiales et Assimilation » réalisés en 2002 et 2003.

En tant qu'enseignant-chercheur, je suis confrontée à double titre au manque d'attrait des filières scientifiques et en particulier des formations à la recherche. Ce constat me préoccupe. C'est pourquoi, parallèlement à mes activités de recherche, d'enseignement et d'encadrement de la recherche, j'ai ressenti la nécessité d'y remédier dans la mesure de mes moyens.

Outre les doctorants et les stages de Master 2^{ème} année mentionnés dans ce document, j'ai accueilli au sein du laboratoire nombre d'étudiants en stage de Licence, de Master 1^{ère} année, ou pour des projets d'initiation à recherche de Master Professionnel.

J'ai demandé en 2002 une mutation de l'IUT de Vélizy au département de physique de l'UVSQ : Ma motivation principale était la création du Master TRIED. Ce Master pluridisciplinaire, comprends un parcours Recherche et un parcours Professionnel. Je pense avoir contribué, par un investissement important auprès de Sylvie Thiria, à le rendre particulièrement attractif.

Au sein du Master je coordonne et j'évalue les projets de recherche réalisés un mois durant, par les étudiants aux seins des laboratoires de recherche qui participent à la formation. Le master forme à la modélisation statistique et au traitement des données (images, reconnaissance des formes, réseaux de neurones, chaîne de Markov, réseau bayésien, capteur), mais une sensibilisation particulière est apportée aux thèmes de l'environnement et de la biométrie.

De plus, dans le contexte actuel, maintenir un flux d'étudiants dans une formation à la recherche, nécessite de mener des actions de communication (site web, création et diffusion de plaquettes), de mettre en place des cohabitations ou des conventions avec d'autres établissements en France ou à l'étranger.

Ma mission est de maintenir un équilibre entre l'enseignement et la recherche. Parallèlement à mes activités de direction scientifique, j'ai fait en sorte de diffuser aux étudiants les savoirs les plus récents dans le domaine de la modélisation statistique, de leur communiquer le goût pour l'activité scientifique, et de maintenir une filière indispensable à la formation de futurs chercheurs.

ACTIVITE ADMINISTRATIVE

ENSEIGNEMENT ET RECHERCHE

- 2001 – 2006 Nommée à la CSE section 61 et 63 de l'Université de Marne-la-Vallée
 1998 –2008 Elue à la CSE section 61 et 63 collège B , UVSQ

ENSEIGNEMENT

- 1992 – 1995 Direction des études du département GTR
 1992 – 2002 Responsable organisation des enseignements d'électronique GTR année
 2000– Responsable projets longs DESS TICED puis Master TRIED
 2000– Responsable stages DESS TICED puis Master TRIED
 2005– Responsable Master TRIED parcours professionnel
 2008 – Elue au conseil de l'UFR de Sciences

CONTRATS ET PROJETS DE RECHERCHE

Mes travaux s'insèrent dans différents contrats qui sont l'occasion d'une activité administrative plus ou moins importante

1995–1998	projet européen NEUROSAT soutenu par la Commission Européenne Intitulé :" <i>Processing of environment observing satellite data with Neural Networks</i> ". Responsable Michel Crepon (LODYC) Responsable CETP Cécile Mallet
1995–1998	Contrat entre le CETP et l'agence spatiale japonaise (NASDA). Projet également soutenu par le CNES Intitulé " <i>Development of methods combining data from AMSR and GLI to retrieve atmospheric water parameters and surface wind speed over the ocean</i> " Responsable CETP Claude Klapisz
1999–2002	Etude réalisée pour le compte du CELAR (DGA) Marché 98-42-541 par l'Association Universitaire de Recherche Appliquée (AURA/CETP). Intitulé « <i>Préparation de la campagne de propagation EXPRESS (Expérimentations de Propagation en EHF avec le satellite STENTOR)</i> . Responsable CETP Jacques Lavergnat

1999–2002	<p>Contrat entre le CETP et l'agence spatiale japonaise (NASDA).</p> <p>Projet également soutenu par le CNES</p> <p>Intitulé "<i>Développement d'algorithmes neuronaux pour radiomètres hyperfréquences spatiaux (AMSR)</i>".</p> <p>Responsable CETP Cécile Mallet</p>
1999–2002	<p>Projet Constellation soutenu par le RNRT (Réseau National de Recherche en Télécommunication).</p> <p>Responsable CETP Laurent Barthes</p>
2000–2003	<p>Contrat entre le CETP et l'agence spatiale américaine (NASA).</p> <p>Intitulé "<i>validation of TRMM rain products and heat fluxes with ground segments data sets</i>"</p> <p>soutenu par le PATOM (Programme National Atmosphère et océan multi-échelle) dans le cadre du projet "<i>Estimation par satellites des profils de chaleur latente dans la convection tropicale: application aux cas des cyclones tropicaux</i>"</p> <p>Responsable CETP Nicolas Viltard</p>
2000–2002	<p>Projet européen CLIWANET soutenu par la Commission Européenne</p> <p>Intitulé "<i>BALTEX Cloud Liquid Water Network</i>"</p> <p>Responsable CETP Cécile Mallet</p>
2001–2003	<p>Contrat entre le CETP et le CELAR (DGA) Marché 01-42-521 lancé en 2001</p> <p>Intitulé « <i>Prestations pour le soutien au groupe de travail EXPRESS. (Expérimentations de Propagation en EHF avec le satellite STENTOR)</i> »</p> <p>Les tranches conditionnelles n'ont jamais été effectives (échec du lancement du satellite STENTOR, vol 157 ESCA Ariane 5).</p> <p>Responsable CETP Jacques Lavergnat</p>
2001–2003	<p>Projet soutenu par le PNTS (Programme National : 'Télédétection Spatiale')</p> <p>Intitulé '<i>Développement d'algorithmes neuronaux pour radiomètres hyperfréquences spatiaux</i>'</p> <p>Responsable CETP Cécile Mallet</p>
2004–2004	<p>Projet VAPIC soutenu par le PNTS</p> <p>Campagne d'inter comparaison de mesures de la vapeur d'eau atmosphérique à partir d'instruments de télédétection au sol et embarqués sur satellite (VAPIC).</p> <p>Responsable IPSL Martial Heafflin</p>

2005-2005	<p>Projet VAPIC2 soutenu par le PNTS</p> <p>Campagne d'inter comparaison de mesures de la vapeur d'eau atmosphérique à partir d'instruments de télédétection au sol et embarqués sur satellite (VAPIC).</p> <p>Responsable IPSL Martial Heafflin</p>
2005–2007	<p>Projet européen AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine) soutenu par la Commission Européenne d'étude de la mousson africaine, campagne de mesures au Sénégal et au Bénin.</p> <p>Intitulé. <i>Mesure de la variabilité spatiale et temporelle de la microphysique des précipitations</i></p> <p>Responsable CETP Alain Protat</p>
2005–2005	<p>Financement BQR (Bonus Qualité Recherche) de l'UVSQ</p> <p>Intitulé : <i>Mesure de la variabilité spatiale et temporelle de la microphysique des précipitations (projet AMMA)</i></p> <p>Responsable CETP Cécile Mallet</p>
2006–2009	<p>Contrat entre le CETP et le CELAR (DGA)</p> <p>Intitulé « <i>Modélisation du canal de propagation Terre-Satellite en bande EHF</i> »</p> <p>Responsable CETP L.Barthes</p>
2008–2008	<p>Financement BQR (Bonus Qualité Recherche) de l'UVSQ</p> <p>Intitulé : <i>Analyse Multifractal de séries temporelles 1D et 2D : application à la modélisation statistique des précipitations</i></p> <p>Responsable CETP Laurent Barthes</p>

ACTIVITE D'ENCADREMENT

ENCADREMENT DE THESES

5 doctorants et un stage de thèse

Ada Bosisio

Thèse de l'Université degli Studi La Sapienza Spécialité Electromagnétisme
Titre : *Utilizzo del radiometro come strumento d'indagine degli effetti atmosferici sulla propagazione di onde millimetriche in collegamenti terra-spazio*,
(*Utilisation du radiomètre comme instrument pour l'investigation des effets atmosphériques sur la propagation des ondes millimétriques le long des liaisons terre espace*)

Date mars 1992 - février 1995

Directeur de thèse Professeur Carlo Capsoni

Encadrement 100 % pendant le stage de deuxième année de octobre 1993 – février 1994

Ecole Doctorale : Electronique et Télécommunications du Politecnico di Milano, Italie.

Emmanuel Moreau

Thèse de l'Université Paris 7 Spécialité Méthodes Physiques en Télédétection
Titre : *Restitution de paramètres atmosphériques par radiométrie hyperfréquence spatiale. Utilisation de méthodes neuronales*

Date Octobre 1997.- Octobre 2000

Encadrement 70 % co-directeur Claude Klapisz 30%

Ecole Doctorale : EDSE École Doctorale des Sciences de l'Environnement d'Ile de France

Financement : bourse du Ministère

Olivier Brisseau

Thèse de l'Université de Rennes 1 Spécialité Traitement du Signal et Télécommunications
Titre : *Développement de modèles de similitude en fréquence pour les liaisons terre-espace en EHF.*

Date Novembre 2001 – Novembre 2005 (thèse prolongée en raison d'un arrêt maladie de 6 mois en 2004)

Encadrement: 50% co-directeur: Barthes Laurent 50%

Ecole Doctorale : MATISSE Ecole Doctorate MATHématique Télécommunication Informatique Signal Systèmes Electronique

Financement : DGA - Contrat CELAR

Miguel Angel Pérez Chavarria

Thèse de l'Université Paris 6 Spécialité Télédétection et méthodes statistiques
Titre : *Restitution de paramètres atmosphériques hydrologiques sur l'océan par radiométrie hyperfréquence spatiale. Méthodologie neuronale.*

Date– Novembre 2003 - Décembre 2007

Encadrement: 50% Sylvie Thiria 50 %

Ecole Doctorale : EDSE École Doctorale des Sciences de l'Environnement d'Ile de France

Financement : Université Autonome de Basse Californie (UABC)

Louis De Montera

Thèse de l'Université de Versailles Spécialité Modélisation Statistique des milieux naturels

Titre : *Etude de la variabilité de la microphysique de la pluie : Application à la propagation des ondes millimétriques en satcom*

Date Septembre 2006 – (prévue) Novembre 2008

Encadrement: 50% co-directeur: Barthes Laurent 50%

Ecole Doctorale : M2RM2 Matière, Milieux, Réactifs et Méthodes de la Modélisation

Financement : DGA - Contrat CELAR

Sébastien Verrier

Thèse de l'Université de Versailles Spécialité Modélisation Statistique des milieux naturels

Titre : *Modélisation multi fractale des champs précipitants*

Date Octobre 2008 -

Encadrement: 50% co-directeur: Barthes Laurent 50%

Ecole Doctorale : EDSE École Doctorale des Sciences de l'Environnement d'Ile de France

Financement : bourse du Ministère

ENCADREMENT DE STAGES DEA et MASTER RECHERCHE ANNEE 2

9 étudiants soit un total de 52 mois

Luc Casagrande. Date : Mars 1997- Juillet 1997

Diplôme DEA Méthode Physique en télédétection UPMC

Titre : *Restitution de grandeurs Géophysiques par radiométrie hyperfréquence spatiale*

Sabrina Durcos Date :Avril 2002-Septembre 2002

Diplôme :. DEA télécom + ingénieur ENST

Titre : *Statistiques d'atténuation en bande Ka et Q*

Aymeric Chazottes Date :Mars 2003-Aout 2003

Diplôme :. DEA Méthode Physique en Télédétection UPMC

Titre : *Etude de l'inhomogénéité spatio-temporelle de la pluie*

Gaëlle Verge-depre Date : Mars 2003-Juillet 2003

Diplôme :. DEA Méthode physique en télédétection UPMC

Titre : *Réalisation de cartes globales de précipitations par radiométrie hyperfréquence*

Ibnouzahir Youssef Date : Mars 2004-Juillet 2004

Diplôme :. DEA Statistique UPMC

Titre : *Extension 3D d'un simulateur spatio-temporel de l'inhomogénéité de la pluie à partir d'une méthode de stéréologie*

Foudil Benkerrou Date :Avril 2006-Juillet 2006

Diplôme :. Master 2 TRIED recherche UVSQ

Titre : *Prédiction des séries temporelles d'affaiblissement*

Zakaria Darfaoui Date :Avril 2006-Juillet 2006

Diplôme :. Master 2 électronique et systèmes de communication, UPMC

Titre : *Etude de la microphysique de la pluie à l'aide d'un spectropluviomètre*

Slim Karkar Date :Avril 2007-Juillet 2007

Diplôme :. Master 2 TRIED recherche UVSQ

Titre : *Prédiction des séries temporelles d'affaiblissement en bande EHF :utilisation des méthodes neuronales*

Sahra Kacimi Date :Mars 2008-Juin 2008

Diplôme :. DEA Méthode Physique en Télédétection UPMC

Titre : *Utilisation des réseaux de neurones pour réduire la base de l'algorithme BRAIN*

ENCADREMENT DE STAGES DESS, INGENIEUR et MASTER PROFESIONNEL ANNEE 2

7 étudiants soit un total de 42 mois

Louis de Montera Date : Avril 2000.- Septembre 2000.

Diplôme :Ingénieur Supélec

Titre : *Développement d'algorithmes neuronaux de restitution des précipitations à partir de mesures hyperfréquences (actives et passives)*

Pierre Courtois Date :Avril 2001- Novembre 2001

Diplôme : Ingénieur ESME Sudria

Titre : *Estimation des affaiblissements d'une liaison Terre – satellite en bande Ka à l'aide d'un modèle neuronal*

Alexandre Pitti Date :Avril 2001- Septembre 2001

Diplôme:Ingénieur ESME Sudria

Titre : *Développement d'algorithmes neuronaux pour le radiomètre AMSR*

Kemal Gebic Date :Avril 2002-Septembre 2002

Diplôme : DESS Application des Technologies Spatiales

Titre : *Correction du biais d'échantillonnage dans la réalisation de cartes globales de précipitation*

David Wolyniec Date :Mars 2002-Juillet 2002

Diplôme :. DESS Traitement de l'Information et Exploitation des Données

Titre : *Developpement instrumental : mise au point d'un algorithme neuronal de détection des gouttes de pluie par un spectropluviomètre*

Adil El Gazzouzi Date :Mars 2004-Aout 2004

Diplôme : DESS Traitement de l'Information et Exploitation des Données

Titre : *Utilisation des cartes de Kohonen pour l'égalisation des bases de données*

Sébastien Verrier Date :Avril 2008-Septembre 2008

Diplôme :Ingénieur Supélec

Titre : *Analyse multifractal de données radar.*

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

ARTICLES DE REVUES INTERNATIONALES A COMITE DE LECTURE

- [1] MALLET C., LAVERGNAT J., *Beacon calibration with multifrequency radiometer*, **Radio Science**, Vol 27, Number 5, pp 661-680, September-October 1992
- [2] BOSISIO A. V., MALLET C., *Influence of Cloud Temperature on Brightness Temperature and Consequences for Water Retrieval*, **Radio Science**, Vol 33, Number 4, pp 929-939, July-August 1998
- [3] MALLET C., MOREAU E., CASAGRANDE L., KLAPISZ C. *Determination of integrated cloud liquid water path and total precipitable water from SSM/I data using a neural network algorithm*, **International Journal of Remote sensing** Vol 23 Issue 4 pp 661-674, Feb. 2002
- [4] MOREAU E., MALLET C., THIRIA S., MABBOUX X., BADRAN F., KLAPISZ C., *Atmospheric Liquid Water Retrieval Using a Gated Expert Neural Network*, **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology** Vol 19, pp 457-466, 2002.
- [5] BARTHES L., MALLET C., GOLE P., *Neural Network model for atmospheric attenuation retrieval between 20 and 50 GHz by means of dual beam radiometers*, **Radio Science** #2002RS002813, Vol 38 N°5, 2003
- [6] MALLET C., L. BARTHES, A. CHAZOTTES, GOLE, *Simulation of rain attenuation time series*, **Space Communication IOS Press**, Volume 20, Number 1-2, pp61-68, 2005
- [7] BRISSEAU O., C. MALLET, BARTHES L., T. MARSAULT, *Frequency scaling of rain attenuation based on microphysical characteristics for SatCom link*, **IEE Microwaves, Antennas & Propagation**, Vol 153, Issue 6, p 523-532, Décembre 2006.
- [8] BARTHES L., C. MALLET BRISSEAU O. *A neural network model for the separation of atmospheric effects on attenuation: Application to frequency scaling*, **Radio Science paper n°2005RS003310R**, vol. 41, 2006.
- [9] DE MONTERA L., MALLET C., L. BARTHES and P. GOLE *Short-term prediction of rain attenuation level and volatility in Earth-to-Satellite links at EHF band*, **Nonlin. Processes Geophys.**, 15, 631-643, 2008.
- [10] DE MONTERA L., L. BARTHES, MALLET C *The effect of rain-no rain intermittency on the estimation of the Universal Multifractal model parameters*, **J. of Hydrometeorology**, 2008
- [11] MALLET C., L. BARTHES, *Estimation of Parameters of Gamma Raindrop Size Distribution : Statistical Fluctuation and Estimation Error*, (accepté JAOT Février 2009)

Articles soumis

- [12] L. BARTHES, MALLET C., *Vertical evolution of the rain drop size distribution: Impact on the shape of the DSD*, (soumis JAOT Juin 2008)

Ouvrages (ou extraits) à comité de lecture

- [13] C. MALLET OPEX Second workshop of the OLYMPUS Propagation Experimenters ; Vol 3: **Reference Book on Radiometry and Meteorological Measurements** ; ch 3 : Measurement Techniques ; WPP-083 ESA, 41-57, Noordwijk, 8-10 Novembre 1994

- [14] MOREAU E., MALLET C., KLAPISZ C., *Effects of aspherical ice and liquid hydrometeors on microwave brightness temperatures*, in **Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Earth's Surface and Atmosphere**, pp 283-290 edited by VSP Netherland 2000
- [15] MALLET C., KLAPISZ C., VILTARD N., *Effects of heterogeneous precipitating atmospheres on simulated microwave brightness temperatures*, in **Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Earth's Surface and Atmosphere**, pp 291-298 edited by VSP Netherland 2000

ACTES DE CONGRES INTERNATIONNAUX

- [16] DELAHAYE J.Y., LAVERGNAT J., MALLET C., *Beacon calibration by means of two-frequency radiometer*, in **Proceedings of the U.R.S.I. Symposium [Commission F]**, pp. 6.6.1-6.6.5, 1989
- [17] MALLET C., LAVERGNAT J., *Zero level retrieval by means of a two-frequency radiometer*, ESA, **First OPEX Workshop proceedings**, april 1991.
- [18] MALLET C., LAVERGNAT J., *Radiometer calibration by means of tip-curve*, in **Proceedings of the U.R.S.I. Symposium [Commission F]**, 1992.
- [19] LAVERGNAT J., P. GOLE and C. MALLET, *Retrieval of Atmospheric Water from Ground-based Radiometry*, ESA, Olympus utilisation conference, in **Proceedings of an International Conference concerning Programme results**, Sevilla, Spain .WPP-60 ESA pp595-602, april 1993
- [20] BOSISIO A. V., MALLET C. *Retrieval of water vapor and liquid water content from three radiometric frequency: Towards a non linear approach.*, ESA, **Progress In Electromagnetics Research Symposium**, Noordwijk, The Netherlands July 1994.
- [21] BOSISIO A. V., MALLET C. *Water Vapour and Liquid Water Content retrieval by means of a Non Linear Three Frequency Algorithm*, ESA, **Progress In Electromagnetics Research Symposium**, University of Innsbruck, Austria , July 1996
- [22] MALLET C., *Water vapor algorithm intercomparison*, in Proceedings of an **International Conference concerning Retrieval Algorithm and related Advanced Microwave Scanning radiometer (AMSR) on Advanced Earth Observing Satellite - II(ADEOS II)**, Tokyo, Japan septembre 1997
- [23] MOREAU E., MALLET C., CASAGRANDE L., KLAPISZ C., *Determination of integrated cloud liquid water and total precipitable water using neural network algorithm*, in Proceedings of the **SPIE's First International Asia-Pacific Symposium on Remote Sensing of the Atmosphere, Environment, and Space**, Beijing 14-17 Septembre 1998
- [24] MOREAU E., MALLET C. KLAPISZ C., and N. VILTARD: *A neural network approach to estimate rainfall from spaceborne microwave data*. Comparison with the PR, **XXVIth General Assembly of European Geophysical Society**, Nice, France, 25-29 March 2001 (avail. CDrom)
- [25] GAIROLA R., MALLET C., VILTARD N., MOREAU E., *Rainfall from TRMM-TMI*, in **Proceeding of Méghatropique conférence**, France Juillet 2001 Paris
- [26] GAIROLA R., OBLIGIS E., MOREAU E. MALLET C., EYMARD L., *Multiparameter microwave retrieval algorithms: Part B perforance of neural networks*, in **Proceeding of Méghatropique conférence**, France Juillet 2001 Paris

- [27] BARTHES L., MALLET C., P. COURTOIS, P. GOLE P, LAVERGNAT *Etude statistique de l'atténuation dans la bande 20 – 50 GHz au moyen de radiomètres : application à la diversité de pointage* in **4èmes Journées d'études "Propagation Electromagnétique dans l'Atmosphère du Décamétrique à l'Angström"** à l'Université de Rennes 1, Mars 2002
- [28] VILTARD N., C. BURLEAU and C. MALLET *Rainfall retrieval over the West African regions from TMI data using PR-based rain profiles co-located with brightness temperature measurements*, **1st TRMM International TRMM Sciences Conference** 22-26 July Honolulu, Hawaii
- [29] MALLET C. VILTARD N.: *Comparison between Bayesian techniques and self-Organizing Feature Map for TMI Measurement Classification : Application to rain Rate Retrieval*, **3rd Conference on Artificial Intelligence Application to the Environmental Science**, Long Beach , CA, 2003
- [30] BRISSEAU O. BARTHES L, MALLET C, *Effect of microphysical characteristics of rain on frequency scaling in microwave band*, **IGARSS (International Geoscience and Remote Sensing Symposium)**, 21-25 July 2003, Toulouse. publié sur CD
- [31] BRISSEAU O. BARTHES L, MALLET C MARSALUT T. *Rain frequency scaling model using the normalized DSD concept*, **European Conference Propagation & System (ECPS'05)**, Brest mars 2005
- [32] MALLET C BARTHES L, MARSALUT T., *Validation of a neural network model for atmospheric effects on attenuation* , **European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2006)**, Nice Novembre 2006
- [33] DE MONTERA L. MALLET C BARTHES L, *Short-term prediction of rain attenuation using financial time series models*, **Int. Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)**, Niigata, Japan, August 2007.
- [34] MARSALUT T., L. DE MONTERA L HERMANT J. D. MAUREL C., BRISSEAU O. BARTHES L, MALLET C , GOLE P. *EHF propagation experiment with syracuse 3 satellite: first results*, **European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2007)**, Edinburgh, UK, November 2007.
- [35] DE MONTERA L. MALLET C BARTHES L: *Multifractal properties of rain at high resolution derived from Earth-to-satellite links fading*, **International. Precipitation Conference. (IPC 9)**, U. Paris Est, Paris, November 2007.
- [36] L. DE MONTERA, BARTHES L, GOLE P. MARSALUT T., , MALLET C , *Short-term prediction of atmospheric attenuation in Q band from Ka band measurements in Earth-to-Satellite links*, **European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2009)**, Berlin Allemagne, Mars 2009.
- [37] MARSALUT T., HERMANT J. D., L. DE MONTERA , BARTHES L, MALLET C , GOLE P. *Statistical Analysis Of The SYRACUSE 3 Satellite EHF Propagation Experiment*, **European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2009)**, Berlin Allemagne, Mars 2009.
- [38] PEREZ CHAVARRIA M.A., MEJIA C., MALLET C., CREPON M., BADRAN F., THRIA S. *Rain rate retrieval by processing the observations of the 85V and 85H GHz channels of the SSM/I and TMI passive microwave sensors*, **IJCNN International Joint Conference on Neural Network, Atlanta USA**, Juin 2009

COMMUNICATIONS ET POSTERS DANS DES CONFERENCES INTERNATIONNALES

- [39] MALLET C., *Communication sur l'étalonnage des balises satellitaires*, in **OPEX 14 meeting** in Felixstowe, octobre 1990
- [40] MALLET C., LAVERGNAT J., *Contribution of CETP (IPSL) : Use of neural network for the inversion of SSM/I radiometric data*, **NEUROSAT Meeting**, Paris, Mai 1995

- [41] MOREAU E.,MALLET C.,*Estimation of integrated cloud liquid and water vapour by using microwave radiometric data*, Second year **NEUROSAT Meeting**, Paris, 3-4 July 1998
- [42] MALLET C.,*A Neural Network Approach to Retrieve Atmospheric Parameters over the Ocean from AMSR Microwave radiometric Data*, **The third ADEOS_II AMSR WORKSHOP**, Tokyo, 10-12 November 1998
- [43] MOREAU E., MALLET C., KLAPISZ C., *Effects of aspherical ice and liquid hydrometeors on microwave brightness temperatures* ,**6th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment, session on basic studies in microwave radiometry**,Florence (Italie), 15-18 Mars 1999.
- [44] MALLET C., KLAPISZ C., VILTARD N., *Effects of heterogeneous precipitating atmospheres on simulated microwave brightness temperatures*,**6th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment, session on satellite microwave radiometry of clouds and precipitations**,Florence (Italie), 15-18 Mars 1999
- [45] MOREAU E.,MALLET C.,MAFFOUF, *Use of a multi-expert architecture to retrieveatmospheric quantities from satellite radiometric data*, **NEUROSAT Meeting** 4-5 June 1999 – Paris
- [46] MOREAU E.,MALLET C., KLAPISZ C., VILTARD N.,*TMI and PR synergy for rain retrieval with neural network techniques* **EURO-TRMM Meeting 15-17** Decembre 1999-Paris
- [47] MALLET C., EYMARD L.,*Contribution of CETP to BALTEX Cloud Liquid Water Network : CLIWA-NET, CLIWA_NET Kick-Off Meeting*, Texel, The Netherlands, April 5-7, 2000
- [48] MALLET C. **International Conference concerning Retrieval Algorithm and related Advanced Microwave Scanning radiometer (AMSR) on Advanced Earth Observing Satellite - II**, Kyoto, Japan Novembre 2000
- [49] MOREAU E.,MALLET C., KLAPISZ C., VILTARD N., *A neural network approach to estimate rainfall from spaceborne microwave data. Comparison with the PR*, **XXVIth General Assembly of European Geophysical Society**, 25-29 March, Nice, France 2001 (avail. CDrom)
- [50] KLAPISZ C., MALLET C., MOREAU E., VILTARD N.,*Rainfall Global Maps Using Passive Microwave Satellite Measurements*, **GEWEX** ,Paris,Septembre 2001
- [51] VILTARD N., BURLAUD C. and C. MALLET, *Rainfall retrieval over the West African regions from TMI data using PR-based rain profiles co-located with brightness temperature measurements*. **1st TRMM International TRMM Science Conference**, 22-26 July, Honolulu, Hawaii,2002
- [52] BRISSEAU O.,BARTHES L. MALLET C., MARSAULT T., *Effect of microphysical characteristics of rain on frequency scaling in microwave band*, **IGARS** Toulouse Juillet 2003
- [53] MALLET C., BARTHES L. CHAZOTTES A. GOLE P. *Simulation of rain attenuation time series, propagation workshop*, **CNES**, Toulouse, France, 3-15 Octobre 2004.
- [54] DE MONTERA L. MALLET C BARTHES L, P. GOLE, *The effect of the on-off intermittency on rain multifractal parameters*, **journées SAMA Statistical Modeling of Extremes in Data Assimilation and filtering approach U. louis Pasteur** , Stasbourg Juin 2008.
- [55] VERRIER S. DE MONTERA L. MALLET C. BARTHES L., *Multi-scale analysis of Radar Reflectivity Maps*, **EOS, Trans. AGU, Nonlinear Geophysique** 89(53), Fall Meet. Suppl., Abstract NG33A-1206, San Fransisco, Décembre 2008.
- [56] DE MONTERA L., VERRIER S. BARTHES L., MALLET C. : *Rain rate time series as an integrated multiplicative process*, **EGU General Assembly**, 2009.

Bilan scientifique

INTRODUCTION

Mon activité de recherche a débuté lors de ma thèse au CNET² par l'étalonnage des liaisons hyperfréquence entre la terre et le satellite Olympus³. Lors des expériences de propagation terre – satellite, la puissance émise à bord du satellite étant inconnue, l'estimation de l'affaiblissement observé sur la liaison nécessite un niveau de référence. J'ai défini et mis en œuvre un radiomètre terrestre destiné à estimer l'affaiblissement observé sur la liaison par ciel clair afin de réaliser cet étalonnage. Depuis, les recherches que j'ai menées se sont poursuivies dans ces deux directions :

Domaine I : Télédétection de l'atmosphère au moyen de radiomètres micro-ondes

Les constituants de l'atmosphère tels que la vapeur d'eau, l'oxygène, et l'eau liquide sont sources de rayonnement. L'atmosphère émet un rayonnement naturel qui dépend de sa constitution, la mesure à différentes fréquences de ce rayonnement électromagnétique incohérent au moyen de radiomètres spatiaux ou terrestres nous renseigne sur la constitution de l'atmosphère. J'ai développé des algorithmes pour l'estimation des contenus intégrés atmosphériques à partir des températures de Brillance radiométriques.

Domaine II : Modélisation du canal de propagation atmosphérique

L'évolution des systèmes de télécommunication, pousse à utiliser des fréquences de plus en plus élevées. La bande Ka (20-30 GHz) suscite un grand intérêt auprès des différents opérateurs de télécommunication par satellite. A plus long terme, l'utilisation de la bande Q/V (40-50 GHz) est également envisagée. A ces fréquences l'atmosphère, est à l'origine de la dégradation des bilans de liaisons des systèmes de télécommunication par satellites. J'ai participé à différentes campagnes de mesures, et aux travaux de modélisation associés, en vue du développement des futurs systèmes de télécommunication par satellite.

Mes recherches, dans ces deux domaines, ont pour base commune l'interaction des ondes électromagnétiques hyperfréquence avec l'atmosphère. Il ne s'agit pas ici de faire une présentation exhaustive des mécanismes qui affectent la propagation des ondes [Crane, 1981] ou qui sont sources du rayonnement mesuré par les satellites de télédétection passive. Il s'agit de décrire succinctement le milieu de propagation que constitue l'atmosphère et les phénomènes physiques en jeu dans la télédétection et la propagation hyperfréquence de l'atmosphère.

La partie basse de l'enveloppe gazeuse qui entoure la terre, nommée troposphère, est seule responsable des phénomènes qui nous intéressent ici. Ses limites sont définies par les variations

²Centre National d'Etude des Télécommunications

³ le satellite Olympus de l'ESA, percuté par un météore en août 1993

de la température avec l'altitude. La température décroît en effet (d'environ $6.5^{\circ}/\text{km}$) jusqu'à la tropopause caractérisée par un gradient de température pratiquement nul et située à une altitude d'environ 18 Km à l'équateur et 8 Km aux pôles. Le profil de pression décroît également avec l'altitude et peut souvent être approximé par une décroissance exponentielle. Les caractéristiques physiques du milieu, qui interviennent dans mes travaux, outre la température et la pression déjà mentionnée, sont sa composition en gaz (vapeur d'eau et oxygène) et la densité, la forme et les dimensions des hydrométéores qui le constitue. La densité de vapeur d'eau décroît mais les variations avec l'altitude sont irrégulières et varient au court du temps et en fonction de la localisation géographique. On considère que le rapport de mélange de l'oxygène est fixé à une valeur constante. Lorsque l'air se refroidit au-delà du point de saturation, la vapeur d'eau se condense pour former des gouttelettes d'eau, voire de la glace si la température est très basse. L'interaction des ondes avec les hydrométéores dépend des propriétés macro-physiques (taux précipitants) mais également microphysiques (distribution de taille des diamètres de gouttes). Dans les nuages, la concentration des particules d'eau liquide peut être importante (entre $0,3$ et $1\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), mais les particules ainsi formées sont de petites tailles (rayon inférieur à 50 micron). Les précipitations sont constituées d'hydrométéores de dimension plus importante (rayon supérieur à 0.2 mm).

La troposphère est donc constituée d'un mélange de particules ayant des dimensions et des caractéristiques très variées, des molécules de gaz (oxygène, vapeur d'eau) aux hydrométéores (nuage, pluie, glace, grêle). Le rayonnement électromagnétique interagit avec la matière suivant trois processus

- l'absorption due à la conversion de l'énergie électromagnétique en énergie thermique des particules absorbantes (molécules de gaz, particules d'eau). Le modèle de propagation MPM de Liebe pour les gaz [Liebe, 1989] et l'approximation de Rayleigh pour les nuages permettent de déterminer le coefficient linéique d'absorption (en dB/Km), c'est-à-dire l'absorption provoqué par 1 Km d'atmosphère homogène, à partir des caractéristiques de l'atmosphère (température, pression, humidité, eau liquide nuageuse) (Fig 1).

- la diffusion due à la redirection de l'onde par les hydrométéores, de sorte qu'une partie seulement de l'énergie se propage dans la direction du récepteur. Pour une particule donnée, l'importance du phénomène de diffusion dépend de la dimension relative de la particule par rapport à la longueur d'onde. En présence de précipitation (contrairement aux nuages), la taille des gouttes est du même ordre que la longueur d'onde et les phénomènes de diffusion deviennent prépondérants par rapport aux phénomènes d'absorption. La contribution d'une goutte d'eau à la diffusion du rayonnement est calculée à partir de sa surface d'extinction. La théorie de Mie [Mie, 1908], pour les gouttes sphériques, et la méthode de la matrice T, pour les

sphéroïdes, permettent le calcul de la surface d'extinction (Fig 2) a une fréquence donnée en fonction du diamètre. La contribution totale des précipitations suppose une connaissance de la granulométrie sous forme de DSD (Drop Size Distribution – Distribution de taille de goutte).

-l'émission par les particules absorbantes (molécules de gaz, particules d'eau), d'un rayonnement naturel incohérent.

Ces processus d'interaction des ondes avec la troposphère sont à l'origine de mes différents travaux. Les grandeurs géophysiques concernées sont diverses (vapeur d'eau, eau nuageuse ou pluie) et les moyens expérimentaux pluriels (liaison de télécommunication terre-satellite, radiomètres terrestres ou spatiaux). Mes recherches, de nature pluridisciplinaire, associent étroitement modélisation et observation, les travaux réalisés font appel à des aspects distincts et complémentaires :

- la modélisation physique du problème direct
- la description du milieu naturel
- la simulation numérique
- le développement de modèles inverses
- l'analyse et la modélisation statistique
- des campagnes de mesures
- la validation des modèles sur les bases de données observées.

Le parti pris est une recherche réellement pluridisciplinaire qui met à profit l'interaction entre ces différents aspects. La nécessaire interaction entre expérimentation et modélisation physique ou statistique, qui repose généralement sur la simulation numérique des processus en jeu, est commune à l'ensemble de mes travaux.

Les études décrites dans ce mémoire sont le fruit de nombreuses collaborations principalement au sein du CETP, du LOCEAN⁴ et du CELAR⁵. Ajoutons que de nombreux doctorants et stagiaires en sciences de l'environnement (EDSE)⁶, modélisation statistique (M2RM2)⁷, ou sciences de l'ingénieur (MATISSE)⁸ ont contribué à ces travaux.

⁴ Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentation et Approches Numériques

⁵ Centre d'ELectronique de l'ARmement et de la DGA (Direction générale de l'armement). Situé à Bruz, en Ille et Vilaine.

⁶ École Doctorale des Sciences de l'Environnement d'Ile de France

⁷ Matière, Milieux, Réactifs et Méthodes de la Modélisation

⁸ MAthématique Télécommunication Informatique Signal Systèmes Electronique

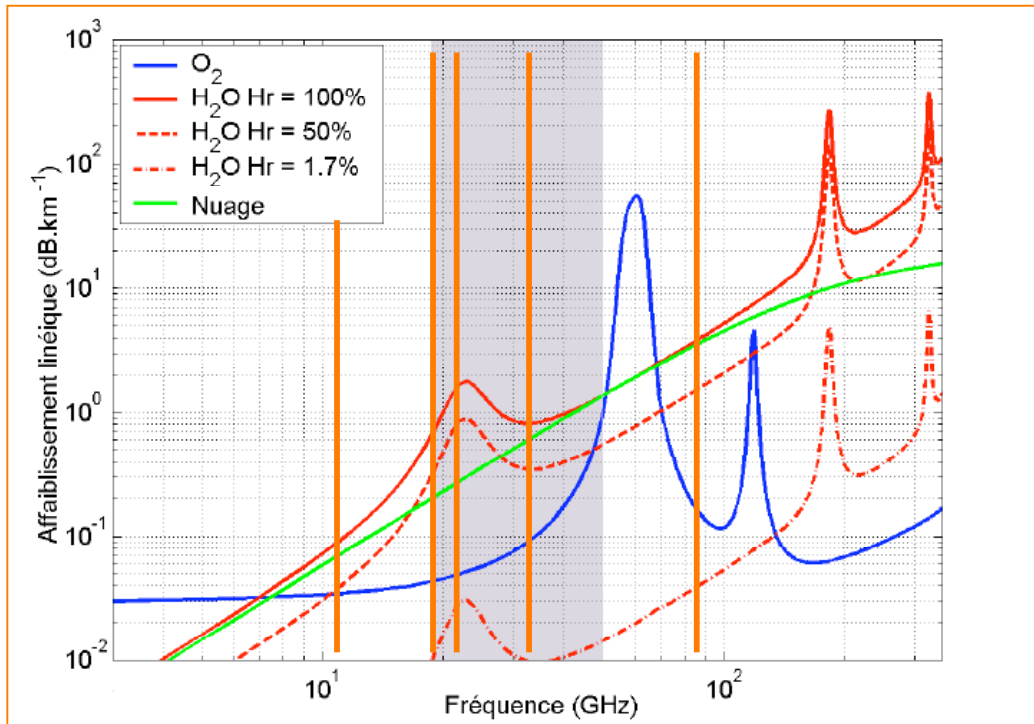


Figure-1. Affaiblissement linéique dû à l'oxygène à la vapeur d'eau pour une humidité relative variant de 1 à 100 % et à l'eau liquide nuageuse ($1g.m^{-3}$) en fonction de la fréquence. La zone en grisé correspond aux bandes Ka et Q/V des futurs systèmes de télécommunication. Les traits orange correspondent aux canaux utilisés par les radiomètres de télédétection.

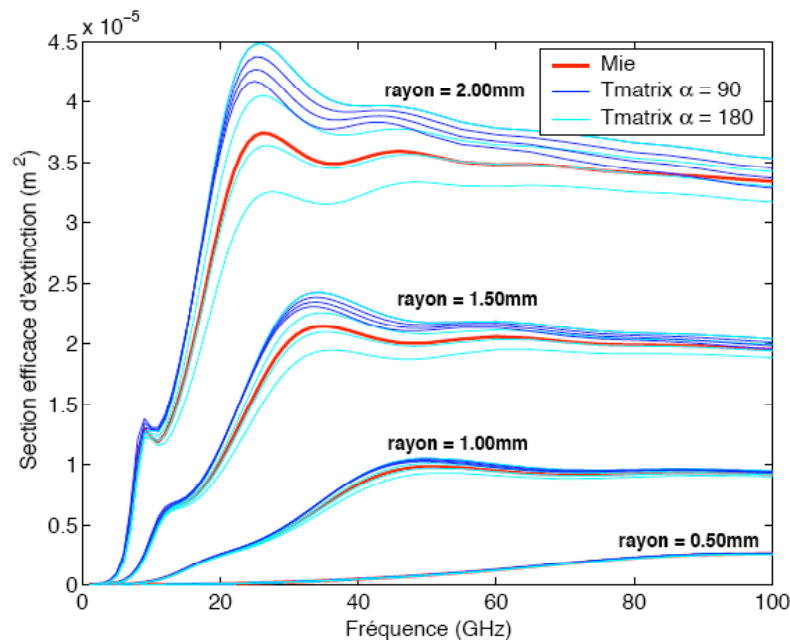


Figure-2. Surface efficace d'extinction de goutte d'eau pour différents rayons et différentes polarisations, en fonction de la fréquence pour $T=10^{\circ}C$. La surface d'extinction d'une goutte d'eau sphérique a été résolue par Mie en 1908 à partir des équations de Maxwell (courbe rouge). La théorie, dite de la Tmatrice, prend en compte la non sphéricité des gouttes (courbe bleu).

I. TELEDETECTION DE L'ATMOSPHERE AU MOYEN DE RADIOMETRE MICRO_ONDES

L'étude du cycle de l'eau, et en particulier des précipitations, suscite un grand intérêt car les enjeux sont aussi importants que variés. L'estimation des contenus en eau de l'atmosphère au-dessus des océans, qui représentent plus de 70% de la surface du globe, est un élément important de ces études. Seules les techniques de télédétection spatiales peuvent permettre une estimation des contenus atmosphériques à l'échelle globale.

Un radiomètre est un capteur passif qui mesure la puissance du rayonnement émis par l'atmosphère dans une bande de fréquence donnée. Cette mesure, appelée température de Brillance, est définie comme la température du corps noir qui émettrait une puissance identique. L'atmosphère n'étant pas un corps noir, la température de Brillance mesurée n'est pas égale à la température physique des couches de l'atmosphère, mais en dépend. La mesure des températures de Brillance à différentes fréquences au sein du domaine micro-onde (Fig 1, Tab. 1) permet d'isoler les différentes contributions de l'atmosphère.

La modélisation des processus d'absorption, de diffusion et d'émission décrits précédemment, associée à l'équation de transfert radiatif [Chandrasekhar, 1960], permet le calcul de la température de Brillance, à partir des propriétés du milieu. Dans le cas le plus général, le transfert du rayonnement à travers la matière dépend de trois variables spatiales, une variable temporelle, deux variables de direction et de la fréquence. Il s'agit donc d'un problème en dimension sept, non linéaire et qui doit être résolu de manière itérative. Dans le contexte particulier de la troposphère, certaines approximations peuvent être utilisées :

- les échelles de temps concernées permettent de négliger les variations thermiques du milieu au cours de la propagation (hypothèse statique)
- la courbure de la terre est négligée, on utilise l'approximation dite « plan-parallèle »
- l'approximation dite « d'équilibre thermodynamique local » peut également être utilisée. Elle permet le calcul de l'émission atmosphérique à partir de la connaissance de sa température physique locale.

Pour estimer les grandeurs atmosphériques à partir des températures de Brillance il s'agit d'inverser l'équation de transfert radiatif. L'équation de transfert radiatif ne peut pas être inversée de manière analytique, j'ai développé une méthodologie originale pour l'estimation des grandeurs atmosphériques à partir des températures de Brillance mesurées.

Les différentes méthodes de restitution des contenus en eau de l'atmosphérique à partir de données radiométriques hyperfréquence peuvent être classées en deux grandes catégories : les algorithmes statistiques et les algorithmes itératifs.

Les algorithmes itératifs sont basés sur l'utilisation d'un modèle de transfert radiatif et

consistent à ajuster de manière itérative les températures de brillance simulées et mesurées en modifiant les grandeurs atmosphériques. Les algorithmes itératifs ont l'avantage d'être transposables à une autre configuration d'observation (autres polarisation, fréquence et incidence) mais ils présentent des inconvénients majeurs : Ils nécessitent des simplifications importantes de la structure et de la composition de l'atmosphère, sont sensibles aux conditions initiales et sont beaucoup plus gourmands en temps de calcul que les autres algorithmes. Les algorithmes statistiques sont aujourd'hui les plus courants. L'inconvénient majeur est qu'un modèle n'est pas transposable à une autre configuration d'observation.

Les algorithmes statistiques consistent à exprimer la grandeur atmosphérique comme une fonction de plusieurs températures de brillance ou à rechercher par décision bayésienne la grandeur la plus probable à partir d'un ensemble d'exemples. L'approche neuronale que j'ai développée permet d'associer les avantages de ces deux méthodes en déterminant une fonction dont la forme n'est pas choisie a priori mais est « apprise » à partir d'un ensemble d'exemples de manière à rendre compte de toute la complexité des dépendances relationnelles complexes entre les variables.

I.1 INTRODUCTION DE L'APPROCHE NEURONALE

Les estimations que j'ai réalisées pendant ma thèse reposaient sur la linéarisation de l'équation de transfert radiatif. Lors de la thèse d' Ada Bosisio soutenue en 1995, j'ai pu quantifier les erreurs induites par cette linéarisation [liste des publications : ref. 2,20,21]. J'ai alors mis en évidence la nécessité d'utiliser des méthodes d'inversion non linéaire.

La nature particulière des observations radiométriques micro-ondes (multidimensionnelles et bruitées) m'ont conduit à envisager l'utilisation de Perceptron Multicouches pour l'inversion des températures de Brillance. Les réseaux de neurones permettent d'appréhender la relation entre le vecteur d'observation et la grandeur à estimer. Cette relation inverse non linéaire n'est pas déduite du modèle physique direct mais optimisée par des méthodes d'apprentissage de type statistique sur un ensemble de données.

La difficulté principale réside dans la collecte des données nécessaires aux différentes étapes du développement d'un modèle neuronal : l'apprentissage, la généralisation et l'évaluation des performances.

Dans le cas de l'estimation des paramètres atmosphériques que sont les contenus intégrés en vapeur d'eau, en eau liquide nuageuse, les précipitations, et l'affaiblissement atmosphérique, nous sommes dans l'impossibilité de recueillir simultanément les températures de Brillance observées, associées aux grandeurs atmosphériques que l'on cherche à restituer. La spécificité des travaux que j'ai réalisés est liée à l'absence de données co-localisées : c'est une difficulté

majeure de l'utilisation de méthodes d'apprentissage de type statistique. Seule une approche pluridisciplinaire peut remédier à ce problème.

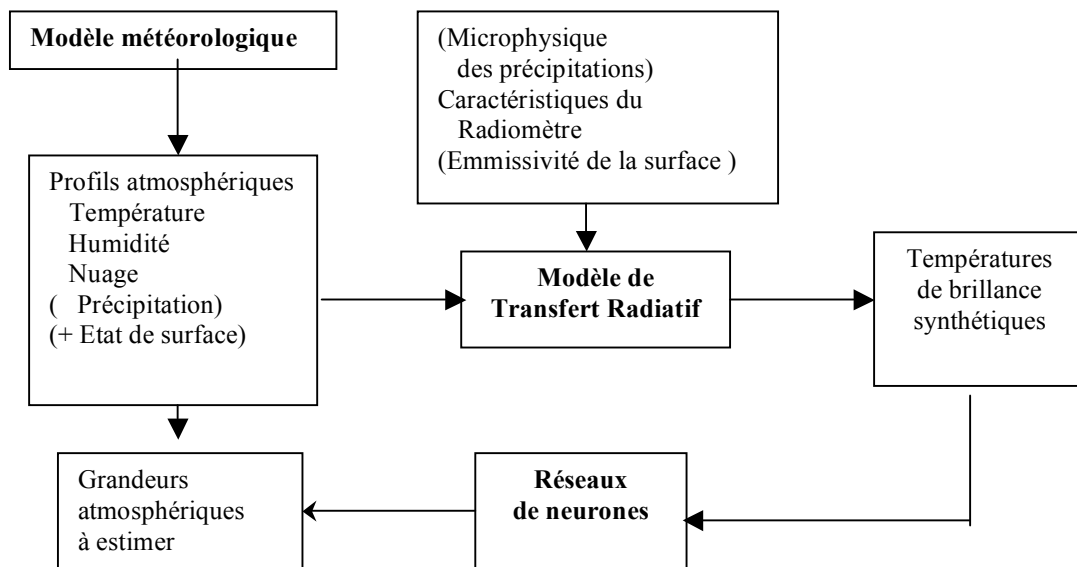


Figure-3. Schéma de la méthodologie employée

Une première étude de faisabilité, réalisée à l'occasion du stage de Luc Casagrande en 1997, a mis en évidence la pertinence de l'approche neuronale et de la simulation numérique pour l'inversion des mesures du radiomètre SSM/I (Tab. 1). Les bases d'apprentissage sont simulées par un modèle de transfert radiatif à partir de la composition de l'atmosphère (et de la surface océanique). La fonction inverse non linéaire est modélisée par un réseau de neurones dont les paramètres sont estimés sur les données synthétiques (Fig. 3).

Après validation de cette méthodologie, je l'ai adaptée à la restitution des contenus intégrés en vapeur d'eau, en eau liquide nuageuse, puis à l'estimation des taux précipitants à partir des températures de Brillance mesurées par différents radiomètres spatiaux. Je l'ai également mis en œuvre pour l'inversion des températures de Brillance de radiomètres terrestres. Les paragraphes qui suivent décrivent les travaux spécifiques réalisés pour ces différentes applications.

I.2 CONTENUS INTEGRES EN VAPEUR D'EAU ET EN EAU LIQUIDE NUAGEUSE AU DESSUS DES OCEANS ESTIMES AU MOYEN DE RADIOMETRES SPATIAUX

Dans le cadre du projet NEUROSAT⁹, j'ai mis en œuvre la méthodologie décrite figure 3 pour mettre au point des algorithmes neuronaux d'architecture classique (Perceptron multicouches). Les grandeurs atmosphériques restituées dans cette application sont les contenus intégrés en vapeur d'eau et en eau liquide nuageuse. Les températures de Brillance sont celles

⁹ projet européen NEUROSAT "Processing of environment observing satellite data with Neural Networks". soutenu par la Commission Européenne

du radiomètre SSM/I. Le point critique est la représentativité statistique des bases de données de profils atmosphériques disponibles.

Les profils atmosphériques issus du modèle de prévision du CEPMMT permettent la réalisation de bases de données représentatives au sens géophysique. Les différentes grandeurs physiques sont réalistes, cohérentes entre elles, et couvrent l'ensemble des situations météorologiques rencontrées. L'ensemble du globe terrestre est maillé, et à chaque point de maille nous disposons de profils verticaux des grandeurs atmosphériques et des caractéristiques de la surface, nécessaires au calcul du transfert radiatif. Soit 500 variables par point de grille et un total de 400 000 points de grille pour l'ensemble du globe.

La distribution naturelle des situations météorologiques n'est pas optimale pour l'apprentissage d'un modèle neuronal. En effet, les situations les plus extrêmes sont peu représentées et ne peuvent être apprises correctement. J'ai développé une méthode originale d'égalisation des bases d'apprentissage. Les dimensions importantes des espaces de représentation, m'ont conduit à l'utilisation de carte auto-organisatrice de Kohonen [Kohonen 2001] afin d'appréhender la densité de probabilité de la base de profils atmosphériques. L'estimation de la densité de probabilité permet ensuite la régularisation de la base de profils par un échantillonnage adapté.

Une base d'observations, fournie par la NASDA dans le cadre d'un contrat de recherche¹⁰, comprenant 11 449 radiosondages co-localisés avec les températures de Brillance mesurées par le radiomètre SSM/I, a permis l'intercomparaison de l'approche proposée (réseaux de neurones et simulation numérique) avec d'autres approches [Gérard 1998], [Wentz 1997], [Petty, 1997], [Alishouse, 1990] de restitution des contenus en vapeur d'eau. Grâce à la méthodologie décrite précédemment, associée à l'égalisation des bases d'apprentissage, l'algorithme obtenu présente des performances identiques aux autres en moyenne, mais de meilleures performances pour les valeurs « extrêmes », plus rarement observées [liste des publications : ref. 3,22,23]. Ces travaux sont présentés dans le premier article en annexe de ce document [Mallet 2002].

Les bases synthétiques réalisées à partir des profils fournis par le modèle de prévision du CEPMMT de l'atmosphère se sont améliorées au cours du temps du simple fait de l'amélioration des modèles météorologiques eux-mêmes, qui assimilent des observations. La résolution spatiale horizontale et verticale a évolué considérablement¹¹. La qualité des modèles météorologiques actuels nous assure d'effectuer les calculs de transfert radiatif sur des cas

¹⁰ Contrat entre le CETP et l'agence spatiale japonaise (NASDA). Intitulé "*Development of methods combining data from AMSR and GLI to retrieve atmospheric water parameters and surface wind speed over the ocean*" Projet également soutenu par le CNES

¹¹ Les premières données météorologiques dont j'ai pu disposer avaient une résolution spatiale de 1.125°x1.125° et l'atmosphère y été décrite sur 31 niveaux de pression ; plus récemment l'atmosphère a été décrite à la résolution spatiale de 0.5°x0.5° et à 60 niveaux de pression

observables, donc d'obtenir des températures de brillance elles aussi observables par un radiomètre. Lors de la thèse de Miguel Perez Chavarria soutenue en 2007 un nouvel algorithme neuronal a été réappris afin de profiter des améliorations des modèles. La restitution neuronale montre une meilleure adéquation que celles des algorithmes standards de la NASA pour les radiomètres SSM/I et TMI dans le cas particulièrement difficile à restituer d'un cyclone.

I.3 TAUX PRECIPITANT AU DESSUS DES OCEANS ESTIMES AU MOYEN DE RADIOMETRES SPATIAUX

La thèse d'Emmanuel Moreau soutenue en 2000, a été l'occasion d'étendre la méthodologie décrite figure 3 à la restitution du taux précipitant. Les températures de Brillance considérées étant celles des radiomètres SSM/I et TMI. Le point critique est la simulation des températures de Brillance par l'équation de transfert radiatif pour les situations précipitantes. Je me suis tout d'abord intéressée à l'influence de la microphysique. D'une part les propriétés microphysiques (constante diélectrique, densité) et plus particulièrement géométriques (forme dimension orientation) des particules nécessaires au calcul des températures de Brillance ne figurent pas dans les données météorologiques disponibles. D'autre part les phénomènes de diffusion induits par le caractère granuleux des précipitations font apparaître des problèmes liés à la résolution numérique de l'équation de transfert radiatif. Un modèle, simulant le transfert d'un rayonnement polarisé à travers une atmosphère horizontalement stratifiée, a été développé. Ce modèle simule correctement la diffusion par des particules sphériques ou ellipsoïdales. Il ne permet pas la modélisation par des cristaux de glace de formes complexes. Néanmoins, pour quantifier l'incertitude introduite par le manque d'information relatif à la forme des particules de glaces, nous avons pu faire des simulations correspondant à la forme dite de "plates", en la modélisant par un sphéroïde oblate orienté horizontalement. Même aux fréquences les plus élevées des radiomètres spatiaux (85 GHz), les effets observés de la diffusion des particules les plus volumineuses (glace) sur les températures de Brillance ont pu être reproduits [liste des publications : ref. 14].

A l'occasion de la thèse d'Emmanuel Moreau j'ai comparé les performances pour l'inversion d'un réseau de neurones classique avec celles d'un réseau de neurone modulaire. Connus sous le nom de multi-experts, ces réseaux de neurones divisent automatiquement un problème complexe en différents sous problèmes plus simples. Ce type de réseaux de neurones est particulièrement bien adapté à la résolution de problèmes pour lesquels la fonction à estimer est multi-modale [liste des publications : ref. 4,24]. L'architecture optimale pour la restitution des précipitations à partir de l'ensemble des températures de Brillance observées par le

radiomètre TMI (Tab. 1), est composée de deux experts, un pour les zones où il pleut, l'autre pour les situations sans pluie (restitution de la valeur nulle). Un classifieur pluie/non pluie présentant un pourcentage de bonne détection supérieur à 93% complète le dispositif.

L'amélioration apportée dans la simulation numérique des processus de diffusion associée à l'architecture modulaire du modèle inverse a permis une amélioration notable de la restitution des faibles précipitations et de la dynamique de restitution. L'architecture multi-expert utilisée permet de plus l'estimation de la variance associée à chacun des experts. Ces travaux sont présentés dans le second article fourni en annexe de ce document [Moreau 2002].

Les situations fortement convectives, qui présentent des structures fortement hétérogènes à l'intérieur d'un pixel sont systématiquement sous-estimées. La faible étendue géographique des cellules de pluie par rapport à la tâche au sol des radiomètres spatiaux (Tab. 1), associée à la non-linéarité de l'équation de transfert radiatif, induit des effets de 'beamfilling' : l'hétérogénéités spatiales des précipitations à l'intérieur des pixels conduit à une sous estimation des taux précipitants restitués [liste des publications : ref. 16]. Etant donné l'intermittence et l'hétérogénéité des précipitations la résolution spatiale de la mesure à 85 GHz est la mieux adaptée de ce point de vue. Cependant cette fréquence est particulièrement sensible à la diffusion par la glace, ce qui nuit à son utilisation. A l'occasion de la thèse de Miguel Perez Chavarria soutenue en 2007 j'ai développé un algorithme de restitution à partir des températures mesurées à cette fréquence. Les données météorologiques disponibles n'ont pas la résolution spatiale adéquate pour la simulation des températures de Brillance à 85 GHz. J'ai mis au point une procédure de 'downscaling' qui améliore d'un facteur 9 la résolution spatiale des températures de Brillance simulées [liste des publications : ref. 38].

Les améliorations apportées, dans la simulation numérique, d'une part aux processus de diffusion, d'autre part à la résolution des données météorologiques utilisées en entrée du modèle de transfert radiatif, ont permis la mise au point d'un algorithme de restitution à partir des températures de Brillances à 85 GHz. Grâce à la résolution spatiale mieux adaptée à l'hétérogénéité des précipitations, les structures spatiales des événements extrêmes particulièrement hétérogènes (Fig. 4), sont nettement plus fines que celles observées par les algorithmes classiques utilisant les basses fréquences. L'utilisation des températures de Brillance à 85 GHz permet d'obtenir des taux précipitants relativement proches de ceux du radar PR de TRMM tout en conservant la répétitivité temporelle permise par la fauchée relativement importante du radiomètre. Les climatologies mensuelles globales et zonales obtenues sont beaucoup plus proches des résultats obtenus par le radar PR qu'avec les produits opérationnels (produits TMI et SSM/I de la NASA). Les travaux sur la validation de cet algorithme sont en cours.

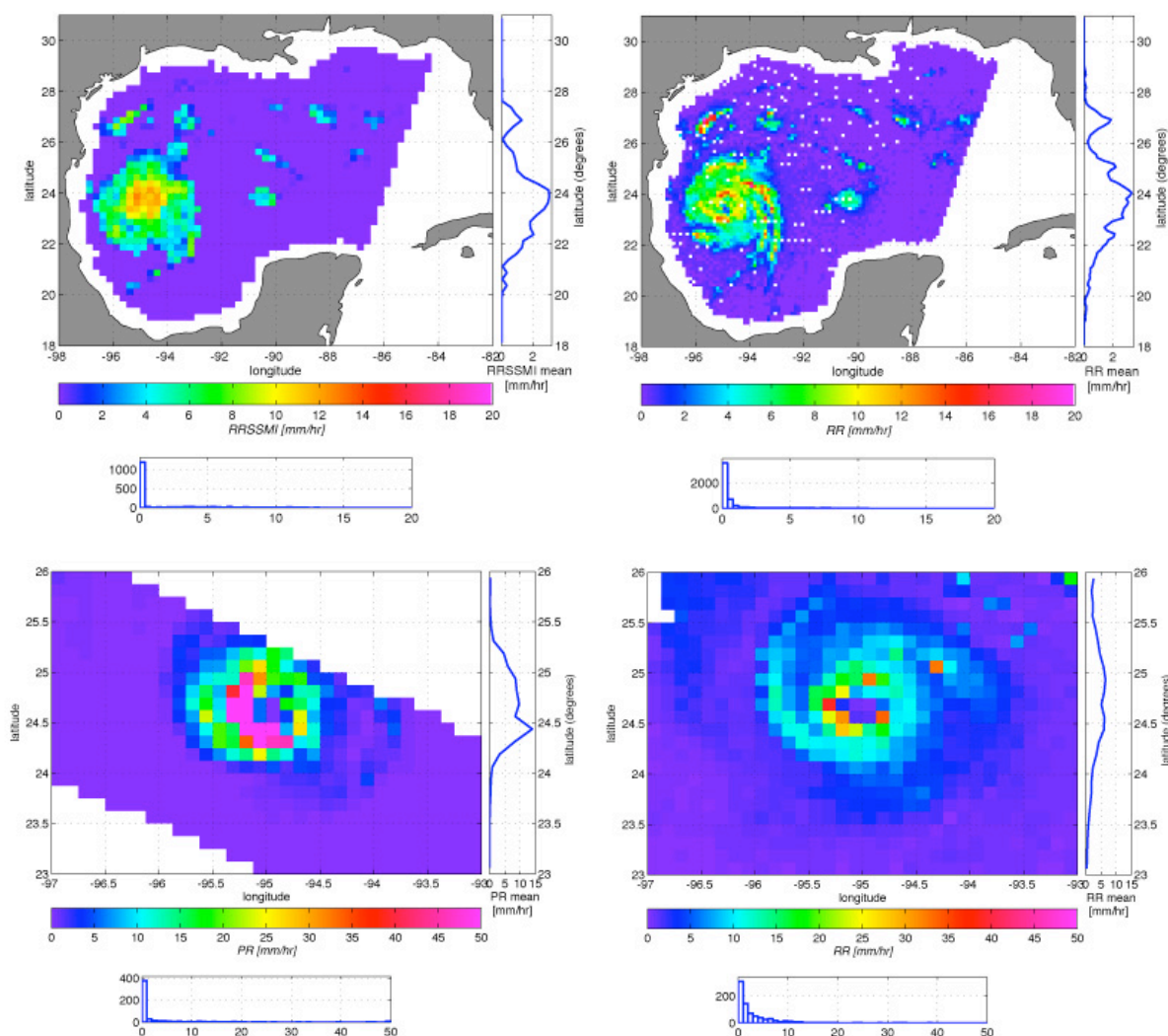


Figure-4. Cyclone Bret : Golfe du Mexique journée du 21 août 1999
 en haut inversion des températures de Brillance SSM/I mesurées à 15h18
 - à gauche (produit NASA utilisant les canaux basse fréquence)
 - à droite (Algorithme neuronal d'inversion du canal 85 GHz)
 en bas inversion des données observées par le satellite TRMM à 14h42
 - à gauche (inversion des données radar PR)
 - à droite (Algorithme neuronal d'inversion du canal 85 GHz)

	SSM/I Special Sensor Microwave/Imager				TMI TRMM Microwave Imager					PR TRMM
	19,35	22,23	37	85,5	10,65	19,35	22,23	37	85,5	13.8
Fréquences (GHz)	19,35	22,23	37	85,5	10,65	19,35	22,23	37	85,5	13.8
Polarisations	V,H	V	V,H	V,H	V,H	V,H	V	V,H	V,H	
Taches au sol (km)	69x43	50x40	37x29	15x13	60x36	30x18	27x16	16x10	7x4	4.3x4.3
Fauchée (km)	1394				758					215

Tableau-1. Caractéristiques des radiometers SSM/I et TMI et du radar PR

I.4 RADIOMETRIE TERRESTRE

J'ai développé et mis en oeuvre des algorithmes spécifiques pour l'estimation des grandeurs atmosphériques (contenus intégrés en vapeur d'eau, affaiblissements atmosphériques micro-ondes) à partir des températures de Brillance mesurées par les radiomètres micro-ondes terrestres pour diverses applications. La spécificité de ma contribution dans ce domaine est similaire à celle décrite à propos de la radiométrie spatiale. Les algorithmes inverses neuronaux appris sur des bases de données synthétiques sont plus performants que les algorithmes classiques (inversion de l'équation de transfert radiatif, algorithme statistique développé à partir d'observations co-localisées). Un volet expérimental important est par contre spécifique à cette thématique. Les principales campagnes de mesures auxquelles j'ai participé et qui ont donné lieu à des travaux de modélisation spécifiques sont les suivantes:

La campagne de mesure DIRAC¹², qui a permis de recueillir des mesures de température de Brillance dans diverses directions de visées. Deux radiomètres ont fonctionné de 1999 à 2002 sur le site expérimental de l'IPSL : SIRTA¹³. Un algorithme neuronal adapté à la configuration particulière de cette expérience a été développé pour estimer l'affaiblissement atmosphérique avec une précision de l'ordre de 0.1 dB pour des fréquences comprises entre 20 et 50 GHz, ainsi que des angles d'élévation entre 30° et 90° [liste des publications : 5¹⁴,27]. Cet algorithme est actuellement utilisé pour l'étalonnage des balises satellitaire dans le cadre de l'expérience de propagation SYRACUSE décrite dans la partie II de ce document.

Un algorithme de restitution des contenus intégrés en vapeur d'eau et en eau liquide nuageuse a pu être développé et validé à l'occasion de campagnes destinées à l'observation de l'atmosphère :

Les campagnes VAPIC¹⁵ 1 et 2 d'inter comparaison de mesures de la vapeur d'eau, des nuages et de la pluie à partir d'instruments de télédétection au sol et embarqués sur satellite, a réuni entre Mai 2004 et Mai 2005, sur le site du SIRTA, plusieurs instruments de mesure complémentaires (Radars, Lidars, radiomètres, mesures vapeur d'eau par GPS, spectropluviomètre) [Haeffelin 2005].

Dans le cadre du projet européen CLIWANET¹⁶, dont l'objectif était de réaliser un réseau de mesures de l'eau liquide nuageuse pour améliorer les modèles de nuage, j'ai été responsable des deux radiomètres du CETP qui ont participé à la campagne de mesure en mer Baltique ainsi qu'à la campagne d'inter comparaison des appareils qui a eu lieu aux Pays Bas.

¹² campagne DIRAC réalisée dans le cadre du projet constellation financée par le RNRT

¹³ Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique de l'IPSL

¹⁴ en annexe de ce mémoire

¹⁵ Projet soutenu par IPSL, PNTS, PATOM d'étude de la vapeur d'eau atmosphérique

¹⁶ projet européen CLIWANET "BALTEX Cloud Liquid Water Network" soutenu par la Commission Européenne

II MODELISATION DU CANAL DE PROPAGATION ATMOSPHERIQUE

Dans le contexte des systèmes de télécommunication par satellite l'atmosphère est un obstacle à la transmission du signal. En bande Ka¹⁷ et Q/V¹⁸, ou plus généralement en bande EHF¹⁹ les processus d'absorption et de diffusion par les composants de la troposphère provoquent l'affaiblissement des ondes électromagnétiques. En présence de précipitation, à des fréquences supérieures à 30 GHz, l'affaiblissement peut atteindre une dizaine de dB par kilomètre. Les événements de pluie étant très localisés dans le temps et l'espace, plusieurs types de FMTs adaptatives (Fade Mitigation Technique) sont envisagées pour rendre possible l'utilisation de ces fréquences pour les besoins toujours croissants des télécommunications. Les FMTs sont des techniques spécifiques (contrôle de puissance, réduction du débit et changement du codage, diversité spatiale, diversité temporelle ou en fréquence, back-up par connexions terrestres etc.) d'adaptation du système. L'objectif est d'assurer la continuité du service, ou tout au moins d'améliorer sa disponibilité, même dans des conditions de propagation difficiles. Aux fréquences supérieures à 30 GHz, les affaiblissements sont tels qu'il n'est en effet pas envisageable d'émettre continûment avec la puissance et le débit nécessaire au bon fonctionnement de la liaison en présence de précipitations intenses (Fig. 5). Ces événements sont cependant suffisamment rares pour qu'on envisage d'adapter le système uniquement quand c'est nécessaire (Fig. 6). Les boucles de contrôle des systèmes de télécommunication nécessitent alors de prévoir l'évolution du signal dans un délai de quelques secondes. Leur mise en œuvre nécessite de prévoir l'affaiblissement futur (quelques secondes) de la liaison montante (fréquence f_2), à partir des valeurs passées de l'affaiblissement observé sur la liaison descendante (fréquence f_1). Afin d'économiser l'énergie du satellite, la liaison descendante travaille à une fréquence plus faible que celle de la liaison montante, elle est ainsi moins affectée par l'affaiblissement atmosphérique (Fig. 1).

La modélisation du canal atmosphérique est une étape préliminaire à la mise au point des techniques de FMT :

- Les modèles de similitude en fréquence permettent l'estimation de l'affaiblissement instantané à une fréquence donnée f_2 , en fonction de l'affaiblissement à une autre fréquence f_1 , généralement plus basse.
- Les modèles de prédiction à court terme permettent d'estimer l'affaiblissement à un horizon de quelques secondes à partir des valeurs passées.

Les précipitations étant à l'origine des dégradations du signal les plus importantes, leur

¹⁷ Ka : 20-30 GHz;

¹⁸ Q/V : 40-50 GHz

¹⁹ EHF :30-300 GHz

caractérisation est l'élément clef de la modélisation. En raison des phénomènes de diffusion, l'affaiblissement dû aux précipitations dépend certes du taux précipitant, mais également de leur microphysique (DSD : Drop Size Distribution – Distribution de taille de goutte). C'est donc la variabilité des précipitations et plus précisément de la microphysique des précipitations à des échelles de temps de l'ordre de la seconde, qu'il s'agit d'appréhender. Dans ce contexte, le CETP a mis au point depuis de nombreuses années un capteur permettant de mesurer la DSD: le spectropluviomètre optique bifaisceaux. Cet instrument a participé à de nombreuses campagnes de mesures²⁰, les données recueillies permettent l'amélioration des connaissances concernant la variabilité des précipitations et de sa microphysique à des échelles de temps très faibles.

Mes recherches sur la dégradation par l'atmosphère des bilans de liaisons en bande Ka et Q/V comportent quatre axes principaux:

- un volet expérimental destiné à recueillir des mesures de propagation de qualité. Les travaux de modélisations ne peuvent être validés sans la mesure de séries chronologiques d'affaiblissement sur des durées suffisamment longues. De telles données sont extrêmement rares aux fréquences supérieures à 20 GHz.

- la description statistique de la microphysique des précipitations, et l'application aux modèles de similitude en fréquence.

- l'analyse des séries chronologiques de taux précipitants et l'application aux modèles de prédiction à court terme de l'affaiblissement.

- la simulation numérique de série chronologiques de taux précipitants et des affaiblissements correspondants. L'objectif est de reproduire en simulation les propriétés statistiques, l'invariance d'échelle et l'intermittence observées expérimentalement.

²⁰ Campagne Mars-Octobre 2000 SIRTA Palaiseau (France)
Campagne DEWEX April - October 2002 Iowa-City, (USA)
Campagne AMMA Juin-Septembre 2006 Djougou (Benin)
Projet SYRACUSE Juin 2007- Rennes (France)

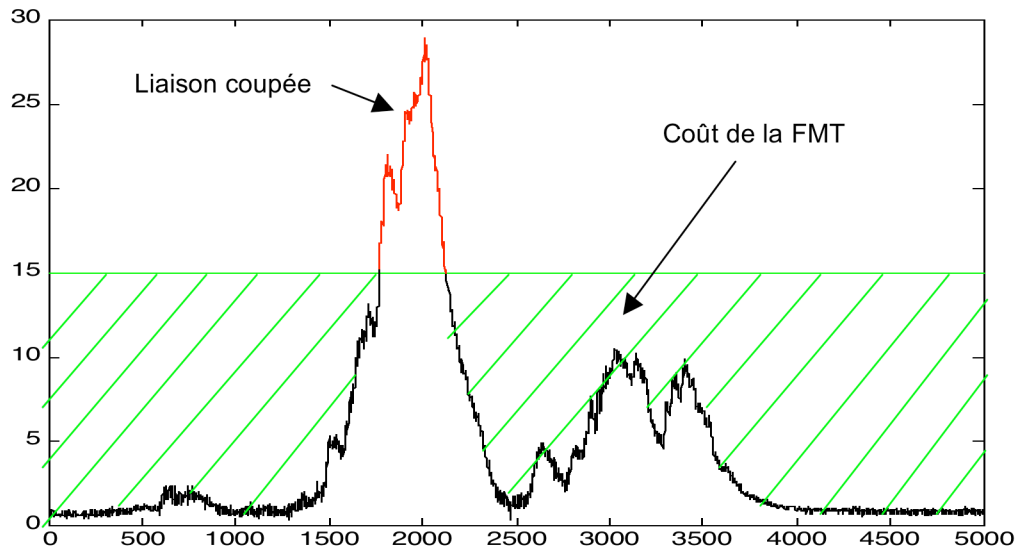


Figure-5. Série chronologique d'affaiblissements . Exemple de système de lutte contre l'affaiblissement à marge de puissance fixe.

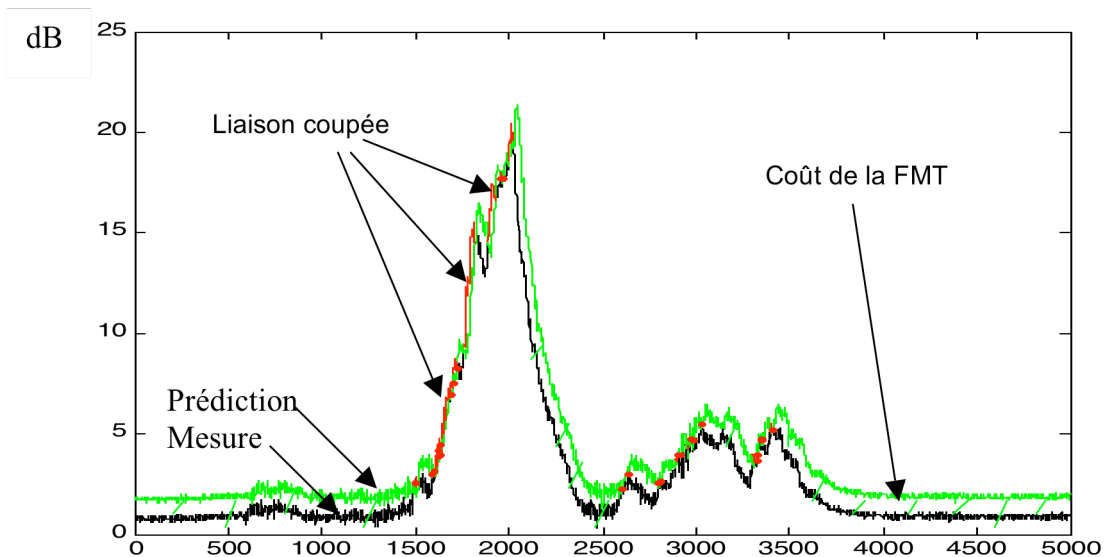


Figure-6. Série chronologique d'affaiblissements . Exemple de système adaptatif de lutte contre l'affaiblissement. Le coût du système est réduit, ainsi que les périodes où la liaison est coupée (la liaison est coupée lorsque l'affaiblissement atmosphérique dépasse l'affaiblissement maximum prévu à partir de l'affaiblissement prédit et de la marge).

II.1 EXPERIENCE DE PROPAGATION SIRACUSE 3

J'ai participé aux différentes expériences de propagation terre-satellite en bande Ka et EHF qui ont eu lieu sur le territoire français. J'ai en effet effectué ma thèse dans le contexte du groupe OPEX²¹ qui regroupait plus de 50 stations de réceptions réparties à travers l'Europe [Arbesser-Rastburg, 1993]. Le satellite Olympus²², avec à son bord deux balises émettrices à 20 et 30 GHz, a permis d'obtenir un an de mesures. J'ai ensuite participé à la préparation de l'expérience EXPRESS²³ destinée à l'étude du canal à 20.7 et 41.4 GHz et prévue en 2003 [Lemorton, 2001]. Suite à l'échec du lancement de la première fusée Ariane V nouvelle génération, le satellite français STENTOR²⁴ n'a pu être placé en orbite et l'expérience EXPRESS n'a pu être menée à bien.

L'expérience de propagation menée en collaboration avec le CELAR depuis Septembre 2006, utilisant le satellite militaire de télécommunication SYRACUSE3A²⁵, est une occasion unique au niveau national de recueillir des données de propagation à 20 et 44 GHz. [liste des publications : ref. 34]. Le fonctionnement général est présenté ci-dessous (Fig. 7).

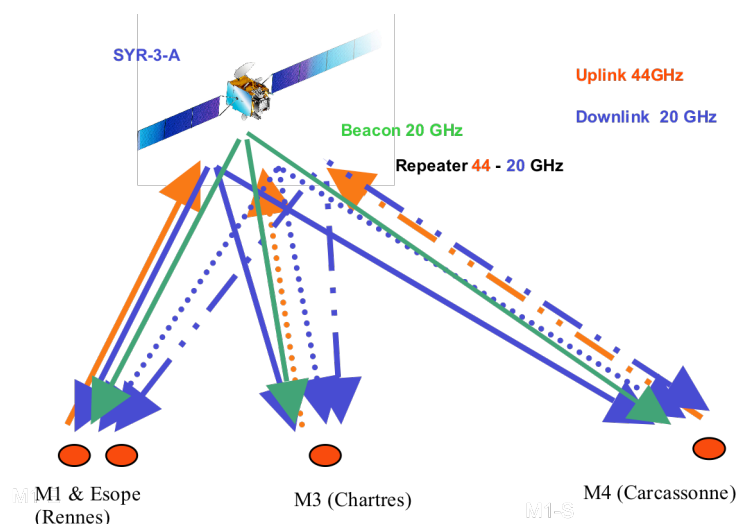


Figure-7. Synopsis de l'expérience Syracuse 3 comportant 3 sites différents (Carcassonne, Chartres et Rennes). L'angle d'élévation est relativement bas (17°)

Mes travaux d'expertise et d'encadrement sur l'ensemble de cette expérimentation sont multiples et concernent aussi bien l'étalonnage des balises satellitaires, la qualification des procédures de prétraitement, la certification des données, l'analyse statistique des mesures que

²¹ Olympus Propagation Experimenters

²² le satellite Olympus de l'ESA, percuté par un météore en août 1993

²³ EXperimentation of PPropagation in the EHF-band from STENTOR Satellite

²⁴ le satellite STENTOR développé conjointement par le CNES, France Télécom, la DGA, Alcatel Space et ATRIUM Space

²⁵ le programme SYRACUSE (SYstème de RAdioCommunication Utilisant un SatellitE) mené par la DGA est une série de satellites militaires de télécommunications protégées et sécurisées français qui a débuté en 1980, troisième génération du programme SYRACUSE, lancé en Octobre 2005.

les travaux de modélisation du canal décrits ci-dessous.

II.2 MICROPHYSIQUE DES PRECIPITATIONS ET MODELE DE SIMILITUDE EN FREQUENCE

Les modèles de canal de la littérature sont des modèles empiriques, basés sur des relations en puissance entre affaiblissement et taux précipitant, et qui de plus, négligent la contribution des gaz et des nuages. Cette approche est justifiée pour la bande Ku²⁶ utilisée jusqu'ici, mais ne l'est plus aux fréquences supérieures à 20 GHz. Mes travaux ont permis le développement d'un nouveau modèle de similitude dont le domaine de validité s'étend aux fréquences supérieures à 20 GHz et à toutes les situations météorologiques.

Les coefficients de la relation en puissance entre taux précipitants et affaiblissement correspondent à une DSD particulière. Une hypothèse de Marshall et Palmer [Marshall et Palmer 1948] est généralement utilisée. Certains auteurs introduisent une variabilité statistique des coefficients de la loi de puissance pour prendre en compte l'incertitude de la relation entre affaiblissement et taux précipitant qui est due à la variabilité de la distribution de taille des gouttes (DSD) [Catalan 1999 ; Bertorelli 2006]. Lors de la thèse d'Olivier Brisseau soutenue en 2005, j'ai pu mettre en évidence les erreurs induites en bande Ka et Q/V par une telle approche. Une nouvelle description de l'affaiblissement en fonction de deux paramètres caractéristiques de la DSD (diamètre moyen et nombre de gouttes) a été élaborée. Cette modélisation basée sur les relations existantes entre les propriétés microphysique des précipitations et l'affaiblissement atmosphérique a ensuite été utilisée pour développer un nouveau modèle de similitude en fréquence [liste des publications : ref 7²⁷,30,31].

Aux fréquences considérées, chaque constituant de l'atmosphère (pluie, nuage, oxygène et vapeur d'eau) a un comportement en fonction de la fréquence, qui lui est propre. En présence d'évènements précipitants importants, la contribution de la pluie à l'affaiblissement total est telle, que le coefficient de similitude global est pratiquement équivalent à celui de la pluie seule. Pour des évènements de pluie moins intenses, la modélisation doit prendre en compte les coefficients de similitude des différents constituants. Un réseau de neurones a été développé pour la séparation des effets des différents constituants. Mis au point sur des données synthétiques, suivant la méthodologie présentée dans la première partie de ce document, cet algorithme estime à partir de l'affaiblissement total, les trois contributions relatives des gaz, des nuages et des précipitations [liste des publications : ref 8,32]. Ce modèle de séparation des effets est associé à trois modèles de similitude distincts pour les gaz, les nuages et les

²⁶ Ku : 12-18 GHz;

²⁷ en annexe de ce mémoire

précipitations. Il réalise ainsi un modèle de similitude global. La comparaison réalisée avec les coefficients de similitude mesurés (Fig. 8) montre les améliorations apportées par ce nouveau modèle de similitude global par rapport au modèle ITU existant.

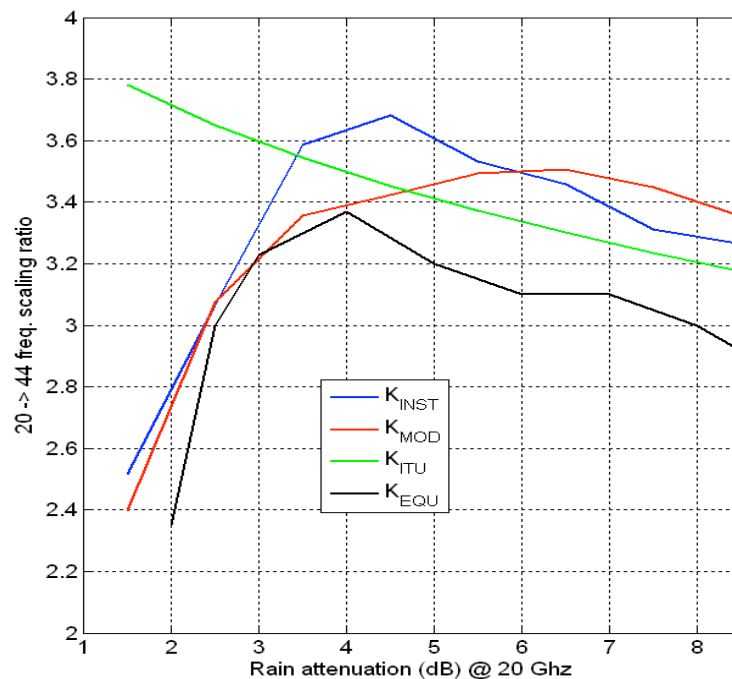


Figure-8. Rapport de similitude 44/20 GHz en fonction de l'affaiblissement à 20 GHz

- courbe noir coefficient de similitude à long terme estimé à partir des mesures SYRACUSE ($K_{EQU}=A_{44}/A_{20}$) A_{44} et A_{20} sont des affaiblissement équiprobables.
- courbe bleu coefficient de similitude instantané estimé à partir des mesures SYRACUSE ($K_{inst}=A_{44}/A_{20}$) A_{44} et A_{20} sont des affaiblissement simultanés.
- courbe verte modèle ITU (K_{ITU})
- courbe rouge nouveau modèle global de similitude (K_{mod}).

II.3 ANALYSE STATISTIQUE DES SERIES CHRONOLOGIQUES ET PREDICTION

Dans le cadre de la mise au point des FMT, l'intervalle de prédiction est de l'ordre de 10 secondes, ce qui correspond au temps de réaction de la boucle de contrôle. Une grande variété de méthodes pour prédire l'affaiblissement a été proposée dans la littérature : le modèle développé à l'ONERA [Van de Kamp 2006] basé sur une chaîne de Markov à deux échantillons espacés de 10 secondes, le modèle de la NASA [Manning 1991] basé sur un filtrage markovien non-linéaire, les modèles plus classiques du type filtrage linéaire adaptatif (ARMA ou ADALINE) [Dossi 1990][Chambers 2005][Grémont 1999]. Ces modèles de prédiction sont, dans l'ensemble, non biaisés, mais ne font guère mieux que la persistance. Il est généralement supposé que l'erreur de prédiction est composée de scintillations, dues à la turbulence de l'atmosphère, et dont la variance est constante. La marge qu'il faut ajouter à l'affaiblissement

prédit pour s'assurer du bon fonctionnement de la liaison est alors fixe et ne dépend que de la disponibilité requise, c'est à dire du pourcentage de temps pendant lequel le service de télécommunication doit être assuré. Grémont [1999] et Van de Kamps [2006] ont cependant montré que la variance des scintillations n'est pas forcément constante et doit être modélisée.

Lors de la thèse de Louis de Montera soutenue en 2008, l'analyse statistique des séries temporelles d'affaiblissement, a permis d'identifier et d'estimer un modèle de prédiction de type TARIMA (Threshold Auto Regressive Integrated Moving Average). L'analyse des résidus, c'est à dire de l'erreur de prédiction de ce modèle, montre que l'espérance en est toujours nulle, mais que la variance n'est pas constante. Ce caractère hétéroscédastique des résidus signifie que le modèle TARIMA a été construit sur des hypothèses qui ne sont pas entièrement vérifiées. L'approche originale retenue pour améliorer l'estimation des marges nécessaires aux boucles de contrôle, est de considérer la prédiction de l'affaiblissement par le modèle TARIMA comme correcte, et de modéliser la variance conditionnelle des résidus.

Un modèle non linéaire de type GARCH [Bollerslev 1986] a été utilisé pour modéliser la variance conditionnelle des erreurs de prédiction. Ce modèle, ne cherche pas à améliorer la prédiction de l'affaiblissement mais à estimer l'incertitude de l'affaiblissement prédit. La marge qu'il faut ajouter à l'affaiblissement prédit pour s'assurer du bon fonctionnement de la liaison n'est plus constante mais calculée à partir de la variance estimée à chaque instant en fonction de la disponibilité souhaitée. Le modèle développé à l'occasion de la thèse de Louis de Montera, basé sur une modélisation de type TARIMA GARCH [liste des publications : 9,33], présente des performances supérieures à celles des modèles existants (Figure 9).

L'adaptation de ce modèle, issu de l'analyse de données boursières, à la modélisation de l'affaiblissement atmosphérique, présente un intérêt méthodologique qui dépasse largement la mise au point des FMT. L'évaluation des risques liés aux phénomènes géophysiques de toutes nature nécessite plutôt que de prévoir le comportement moyen du processus d'être capable de prévoir le risque d'un comportement extrême. Dans ce contexte l'aptitude du modèle TARIMA GARCH à modéliser et prévoir la variabilité temporelle des précipitations est particulièrement prometteuse.

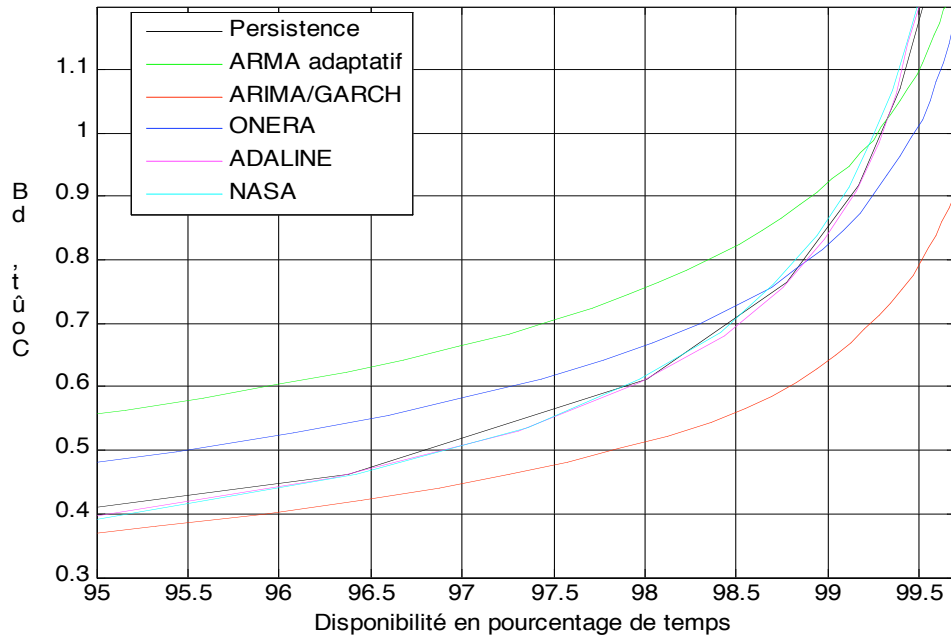


Figure-9. Performances des modèles de prédiction en terme de coût/disponibilité calculées à partir des données SYRACUSE3 20 GHz.

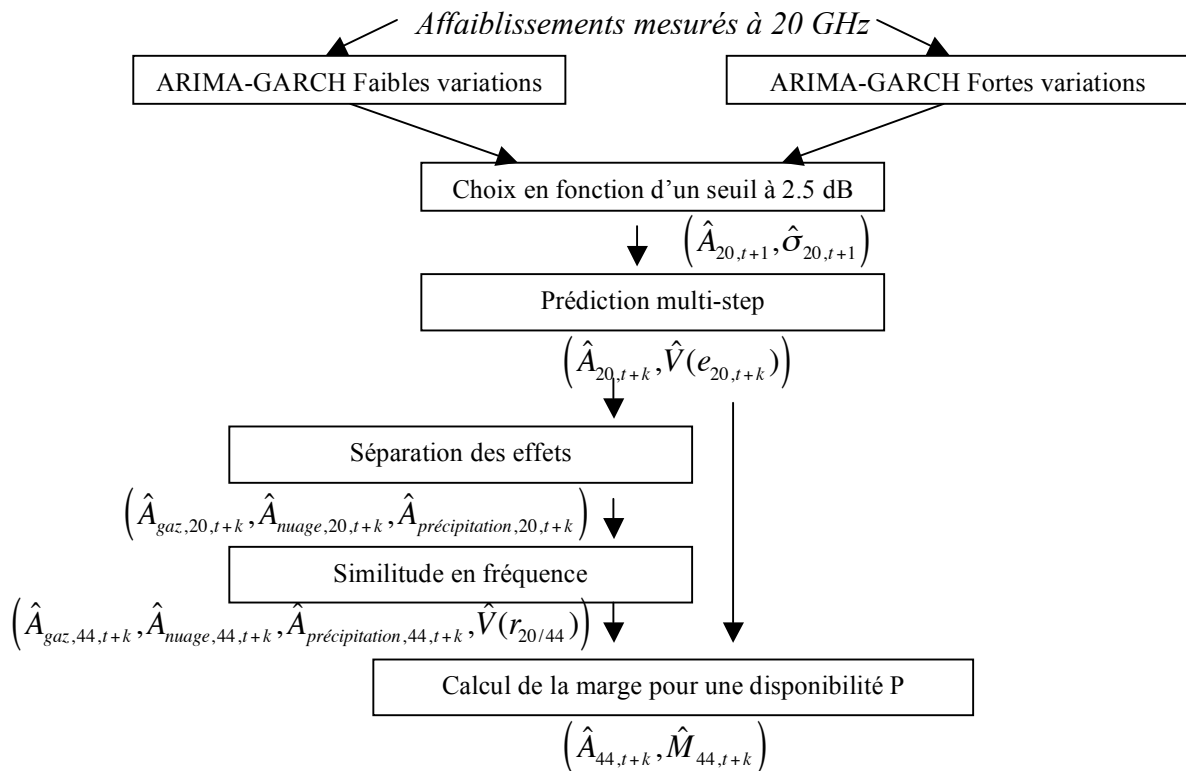


Figure-10. Synopsis du modèle global : $\hat{A}_{f,t+k}$ affaiblissement estimé à la fréquence f pour un horizon k , $\hat{V}(e_{f,t+k})$ estimation de la variance de l'erreur de prédiction, $\hat{V}(r_{20/44})$ estimation de la variance de l'erreur du coefficient de similitude, $\hat{M}(P)$ estimation de la marge pour une disponibilité P

II.4 PREMIER MODELE GLOBAL

Les expériences de propagation associées aux différents travaux de modélisation décrits précédemment m'ont fourni les éléments indispensables au développement et la validation du premier modèle global de marges adaptatives en bandes Ka et EHF. L'objectif est d'adapter les caractéristiques de la liaison montante (fréquence f_2), à partir de ce qui est observé sur une liaison descendante (fréquence f_1). Le modèle de prédiction doit être associé au modèle de similitude afin de prédire l'affaiblissement futur à la fréquence f_2 à partir des valeurs passées observées à la fréquence f_1 .

Afin de garantir l'adaptabilité du modèle obtenu pour la prédiction de l'affaiblissement sur la liaison montante les principales difficultés concernent d'une part, la réalisation d'un modèle « multi-step » capable de prédire la marge pour un horizon de prédiction quelconque (entre 1 et 30 secondes) et d'autre part, l'association de deux modèles « multi-step », nécessairement distincts, pour les situations avec ou sans précipitation. Les modèles existant (ITU) pour les bandes Ku et Ka négligent (ou supposent constante) la contribution des gaz et des nuages à l'affaiblissement total de l'atmosphère. L'affaiblissement est dans ce cas supposé avoir un comportement identique à la seule contribution de la pluie. Le point le plus délicat, spécifique à l'estimation d'une marge adaptative, est la nécessité d'estimer la variance de l'erreur d'estimation à la fréquence f_2 à partir de celle modélisée par le modèle GARCH à la fréquence f_1 et de l'erreur sur le coefficient de similitude lui même.

La thèse réalisée par Louis de Montera dans le cadre d'un contrat de recherche avec le CELAR a été l'occasion d'une synthèse des travaux précédents, le premier modèle global a ainsi pu être réalisé en combinant le nouveau modèle de similitude (II.2) associés à deux modèles de prédiction distincts du type TARIMA GARCH (II.3) pour les situations avec ou sans précipitation. Un tel modèle n'a pu être validé que grâce aux séries chronologiques recueillies pendant plusieurs mois consécutifs simultanément à deux fréquences lors des expériences de propagation menées (II.1). La publication [liste des publications : 9²⁸] présente en détail les spécificités de ce nouveau modèle global (Figure 10) (séparation des effets, similitude, prédiction, multi-step, marge adaptative) et ses performances sur les données de l'expérience Olympus (20-30 GHz). Il n'existe à notre connaissance aucune publication qui présente un modèle similaire. Les données de l'expérience Syracuse (20 – 44 GHz) confirment la pertinence de ce nouveau modèle (Figure 11)

²⁸ en annexe de ce mémoire

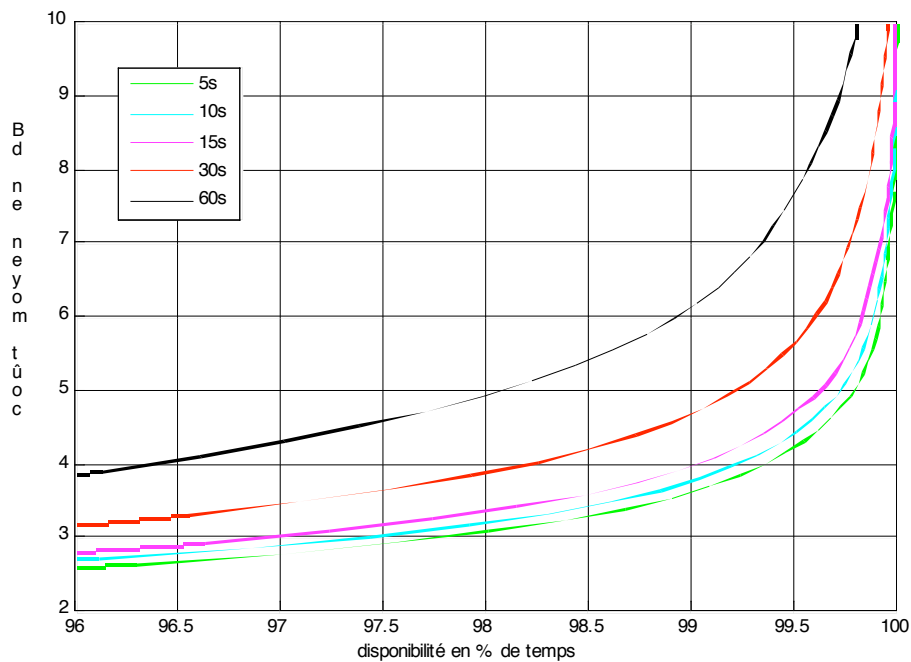


Figure-11. Performance du modèle global de prédiction à 44 GHz à partir de la mesure réalisée à 20 GHz en terme de coût/disponibilité pour différents horizons de prédiction. Performances calculées à partir des observations réalisées lors de l'expérience de propagation Syracuse à Rennes en 2008

II.5 ANALYSE MULTIFRACTALE-SIMULATEUR DE SERIE SYNTHETIQUES D'AFFAIBLISSEMENT

Les processus utilisés dans la modélisation ARIMA/GARCH sont des processus à mémoire courte en raison de la décroissance exponentielle de leur auto corrélation. Les tentatives pour améliorer ces modélisations de l'espérance et de la variance de l'affaiblissement avec des processus à mémoire longue n'ont pas été concluantes. L'estimation des paramètres qui fait théoriquement intervenir un nombre infini d'échantillons passés (mémoire longue) pose de nombreux problèmes pratiques.

D'autre part l'affaiblissement que l'on cherche à modéliser jusqu'ici combine les effets de différents constituants atmosphériques (gaz, nuage, précipitations). La complexité du modèle global présenté dans le paragraphe précédent illustre la nature complexe de cette grandeur. Afin d'avancer dans la compréhension des processus responsable de la variabilité, mes recherches les plus récentes se concentrent sur la modélisation statistique des précipitations et la réalisation d'un simulateur de séries chronologiques.

La pluie, phénomène prépondérant, est un phénomène complexe et très intermittent, il est donc difficile à mesurer, et plus encore à modéliser. 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 (voir par exemple Deidda 2000, Schertzer 2002). Les précipitations comme beaucoup de phénomènes géophysiques ne sont pas stationnaires. On peut procéder à l'intégration fractionnaire d'ordre H d'un flux multifractal universel conservatif, ce qui donne un champ multifractal universel non conservatif. Ce type de processus, appelé Fractionnally Integrated Flux (FIF) a été développé par Schertzer & Lovejoy (1997). H est le degré de non-stationnarité, ou plus précisément l'ordre d'intégration fractionnaire : plus H est fort, plus le processus est lisse. Le cas particulier $H = 0$ correspond au cas d'un champ conservatif.

Le modèle FIF ouvre la voie à une description plus réaliste de la pluie, il a déjà été validé avec des données expérimentales de taux de pluie mesurées (échelle temporelle : journalière, spatiale : quelques kilomètres). Ce modèle caractérise les séries chronologique de taux précipitant 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. Dans le contexte de la modélisation du canal les échelles à considérer sont beaucoup plus fines (échelle temporelle : secondes, spatiale : quelques mètres). Les analyses multifractales menées à l'occasion des thèses de Louis de Montera [liste des publications : 10, 54] sur des séries chronologiques et de Sébastien Verrier sur des cartes de réflectivité radar [liste des publications : 55] font apparaître une différence importante avec ceux proposés dans la littérature. Ces travaux mettent en évidence le rôle de l'intermittence pluie-non pluie sur l'estimation des paramètres multifractals. Les données haute résolution permettent l'analyse des variations intra-événement. Les paramètres obtenus diffèrent de ceux obtenus à une résolution moins fine par l'analyse de cartes ou de séries complètes (i.e. en conservant les périodes sans pluie). En particulier, le paramètre H a été obtenu différent de zéro, le processus n'est donc pas stationnaire et correspond à une cascade intégrée (FIF). Ce résultat est important car il signifie que le taux de pluie n'est pas une cascade multiplicative pure, mais qu'il doit être (fractionnairement) différencié afin de reconstituer la cascade elle-même.

Ce modèle FIF ne simule pas correctement la présence dans la série de grandes périodes sans pluie (taux précipitant égal à zéro pendant 95 % du temps pour une résolution temporelle d'une minute) Un nouveau modèle de cascade intégrée à seuil (TFIF : Thresholded FIF), a été réalisé afin de reproduire la variabilité des précipitations aussi bien à l'échelle de quelques secondes que de quelques semaines. En fait, dans le modèle TFIF, l'introduction d'un seuil permet de reproduire l'intermittence du phénomène (Figure 12). Les séries chronologiques simulées par le modèle TFIF ont été validées, elles présentent des propriétés d'invariance d'échelles identiques aux séries mesurées le modèle permet de reproduire :

- Les propriétés multifractale micro-échelle (intra-événement).

- La dimension fractale du support de la pluie (intermittence pluie-non pluie)
- La cassure de l'invariance d'échelle observée vers des échelles de l'ordre d'une heure.

Les simulateurs développés jusqu'ici pour l'étude de la dynamique du canal de propagation reposent sur les fonctions de distribution ou de répartition des précipitations déduites de données expérimentales [ITU-R P.837]. Cependant, ces simulateurs ne fournissent qu'une valeur moyennée sur quelques années de mesure et ne prennent pas en compte la variabilité du processus. On constate en effet expérimentalement que les fonctions de répartition peuvent différer assez nettement d'une année sur l'autre. La mise en évidence du caractère non stationnaire des précipitations induit celui de la fonction de répartition, et correspond à la non convergence de celle-ci sur un temps important. Ceci confirme que la connaissance d'une fonction de répartition expérimentale en un lieu donné et sur une période fixée peut difficilement être extrapolée à des périodes de temps disjointes, et ceci du fait de la nature même du phénomène précipitant. Le simulateur développé à partir du modèle TFIF permet de reproduire la variabilité intermensuelle et interannuelle des fonctions de répartition expérimentales.

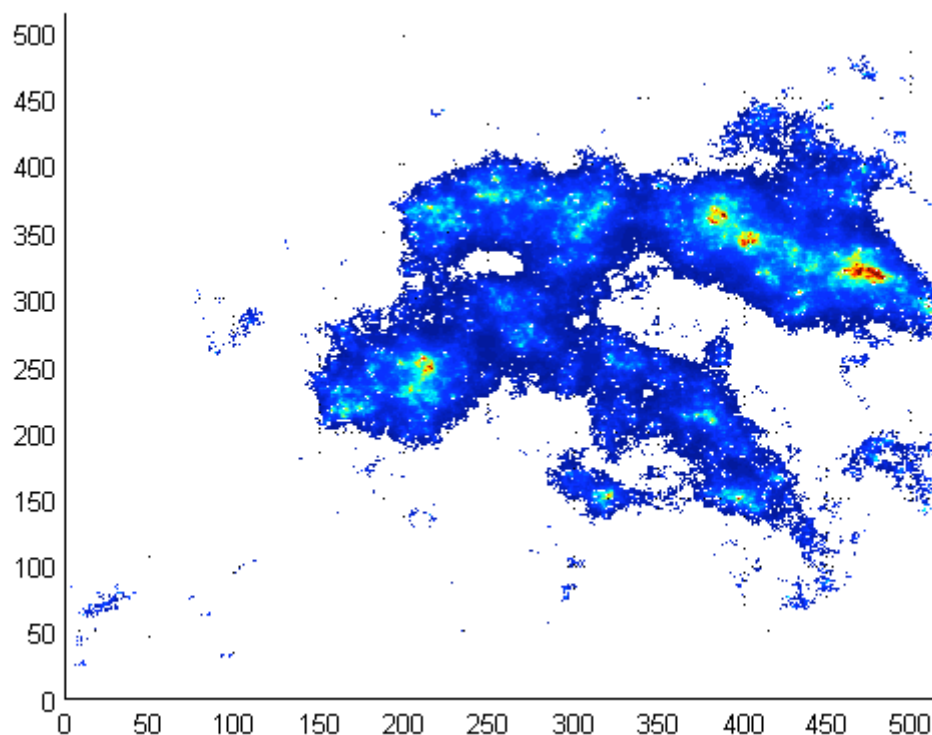


Figure-12. Champ de pluie multifractal TFIF 512x512 avec ($H=0.53$, $\alpha=1.7$, $C_1=0.13$) avec un seuil tel que la dimension fractale du champ soit 1.82

Contrairement aux taux précipitants, les séries chronologiques d'affaiblissements observés, ne présentent pas de propriétés d'invariance d'échelle pour les faibles échelles. A partir de carte de précipitation simulées par le modèle TFIF (Fig 12), et moyennant des hypothèses simples concernant la microphysique et le déplacement horizontal des champs précipitants, on peut générer des séries synthétiques d'affaiblissement par la pluie (Figure 13). Une analyse qualitative des séries simulées montre que l'intégration le long de la liaison brise effectivement l'invariance d'échelle aux petites échelles. Une validation plus complète de ce simulateur de canal, basé sur un modèle TFIF de champ précipitant reste à faire.

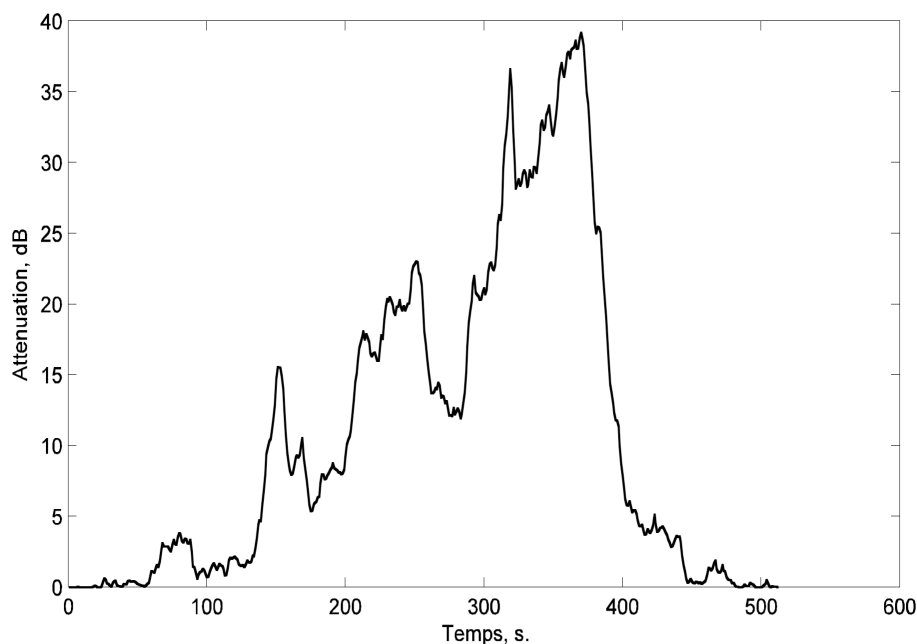


Figure-13. Série synthétique d'affaiblissement par la pluie simulée à partir d'un champ de pluie multifractal ($H=0.53$, $\alpha=1.7$, $C_1=0.13$) avec un support de dimension fractale égale à 1.82 en supposant une liaison d'élévation 30° et un azimut avec le sens du vent de 90° .

CONCLUSION

Les travaux que j'ai dirigés ont confirmé, dans le contexte particulier de l'observation de l'atmosphère par des capteurs passifs, la capacité des réseaux de neurones à restituer les paramètres physiques des phénomènes sous-jacents aux mesures observées. Une amélioration des performances globales de la restitution des grandeurs atmosphériques est obtenue grâce à la modélisation de relations non linéaires que permet cette approche. L'emploi des algorithmes neuronaux pour l'inversion de données issues de la télédétection spatiale s'est d'ailleurs développé ces dernières années. Mis à part leur antériorité, dans le domaine de l'inversion des températures de Brillance micro-onde, les algorithmes que j'ai développés présentent deux spécificités : l'apprentissage sur des données synthétiques et l'utilisation d'architectures

modulaires. Bien que relativement délicate à mettre en œuvre, ce type d'architecture peut apporter des solutions chaque fois que des raisons physiques induisent la présence de plusieurs modes. De même l'emploi des cartes de Kohonen pour l'égalisation de bases de données dans des espaces de représentation de grande dimension, ouvre des perspectives multiples dans le traitement de données en géophysique.

L'originalité de mes recherches relatives à la modélisation du canal réside dans l'usage de modèles statistiques innovants permettant l'introduction dans la modélisation statistique d'informations relatives à la physique des phénomènes en jeu (prise en compte de la DSD dans les modèles de similitude, séparation des effets des différents constituants).

Les algorithmes inverses développés ont nécessité de nombreuses études relatives aussi bien à la modélisation du problème directe qu'à la caractérisation du milieu. Seuls certains de ces travaux ont été mentionnés (nouveau modèle de transfert radiatif, influence des différentes paramétrisations des particules d'eau et de glace, méthode de « downscaling » des profils atmosphériques). Dans le domaine micro-onde, le taux précipitant ne peut à lui seul expliquer les observations, que ce soit les températures de Brillance ou les affaiblissements atmosphériques. L'hétérogénéité à l'échelle du pixel micro-onde et la caractérisation de la microphysique des précipitations [liste des publications : 11 ,12] ont donné lieu à des travaux spécifiques qui ne peuvent être détaillés ici .

Les modèles statistiques que j'ai mis en œuvre (modèle multi expert, ou modèle GARCH) présentent l'avantage, par rapport aux modèles classiquement utilisés, d'estimer non seulement les grandeurs moyennes connaissant les observations (taux précipitant moyen sachant les températures de Brillance observées ou affaiblissement prévu sachant les affaiblissements observés) mais également les variances conditionnelles. Cette amélioration des méthodes d'estimation va de pair avec l'amélioration de la caractérisation des phénomènes en jeu et de leur variabilité.

Dans les deux domaines concernés par mes travaux le point critique reste la variabilité spatiale ou temporelle à petite échelle et l'intermittence des champs précipitants, c'est ce point qui fait l'objet de mes travaux à venir.

REFERENCES

- [1] Alishouse, J. C., Snyder, S. A., Vongsathorn, J., and Ferraro, R. R., 1990, Determination of oceanic total precipitable water from the SSM/I. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **28**, 811-816
- [2] Arbesser-Rastburg, Bertram R.; Brussaard, Gert, Propagation research in Europe using the OLYMPUS satellite, IEEE, Proceedings (ISSN 0018-9219), vol. 81, no. 6, p. 865-875. Juin 1993
- [3] Bertorelli S., A. Paraboni, Modelling of short-term frequency scaling for rain attenuation using ITALSAT data. *International Journal of Satellite Communications*, Vol 25 Issue 3, Pages 251-262, Décembre 2006.
- [4] Bollerslev T.: Generalised Autoregressive Conditional Heteroskedasticity, *Journal of Econometrics* 31, 307–327, 1986
- [5] Bouchard A., Bilans d'eau et d'énergie par inversion et fusion de données. Ph.D. Thesis, CETP, 2006
- [6] Catalan, C. Gremont, B. Vilar, E. Frequency scaling factor of amplitude scintillation variance for satellite communication systems, *Antennas and Propagation*, 1999. IEE National Conference on, 1999
- [7] Chambers A.P., Otung L.E.: Neural network approach to short-term fade prediction on satellite links, *Electronics Letters*, 10th November 2005, Vol. 41, No. 23
- [8] Chandrasekhar S., *Radiative transfer*, ed New York :Dover, 1960
- [9] COST255 final report : Radiowave Propagation Modelling for Satcom Services at Ku-band and above', SP 1252 ESA, mai 2002.
- [10] COST280.
- [11] Crane R. K. , Fundamental Limitations caused by RF propagation, *Proceedings of the IEEE*, vol 69, No2, February 1981, pp196-209
- [12] Deidda, R., 2000: Rainfall downscaling in a space–time multifractal framework. *Water Resour. Res.*, **36**, 1779–1794
- [13] Dossi L.: Real-time prediction of attenuation for applications to fade countermeasures in satellite communications, *Electronics Letters*, 15th February 1990, Vol. 26, No. 4.
- [14] Gérard, E., and Eymard, L., 1998, Remote sensing of integrated cloud liquid water: Development of algorithms and quality control, *Radio Science*, **33**, 2, 433-447
- [15] Gibbins C. J., Improved algorithms for the determination of specific attenuation at sea level by dry air and water vapor, in the frequency range 1-350 Ghz, *Radio Science*, Vol 21, No6, PP949-954
- [16] Grémont B., Philip M., Galois P. and Bate S.: Comparative analysis 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.
- [17] Haeffelin, M., L. Barthès, O. Bock, C. Boitel, S. Bony, D. Bouniol, H. Chepfer, M. Chiriaco, J. Cuesta, J. Delanoë, P. Drobinski, J-L. Dufresne, C. Flamant, M. Grall, A. Hodzic, F. Hourdin, F. Lapouge, Y. Lemaître, A. Mathieu, Y. Morille, C. Naud, V. Noël, B. O'Hirok, J. Pelon, C. Pietras, A. Protat, B. Romand, G. Scialom, R. Vautard, 2005: SIRTA, a ground-based atmospheric observatory for cloud and aerosol research." *Annales Geophysicae*, 23, pp 253-275
- [18] Hornik K., Stinchcomb M. , White H., 1989, Multi layered feedforward networks are universal approximators, *Neural Networks*, 2, PP359-366
- [19] ITU recommendation ITU-R RPN.618-4, 1996.
- [20] ITU rain rate digital maps, ITU-R P.837
- [21] Kohonen Teuvo, *Self Organizing maps*, Springer 2001
- [22] [Kummerow, 1996] Kummerow C., Olson W. S. et Giglio L. (1996). 'A simplified Scheme for Obtaining Precipitation and Vertical Hydrometeor Profiles from Passive Microwave Sensors'. *IEEE Trans. On Geosci. and Remote Sensing*, **34**, 1213-1232.
- [23] Kummerow C., W. Barnes, T. Kozu, J. Shiue, and J. Simpson, 2001, The evolution of the Goddard profiling algorithm (GPROF) for rainfall estimation from passive microwave sensors, *J. Appl. Meteor.*, 40, 1801-1820.
- [24] 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
- [25] Liebe H. J.: "MPM – An Atmospheric Millimeter-wave Propagation Model", *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 10.6 pp. 631-650, 1989.
- [26] [Marshall et Palmer, 1948] Marshall J. S. et Palmer W. M. K (1948). 'The distribution of rain drops with size', *Journ. Meteorol.*, **5**, 165-166.
- [27] Manning R.M.: A statistical rain attenuation prediction model with application to the Advanced Communication Technology Satellite Project, part III: a stochastic rain fade control algorithm for satellite link power via nonlinear markov filtering theory, NASA TM-100243, 1991.
- [28] McCulloch W. S. and Pitts W. 'A logical calculus for the ideas immanent in nervous activity', *Bulletin of Math. Biophys*, 5, 115-137, 1943
- [29] Mie, G. 1908. Beitrage zur optik truder medein, spezeill. colloidalen metallosungen (contributions à l'optique des milieux troubles, en particulier des solutions métalliques colloïdales). *Ann. Derphys.*, 377-443
- [30] Olson W., S. Yang, J.E. Stout and M. Grecu, 2007. The Goddard Profiling Algorithm (GPROF)/ Description and current application p 179-188 in *Measuring Precipitation from Space*. Eds. V Levizzani, P. Bauer F. Turk. *Springer*
- [31] Petty, G. W., 1997, ADEOS-II/AMSR Pre-Launch Algorithm Development Activities for Column Water Vapor: Preliminary Algorithm Design and Validation Results for SSM/I, NASA/EORC Technical Report, Japan.
- [32] S. R. Saunders, 'Antennas and Propagation for Wireless Communications Systems', Wiley, 1999
- [33] D. Schertzer, S. Lovejoy, P. Hubert: An introduction to stochastic multifractal fields. *Mathematical Problems in Environmental Science and Engineering*, A. Ern and L Weiping (eds.), Series in Contemporary Applied Mathematics, vol.4, Higher Education Press, Beijing, 2002, p. 106-179
- [34] "UIT-R série P", *Propagation des Ondes Radioélectriques*.
- [35] Ulaby, F. T. R.K. Moore, A.K. Fung: "Microwave remote sensing active and passive", Vol 1-3, Artech Huse, 1981-1986
- [36] Van de Kamp M.M.J.L.: Short-term prediction of rain attenuation using two samples, *Electronics Letters*, vol.38 (23), pp.1476-1477, 2002.
- [37] Wentz, F. J., Song, Y., 1997, Vapor Algorithms for SSM/I and AMSR, NASA/EORC Technical Report, Japan

Prospective

PREAMBULE

Une prospective scientifique est par nature délicate. L'évolution des connaissances et des technologies produit constamment de nouveaux capteurs, améliore l'efficacité des méthodes numériques ou statistiques. Les institutions de la recherche au niveau national, ainsi que la structure de mon laboratoire d'accueil²⁹, sont également en mutation. Ces évolutions influenceront nécessairement les travaux à venir.

Cette prospective se situe dans le cadre de l'étroite collaboration qui existe au niveau du groupe inter laboratoire LOCEAN-LATMOS³⁰. Cette coopération est motivée par le désir de pérenniser le thème de la modélisation statistique et ses applications à l'environnement au sein de l'IPSL, Elle consiste en des actions concrètes, qui ne se cantonnent pas aux activités purement scientifiques, mais agit suivant quatre axes complémentaires :

- Recherche : développement de méthodes et modélisation statistique.
- Développement et pérennisation de logiciels d'aide à la réalisation de modélisation statistique.
- Formation des étudiants et des chercheurs à la modélisation statistique en géophysique.
- Coopération avec les pays du Sud³¹.

Les différents projets décrits dans ce document ont été (ou vont être) soumis à différents organismes, et s'intégreront à différents programmes de recherche. Des demandes ont, dès à présent, été soumises au programme RiskNat de l'ANR, dédié à la compréhension et à la maîtrise des risques naturels, au PNTS, Programme National de Télédétection Spatiale qui a pour vocation d'aider les développements instrumentaux et méthodologiques en relation avec les instruments et missions spatiales. Une demande BQR (Bonus Qualité Recherche) de l'UVSQ est également envisagée l'an prochain. J'ai l'intention de participer au programme HyMeX (HYdrological cycle in the Mediterranean Experiment). Ce programme a pour objectifs d'améliorer la caractérisation et la compréhension du cycle de l'eau sur le bassin Méditerranéen, en considérant les différents compartiments (océan, atmosphère, surface et hydrosystèmes continentaux, biogéochimie) et leurs couplages aux différentes échelles de temps.

²⁹ Le Service d'Aéronomie et une partie du CETP ont fusionné le 1 Janvier 2009 pour donner le LATMOS (Laboratoire, Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales)

³⁰ NEURATEL groupe de travail de l'IPSL dédié aux méthodes neuronales maintenant inséré dans le groupe de travail SAMA 'Statistiques pour l'Analyse, la Modélisation et l'Assimilation' de l'IPS. Les membres permanents de ce groupe sont pour le LATMOS: Laurent Barthes, Aymeric Chazottes et moi-même et pour LOCEAN : l'équipe Modélisation et Méthodes Statistiques Avancées (MMSA) dirigée par Sylvie Thiria.

³¹ Projet de création d'un laboratoire mixte international (LMI) focalisé sur les problèmes environnementaux de l'Afrique de l'Ouest et l'océan atlantique tropicale en collaboration avec l'Université Cheikh Anta Diop (UCAD) à Dakar (Sénégal).

THEME

Les recherches que je compte mener à bien concernent la variabilité des précipitations. La nécessaire synergie entre observation et modélisation implique une approche pluridisciplinaire qui combine ces deux aspects. Mes projets portent sur la modélisation statistique de la variabilité des précipitations, sur l'estimation des précipitations et sa microphysique à partir des observations disponibles, et sur le développement de nouveaux moyens d'observation.

DE LA PROPAGATION DANS L'ATMOSPHERE A L'OBSERVATION DES PRECIPITATIONS

L'étude de la propagation atmosphérique et de ses applications aux télécommunications est liée à l'histoire du laboratoire³². La recherche que j'ai menée au CETP dans ce domaine consiste à utiliser les savoirs d'un laboratoire d'environnement en terme de connaissance du milieu naturel pour faire évoluer la modélisation du canal. D'autre part elle me permet de bénéficier des moyens expérimentaux spécifiques aux études de propagation pour améliorer la caractérisation statistique de l'atmosphère. Afin de pouvoir observer expérimentalement les phénomènes qui provoquent l'interruption des liaisons (phénomènes extrêmement rares), les expériences dédiées aux études de propagation sont effectuées sur des durées très longues (plusieurs années), avec un dispositif expérimental qui garantit la continuité des mesures. Les travaux générés par les études de propagation (cf. bilan) concernant la microphysique, l'interaction des ondes avec les hydrométéores, et la variabilité temporelle de l'affaiblissement atmosphérique, bénéficient à l'amélioration des connaissances relatives aux phénomènes précipitants. Les précipitations sont un des processus hydrologiques les plus variables, et ceci quelle que soit l'échelle spatiale (régionale, locale, etc.) ou temporelle (annuelle, événement pluvieux) prise en compte. L'hétérogénéité et l'intermittence du phénomène précipitant, ainsi que sa nature discrète, font de la pluie une des grandeurs géophysiques les plus difficiles à mesurer et à modéliser. En particulier les relations entre observations et modélisations, souvent à des échelles différentes est un point critique. L'observation des événements précipitants extrêmes est particulièrement problématique, du fait même de leur violence, de leur relative rareté et de leur extrême variabilité, tant spatiale que temporelle. Le fort contexte expérimental des travaux menés jusqu'ici dans le cadre des études de propagation, sera mis à profit pour l'observation des événements extrêmes.

³² l'origine du CETP est le CRPE (Centre de Recherche en Physique de l'Environnement), laboratoire ayant pour tutelles le CNRS et le CNET (Centre National d'Etude en Télécommunication), centre de recherche de France Télécom avant sa privatisation.

LES ENJEUX ACTUELS DE L'OBSERVATION DES PRECIPITATIONS

La localisation et l'intensité des précipitations interviennent de multiples manières dans le cycle de l'eau (condensation de la vapeur d'eau³³, apparition de végétation³⁴, salinité de surface des océans³⁵, ...), élément majeur de la physique du climat. Les enjeux, concernant l'hétérogénéité des précipitations dans le temps ou dans l'espace, ne sont pas seulement scientifiques. Les connaissances sur la variabilité des précipitations à court terme (événements extrêmes), comme à long terme (gestion des ressources en eau), peuvent limiter les dégâts humains et matériels engendrés par ces phénomènes.

Citons quelques exemples qui soulignent les limites de nos connaissances actuelles relatives à la variabilité des précipitations et aux relations entre les différentes échelles:

- Un des problèmes fondamentaux des modèles de prévision numérique du temps est celui des conditions initiales. Les méthodes d'assimilation permettent d'obtenir une description aussi précise que possible de l'état de l'atmosphère, à partir des observations disponibles. La matrice de covariance d'erreur des observations joue un rôle essentiel dans l'impact que doivent avoir les observations. Elle s'obtient à partir des erreurs de mesure, de la précision de l'algorithme d'estimation des grandeurs pertinentes, des erreurs qui proviennent des différences de résolution spatiale et temporelle entre modèles et observations. L'assimilation des informations relatives aux précipitations dans les modèles souffre actuellement du manque d'observations disponibles, des erreurs d'estimation importantes et du peu d'informations concernant la matrice de covariance. L'incertitude de la prévision, aussi bien en terme de localisation que d'intensité, est par ailleurs très liée à l'échelle de modélisation.
- Parmi les risques naturels majeurs, les inondations sont certainement les catastrophes les plus fréquentes et les plus dévastatrices³⁶ sur les plans humain et matériel. L'observation des précipitations, phénomènes précurseurs de ces désastres, est donc un des éléments importants des systèmes d'alerte. Les zones du globe non équipées de radars météorologiques, du fait des contraintes techniques (relief tourmenté) ou des contraintes économiques (pays émergents), ne disposent pas des informations (carte de précipitations environnantes) pourtant essentielles à la prévision des crues. D'autre part, les systèmes d'annonce de crues utilisant les transmissions par satellites, mêmes s'ils présentent une fiabilité accrue (vis-à-vis d'autres supports de communication), ne peuvent, en l'état actuel des connaissances et des technologies disponibles, garantir une robustesse de transmission face aux événements de

³³ 600 calories par gramme d'eau condensé ; 40 % de l'énergie nécessaire au chauffage de l'atmosphère

³⁴ modifie ainsi l'albedo de la surface continentale,

³⁵ la salinité agit sur la densité et conditionne la circulation thermohaline

³⁶ Le nombre d'inondations et leurs intensités ont considérablement augmenté dans le monde ces dernières années, causant des milliers de morts. Selon la base de données internationale sur les catastrophes (Emergency Events Database www.em-dat.net) 2 251 inondations ont tué 176 000 personnes entre 1980 et 2005.

pluies extrêmes.

- La structure spatiale et temporelle des précipitations est un élément indispensable de la modélisation des interactions entre la surface et l'atmosphère et de la prédiction des inondations. Un lien fort existe entre la réponse hydrologique du sol et les caractéristiques spatio-temporelles des phénomènes précipitants. Alors qu'un épisode orageux constitué de quelques cellules isolées peut générer une crue éclair sur un bassin de quelques dizaines de km². Un système convectif mésoéchelle (MCS) peut couvrir plusieurs régions simultanément et provoquer des crues dans des bassins de 500-2000 km². La nature convective des précipitations dans certaines régions comme l'Afrique de l'Ouest, se traduit par une très forte hétérogénéité spatiale des champs de précipitation, y compris à l'échelle saisonnière, ce qui a un impact fort sur le cycle hydrologique continental.
- L'évolution des précipitations, comme celle des températures, est un des indicateurs de changement climatique. Les modèles de climats s'accordent à très grande échelle d'espace (tropiques, moyennes et hautes latitudes, continents par rapport aux océans). Ils prévoient d'une part que les régions du globe aujourd'hui sèches tendront à s'assécher et que les régions humides s'humidifieront. Ils prévoient d'autre part une augmentation de l'intensité et de la fréquence des événements « extrêmes » (inondations, sécheresses, typhons, cyclones, coulées de boue). Cependant, à l'échelle d'une région particulière de la planète, comme l'Atlantique Nord ou les régions de mousson, les différences entre modèles sont notables. Elles proviennent des propriétés à petite échelle des nuages et de la pluie, qu'il est difficile de représenter correctement dans les modèles de grande échelle.

HETEROGENEITE DES PRECIPITATIONS ET RESOLUTION DES OBSERVATIONS

La diversité des domaines (climatologie, météorologie, hydrologie, télécommunication, télédétection) pour lesquels la variabilité des précipitations est problématique, montre à quel point les échelles tant spatiales que temporelles concernées peuvent être différentes.

De nombreuses applications : les comparaisons modèles/observations, la fusion de données issues de capteurs différents, la validation de grandeurs estimées par télédétection à partir d'observations effectuées par des capteurs in-situ, sont confrontées au problème de l'échelle de représentation du champ précipitant. La caractérisation du phénomène précipitant à partir de la moyenne et de la variance du taux précipitant à une échelle particulière n'est souvent pas suffisante.

Les nouveaux modèles, basés sur l'invariance d'échelle et les multifractales, semblent être des outils prometteurs. La propriété d'autosimilarité d'un objet fractal, qu'elle soit

déterministe ou stochastique, implique que sa description puisse être obtenue à l'aide de règles simples itératives. L'autosimilarité signifie que le tout est semblable à ses parties, autrement dit, qu'un changement d'échelle ne modifie pas l'objet observé. Dans la mesure où la complexité est identique quelle que soit la résolution, les différentes échelles ne doivent pas être étudiées séparément. Il est alors plus simple de décrire ces objets en prenant en compte toutes les échelles en même temps.

Ce type de modélisation pour la description de la variabilité spatiale est rendu délicat du fait du peu d'échelles pour lesquelles les observations sont disponibles. Les études présentées dans le bilan, et qui concernent uniquement la variabilité temporelle, ont en effet souligné tout l'intérêt qu'il y a à dissocier l'analyse inter événement de celle de l'intermittence pluie/non pluie. D'un point de vue spatial, ceci implique de disposer d'observations fines à l'intérieur même d'un système précipitant. Mes objectifs relatifs à l'observation et à la modélisation des précipitations concernent

la mesure des précipitations aux échelles intermédiaires entre la mesure ponctuelle (pluviomètre) et la mesure fournie par télédétection hyperfréquence (radar ou radiomètre)

l'amélioration des connaissances relatives à la variabilité verticale des propriétés microphysiques

la modélisation de l'hétérogénéité des événements précipitants

la modélisation de l'intermittence pluie-non pluie

les conséquences des caractéristiques de l'hétérogénéité et de l'intermittence pour la télédétection hyperfréquence des précipitations ('downscaling', étalonnage d'instruments spatiaux, fusion de données multi échelle, validation des champs observés, comparaison observations - modèle)

PROJETS

ANALYSE MULTIFRACTALE -MODELISATION –SIMULATION DES CHAMPS PRECIPITANTS

L'analyse multifractale des séries chronologiques de précipitations a mis en évidence la capacité de cette modélisation à capter les relations inter-échelles du phénomène considéré. Le simulateur multifractal réalisé durant la thèse de Louis de Montera, permet de générer des séries chronologiques qui reproduisent les caractéristiques d'intermittence et les variations temporelles des affaiblissements observés. Le projet est d'étendre ces travaux relatifs à la dimension temporelle aux dimensions spatiales. Les données les plus à même de décrire la structure interne des systèmes précipitants sont fournies par les radars terrestres³⁷.

³⁷ Les travaux relatifs aux relations entre précipitations et observations Radar font l'objet d'une description ultérieure.

Le CETP a participé aux expériences AMMA³⁸ pour l'étude de la mousson africaine, et FRAMEA³⁹ pour le bassin hydrologique de Grasse, dans le Var. Lors de ces deux expériences, des cartes de réflectivité ont été réalisées respectivement par les radars Ronsard⁴⁰ et Hydrix⁴¹ : un grand nombre de données sont ainsi disponibles. Des études récentes ont déjà montré la pertinence de l'analyse multifractale pour la modélisation des champs de pluie restitués par image Radar. La spécificité des travaux envisagés repose sur : la modélisation fractale des supports pluie/non-pluie, l'analyse multifractale des zones de pluie (sans intermittence) et enfin sur la remise en question de l'hypothèse de conservation généralement admise.

Les cartes de réflectivité radars portent généralement sur plusieurs centaines de kilomètres carrés. Une attention particulière sera portée à l'analyse de l'anisotropie des champs observés. La comparaison des paramètres obtenus entre les données AMMA (climat tropical) et FRAMEA (climat méditerranéen) permettra de valider la modélisation multifractale et d'analyser le comportement des différents paramètres. Cependant, chaque pixel ne représentant au mieux qu'une zone de 1 km², les possibilités d'analyse des fines résolutions resteront toutefois limitées.

Dans le cadre de l'expérience Syracuse (cf. bilan) nous disposons de séries temporelles d'affaiblissements échantillonnées à 1 Hz, ainsi que des champs précipitants fournis par un radar météorologique opérationnel du réseau ARAMIS⁴² de météo France. Nous disposons également des données du radar Ronsard associées aux mesures du spectropluviomètre. L'utilisation de plusieurs bases de données présentant des résolutions différentes afin d'augmenter le nombre d'échelles est une solution qui n'a pas encore été envisagée pour l'étude des précipitations, mais que j'ai l'intention d'expérimenter.

Ces travaux d'analyse des mesures permettront la modélisation de l'hétérogénéité spatiale. L'ensemble de ces travaux permettra la réalisation d'un simulateur de champ précipitants reproduisant à la fois la non stationnarité, l'anisotropie, l'hétérogénéité et l'intermittence de phénomènes observables. Grâce à ce simulateur, la variabilité des phénomènes pourra être reproduite à volonté à toutes les échelles.

Le modèle et les champs précipitants synthétiques ainsi générés seront utilisés pour améliorer le traitement des mesures de précipitation. On peut citer : l'interpolation de mesures pluviométriques, les méthodes de « downscaling », l'étalonnage radar au moyen de mesures ponctuelles généralement disponibles, le développement d'algorithmes inverses, la validation des

³⁸ AMMA : Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine

³⁹ FRAMEA : Flood forecasting using Radar in Alpine and Mediterranean Areas

⁴⁰ Ronsard : radar polarimétrique Doppler en bande C installé au Bénin entre Mai et Septembre 2006

⁴¹ Hydrix : radar polarimétrique Doppler en bande X(9.3 GHz) installé dans le Var en 2006

⁴² réseau ARAMIS : Application RAdar à la Météorologie Infra-Synoptique de météo France constitué de 21 radars bande S (2-4 GHz) au sud de la France et en bande C (4-8 GHz) au Nord.

champs précipitants obtenus par télédétection spatiale, comparaison des champs issus de modèles numériques avec les observations, exploitation de mesures effectuées à des échelles spatiale et avec des répétitivité temporelle diverses.

PROFIL VERTICAL DE LA MICROPHYSIQUE : ASSIMILATION DES REFLECTIVITE RADAR

Le seul instrument capable de fournir des cartes de précipitations à une résolution suffisante pour les travaux de modélisation présentés dans le paragraphe précédent, sont les radars météorologiques. L'estimation des précipitations au sol à partir des mesures radars est cependant très indirecte, et l'incertitude actuelle des taux précipitants radar est de l'ordre de 50%. Les travaux récents concernant les procédures d'étalonnage des radars reposent sur des comparaisons statistiques entre réflectivités radar mesurées en altitude, et mesure directe de la distribution de taille des gouttes (DSD) au sol par des spectropluviomètres. Le manque d'informations concernant la structure verticale de la pluie, et plus précisément de sa DSD, ainsi que la différence importante des volumes sondés par ces deux capteurs, est source d'incertitude. L'assimilation de ces données de nature hétérogènes dans un modèle physique est une solution que j'envisage pour réduire ces incertitudes.

La modélisation des phénomènes physiques⁴³ qui affectent l'évolution verticale de la microphysique permet de déduire la DSD au sol à partir de celle que l'on observe au sommet de la zone de précipitation. Un modèle de ce type a été développé et validé récemment au CETP [liste des publications : 12]. Nous envisageons d'utiliser logiciel d'aide YAO développé, par l'équipe MMSA du LOCEAN, pour l'assimilation de données dans les modèles numériques (Fig.14). L'assimilation combinée des réflectivités radars mesurées au sommet de la zone de précipitation et des DSD mesurées au sol dans le modèle physique d'évolution verticale de la DSD est destinée à obtenir des profils verticaux de DSD. Les modèles de diffusion pour simuler des mesures radars⁴⁴ à partir de la DSD sont ceux présentés dans le bilan.

Le profil de granulométrie ainsi obtenu permettra d'évaluer précisément :

- La représentativité de la granulométrie observée au sol en vue de l'étalonnage des radars.
- Les relations de puissance classiquement utilisées entre la réflectivité radar et l'intensité de la pluie au sol.
- Les relations entre l'affaiblissement observé sur un trajet oblique et l'intensité de la pluie au sol.

⁴³ Les phénomènes de break up, de coalescence et d'évaporation des gouttes pendant leur chute

⁴⁴ Pour éviter des phénomènes d'absorption trop importants, les radars destinés à la mesure des précipitations fonctionnent dans des bandes de fréquences S (2-4 GHz), C(4-8 GHz) ou X(8-12 GHz) inférieures à la bande Ka (20-30 GHz) utilisée jusqu'ici dans mes travaux. Alors que l'affaiblissement fait intervenir la diffusion avant la réflectivité radar fait intervenir la diffusion arrière.

Le radar CURIE⁴⁵ en phase de test au CETP est destiné à documenter de façon fine les premiers cinq cents mètres de l’atmosphère. Son objectif est d’étudier la turbulence en ciel clair ainsi que le vent horizontal. La bande de fréquence qu’il utilise est celle des radars météorologiques. Par rapport à ces derniers, la résolution spatiale est bien meilleure, de l’ordre de 25 m au lieu d’un kilomètre. La méthode employée permet d’obtenir des données dans les très basses couches de l’atmosphère, qui correspondent à la zone aveugle des radars classiques. La campagne de mesures en cours au SIRTA pour la mise au point de cet instrument, l’associe à un spectropluviomètre. Le profil vertical de réflectivité radars en bande X⁴⁶, associé à la DSD mesurée au sol, permettra d’accéder à une connaissance fine du profil vertical microphysique.

La méthode d’assimilation évoquée ci-dessus pour l’analyse des données radar météorologiques, sera adaptée à cet instrument

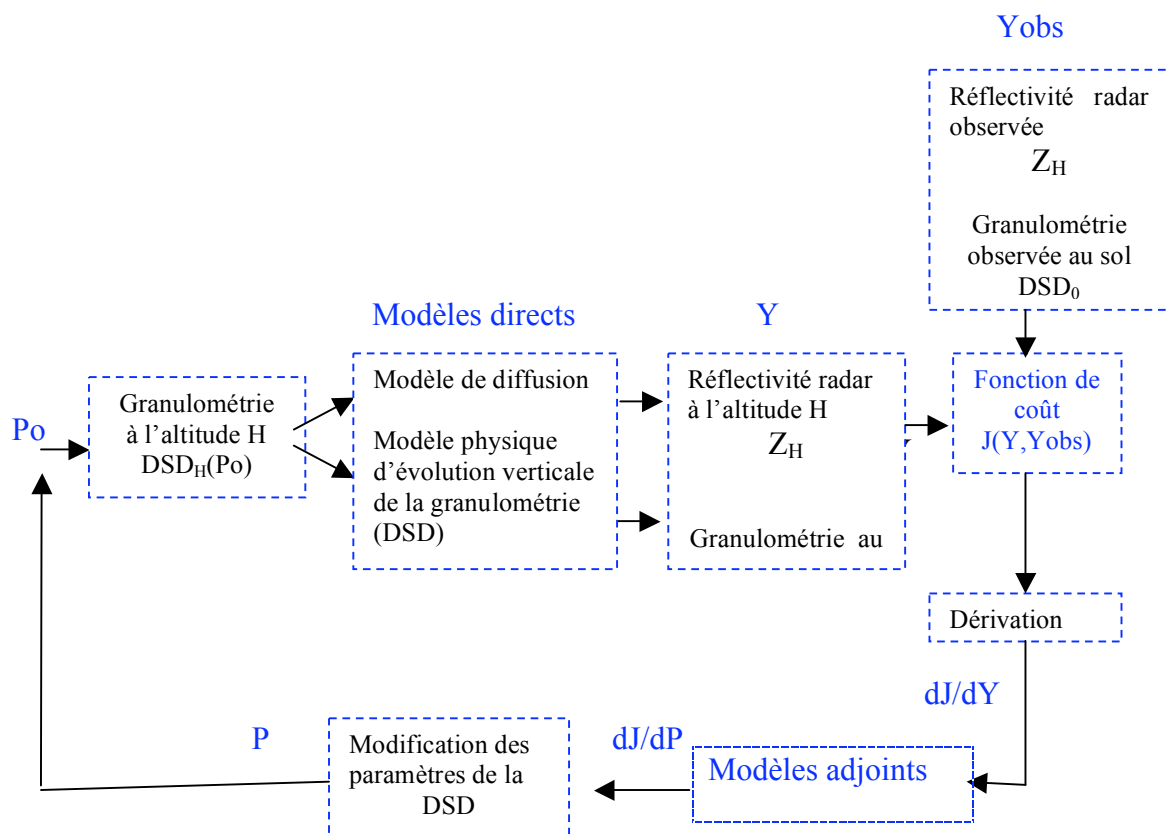


Figure-14. Schéma synoptique de l’assimilation des réflectivités radars et de la microphysique (DSD : Drop Size Distribution)

UN NOUVEAU MOYEN D’OBSERVATION DES PRECIPITATIONS

Pour des raisons techniques (relief tourmenté) ou économiques (pays émergents),

⁴⁵ CURIE (Canopée Urbaine Recherches sur les Interactions et Echanges) est un radar Doppler en bande X (9.4 GHz)

⁴⁶ Le radar Curie fonctionne à 9,4 GHz

certaines zones du globe ne sont pas équipées de radars météorologiques terrestres. De ce fait, elles ne disposent pas actuellement de mesure de pluie fiable et continue. Les techniques satellitaires micro-ondes sont les seules à permettre une surveillance globale des précipitations depuis l'espace. L'émissivité importante et variable du sol terrestre dans le domaine micro onde est telle que le rapport signal sur bruit des mesures radiométriques spatiales n'est pas favorable à leur utilisation au dessus des continents. La résolution spatiale des mesures satellitaire n'est par ailleurs pas optimale, pour l'observation fine des évènements. Les réseaux de pluviomètres sont alors les seules données envisageables, bien qu'ils présentent de nombreux défauts : mesures extrêmement ponctuelles, résolution temporelle importante, incapacité à mesurer les faibles précipitations, manque de fiabilité liée à la nature mécanique du dispositif.

Il est cependant possible de regarder la télévision grâce aux satellites ou d'être en relation avec un satellite de télécommunications, en pratiquement tout point du globe. 250 satellites, situés sur des orbites géostationnaires, sont des sources de rayonnement micro-ondes disponibles. Le système envisagé consiste à utiliser les signaux émis par les satellites géostationnaires en bande Ku ⁴⁷ (ou Ka) pour estimer la quantité d'eau précipitante présente dans l'atmosphère terrestre. Bien que la physique de la mesure soit assez différente, cette approche peut être comparée à l'utilisation du GPS pour la mesure de la vapeur d'eau.

Le principe du capteur envisagé est relativement simple. Les signaux des balises de différents satellites reçues sur un site donné seront scrutés, et les puissances de réception du signal seront archivées en temps réel. La mesure de la puissance reçue sera effectuée à l'aide d'un analyseur de spectre relié à la centrale d'acquisition, la centrale assurant le pilotage du balayage sur la bande considérée (a priori Ku)⁴⁸. Une acquisition cyclique rapide permettra de suivre les évolutions temporelles des puissances reçues de chaque satellite visible.

Ce capteur, d'un faible coût, d'une faible consommation de puissance, de petites dimensions, et utilisant, autant que possible, des équipements et des technologies déjà existantes, doit être capable de suivre plusieurs satellites (au minimum deux) opérant à l'intérieur d'une même bande de fréquences. Pour chaque signal satellite, la puissance acquise sera comparée à la puissance reçue en temps clair (puissance maximum), de manière à obtenir l'affaiblissement atmosphérique. Aux fréquences considérées (en bande Ku), l'affaiblissement atmosphérique est pratiquement égal à l'affaiblissement dû aux seules précipitations.

On disposera, pour chaque site, de K mesures de l'affaiblissement des liaisons, avec les K satellites considérés. À partir de ces mesures d'affaiblissement, une estimation des intensités de pluie correspondantes est envisageable. Les travaux présentés plus hauts sur la structure

⁴⁷ Bande Ku (12-18 GHz)

⁴⁸ à priori Ku, mais éventuellement Ka pour que les atténuations dues à la pluie soient encore plus significatives, les bandes Q et V étant écartées pour des contraintes de coûts / complexité de la station, antenne, tête RF).

verticale des précipitations, permettront d'évaluer précisément les relations entre l'affaiblissement observé sur un trajet oblique et l'intensité de la pluie au sol

Le dispositif dupliqué sur plusieurs sites distants les uns des autres, fournira plusieurs mesures sur la zone. Une méthode d'interpolation multifractale pourra être envisagée sur ces données, afin d'obtenir des champs 2D d'affaiblissement et de précipitation en temps quasi-réel. Les cartes ainsi obtenues seront validées par comparaison avec des données radars.

L'originalité d'une telle démarche est multiple : faible coût, faibles contraintes d'entretien (pas de système mécanique comme c'est le cas pour les pluviomètres), mesures simultanées dans plusieurs directions, en continu avec une excellente résolution temporelle (seconde), une résolution spatiale intermédiaire entre une mesure ponctuelle (pluviomètre) et un pixel radar. L'inconvénient d'un tel capteur est qu'il n'est destiné qu'à la mesure des précipitations au dessus des continents.

AU DESSUS DES OCEANS : OBSERVATION PAR SATELLITE

Les précipitations dans les zones tropicales représentent les deux tiers des précipitations globales. Les tropiques sont couverts à 75% par les océans. Il va donc de soit que l'observation des précipitations au-dessus des océans est capitale. Le problème spécifique posé par ces observations ne peut donc être négligé. Seules les techniques satellitaires micro ondes permettent une surveillance globale des précipitations. Elles sont cependant confrontées à un dilemme résolution spatiale/répétitivité temporelle particulièrement cornélien. Les instruments micro-onde existants⁴⁹ (cf. bilan) sont nécessairement placés en orbite basse, cela leur permet d'obtenir une résolution de quelques km² et la fréquence d'observation correspondant est alors au mieux de deux fois par jours (très faible étant donné la dynamique des événement pluvieux de la zone tropicale). L'utilisation de fréquences plus élevées améliore la résolution spatiale, mais la sensibilité à la glace dégrade ou empêche alors la restitution des précipitations.

Par ailleurs, les satellites d'observation géostationnaires permettent une mesure continue, mais les bandes de fréquences envisageables sont VIS-IR⁵⁰ et ne permettent de mesurer les précipitations,

Parmi les projets de télédétection hyperfréquence, on peut citer le futur satellite MEGHA-TROPIQUES⁵¹. Il volera à une altitude plus élevée, ce qui lui assure une répétitivité accrue (6

⁴⁹ le satellite nippo-américain TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) par exemple

⁵⁰ domaine visible ou infra rouge

⁵¹ La mission franco-indienne Mégha-Tropiques comprends trois instruments dont un radiomètre MADRAS similaire au radiomètres SSM/I et TMI (avec un canal additionnel à 157 GHz destiné à l'observation de la glace). Le lancement est prévu en Avril 2009, la mission MEGHA-TROPIQUES est gérée conjointement par les agences spatiales française et indienne CNES et ISRO

fois par jour), mais l'imageur hyperfréquence MADRAS⁵² embarqué à son bord aura une résolution spatiale dégradée⁵³ par rapport aux radiomètres actuels. MADRAS est associé au projet GPM⁵⁴, faisant suite à TRMM, vise à mettre en orbite une constellation de satellites portant des radiomètres pour améliorer la répétitivité sans dégrader la résolution spatiale.

Malgré la multiplicité des observations provenant de capteurs de résolution spatiale et de répétitivité temporelle différente, la restitution des précipitations aux moyens des radiomètres micro-ondes actuels ou futurs se heurte à une difficulté majeure. L'information multi-fréquence permet théoriquement de discriminer les différentes contributions de l'atmosphère (vapeur d'eau, eau liquide nuageuse, précipitation) et celle de la surface. Mais d'une part les échelles de variabilité spatiale de ces différents phénomènes ne sont pas identiques, et d'autre part la résolution spatiale est différente d'un canal à l'autre, ce qui signifie que la zone observée aux différentes fréquences n'est pas identique. Les précipitations étant un phénomène particulièrement hétérogène, l'hypothèse d'homogénéité utilisée dans l'approche multi-fréquence est particulièrement problématique. Les travaux présentés dans la première partie du bilan concernant l'estimation des taux précipitants (I.3) seront revisités. En particulier la modélisation multi-échelle de l'hétérogénéité des précipitations, permet d'étendre la méthode de downscaling utilisée pour le canal à 85 GHz à l'ensemble des canaux radiométriques. L'information relative aux caractéristiques spatiales des champs et à leur dynamique sera exploitée dans des algorithmes d'inversion multi résolutions et multi pixels.

PROJETS METHODOLOGIQUES

Les travaux de recherche décrits dans le domaine I du bilan, centrés sur l'utilisation des méthodes neuronales pour des applications à la télédétection de l'atmosphère, sont de nature méthodologique. Ils ont consisté à mettre au point une méthodologie efficace pour le développement d'algorithmes.

Associés à des actions de formations : école d'été, création d'un master et cours d'école doctorale, leur objectif était de participer à la diffusion vers la communauté géophysique de techniques développées par les statisticiens. Aujourd'hui, ces méthodes sont couramment utilisées pour l'inversion des données radiométriques, et plus généralement pour extraire des informations de données de télédétection de l'environnement, par nature toujours extrêmement bruitées.

⁵² Le radiomètre MADRAS sera doté de neuf canaux à cinq fréquences 18.7, 23.8, 36.5, 89 et 157 GHz , polarisations verticale et horizontale

⁵³ 40 km pour les canaux 18.7, 23.8, 36.5 ; 10 km pour le canal 89 GHz et 6 km pour le canal 157 GHz

⁵⁴ lancement prévu en 2013, le projet (Global Precipitation Mission) des agences spatiales américaines et japonaises NASA et NASDA

La diversité des problématiques abordées me conduit à avoir une approche plurielle de la modélisation statistique. Les activités présentées dans le bilan font appel aux modélisations suivantes : Multy Layer Perceptron, Self Organized Map, Multi-experts⁵⁵, analyse multi fractale de séries chronologiques, modèle de prédiction de type TARIMA, modèle non-linéaire de la variance conditionnelle de type GARCH⁵⁶. Mes projets font quant à eux intervenir : la modélisation multi fractale de champ 2D, les méthodes d'assimilation, de downscaling, d'interpolation, de comparaison modèle observations, de fusion de données multi-échelles).

Toutes ces méthodes sont destinées à avoir des applications multiples en science de l'environnement, elles ne sont pas spécifiques à l'étude des contenus en eau de l'atmosphère, elles permettent la modélisation de phénomènes naturels aussi complexes que variés. Par le biais de collaborations avec des physiciens d'autres domaines les connaissances, par la mise en place de formations au sein de l'école doctorale d'environnement, les outils développés pour la mise en œuvre de ces méthodes sont destinés à être adapté à des applications diverses. Ces collaborations sont difficilement prévisibles et ne peuvent être mentionnées dans cette prospective.

CONCLUSION

Observation et modélisation des précipitations sont intimement liées. Les projets de recherche que j'envisage de mener à bien, dans la continuité des travaux présentés dans le bilan, sont de nature pluridisciplinaire. Ils reposent sur une nécessaire synergie entre expérimentation et modélisation. L'essentiel des efforts de modélisation porte sur les différents aspects de la variabilité des précipitations : temporelle ou spatiale (horizontale ou verticale), il s'agit de décrire statistiquement le phénomène précipitant de la microphysique à l'échelle globale. Ces travaux de modélisations basés sur les observations disponibles, alimentent les recherches concernant l'estimation des grandeurs caractéristiques des précipitations à partir des mesures. Dans le cadre de l'observation par satellite, les algorithmes présentés dans le bilan, seront améliorés par la prise en compte de la modélisation statistique des relations inter échelles. Au-dessus des terres émergées, la mesure radar sera associée à la mesure de la DSD au sol, exploitée séparément jusqu'ici. La fusion de mesures de la microphysique au sol avec une mesure méso échelle fournit par les radars en altitude, se fera par l'intermédiaire d'un modèle physique. Le manque d'observations aux échelles intermédiaires entre la mesure ponctuelle et la mesure méso échelle est un obstacle à la modélisation et à la prédiction qui nécessite de nouveaux moyens d'observation. Le développement d'un nouveau capteur est envisagé, qui

⁵⁵ Réseaux de neurones non bouclés, Cartes de Kohonen réseaux de neurones multi experts

⁵⁶ Generalized Auto Regressive Conditionally Heteroscedastic

devrait répondre à ce besoin.

Le développement de méthodes adaptées à l'analyse, la modélisation ou la simulation d'un phénomène aussi complexe que les précipitations pourra donner lieu, dans le cadre de collaborations, à des applications concernant d'autres grandeurs géophysiques ayant des propriétés similaires.

Articles

