



**Hydrométéorologie en zone tropicale : variabilité
pluviométrique et impact hydrologique.**
Une analyse multi-échelles et multi-capteurs centrée sur
l'Afrique de l'Ouest .

Mémoire présenté par

Marielle Gosset

Institut de Recherche pour le Développement (IRD)
Geoscience Environnement Toulouse (GET)

Pour l'obtention du diplôme d'

**Habilitation à Diriger des Recherches
de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III**

Spécialité Sciences de la Terre et de l'Univers

Le 21 Septembre 2021

Devant le jury composé de :

Serge Chauzy, Président
Maria-Helena Ramos, rapporteuse
Frédérique Seyler, rapporteuse
Christian Salles, rapporteur
Eduardo Savio Martins, examinateur
Eric Mougin, parrain de l'HDR.

DIPLOME D'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

RAPPORT DE SOUTENANCE

Nom du candidat(e) : Marielle GOSSET HALL

Date de soutenance : 21 septembre 2021

Nom du Président du jury : Serge CHAUZY

Marielle GOSSET HALL, Chargée de Recherches à l'IRD, a présenté, le 21 septembre 2021, l'exposé oral de ses activités dans le but d'obtenir une Habilitation à Diriger des Recherches. Parrainée par Éric MOUGIN, sa candidature se base sur les résultats de ses travaux résumés par le titre de son mémoire : « Hydrométéorologie en zone tropicale : variabilité pluviométrique et impact hydrologique. Une analyse multi-échelles et multi-capteurs centrée sur l'Afrique de l'Ouest. ». Le jury a été impressionné par la diversité et la qualité des activités de la candidate dont témoigne le rapport écrit. Il a souligné l'importance des responsabilités nationales et internationales qu'a su prendre Marielle GOSSET HALL, ainsi que celle du rôle qu'elle joue dans l'organisation de son domaine de recherche. La mobilité dont elle sait faire preuve constitue un atout important de son dossier. Le nombre d'encadrements universitaires qu'elle a assurés est important et leur qualité est démontrée par des publications et acquis clés de connaissances dans son domaine, ce qui est très apprécié.

Très didactique et bien structurée, sa présentation orale en français s'est appuyée sur des illustrations en anglais afin de permettre à tous les membres du jury de bien suivre ses propos. Elle a ainsi mis en évidence et en perspective une sélection judicieuse de ses principaux résultats. La cohérence et la progression de sa démarche, l'honnêteté scientifique dont elle a fait preuve a été très appréciée par le jury. En particulier, tout au long de son exposé, elle n'a pas manqué de mentionner les contributions aux résultats obtenus de ses collaborateurs et étudiants.

La discussion et la session des questions qui ont suivi son exposé ont permis de progresser encore vers les nouvelles pistes que Marielle GOSSET HALL a su tracer. Ses réponses judicieuses et honnêtes aux questions posées ont permis de mettre en évidence sa maturité scientifique, la compétence qu'elle a acquise ainsi que son expertise dans ce domaine stratégique.

La qualité globale de son dossier et celle de sa soutenance orale ont amené le jury à accorder sans réserve à Marielle GOSSET HALL le diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches délivré par l'Université de Toulouse.

EMARGEMENT DES MEMBRES DU JURY



MARIA-HELENA RAMOS



CHRISTIAN SALLES



FREDERIQUE SEYLER



SERGE CHAUZY



EDUARDO MARTINS



ERIC MOUGIN

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu les membres du jury qui ont bien voulu lire et évaluer ce manuscrit d'Habilitation à Diriger des Recherches, avec une mention particulière à Serge Chauzy pour ce deuxième mandat de président !

Un merci sincère à Eric qui a accepté d'être le parrain de cette HDR, et pour l'accueil chaleureux de toute cette équipe 'sahélienne' quand je suis arrivée à Toulouse. Fabrice, Manuela, Pierre (Ratounet), Yves, Cécile, Laeticia, Laurent et Françoise, quel privilège de côtoyer au boulot et ailleurs des collègues si riches et bienveillants ! et merci à tous les sympathiques zonards critiques de l'équipe V.

Je remercie aussi tous ceux et celles, dont les efforts plus ou moins visibles embellissent et facilitent le travail quotidien au GET, les équipes de gestion, d'informatique, de direction, tout particulièrement Sabine, Carine et Laurence que je connais mieux.

Ayant tant tardé à écrire ce manuscrit, la liste de ceux et celles que j'ai croisés s'est allongée, je ne peux pas remercier chacun.e. Un grand merci collectif aux équipes d'AMMA et AMMA-CATCH pour ce bout de chemin en Afrique de l'Ouest, à Thierry, à Frédéric pour la saga Xport; à Christophe et sa famille, Randel, Françoise, Armand, Elodie, Ramatou, découverts au Bénin. Certaines rencontres professionnelles sont des tournants. Merci Remy de m'avoir invitée dans l'aventure Megha-Tropiques, que de défis relevés tous ensemble avec notamment Sophie, Hélène, Nicolas, Pierre et Michel(s), Philippe, Thomas, Clément, Julien, Matias, Romulo. L'Hydrométéorologie Spatiale Tropicale a relancé mon intérêt pour ce métier, merci à cette grande famille de m'avoir adoptée et à vous tous, Adrien, Ayan, Bachir, Denis, Jean-François, Guero, Jean-Jacques, Kone, Laetitia, Luc, Nicolas, Rodrigo, Selma, Stéphane, Sylvain, Walter de partager un peu de vos rivières, lacs, modèles ou satellites préférés !

La partie la plus gratifiante de ce métier est d'accompagner les 'jeunes pousses'. Merci mes thésards, tous différents et dont j'ai tant appris, Eric-Pascal mon tout premier, Sounmaila, Emmanuel, Claire -enfin une fille-, Clément, Augustin, Apoline, Modeste, Matias, Maxime, et le 'petit dernier' Rodrigo. Mes amis d'Abidjan ce que nous bâtissons ensemble via plusieurs générations de chercheurs est une source de joie et de fierté !

Une pensée pour mon père, Henri-Papillou qui aurait été fier d'ouvrir une bouteille de champagne Gosset pour l'occasion, et merci à toi ma si courageuse Ofelia.

Enfin vous mes deux grands, mes deux petits, Léo & Dylan, source intarissable d'émotions, quel plaisir de vous voir être et devenir de si belles personnes. Last but not least, my best HDR, really, is my Husband de Rêve Nick, thank you for everything and much more.



Résumé

Les précipitations sont la variable d'entrée du cycle hydrologique continental et à ce titre intéressent les sciences hydrologiques. Elles sont aussi le flux en surface résultant de processus atmosphériques complexes de génération, évolution et chute, des hydrométéores. Les systèmes précipitants ont un rôle majeur dans les cycles de l'eau et d'énergie, des échelles microphysique à climatique. Quantifier les précipitations et analyser leur variabilité, sur une gamme d'échelles spatiales et temporelles, intéresse une vaste communauté scientifique et d'utilisateurs, des spécialistes du climat aux experts de la mesure, des agences de bassins aux services hydrométéorologiques, des responsables de la sécurité civiles aux agriculteurs, entre autres. La pluie est considérée comme la variable climatique essentielle (ECV) ayant le plus d'impact sur le bien-être des hommes et des sociétés.

Malgré un intérêt universel pour cette variable, son estimation précise, en tout point du globe demeure difficile. Les réseaux pluviométriques sont insuffisamment denses sur une partie des continents et tout particulièrement dans les Tropiques où les enjeux sur l'eau sont majeurs : risques d'extrêmes, sécheresses et inondations ; modèles de prévisions incertains ; conflits latents autour de la ressource en eau. Des moyens de télédétection, au sol et satellitaires, sont venus renforcer le système global d'observation des précipitations. Mais ces techniques indirectes ne sont pas exemptes d'incertitudes et doivent être qualifiées.

J'ai participé à ce questionnaire général sur la pluie et sa mesure, en me concentrant sur la zone tropicale et tout particulièrement l'Afrique subsaharienne. J'ai contribué à renforcer les connaissances sur les systèmes pluvio-nuageux de ces régions, des échelles microphysiques accessibles par disdromètre ou radar, aux échelles convectives puis régionales que couvrent les satellites. J'ai analysé la capacité de ces instruments, puis de nouvelles sources d'information issues des réseaux cellulaires pour qualifier la pluie et son rôle dans les inondations que subit la région.

Un défi pour de futures recherches est de tirer parti d'un système d'observation global en pleine évolution, pour mieux qualifier les évolutions de nos hydro-systèmes et des risques hydro-climatiques.

Table des Matières

Remerciements	2
Résumé	3
Table des Matières	5
Chapitre I – Parcours scientifique et professionnel	7
I.1 Curriculum Vitae.....	7
I.2 Prix et distinctions.....	9
I.3 Coordination, animation, responsabilités collectives et partenariats internationaux	9
<i>Partenariats industriels et transfert</i>	11
<i>Animation scientifique</i>	12
I.4 Encadrement, enseignement, diffusion de connaissances et d’expertise.	13
I.5 Production Scientifique - Publications.....	17
Chapitre II –Contexte et positionnement de mes travaux	24
Contexte Scientifique général.....	24
Mon positionnement.....	27
Chapitre III –Synthèse de mes travaux.....	30
III.1 Ausculter les systèmes convectifs tropicaux par radar météorologique : processus microphysiques, dynamique et structure des précipitations.	30
<i>Qualifier et améliorer l’estimation de la pluie par radar – Etudes par simulations numériques : ...</i>	37
<i>Qualifier et améliorer l’estimation de la pluie par radar – Nos campagnes de mesures africaines :</i>	42
<i>Analyser la typologie des précipitations et les processus physiques :</i>	44
<i>Au cœur des processus convectifs et stratiformes de génération des pluies - Données disdrométriques :</i>	46
<i>Au cœur des processus convectifs et stratiformes de génération des pluies - Microphysique par radar et préparation des mesures satellitaires :</i>	48
<i>En résumé de cette partie radar :</i>	53
III.2 Observation satellitaire des précipitations et applications hydrologiques : le cadre Megha-Tropiques.....	54
<i>Validation des produits pluviométriques de niveaux 2 à 4 – Cadre Megha-tropiques Ground</i>	
<i>Validation MTGV :</i>	56
<i>Validation et applications hydrologiques :</i>	62
<i>Recrudescence des inondations en zone tropicale : le cas de la crue rouge à Niamey analysée grâce à la modélisation et aux observations satellitaires et in situ.</i>	64
<i>En conclusion,</i>	67
III.3– Une hydrométéorologie innovante et adaptée aux PED : Rain Cell Africa et les mesures d’opportunités.....	70
<i>Rain Cell Africa : Estimation des précipitations par réseau de téléphonie mobile.</i>	70
<i>En conclusion :</i>	75
Chapitre IV : Projet scientifique et conclusion	76
Nouvelles opportunités pour l’étude du cycle de l’eau et des risques hydrométéorologiques :.....	78
Améliorer l’estimation des précipitations – vers une approche régionale et multi-source	81
Vers de nouveaux sites d’étude en Amérique du sud :.....	83
Références bibliographiques citées	87
Annexe : Six publications significatives.....	93

Chapitre I – Parcours scientifique et professionnel

I.1 Curriculum Vitae

Nom : GOSSET

Prénom : Marielle

Née le 17-12-1966

CRCN, IRD

Spécialités :

Hydrométéorologie , télédétection, précipitations , bassins tropicaux, risques hydrométéorologiques.

Formation et diplômes :

1992 : Thèse doctorat télédétection atmosphérique ; UPS Toulouse. ' Une méthode radar bi-longueur d'onde pour la discrimination eau-glace dans les nuages froids', directeur H Sauvageot, Laboratoire d'Aérodynamique Toulouse. (<https://www.theses.fr/1992TOU30140>)

1989 : DEA électronique, UPS, Toulouse.

1989 : Diplôme ingénieur ENSEEIHT, INP Toulouse

Parcours professionnel :

Après un post-doc à l'Université de Reading (UK) j'ai été recrutée à l'IRD comme hydrologue, physicienne des précipitations plus particulièrement chargée de développer au sein de l'institut une spécialité en radar météorologie pour l'estimation des précipitations tropicales. Je m'intéresse également à l'hydrométéorologie satellitaire et son application dans les Tropiques de l'échelle des grands bassins aux risques en zones urbaines – notamment dans le cadre des missions satellitaires Megha-Tropiques, SWOT et GPM. Enfin, ces dernières années j'ai développé une activité de recherche et développement sur l'utilisation des mesures d'opportunités, comme les données issues des réseaux mobiles, pour le suivi des risques hydrométéorologiques.

1998-2000 : Titularisation à l'IRD. Affectation au Marshall Radar Observatory (MRO), Uni McGill Montreal, Canada

- Projet de développement et mise en œuvre d'un radar météorologique de recherche bien adapté au questionnement scientifique de notre équipe IRD. Développement d'un premier prototype en collaboration avec l'équipe canadienne du MRO.
- Etudes théoriques et par simulations numériques sur l'effet de la variabilité très fine échelle de la pluie sur la propagation de l'onde radar et les sources d'erreurs dans l'estimation radar de la pluie (Gosset et Zawadzki, 2001)

2001-2004 : Affectation au LTHE, Grenoble, France.

- o Supervision du projet de développement d'un radar bande-X polarimétrique transportable par notre équipe IRD/LTHE : radar Xport.
- o Développement d'un simulateur radar pour l'analyse des nouvelles méthodologies polarimétriques et leur application à l'estimation des précipitations (Gosset, 2004).

- o Enseignement - Master Terre Univers Environnement- OSUG.

2005-2007 : Affectation à Cotonou, Bénin pour la phase intensive (EOP) du programme AMMA.

- o Supervision scientifique des expérimentations radar-météorologiques, pluviométriques et disdrométriques dans le bassin de l'Ouémé (Bénin). Organisation de cellule Bénin du AMMA Operational Center (AOC) .
- o Démonstration du concept de radar bande X polarimétrique pour l'observations des pluies Tropicales.
- o Thèse de EP Zahiri (Cote d'Ivoire) encadrée en collaboration avec JP Lafore, CNRM/Météo France (Caumont et al, 2005 ; Zahiri et al, 2008)
- o Enseignement -DEA Eau Environnement - Universté Abomey Calavi.

2008-2009 : Rattachement LTHE Grenoble ; Accueil au CNRM MétéoFrance Toulouse, équipe MOANA.

- o Retour de l'expérience AMMA : Dépouillement/Qualification/valorisation des données EOP (Radars, disdromètres) et AMMA-CATCH (réseaux pluviographiques) au Bénin.
- o Caractérisation des systèmes précipitants en Afrique de l'Ouest
 - o Analyse des propriétés microphysique via les données sur la disdrométrie au sol (Moumouni et al, 2008). Estimation quantitative des précipitations associées aux MCS en régime soudanien (Gosset et al. 2008). Etudes cinématiques et climatologiques (Depraetere et al., 2009 ; Vischel et al. , 2011).
- o Thèse de S Moumouni (INP Grenoble/ UAC Cotonou).

2010-2020 : Depuis le 1^{er} Janvier 2010, Toulouse - Geoscience Environnement Toulouse (GET, UMR 5563).

- MEGHA-TROPIQUES et MTGV : HYDRO-METEOROLOGIE SPATIALE ET RADAR
 - o Coordination du plan de Calibration/Validation international de la mission satellitale franco-indienne Megha Tropiques (CNES/ISRO), dédiée aux bilans d'eau et d'énergie dans l'atmosphère tropicale.
 - o Organisation de campagnes de validation instrumentées en Afrique (Niger ; Burkina Faso) et évaluations des produits satellitaires pour différentes applications en hydrologie, agronomie, santé ou glissements de terrain (Gosset et al, 2013 ; Ramarohetra et al, 2013 ; Kirstetter et al, 2013 ; Guilloteau et al, 2014, 2016, 2018; Cassé et al., 2015, 2016 ; Gosset et al., 2018 ; Marc et al., 2018)
 - o Analyse et exploitation des données radar météorologiques et pluviométrique des campagnes AMMA et MT-Niamey 2010, Ouagadougou 2012-2014 pour caractériser la structure spatio-temporelle et la microphysique de la pluie en zone sahélienne (Russel et al, 2010 ; Gosset et al., 2010 ; Koffi et al, 2014 ; Cazenave et al., 2016 ; Alcoba et al., 2016).
 - o Encadrement des thèses de C Guilloteau (2016); M Kacou (2014), M Alcoba (2019).
 - o Organisation du 1^{er} Workshop International sur la Validation et applications Hydrologiques des produits pluie satellite.
- RISQUES HYDRO-CLIMATIQUES, INONDATIONS ET SUIVI DES FLEUVES TROPICAUX :
 - o Direction des travaux de thèse CNES/région de Claire Cassé sur l'étude des inondations du fleuve Niger et de leur recrudescence (Cassé et al, 2015, 2016 ; Gosset et al., 2018 ; Fleichman et al., 2018).
 - o Coordination de projets internationaux (France ; Amerique du Sud ; Afrique) pour l'étude intégrée de l'hydro-météorologie des bassins tropicaux à partir des données pluviométriques et altimétriques satellitaires et de la modélisation. Application au fleuve Niger et transfert à l'autorité du bassin du Niger (financement CNES/AFD)
 - o Intégration des projets scientifiques des missions satellitaires altimétriques SWOT et SMASH.
 - o Organisation workshop Fleuve Niger, OMP, Toulouse, 2017. Co-organisations des workshop Water from Space South America (Santiago de Chile 2018, Manaus, 2019).
 - o Nomination depuis 2019 au Comité de programmation Scientifique (CPS) du CNES.
- RAIN CELL - INNOVATION ET TIC EN CONTEXTE DE RISQUE HYDRO-CLIMATIQUE :

- o Coordination Scientifique du projet Rain Cell Africa sur le suivi et la cartographie des pluies à partir des réseaux de téléphonie mobile (Gosset et al., 2016). Depuis 2016 partenariat avec Orange et ouverture de plusieurs chantiers en Afrique, soutenus par différents fonds de la Banque Mondiale et des Nations Unies (Data4Development). Depuis 2018 application temps réel cadre SMART/DVD Cameroun. Accord de démonstration de ces méthodes avec l'OMM.
- o Organisation du 1er workshop international sur l'utilisation des réseaux cellulaires pour la mesure de pluie en Afrique.
- o Encadrement des thèses de A Doumounia (Doumounia et al, 2014), et M Turko (Turko et al., 2020).

Situation actuelle : chercheur GET en affectation au Brésil

I.2 Prix et distinctions

J'ai été honorée par plusieurs signes de reconnaissance de ces travaux :

Trophée ADEME : En 2015 notre équipe ayant initié le projet Rain Cell de Ouagadougou (F Cazenave IRD ; M Gosset IRD ; F Zougmore Un Ouagadougou) a été lauréate du Trophée ADEME de la Recherche Publique Énergie Environnement Climat.

Ordre du mérite : J'ai été élevée au grade de chevalier à l'ordre national du Mérite, en 2020. (<https://intranet.ird.fr/l-ird-et-moi/actualites/toutes-les-actualites/marielle-gosset-et-yunne-jai-shin-deux-chercheuses-ird-promues-a-l-ordre-national-du-merite>)

En 2016 j'ai reçu un '**Scientific Award**' de la NASA au titre de mon implication dans le projet Global Precipitation Measurement Mission (GPM, via la mission française Megha-Tropiques).

En 2019 le président du CNES (JY Legal) m'a nommée **membre du Comité de Programmation Scientifique du CNES (CPS)**, un groupe de 12 experts scientifiques français qui assistent la présidence de cet institut dans ses grandes orientations et arbitrages. Un signe de reconnaissance de mes travaux sur l'observation de la terre au service des sciences de l'environnement du développement durable.

I.3 Coordination, animation, responsabilités collectives et partenariats internationaux

Coordination et gestion de projets :

Mes résultats de recherche sont le fruit de différents projets que j'ai menés ou co-animés depuis mon entrée à l'IRD.

Au sein du programme d'Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africain (**AMMA**) et du SO AMMA-CATCH en Afrique de l'Ouest, je me suis consacrée à l'étude de la variabilité pluviométrique et de ses impacts sur une gamme d'échelles et de capteurs, et animais un GT sur les précipitations.

Le projet scientifique international associé à la mission spatiale franco-indienne **Megha-Tropiques** (MT, lancée fin 2011), membre du programme international 'Global Precipitation

Measurement' (GPM) m'a permis depuis 2009 de développer une approche globale, inter-tropicale, de la variabilité pluviométrique et de ses impacts. Au sein de la mission MT j'ai été successivement responsable du programme international de validation sol de Megha-Tropiques (MTGV) puis plus récemment de l'axe HydroMétéorologie.

C'est en lien avec ces activités MT que s'est développé le projet [Rain Cell Africa](#), un projet en pleine expansion centré sur l'utilisation des réseaux de téléphonie mobile pour estimer la pluie et potentiellement développer des systèmes d'alertes inondations dans les PED. Ce projet maintenant présent dans plusieurs pays d'Afrique et qui intéresse également l'Amérique du Sud, a été initié grâce au super-site de validation MTGV opérant à Ouagadougou de 2012 à 2014. Depuis 2016 un partenariat avec Orange et des projets financés par la Banque Mondiale, le fond des Nations Unis 'Data For Development' et l'OMM ont donné un nouvel élan à ces activités au Niger et au Cameroun.

C'est dans la dynamique de mes travaux sur les applications hydrologiques de MT que sont nées plusieurs initiatives autour de l'hydro-météorologie spatiale intégrée. J'ai initié et coordonné un axe scientifique transverse de l'Observatoire Midi-Pyrénées sur l'[Hydrologie Tropicale et les Observations Spatiales](#), dans le but d'agréger les expertises sur la pluie, les eaux de surfaces et sous-terraines et la modélisation hydrologique, autour d'une approche intégrée de l'hydro-météorologie spatiale tropicale. J'ai intégré la *science team* de la nouvelle mission altimétrique CNES-NASA [SWOT](#), pour y développer un projet sur l'apport combiné des mesures de pluie et d'altimétrie (GPM-SWOT) spatiales. Ce projet, qui implique différents partenaires du Sud (Afrique et Amérique du Sud) fait déjà l'objet de plusieurs financements CNES/TOSCA pour des applications en Afrique (fleuve Niger puis Congo) et au Brésil (Amazonie ; Parana ; NordEst).

J'ai intégré la science Team de la nouvelle mission [SMASH](#).

Plus récemment j'ai lancé avec le soutien du CNES et la collaboration de l'Autorité du Bassin du Niger (ABN) l'initiative [TRHYMMS](#) (Hydro-meteorologie Tropicale et Observations Spatiales ; projet TOSCA-CNES et soutien AFD) visant à faire du Niger un site pilote en hydrologie spatiale opérationnelle.

Les projets coordonnés sont listés ci-dessous :

[Période Xport et AMMA 2000-2007 :](#)

Projet Xport 2000-2005 (Financement IRD ; 200 k€)

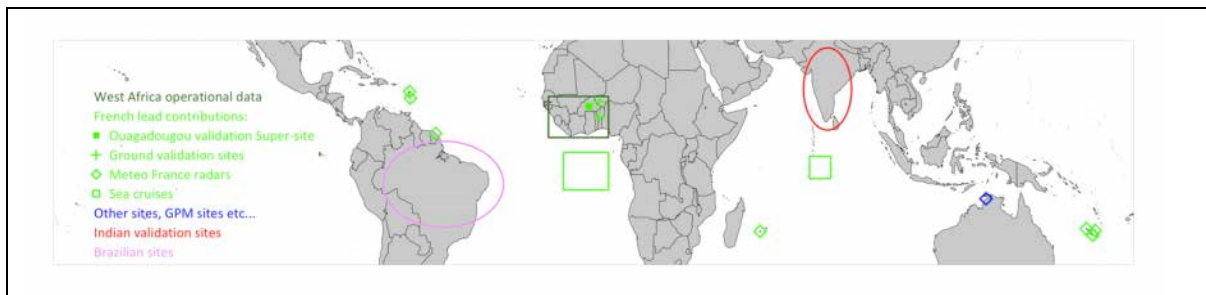
Campagne Xport AMMA Bénin (INSU-IRD AMMA France 50 k€)

J'ai assuré la direction scientifique du projet Xport, le radar portable de l'IRD réalisé par F Cazenave au LTHE/IGE puis animé scientifiquement la campagne expérimentale avec cet instrument, au Bénin, pour le projet AMMA

[Période Megha-tropiques et Hydrologie spatiale 2009-2021 :](#)

MTGV – Plan de validation international 2010-2014 (Financement CNES ; 1300 k€)

En 2009 le CNES m'a confié la conception et coordination du plan de validation international de Megha-Tropiques. Il s'appuyait sur des campagnes (radar et avion) spécifiques, des réseaux opérationnels, des SNO (Afrique ; Inde) et de nombreuses collaborations internationales résumées par la figure ci-dessous.



GDR Megha-Tropiques 2015-2021 (Fin. CNES/INSU 80 k€)

Depuis 2015, j'assure l'animation scientifique du volet Hydrométéorologie de ce projet qui agrège une soixantaine de chercheurs français.

GPM/SWOT 2015-2016 – (Financement CNES 60 k€)

TRHYMS 2017-2020- (Financement CNES (230 k€)

Je coordonne plusieurs projets scientifiques financé par le programme CNES/TOSCA autour de l'hydrologie spatiale en Afrique.

Niger Bassin Pilote en Hydrologie spatiale 2018-2019 (AFD 80 k€)

Coordination de ce projet de transfert d'expertise vers l'opérationnel, auprès de l'Agence de Bassin du Niger.

CECC/demonstrateur Niamey 2021-2023 (AFD - 200 k€ - projet entier 3 M€)

Responsable d'un sous projet de démonstrateur à Niamey – Apport des mesures spatiales et innovantes pour la prévisions d'inondations (encadrement thèse + post-doc)

Préiode RAINCELL 2014-2021 :

RainCell Africa -Pilotes Burkina et Niger 2014-2016 Banque Mondiale 250 k€)

Coordinatrice de ce projet collaboratif IRD-Orange-UHFB abidjan

Développement d'une démonstration de la méthodologie RainCell au BF et au Niger.

SMART -RAINCELL Cameroun 2017-2019 (UNF programme Data4SDG 150 k€)

Coordinatrice projet -Collaboration IRD-Orange-UHFB abidjan – projet DVD Cameroun

Développement d'une démonstration temps réel de la méthodologie raincell au Cameroun.

CREWS Tchad-Togo – démonstrateur Hydrométéorologie RAINcell/Altimétrie. 2021-2023 (Financement OMM 110 k€)

Coordinatrice projet -Développement d'une démonstration pilote des outils raincell et altimétrique auprès des services hydrométéorologique tchadiens pour l'OMM.

Partenariats industriels et transfert

Au cours de ces projets j'ai tissé des relations avec le secteur privé, notamment des *start up* innovantes qui peuvent offrir un débouché intéressant aux jeunes chercheurs que nous formons.

Un accord de longue durée a été mis en place avec l'opérateur Orange ; il a permis de disposer des données nécessaires au projet Rain Cell et à sa démonstration pilote en Afrique, et de

réfléchir aux conditions d'opérationnalisation de cette technique. L'appui d'Orange a été déterminant pour l'obtention du projet UNF Data4SDG 'SMART' au Cameroun.

Une collaboration est en place avec la *start up* toulousaine 'Weather Force' spécialisée dans l'appui au développement des services HydroMétéorologiques des pays en développement. Une thèse CIFRE est en cours autour de la valorisation de la technique Rain Cell pour l'élaboration de produits pluviométriques régionaux.

Deux anciens collaborateurs (CDD encadrés pour le projet TRHYMS) ont rejoint la *start up* Ocean Next et nous sommes associés sur plusieurs projets de transfert de l'hydrologie spatiale en Afrique.

Je suis régulièrement sollicitée pour des expertises :

- MétéoFrance m'a confié un travail d'évaluation de faisabilité (POC) des techniques de mesure de pluie via le réseau cellulaire, pour améliorer la lame d'eau opérationnelle de MF en zone montagneuse.
- L'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) m'a contractée pour coordonner un guide technique sur l'utilisation des liens micro-ondes commerciaux par les services météorologiques africains.
- L'AFD m'a financée pour la formation aux techniques spatiales de plusieurs experts de l'Autorité du Bassin Niger (ABN).

Animation scientifique

Au niveau régional et national

- J'ai coordonné un axe transverse à l'Observatoire Midi-Pyrénées nommé 'Hydrologie TROPicale et Observations Spatiale'.
- J'ai animé au sein du pôle Aerospace Valley de Toulouse un chantier d'animation scientifique appelé MOMMHYS (Mesures d'Opportunités pour la Modélisation Météo-Hydro-Surfaces continentales).
- Animation de l'axe HydroMétéorologie au sein du GDR Megha-Tropiques.

A l'international :

- Je suis membre d'un Groupe de Travail (CNES/IRD/AFD) oeuvrant à la promotion de l'Hydrologie Spatiale en Afrique.
- Membre active de l'International Precipitation Working Group (IPWG).
- Membre des GDRI IRD Sense-Sud et SciHylab.

Membre de comités :

- J'ai été brièvement membre du comité éditorial du magazine La Météorologie qui vise à diffuser des actualités sur la recherche en Météorologie et Climat dans toute la francophonie.
- De 2015 à 2020 j'ai été membre du jury du prix Prudhomme / Météo et Climat.

- En 2019 le président du CNES m'a nommé membre de son Comité de Programmation Scientifique, un groupe de 12 scientifiques chargés d'assister la prise de décision sur la stratégie scientifique.

Organisation de conférences :

- Le premier atelier international '1st international Megha-Tropiques Ground Validation Methodologies and Hydrological Applications in the Tropics' que j'ai organisé du 25 au 27 septembre 2013 à Toulouse (<http://mtgv-ws1.sciencesconf.org/>) a accueilli une 60aine de chercheurs de 15 pays d'Afrique, Amérique du Sud, du Nord, Inde et Europe.
- J'ai organisé avec le LTHE et le LAME de Ouagadougou le 1er workshop international et école thématique Rain Cell Africa, sur l'utilisation des réseaux de téléphonie mobile pour mesurer la pluie. 87 participants de 18 pays (Benin, Burkina Faso, Cameroun, Côte d'Ivoire, France, Allemagne, Ghana, Israël, Kenya, Mali, Pays-bas, Niger, Nigeria, Sénégal, Suisse, Tanzanie, Togo, U.S.A) et organisations inter-gouvernementales (CILSS ; PNUD ; UNESCO) étaient représentés (Summary in Gosset et al, 2016 BAMS). Rain Cell Africa first International Workshop 30 March - 2d April 2015 Ouagadougou, Burkina Faso
- En 2017 j'ai organisé les *Rencontres autour de l'hydrologie du Fleuve Niger - Enjeux scientifiques , enjeux opérationnels, apport des mesures spatiales et préparation à la future mission altimétrique haute-résolution SWOT* – Elles ont permis d'accueillir une 40aine de scientifiques de laboratoires français, du CNES, et une délégation de l'Autorité du Niger. 14-15 Septembre 2017, OMP, Toulouse
- Enfin je co-organise la série de workshop 'Water from Space in South America' à Santiago de Chile en 2018 et à Manaus en 2019 (<https://hydrologyfromspace.org/index.php>) qui agrège annuellement une soixantaine de chercheurs internationaux et majoritairement sud-américain autour de l'apport du spatial pour le suivi du cycle de l'eau.

I.4 Encadrement, enseignement, diffusion de connaissances et d'expertise.

Encadrement

Doctorats :

Les travaux développés au cours des quinze dernières années en Afrique suite à mon affectation dans le cadre AMMA-CATCH, le programme Megha-Tropiques et plus récemment l'initiative Rain Cell Africa ont donné lieu à 11 thèses soutenues (Chapon, 2006; Zahiri, 2007 ; Moumouni, 2009 ; Lawin, 2007 ; Koffi, 2013 ; Kacou 2014 ; Cassé, 2015 ; Guilloteau, 2016 ; Doumounia, 2016 ; Alcoba, 2019 ; Turko, 2020), dont 8 comme encadrant principale.

Mon taux d'encadrement (TEMG) est indiqué en gras dans l'inventaire :

1. Eric-Pascal Zahiri, 2007. Cycle de l'eau des systèmes convectifs Ouest-africains : preparation à l'exploitation des mesures radar Xport dans AMMA par simulation (Université Toulouse). **TEMG : 80%**
2. Moumouni Sounmaila, 2009 Analyse des distributions granulométriques des pluies au Bénin : caractéristiques globales, variabilité et application à la mesure radar (<https://www.theses.fr/2009INPG0032>) (Université Grenoble Alpes). **TEMG : 100%**
3. Modeste Huberson Ahiba Kacou, 2014. Analyse des précipitations en zone sahélienne à partir d'un radar bande X polarimétrique. (<http://www.theses.fr/2014TOU30223>) (Université Toulouse). **TEMG : 100%**
4. Claire Cassé, 2015. Impact du forçage pluviométrique sur les inondations du fleuve Niger à Niamey : Etude à partir de données satellitaires et in-situ (<https://www.theses.fr/195706811>) (Université Toulouse). **TEMG : 100%**
5. Ali Doumounia, 2016. Estimation des précipitations à partir des liens micro-ondes commerciaux de télécommunication cellulaire en Afrique. (Université de Ouagadougou, BF). **TEMG : 75%**
6. Clement Guilloteau, 2016. Approche physico-statistique de la désagrégation des précipitations satellite dans les Tropiques (<http://www.theses.fr/2016TOU30216>) (Université Toulouse). **TEMG 50%**
7. Matías Alcoba Kait, 2019. Contribution à l'observation des précipitations en Afrique avec un radar polarimétrique et des liens microondes commerciaux par (<http://www.theses.fr/2019TOU30238>) - (Université Toulouse). **TEMG 100%**
8. Maxime Turko, 2020. Apport potentiel des mesures de pluie par liens micro-ondes commerciaux pour l'hydrologie urbaine en Afrique par (Université Toulouse). **TEMG 80%**

J'ai également contribué (moins de 50%) à l'encadrement des thèse de A Kadjo (2014 ; <https://invenio1.uvci.edu.ci/record/13880/>) , E Lawin (2007 ; <http://www.theses.fr/2007INPG0169>) et B Chapon (<https://www.theses.fr/2006GRE10236>) . (Synthese France : <https://www.theses.fr/114301387>)

Encadrement de collaborateurs en contrats post-doctoraux ou ingénieurs en CDD :

Adrien Paris ; Cecile Dardel ; Laetitia Gal ; Claire Cassé ; Matias Alcoba ; Romulo Juca de Oliveira ; Julien Viarre, en CDD sur projets CNES/TOSCA ou autres conventions.
Odin Marc, en post-doc CNES (aujourd'hui recruté CNRS/GET).

J'ai encadré de *nombreux stages* (un par an en moyenne sur les dix dernières années) de niveau projet de fin d'étude ingénieur ou master, que je ne liste pas pour ne pas alourdir inutilement le document.

Enseignement et séminaires de vulgarisation

Au cours de ma carrière j'ai donné régulièrement des modules de cours ou des séminaires dans des universités, en France et à l'étranger.

- OSUG, Grenoble – 2002-2005 Intervention en Master Terre Univers Environnement-Module sur les radar météorologiques (6h/an)
- ENSEEIHT, Toulouse – 2010-2019 - séminaire/cours sur l'application des micro-ondes actives/passives à la mesure des précipitations (3h/an)
- Université Abomey Calavi - 2005-2007. Enseignement -DEA Eau Environnement (6h/an); organisation de stages de terrain pour découverte des expérimentations AMMA par les étudiants.

Séminaires invités :

Je contribue à la diffusion des savoirs par des séminaires invités auprès d'instituts ou agences internationales.

- Séminaire invité Collège de France, Colloque sur Le Cycle de l'eau et le Climat organisé par Edouard Bard. 'Télédétection de la pluie dans l'atmosphère tropicale : apport des mesures d'opportunité', 21 juin 2019, CdF Paris.(<https://www.college-de-france.fr/site/edouard-bard/symposium-2019-06-21-10h30.htm>)
- World Bank, Global Facility for Disaster Reduction and Resilience : Real-Time Urban Flood Risk Data Via Cellphone Network Analysis, April 4th 2017.
- Marielle Gosset : Opportunity Measurements for Hydro-Meteorology. UFGS/IPH, Porto Alegre, Brasil, Nov 20th 2017
- Marielle Gosset, Mesures opportunes et utilisation de la transmission des signaux mobiles pour la détection des précipitations. Assemblée plénière du Conseil Supérieur de la Météorologie vendredi 19 mai 2017, Paris
- Marielle Gosset, L'utilisation de la transmission des signaux mobiles pour la détection des précipitationsMeteo-France, 3 juillet 2017, journée thématique du CCROM (Comité Consultatif des Réseaux d'Observations Météorologiques) Météo-France sur l'évolution des réseaux.
- Présentation invitée 'Flood predictions and remote sensing' au colloque ISSI Global Change in Africa: Role of Space Observation (<https://www.issibern.ch/workshops/globalchangeafrica/index.php/programme/>; ISSI, Switzerland . 11-15 January 2021)
- Marielle Gosset, 2015 : Some perspectives on rainfall measurement in Rain Gauge poor areas : Latest News (GPM / Megha-Tropiques) and current limitations of satellite products - Potential of Rain measurements from Cell Phone networkSéminaire invité Université de l'état de Manuas, 5 Mai 2015.
- Marielle Gosset, 2015 : Rainfall measurement from cellular phone networks microwave links : First tests in Africa and potential in Brazil. Séminaire invité Instituto de Pesquisas Hidraulicas, UFRGS, Porto Alegre, Bresil , 17 avril 2015
- Marielle Gosset, 2015 : Innovation in Rainfall measurements from satellite to Mobile Phone network - Hydrological Applications in the Tropics ; Université Nationale de Brasilia (UNB) – LMI OCE.
- Training course 'Kriging Interpolation of Rain Gauges Network in Context of Satellite Evaluation' JRC Ispra Italie - on 7-8-9 October 2014.
- juil 2011 Conf Invitée - université de Ouagadougou : «« estimation des précipitations par satellite et mission spatiale MeghaTropiques» - 4h. »
- janvier 2011, CIPMA Cotonou, Bénin ; Intervention transversale Master International Océanographie et Master Hydrologie/GIRE : « estimation des précipitations par satellite » - 3h.
- Juil 2010 – Manaus, Brésil. Ecole d'été – CNES-IRD-HYBAM – Observation Spatiale de l'Environnement (OSE). Cours « estimation des précipitations par satellite » - 4h.

- cours sur l' 'utilisation du satellite pour l'estimation des précipitations. 21-22 octobre 2014. SENAMHI, Pérou.
- M Gosset. Usando las redes de comunicación celular para el monitoreo de lluvias / use of cell phone networks for rainfall monitoring. 20 oct 2014 ; PreCOP 20 side event IRD-SENAMHI.

Webinaires :

- Cours de Vulgarisation "Rainfall estimation from various techniques: from weather radar to satellite and even telecommunication networks!", en 2021 Chaine Youtube du Dpt Fisica UFC, Fortaleza. (<https://youtu.be/-Abs06Lji4Y>)
- **Video du Séminaire invité Collège de France**, 'Télédétection de la pluie dans l'atmosphère tropicale : apport des mesures d'opportunité', en 2019 (<https://www.college-de-france.fr/site/edouard-bard/symposium-2019-06-21-10h30.htm>)

Media :

J'ai participé à l'élaboration de différents supports de communication, et interagi avec les médias (RFI ; La Recherche ; BBC etc.) à l'occasion du lancement de Megha-Tropiques et autour du projet Rain Cell

Quelques exemples sont listés ci-dessous :

- Film IRD : RainCell Signal d'Alerte (https://www.youtube.com/watch?v=_3GrZlY3m1g)
- Presse
<http://www.courrierinternational.com/article/meteorologie-les-antennes-relais-se-transforment-en-pluviometres>
<http://www.hubrural.org/Suivi-des-pluies-la-telephonie.html?lang=fr>
- BBC Afrique, « l'invité », 13 octobre 2010 (http://www.bbc.co.uk/afrique/region/2011/10/111013_marielle_gosset.shtml)
- Fiche d'actualité scientifique IRD n° 461 : "[Suivi des pluies : la téléphonie mobile prend le relais](#)" - juillet 2014

Ouvrages de vulgarisation

Participation à :

- Science et développement durable : 75 ans de recherche au Sud ; Marseille : IRD, 2019, 224 p. ISBN 978-2-7099-2737-6
- Livre et l'exposition IRD "L'eau, au coeur de la science" pour le Forum Mondial de l'Eau 2020 ; éditions IRD (Th. Mourier).



Exemples de coupures de presse autour du projet RainCell Africa et image du film éponyme.

1.5 Production Scientifique - Publications

<https://publons.com/researcher/4193506/marielle-gosset/> (H-Index 22)

<https://orcid.org/0000-0003-1064-7003> (H-Index 23)

	Marielle Gosset			Web of Science ResearcherID  AAC-4790-2021
	PUBLICATIONS	TOTAL TIMES CITED	H-INDEX	
	54	1 392	22 	

Publications [?]

 (7) Quarterly Journal of the Royal Meteorological So... 	 (5) Journal of Applied Meteorology and Climatology 
 (5) Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 	 (5) Journal of Hydrology 
 (4) Atmospheric Research 	 (4) Journal of Hydrometeorology 
 (3) Atmospheric Science Letters 	 (3) Geophysical Research Letters 
 (2) Bulletin of the American Meteorological Society 	 (1) Agricultural and Forest Meteorology 
 (1) Conference on Radar Meteorology	 (1) Conference on Radar Meteorology, Vols 1 and 2
 (1) Earth Surface Dynamics 	 (1) Earth and Space Science Open Archive
 (1) Frontiers in Earth Science 	 (1) Hydrologic Non-stationarity and Extrapolating Models t...
 (1) Hydrology and Earth System Sciences 	 (1) IAHS-AISH Publication
 (1) IEE Colloquium (Digest)	 (1) IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth ... 
 (1) International Conference on Radar Meteorology	 (1) Remote Sensing 
 (1) Sustainable Water Management Solutions for Large Cit...	 (1) Vadose Zone Journal 
 (1) Water 	

Publications dans journaux de rang A (52) :

- Gosset, M., and H. Sauvageot. 1992. "A Dual-Wavelength Radar Method for Ice-Water Characterization in Mixed-Phase Clouds." *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology* 9 (5). [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1992\)](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1992))
- Brown, P.R.A., A.J. Illingworth, A.J. Heymsfield, G.M. McFarquhar, K.A. Browning, and M. Gosset. 1995. "The Role of Spaceborne Millimeter-Wave Radar in the Global Monitoring of Ice Cloud." *Journal of Applied Meteorology* 34 (11). [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1995\)](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1995))
- Gosset, M., and I. Zawadzki. 2001. "Effect of Nonuniform Beam Filling on the Propagation of the Radar Signal at X-Band Frequencies. Part I: Changes in the k(Z) Relationship." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 18 (7). [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001))
- Gosset, M, F Cazenave, and Ams. 2003. "Test of Polarization Based Retrieval Algorithms at X-Band." 31st Conference on Radar Meteorology, Vols 1 and 2. 2003. <https://publons.com/publon/36464735/>.
- Gosset, M. 2004. "Effects of Nonuniform Beam Filling on the Propagation of Radar Signals at X-Band Frequencies. Part II: Examination of Differential Phase Shift." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 21 (2). [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2004\)](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2004))
- Caumont, O., V. Ducrocq, G. Delrieu, M. Gosset, J.-P. Pinty, J.P. du Châtelet, H. Andrieu, Y. Lemaître, and G. Scialom. 2006. "A Radar Simulator for High-Resolution Nonhydrostatic Models." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 23 (8). <https://doi.org/10.1175/JTECH1905.1>
- Zahiri, E.-P., M. Gosset, J.-P. Lafore, and V. Gouget. 2008. "Use of a Radar Simulator on the Output Fields from a Numerical Mesoscale Model to Analyze X-Band Rain Estimators." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 25 (3). <https://doi.org/10.1175/2007JTECHA933.1>

8. Chapon, B., G. Delrieu, M. Gosset, and B. Boudevillain. 2008. "Variability of Rain Drop Size Distribution and Its Effect on the Z-R Relationship: A Case Study for Intense Mediterranean Rainfall." *Atmospheric Research* 87 (1). <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2007.07.003>.
9. Moumouni, S., M. Gosset, and E. Houngrinou. 2008. "Main Features of Rain Drop Size Distributions Observed in Benin, West Africa, with Optical Disdrometers." *Geophysical Research Letters* 35 (23). <https://doi.org/10.1029/2008GL035755>.
10. Seghier, J., A. Vescovo, K. Padel, R. Soubie, M. Arjounin, N. Boulain, P. de Rosnay, et al. 2009. "Relationships between Climate, Soil Moisture and Phenology of the Woody Cover in Two Sites Located along the West African Latitudinal Gradient." *Journal of Hydrology* 375 (1–2). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.01.023>.
11. Depraetere, C., M. Gosset, S. Ploix, and H. Laurent. 2009. "The Organization and Kinematics of Tropical Rainfall Systems Ground Tracked at Mesoscale with Gages: First Results from the Campaigns 1999-2006 on the Upper Ouémé Valley (Benin)." *Journal of Hydrology* 375 (1–2). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.01.011>.
12. Lebel, T., B. Cappelaere, S. Galle, N. Hanan, L. Kergoat, S. Levis, B. Vieux, et al. 2009. "AMMA-CATCH Studies in the Sahelian Region of West-Africa: An Overview." *Journal of Hydrology* 375 (1–2). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.020>.
13. Lawin, E.A., A. Afouda, M. Gosset, and T. Lebel. 2010. "Comparison of Rainfall Variability at Regional and Local Scales in the Upper Valley of Ouémé in Bénin." In *IAHS-AISH Publication*. Vol. 340.
14. Gosset, M., E.-P. Zahirib, and S. Moumounic. 2010. "Rain Drop Size Distribution Variability and Impact on X-Band Polarimetric Radar Retrieval: Results from the AMMA Campaign in Benin." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 136 (SUPPL. 1). <https://doi.org/10.1002/qj.556>.
15. Roca, R., P. Chambon, I. Jobard, P.-E. Kirstetter, M. Gosset, and J.C. Bergés. 2010. "Comparing Satellite and Surface Rainfall Products over West Africa at Meteorologically Relevant Scales during the AMMA Campaign Using Error Estimates." *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49 (4). <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2318.1>.
16. Russell, B., E.R. Williams, M. Gosset, F. Cazenave, L. Descroix, N. Guy, T. Lebel, A. Ali, F. Metayer, and G. Quantin. 2010. "Radar/Rain-Gauge Comparisons on Squall Lines in Niamey, Niger for the AMMA." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 136 (SUPPL. 1). <https://doi.org/10.1002/qj.548>.
17. Vischel, T., G. Quantin, T. Lebel, J. Viarre, M. Gosset, F. Cazenave, and G. Panthou. 2011. "Generation of High-Resolution Rain Fields in West Africa: Evaluation of Dynamic Interpolation Methods." *Journal of Hydrometeorology* 12 (6). <https://doi.org/10.1175/JHM-D-10-05015.1>.
18. Paeth, H., N.M. Hall, M.A. Gaertner, M.D. Alonso, S. Moumouni, J. Polcher, P.M. Ruti, et al. 2011. "Progress in Regional Downscaling of West African Precipitation." *Atmospheric Science Letters* 12 (1). <https://doi.org/10.1002/asl.306>.
19. Séguis, L., B. Kamagaté, G. Favreau, M. Descloitres, J.-L. Seidel, S. Galle, C. Peugeot, et al. 2011. "Origins of Streamflow in a Crystalline Basement Catchment in a Sub-Humid Sudanian Zone: The Donga Basin (Benin, West Africa). Inter-Annual Variability of Water Budget." *Journal of Hydrology* 402 (1–2). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.054>.
20. Uijlenhoet, R., J.-M. Cohard, and M. Gosset. 2011. "Path-Average Rainfall Estimation from Optical Extinction Measurements Using a Large-Aperture Scintillometer." *Journal of Hydrometeorology* 12 (5). <https://doi.org/10.1175/2011JHM1350.1>.

21. Peugeot, C., F. Guichard, O. Bock, D. Bouniol, M. Chong, A. Boone, B. Cappelaere, et al. 2011. "Mesoscale Water Cycle within the West African Monsoon." *Atmospheric Science Letters* 12 (1). <https://doi.org/10.1002/asl.309>.
22. Lafore, J.-P., C. Flamant, F. Guichard, D.J. Parker, D. Bouniol, A.H. Fink, V. Giraud, et al. 2011. "Progress in Understanding of Weather Systems in West Africa." *Atmospheric Science Letters* 12 (1). <https://doi.org/10.1002/asl.335>.
23. Ramarohetra, J, B Sultan, C Baron, T Gaiser, and M Gosset. 2013. "How Satellite Rainfall Estimate Errors May Impact Rainfed Cereal Yield Simulation in West Africa." *Agricultural and Forest Meteorology*. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.05.010>.
24. Kirstetter, P.-E., N. Viltard, and M. Gosset. 2013. "An Error Model for Instantaneous Satellite Rainfall Estimates: Evaluation of BRAIN-TMI over West Africa." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 139 (673). <https://doi.org/10.1002/qj.1964>.
25. Gosset, M, J Viarre, G Quantin, and M Alcoba. 2013. "Evaluation of Several Rainfall Products Used for Hydrological Applications over West Africa Using Two High-Resolution Gauge Networks." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1002/qj.2130>.
26. Guilloteau, C., M. Gosset, C. Vignolles, M. Alcoba, Y. M. Tourre, and J.-P. Lacaux, 2014: Impacts of Satellite-Based Rainfall Products on Predicting Spatial Patterns of Rift Valley Fever Vectors*. *J. Hydrometeorol.*, 15, 1624–1635, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0134.1>.
27. Koffi, A.K., M. Gosset, E.-P. Zahiri, A.D. Ochou, M. Kacou, F. Cazenave, and P. Assamoi. 2014. "Evaluation of X-Band Polarimetric Radar Estimation of Rainfall and Rain Drop Size Distribution Parameters in West Africa." *Atmospheric Research* 143. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.03.009>.
28. Doumounia, A, M Gosset, F Cazenave, M Kacou, and F Zougmore. 2014. "Rainfall Monitoring Based on Microwave Links from Cellular Telecommunication Networks: First Results from a West African Test Bed." *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1002/2014GL060724>.
29. Satgé, F., M.-P. Bonnet, M. Gosset, J. Molina, W. Hernan Yuque Lima, R. Pillco Zolá, F. Timouk, and J. Garnier. 2015. "Assessment of Satellite Rainfall Products over the Andean Plateau." *Atmospheric Research* 167. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.07.012>.
30. Roca, R., H. Brogniez, P. Chambon, O. Chomette, S. Cloché, M.E. Gosset, J.-F. Mahfouf, P. Raberanto, and N. Viltard. 2015. "The Megha-Tropiques Mission: A Review after Three Years in Orbit." *Frontiers in Earth Science* 3. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00017>.
31. Casse, C, and M Gosset. 2015. "Analysis of Hydrological Changes and Flood Increase in Niamey Based on the PERSIANN-CDR Satellite Rainfall Estimate and Hydrological Simulations over the 1983-2013 Period." In *IAHS-AISH Proceedings and Reports*. <https://doi.org/10.5194/piahs-370-117-2015>.
32. Drigeard, E, E Fontaine, W Wobrock, A Schwarzenböck, C Duroure, E R Williams, B Russell, et al. 2015. "A Comparison of Airborne in Situ Cloud Microphysical Measurement with Ground-Based C-Band Radar Observations in Deep Stratiform Regions of African Squall Lines." *Journal of Applied Hydrométéorologie*
33. Casse, C, M Gosset, C Peugeot, V Pedinotti, A Boone, B A Tanimoun, and B Decharme. 2015. "Potential of Satellite Rainfall Products to Predict Niger River Flood Events in Niamey." *Atmospheric Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.01.010>.
34. Casse, C., M. Gosset, T. Vischel, G. Quantin, and B.A. Tanimoun. 2016. "Model-Based Study of the Role of Rainfall and Land Use-Land Cover in the Changes in the Occurrence and Intensity of

Niger Red Floods in Niamey between 1953 and 2012.” *Hydrology and Earth System Sciences* 20 (7). <https://doi.org/10.5194/hess-20-2841-2016>.

35. Cazenave, F, M Gosset, M Kacou, M Alcoba, E Fontaine, C Duroure, and B Dolan. 2016. “Characterization of Hydrometeors in Sahelian Convective Systems with an X-Band Radar and Comparison with in Situ Measurements. Part I: Sensitivity of Polarimetric Radar Particle Identification Retrieval and Case Study Evaluation.” *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0013.1>.
36. Guilloteau, C, R Roca, and M Gosset. 2016. “A Multiscale Evaluation of the Detection Capabilities of High-Resolution Satellite Precipitation Products in West Africa.” *Journal of Hydrometeorology*. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0148.1>.
37. Alcoba, M, M Gosset, M Kacou, F Cazenave, and E Fontaine. 2016. “Characterization of Hydrometeors in Sahelian Convective Systems with an X-Band Radar and Comparison with in Situ Measurements. Part II: A Simple Brightband Method to Infer the Density of Icy Hydrometeors.” *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0014.1>.
38. Gosset, M., H. Kunstmann, F. Zougmore, F. Cazenave, H. Leijnse, R. Uijlenhoet, C. Chwala, et al. 2016. “Improving Rainfall Measurement in Gauge Poor Regions Thanks to Mobile Telecommunication Networks.” *Bulletin of the American Meteorological Society* 97 (3). <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00164.1>.
39. Hossain, F., M. Srinivasan, C. Peterson, A. Andral, E. Beighley, E. Anderson, R. Amini, et al. 2017. “Engaging the User Community for Advancing Societal Applications of the Surface Water Ocean Topography Mission.” *Bulletin of the American Meteorological Society* 98 (11). <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0161.1>.
40. Gosset, Marielle, Matias Alcoba, Remy Roca, Sophie Cloché, and Guillaume Urbani. 2018. “Evaluation of TAPEER Daily Estimates and Other GPM-Era Products against Dense Gauge Networks in West Africa, Analysing Ground Reference Uncertainty.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 144 (November): 255–69. <https://doi.org/10.1002/qj.3335>.
41. Descroix, L, F Guichard, M Grippa, L A Lambert, G Panthou, G Mahé, L Gal, et al. 2018. “Evolution of Surface Hydrology in the Sahelo-Sudanian Strip: An Updated Review.” *Water (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/w10060748>.
42. Galle, S., M. Grippa, C. Peugeot, I. Bouzou Moussa, B. Cappelaere, J. Demarty, E. Mougin, et al. 2018. “AMMA-CATCH, a Critical Zone Observatory in West Africa Monitoring a Region in Transition.” *Vadose Zone Journal* 17 (1). <https://doi.org/10.2136/vzj2018.03.0062>.
43. Amaral, L.M.C. do, S. Barbieri, D. Vila, S. Puca, G. Vulpiani, G. Panegrossi, T. Biscaro, et al. 2018. “Assessment of Ground-Reference Data and Validation of the H-SAF Precipitation Products in Brazil.” *Remote Sensing* 10 (11). <https://doi.org/10.3390/rs10111743>.
44. Guilloteau, C., R. Roca, M. Gosset, and V. Venugopal. 2018. “Stochastic Generation of Precipitation Fraction at High Resolution with a Multiscale Constraint from Satellite Observations.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 144. <https://doi.org/10.1002/qj.3314>.
45. Roca, Rémy, Nicolas Taburet, Estelle Lorant, Philippe Chambon, Matias Alcoba, Hélène Brogniez, Sophie Cloché, Christophe Dufour, Marielle Gosset, and Clément Guilloteau. 2018. “Quantifying the Contribution of the Megha-Tropiques Mission to the Estimation of Daily Accumulated Rainfall in the Tropics.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, November. <https://doi.org/10.1002/qj.3327>.
46. Roca, R, N Taburet, E Lorant, P Chambon, M Alcoba, H Brogniez, S Cloché, C Dufour, M Gosset, and C Guilloteau. 2018. “Quantifying the Contribution of the Megha-Tropiques Mission to the

Estimation of Daily Accumulated Rainfall in the Tropics.” Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. <https://doi.org/10.1002/qj.3327>.

47. Marc, O, A Stumpf, J.-P. Malet, M Gosset, T Uchida, and S.-H. Chiang. 2018. “Initial Insights from a Global Database of Rainfall-Induced Landslide Inventories: The Weak Influence of Slope and Strong Influence of Total Storm Rainfall.” *Earth Surface Dynamics*. <https://doi.org/10.5194/esurf-6-903-2018>.
48. Fleischmann, Ayan, Vinicius Siqueira, Adrien Paris, Walter Collischonn, Rodrigo Paiva, Paulo Pontes, Jean-François Crétaux, et al. 2018. “Modelling Hydrologic and Hydrodynamic Processes in Basins with Large Semi-Arid Wetlands.” *Journal of Hydrology* 561 (June): 943–59. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.041>.
49. Marc, Odin, Marielle Gosset, Hitoshi Saito, Taro Uchida, and Jean-Philippe Malet. 2019. “Spatial Patterns of Storm-Induced Landslides and Their Relation to Rainfall Anomaly Maps.” *Geophysical Research Letters* 46 (20): 11167–77. <https://doi.org/10.1029/2019GL083173>.
50. Grippa, Manuela, Cyprien Rouzies, Sylvain Biancamaria, Denis Blumstein, Jean-francois Cretaux, Laetitia Gal, Elodie Robert, Marielle Gosset, and Laurent Kergoat. 2019. “Potential of SWOT for Monitoring Water Volumes in Sahelian Ponds and Lakes.” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*.
51. Paris, Adrien, Stéphane Calmant, Marielle Gosset, Ayan Fleischmann, Taina Conchy, Jean-Pierre Bricquet, Pierre-André Garambois, et al. 2020. “Monitoring Hydrological Variables from Remote Sensing and Modelling in the Congo River Basin,” December. <https://doi.org/10.1002/ESSOAR.10505518.1>.
52. Turko, Maxime, Marielle Gosset, Christophe Bouvier, Nanee Chahinian, Matias Alcoba, Modeste Kacou, and Apoline Yappi. 2020. “Rainfall Measurement from Mobile Telecommunication Network and Potential Benefit for Urban Hydrology in Africa: A Simulation Framework for Uncertainty Propagation Analysis.” *Proceedings of the International Association of Hydrological Science Proc. IAHS*, 383, 237–240, 2020 <https://doi.org/10.5194/piahs-383-237-2020>

CONFERENCES

J’ai participé à 81 conférences internationales, dont 56 présentations orales et 25 posters (la liste exhaustive n’est pas fournie ici par souci de compacité).
Seules celles qui font l’objet de ‘proceedings sont listées :

1. Brown, P.R.A., A.J. Illingworth, A.J. Heymsfield, G.M. McFarquhar, K.A. Browning, and M. Gosset. 1995. “Role of Spaceborne Millimetre-Wave Radar in the Global Monitoring of Ice Cloud.” In *IEE Colloquium (Digest)*.
2. Gosset, Marielle E.J., Anthony J. Illingworth, Philip R.A. Brown, and John W.G. Thomason. 1995. “Effect of Ice Crystal Density Assumption in Inferring Reflectivity vs Ice Content Relationship.” In *International Conference on Radar Meteorology*.
3. Gosset, Marielle. 1999. “Along Slant VPR Correction to Account for Hydrometeors Drift Due to Wind Shear: Case Studies in Snow with McGill S Band Radar.” In *Conference on Radar Meteorology*.
4. Gosset et al., 2018, Rainfall retrieval from commercial microwave links : from a validated potential towards worldwide operational applications - IOM 132 ; <http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications-IOM-series.html>).
5. Turko, Maxime, Marielle Gosset, Christophe Bouvier, Nanee Chahinian, Matias Alcoba, Modeste Kacou, and Apoline Yappi. 2020. “Rainfall Measurement from Mobile Telecommunication Network and Potential Benefit for Urban Hydrology in Africa: A Simulation Framework for Uncertainty Propagation Analysis.” *International Association of Hydrological Science Proc. IAHS*, 383, 237–240, 2020 <https://doi.org/10.5194/piahs-383-237-2020>

Chapitre II –Contexte et positionnement de mes travaux

Contexte Scientifique général

L'eau douce est une ressource stratégique à bien des égards. Elle est un élément vital de notre alimentation (aquaculture, pêche, irrigation, ...), souvent un moyen de transport privilégié des biens et des personnes, elle représente un potentiel d'énergie significatif (hydroélectrique, stockage) et elle est indispensable dans de nombreux secteurs économiques (agriculture, industrie etc.). Le cycle de l'eau et sa répartition spatiale et temporelle détermine le bien être collectif et individuel. Mais l'eau représente aussi un risque majeur, que ce soit d'inondations (qui représentent environ la moitié des catastrophes naturelles recensées à l'échelle mondiale ; rapport TreeHugger) ou d'étiages sévères. Bien que constamment renouvelée, cette ressource en eau douce est loin d'être inépuisable (Marsily et al. 2018) et est très inégalement répartie à la surface de notre planète. Dans le contexte du réchauffement climatique (avec fonte des glaciers, modification des courants océaniques et atmosphériques, augmentation des températures, intensification des précipitations..., Meehl et al. 2000) et avec une pression anthropique croissante, cette ressource devient de plus en plus critique pour bon nombre de pays. L'accès à l'eau et son usage deviennent ainsi une source de conflit dans certaines zones du monde et le suivi quantitatif et qualitatif de cette ressource est indispensable (Vorosmarty et al. 2001). L'hydrologie, qui couvre tous les aspects du cycle de l'eau, et en particulier les échanges entre la mer, l'atmosphère, la surface terrestre et le sous-sol, sur terre, s'impose donc comme un secteur stratégique à l'échelle d'une région, d'un pays et même d'un continent.

Les précipitations sont la variable d'entrée des hydro-systèmes continentaux. A ce titre, l'estimation précise des cumuls pluviométriques est de longue date un enjeu majeur en hydrologie (Gupta and Sorooshian 1985). Les précipitations sont d'autre part le flux en surface résultant de divers processus atmosphériques de génération, évolution et chute, des hydrométéores en phase solide ou liquide. Les systèmes précipitants ont un rôle majeur dans les cycles de l'eau et d'énergie, des échelles micro-physique à climatique. Quantifier les précipitations et analyser leur variabilité, sur une gamme d'échelles spatiales et temporelles, intéresse donc une vaste communauté scientifique et d'usagers, en lien avec différents domaines : la variabilité climatique, l'étude de la convection et des systèmes pluvieux et leur contribution aux cycles de l'eau et de l'énergie, l'étude des processus microphysiques et dynamiques, les extrêmes pluviométriques, l'hydrologie (de l'échelle urbaine à continentale), les risques hydrométéorologiques et hydroclimatiques, les glissements de terrain (Marc et al. 2019), l'agronomie, les télécommunications, la modélisation numérique du temps et du climat, etc., sans oublier la physique du signal et l'algorithmie d'estimation de la pluie. La pluie est ainsi une des variables climatiques essentielles (ECV selon la définition du Global Climate Observing System GCOS/WMO; <https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables/precipitation>) dont la surveillance est critique pour documenter le changement climatique (CC) et ses impacts. La variabilité pluviométrique et l'occurrence de ses extrêmes (hauts et bas) sont un des effets sensibles du changement climatique (Dankers et al. 2014). Une pluviométrie perturbée impacte à son tour le cycle hydrologique continental avec des

conséquences parfois dramatiques sur la ressource en eau, les phénomènes d'inondations ou d'étiages extrêmes, l'hydraulicité des fleuves.

Au 21^{ème} siècle la gestion présente et prospective du risque hydro-climatique et de la ressource en eau s'impose comme une question majeure pour les décideurs, et pour les communautés spécialistes qui essaient de mettre à disposition des connaissances et des outils pour les éclairer ; par exemple via les groupes de travail du Groupe International d'Experts sur le Climat GIEC/IPCC, <https://www.ipcc.ch>) ou du Programme Mondial de Recherche sur le Climat (World Climate Research Programme, WCRP) et son 'Framework for Disaster Risk Reduction' dont l'objectif est de proposer des trajectoires pour réduire les désastres et leurs impacts humains et socio-économiques. L'observation des variables hydroclimatiques, et en premier lieu, la pluie, est évidemment essentielle pour nourrir ce socle de connaissance et documenter les changements en cours, leurs impacts et mieux anticiper le futur.

Dans les Tropiques les enjeux autour de l'eau – et donc des précipitations- sont exacerbés car ces régions accueillent les plus grands contrastes et les plus grandes vulnérabilités. L'eau y est répartie de manière très contrastée, concentrée dans le temps et spatialement par la convection tropicale organisée qui produit l'essentiel des précipitations. Dans les villes du Sud où afflue une proportion croissante de la population mondiale, les risques hydrométéorologiques augmentent (Descroix et al. 2012) sous l'effet combiné de précipitations intenses et de surfaces moins végétalisées qui accentuent les ruissellements. L'accès à une eau potable et de qualité (pourtant un des ODD principaux) est loin d'être garanti dans ces régions. Les populations rurales dont l'économie est basée sur une petite agriculture souffrent des excès (inondations) comme des manques (sécheresses) d'eau et subissent parfois les deux fléaux en une seule saison des pluies. C'est donc une région où le suivi précis des précipitations semble essentiel, et malheureusement l'une des zones les moins bien pourvues en observation in situ, comme l'illustre la figure suivante.

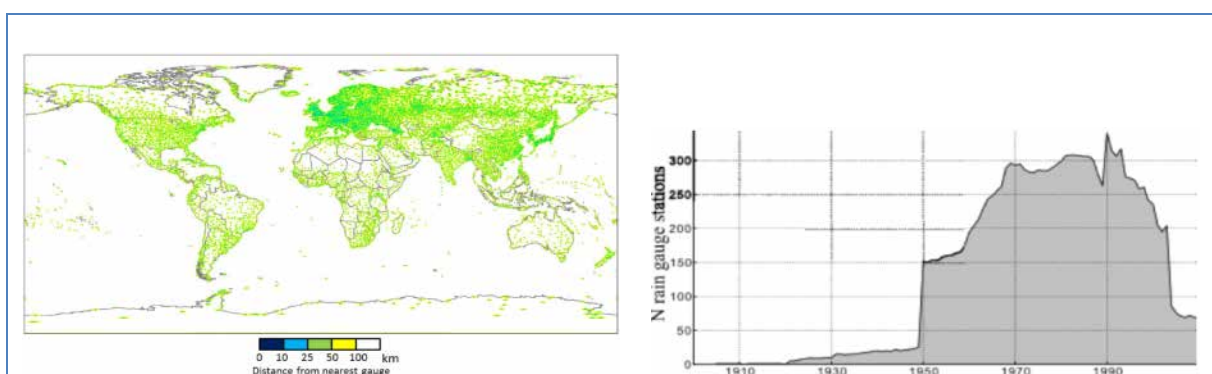


Figure 1 : Le réseau pluviométrique global reçu par WMO Global Telecommunication System : 8000 à 12000 pluviomètres automatiques (Kidd et al. 2017), dans lequel on remarque le déficit d'observations dans les Tropiques; Evolution du nombres de pluviomètres opérationnels en Afrique depuis le début du 20^{ème} siècle (Lorenz and Kunstmann 2012), la décroissance brutale amorcé dans les années 90 est bien visible.

Le programme international (WMO, UNEP, UNESCO) Global Climate Observing System (GCOS) créé en 1992 pour ‘veiller au niveau global à ce que les observations et informations nécessaires pour surveiller le climat et ses impacts soient collectées et distribuées aux utilisateurs potentiels’ précise à propos des précipitations : *‘Les précipitations, liquides ou solides, sont la variable climatique qui impacte le plus directement les humains. Par leur durée, leur intensité et leur fréquence ou par leur absence, elles influent sur l’approvisionnement en eau, entraînent des risques pour la vie et les moyens de subsistance en cas d’inondations, de glissements de terrain et de sécheresses, et affectent la planification des infrastructures, les activités de loisirs et plus encore. Les précipitations sont étroitement liées aux propriétés des nuages, à un certain nombre d’ECV terrestres et à la salinité de la surface de l’océan. Elles influencent le bilan d’énergie par dégagement de chaleur latente et sont au cœur du cycle hydrologique’*. Le GCOS fixe également le minimum requis pour le suivi de cette variable climatique essentielle en tout point du globe : mesurer les précipitations journalières avec une résolution de 25 km au moins, résoudre le cycle diurne et fournir de statistiques sur les intensités à 3h, avec une précision de 0.5 mm/h. Les réseaux pluviométriques in situ présentés Figure 1 sont clairement insuffisants pour ces exigences.

De nouvelles techniques d’estimation des précipitations à l’échelle globale ont progressivement émergé au cours du 20^{ème} siècle : les mesures satellitaires. Contrairement au pluviographe qui fournit une mesure directe de la précipitation en un point du globe, le satellite fournit une mesure indirecte mais sur des surfaces plus vastes à des résolutions diverses. Trois types de capteurs sont successivement apparus dans le paysage ‘météorologique’ amenant une information de plus en plus riche sur les systèmes pluvio-nuageux : les radiomètres infra-rouge (et visible) dès les années 70s, puis les capteurs micro-ondes passifs et enfin le premier radar météorologique embarqué, du programme nippo-américain Tropical Rain Measuring Mission (TRMM) Precipitation Radar (PR). Aujourd’hui la constellation internationale de satellites, géostationnaires et défilants, dédiée au suivi des systèmes pluvieux a atteint une densité inégalée jusqu’ici avec le programme Global Precipitation Measurement (GPM, Hou et al. 2014), appuyé pour les Tropiques par le satellite franco-indien Megha-Tropiques (Roca et al. 2015). Les algorithmes d’estimation ont progressé, mieux contraints par les bases de données acquises au cours de ces décennies d’observation (satellite et in situ) et bénéficiant également des progrès faits par la modélisation numérique des processus atmosphériques. Les nouveaux produits à résolution infra-journalière et de quelques dizaines de km sont satisfaisants, mais encore imparfaits, ce sera discuté plus loin. La communauté internationale s’organise au sein de projets comme l’International Precipitation Working Group (IPWG ; Levizzani et al. 2018) ou Precipitation Measurement Mission (PMM, le programme scientifique qui accompagne GPM) pour continuer à faire progresser la science des précipitations, améliorer l’estimation, mieux qualifier les incertitudes, développer de nouvelles méthodes pour combiner toutes les informations disponibles, provenant de modèles, d’observations spatiales et in situ.

Mon positionnement

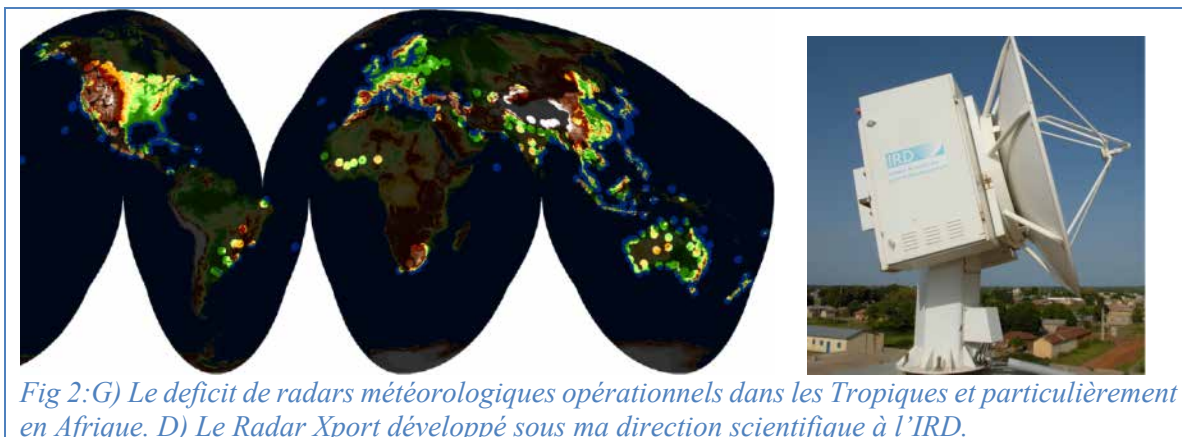
Dans cet élan de recherche communautaire et international sur les précipitations, mes efforts se sont portés en premier lieu sur la zone inter-tropicale où se focalisent les chantiers prioritaires de l'IRD et en particulier sur l'Afrique sub-saharienne, les régions sahélienne, guinéenne et le bassin du fleuve Niger. Une particularité de ces régions, liée à leur pauvre développement socio-économique et aux faiblesses structurelles des états, est le délabrement des services et réseaux hydrométéorologiques (Lorenz and Kunstmann 2012;). La ressource en eau et les précipitations y sont mal suivies et les processus eux-même sont assez mal connus ce qui rend difficile de comprendre leur évolution passée et d'anticiper le futur.

Palier ce déficit de connaissance était un des objectifs du programme d'Analyse Multi-Disciplinaire de la Mousson Africaine (AMMA, Lebel et al. 2010) que j'ai rejoint après ma titularisation à l'IRD.

Initialement et dans la poursuite de mes travaux de thèse je me suis consacrée à l'analyse des précipitations à l'échelle 'mésos' en observant au cœur même de systèmes précipitants pour comprendre la variabilité à des échelles peu observées en Afrique et auxquelles permet d'accéder le radar météorologique, quelques minutes, kilométriques. C'est l'échelle des cellules convectives qui expliquent la majorité des précipitations et leur variabilité spatiale en Afrique de l'Ouest ; également l'échelle clef pour aborder les problèmes d'extrêmes et de risques d'inondations, notamment dans les zones urbaines où la combinaison de la variabilité pluviométrique et la concentration du ruissellement provoque des phénomènes de ruissellement rapides.

A mon entrée à l'IRD l'institut ne disposait pas de radar météorologique et les pays africains dans lesquels je m'apprêtais à travailler en étaient également quasi dépourvus. Le premier projet que j'ai mené à l'IRD était centré autour du développement, puis l'utilisation d'un radar météorologique dédié à l'exploration des systèmes pluvieux tropicaux. Le radar de recherche Xport a ainsi été développé sous mon impulsion par les équipes techniques du LTRE (aujourd'hui IGE) et déployé pour une série d'expérimentations en Afrique de l'Ouest, au Bénin, Niger puis Burkina Faso de 2005 à 2014. Ces données acquises au cœur même des systèmes pluvieux ouest-africains ont permis d'accéder à de nouvelles connaissances sur leur structure, leur intensité et la nature même des processus microphysiques. Elles ont aussi permis de former plusieurs jeunes chercheurs africains sur l'étude des précipitations et les techniques radar météorologiques peu développées dans la région.

Cette première partie de mes recherches est présentée dans le chapitre III.1.



Les données acquises par radar météorologique sur les super sites de méso-échelle du Benin, Niger puis Burkina Faso ont également été mises à profit pour développer et valider d'autres sources d'informations sur les précipitations, plus adaptées aux contraintes des pays encore peu développés.

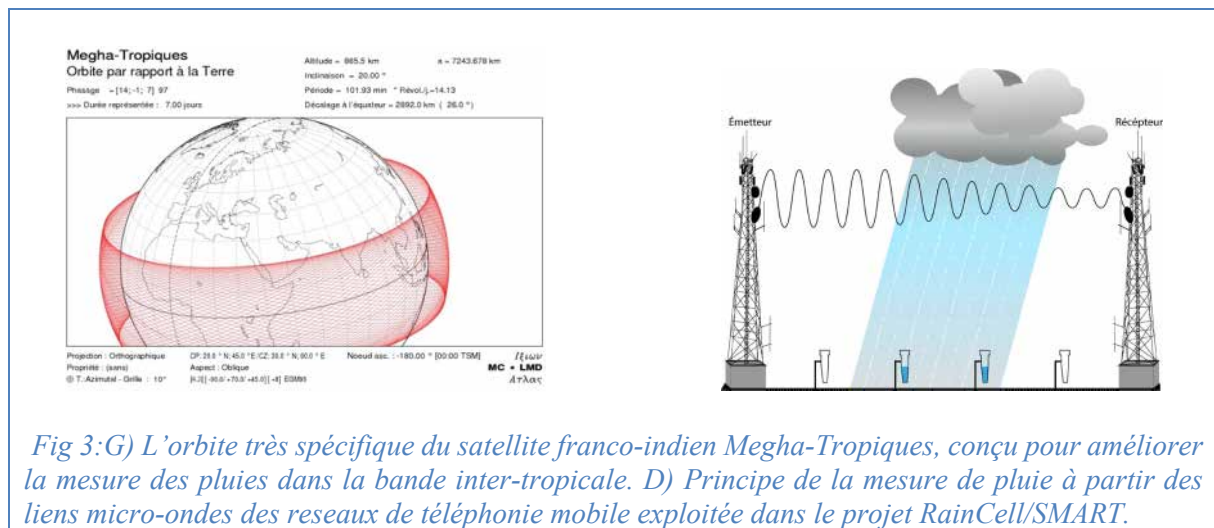
En effet malgré l'intérêt des radars météorologiques pour l'étude et le suivi opérationnel des systèmes précipitants, leur développement en Afrique -et plus généralement dans la bande inter tropicale- demeure très limité comme le montre la figure 2. Le frein principal est le coût prohibitif de ces instruments (typiquement plusieurs millions d'euros pour l'achat et l'installation d'un radar ; et environ 10% de ce prix pour la maintenance annuelle – source Météo-France) et également le haut degré d'expertise technique nécessaire pour maintenir et exploiter ces instruments. Les services hydro-météorologiques africains n'ont actuellement pas les moyens de maintenir des réseaux et équipes équivalents à ceux des pays industrialisés – à titre d'exemple Météo-France opère 30 radars sur la seule métropole. Par contraste, une source d'information gratuite pour les utilisateurs demeure relativement sous-exploitée et par les services opérationnels et par la communauté scientifique africaine : les satellites météorologiques. Ces données sont au coeur du deuxième axe de mes recherches.

En 2009 j'ai été invitée à rallier l'équipe scientifique chargée de promouvoir et d'exploiter les données d'une nouvelle mission satellitaire franco-indienne dédiée à l'étude des bilans d'eau et d'énergie dans l'atmosphère tropicale, Megha-Tropiques.

La mission spatiale franco-indienne Megha-Tropiques (MT) a été lancée fin 2011 (Fig. 3). Elle s'inscrit dans un programme spatial international plus large, Global Precipitation Measurement Mission (GPM) qui a vu se construire une constellation de satellites (actif/passif) dédiés à l'amélioration des estimations de pluie à l'échelle globale. Une dynamique très forte s'est créée au niveau international, relayée en France via MT, sur l'hydrométéorologie spatiale : comment utiliser au mieux ces nouveaux produits pluviométriques en hydrologie, pour la compréhension des processus aux échelles régionales et dans des zones mal couvertes par les réseaux sol, pour la prévision des risques hydrométéorologiques. L'enjeu était important pour l'IRD et ses partenaires en zone tropicale.

Au sein de ce projet, j'ai coordonné le programme de validation international de la mission (MTGV, pour Megha-Tropiques Ground Validation) puis développé un axe de recherche centré sur l'hydro-météorologie spatiale. Je me suis particulièrement penchée sur les inondations

récurrentes du fleuve Niger, à Niamey et l'apport des données satellitaires et de la modélisation pour en comprendre la genèse.
Cet aspect de mes travaux est présenté au chapitre III.2.

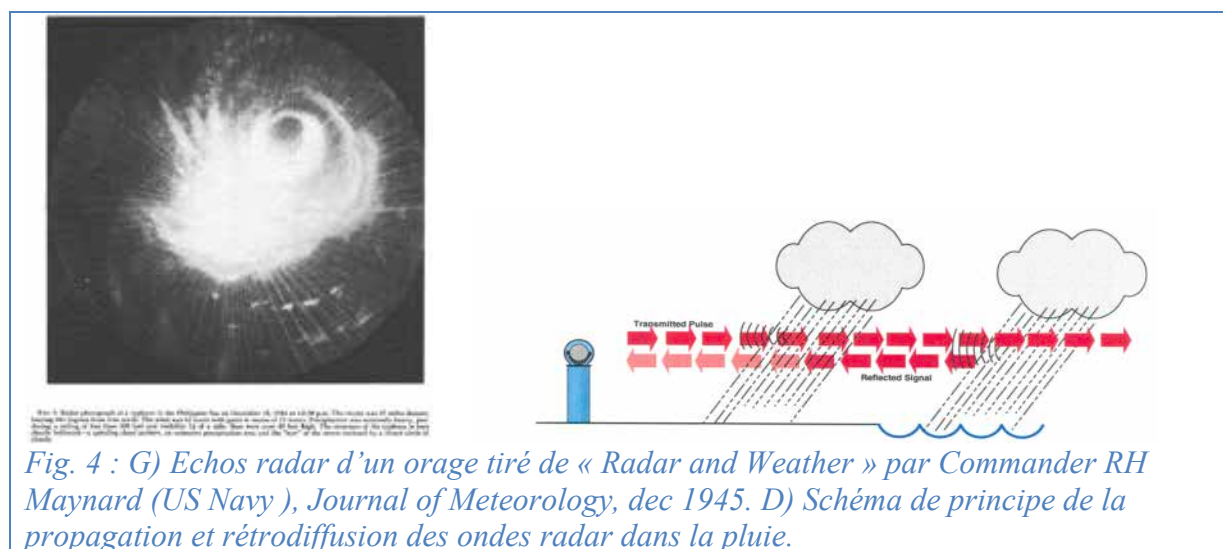


Enfin, un axe de recherche très novateur, en phase avec les défis ouverts par le 21^{ème} siècle a émergé : intégrer dans nos systèmes d'observation de la terre et de l'environnement de nouveaux types de données, issues de mesures d'opportunités. Je me suis consacrée depuis 2012 au développement en Afrique d'un nouveau type d'information : les fluctuations induites par la pluie sur les réseaux de téléphonie mobile. Au sein du projet RAIN CELL (pour RAIN Measurement from CELLular phone networks) Africa plusieurs expériences pilotes ont permis de valider ce concept et d'en démontrer l'intérêt pour diverses applications comme le suivi des risques d'inondations, un problème crucial dans les grandes villes comme les zones rurales. Ces résultats sont présentés au chapitre III.3.

Chapitre III – Synthèse de mes travaux

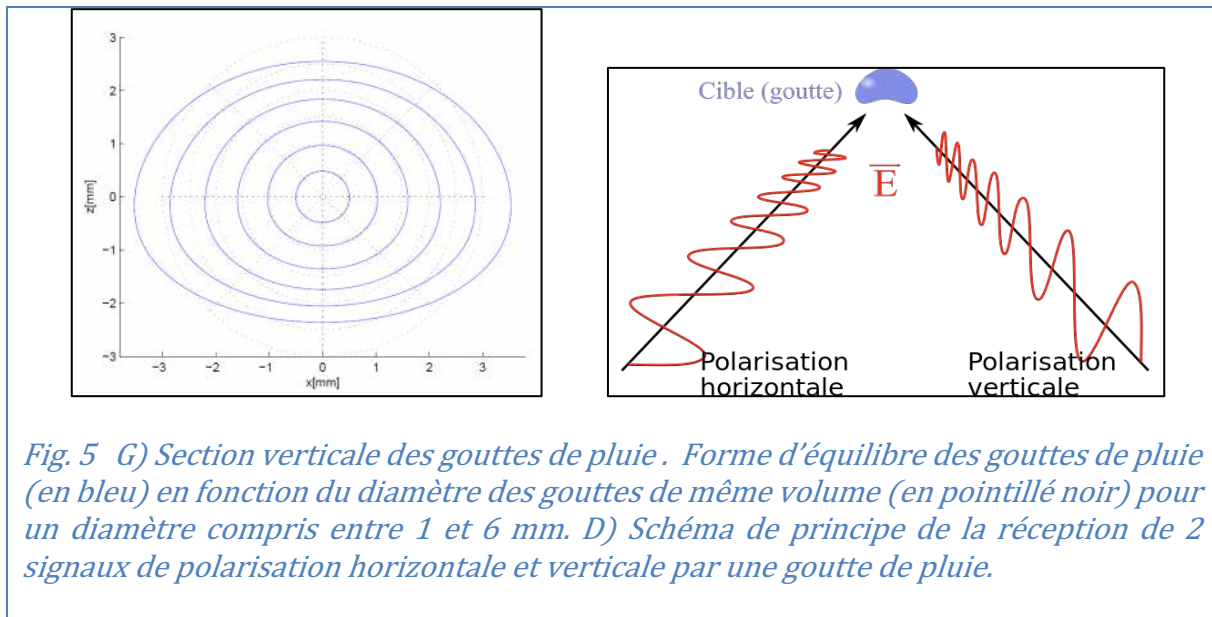
III.1 Ausculter les systèmes convectifs tropicaux par radar météorologique : processus microphysiques, dynamique et structure des précipitations.

L'application météorologique des radars a émergé après la seconde guerre mondiale, pendant laquelle ces instruments ont été intensément utilisés pour leur vocation première, la localisation de cibles mobiles de type avions ennemis. Ce sont des échos 'parasites' sur les écrans de surveillance des radar qui ont révélé la signature des systèmes pluvieux et le potentiel d'exploitation de celle-ci (Bringi and Chandrasekar 2001).

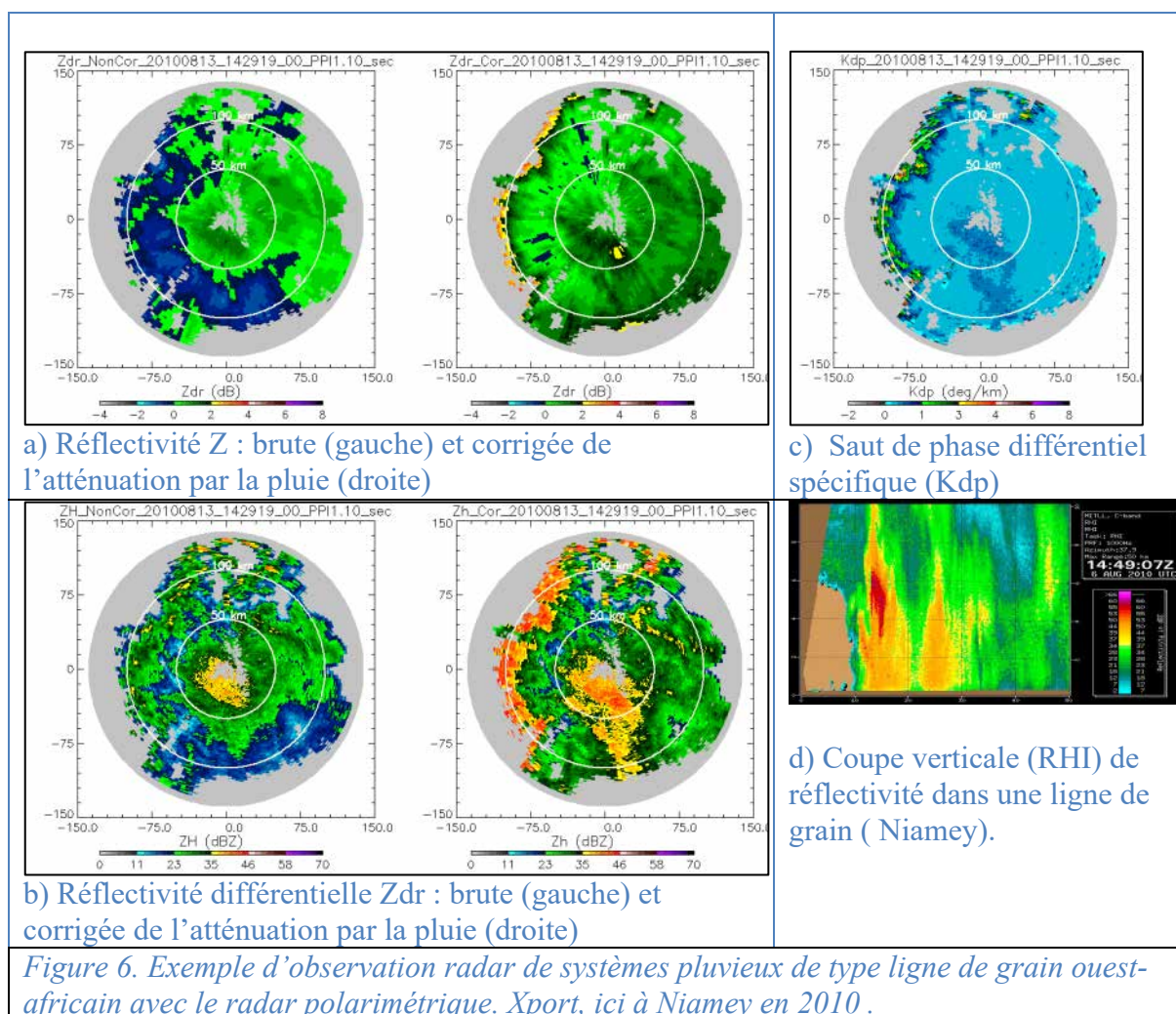


L'avantage associé au radar par rapport aux instruments réside dans le fait qu'il peut couvrir en continue une zone étendue de quelques centaines de km, avec un mode d'échantillonnage spatial (quelques centaines de mètres) et temporel (quelques minutes) offrant une vision tridimensionnelle des systèmes pluvieux et de leur évolution . Le radar météorologique est un système de mesure de télédétection active (Bringi and Chandrasekar 2001) dont les hydrométéores constituent la cible. L'équation radar météorologique relie la puissance reçue d'une portion d'atmosphère au facteur de réflectivité (noté Z), le paramètre renfermant les informations sur la cible c'est-à-dire les particules précipitantes (hydrométéores). Avec l'introduction de la polarimétrie, il a été montré depuis les années 90 que l'on peut tirer des informations supplémentaires de la mesure radar. Ces techniques exploitent la forme généralement non sphérique des hydrométéores. Les gouttes de pluie se déforment lors de leur chute et les différentes forces en jeu aboutissent à une forme à l'équilibre bien décrite par une ellipsoïde, dont le facteur d'aplatissement croît avec la taille (Fig. 5; Thurai et al. 2007; Gorgucci et al. 2008). Lorsque l'atmosphère est sondée par un radar polarimétrique, au cours d'une pulsation, il est transmis simultanément ou alternativement deux ondes électromagnétiques dont l'une est polarisée horizontalement et l'autre polarisée verticalement. En plus de la hauteur du signal rétrodiffusé, les radars modernes mesurent la phase des signaux. Celle-ci est utilisée pour les mesures Doppler de la vitesse radiale des gouttes en suspension

(V_{DOP}), et dans le cas des radars polarimétriques pour mesurer le changement de phase entre le signal horizontal et le signal vertical (Bringi and Chandrasekar, 2001).



Depuis les années 90, ces techniques radar polarimétriques se sont généralisées sur les radars opérationnels en Europe, aux Etats-Unis, en Asie et depuis peu en Amérique du Sud (Brésil). Au début de l'ère radar, ce sont les radars dans les bandes S et C (entre 3 et 7 GHz) qui étaient utilisés pour estimer les précipitations. Les radars fonctionnant à des fréquences plus élevées (bande X et au-dessus) étaient traditionnellement évités à cause du phénomène d'atténuation qu'ils subissent dans la pluie. Il a cependant été démontré depuis les années 2000 que grâce à la polarimétrie, l'on parvient à contourner le problème d'atténuation en bande X (Matrosov et al. 2005; Testud et al. 2000). Ainsi, l'utilisation des radars de petits gabarits, en bande X, pour l'estimation de la pluie s'est généralisée ces dernières années. En plus de leur transportabilité, ces radars sont moins coûteux et moins sensibles aux échos de sol que ceux fonctionnant à plus basse fréquence. La portée maximale des radars bande X est plus petite que celle des radars opérant en bande S ou C. Ils sont de plus en plus utilisés actuellement sous climat tempéré, pour compléter les réseaux opérationnels dans des zones mal couvertes par ceux-ci, comme les zones de relief. Ils répondent aussi au besoin croissant de champs de précipitation haute résolution en hydrologie urbaine. Le potentiel de ce type de radar pour la surveillance des risques hydrométéorologiques en zone tropicale (par exemple dans les métropoles à forte croissance de ces régions) où les pluies intenses à caractère convectif dominant, a été peu étudié faute de données. Mes premiers travaux à l'IRD ont été pour grande part consacrés à l'exploitation de radar bande X polarimétrique, dans une région dominée par la convection profonde tropicale : l'Afrique de l'Ouest.



L'aventure Xport : doter l'IRD d'un radar météorologique polarimétrique en bande X et quantifier les précipitations :

J'ai été recrutée à l'IRD, au LTHE (aujourd'hui IGE) de Grenoble, sur un poste coloré proposant de qualifier 'l'apport des radars météorologiques pour l'étude des précipitations en Afrique de l'Ouest'.

L'application météorologique des radars a émergé dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle. Petit à petit à cours des années 80s l'usage des radars météorologiques s'est généralisé dans les pays industrialisés, avec des avancées remarquables dans le domaine de la recherche aux Etats-Unis (dans le Colorado notamment avec le NCAR) et au Canada avec le Marshall Radar Observatory de McGill, et un équipement progressif des grands services météorologiques opérationnels (dont Météo-France et le UK Met Office, pionniers de ces techniques en Europe). Plusieurs grandes campagnes expérimentales ont été mises en œuvre pour aller ausculter des systèmes pluvieux de différents types (pluies associées aux grands systèmes frontaux des latitudes moyennes ; systèmes convectifs). Dans les Tropiques les coûteuses campagnes (GATE ; COPT 81) ont permis de valider et améliorer la compréhension des processus pluvio-nuageux grâce au déploiement loin des laboratoires d'instruments radar très lourds et encombrants (opérant en Bande S ou C, des antennes de plusieurs mètres et des besoins

électriques et mécaniques conséquents). Des campagnes expérimentales d'une telle envergure sont ponctuelles, elles apportent des informations précieuses sur quelques cas d'études, mais ne permettent pas l'analyse statistique des champs pluvieux sur une saison entière ou mieux en inter-annuel. Pour caractériser les phénomènes de manière plus systématique, les réseaux de radar opérationnels permanents ou des campagnes expérimentales de longue durée sont nécessaires.

Il n'existait pas de radars météorologiques opérationnels en Afrique lorsque j'ai été recrutée, dans les années 90s et la situation ne s'est d'ailleurs guère améliorée en ce début de 21^{ème} siècle. La fin du 20^{ème} siècle marque par contre un tournant dans le domaine radar-météorologique avec l'avènement des radars à diversité de polarisation qui ont ouvert de nouvelles possibilités, promettant une estimation plus précise des précipitations, l'accès à une information sur la structure interne et la dynamique des systèmes pluvieux et même de détecter la nature des hydrométéores en leur sein (Bringi and Chandrasekar, 2001). Une autre perspective de ces développements technologiques était la possibilité de développer des radars performants mais opérant à des longueurs d'ondes plus courtes (Bande X). Ce type de radar plus compact et léger étaient évités pour l'étude des précipitations car ils subissent une atténuation forte dans la pluie, mais les techniques polarimétriques promettaient de corriger ce phénomène (Matrosov et al. 2005; Testud et al. 2000). Ce faisceau de raisons a impulsé l'idée de doter l'IRD d'un radar bande X léger, polarimétrique, que nous pourrions transporter sur les chantiers africains pour des campagnes de mesure extensives. C'est ainsi qu'a évolué peu à peu le projet qui déboucherait sur des campagnes successives au Bénin, Niger et Burkina Faso, entre 2005 et 2014 avec le radar Xport développé au LTHE.

Peu après mon recrutement j'ai initié une collaboration avec un des laboratoires pionniers en météorologie radar : le Marshall Radar Observatory (MRO) de l'Université McGill de Montréal au Canada. J'y ai fait un séjour de plusieurs années, bientôt rejointe par F Cazenave, ingénieur radar au LTHE, et avec l'équipe d'I Zawadzki nous avons posé les bases techniques du radar que développerait ensuite F Cazenave en France. De mon côté j'ai initié des recherches sur les algorithmes d'estimation de la pluie à partir de ces radars bande X polarimétriques et sur les incertitudes associées à ces mesures.

Les principales caractéristiques du radar Xport sont rappelées ici : il opère à une fréquence relativement élevée de 10 GHz, ce qui en réduit le coût et l'encombrement ; en contrepartie l'onde radar subit en bande X une forte atténuation par la pluie qui peut causer la perte du signal par extinction ou rendre le paramètre mesuré, la réflectivité radar de la pluie, plus difficile à interpréter quantitativement. Sur Xport l'utilisation de la diversité de polarisation permet de compléter la mesure de réflectivité par celle d'une autre variable : le saut de phase différentiel (Fig. 6) un paramètre lié à la propagation de l'onde radar dans un milieu pluie anisotrope et que l'on peut utiliser pour corriger l'atténuation et estimer la pluie.

Émetteur	
Fréquence d'émission	9.4 GHz
Puissance	50 kW par canal
Durée de l'impulsion	0.4, 0.5 ou 1 μ s – 1 μ s à Niamey/Ouagadougou
Antenne	
Diamètre	1.8 m
Largeur de faisceau à 3dB	1°4
Gain	42 dB
Vitesse de rotation en azimut	Jusqu'à 5 rpm
Vitesse d'élévation	Jusqu'à 1.6 rpm
Polarisation	H et V, émission réception simultanée (orthomode)
Acquisition	
Puissance du bruit	-104 dBm équivalent à -10 dBZ à 10 km
Echantillonnage type	12 élévations entre 0 et 45° en 12 minutes Revisite site bas toutes les 6 minutes en moyenne
Résolution radiale	De 37.5 à 300 m
Portée type	685 portes radiales de 205 m soit 140 km



Tableau : Principales caractéristiques du radar Xport, construit au LTHE sous ma direction, avant d'être déployé en Afrique.

Trois campagnes expérimentales AMMA et Megha-Tropiques pour l'étude des précipitations en Afrique : Bénin, Niger et Burkina-Faso.

Deux projets scientifiques internationaux récents ont donné lieu au déploiement de radar météorologiques en Afrique de l'Ouest : i) le programme d'Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine (AMMA) et ses campagnes d'observations intensives en 2006 et 2007, et ii) la mission spatiale franco-indienne Megha-Tropiques dédiée au cycle de l'eau et de l'énergie de l'atmosphère tropicale et ses campagnes de validation ouest-africaines en 2010, 2012 et 2013.

Une des ambitions du vaste programme AMMA était d'améliorer nos connaissances sur les précipitations ainsi que de mieux comprendre l'interaction entre les systèmes précipitants et leur environnement. Cet effort s'est concentré sur la zone sahélienne et le site multi-instrumenté de Niamey, mais un site secondaire était également installé au Nord Bénin sur l'Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé (OHHVO). C'est sur ce site, à Djougou que le radar polarimétrique bande X de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), radar Xport, a été installé entre 2005 et 2007.

Le satellite Megha-Tropiques (MT) a été lancé fin 2011, avec à son bord trois instruments complémentaires : SCARAB pour le bilan radiatif au sommet de l'atmosphère,

SAPHIR pour le sondage de la vapeur d'eau et enfin MADRAS, un imageur micro-onde dédié à la mesure des précipitations. En 2010 une première campagne de mesure au sol MTGV (MT Ground Validation), pré-lancement, a été organisée à Niamey, au Niger. Il s'agissait de combiner des vols instrumentés et des radars au sol pour documenter la microphysique des systèmes convectifs, en vue d'améliorer l'estimateur de pluie utilisé par MT (algorithme BRAIN ; Viltard et al. 2006). En 2012 et 2013 deux campagnes de mesures, post-lancement ont eu lieu à Ouagadougou, au Burkina Faso, devenu super-site de validation MT. Le radar Xport y a été déployé ainsi qu'un réseau de pluviographes pour produire des champs de pluie de référence et valider les estimations de pluie MT.

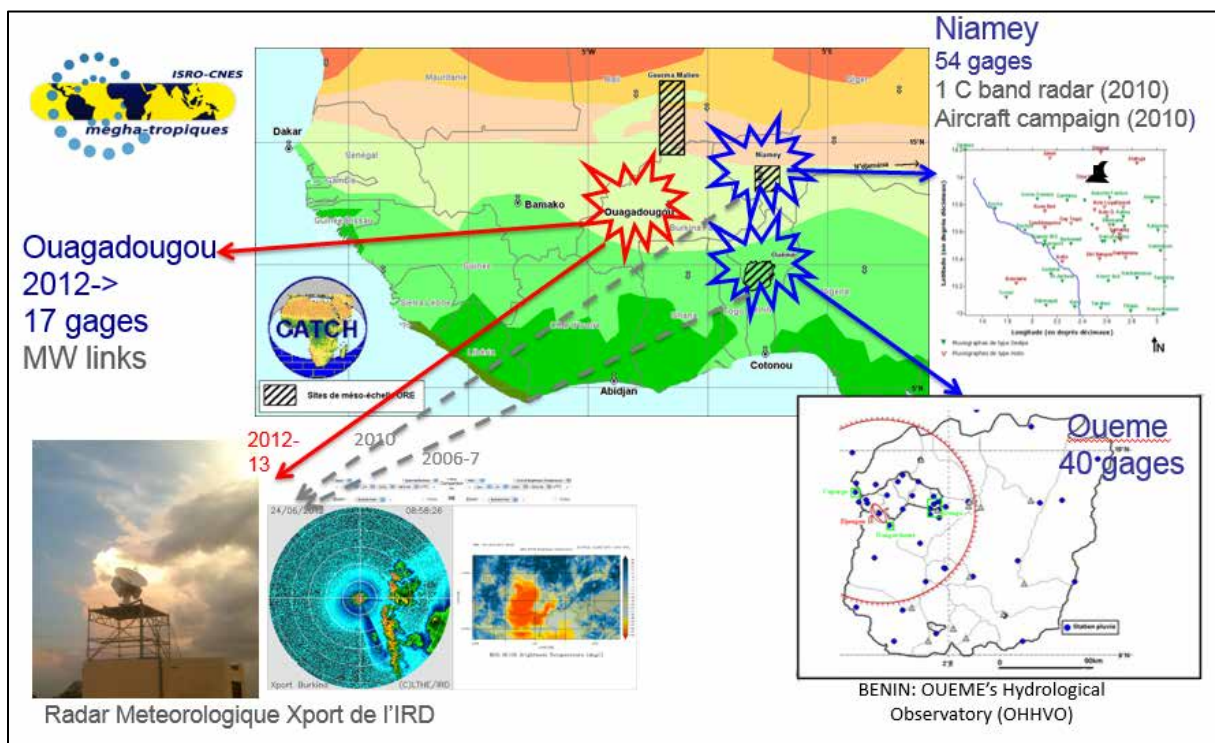
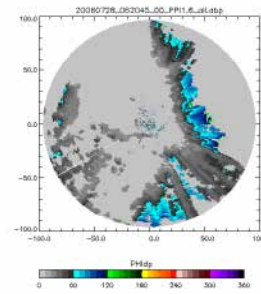
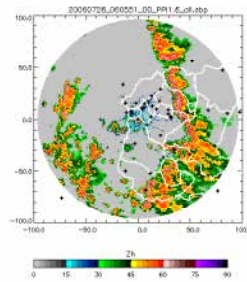


Figure 7 : la zone d'étude en Afrique de l'Ouest où le radar Xport a été installé successivement : Deux sites expérimentaux Megha-Tropiques au Niger (2010) et Burkina-Faso (2012-2013) et AMMA-CATCH au Bénin (2005-2006-2007).

Le radar Xport a été déployé pour la première fois au Bénin de 2005 à 2007 pendant la campagne AMMA, afin de documenter les caractéristiques (structure, cinématique) des systèmes convectifs de la région et de produire des estimations quantitatives des précipitations avec des résolutions spatiale et temporelle fines. En bande X, un défi majeur est le problème d'atténuation du signal radar par les précipitations. Pour surmonter ce problème Xport est équipé de double polarisation afin de compléter la mesure de base (réflectivité, Z) avec le saut de phase différentiel (noté ϕ_{DP}) non perturbé par l'atténuation et qui permet au contraire d'estimer celle-ci. Le radar Xport et un exemple des champs de réflectivité Z (milieu) et saut de phase ϕ_{DP} (droite) pour la ligne de grain observée à Djougou le 28 juillet 2006 sont présentés ci-dessous.



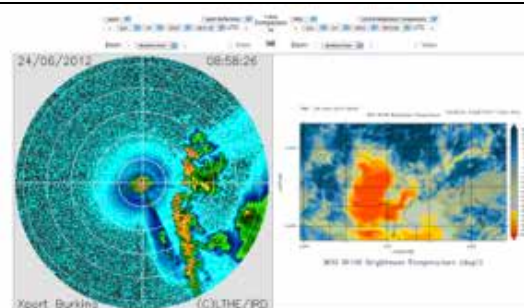
Le radar Xport installé à Djougou au Bénin pendant les campagnes AMMA. Les points noirs sur la figure central sont les pluviomètres du réseau AMMA-CATCH.



Le radar Xport installé à proximité de Niamey et l'un des avions instrumenté de SAFIRE pendant la campagne de préparation de Megha-Tropiques en 2010.



MT à Ouagadougou
< radar Xport
Image radar et satellite
IR d'1 ligne de grain
observée en 2012 a
Ouagadougou



Le radar Xport installé à Ouagadougou dans le cadre du super site de validation Ouest-africain de MTGV en 2012 et 2013

Figure 8 : Illustrations des 3 campagnes expérimentales Xport en Afrique de l'Ouest.

En 2010, dans le cadre de la préparation du lancement de Megha-Tropiques, les efforts se sont focalisés sur la préparation et la mise en oeuvre d'une campagne expérimentale d'envergure

au Niger, impliquant mesures avion et radar. Le CNES, l'IRD et plusieurs laboratoires INSU ont collaboré à l'élaboration de cette campagne aéroportée au Niger. Quatre semaines d'exploration intensive des systèmes convectifs ont eu lieu en Aout dans la région de Niamey en combinant : l'avion Falcon 20 instrumenté de l'unité SAFIRE (Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement), le radar polarimétrique Xport de l'IRD/LTHE et les installations du Système d'Observation AMMA-CATCH au Niger. L'objectif était la collecte de nouvelles informations sur la nature des cristaux de glace présents dans les nuages et que détecteront les canaux haute fréquence du radiomètre embarqué Madras/MT. Des études montrent en effet que l'on améliorerait sensiblement les estimations de pluie par satellite, sur les continents notamment, en représentant mieux dans les algorithmes les propriétés des hydrométéores glacés. Jusqu'ici, et faute de campagne dédiée, peu d'information quantitative était disponible sur la nature des cristaux dans les systèmes convectifs africains. La campagne 'MeghaTropiques 2010' de Niamey palliait ces lacunes. Au total onze vols de l'avion instrumenté ont eu lieu dans les systèmes pluvieux, pour en percer les secrets microphysiques. Au sol, les radars météorologiques assuraient le guidage de l'appareil et récoltaient des mesures complémentaires dans un rayon de 250 km autour de Niamey et en trois dimensions, pour généraliser les mesures avions. Le radar polarimétrique Xport (IRD/LTHE), installé dans la région de Say au sud de Niamey, et un radar doppler américain (MIT), déployé sur la base aérienne de la capitale nigérienne, tous deux déjà impliqués dans le programme AMMA, ont été mobilisés (Figure 8). La campagne a été un franc succès tant par la variété des systèmes pluvieux échantillonnés que par le bilan instrumental. Les résultats scientifiques sont détaillés plus bas.

Qualifier et améliorer l'estimation de la pluie par radar – Etudes par simulations numériques :

Une image d'un champ d'échos radar comme celui de la figure 6 permet immédiatement de comprendre l'intérêt suscité depuis près d'un siècle auprès des météorologues par cet instrument capable de capturer instantanément la structure d'un système pluvieux. La communauté hydrologique a montré (et montre encore) plus de réticences à adopter cet instrument comme une source d'information fiable. Ces réticences sont justifiées par la difficulté à transformer l'information produite par les radars en une donnée quantitative sur la pluie. Comme tout moyen de télédétection, le radar fournit une information indirecte. Les variables mesurées, réflectivité, réflectivité différentielle, saut de phase différentiel (Figure 6) reflètent les propriétés électromagnétiques d'une eau atmosphérique distribuée au sein de milliers d'hydrométéores (gouttes de pluie ; grêlons etc.). Le lien entre ces variables et les propriétés physiques de la pluie passe par des fonctions complexes et dépend de l'indice diélectrique de l'eau pour la fréquence micro-onde et la température atmosphérique considérées, et de la distribution de taille, de forme et d'orientation des hydrométéores. L'intensité de pluie au sol est liée à la densité volumique de ces gouttes et à leur vitesse de chute. Les variables radar et l'intensité pluvieuse sont donc reliées par les propriétés microphysiques de la pluie. La distribution granulométrique des hydrométéores est le fruit de processus physiques connus et obéit heureusement à des lois elles aussi connues (Moumouni et al. 2008a). Cela a permis d'établir des relations analytiques (de type puissance) entre les

variables radar et l'intensité pluvieuse (Zhang et al. 2001; Bringi and Chandrasekar 2001; Seliga and Bringi 1978, 1976). L'inversion des mesures radar pour estimer la pluie est malgré tout entachée d'incertitudes, dont la compréhension et la réduction demeure un sujet de recherche actif (Thurai et al. 2012). Différentes sources d'incertitudes doivent en effet être considérées. Certaines sont liées à l'échantillonnage spatial et temporel, à la mauvaise calibration du radar, d'autres à la conversion de la mesure radar en taux de pluie, ou encore à la contamination par la grêle, l'atténuation par la pluie le long du trajet, l'occultation partielle ou totale du faisceau radar par le relief ou les immeubles, le non-remplissage du faisceau radar. Un enjeu et un problème encore très discuté par la communauté est l'utilisabilité du radar pour faire des estimations quantitatives de la pluie (QPE pour Quantitative Precipitation Estimation) pour des applications hydrologiques (Berne and Krajewski 2013).

J'ai contribué à cette question à travers mes recherches propres et plusieurs thèses encadrées. Mes travaux se sont focalisés sur l'estimation de la pluie avec les radars polarimétriques, avec une spécialisation graduelle sur les pluies tropicales. Pour aborder la question des incertitudes et tester différents algorithmes, j'ai développé une approche par simulation numérique.

Une première version de mon simulateur a été utilisée pour analyser un problème important, l'impact du remplissage non uniforme du faisceau radar par les hydrométéores (Gosset and Zawadzki 2001; Gosset 2004). L'équation radar météorologique (Bringi and Chandrasekar 2001) considère par défaut que les hydrométéores sont répartis uniformément au sein de chaque porte radar, or dans les pluies convectives en particulier et lorsque le faisceau s'élargit, des gradients de pluie peuvent perturber le signal. Ces effets sont connus et discutés pour les radar satellitaires (Bolen and Chandrasekar 2003) à cause de leur longue portée, mais avaient été assez peu analysés pour les radar sol. Nos travaux (Gosset and Zawadzki 2001; Gosset 2004) illustrés ci-dessous ont montré qu'aux fréquences relativement élevées comme en bande X, les effets de ces gradients sur la propagation du signal ne sont pas négligeables et doivent être considérés comme une source d'incertitude. Ils renforcent le besoin de privilégier des radars avec des faisceaux concentrés (donc des antennes d'un mètre de diamètre au moins) pour augmenter la précision sur les pluies estimées.

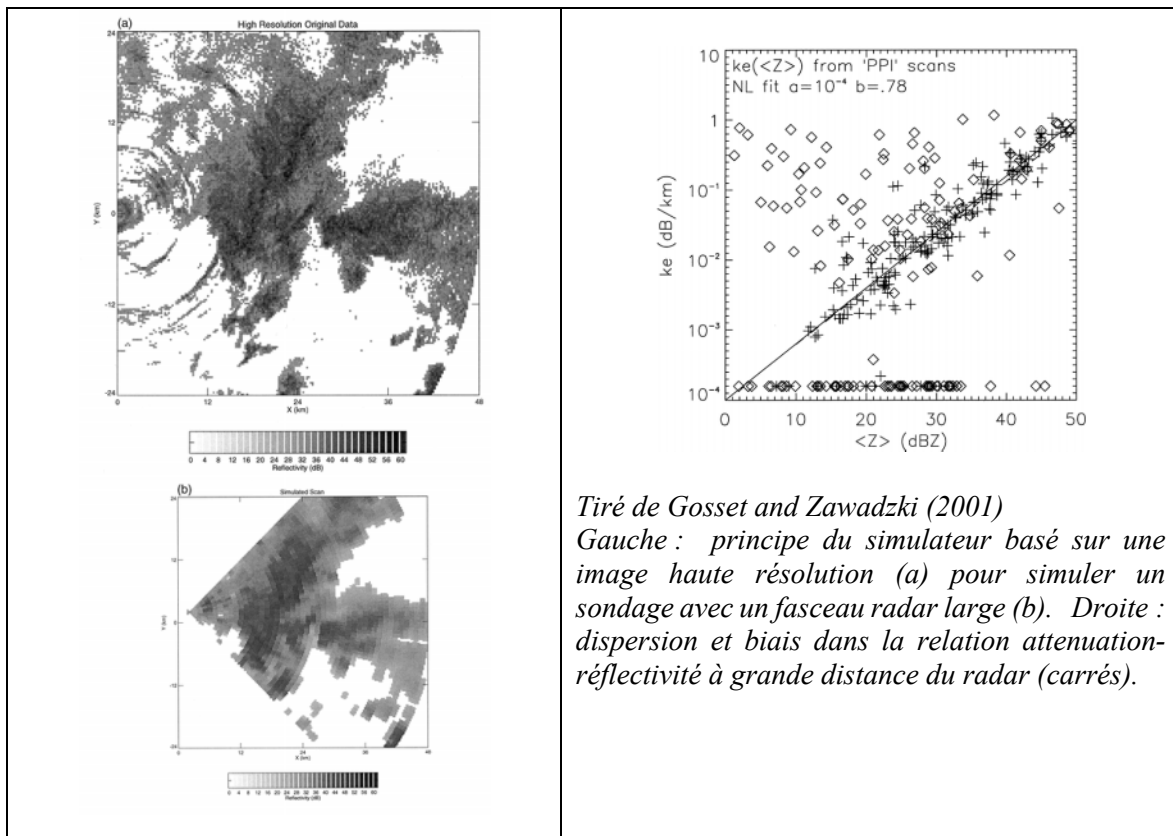
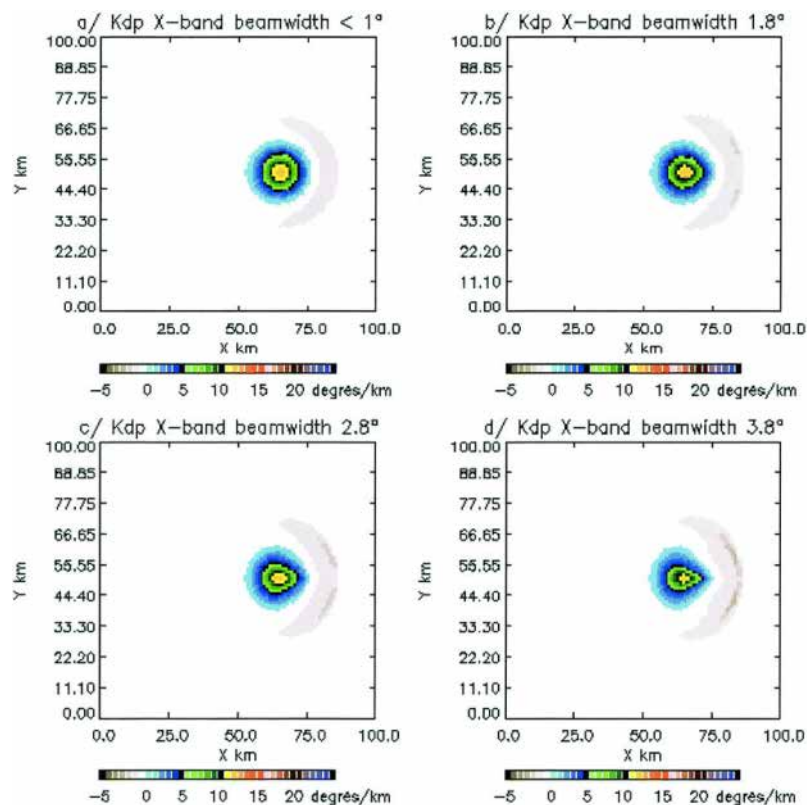


Fig 9 : Extraits de Gosset and Zawadzki (2001) : Analyse par simulation numérique des effets de remplissage non uniforme du faisceau radar sur la relation entre atténuation et réflectivité radar

La figure ci-après extraite de Gosset (2004) illustre les effets d'hétérogénéité et de largeur de faisceau sur une variable qui a créé une vraie rupture dans l'estimation des précipitations par radar : le saut de phase différentiel entre deux polarisations. Cette variable mesure un effet propagatif lié à la quantité d'eau sur le chemin de l'onde et à l'aplatissement des gouttes de pluie. Cet effet est très sensible aux fréquences élevées (comme en Bande X) et plusieurs de nos travaux par simulation puis sur données réelles, en ont démontré la pertinence pour estimer la pluie dans les systèmes tropicaux, avec des radars à relativement faible coût.

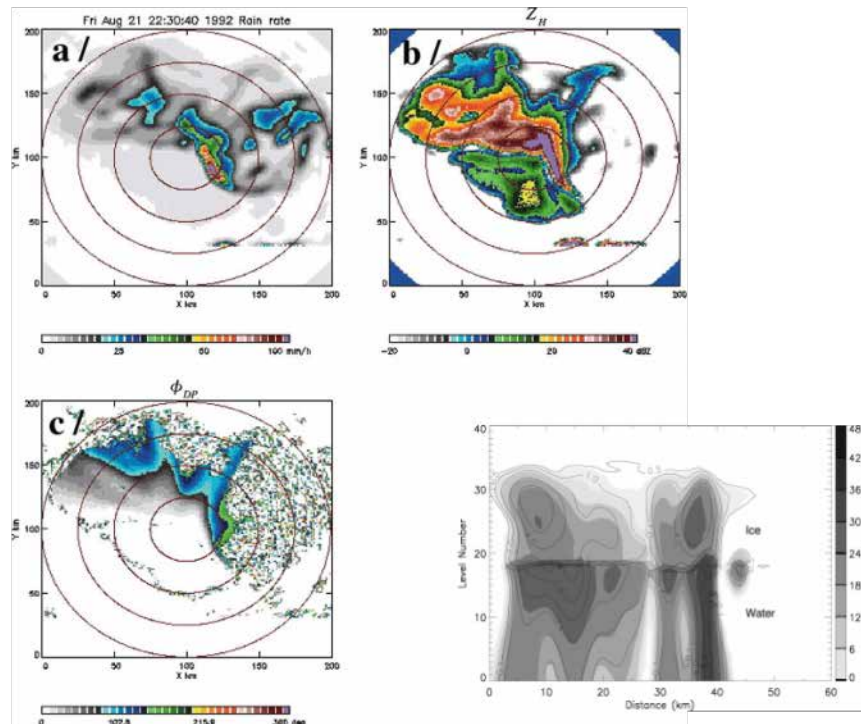


Tiré de Gosset, 2004 (fig 4) : Combined effect of the backscattering phase shift δ and of strong azimuthal gradients within the beam on the measurement of ϕ_{DP} for various beamwidths, at X band. The phase shift ϕ_{DP} decreases behind the cells, which causes negative values in the retrieved K_{DP} field shown. The ring of negative values is more marked and the shape of the K_{DP} field altered when the beamwidth is large. The beamwidths are equal to (a) 0.1° , (b) 1.8° , (c) 2.8° , and (d) 3.8°

Fig 10 : Extraite de Gosset, 2004: Analyse par simulation numérique des effets de remplissage non uniforme et de taille des hydrométéores, sur la détection d'une cellule pluvieuse à partir du saut de phase différentiel.

Le simulateur numérique de données radar a évolué au fil des études pour intégrer des paramètres de plus en plus détaillés sur les précipitations, avec une description explicite de la distribution de taille des gouttes et de leur aplatissement, pour produire des données synthétiques réalistes et générer toutes les variables polarimétriques. Les premières simulations s'appuyaient sur des modèles de pluie très académiques (cellules gaussiennes dans Gosset 2004). Pour la thèse d'E-P Zahiri co-encadrée avec JP Lafore de météo-France nous avons couplé ce simulateur radar avec un modèle de prévision numérique du temps hautement résolu (MésO-NH) pour simuler la capacité du radar à observer des systèmes convectifs africains de type ligne de grain (Zahiri et al. 2008). Ce principe a été repris pour développer un simulateur complet de mesures radar polarimétrique dans le modèle opérationnel MésO-NH (Caumont et al. 2006) puis AROME afin de préparer l'assimilation de ce type de données.

Zahiri et al. (2008) a été le premier d'une série de travaux sur le développement et le test d'algorithmes d'estimation des précipitations adaptés au contexte tropical, caractérisé par des pluie convectives intenses.



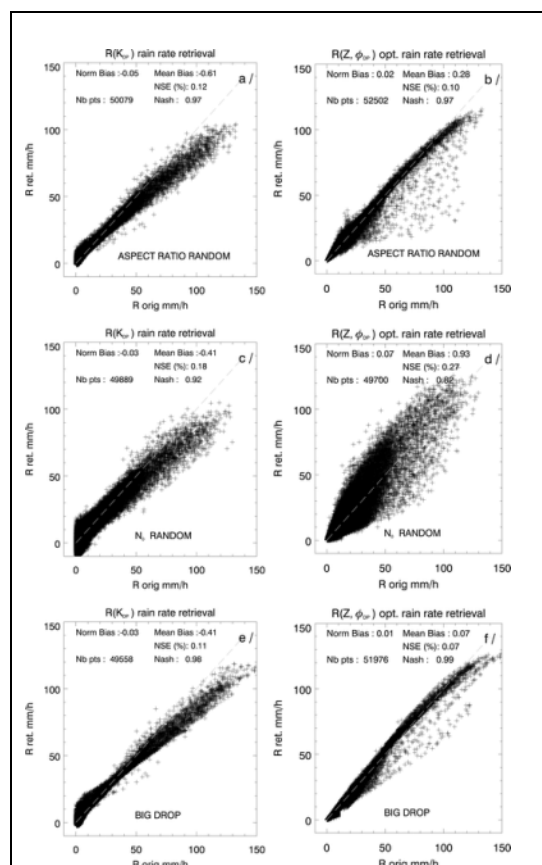
Example of PPI scans generated by the radar simulator for the Meso-NH case study described in the text. The illustration is for one PPI, for the radar in the Sudanese zone, and the variables are the (a) R, (b) synthetic reflectivity in polarization H (with the attenuation and the measurement uncertainty modules turned on), and (c) differential phase shift. Bottom right Example of a vertical slice in an African squall line generated by Meso-NH. The numbers on the contours indicate hydrometeor mixing ratios, used as an input for the radar simulator. The shaded areas represent the reflectivity factors (dBZ) calculated by the model. The y axis indicates the vertical level number in the model. The separation between solid (above around level 18) and liquid hydrometeors is visible, on both the reflectivity and mixing ratio contours.

Figure 11 : extraite de Zahiri et al. (2008), génération de variables radar polarimétriques synthétiques dans une ligne de grain africaine simulée par le modèle MesoNH, pour tester différents algorithmes d'estimation.

A partir des variables mesurées par un radar polarimétrique comme Xport (réflectivité et saut de phase différentiel) plusieurs approches sont possibles. Les études de sensibilité réalisées au cours des travaux de thèse de EP Zahiri, ont conduit à sélectionner pour Xport deux algorithmes : i/ l'un utilise uniquement le saut de phase différentiel (Matrosov et al. 2005) qui doit être dérivé en distance par une technique numérique appropriée ii/ l'autre est une méthode de type profileur qui combine la mesure de réflectivité et la valeur intégrée sur la radiale du saut de phase différentiel (Testud et al. 2001).

Figure 12 (ci-contre) : extraite de Zahiri et al. (2008), test de différents algorithmes d'estimation à partir de variables polarimétriques sous différentes hypothèses dans les incertitudes.

Les tests par simulations numériques (Zahiri et al, 2007) ont permis d'évaluer l'influence des différentes sources d'erreur et de hiérarchiser leur impact sur la mesure. Ces tests montrent que les deux algorithmes choisis devraient être complémentaires, le premier étant mieux adapté aux pluies intenses et le second à des pluies plus modérées. Ces résultats ont ensuite été mis en œuvre sur les données réelles au cours des campagnes de mesures effectuées avec Xport, au Bénin, Niger puis Burkina Faso.



Qualifier et améliorer l'estimation de la pluie par radar – Nos campagnes de mesures africaines :

Les thèses d'Augustin Kadjo puis de Modeste Kacou ont significativement fait progresser les conclusions sur le concept de radar léger bande X pour l'estimation quantitative des précipitations en Afrique. La qualification du radar et de différents algorithmes d'estimation des précipitations a été réalisée sur la base : i) des comparaisons entre les pluies estimées par radar et mesurées par le réseau de pluviographes situés dans la zone de couverture ii) d'une méthode originale basée sur la cohérence entre les variables radar (Koffi et al. 2014).

Un jeu de données radar et pluviographique conséquent, constitué de près de 200 événements pluvieux collectés au Bénin, Niger et Burkina Faso a été analysé. Une gamme d'estimateurs radar polarimétriques a été considérée et chacun d'eux a été évalué sur la base de comparaisons avec les pluviographes. Une batterie de tests statistiques classiques et l'analyse des distributions fréquentielles d'intensités ont permis de comparer les performances de ces estimateurs (Fig. 13). Les performances ont été évaluées sur une gamme d'échelles spatio-temporelles et les problèmes liés à la représentativité spatiale des pluviographes ont été analysés. Au-delà de l'évaluation "ponctuelle" des estimateurs, basée sur des comparaisons directes entre un pluviographe et un pixel radar, on a développé des méthodes originales pour comparer entre eux les champs haute résolution issus du radar et de l'interpolation des pluviographes (Fig. 13). En s'inspirant de méthodes héritées de l'évaluation de modèles numériques les structures des champs ont été comparées en autorisant une tolérance spatiale. Ceci permet d'avoir une

évaluation pertinente des champs pour des utilisations subséquentes en hydrologie ou pour la validation satellitaire.

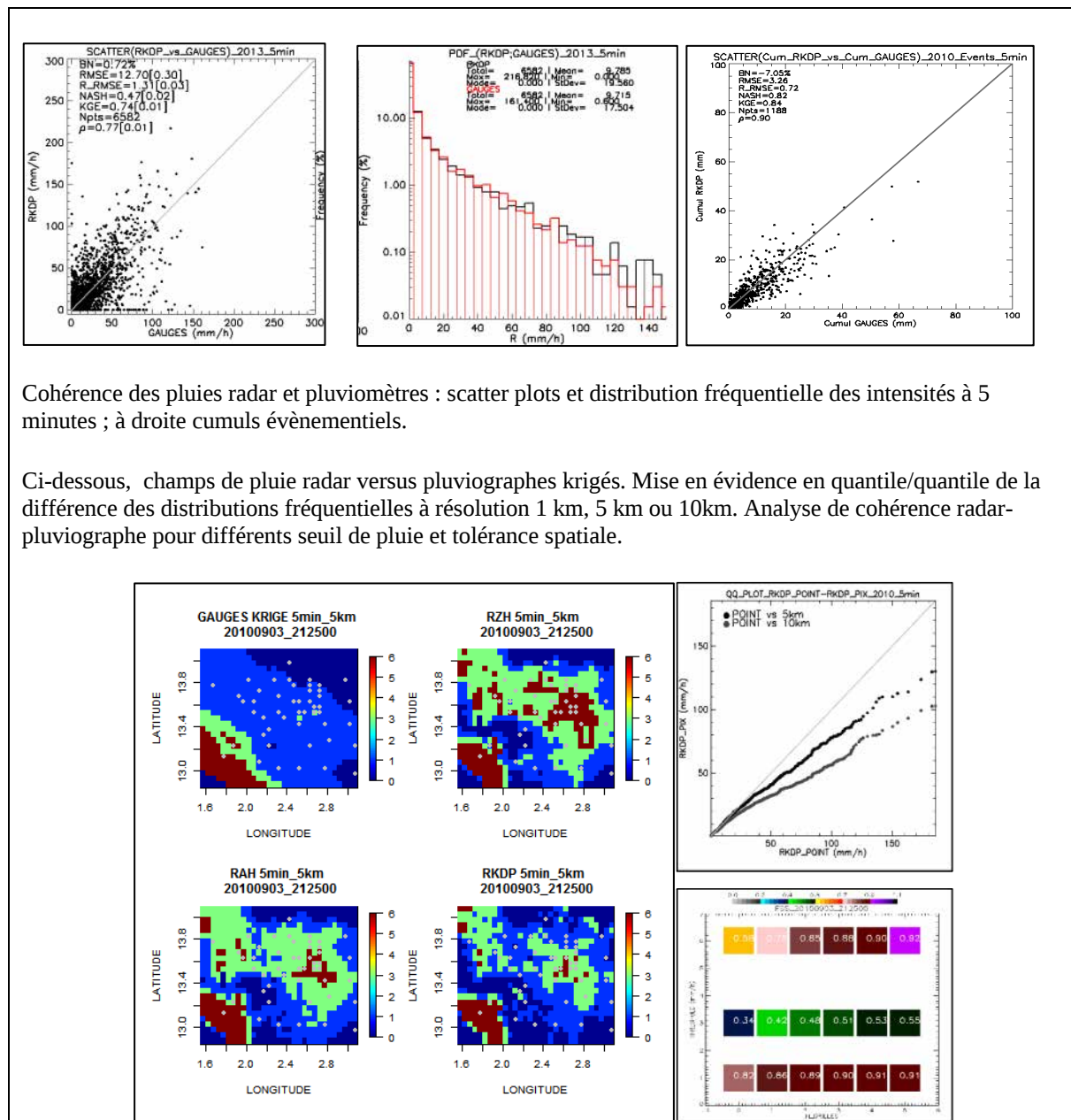


Figure 13, adaptée de la thèse de M Kacou. Résultats des évaluations statistiques de différents estimateurs radar polarimétrique en Afrique de l'Ouest ; analyses multi-échelles.

Ces travaux ont confirmé et étendu à la zone sahélienne certains des résultats précédents sur les performances de différents estimateurs radar en Afrique de l'Ouest ; ils ont mis en avant les très bonnes performances de l'estimation s'appuyant sur le saut de phase différentiel (K_{DP}), et dans une moindre mesure l'estimateur basé sur l'atténuation spécifique (A_H).

Nos analyses confirment l'intérêt du radar bande X polarimétrique pour l'estimation quantitative des précipitations et l'analyse des systèmes précipitants, même en zone tropicale. Ce type de radar relativement compact et peu coûteux pourrait être appliqué à la surveillance des risques

hydrométéorologiques dans les zones urbaines ou le suivi de bassins particuliers (zone équipée de barrage ou haut de bassin montagneux par exemple).

Analyser la typologie des précipitations et les processus physiques :

L'attrait des météorologues pour le radar vient de ce qu'il offre bien plus que l'estimation des précipitations en surface. Le balayage tridimensionnel fréquent et les différentes variables mesurées permettent de recueillir une information sur la structure même des systèmes pluvieux et les processus physiques qu'ils abritent. Contrairement aux systèmes des latitudes moyennes, observés quasiment continuellement depuis plusieurs décennies par les réseaux radar opérationnels, peu d'information est disponible sur la structure des systèmes pluvieux en Afrique et plus généralement dans la bande inter-tropicale, sous-observée. L'information satellitaire, notamment géostationnaire, offre une vision utile mais partielle de la structure des systèmes convectifs 'vus d'en haut'. Le radar aéroporté de TRMM a créé une révolution en offrant des coupes verticales dans ces systèmes, sous la forme de quelques images instantanées le long de son orbite (Nesbitt and Anders 2009). Mais la probabilité qu'un système pluvieux donné soit observé par un radar satellitaire est très faible, et il ne l'est au mieux qu'à un instant dans son cycle de vie. Un radar au sol permet au contraire d'observer un système pluvieux et son évolution pendant plusieurs heures. En un lieu, les systèmes pluvieux successifs peuvent être comparés. Cette information est utile pour comprendre la genèse des précipitations, les facteurs qui rendent un système donné plus ou moins pluvieux, voire dangereux ; elle est également essentielle pour alimenter et valider d'autres outils comme les modèles numériques du temps ou les algorithmes d'estimation satellitaire de la pluie (Kidd et al. 2018). La nature des systèmes pluvieux et notre capacité à l'observer ou prédire, est une question cruciale dans un contexte de changement climatique où des interrogations émergent sur une éventuelle intensification des pluies et augmentation des phénomènes extrêmes (Allan et al. 2010).

En zone sahélienne une littérature importante a été produite sur les pluies, sur la base du réseau AMMA-CATCH notamment (Panthou et al. 2014; D'Amato and Lebel 1998; Ali et al. 2003) . Les systèmes pluvieux bien documentés à Niamey sont-ils représentatifs de l'Afrique de l'Ouest (et même du Sahel) dans son ensemble ? Explorer les différences au sein du gradient Sud-Nord en Afrique de l'Ouest était un des objectifs du programme AMMA. L'analyse des données acquises au Bénin pendant ces campagnes a mis en évidence la nature duale des systèmes pluvieux dans cette région, certains organisés en ligne de grain et associés une convection organisée, comme au Sahel, d'autres liés à une convection localisée. Ces seconds systèmes, présentant une structure très clairsemée, sont mal détectés par les réseaux de pluviomètres opérationnels trop lâches et également par le satellite. Leur existence et leur apport à la pluviométrie de la zone ont été sous-estimés alors même qu'ils peuvent être à l'origine de précipitations intenses et d'inondations très localisées comme ce fût le cas au Nord Bénin en 2006. La figure 14 ci-dessous illustre deux types de systèmes tels qu'observés par le radar Xport au Bénin en 2006.

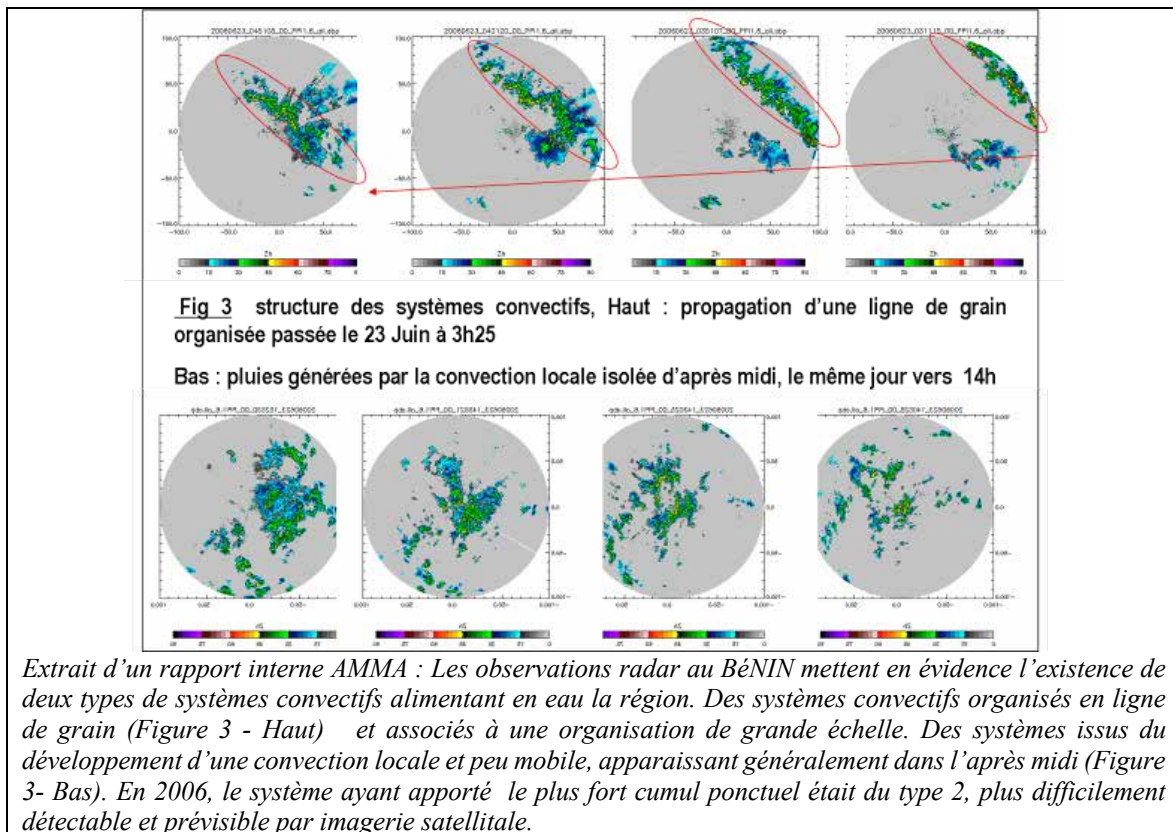


Figure 14 : typologie et organisation des systèmes pluvieux, observée par radar.

Pour étendre l'analyse au-delà des années couvertes par le radar, nous avons dans (Depraetere et al. 2009) proposé une méthode pour typographier les événements et ainsi détecter des évolutions long terme, sur la base de leur signature spatio-temporelle sur un réseau pluviographique dense. L'étude de la propagation d'un système pluvieux sur une zone présente également un intérêt pour la mise en œuvre de méthodes d'interpolation intelligentes pour la production de champs de pluies à partir de mesures ponctuelles dispersées. De telles techniques de krigeage dit 'lagrangien' parce qu'il tient compte du déplacement des cellules pluvieuses ont été testées dans Vischel et al. (2011) et sont illustrées ci-après.

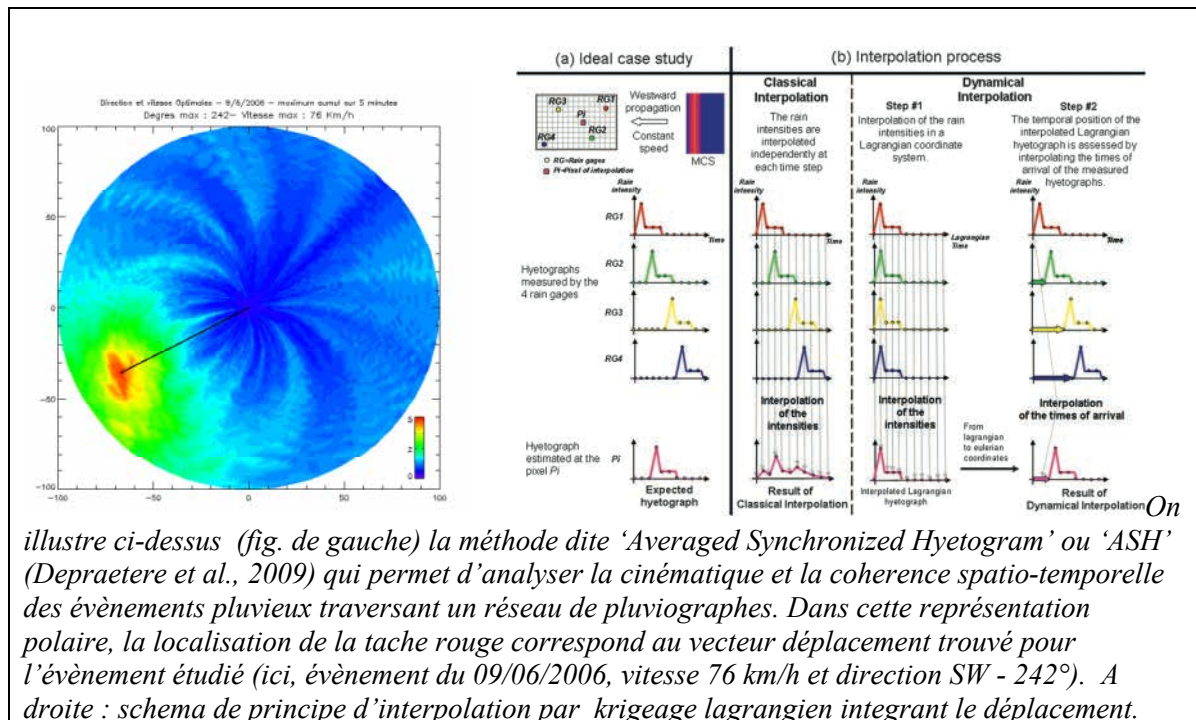
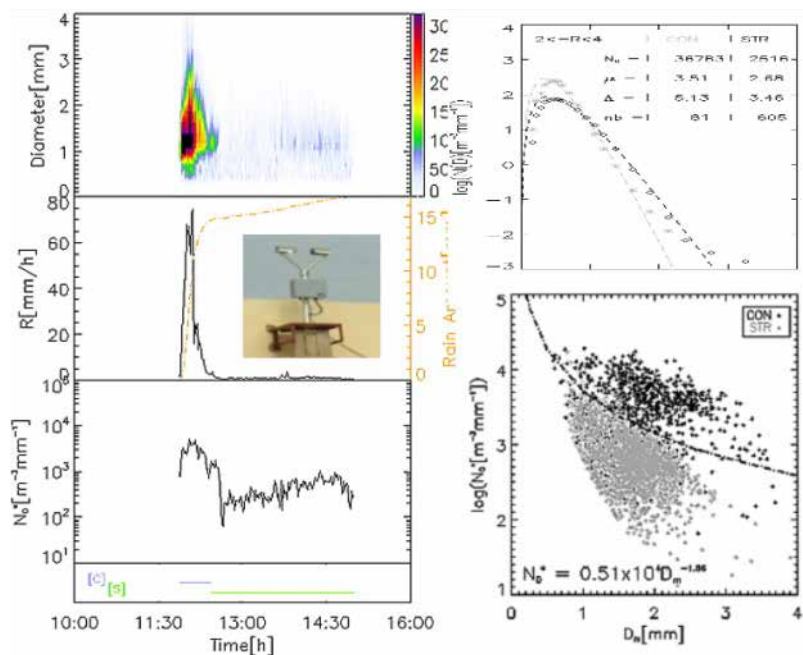


Figure 15 : extraits de Depraetere et al. (2009) et Vischel et al. (2011) illustrant la détection de la direction et vitesse de déplacement d'un système pluvieux et son utilisation pour l'interpolation dynamique des champs de pluie.

Au cœur des processus convectifs et stratiformes de génération des pluies - Données disdrométriques :

La précipitation en surface est le résultat de processus thermodynamiques, dynamiques et microphysiques. Ces différents processus conduisent à la formation des gouttelettes ou cristaux de nuages qui, à leur tour, vont produire de la précipitation en phase glacée ou liquide selon la température (Uijlenhoet et al. 2003). La pluie est constituée d'un ensemble de gouttes de différentes classes de diamètres et de vitesses de chute. Cette distribution granulométrique est désignée par l'acronyme anglais DSD (Drop Size Distribution, ou RSD pour Raindrop Size Distribution) ou distribution de la taille des gouttes en français et que l'on note aussi $N(D)$.

Comme mentionné plus haut, la distribution granulométrique (et sa variabilité) détermine le lien entre les variables mesurées par radar et l'intensité de pluie au sol. La connaissance de la DSD et sa modélisation en particulier sont d'une importance capitale aussi bien en météorologie (modélisation des nuages, estimation quantitative de la pluie, prévision etc.) que dans le domaine des télécommunications pour l'évaluation de l'atténuation. Depuis les travaux de (Marshall and Palmer 1948) plusieurs modèles de distributions de la taille des gouttes ont été proposés à partir de données issues de mesures disdrométriques. Ce sont les modèles exponentiels, gamma et log-normal entre autres. Ochou et al. (2007) ont montré que la DSD des pluies en Afrique de l'Ouest pouvait être décrite par le modèle log-normal. A partir des données de disdromètres recueillies pendant les récentes campagnes de l'expérience AMMA sur le Bénin, dans (Moumouni et al. 2008) nous avons trouvé que les DSD observées pouvaient être modélisées par les modèles gamma et log-normal et établi une paramétrisation robuste de ces modèles, en fonction de l'intensité pluvieuse (cf figure ci-dessous).



G) Evolution du spectre granulométrique des gouttes (DSD) au cours du passage d'une ligne de grain - photo du spectrogranulomètre optique utilisé. D) calage des fonctions gamma sur les spectres stratiformes (noir) et convectif (gris), leurs domaines différenciés dans l'espace des paramètres.

Figure 16 : tiré de Moumouni et al. (2009) : Distributions granulométriques observées en Afrique, mise en évidence d'un modèle différencié dans les pluies convectives et stratiformes.

Ces résultats ont été acquis pendant la période d'observations intensive du programme d'Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine (EOP AMMA, 2005-2007) pendant laquelle trois spectro-pluviomètres optiques ont été successivement installés dans la région de Djougou au Bénin. Au total 93 évènements pluvieux ont été analysés, à partir des spectres granulométriques intégrés sur une minute. L'analyse de cet échantillon robuste (12000 spectres) a mis en évidence plusieurs aspects des distributions granulométriques observées au Bénin, en climat soudanien :

- les DSD sont caractérisées par une convexité marquée et bien modélisées par le modèle gamma avec un facteur de forme assez fort,
- des processus de formation des précipitations distincts entre les parties convectives et stratiformes induisent des caractéristiques disdrométriques différentes, avec des spectres plus étroits dans la partie convective et une discrimination claire des deux types de pluie si les spectres sont analysés dans un espace [nombre de goutte, diamètre moyen], des résultats en cohérence avec les observations reportées pour d'autres régions tropicales.

Une méthode de classification des parties convective et stratiforme proposée par Testud et al. (2001) a été mise en œuvre sur ces données. On trouve que les pluies convectives occupent 1/3 du temps de pluie et contribuent pour 75% au cumul total tandis que ces chiffres sont

respectivement de 2/3 du temps pluvieux pour 25 % du cumul en ce qui concerne les pluies à caractère stratiforme.

Les résultats sur le déficit en gouttes de faibles diamètres sont importants, ils confirment les observations réalisées précédemment en Afrique de l'Ouest (Ochou et al., 2007) mais qui avaient été questionnées à cause du type de disdromètre utilisé (à impact) moins précis pour la mesure des petites gouttes. Ces observations ouvrent des questions sur la microphysique sous-jacente et les impacts de cette granulométrie et de sa variabilité sur les estimations de pluie par télédétection en Afrique de l'Ouest.

A partir de ces données on a également analysé la variabilité des relations entre variables radar-pluie au sein de et entre les événements pluvieux (Gosset et al. 2010) La comparaison avec la littérature montre une bonne cohérence de ces relations pour les lignes de grain d'autres zones en Afrique de l'Ouest, mais des particularités par rapport à d'autres régions tropicales. Ces modèles granulométriques ont servi de base pour la mise en place des algorithmes d'estimation de pluie par atténuation micro-onde dans le projet RainCell, discuté plus loin.

Au cœur des processus convectifs et stratiformes de génération des pluies - Microphysique par radar et préparation des mesures satellitaires :

Je l'ai mentionné, la précipitation en surface est le résultat de processus thermodynamiques, dynamiques et microphysiques à l'œuvre en altitude au cœur des systèmes pluvio-nuageux. Les hydrométéores en phase liquide ou solide de ces parties nuageuses interagissent entre eux et croissent pour produire la pluie. Ce sont ces hydrométéores qui influencent les mesures satellitaires ; ce sont eux que les modèles numériques doivent représenter pour produire une quantité de pluie réaliste. Il est donc important d'en préciser la nature. L'exploration tridimensionnelle faite par radar et l'information supplémentaire des variables polarimétriques peuvent aider à caractériser les hydrométéores et leur distribution au sein des systèmes pluvieux. De nombreuses campagnes expérimentales en Europe et aux USA ont exploité les radar en ce sens, essentiellement sur la base d'instruments lourds en bande S ou C (Tabary and Scialom 2001). La possibilité de transposer ce type d'analyse dans les systèmes pluvieux africains et avec un radar léger paraissait questionnable jusqu'à nos travaux sur l'exploitation micro-physique d'Xport.

Une première étude, réalisée autour de la thèse de A Kadjo, consistait à vérifier sur l'ensemble du domaine couvert par le radar, les analyses sur la distribution des gouttes, et la différence entre les parties convectives et stratiformes, obtenues à l'échelle ponctuelle du disdromètre dans la thèse de Moumouni (Moumouni et al. 2008). Dans Koffi et al. (2014) nous mettons en œuvre une méthode analytique pour déduire les paramètres caractéristiques de la distribution granulométrique (nombre et diamètre médian, par exemple) de fonctions polynomiales des variables polarimétriques (Z, Zdr, Kdp). La figure ci-dessous illustre un des résultats. En parfaite cohérence avec les résultats disdrométriques, le radar distingue des caractéristiques différentes entre les parties convective et stratiforme.

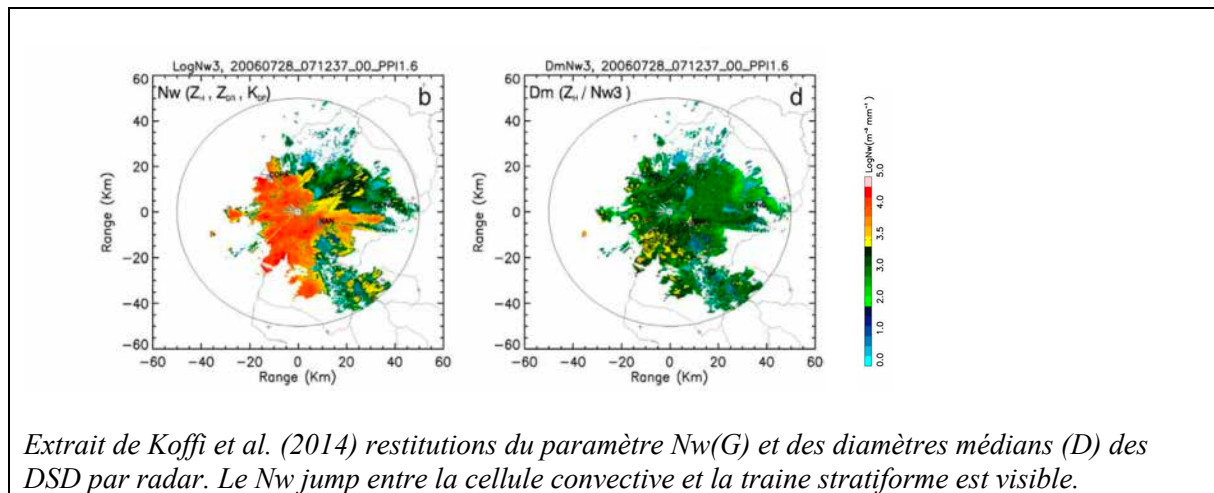


Figure 17 : Tirée de Koffi et al. (2014)- La restitution de la DSD à partir des données radar polarimétriques retrouve des caractéristiques différentes entre les parties convectives et stratiformes – En cohérence avec les analyses disdrométriques de Moumouni et al. (2008).

Pour aller plus loin dans l'exploration des processus de génération de la pluie au sein des systèmes nous nous sommes intéressés à la structure verticale et à la nature des hydrométéores dans les parties supérieures – celles que détecte la mesure satellite micro-onde. Cette partie de mes travaux fait le lien entre l'exploration des systèmes à fine échelle que permet le radar, et les besoins du système d'observation global qui s'appuie sur la constellation de satellites météorologiques. La base de l'estimation satellitaire de la pluie est l'existence de relations robustes entre les variables que peut mesurer un satellite météorologique (i.e. des températures de brillance sur une gamme de fréquence allant du visible aux micro-ondes) et la pluie en surface. Sur des échelles de temps longues (mois ; semaine) et dans les régions tropicales, il a été montré que des méthodes statistiques basées sur l'occurrence de nuages hauts, associés à la convection profonde, permettaient de quantifier la pluie (Richards and Arkin 1981). Ceci a posé les bases de la mesure de pluie à partir des capteurs infra-rouge à bord des satellites géostationnaires comme MeteoSat en Afrique (Bergès et al. 2010). Pour accéder à une information quantitative à l'échelle journalière ou plus fine, et pour détecter les parties pluvieuses des systèmes et pas seulement la couverture nuageuse, les capteurs micro-ondes sont nécessaires (Hou et al. 2014; Viltard et al. 2006). Ces capteurs utilisent plusieurs bandes de fréquences complémentaires sensibles au coefficient d'émission de l'eau liquide ou aux propriétés diffusives des cristaux de glace à différents niveaux d'altitude du profil nuageux. Plusieurs méthodes ont été développées pour lier un profil d'atmosphère à une signature spectrale micro-onde (Stephens and Kummerow 2007). Celles-ci sont basées sur des classifications à apprentissage empirique et sur des modèles physiques de transfert radiatif. Parmi les algorithmes de ce type on peut citer GPROF (Kummerow et al. 2001), BRAIN (Viltard et al. 2006) et GSMaP (AONASHI et al. 2009). Ces méthodes bayésiennes permettent d'associer à chaque signature spectrale un profil d'atmosphère puis un taux de pluie au sol. La paramétrisation des propriétés des hydrométéores glacés dans ces modèles est très sensible, mais également mal contrainte faute d'observations. Un des objectifs de la campagne expérimentale pré-Megha-Tropiques de Niamey était de documenter cette micro-physique glacée pour affiner l'algorithme d'estimation BRAIN développé par les équipes françaises. Nous avons développé à cette fin des méthodes de caractérisation des hydrométéores adaptées

aux mesures Xport, et avons pu les confronter aux mesures microphysiques de l'avion instrumenté de SAFIRE présent à Niamey pendant les campagnes de 2010 (Fig. 8).

Les figures ci-après présentent les travaux de Cazenave et al. 2016. et Alcoba et al., 2016, deux études complémentaires mettant en avant la nature différenciée des hydrométéores glacés dans les parties convectives et stratiformes des lignes de grain. Dans Cazenave et al. (2016) nous avons mis en oeuvre une méthode de classification des hydrométéores (graupels/grêlons; agrégats/neige; cristaux ; bruine, pluie faible ou intense) basée sur la logique floue, pour exploiter les différences dans la signature polarimétriques de ces hydrométéores. Le principe de la méthode est illustré Fig. 18; les différents hydrométéores occupant des domaines disjoints dans l'espace des variables polarimétriques (réflectivité ; réflectivité différentielle ; saut de phase différentiel ; corrélation cross-polarimétrique), le type le plus probable dans chaque porte radar est déterminé sur cette base.

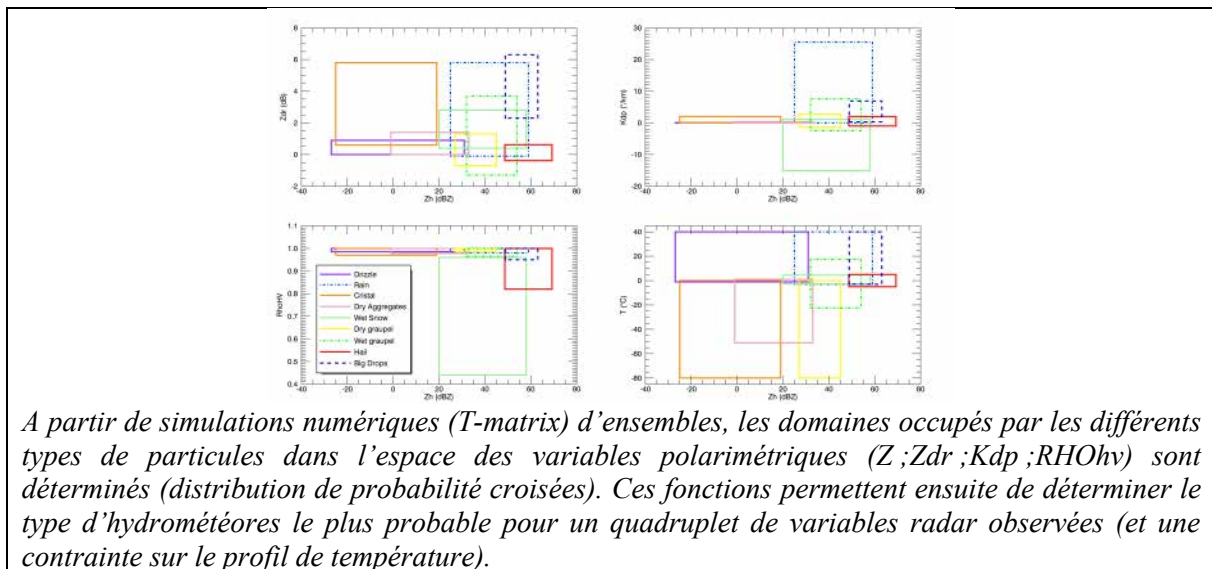


Figure 18 : Tirée de Cazenave et al., 2016 – Principe de la classification des hydrométéores par logique floue.

La méthode a été validée par comparaison avec les mesures de l'avion instrumenté et son application a permis d'établir un modèle d'évolution temporelle de la microphysique au sein des lignes de grains tropicales, comme détaillé Figure 19.

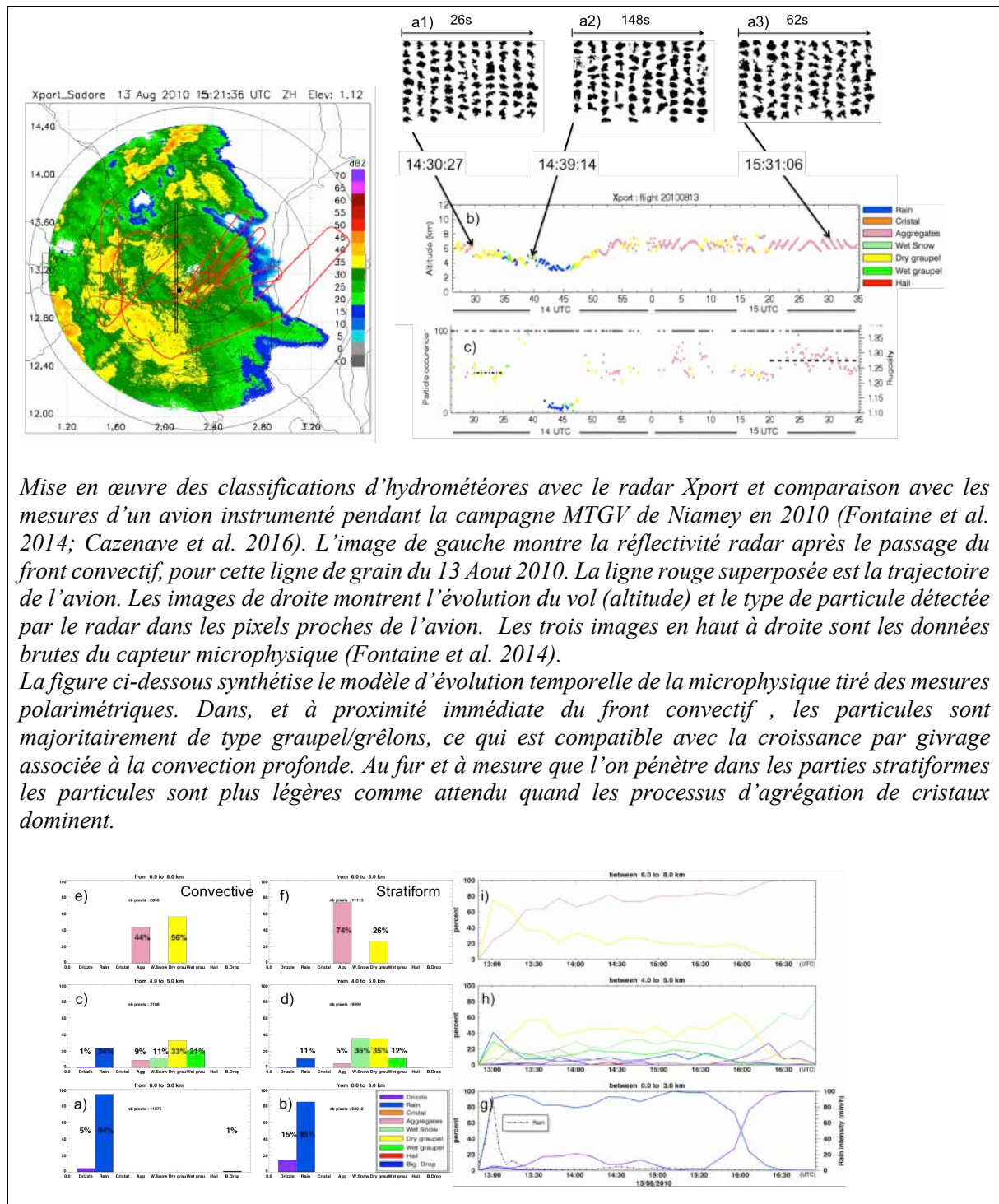


Figure 19 : Tirée de Cazenave et al., 2016; validation in situ de la classification d'hydrométéores et schéma d'évolution temporelle de la microphysique dans les lignes de grain.

Dans Alcoba et al. (2016) nous allons plus loin dans la caractérisation des hydrométéores en phase glacée en testant l'apport du radar pour paramétrer la relation masse/volume des hydrométéores (Fontaine et al., 2014). Ici l'information radar est assimilée dans un modèle physique simplifié représentant le processus de fonte des cristaux lorsqu'ils chutent à travers l'isotherme 0. La fonte crée en effet un artefact -dit bande brillante- dans les mesures radar, qui peut être exploité pour retrouver une information sur la nature des hydrométéores glacés :

s'ils sont très denses, de type grêlon, la brillante est peu visible ; s'ils sont légers de type agrégats elle est au contraire très marquée. Sur cette base le concept d'inversion du profil vertical de réflectivité a été proposé (Kirstetter et al. 2013). Nous l'avons mis en œuvre avec Xport pour analyser l'évolution des processus dans les lignes de grain africaines et comparé avec les mesures avion. La figure 20 illustre la méthode et la figure 21 quelques résultats de nos travaux à Niamey (Alcoba et al., 2016).

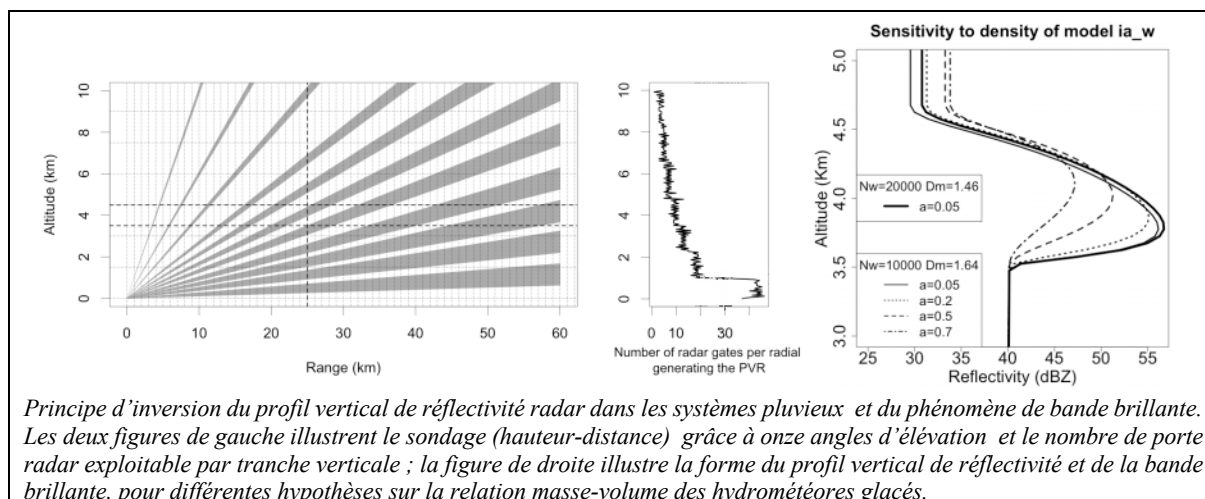


Figure 20 : Tirée d'Alcoba et al. (2016), principe de l'analyse du profil vertical de réflectivité radar pour accéder à la microphysique.

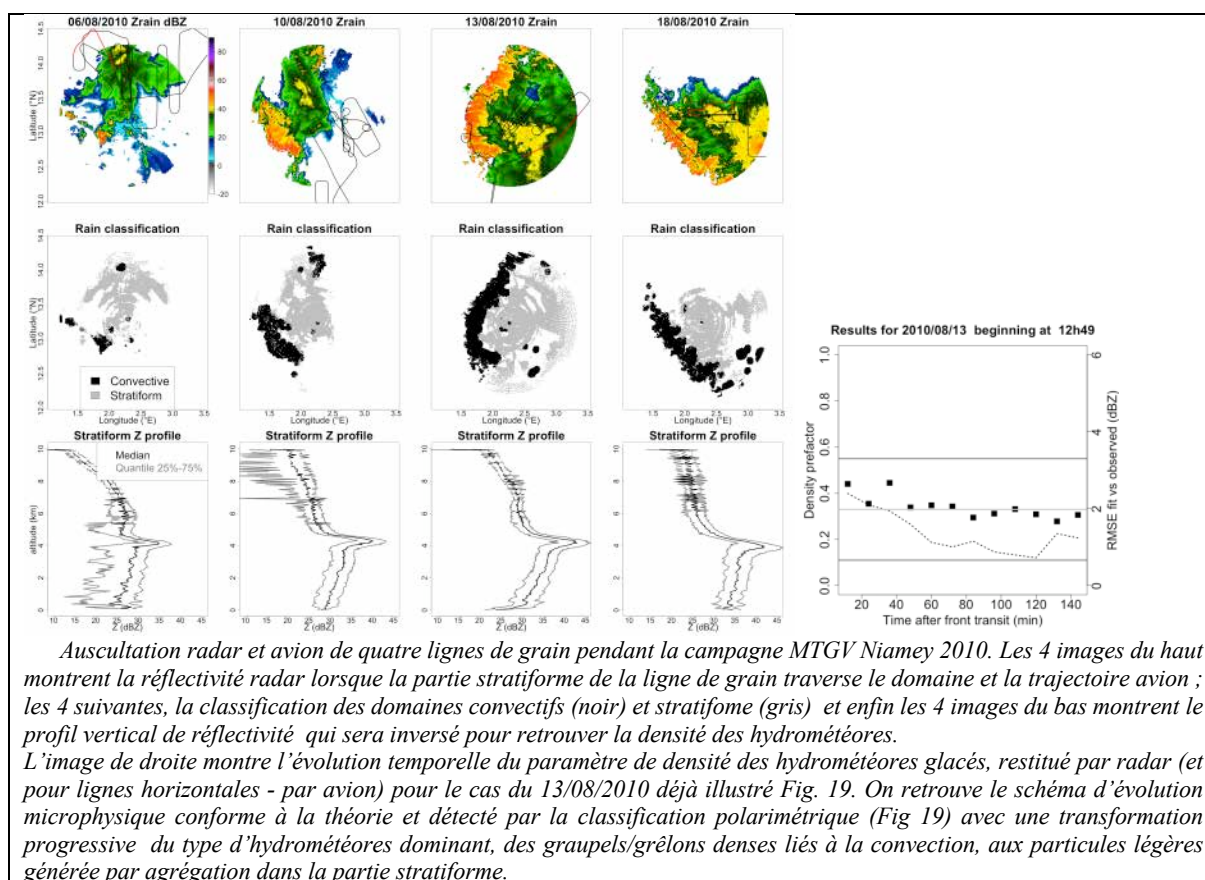


Figure 21 : Tirée d'Alcoba et al. (2016), analyse des propriétés microphysiques fines grâce à l'inversion du profil vertical de réflectivité.

Finalement, l'analyse de la microphysique au sein des lignes de grain africaines avec différents capteurs et méthodes fait émerger une vision cohérente des processus à l'œuvre au cours de l'évolution des systèmes pluvieux. Les différences observées par disdromètre en surface (Moumouni et al., 2008) entre les pluies convectives et stratiformes, traduisent bien les mécanismes de génération des gouttes en hauteur. Ces différences dans les propriétés des gouttes et cristaux affectent les propriétés électromagnétiques et donc la signature de ces hydrométéores par télédétection micro-onde (active ou passive ; sol ou satellitaire) et devraient être considérées par les algorithmes et les modèles numériques de temps.

En résumé de cette partie radar :

Mes travaux sur l'analyse des systèmes pluvieux autour des campagnes menées en Afrique avec le radar Xport ont clairement validé ce concept de radar léger, transportable, relativement peu coûteux, même dans un contexte tropical où l'atténuation par la pluie risquait de limiter les mesures. Les perturbations du signal radar lors de sa propagation dans la pluie peuvent au contraire être exploitées à bon escient grâce à la diversité de polarisation. Nous avons montré que ce type d'instrument pouvait apporter une information quantitative sur les pluies en surface et sur les processus micro-physiques de génération des précipitations, en altitude. Nous avons documenté les caractéristiques des systèmes pluvieux que nous avons observés (plusieurs dizaines de cas) et communiqué ces informations qui peuvent être intégrées dans les algorithmes d'estimation des précipitations ou utilisées pour valider les modèles atmosphériques. Autour de ces travaux j'ai accompagné 5 thèses de doctorat, dont une majorité d'étudiants africains, avec l'objectif de développer une expertise régionale sur des techniques potentiellement intéressantes pour renforcer les réseaux d'observation météorologiques en Afrique (et plus généralement dans les zones tropicales), par exemple pour la surveillance des risques hydrométéorologiques dans les grandes agglomérations à forte croissance de la zone intertropicale. Quelques exemples d'utilisation opérationnelle de radars bande X en zone tropicale émergent, au Brésil en particulier (pour la surveillance renforcée des villes de Fortaleza et Sao Paulo). En Afrique ce genre d'instruments n'est pas encore déployé (sauf en Afrique du Sud) car même si l'investissement initial est relativement faible comparé aux radars en bande S ou C, la maintenance et l'opération d'un radar requièrent un budget récurrent et des équipes techniques spécialisées dont les services opérationnels ou les centres de recherche africains ne disposent pas aujourd'hui. En attendant que le niveau de développement des régions tropicales progresse, le système d'observation de la terre par satellite apporte déjà des informations capitales sur la pluie, comme développé dans la section suivante.

III.2 Observation satellitaire des précipitations et applications hydrologiques : le cadre Megha-Tropiques

Contrairement au radar pour lequel j'ai développé des algorithmes d'estimation, mon implication dans les produits pluviométrique satellitaire a été du côté de la validation et de l'utilisation -critique- de ces produits dans un cadre hydrologique. J'ai rejoint l'équipe scientifique de la mission satellitaire franco-indienne Megha-Tropiques en 2009, date à laquelle le CNES et le responsable scientifique (PI) m'ont proposé de concevoir et coordonner le plan international de validation de ce satellite. Cela a été le début d'une aventure humaine et scientifique passionnante car les enjeux autour de la mesure satellitaire de la pluie sont vastes, des questions amont sur la qualification de ces produits et la compréhension de leurs incertitudes, aux applications aval dans le domaine des risques hydrométéorologiques.

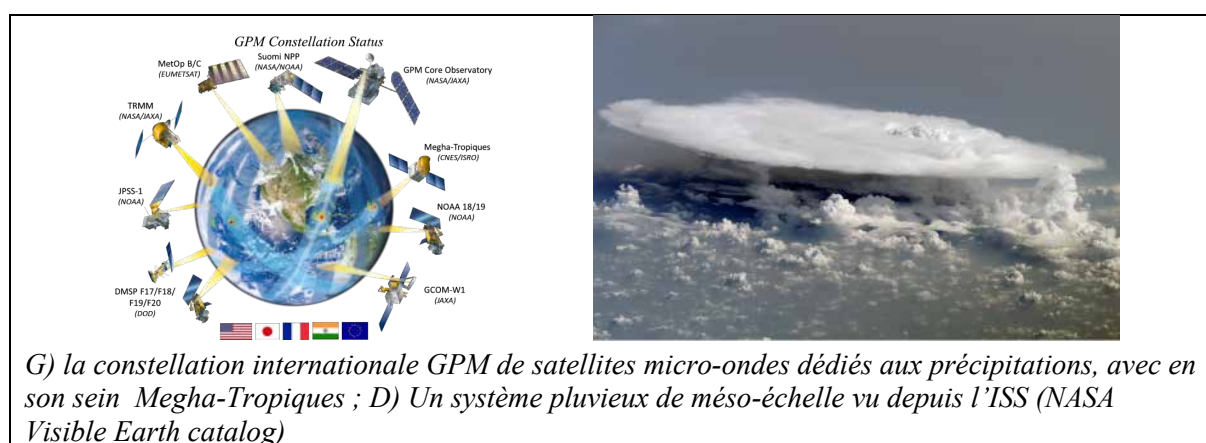


Figure 22, *Raisons d'espérer mais difficultés autour de la mesure satellitaire de la pluie : la constellation GPM illustre l'effort international pour améliorer le SO dédié aux précipitations, mais la structure complexe des systèmes pluvio-nuageux rend cette estimation difficile.*

Les figures 22 et 23 résument certains enjeux de la mesure satellitaire des précipitations. La figure 23 montre un chapelet de systèmes convectifs de méso-échelle (MCS) traversant l'Afrique de l'Ouest au cœur de la saison des pluies ou Mousson Ouest africaine (Mathon et al. 2002; Mathon and Laurent 2001). C'est cette succession d'évènements pluvieux, issus de la convection profonde et organisée à l'œuvre au sein de la zone inter-tropicale de convergence (ITCZ) qui donne tout son caractère à la saison des pluies : le cumul annuel est conditionné avant tout par le nombre de ces lignes de grains (Panthou et al. 2015; D'Amato and Lebel 1998), la date des premiers évènements et leur fréquence est cruciale pour la saison agricole (Ramarohetra et al. 2013a), l'intensité particulière et/ou l'occurrence rapprochée de quelques évènements peut amener des inondations dévastatrices qui marqueront durablement la zone touchée (Descroix et al. 2012). Les images infra-rouge des satellites géostationnaires détectent bien la nébulosité associée à ces MCS ; les sommets de nuages sont d'autant plus hauts donc froids, que la convection est profonde. Mais le lien entre l'intensité de la convection et celle de

la pluie au sol est statistique et indirect. Des méthodes basées sur le seuillage des images infra-rouge ont été utilisées depuis les années 80 pour estimer la pluie en surface mais elles sont entachées d'erreurs et ne donnent une indication quantitative que pour les pluies cumulées sur plusieurs jours (Jobard et al. 2011; Bergès et al. 2010; Roca et al. 2010). Pour accéder à une information pertinente sur les précipitations l'utilisation des micro-ondes est nécessaire. Les radiomètres micro-ondes pour des applications météorologiques ont fait leur apparition dans les années 90 sur des satellites défilants dont l'orbite basse est compatible avec ces fréquences élevées. L'image *b*) illustre le passage du satellite TRMM (Kummerow et al. 2000) et de son radiomètre TMI capturant un instantané d'un des MCS. Ici il s'agit du canal 85 GHz, très sensible à l'effet diffusif des hydrométéores en phase glace que nous avons évoqués au chapitre précédent à propos du radar polarimétrique. La structure de type ligne de grain, déjà observée par radar précédemment, est visible avec un arc de cellules convectives marqué à l'avant, et une partie stratiforme moins intense mais plus étendue à l'arrière. On remarque en comparant les images *a*) et *b*) les complémentarités des capteurs infra-rouge sur satellite géostationnaire et micro-onde sur satellite défilant. Les premiers donnent une image très résolue (kilométrique) et chaque demi-heure de la dynamique du sommet des nuages, les seconds apportent une information pertinente sur la pluie, mais avec un échantillonnage spatial (fauchée réduite) et temporel (revisite toutes les quelques heures) partiel. Les produits pluviométriques satellitaires les plus récents combinent ces deux sources d'information selon diverses techniques (Stephens and Kummerow 2007). C'est le cas en particulier du produit TAPEER (Roca et al. 2010) développé dans le cadre de Megha-Tropiques et auquel je me suis intéressée. L'image *c*) ci-dessous illustre un des objectifs d'applications de ces produits satellitaires : l'analyse et la prévision des événements extrêmes comme ici, l'inondation record de la ville Niamey en 2020 sous l'effet des précipitations sur de petits affluents du fleuve Niger en amont. L'utilisation hydrologique des produits pluviométriques est exigeante ; elle requiert une bonne connaissance des incertitudes sur ces produits et une très bonne représentation de la distribution des intensités pluvieuses, les plus fortes notamment qui impactent le ruissellement (Gosset et al. 2013). Ces questions ont été le fil conducteur de mes travaux sur les précipitations observées par satellite.

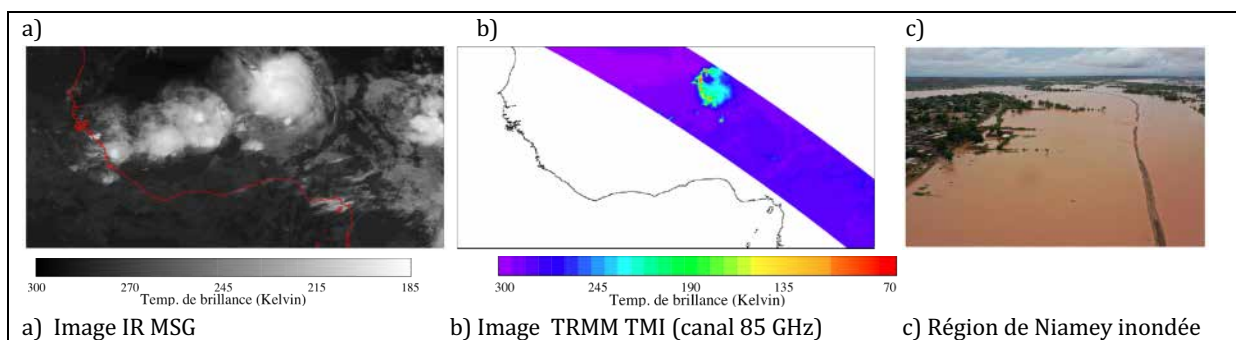


Figure 23, suivi des systèmes pluvio-nuageux en Afrique de l'Ouest par satellite et enjeu des inondations à Niamey.

Nous l'avons vu, une caractéristique des pluies tropicales est leur grande variabilité spatio-temporelle, liée à la nature convective des systèmes pluvieux. Nos études à partir des réseaux sols (radar ; pluviomètres ; disdromètres) estiment que les pluies intenses associées au passage des cellules convectives expliquent 70 à 80 % du cumul annuel en Afrique de l'Ouest, pourtant en un point donné la durée cumulée annuelle de ces pluies intenses ne dépasse pas quelques heures. On comprend donc le défi qu'elles représentent pour l'observation satellitaire. Le système d'observation actuel combine trois types de données : i) l'information globale sur la couverture nuageuse issue des capteurs visibles et infra-rouge des satellites géostationnaires, résolution type de 4 km et revisite demi-horaire ; ii) les capteurs micro-ondes passifs de la constellation des satellites défilants (12 actuellement dans la constellation GPM) qui apportent une information indirecte sur les profils verticaux d'hydrométéores ; les produits de niveau 2 (pluie instantanée en surface) dérivés sont à une résolution de 10 km à quelques dizaines de km (Kidd et al. 2018) chaque 3 h environ. Enfin iii) les radar nuage ou pluie sur satellite, comme l'ancien TRMM-PR, puis CLOUDSAT et aujourd'hui le GPMcore DPR (Hou et al. 2008), apportent une information très résolue verticalement (100 à 250 m) sur les contenus en eau et glace, mais sur une fauchée réduite. Ces trois types d'information sont utiles à différents stades d'élaboration des produits pluviométriques et pour différents usages. Pour des études de cas ou de processus atmosphériques, les profils verticaux du radar sont plus adaptés ; pour les applications hydrologiques, les produits combinés multi-satellites, fournissant des cumuls sur grille spatiale et pas de temps réguliers sont les plus utilisés. Le Produit TAPEER (Chambon et al. 2013) développé dans l'équipe Megha-Tropiques rentre dans cette seconde catégorie. TAPEER pour Tropical Analysis of Precipitation with an Estimation of ERror, fournit des cumuls de pluie journaliers sur toute la bande inter-tropicale, avec une résolution spatiale de 1 degré. L'algorithme s'appuie sur le principe de l'Universal UGPI pour combiner données micro-ondes et IR. L'idée est d'entraîner les données IR des géostationnaires (typiquement 48 images journalières à résolution 4 km sur la zone Afrique MSG) grâce aux estimés de pluie instantanées issues des passages micro-onde (quelques passages journaliers ; résolution variable selon satellite) ou produit de niveau 2. Le principe de TAPEER est de calculer le cumul de pluie journalier comme le produit d'une fraction pluvieuse journalière par une intensité pluvieuse moyenne. L'intensité pluvieuse moyenne est tirée des estimés micro-ondes ; la fraction pluvieuse correspond à la proportion journalière de pixels IR classés pluvieux. La version officielle du produit, TAPEER 1.5 (telle que distribuée par le pôle AERYYS) est basée sur l'estimateur micro-onde BRAIN (Viltard et al., 2006). TAPEER utilise une fenêtre d'entraînement spatio-temporelle de 5° et 3 jours autour du pixel/jour d'estimation pour ajuster les 2 paramètres de l'algorithme : i) le seuil de Tb IR au-dessous duquel un pixel géostationnaire est considéré comme pluvieux et ii) l'intensité de pluie moyenne. Dans le cadre des activités Megha-Tropiques (MTGV), j'ai contribué à valider le produit final TAPEER et à le comparer à l'état de l'art, à qualifier le produit de niveau 2 BRAIN, et également à réfléchir (Guilloteau et al., 2018) aux limites en résolution du système d'observation et aux méthodes de descente en échelle.

Les figures ci-dessous illustrent les nombreuses analyses réalisées dans le cadre MTGV pour préparer la mise à disposition des produits pluie MT de niveaux 2 (BRAIN) et 4 (TAPEER). Une des difficultés de la validation dans la bande inter-tropicale est le manque de données in situ pour établir une référence robuste – manque de données qui confirme d’autant l’intérêt du satellite. C’est un véritable souci pour la qualification des données de niveau 2, les pluies instantanées à résolution de quelques km sous l’orbite défilante de satellite micro-ondes. Dans les zones tempérées ces produits sont comparés aux réseaux radar opérationnels (Kidd et al. 2018). Nous avons utilisé un faisceau de données pour qualifier BRAIN dans la bande tropicale : les réseaux pluviographiques denses du SO AMMA-CATCH (Kirstetter et al. 2013) des campagnes radar expérimentales en Afrique et au Brésil (do Amaral et al. 2018), le radar aéroporté de TRMM CATCH (Kirstetter et al. 2013) ou comme ci-dessous les données des radar Outre-Mer de Météo-France.

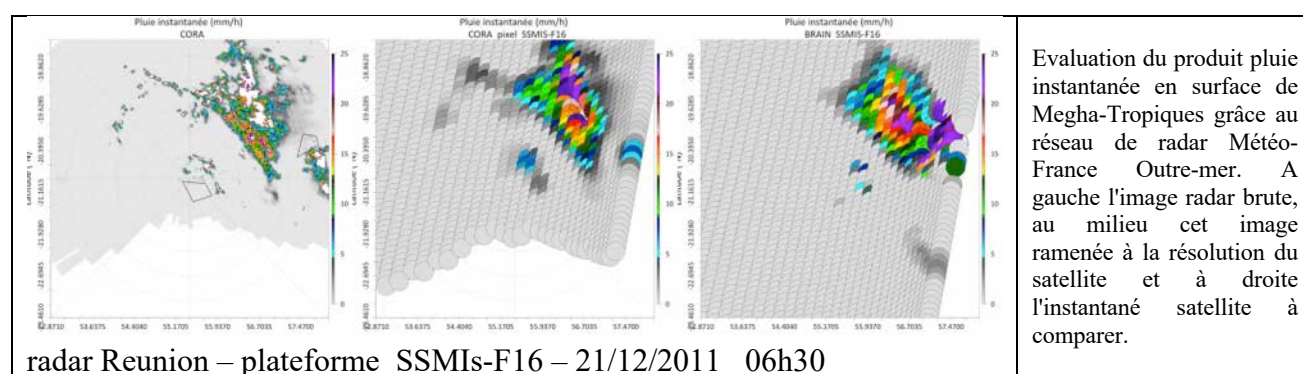


Figure 24, validation des estimation satellitaires micro-ondes avec les radar de MétéoFrance Outre-Mer.

Dans Kirstetter et al. (2013) nous confrontons dix années (1998-2007) de données de pluie instantanées issues de l’algorithme Megha-Tropiques ‘BRAIN’ testé sur le radiomètre du satellite TRMM (TMI) aux champs de pluie coïncidents au sol, élaborés à partir des réseaux pluviographiques AMMA-CATCH du Bénin et du Niger, d’une densité exceptionnelle pour les Tropiques, de plus de 20 pluviomètres pour de 1 degrés carré. Ce travail met en évidence la bonne qualité globale de BRAIN-MT sur les deux zones AMMA-CATCH ainsi que sur la région Afrique de l’Ouest où le produit est comparé aux pluies du radar de TRMM. Les figures ci-dessous issues de ces travaux illustrent différents aspects de nos analyses. Les deux images de haut sont une analyse de l’incertitude sur la référence sol elle-même, un thème récurrent de nos travaux, important mais peu considéré dans la littérature sur la validation. Une analyse basée sur la théorie du krigeage et la structure spatiale de la pluie permet de ne sélectionner pour la comparaison que les pixels de référence obéissant à un critère de qualité objectif, limitant ainsi la surestimation des incertitudes du produit satellitaire. L’image du bas illustre la variabilité des performances des produits satellitaires au sein du gradient eco-climatique d’Afrique de l’Ouest. Les sites du Bénin et du Niger sont distants d’à peine 500 km, mais l’environnement humide des systèmes au Sud et très sec dans la zone sahélienne conduisent à des profils atmosphériques et des signatures micro-ondes différentes ; la ré-évaporation des pluies au Sahel peut expliquer la surestimation systématique de Brain dans cette zone.

L'existence au Bénin d'une convection locale et non organisée, mentionnée lors des analyses radar, peut également expliquer les différences. Cette variabilité géographique des performances a été remarquée dans d'autres études, comme celles que nous avons menées au Brésil (do Amaral et al. 2018) ; elle a conduit la communauté à faire évoluer les produits en améliorant les bases de profils utilisés dans l'inversion bayésienne et en tenant mieux compte de données auxiliaires comme les propriétés micro-ondes des surfaces.

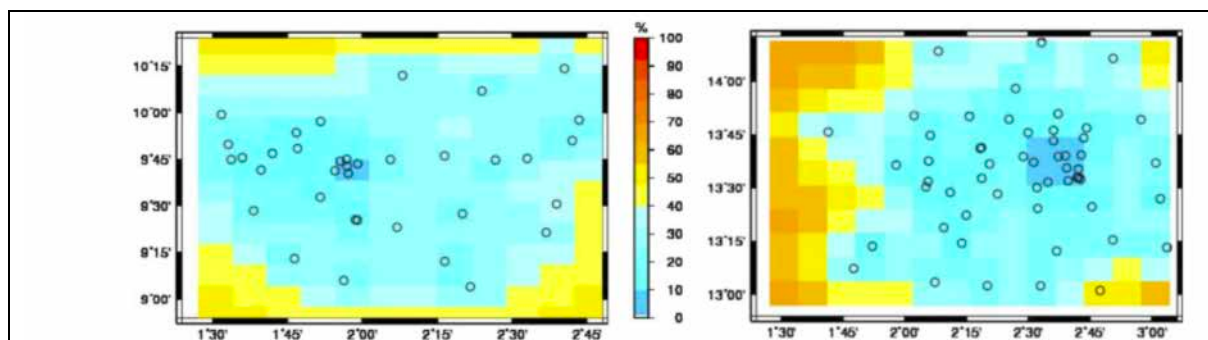


Figure 1. Maps of kriging error in per cent of the rainfall field variance at 5 min time-step and at BRAIN-TMI spatial resolution for the (left) Benin and (right) Niger networks. Circles indicate the effective positions of the rain-gauges. This figure is available in colour online at wileyonlinelibrary.com/journal/qj

Evaluation des estimation satellitaires micro-ondes en Afrique de l'Ouest à partir des réseaux pluviographique AMMA-CATCH. Haut : carte des variance d'estimation des champs haute résolution de référence au sol, calculées par krigeage.

Bas : Mise en évidence d'un biais d'estimation différent entre les zones soudaniennes et sahéliennes, imputable aux différences de processus et structure 3D des systèmes.

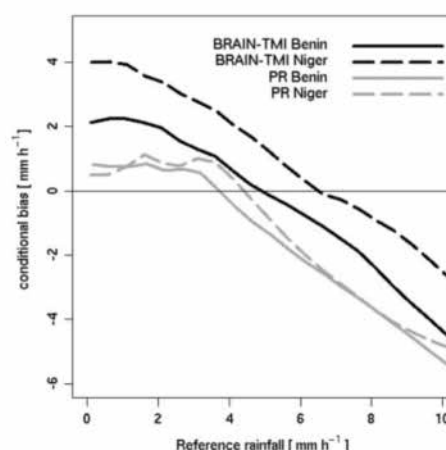
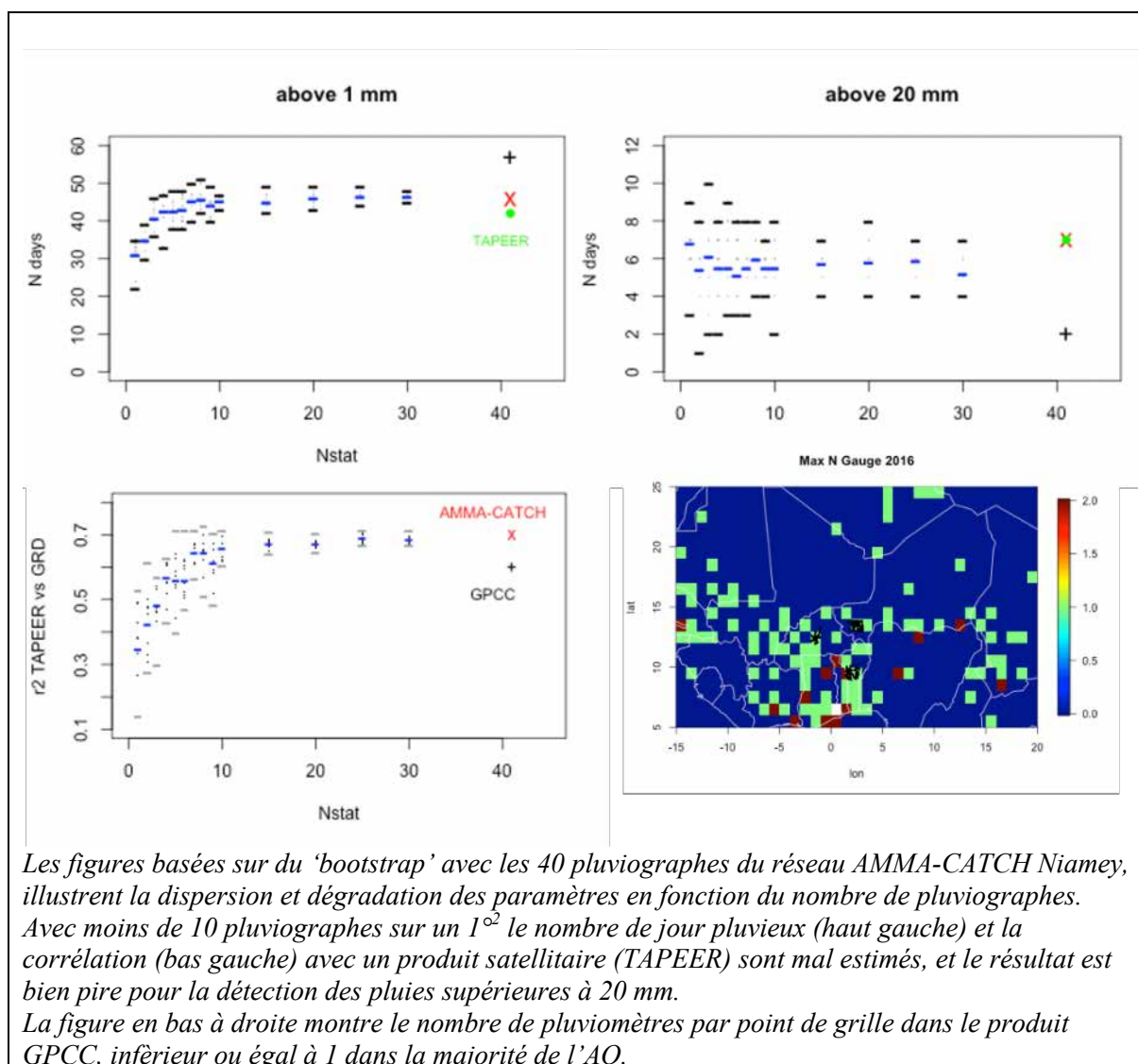


Figure 11. Conditional median of residuals as a function of GV for BRAIN-TMI (black lines) and PR (grey lines), over Benin (solid lines) and Niger (dotted lines).

Figure 25, tirée de Kirstetter et al. (2013) *Evaluation des estimation satellitaires micro-ondes en Afrique de l'Ouest avec prise en compte de l'incertitude de la référence et mise en évidence des différences zonales.*

La qualification des produits grillés à 1 degré x 1 jour requiert également des précautions méthodologiques. La figure ci-dessous (Gosset et al. 2018) illustre par des tests aléatoires, en sous-échantillonnant un réseau pluviographique dense, l'effet de la qualité du réseau pluviométrique sur les performances apparentes des produits satellitaires. Elle met en avant en particulier l'incertitude sur la qualification de la distribution des pluie journalières intenses (et qui plus est, extrêmes) si le nombre de pluviomètres par degré carré est insuffisant. L'étude conclut qu'au moins 5 et de préférence 10 pluviomètres sont nécessaires pour établir une référence robuste à cette échelle. Très peu de sites dans la zone tropicale disposent d'un tel réseau et toute étude de validation dans cette zone doit être considérée avec précaution.



Les figures basées sur du 'bootstrap' avec les 40 pluviographes du réseau AMMA-CATCH Niamey, illustrent la dispersion et dégradation des paramètres en fonction du nombre de pluviographes. Avec moins de 10 pluviographes sur un 1°² le nombre de jour pluvieux (haut gauche) et la corrélation (bas gauche) avec un produit satellitaire (TAPEER) sont mal estimés, et le résultat est bien pire pour la détection des pluies supérieures à 20 mm. La figure en bas à droite montre le nombre de pluviomètres par point de grille dans le produit GPCC, inférieur ou égal à 1 dans la majorité de l'AO.

Figure 26, tirée de Gosset et al., 2018, mise en évidence de la qualité du réseau sol de référence sur les performances apparentes des produits satellitaires.

Certaines analyses sont légitimes à l'échelle régionale ; par exemple les études de biais inter-annuels peu affectés par la densité de pluviomètres. Dans la figure ci-dessous le biais relatif de différents produits multi-satellite (sans calibration par pluviomètres) est analysé sur l'Afrique de l'Ouest, sur la période 2012-2017. Outre que TAPEER présente un biais faible sur la zone, on remarque sur tous les produits un gradient de performances, à rapprocher de la figure 25 sur les produits de niveau 2. Les produits finaux propagent les incertitudes des produits intermédiaires, et tendent à surestimer les pluies en région sahélienne et à les sous-estimer dans les régions humides du Golfe de Guinée. Ceci montre que des progrès sont encore nécessaires pour améliorer l'estimation satellitaire de la pluie et comprendre ces différences régionales afin d'améliorer les produits.

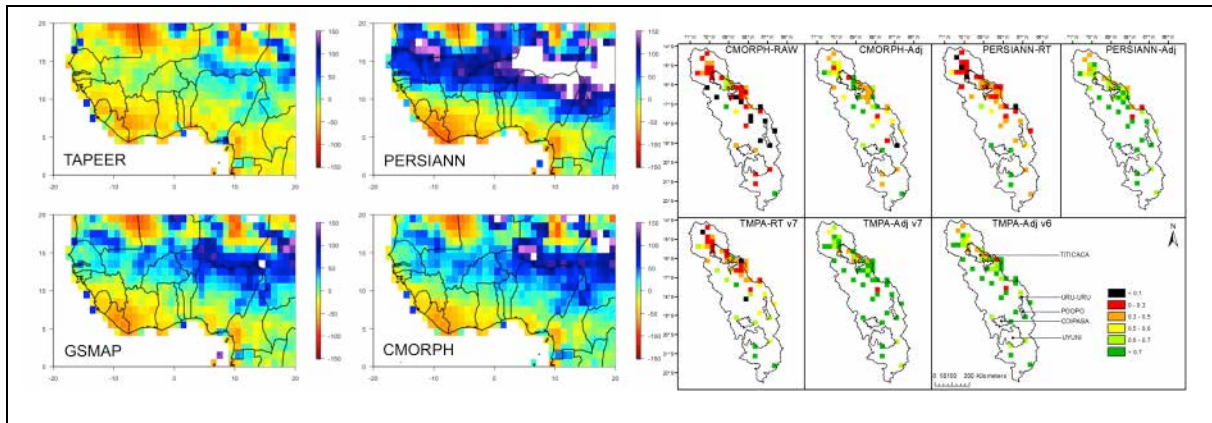


Figure 27, tirée de Gosset et al. (2018) et Satgé et al. (2015) Illustration des biais interannuels de différents produits satellitaires par rapport aux pluviomètres, en Afrique (gauche) et plateau andin (droite).

Les analyses approfondies sur les sites denses AMMA-CATCH (Gosset et al. 2018) et la comparaison avec des travaux antérieurs (Gosset et al., 2013 ; Jobard et al. 2011) permettent malgré tout de mesurer les progrès faits au cours des dernières années, par l'amélioration progressive des algorithmes, nourris par des bases de données récentes, issues d'observations (les 20 ans de données du radar TRMM ; les données du radar GPM core depuis 2014) et de modèles atmosphériques de plus en plus précis et réalistes (Chambon et al. 2020). A l'échelle de 1° 1 jour les produits combinés issus de la constellation GPM et de la dynamique scientifique qui l'accompagne (produits TAPEER ; IMERG de la NASA ; GSMAP de la JAXA) montrent une excellente capacité à reproduire la dynamique de la pluviométrie (corrélations au-dessus de 0.6). Des études complémentaires (Satgé et al., 2015) sur d'autres zones géographiques (Amérique du Sud) confirment les bonnes performances des produits combinés, et montrent que les biais de certains produits uniquement satellitaires sont bien corrigés dans les versions intégrant des pluviomètres et aujourd'hui disponibles à très courtes échéances. Cette qualité rend ces produits pertinents pour une gamme d'applications, des échelles climatiques (Paris et al. 2020) à météorologiques (Roca et al. 2010), et des usages variés. Je me suis intéressée via diverses collaborations et encadrements à l'utilisation de ces produits pluviométriques satellitaires dans le domaine agricole (Ramarohetra et al. 2013) de la santé avec la prévision de certaines maladies à vecteur (Guilloteau et al. 2014) et de l'hydrologie que je détaillerai plus loin.

La faible densité des réseaux in situ dans les Tropiques rend difficile l'analyse des produits à très fine résolution. Pourtant l'accès à une information fiable à fine échelle serait utile pour aborder certaines questions : mieux comprendre la variabilité du couvert végétal naturel ou cultivé ; la réponse hydrologique de petits bassins, montagneux ou urbains ou en contexte endoréique ; analyser certains processus comme les effets orographiques ou les glissements de terrain (Marc et al. 2018). Dans la thèse de Clément Guilloteau nous avons cherché à caractériser la capacité du système d'observation satellitaire actuel à détecter la variabilité pluviométrique aux fines échelles. A partir de méthodes spectrales, par ondelettes, et par comparaison avec nos champs de pluie radar en Afrique, nous avons analysé la résolution effective de produits supposés haute résolution. Guilloteau et al. (2016) mettent ainsi en évidence certaines limites, illustrées ci-dessous. En dessous de 3 heures/20 km, l'énergie

contenue dans le spectre fréquentiel des produits satellitaires s'apparente à un bruit plus qu'à une réelle information sur la pluie : les hautes fréquences sont bien présentes mais les *patterns* pluvieux ne sont pas exactement positionnés spatio-temporellement. L'étude porte sur plusieurs produits haute-résolution disponibles en ligne et sur le masque pluie-non pluie haute résolution qu'utilise TAPEER. Ces résultats objectifs confirment ce que nous comprenons de la mesure satellitaire de la pluie : l'imagerie IR disponible à haute résolution est représentative de la structure du sommet des nuages mais pas nécessairement de la pluie en surface, car les processus microphysiques de génération de pluie sont complexes et éminemment tridimensionnels (Figure 22) ; l'information pertinente sur la pluie est obtenue par les capteurs passifs micro-ondes, dont le faible nombre de passages journaliers et la résolution, expliquent les limites du produit final. La figure 28 montre par ailleurs que si l'on accepte de travailler à une échelle spatiale relativement grossière (1° ou plus) l'information temporelle est assez pertinente dès le pas de temps horaire et les produits résolvent de manière satisfaisante le cycle diurne des précipitation, car ils détectent bien le passage des systèmes pluvieux 'dans la boîte'. Un résultat intéressant pour l'application météorologique et la validation des modèles de prévision du temps. L'une des questions abordées dans la thèse de Clément était la possibilité de descendre en échelle tout en considérant l'incertitude sur l'information haute résolution en utilisant des méthodes stochastiques. La figure 29 illustre ce concept développé dans (Guilloteau et al. 2018) et qui pourrait être opérationnalisé en proposant des produits haute-résolution de type ensembliste à partir de TAPEER (ou autres produits multisatellite) robuste à l'échelle 1° et journalière.

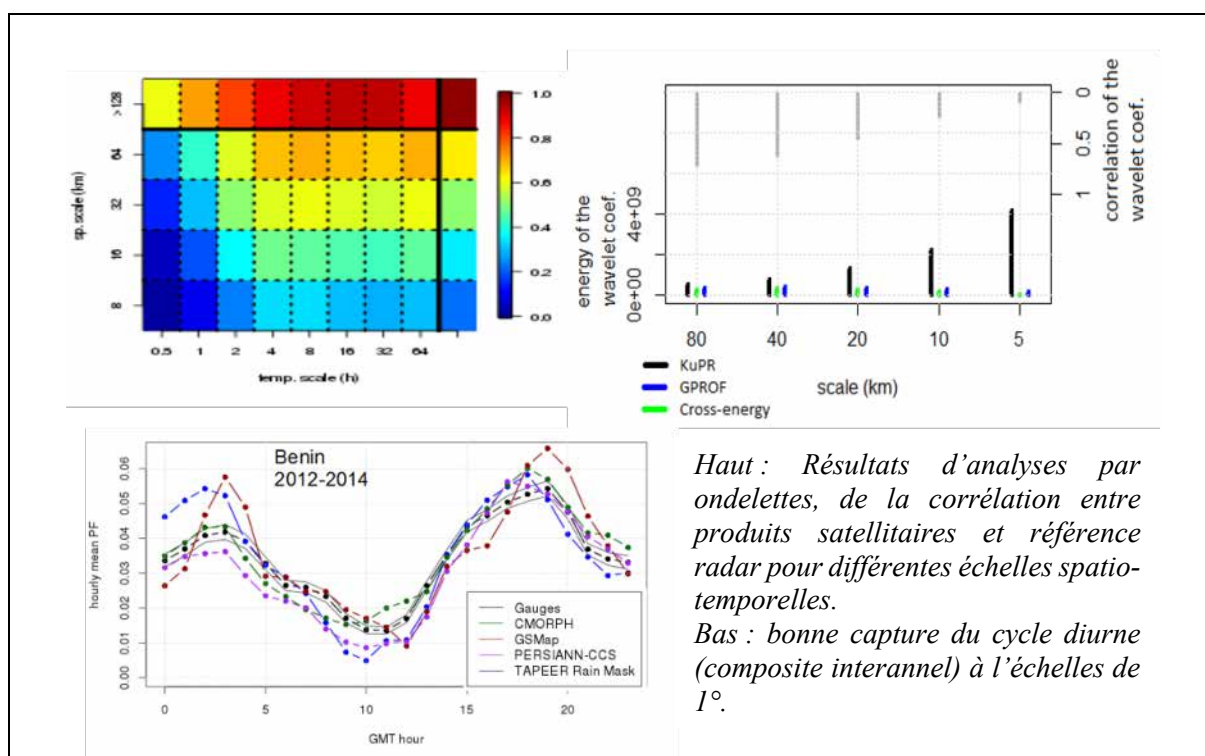


Figure 28, tirée de Guilloteau et al. (2016) illustration des limites de détection des produits satellitaires en dessous de 20 km/3h environ. Bonne résolution du cycle diurne à l'échelle de 1° .

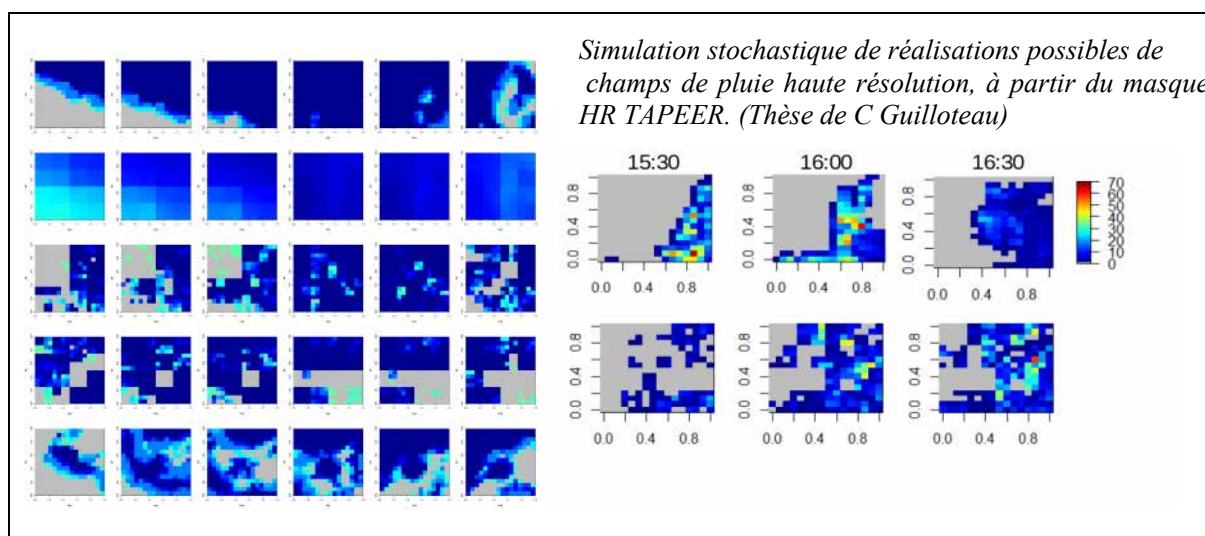


Figure 29, tirée de Guilloteau et al. (2018), génération stochastique de champs de pluie HR à partir du produit TAPEER.

Validation et applications hydrologiques :

L'intégration de données satellitaires est désormais la norme en météorologie opérationnelle. Tous les grands centres de prévisions (Météo-France ; NOAA ; ECMWF, Chambon et al., 2020) assimilent en routine les données satellitaires ; les agences comme Eumetsat et l'OMM ont encouragé l'usage de l'imagerie satellitaire pour la surveillance du temps dans les services météorologiques de tous les pays. En hydrologie, l'appropriation de ces données reste balbutiante. Les réticences sont en partie justifiées par les incertitudes inhérentes à la mesure indirecte de la pluie – et des autres variables comme le débit. Il est donc important pour l'utilisation hydrologique des produits pluviométriques de comprendre comment ces incertitudes impactent les applications – notamment la prévision hydrologique par modélisation pluie-débit. Les processus hydrologiques au sein des bassins sont d'une manière générale non linéaires et cela se retrouve dans les équations simplifiées qui les représentent dans les modèles hydrologiques. De ce fait certaines caractéristiques des champs pluvieux sont amplifiées lors de leur propagation dans un bassin. Un même cumul de pluie peut avoir un impact très différent en terme de ruissellement, et sur la manière dont l'eau va se propager dans le bassin, selon la distribution des intensités de pluie, au cours du temps et au sein du bassin. Les premières études sur l'utilisation des produits satellitaires en hydrologie se concentraient sur les problèmes de biais de produits. Avec l'apparition ces dernières années de produits plus précis et mieux résolus, l'analyse peut être affinée. Dans Gosset et al. (2013) nous avons analysé l'impact de la distribution fréquentielle des intensités pluvieuses, plus ou moins bien reproduite par les produits pluviométriques, sur la réponse hydrologique dans deux bassins contrastés d'Afrique de l'Ouest : la région de Niamey en contexte semi-aride et le bassin de l'Ouémé au Bénin, sous climat soudanien humide.

La figure ci-dessous (de Gosset et al. 2013) montre les tests faits pour le bassin hydrologique de la haute-vallée de l'Ouémé (site AMMA-CATCH Bénin), en utilisant le modèle TopAMMA

(Peugeot et al. 2011). Le biais simulé sur le débit est comparé au biais sur l'entrée pluie (par comparaison à la pluie issue des pluviographes). On remarque que ce biais est amplifié pour les produits temps réel, dont nos analyses montrent par ailleurs (figure de droite), qu'ils surestiment sérieusement les plus fortes intensités. Les méthodes de dé-biaisage communes ne corrigent pas ces erreurs spécifiques aux fortes pluies. Cela nous a amené à développer dans Casse et al. (2015) une méthode originale pour corriger statistiquement la distribution fréquentielle des intensités (*probability matching*).

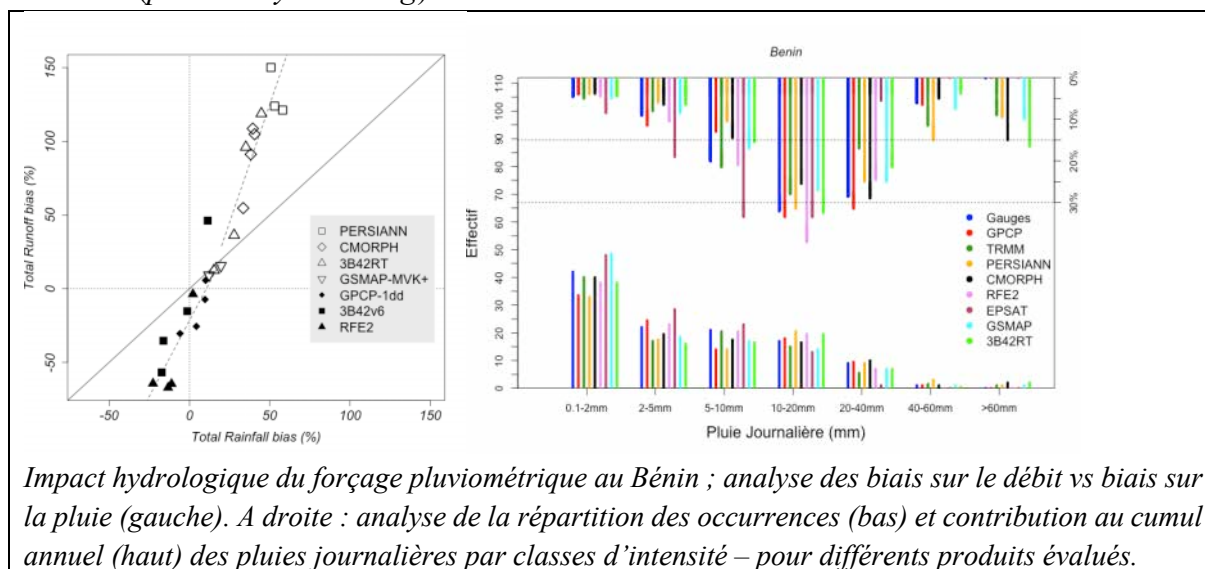


Figure 30, tirée de Gosset et al. (2013) propagation dans un modèle hydrologique des incertitudes sur les produits pluviométriques satellitaires.

La figure 31 (adaptée de Gosset et al. 2013) illustre l'impact exacerbé d'une mauvaise représentation des pluies intenses sur la part des pluies ruisselées, dans une région semi-aride comme le Niger. La question est importante alors que la communauté scientifique s'interroge sur l'augmentation des inondations et son attribution à une éventuelle intensification des précipitations.

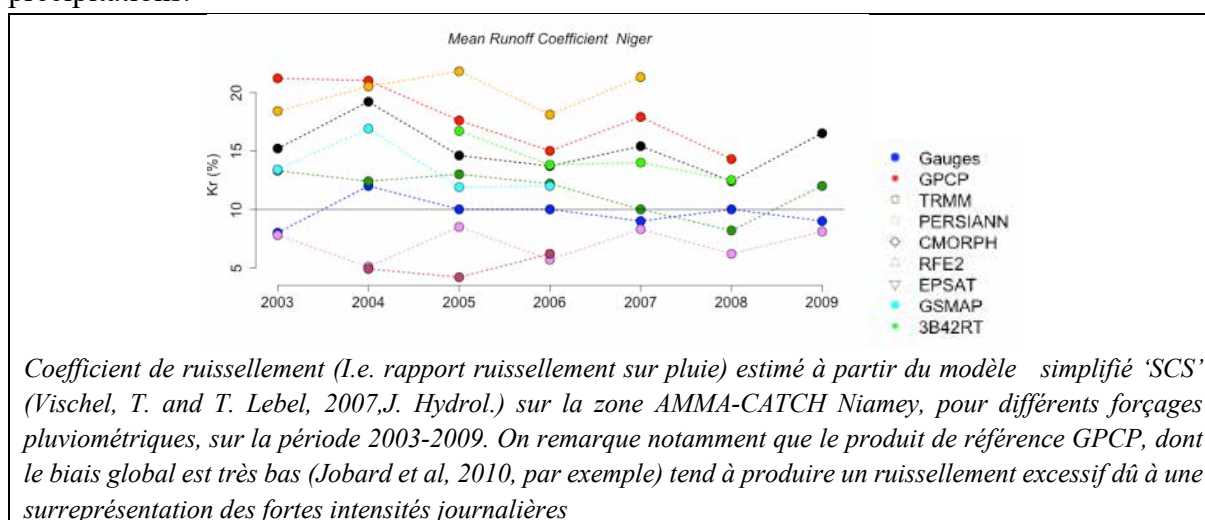


Figure 31, adaptée de Gosset et al. (2013) sensibilité du coefficient de ruissellement en sortie d'un modèle SCS au Sahel au forçage pluviométrique.

Ces diverses études sur l'utilisation des produits satellitaires ont mis en évidence la nécessité d'adapter les critères d'évaluation d'un produit, aux applications visées. Il n'y a pas de bons ou mauvais produits, contrairement à un vocabulaire courant, et aucun estimateur ne reproduit parfaitement la pluie tombée en surface. Plus les échelles visées sont fines, et la latence de production faible, plus les incertitudes sont importantes – a contrario les produits post-calibrés avec une information issue des pluviomètres sont globalement plus robustes (lorsque la densité du réseau est suffisante). Deux points importants sont à retenir de ces travaux de validation : i) l'évaluation des produits requiert une rigueur méthodologique, en particulier pour qualifier la qualité de la référence sol, le pluviomètre souffrant de grosses erreurs de représentativité spatiale. ii) Les produits pluviométriques 'globaux' ne présentent pas une qualité 'globale' ; leur performance varie en fonction du type de systèmes pluvieux observés et de leur environnement ; la physique de la mesure et des processus permet de comprendre ces différences, qui tendent à s'estomper au fur et à mesure que les algorithmes s'améliorent. Malgré ces nuances, les différentes analyses montrent que les produits de dernière génération, intégrant la constellation micro-onde la plus complète (GPM) permettent de qualifier les précipitations et leur variabilité aux échelles météorologiques à climatique, et sont d'ores et déjà utilisés dans de nombreuses applications. Des efforts internationaux comme l'International Precipitation Working Group (IPWG) dont je fais partie aident à documenter les algorithmes, produits et performances pour en faciliter l'usage (Kidd et al. 2020).

Au sein du programme Megha-Tropiques j'ai créé une dynamique sur l'hydrométéorologie spatiale autour d'un cas d'étude particulier : la question des inondations récurrentes du fleuve Niger à Niamey, les raisons de leur recrudescence depuis quelques années et notre capacité à les prévoir. Ces études ont débuté avec la thèse de Claire Cassé où nous avons mis en place une modélisation hydrologique du fleuve Niger nourrie par différents produits (satellite et in situ) pour analyser le rôle précis du forçage pluviométrique et d'autres facteurs comme les états de surface, dans la genèse et l'amplitude des inondations.

Recrudescence des inondations en zone tropicale : le cas de la crue rouge à Niamey analysée grâce à la modélisation et aux observations satellitaires et in situ.

Nos travaux se sont concentrés sur la partie sahélienne du fleuve Niger, dont la fréquence des crues a nettement augmenté les 20 dernières années, avec des inondations record une année sur deux en moyenne depuis 2010 dans la ville de Niamey (Descroix et al. 2018). Elles ont atteint en 2020 un record absolu depuis l'enregistrement de données à Niamey en 1950 ! Nous nous sommes appuyés initialement sur une modélisation hydrologique du fleuve Niger via la plateforme opérationnelle Surfex-Trip (CNRM) déjà configurée pour le Niger dans le cadre de la thèse CNES/SWOT/CNRM de V Pedinotti (Pedinotti et al. 2014), avec une résolution assez grossière (50 km). Nous avons ensuite adapté au fleuve Niger le modèle de grand bassin MGB (Collischonn et al. 2007) avec une résolution de 10 km, et une modélisation plus fine des interactions entre l'hydrologie et l'hydrodynamique (Fleischmann et al. 2018).

Le Niger à Niamey présente depuis une vingtaine d'année une double crue marquée, alors que son hydrogramme ne comportait qu'un seul pic au cours du 20^{ème} siècle (Descroix et al. 2012). La problématique initiée dans Cassé et al. (2015) était précisément la recrudescence de

la première crue ou ‘crue rouge’. Ce phénomène est lié à l’impact des pluies convectives dans les environs de Niamey et de petits affluents en rive droites du fleuve Niger (Niger- Burkina Faso) dans une zone de 100 000 km² environ. La reprise pluviométrique des dernières années et les changements brutaux d’occupation du sol depuis les périodes de sécheresses (70s-80s) se combinent pour expliquer ce phénomène. L’évolution drastique de ce phénomène hydroclimatique depuis soixante ans est présentée figure – ci-dessous.

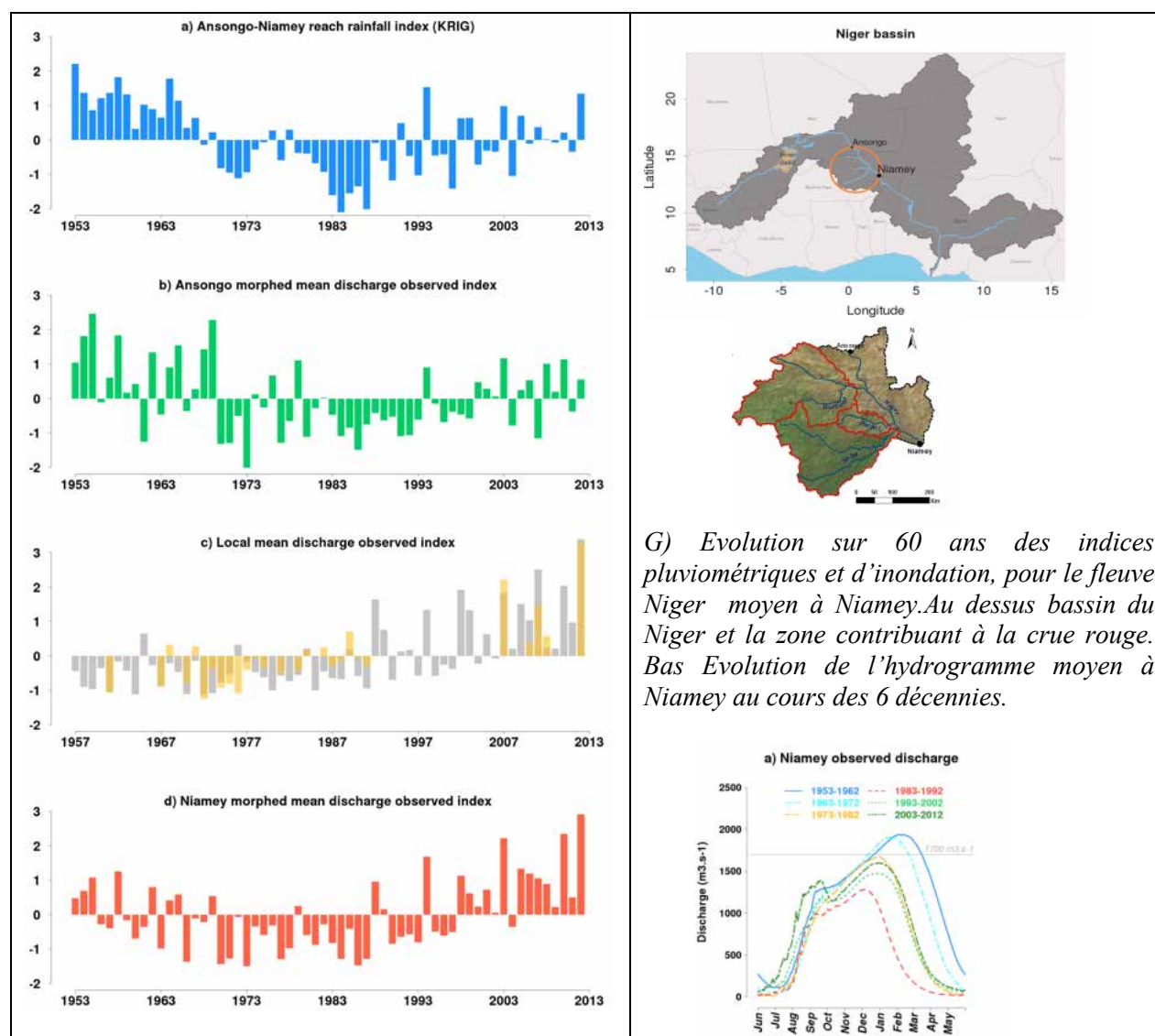


Figure 32, adaptée de Cassé et al. (2016) et de la thèse de C Cassé, évolution hydroclimatique du Niger moyen sur 60 ans et inondations à Niamey.

Les travaux portant sur la période récente (2000-2014) (Cassé et al, 2015) ont démontré l’apport des produits satellites, en forçage du modèle, pour diagnostiquer les inondations. Une méthode originale basée sur la détermination du seuil d’inondation en relatif (dépassement d’un quantile du débit simulé) plutôt qu’absolu, a été proposée avec succès pour contourner les effets des biais de certains produits satellites. Une gamme de produits (temps réel ou post-ajustés) a été testée sur la période 2000-2014, dont le produit Megha-Tropiques TAPEER pour la période 2012-2014. La sensibilité du modèle et de ses performances pour détecter les inondations, à

divers aspects du forçage pluviométrique (la résolution temporelle et la distribution d'intensités) a été analysée.

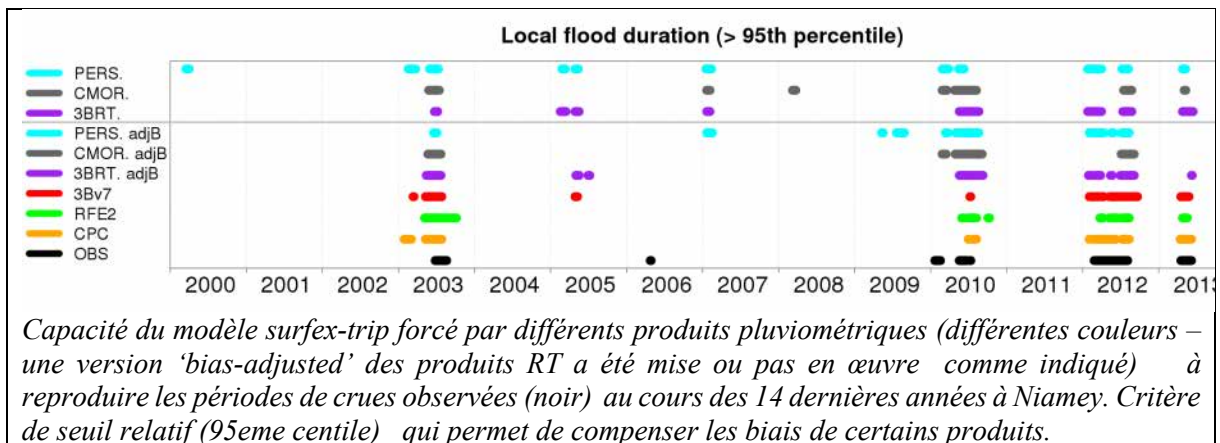
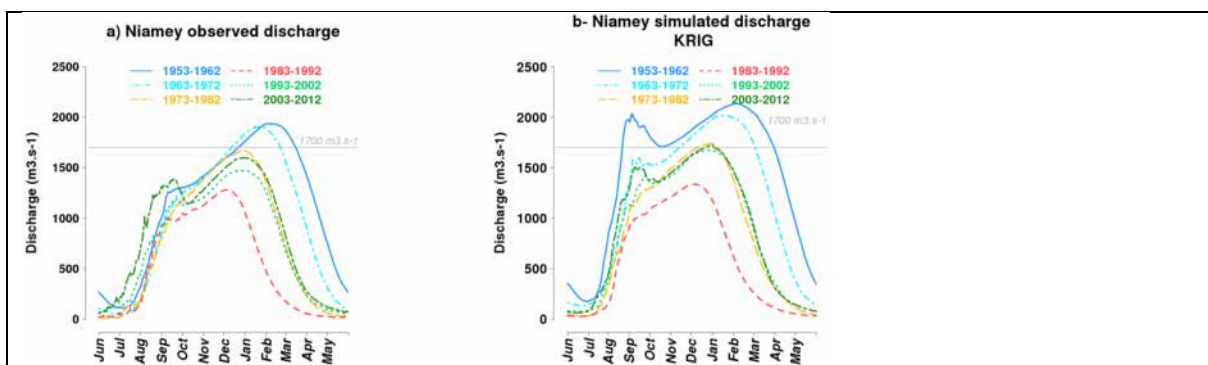


Figure 33, tirée de Cassé et al. (2015), capacité du modèle hydrologique surfex-trip forcé par des produits satellitaires à reproduire les périodes d'inondation à Niamey.

A partir de la même modélisation, Cassé et al. (2016) et Cassé et Gosset (2015) analysent sur deux périodes étendues (1950-2010 à partir de données pluviométriques in situ ; 1983-2010 à partir du produit climatologique satellitaire PERSIANN-CDR) les changements dans l'occurrence des inondations et les paramètres explicatifs. L'étude montre que la tendance dans les inondations récentes (entre 1990 et 2010) est bien expliquée par la variabilité (augmentation graduelle) pluviométrique seule. Par contre, la prise en compte des changements d'occupation du sol (dégradation de la végétation suite aux sécheresses) est nécessaire pour expliquer les différences du coefficient de ruissellement entre les années 60s (très humides ; peu inondées) et les années 2000 (humides mais moins que dans les années 60s ; plus inondées). La modélisation a permis d'analyser les causes une à une, et de confirmer ainsi certains travaux IRD et partenaire basés sur les observations seules.

Les figures ci-dessus extraites de Cassé et al, 2016 illustrent ces résultats.



Casse et al., 2016 - Observed and simulated decadal mean discharge at Niamey station between 1953 and 2012. The most striking feature in the Figures is the overestimation of the discharge for the wettest and early decades 1953-1962 and 1963-1972, where the simulations produce too much runoff. For these wet decades, the discharge overestimation leads to an increase of the Red flood and a reinforcement of the bi-modal shape of the decadal hydrograph, contrary to observations.

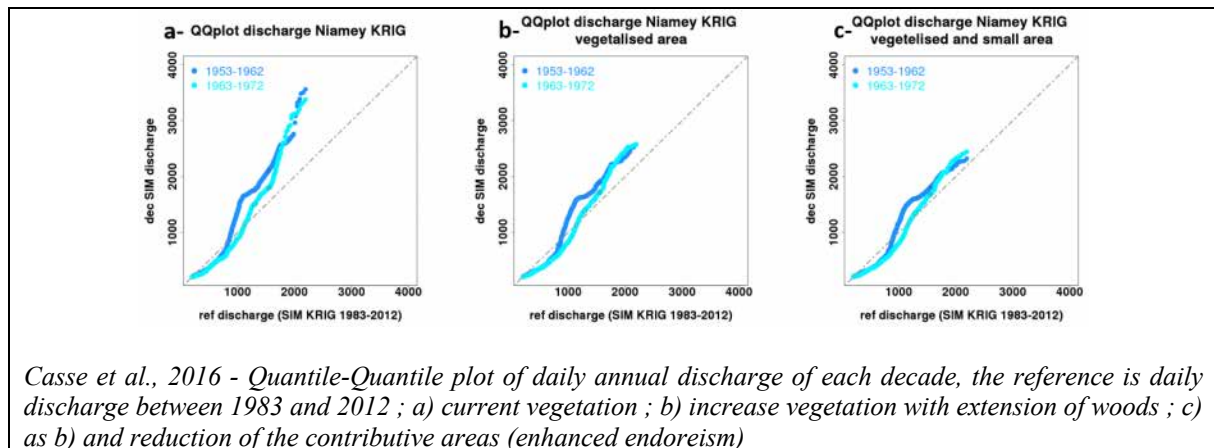


Figure 34, tirée de Cassé et al. (2016), analyse des causes (pluviométrie et/ou états de surface) de la recrudescence des inondations à Niamey sur 6 décennies, à partir de la modélisation hydrologique.

En conclusion,

mes travaux ont contribué à **l'évaluation des produits pluviométriques satellitaires** en zone Tropicale (Roca et al., 2018), en particulier en Afrique (Gosset et al., 2018) et en Amérique du Sud (do Amaral et al., 2018). Une question majeure et un défi pour l'observation spatiale, est la variabilité de la pluie aux échelles spatio-temporelles fines (Guilloteau et al., 2018) et convectives qui expliquent certains phénomènes à fort impact comme les inondations urbaines et les glissements de terrain (Marc et al., 2018).

Des progrès ont été faits sur l'utilisation de ces produits satellitaires associés à la modélisation hydrologique (Fleischmann et al., 2018) pour **le suivi des fleuves tropicaux et la prévision des risques d'inondation**, avec une application au fleuve Niger incluant un transfert d'expertise auprès de l'autorité du bassin du Niger.

L'augmentation des risques hydrométéorologiques dans la zone intertropicale est en effet attestée, et les dégâts humains et matériels rapportés chaque année par les organisations d'aide au développement le confirment. Les causes de ces inondations récurrentes restent cependant en partie incomprises. Les processus physiques qui sous-tendent la relation entre pluie et débit sont complexes, non linéaires, fortement dépendant des échelles spatio-temporelles considérées (Guilloteau et al., 2018) et influencés par des facteurs anthropiques comme l'occupation du sol. Le volet Hydrométéorologie que j'ai coordonné dans Megha-Tropiques a démontré l'apport des produits pluviométriques satellitaires à l'analyse des inondations tropicales et de leur causalité. Un préalable est de quantifier la précision de ces produits, leurs incertitudes. L'évaluation du produit TAPEER par rapport à des réseaux de pluviomètres de référence, et les inter-comparaisons avec d'autres produits satellitaires de l'ère GPM (Global Precipitation Measurement mission) ont démontré les très bonnes performances de TAPEER, un des meilleurs produits de sa génération, notamment en Afrique de l'Ouest (Gosset et al., 2018 ; Roca et al., 2018).

Une originalité de l'approche TAPEER est la fourniture d'une barre d'erreur associée à la pluie journalière qu'estime le produit. En hydrologie cette variable permet d'analyser la propagation des incertitudes du forçage pluviométrique dans la prévision des débits et des inondations. Des études en ce sens se sont concentrées sur le fleuve Niger et le problème de la crue « rouge ».

Ce phénomène est directement lié à l'impact des systèmes convectifs, pendant le cœur de la saison des pluies, sur trois petits affluents situés en rive droite du fleuve Niger, en Amont de Niamey (Fig. 32). La zone contributive s'étend sur une centaine de milliers de km² (quelques pixels TAPEER) ce qui exige une bonne localisation et quantification de la pluviométrie associée à ces systèmes convectifs. Une modélisation hydrologique distribuée (Fleischmann et al., 2018) forcée par le produit TAPEER a été mise en place pour analyser ce phénomène et notre capacité à simuler les débits. Des ensembles de forçage sont produits à partir de la barre d'erreur TAPEER et de différentes hypothèses sur la structure spatio-temporelle de l'erreur. Le résultat est un ensemble de simulations, dont la dispersion traduit l'impact des incertitudes pluviométriques sur la précision des débits simulés et sa sensibilité à la structure de ces erreurs (corrélation spatio-temporelle ; localisation dans le bassin). Les simulations sur le fleuve Niger confirment en outre les bonnes performances de TAPEER en zone Sahélienne et sa pertinence pour des applications hydrologiques.

Le modèle illustré Fig. 35 est en cours de transfert à l'Autorité du Bassin du Niger, pour un test en opérationnel. L'approche est en cours de généralisation sur d'autres bassins tropicaux, en Amérique du Sud, et sur le fleuve Congo (Paris et al. 2020). La démarche d'hydrométéorologie spatiale initiée dans Megha-Tropiques nourrit une réflexion plus large sur l'utilisation complémentaire de différentes missions satellitaires en hydrologie, et s'intègre dans la dynamique scientifique qui accompagne la future mission altimétrique haute résolution SWOT (Pavelsky et al. 2014; Biancamaria et al. 2016).

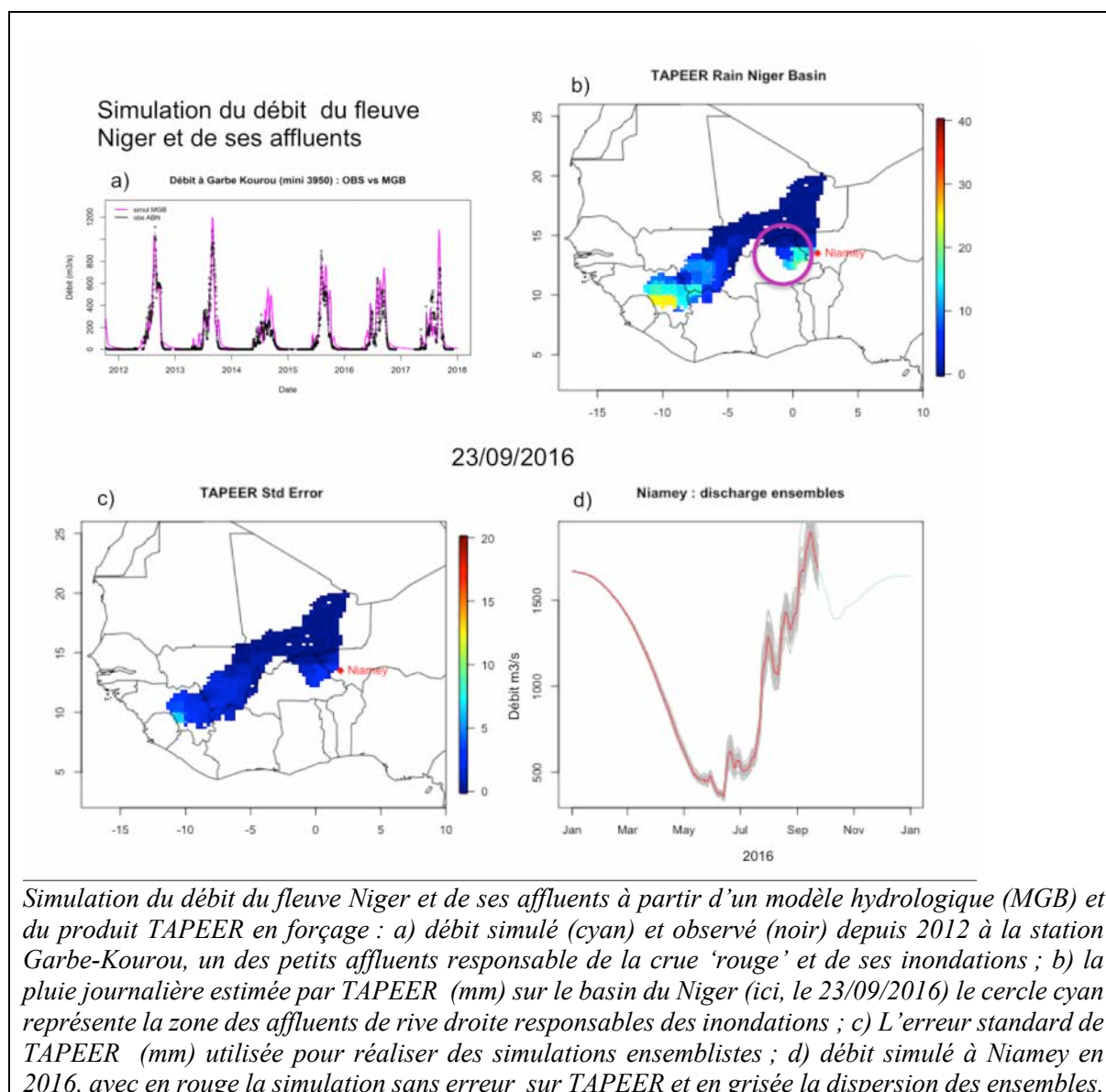


Figure 35, illustration des travaux de prévision d'ensemble des débits du Niger à partir du modèle MGB (Fleischmann et al, 2018) et du produit TAPEER et sa barre d'erreur.

III.3– Une hydrométéorologie innovante et adaptée aux PED : Rain Cell Africa et les mesures d’opportunités.

Les sections précédentes ont mis en évidence les limites du système d’observation actuel pour répondre aux enjeux de l’hydrométéorologie tropicale lorsque l’on s’intéresse aux échelles fines, convectives. Nous l’avons vu, les radars météorologiques sont intéressants mais leur coût prohibitif pour l’Afrique aujourd’hui. La mesure satellitaire apporte une information quantitative essentielle mais avec certaines limites en résolution et encore quelques biais dans les produits temps réel.

Ces constats ont motivé la recherche d’autres sources d’information sur la pluie, adaptées à l’état présent des pays ‘du Sud’ : les réseaux hydrométéorologiques opérationnels y sont globalement sous dotés, alors même que les risques hydrométéorologiques sont en augmentation. Un autre réseau prospère et se densifie constamment à l’échelle globale et singulièrement dans les régions tropicales, très peuplées : le réseau de télécommunication. La partie hertzienne de ce réseau, opère dans la gamme micro-onde et ses signaux sont sensibles au contenu en eau de l’atmosphère. Sur cette base a émergé depuis quelques années l’idée d’exploiter ces fluctuations pour accéder à une information sur les précipitations (Overeem et al. 2012). Les pertes de puissance des liens micro-ondes commerciaux (CML en anglais), entre les antenne-relais des réseaux de téléphonie mobile, peuvent être reliées à l’intensité de pluie sur le chemin de l’onde. Si ces données de puissances sont fournies par l’opérateur, il est possible d’estimer la pluie. J’avais tenté depuis mon séjour au Bénin pendant AMMA d’intéresser des opérateurs mobiles afin de tester la technique, mais sans succès. Le cadre des campagnes MTGV à Ouagadougou nous a enfin donné l’occasion de tester la méthode en Afrique pour la première fois. L’initiative que nous avons appelée Rain Cell Africa est ainsi née.

Rain Cell Africa : Estimation des précipitations par réseau de téléphonie mobile.

Les installations radar et pluviométriques que nous avons mises en place au Burkina Faso pour le super site de validation Megha-Tropiques ont donné l’opportunité de tester une méthode très originale : l’estimation des pluies à partir des réseaux de téléphonie mobile. Grâce aux contacts Burkinabè, la collaboration de l’opérateur de téléphonie Télécel Faso a été acquise. La méthode illustrée ci-dessous exploite les chutes des signaux micro-ondes entre les antenne-relais des réseaux de téléphonie. Vu la densité de ces réseaux en urbain, la méthode peut donner accès à des champs de pluie de très haute résolution, potentiellement en temps réel et à un coût négligeable pour l'utilisateur.

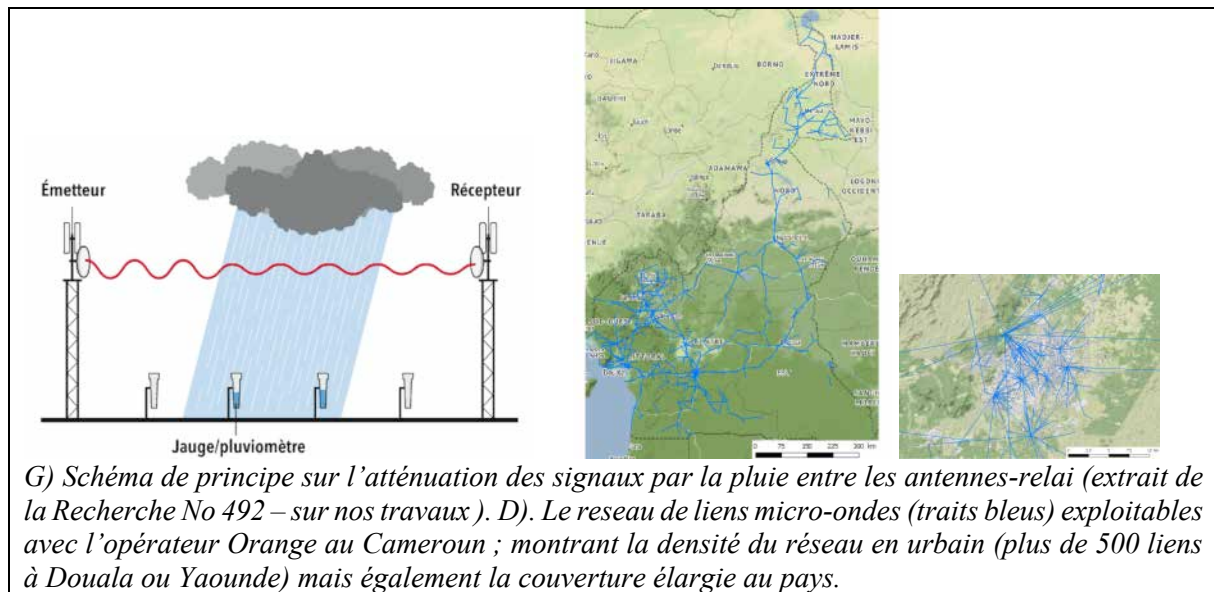


Figure 36, principe de la mesure de pluie à partir des réseaux de téléphonie mobile et exemple du réseau disponible (Orange) au Cameroun pour nos expérimentations.

L'évaluation quantitative de la méthode sur la base d'un lien de l'opérateur Telecel à Ouagadougou et par comparaison avec un pluviographe situé en-dessous a été réalisée dans le cadre de la thèse d'Ali Doumounia de l'Université de Ouagadougou, que j'ai co-encadré avec le Pr François Zougmore. La figure ci-dessous montre ces résultats. Malgré un lien très long (40 km) et une fréquence d'opération basse (7 GHz) plutôt défavorables à la méthode (Leijnse et al. 2008), ces premiers résultats sont excellents. La méthode permet de détecter 95% des événements pluvieux, avec seulement 5% de fausse alarme et une excellente corrélation des séries pluviométriques journalières entre le lien et le pluviographe. La comparaison à fine échelle (5 min) est également très convaincante avec des corrélations de 0.7 en moyenne au sein des événements.

Ce travail publié dans GRL (Doumounia et al. 2014) a été mis en avant par l'AGU et eu énormément d'écho dans la presse internationale (du Washington Post à La Recherche). Suite à la publication de ces travaux et l'intérêt suscité nous avons décidé de regrouper sous le nom Rain Cell Africa le consortium de partenaires intéressés à promouvoir cette méthode en Afrique. Un colloque international suivi d'une école thématique sur le sujet a été organisé par nos équipes (IRD / UNESCO / WASCAL / CNES) à Ouagadougou début 2015, et les conclusions reprises dans le Bulletin of the American Meteor. Society (Gosset et al., 2016).

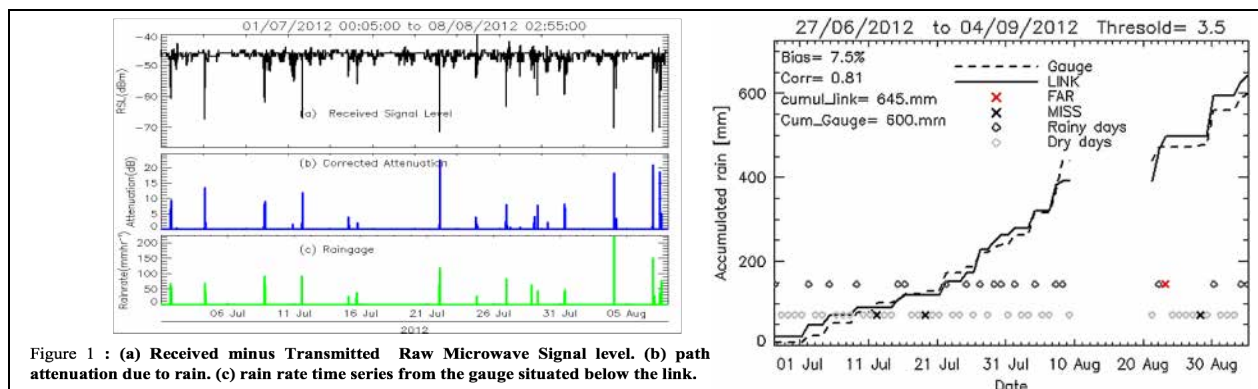


Figure 1 : (a) Received minus Transmitted Raw Microwave Signal level. (b) path attenuation due to rain. (c) rain rate time series from the gauge situated below the link.

Principe de la technique Rain Cell : exploiter les chutes de signal due à la pluie entre les antennes relais de téléphonie mobile. Gauche : noir) les mesures fournies par l'opérateur Telecel entre 2 antennes relais au Burkina Faso ; bleu) extraction de l'atténuation due à la pluie et vert) pluie mesurée par un pluviographe sous le lien. Validation quantitative de la méthode raincell, basée sur les liens micro-ondes commerciaux (trait continu) par comparaison au cumul enregistré par un pluviographe (trait pointillé). Le taux de fausse alarme est inférieur à 5%, le taux de détection de 95%, la corrélation des séries journalière est de 0.8 et le biais total inférieur à 10%.

Figure 37, extrait de Doumounia et al (2014) premières validations quantitatives de la méthode Rain Cell en Afrique, au Burkina Faso.

L'impact médiatique des premiers résultats a attiré l'attention de plusieurs bailleurs et facilité la discussion avec un opérateur très présent dans la région Ouest-Africaine : Orange. Deux projets pilotes collaboratifs ont été lancés grâce à ces contacts : l'un financé par le fond des nations unies Data4development au Cameroun sous le titre 'SMART' (Smart Monitoring of the Atmosphere and Rain using Telecommunication network) et le projet Rain Cell Africa Niger soutenu par la Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR) de la Banque Mondiale au Niger. Au Cameroun un test de validation du concept en temps réel a été mis en place avec Orange sur les villes de Douala et Yaounde (<http://raincell.sedoo.fr>). Les données acquises depuis 2018 sont en cours d'évaluation scientifique mais les premiers résultats de comparaisons avec les pluviomètres sont très prometteurs. Au Niger, un accord informel permet d'avoir des données régulièrement depuis 2016. Un changement d'opérateur en 2020 n'a heureusement pas remis en cause nos contacts et un flux de données nous est actuellement transmis en temps réel. Les figures ci-dessous adaptées de la thèse de Maxime Turko et d'un article en préparation, illustrent l'intérêt et la qualité des données sur la ville de Niamey, par comparaison avec les pluviographes du réseau AMMA-CATCH.

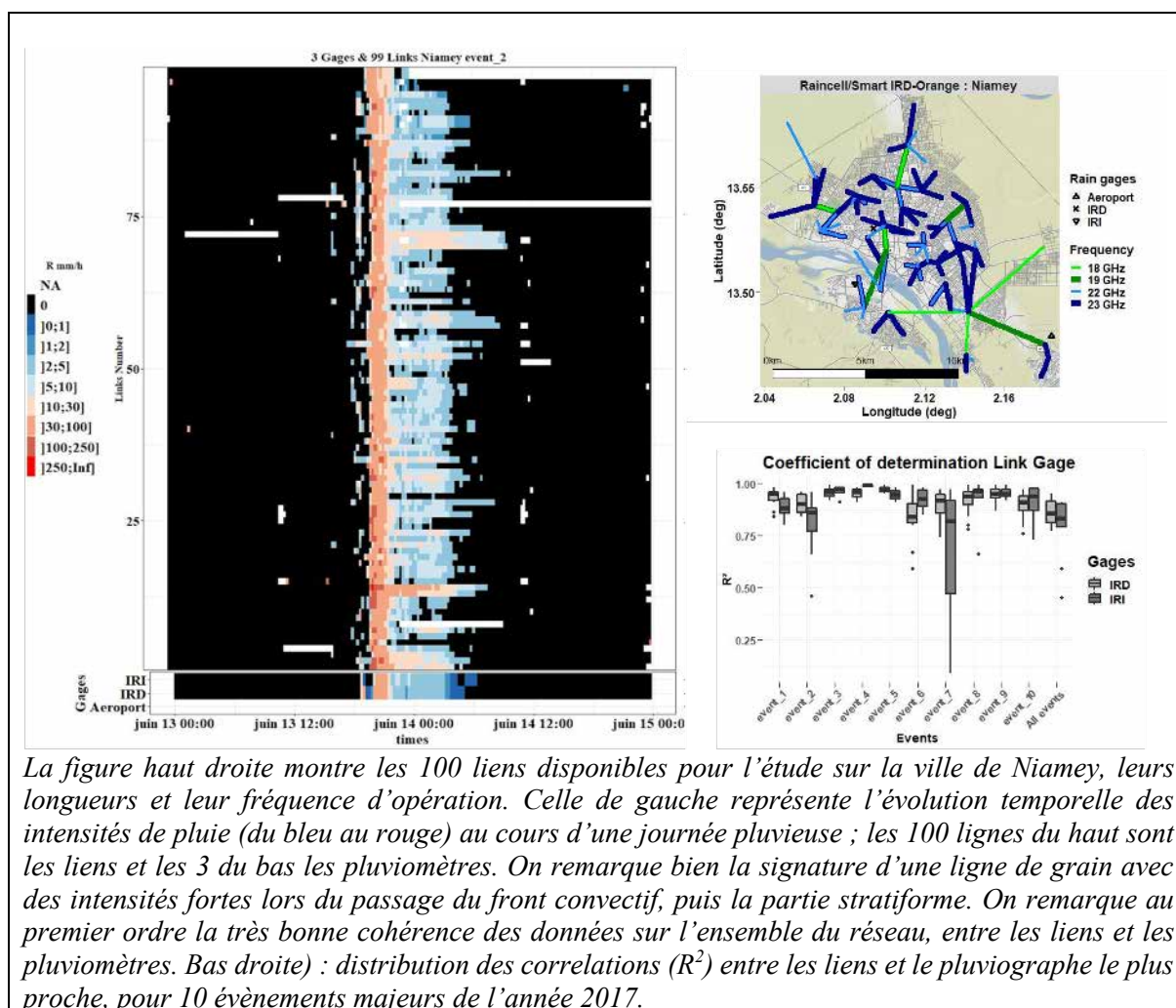


Figure 38, basé sur la thèse de M Turko, illustre la validation de la méthode avec 100 liens à l'échelle de la ville de Niamey.

Sur l'agglomération de Niamey, de 100 km² environ, les données d'une centaine de liens micro-ondes ont pu être exploitées. Les données sont acquises au pas de temps de 15 minutes. Les comparaisons quantitatives ci-dessous mettent en évidence l'excellente capacité du réseau de liens à quantifier les pluies, et à caractériser leur structure temporelle à pas de temps fin (coefficients de détermination des séries à 15 minutes au-dessus de 0.8).

Les images suivantes (thèse M Turko) démontrent un des intérêts majeurs de la technique Raincell vue la densité des réseaux en urbain : la spatialisation de la pluie au sein des agglomérations. Les cartes de pluie reconstituées (cumul événementiel et maximum d'intensité) à partir de la centaine de liens disponibles à Niamey sont affichées pour les huit événements convectifs majeurs de 2017. Pour plusieurs d'entre eux un gradient pluviométrique fort est mis en avant par le réseau, mais pas capturé par les trois pluviomètres regroupés.

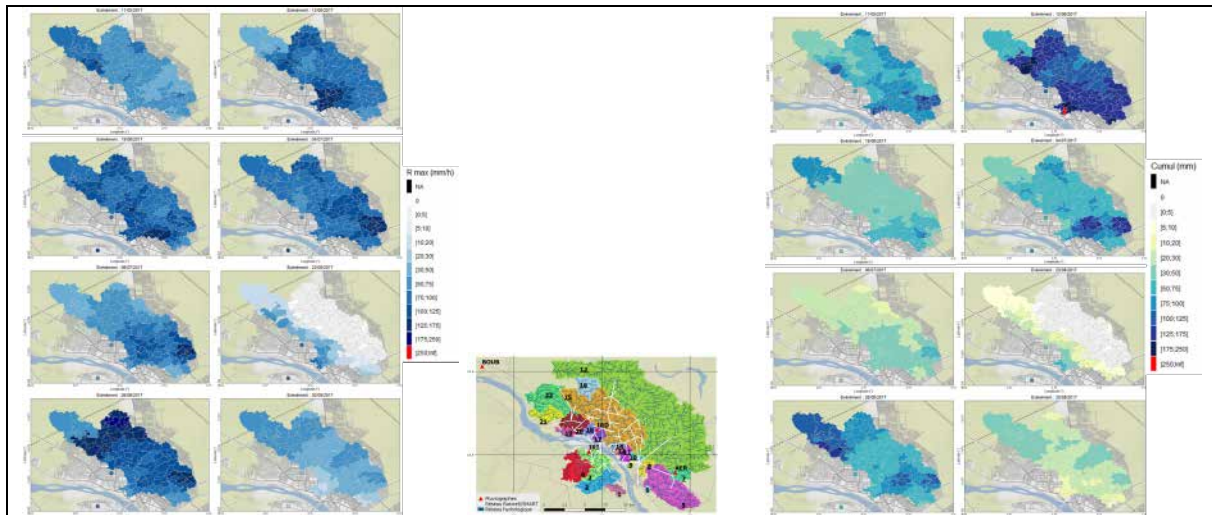
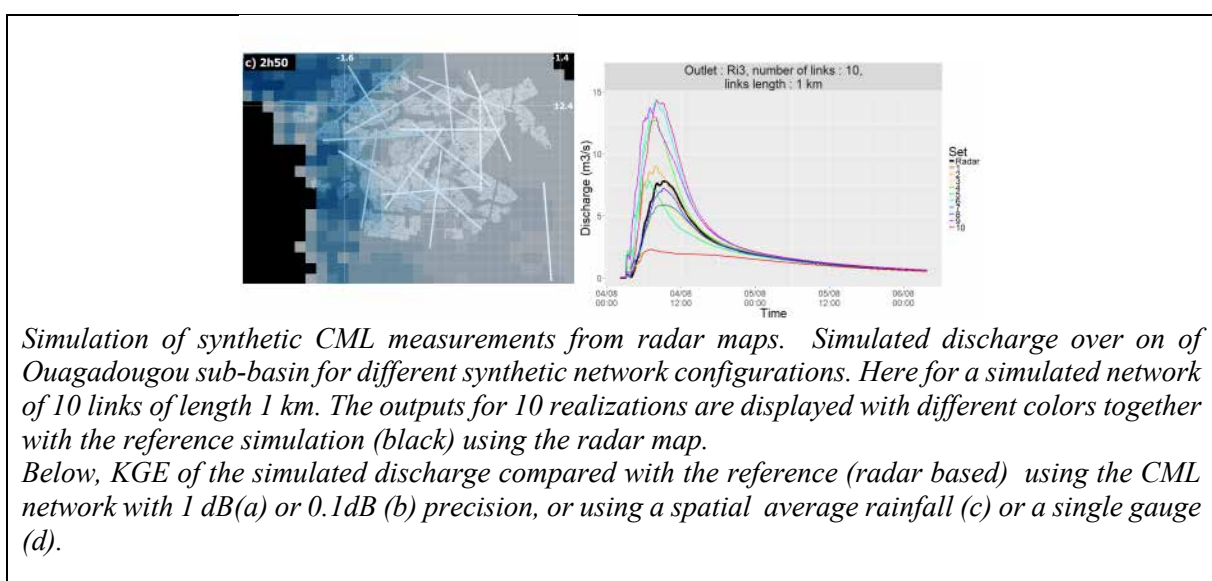


Figure 39, basé sur la thèse de M Turko, illustre l'intérêt de la méthode pour spatialiser la pluie au sein d'une agglomération, ici la ville de Niamey.

Pour aller plus loin sur le potentiel intérêt de ces mesures pour l'hydrologie urbaine, la thèse de Maxime Turko a abordé l'analyse des incertitudes dans l'estimation de pluie basée sur les liens micro-ondes commerciaux, et leur propagation dans la simulation hydrologique. Un simulateur de données de liens synthétiques a été réalisé et mis en œuvre pour caractériser l'impact de deux sources d'incertitudes : i) la précision des signaux bruts obtenus de l'opérateur de téléphonie et ii) la configuration géométrique du réseau, position, longueur et orientation des liens au sein du bassin. Le simulateur est basé sur des images de pluie radar à haute résolution, utilisées comme proxy d'une pluie réelle que le réseau de liens synthétiques échantillonne. Pour analyser la propagation des incertitudes, les données sont utilisées en forçage d'un modèle hydrologique distribué, ATHYS, mis en place sur la ville de Ouagadougou au Burkina Faso. Les simulations avec les données de liens synthétiques en entrée sont comparées à une simulation de référence basée sur le champ radar. Quelques extraits de ces travaux (tirés de Turko et al., 2021) sont présentés ci-après :



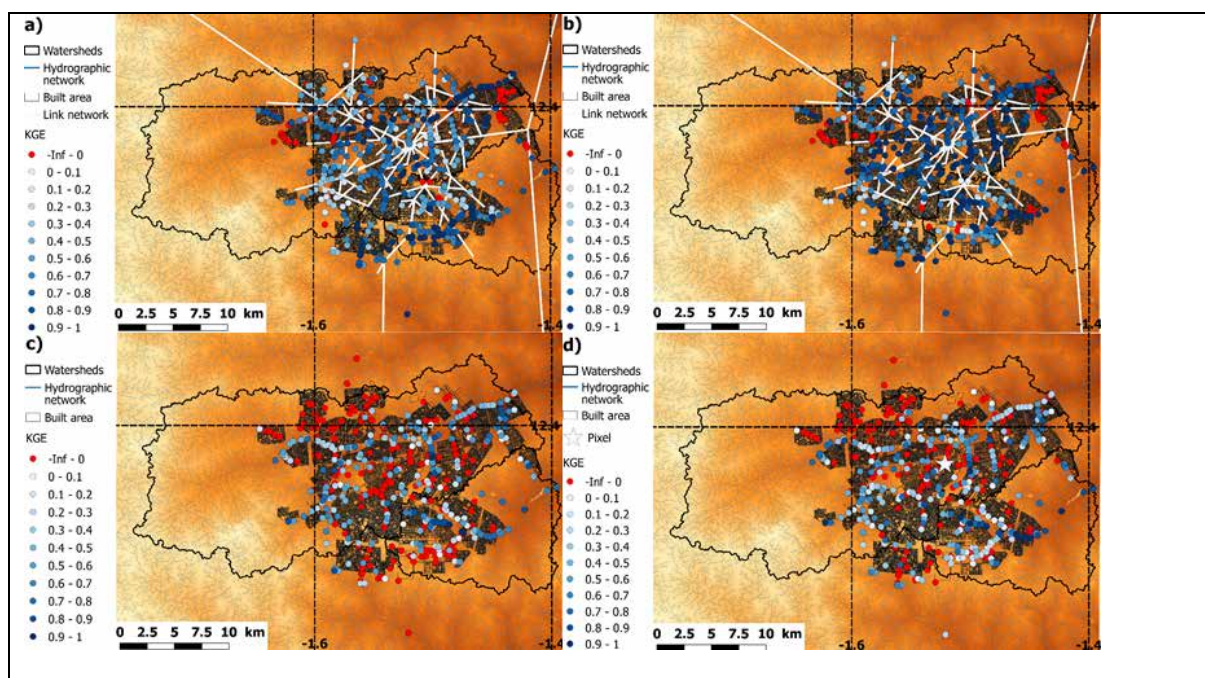


Figure 40, basé sur la thèse de M Turko et Turko et al., 2021 (en révision), étude du potentiel des mesures de pluie par lien micro-ondes en hydrologie urbaine en intégrant les incertitudes.

En conclusion :

Tous les travaux au sein de Rain Cell Africa au Burkina puis au Niger, et SMART au Cameroun, confirment l'intérêt des mesures de liens micro-ondes pour la surveillance des risques hydrométéorologiques en zone tropicale et singulièrement en Afrique. La méthode très sensible aux fortes pluies est particulièrement adaptée à l'estimation des pluies d'origines convectives. Dans les zones urbaines où les réseaux de téléphonie sont denses et les risques particulièrement élevés la méthode est prometteuse ; l'étude montre notamment à Niamey que la dynamique est très bien reproduite (corrélation supérieure à 0,9) et que le biais est inférieur à 10 % pour la majorité des liens. Dans les zones rurales où le réseau est moins dense, les données de liens pourraient être combinées à l'information satellitaire pour améliorer l'estimation de pluie à l'échelle régionale.

La méthode est clairement validée du point de vue technique, par nos résultats en Afrique et de nombreux travaux en Europe et Israël (Uijlenhoet et al. 2018). Malgré ces initiatives la technique n'a pas été mise en œuvre opérationnellement, avec un engagement contractuel des opérateurs à fournir les données brutes. Nos tests en temps réel en Afrique sont une première intéressante mais sont basés sur la bonne volonté des équipes techniques d'Orange. Les opérateurs n'ont jusqu'ici pas été convaincus de leur intérêt à s'engager ni du modèle économique qu'ils pourraient développer avec ces applications météorologiques de leurs données brutes. Nous travaillons actuellement avec l'OMM/WMO à la labélisation de cette méthode et aux moyens d'encourager la libération systématique des données. C'est le véritable défi de la suite de Rain Cell, d'autant que les réseaux évoluent vers des configurations (perspective 5G ; augmentation des fréquences etc.) très favorables aux applications 'météo'.

Chapitre IV : Projet scientifique et conclusion

Les enjeux autour du cycle de l'eau évoluent très rapidement dans ce premier quart du 21^{ème} siècle, à l'échelle planétaire et singulièrement dans la bande inter-tropicale marquée par une démographie galopante, des inégalités croissantes, des instabilités politiques, le tout dans un contexte d'incertitudes sur l'impact dans ces régions des changements globaux et notamment du réchauffement climatique. La nécessité de modèles de développement harmonieux, bénéfiques à toutes les strates de la population et orientés vers une gestion durable des ressources est une priorité affichée des diverses instances internationales et mise en exergue dans les objectifs du développement durable. L'eau sous toutes ses phases et dans tous ses usages (eaux verte, grise, bleue), son évolution et sa répartition tant en quantité qu'en qualité, les risques liés aux événements hydrométéorologiques extrêmes, sécheresses, inondations sont au cœur des questionnements de la communauté scientifiques comme des autorités. Mais comme la ressource elle-même, les capacités d'observation pourtant nécessaires à une gestion éclairée et à l'anticipation des risques, sont extrêmement mal réparties. Dans ce domaine comme dans bien d'autres l'écart entre les pays industrialisés et les moins développés situés majoritairement 'au Sud', se creuse. Dans les premiers où les systèmes d'observations sont denses et de plus en plus connectés, les services opérationnels et les communautés scientifiques disposent de jeux de données étendus, facile d'accès même à courte échéance, et de modèles de prévisions de mieux en mieux résolus, en météorologie comme en hydrologie. Dans les pays moins développés l'accès à ces informations est limité et pour un faisceau de raisons, la surveillance des ressources naturelles et de l'environnement n'est pas une priorité effective des états.

Cela a été mentionné mainte fois dans ce manuscrit, de nouvelles sources d'information sur l'état de l'environnement, de l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère complètent et compensent les lacunes de systèmes d'observation in situ très hétérogènes. **La télédétection satellitaire** est un secteur en évolution constante depuis son avènement, jalonné par des avancées spectaculaires dans le domaine de l'observation de la terre, pour n'en citer que quelques unes : les satellites géostationnaires comme MétéoSat ont révolutionné la compréhension de l'atmosphère globale et le cycle de vie des systèmes pluvieux ; TRMM puis GPM et la vision tri-dimensionnelle de leurs radar ont largement amélioré notre compréhension des systèmes pluvieux et révolutionné l'estimation quantitative des précipitations ; GRACE a permis de quantifier l'évolution des stocks d'eau ; les missions altimétriques jouent un rôle essentiel dans la surveillance du climat et la prise de conscience de la montée des eaux ; l'imagerie visible de mieux en mieux résolue permet de surveiller en routine l'évolution des surfaces et l'empreinte anthropique, mais aussi d'éclairer les interventions lors de catastrophes naturelles.

L'utilisation quantitative de ces données pour le suivi du cycle de l'eau reste cependant limitée à une communauté d'experts plutôt situés dans les pays développés. Même dans la communauté météorologique opérationnelle, qui a adopté l'imagerie satellitaire dès les années 70s et les premières missions dédiées comme MeteoSat, l'utilisation dans les pays du Sud demeure assez qualitative. L'hydrologie spatiale demeure à ses balbutiements en terme d'usage

malgré le potentiel avéré de ces techniques pour la gestion des grands fleuves transfrontaliers notamment.

L'un des freins à l'utilisation de ces données est leur caractère indirect, les variables mesurées par satellite doivent être interprétées et transformées par des algorithmes experts, et ces mesures sont entachées d'incertitudes plus ou moins bien documentées par les fournisseurs de produits finaux et plus ou moins bien comprises par les utilisateurs non experts de la mesure. L'échantillonnage spatial et temporel des mesures satellitaires, contraint par les particularités orbitales diffère de celui des mesures in situ 'de référence' auxquelles les experts thématiques (hydrologues, météorologues) sont habitués. Une meilleure appropriation de ces données par les chercheurs du Sud stimulerait les applications scientifiques et opérationnelles de cette mine d'information et éclairerait certaines questions en suspens dans le domaine du cycle de l'eau tropical. Une utilisation plus généralisée par les experts locaux contribuerait également à l'évaluation et l'amélioration des produits. C'est un domaine auquel je propose de consacrer mes efforts de recherche et de formation des prochaines années.

Une autre révolution est en cours dans le domaine des données sur l'environnement, liée au développement massif du numérique et des télécommunications. Si cette explosion de la communication numérique est nocive à bien des égards pour l'environnement (surconsommation énergétique ; impact de l'extraction des matériaux de base – terres rares etc.), un projet comme Rain Cell montre que l'on peut malgré tout exploiter ces réseaux au bénéfice des sciences environnementales ! L'élargissement du spectre de micro-ondes utilisés en télécommunication (5G etc.) et la généralisation des objets connectés ouvrent de **nouvelles opportunités de capteurs faibles coûts**. Des agences à visées opérationnelles comme l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) réfléchissent à l'intégration de ces nouvelles mesures en renforcement des réseaux traditionnels de surveillance de l'environnement et du climat. Le développement de ces capteurs non conventionnels, la multiplication de sources de données parfois imprécises, s'accompagnent de nouvelles méthodes en science des données massives (big data) et d'algorithmes moins conventionnels basés sur l'apprentissage profond. Accompagner le développement de ces techniques au service du suivi du cycle de l'eau et des risques en zone tropicale, avec nos partenaires du Sud est un autre axe de recherche/formation de mon projet.

Mon affectation au Brésil à partir de 2021 va me permettre de travailler avec de nouveaux partenaires pour développer de nouvelles orientations thématiques (l'hydrologie avec la FUNCEME au Ceara et IPH à Porto Alegre; la science des données avec les experts de l'UFC) et aborder de nouveaux chantiers géographiques en Amérique du Sud (Nordeste ; Guyanne ; Amazone-Andes).

Je souhaite en résumé aider au renforcement d'une communauté d'experts, favoriser l'utilisation et la valorisation des données d'un système global d'observation de la terre inclusif de nouveaux types d'information, pour aborder avec différents partenaires internationaux des questions scientifiques ou opérationnelles en lien avec le cycle de l'eau tropical et les risques hydrométéorologiques. Ces objectifs sont détaillés ci-dessous.

Nouvelles opportunités pour l'étude du cycle de l'eau et des risques hydrométéorologiques :



Un quartier de Niamey après les inondations record de 2020 (photo ABN)

Risques hydrométéorologiques, phénomènes extrêmes et prévisibilité

Différentes études attestent de l'augmentation des risques hydroclimatiques, à l'échelle globale et tout particulièrement dans la bande inter-tropicale (Prein et al. 2017; Veldkamp et al. 2018; Meehl et al. 2000; Easterling et al. 2000). Les risques d'inondation augmentent sous l'effet combiné de l'aléa climatique lui-même, avec une intensification probable des pluies dans certaines régions, des changements d'occupation des sols tendant à augmenter le ruissellement et d'une densification des populations, notamment dans les zones urbaines, qui accroît les vulnérabilités. Ces phénomènes sont perceptibles à différentes échelles. Ils peuvent être très concentrés spatialement et temporellement lors d'inondations urbaines où l'imperméabilité des sols accélère le ruissellement, ou encore lorsque des cellules convectives intenses arrosent des bassins à réponse rapide, par exemple en zones de relief. Capturer de telles échelles est un défi pour les systèmes d'observation actuels. Les inondations peuvent être associées à des processus plus lents et intégrés le long des rivières et fleuves, alors plus facilement détectés par les observations, notamment satellitaires.

Comme abordé dans la thèse de C Cassé pour le cas des inondations à Niamey, ces événements sont complexes et attribuer leur tendance à une cause unique (par exemple la seule intensification des précipitations) est simpliste. L'intensification des pluies et l'augmentation des extrêmes dans les Tropiques demeure une question ouverte, le système d'observation actuel peinant à quantifier de tels phénomènes. Différentes études sous l'égide du programme mondial Global Energy and Water Exchanges (GEWEX), du World Climate research Program

(WCRP) ou de l'International Precipitation Working Group (IPWG) montrent une grande divergence dans les distributions d'intensités de pluie au sein de produits pluviométriques globaux comme ceux du Climate Prediction Center (CPC) ou Global Precipitation Climatology Center (GPCC), considérés comme des références (et servant à ce titre à calibrer les produits satellitaires). Ces incertitudes sur les produits pluviométriques doivent être mieux comprises et documentées afin de les intégrer dans le diagnostic et la prévision des risques hydrométéorologiques. C'est un des axes de recherche que je continuerai à approfondir, tout en cherchant à développer de nouveaux produits régionaux. Je chercherai plus largement à mieux décrire les processus hydrométéorologiques à l'échelle des bassins cibles, en tirant parti du système d'observation satellitaire et de la modélisation, tout en m'attachant à décrire toutes les sources d'incertitudes.

Hydrométéorologie spatiale intégrée

L'hydrométéorologie traite de l'impact des précipitations sur la réponse hydrologique. Mes recherches passées ont essentiellement porté sur la caractérisation des champs de pluie et je n'ai abordé le volet hydrologique qu'assez marginalement, via la modélisation des inondations à Niamey et quelques simulations académiques à Ouagadougou en lien avec Rain Cell. Dans les deux cas l'accent était mis sur la propagation des incertitudes du forçage pluviométrique dans un modèle pluie-débit. Je propose de développer en collaboration une approche plus intégrée de l'hydrologie de bassin, basée sur la modélisation hydrologique contrainte par d'autres variables également mesurées par satellite et distribuées au sein du bassin : hauteur d'eau ou débits issus de l'altimétrie satellitale en premier lieu, humidité du sol, information dynamique sur les surfaces inondées, et éventuellement stock d'eau. L'idée est d'utiliser la cohérence entre ces variables pour réduire l'incertitude globale sur la modélisation et mieux cerner les processus. Il s'agira de contribuer au développement de réanalyses hydrométéorologiques ensemblistes sur des bassins pilotes cibles, comme cela se fait dans la communauté météorologique avec les modèles numériques du temps (ERA ; NCEP). La méthode sera également appliquée au présent pour améliorer la prévision de débit – et d'inondations- par assimilation dans le modèle de différents type de données et la production de sorties ensemblistes. Des travaux en ce sens ont débuté en partenariat dans la dynamique des projets TRHYMS, SWOT, HYFAA.

Le système d'observation global de la terre est en évolution, cela a été mentionné. Les mesures spatiales tendent à devenir plus précises et leur résolution spatio-temporelle à augmenter. Une des (r)évolutions de ce 'nouvel espace' (new space) est le développement de petits satellites (micro et nanosat) dont le faible coût permet d'envisager des constellations. Dans le domaine des précipitation la constellation *Tropics* permettra une revisite très fréquente des systèmes pluvieux tropicaux et ainsi de mieux en comprendre la dynamique. Dans le domaine de l'hydrologie une mission originale SMASH, dont j'ai intégré l'équipe scientifique, a été proposée. SMASH serait une constellation de 10 au moins micro-altimètres, permettant une revisite journalière des rivières et lacs.

Réfléchir à l'apport de ces nouveaux satellites plus fréquents, interroge sur la variabilité et la prévisibilité des phénomènes hydrométéorologiques, et les échelles spatiales ou temporelles nécessaires pour les saisir. Ce sont des questions clefs pour accompagner et orienter l'évolution du système d'observation et réfléchir à une complémentarité optimale des mesures conventionnelles in situ, spatiales et autres capteurs innovants.

Des travaux en ce sens ont été entamés sur le fleuve Niger, en analysant la prévisibilité de ses crues via des simulations numérique du débit et de réseaux d'observations synthétiques. Via des expériences de type OSSE (Observation System Simulation Experiment) nous analysons la capacité de plusieurs systèmes d'observations potentiels à prédire le dépassement de seuils d'alertes dans des 'points chauds', par exemple le long de la Bénoue, un affluent du Niger soumis à des inondations alors que le Cameroun et le Nigeria peinent à partager les informations qui permettraient de partager ces risques. Ce contexte est assez symptomatique des conflits et tensions au sein des bassins transfrontaliers, que le libre partage d'une information indépendante sur l'eau, issue du satellite, peut contribuer à apaiser.

Ces recherches intéressent différents partenaires internationaux. Nos équipes IRD entretiennent une relation forte et suivie avec le CNES, autour de la valorisation dans les chantiers du Sud des mesures spatiales. Je continuerai à m'investir sur les bassins pilotes mis en place en préparation de SWOT en Afrique et en Amérique du Sud. Les fleuves Congo et surtout Niger autour duquel je vais co-encadrer la thèse de Mr Kone Soungalo, expert à l'Autorité du Bassin du Niger (ABN) qui souhaite acquérir une formation par la recherche en hydrologie spatiale et prévision.

Ces efforts sont en phase avec une prise de conscience, par différentes instances internationales dont l'OMM, du besoin d'évolution radicale des agences hydro-météorologiques des pays du Sud – et singulièrement en Afrique- sans laquelle les risques hydroclimatiques continueront à causer des dégâts parfois irréversibles. Les équipes IRD, qui connaissent bien les réalités et équipes locales, sont idéalement placées pour accompagner ces changements et aider à y impliquer les équipes de recherche du Sud. L'OMM m'a confié la coordination d'un chantier de démonstration de ces nouvelles techniques spatiales et Rain Cell auprès des services Hydrologique et météorologique tchadiens. Ce projet valorisera nos recherches dans un contexte de transfert vers l'opérationnel. Ce pilote servira d'appui à une intégration

progressives de ces nouvelles méthodes dans les systèmes d'observation standards labélisés par l'OMM. C'est une reconnaissance et un potentiel de développement supplémentaires pour nos travaux.

Améliorer l'estimation des précipitations – vers une approche régionale et multi-source

Les travaux sur les précipitations présentés dans ce manuscrit démontrent les progrès de nos connaissances sur les systèmes pluvieux tropicaux, leur structure, leur évolution, leur rôle dans le cycle hydrologique et la genèse des inondations. Ils mettent également en évidence des questions restées en suspens parce que le système d'observation global actuel ne permet pas de caractériser les précipitations jusqu'au échelles convectives (quelques kilomètres ; horaire) avec précision en tout point du globe. Certaines zones géographiques ou systèmes hydrométéorologiques à forts enjeux sont encore mal observés. Les régions montagneuses sont clairement dans cette catégorie même dans les pays les plus industrialisés. L'installation et la maintenance d'instruments in situ y est difficile ; les précipitations en phase neigeuse ou mixte, sont mal quantifiées par les instruments conventionnels et les radar météorologiques ; ces derniers sont affectés par des masques dus au relief ; enfin les surfaces pentues, parfois enneigées et les échelles spatiales très fines des processus atmosphériques complexes en jeu dans les pluies orographiques mettent en défaut les mesures et algorithmes satellitaires. Dans les régions montagneuses des pays moins développés le constat est bien plus dramatique. Dans les Andes par exemple la structure spatiale et temporelle fine des systèmes pluvieux reste mal connue, car elle est mal capturée par des réseaux pluviométriques très lâches. Ce déficit d'observation est en partie compensé par les progrès et la montée en résolution de la modélisation numériques des systèmes pluvieux. Cependant les modèles doivent eux même être validés avec des observations fiables et compatibles avec les échelles des processus représentés ; et pour la prévision comme pour la réanalyse, l'assimilation d'observations est nécessaire pour réduire les incertitudes du système.

Les enjeux autour d'objets hydrologiques de petite dimension posent globalement un défi pour l'estimation des précipitations.

Les risques hydrométéorologiques en milieu urbain ont été mentionnés. Dans les villes des pays industrialisés, les radars météorologiques apportent une réponse satisfaisante (mais non parfaite car les échos des bâtiments perturbent la mesure) à la surveillance des systèmes pluvieux aux échelles kilométriques et de quelques minutes. Une alternative exploitant les réseaux de téléphonie mobile a été proposée avec Rain Cell. Le potentiel de ces mesures pour l'hydrologie urbaine a été abordé (Figures 39, 40) dans la thèse de Maxime Turko.

Des recherches sont encore nécessaires pour tirer le meilleur parti de ces mesures et produire une estimation quantitative des champs de pluie tout en documentant les incertitudes associées. Les méthodes de traitement peuvent être améliorées pour mieux exploiter la densité et les particularités de ces réseaux hétérogènes (différentes fréquence ; orientation ; longueur des

liens). Des méthodes d'interpolation intelligentes et prenant en compte la géométrie unique de ces réseaux doivent être testées. L'évolution même des réseaux incite à maintenir une agilité dans les algorithmes développés. Les fréquences d'opération tendent à augmenter pour améliorer la communication (notamment pour la 5G) et la géométrie même des réseaux évolue, les liens les plus longs étant progressivement remplacés par la fibre optique. Une autre piste de développement est la prévision d'évolution des systèmes pluvieux en urbain, intéressante pour augmenter les échéances de prévisions hydrologiques. Ceci permettrait de nourrir des systèmes d'alertes précoces aux inondations dans les pays moins développés sur le modèle de produits comme « Vigicrue » en France.

L'intelligence artificielle est une piste prometteuse que nous avons commencé à aborder, en collaboration avec des spécialistes de ces méthodes, pour ces nouveaux développements autour de Rain Cell. Je continuerai à approfondir ces questions avec les partenaires internationaux du projet Rain Cell et particulièrement mon collègue (et ancien thésard) Modeste Kacou du LAPA d'Abidjan point focal africain de ces projets.

Le besoin d'observer les précipitations à fine échelle ne se limite pas aux zones montagneuses et urbaines. En zone sahélienne, les petites retenues et mares constituent une ressource essentielle pour une large partie des populations rurales les plus vulnérables. La surface totale de ces petits objets hydrologiques sahélien dépasse celle du lac Tchad et représente un enjeu sociétal aussi important, bien que moins médiatisé. Les missions satellitaires hautement résolues des programmes Copernicus et SWOT permettront de généraliser l'inventaire et le suivi des surfaces et volumes de ces objets ; mais pour comprendre leur fonctionnement hydrologique, le forçage pluviométrique doit être caractérisé à l'échelle de ces petits bassins. Ces questions intéressent d'autres régions arides comme le Nordeste brésilien. Dans le Ceara où je développerai de nouveaux travaux, la ressource en eau est disséminée dans des dizaines de milliers de petites retenues (les açundos) dont la surveillance et la prévision d'évolution sont un défi. Ces questions sont centrales au nouveau projet SPLASH financé par le programme CNES SWOT et dont je suis co-investigatrice avec Manuela Grippa.

L'agriculture est un autre type d'applications des données pluviométriques bien résolues spatialement. L'optimisation des ressources et la nécessité d'une agriculture raisonnée poussent les agriculteurs à surveiller de plus en plus précisément l'état hydrique de chaque parcelle. L'agriculture est d'ailleurs un moteur dans le développement de technique de surveillance avancées et l'objet de missions spatiales dédiées. Même dans les pays en développement, une agriculture utilisatrice de capteurs connectés se développe. L'application de la technique rain cell dans ces zones rurales serait intéressante mais est cependant questionnable car les réseaux hertziens n'y sont pas aussi denses qu'en urbain.

La nécessité de mieux tirer parti de l'information satellitaire pour estimer la pluie aux échelles fines demeure donc pleinement d'actualité.

Nos travaux dans le cadre Megha-Tropiques et d'autres études récentes ont documenté les difficultés du SO global actuel à détecter et quantifier la pluie aux échelles kilométriques et horaires, et analysé les raisons de ces limites. Elles sont liées à la structure interne des systèmes pluvieux et aux contraintes physiques de la mesure satellitaire. Seuls les capteurs infra-rouge sur satellites géostationnaires permettent d'accéder à une information fréquente (quelques

minutes sur les nouvelles générations) et à résolution kilométrique. Malheureusement cette information renseigne sur le développement nuageux et non directement sur la pluie en surface. Malgré tous les efforts de la communauté internationale pour améliorer les algorithmes, ces limites d'échelles semblent difficilement franchissables pour les produits globaux.

Avec les travaux de C Guilloteau, nous avons réfléchi à une approche stochastique pour fournir une information de fine échelle tout en incluant les incertitudes. Une philosophie similaire pourrait être développée avec des approches d'intelligence artificielle. Ces méthodes de désagrégation de l'information satellitaire demandent un entraînement et donc une réflexion sur d'autres sources d'information qui pourraient être intégrées à l'échelle régionale ou locale.

Ces questions sont au cœur d'un nouveau projet collaboratif autour de la thèse CIFRE de Rodrigo Zambrana (démarrée en décembre 2020). Il inclut plusieurs laboratoires de recherche et une start up toulousaine, Weather Force, spécialisée en science des données pour le développement de services météorologiques dans les pays moins développés. L'objet en est de construire des produits pluviométriques régionaux optimaux, fusionnant toutes les informations sur la pluie accessibles localement : l'information satellitaire puisqu'elle est globale, les réseaux pluviométriques et radar météorologiques lorsque disponibles et enfin, les mesures d'opportunités issues des réseaux de télécommunication. Les apports et limites de chacune de ces sources d'information ont été présentés individuellement dans mes travaux passés, ce nouveau projet se propose de faire une synthèse de ces acquis. Nous proposons de développer et tester cette nouvelle approche sur différentes zones pilotes, représentatives des différents types d'observation disponible et contextes météorologiques. Les pilotes africains du projet Rain Cell seront valorisés dans ce nouveau cadre, ainsi que plusieurs nouveaux sites sud américains, détaillés ci-dessous.

Vers de nouveaux sites d'étude en Amérique du sud :

Mes recherches ont été concentrées sur l'Afrique de l'Ouest et Centrale. Je m'intéresse depuis quelques années à l'Amérique du Sud, à travers une collaboration avec les équipes l'IPH/UFGS de Porto Alegre sur la modélisation hydrologique MGB déployée sur différents bassins tropicaux et sous l'angle du cycle de l'eau en Amérique du Sud observé par satellite. Mon affectation de deux ans à la FUNCEME de Fortaleza, démarrée en janvier 2021 va renforcer ces projets.

Les travaux initiés avec Megha-Tropiques au Brésil montrent la variabilité des régimes pluviométriques et les performances très contrastées des produits pluviométriques sur la région. Une région qui concentre plusieurs des questions auxquelles je souhaite contribuer dans mon projet de recherche :

Le climat et le cycle de l'eau en Amérique du Sud sont marqués par de très fort contrastes géographiques, de l'échelle des phénomènes pluvieux eux même, de quelques heures, à celle des grands modes de variabilité climatiques (dont le célèbre ENSO). Cette variabilité spatio-temporelle intense pose des problèmes de partage et de disponibilité de la ressource hydrique, dans une région sujette à de grandes inégalités territoriales. Les risques hydroclimatiques

semblent augmenter, notamment dans certains hot spots des Andes et de la partie amont du bassin amazonien, sujets à des inondations intenses récurrentes ou à l'opposé des régions arides comme le Nordeste qui subissent des sécheresses record. Comme dans beaucoup de régions tropicales, le système d'observation ne permet actuellement pas de capturer la variabilité du cycle de l'eau sur le continuum d'échelles qui permettrait de documenter tous les processus et leurs interactions. Les grandes évolutions climatiques régionales ont été bien analysées par la communauté sud-américaine travaillant sur le climat et le cycle de l'eau, mais les changements à l'échelle des systèmes pluvieux et leur impact local sont moins connus. Quelques projets comme CHUVA ont réalisé des campagnes de mesures ponctuelles et des études de cas, mettant en avant les différences entre les régions échantillonnées mais également la nécessité de systématiser la caractérisation des événements pluvieux pour mieux comprendre leur impact et interaction avec les surfaces. Ce type d'observation est nécessaire pour améliorer la modélisation numérique de ces événements pluvieux, dans les modèles météorologiques et climatiques. Je souhaite y contribuer en développant avec les partenaires sud-américains des méthodes d'analyses tirant tout le parti des données mobilisables. Des mesures alternatives comme Rain Cell seraient intéressantes en Amérique du Sud où les réseaux de télécommunications sont très développés. Les contacts n'ont pas encore donné lieu à l'échange de données sauf en Uruguay où une collaboration et des premiers tests ont été amorcés et pourraient servir de point d'appui pour le développement régional de ces nouvelles données et méthodes.

Le NordEst et en son sein le Ceara présente des similitudes avec une autre région semi-aride sur laquelle notre équipe a travaillé, le Sahel. Elles ont en commun une variabilité pluviométrique sensible jusqu'à des échelles très fines, de quelques kilomètres, et un éparpillement de la ressource en eau au sein de petits bassins et retenues dont le grand nombre et les petites dimensions limitent le suivi. Les outils combinant observation spatiale et modélisation que nous avons et continuons à développer au Sahel, seront utiles pour caractériser le fonctionnement hydrométéorologique des açundos du Ceara. Un des freins à l'étude spatialisée du cycle de l'eau et des risques hydrométéorologiques dans la région NordEst est la difficulté à quantifier la pluie à l'échelle régionale. La région est en effet le siège de systèmes pluvieux parfois intenses qui se développent à partir de processus physiques dits 'en phase chaude', présentant un développement vertical faible. Ces systèmes sont mal détectés par les satellites météorologiques à cause de leur signature spectrale inhabituelle. Avec le projet 'HydroMétéorologie spatiale et innovante pour le Nordeste' je propose de développer de nouvelles approches pour l'analyse de ces systèmes pluvieux en exploitant la base de données hydrométéorologique de la FUNCEME et les différentes techniques que j'ai développées en Afrique. Le Nordeste est l'un des site pilote du projet de thèse de Rodrigo Zambrana. Une collaboration a également été initiée avec le département de physique de l'Université Fédérale du Ceara et de chercheurs spécialistes de télécommunication et de science des données, avec l'objectif de créer un groupe de travail local dédié à l'innovation pour le suivi du cycle de l'eau.

Le plateau des Guyanes est un autre terrain d'étude où convergent questions scientifiques et enjeux socio-économiques autour de la ressource en eau et des risques. Le volet guyanais de la

thèse de R Zambrana s'inscrit dans le cadre plus large du projet HYSOM soutenu par le CNES et son Centre Spatial Guyanais (CSG), et dédié au développement de l'hydrologie spatiale sur le fleuve Maroni. Un élément de contexte très positif est l'installation prochaine (mi 2021) par le CSG d'un nouveau radar météorologique polarimétrique, l'un des premiers instruments opérationnels de ce type en contexte tropical humide et qui permettra de mettre en oeuvre les techniques d'auscultation raffinées présentées au chapitre 3.

Enfin, l'un des régions qui excite ma curiosité est la zone Andine, dont on constate qu'elle présente des contrastes saisissants, en latitude, longitude et altitude. La région fait l'objet de nombreuses études aux échelles climatologiques s'appuyant sur le réseau pluviographique ou des ré-analyses. Mais la structure fine et les processus physiques internes des systèmes pluvieux sont essentiellement inconnus, faute d'un réseau de radar météorologiques, alors que de nombreuses questions se posent sur l'augmentation des phénomènes extrêmes dans les 'hots spots' andins. Les données des radar aéroportés de GPM/TRMM/CLOUDSAT ont été assez peu exploitées dans cette zone et pourraient servir de base pour analyser ces systèmes pluvieux et leur évolution au cours des deux dernières décennies. Des contacts -pour l'instant peu fructueux- ont été pris par des partenaires de la région avec des opérateurs au Chili, en Bolivie et au Pérou car la méthodologie Rain Cell pourrait aider à éclairer nos connaissances dans ces zones peu instrumentées in situ. Parmi les questions que j'aimerais aborder dans cette région en tissant des collaborations régionales, l'estimation des précipitations est centrale. Outre les méthodes que j'ai déjà abordées dans ce document, une piste de recherche intéressante est d'exploiter la cohérence entre la pluie et d'autres variables. Les travaux autour de l'humidité du sol pour aider à détecter certains défauts (fausses alarmes ou non détections) des produits pluviométriques sont prometteurs dans les régions arides où l'humidité du sol est relativement bien estimée. Dans les régions à fort relief et avec peu d'infiltration, le débit mesuré en aval pourrait être une information pertinente pour contraindre les estimés de pluie sur les petits bassins montagneux, via des techniques d'inversion. J'ai abordé cette idée avec les équipes d'IPH/UFGRS et nous essaierons de la mettre en oeuvre durant mon séjour brésilien. Une motivation à mieux caractériser la pluie et ses extrêmes dans les Andes, est de mieux comprendre, et à terme anticiper, l'impact de ces phénomènes sur les inondations et les glissements de terrain fréquents dans cette région. Des travaux ont été initiés sur ces thèmes avec mon jeune collègue Odin Marc (Marc et al. 2019) .

Quantifier la valeur de l'information sur l'eau et les risques – un défi.

Le transfert de mes résultats de recherches vers des applications opérationnelles, m'a amenée vers de nouveaux acteurs et questions. Dans le cadre de Rain Cell plusieurs échanges avec les opérateurs, les agences hydrométéorologiques et les bailleurs du développement ont porté sur la définition d'un modèle économique qui permettrait de maintenir sur la durée, au bénéfice de toutes les parties un service opérationnel de surveillance et alerte basé sur notre méthodologie. Une collaboration préliminaire est en cours avec Weather Force et la Junior Entreprise d'une école de commerce sur le sujet. Des questions similaires se posent autour de la création de données à valeur ajoutée à partir de l'information satellitaire. La R&D nécessaire pour accompagner le transfert opérationnel a un coût, qu'il faut évaluer à l'aune des bénéfices des

services rendus. Ces gains peuvent être très indirects en contribuant à une meilleure résilience des populations, à la diminution des inégalités (les études montrent que les populations les plus pauvres, et singulièrement les femmes sont plus exposées aux risques hydrométéorologiques et fragilisées par leurs dégâts) ou bien très directs via la rétribution de services d'information hydroclimatique privés (à l'agro-industrie par exemple). C'est un domaine qui s'éloigne de mon cœur d'expertise mais auquel j'aimerais collaborer avec des économistes.

Références bibliographiques citées

Articles :

- Ali, A., T. Lebel, and A. Amani, 2003: Invariance in the Spatial Structure of Sahelian Rain Fields at Climatological Scales. *J. Hydrometeorol.*, **4**, [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2003\)004<0996:IITSSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2003)004<0996:IITSSO>2.0.CO;2).
- Allan, R. P., B. J. Soden, V. O. John, W. Ingram, and P. Good, 2010: Current changes in tropical precipitation. *Environ. Res. Lett.*, **5**, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/2/025205>.
- do Amaral, L. M. C., and Coauthors, 2018: Assessment of ground-reference data and validation of the H-SAF precipitation products in Brazil. *Remote Sens.*, **10**, <https://doi.org/10.3390/rs10111743>.
- AONASHI, K., and Coauthors, 2009: GSMaP Passive Microwave Precipitation Retrieval Algorithm : Algorithm Description and Validation. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **87A**, <https://doi.org/10.2151/jmsj.87A.119>.
- Bergès, J. C., I. Jobard, F. Chopin, and R. Roca, 2010: EPSAT-SG: a satellite method for precipitation estimation; its concepts and implementation for the AMMA experiment. *Ann. Geophys.*, **28**, <https://doi.org/10.5194/angeo-28-289-2010>.
- Berne, A., and W. F. Krajewski, 2013: Radar for hydrology: Unfulfilled promise or unrecognized potential? *Adv. Water Resour.*, **51**, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.05.005>.
- Biancamaria, S., D. P. Lettenmaier, and T. M. Pavelsky, 2016: The SWOT Mission and Its Capabilities for Land Hydrology. *Surv. Geophys.*, **37**, 307–337, <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9346-y>.
- Bolen, S. M., and V. Chandrasekar, 2003: Quantitative estimation of tropical rainfall mapping mission precipitation radar signals from ground-based polarimetric radar observations. *Radio Sci.*, **38**, <https://doi.org/10.1029/2002rs002625>.
- Bringi, V. N., and V. Chandrasekar, 2001: *Polarimetric Doppler Weather Radar*. Cambridge University Press.
- Casse, C., M. Gosset, C. Peugeot, V. Pedinotti, A. Boone, B. A. Tanimoun, and B. Decharme, 2015: Potential of satellite rainfall products to predict Niger River flood events in Niamey. *Atmos. Res.*, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.01.010>.
- Caumont, O., and Coauthors, 2006: A radar simulator for high-resolution nonhydrostatic models. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **23**, <https://doi.org/10.1175/JTECH1905.1>.
- Cazenave, F., M. Gosset, M. Kacou, M. Alcoba, E. Fontaine, C. Duroure, and B. Dolan, 2016: Characterization of hydrometeors in sahelian convective systems with an X-band radar and comparison with in situ measurements. Part I: Sensitivity of polarimetric radar particle identification retrieval and case study evaluation. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0013.1>.
- Chambon, P., I. Jobard, R. Roca, and N. Viltard, 2013: An investigation of the error budget of tropical rainfall accumulation derived from merged passive microwave and infrared satellite measurements. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **139**, <https://doi.org/10.1002/qj.1907>.
- , and Coauthors, 2020: APPORT DES OBSERVATIONS SPATIALES POUR L'ESTIMATION ET LA PREVISION DES PRECIPITATIONS Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Collischonn, W., D. Allasia, B. C. da Silva, and C. E. M. Tucci, 2007: The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrol. Sci. J.*, <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>.
- D'Amato, N., and T. Lebel, 1998: On the characteristics of the rainfall events in the Sahel with a view to the analysis of climatic variability. *Int. J. Climatol.*, **18**, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199807\)18:9<955::AID-JOC236>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199807)18:9<955::AID-JOC236>3.0.CO;2-6).
- Dankers, R., and Coauthors, 2014: First look at changes in flood hazard in the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project ensemble. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **111**, 3257–3261, <https://doi.org/10.1073/pnas.1302078110>.
- Depraetere, C., M. Gosset, S. Ploix, and H. Laurent, 2009: The organization and kinematics of

- tropical rainfall systems ground tracked at mesoscale with gages: First results from the campaigns 1999-2006 on the Upper Ouémé Valley (Benin). *J. Hydrol.*, **375**, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.01.011>.
- Descroix, L., P. Genthon, O. Amogu, J. L. Rajot, D. Sighomnou, and M. Vauclin, 2012: Change in Sahelian Rivers hydrograph: The case of recent red floods of the Niger River in the Niamey region. *Glob. Planet. Change*, **98–99**, 18–30, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.07.009>.
- Descroix, L., and Coauthors, 2018: Evolution of surface hydrology in the Sahelo-Sudanian Strip: An updated review. *Water (Switzerland)*, **10**, <https://doi.org/10.3390/w10060748>.
- Doumounia, A., M. Gosset, F. Cazenave, M. Kacou, and F. Zougmore, 2014: Rainfall monitoring based on microwave links from cellular telecommunication networks: First results from a West African test bed. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, <https://doi.org/10.1002/2014GL060724>.
- Easterling, D. R., G. A. Meehl, C. Parmesan, S. A. Changnon, T. R. Karl, and L. O. Mearns, 2000: Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. *Science (80-.)*, **289**, 2068–2074, <https://doi.org/10.1126/science.289.5487.2068>.
- Fleischmann, A., and Coauthors, 2018: Modelling hydrologic and hydrodynamic processes in basins with large semi-arid wetlands. *J. Hydrol.*, **561**, 943–959, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.041>.
- Fontaine, E., A. Schwarzenboeck, J. Delanoë, W. Wobrock, D. Leroy, R. Dupuy, C. Gourbeyre, and A. Protat, 2014: Constraining mass-diameter relations from hydrometeor images and cloud radar reflectivities in tropical continental and oceanic convective anvils. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 11367–11392, <https://doi.org/10.5194/acp-14-11367-2014>.
- Gorgucci, E., V. Chandrasekar, and L. Baldini, 2008: Microphysical Retrievals from Dual-Polarization Radar Measurements at X Band. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **25**, 729–741, <https://doi.org/10.1175/2007JTECHA971.1>.
- Gosset, M., 2004: Effects of nonuniform beam filling on the propagation of radar signals at X-band frequencies. Part II: Examination of differential phase shift. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **21**, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2004\)021<0358:EONBFO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2004)021<0358:EONBFO>2.0.CO;2).
- , and I. Zawadzki, 2001: Effect of Nonuniform Beam Filling on the Propagation of the Radar Signal at X-Band Frequencies. Part I: Changes in the $k(Z)$ Relationship. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **18**, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<1113:EONBFO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<1113:EONBFO>2.0.CO;2).
- Gosset, M., E. P. Zahirib, and S. Moumounic, 2010: Rain drop size distribution variability and impact on X-band polarimetric radar retrieval: Results from the AMMA campaign in Benin. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **136**, 243–256, <https://doi.org/10.1002/qj.556>.
- , J. Viarre, G. Quantin, and M. Alcoba, 2013: Evaluation of several rainfall products used for hydrological applications over West Africa using two high-resolution gauge networks. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **139**, 923–940, <https://doi.org/10.1002/qj.2130>.
- Gosset, M., M. Alcoba, R. Roca, S. Cloché, and G. Urbani, 2018: Evaluation of TAPEER daily estimates and other GPM-era products against dense gauge networks in West Africa, analysing ground reference uncertainty. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **144**, 255–269, <https://doi.org/10.1002/qj.3335>.
- Guilloteau, C., M. Gosset, C. Vignolles, M. Alcoba, Y. M. Tourre, and J.-P. Lacaux, 2014: Impacts of Satellite-Based Rainfall Products on Predicting Spatial Patterns of Rift Valley Fever Vectors*. *J. Hydrometeorol.*, **15**, 1624–1635, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0134.1>.
- Guilloteau, C., R. Roca, and M. Gosset, 2016: A multiscale evaluation of the detection capabilities of high-resolution satellite precipitation products in West Africa. *J. Hydrometeorol.*, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0148.1>.
- Guilloteau, C., R. Roca, M. Gosset, and V. Venugopal, 2018: Stochastic generation of precipitation fraction at high resolution with a multiscale constraint from satellite observations. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **144**, <https://doi.org/10.1002/qj.3314>.
- Gupta, V. K., and S. Sorooshian, 1985: The relationship between data and the precision of parameter estimates of hydrologic models. *J. Hydrol.*, **81**, 57–77, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(85\)90167-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(85)90167-2).
- Hou, A. Y., R. K. Kakar, S. Neeck, A. A. Azarbarzin, and D. Christian, 2008: The Global Precipitation Measurement (GPM) Mission. 1–46.

- Hou, A. Y., and Coauthors, 2014: The global precipitation measurement mission. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **95**, 701–722, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1>.
- Jobard, I., F. Chopin, J. C. Berges, and R. Roca, 2011: An intercomparison of 10-day satellite precipitation products during West African monsoon. *Int. J. Remote Sens.*, **32**, <https://doi.org/10.1080/01431161003698286>.
- Kidd, C., A. Becker, G. J. Huffman, C. L. Muller, P. Joe, G. Skofronick-Jackson, and D. B. Kirschbaum, 2017: So, How Much of the Earth's Surface Is Covered by Rain Gauges? *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **98**, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00283.1>.
- Kidd, C., J. Tan, P. Kirstetter, and W. A. Petersen, 2018: Validation of the Version 05 Level 2 precipitation products from the GPM Core Observatory and constellation satellite sensors. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **144**, <https://doi.org/10.1002/qj.3175>.
- , S. Shige, D. Vila, E. Tarnavsky, M. K. Yamamoto, V. Maggioni, and B. Maseko, 2020: The IPWG satellite precipitation validation effort. *Advances in Global Change Research*, Vol. 69 of, Springer, 453–470.
- Kirstetter, P.-E., H. Andrieu, B. Boudevillain, and G. Delrieu, 2013a: A Physically Based Identification of Vertical Profiles of Reflectivity from Volume Scan Radar Data. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **52**, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0228.1>.
- Kirstetter, P.-E., N. Viltard, and M. Gosset, 2013b: An error model for instantaneous satellite rainfall estimates: Evaluation of BRAIN-TMI over West Africa. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **139**, <https://doi.org/10.1002/qj.1964>.
- Koffi, A. K., M. Gosset, E.-P. Zahiri, A. D. Ochou, M. Kacou, F. Cazenave, and P. Assamoi, 2014: Evaluation of X-band polarimetric radar estimation of rainfall and rain drop size distribution parameters in West Africa. *Atmos. Res.*, **143**, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.03.009>.
- Kummerow, C., and Coauthors, 2000: The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in Orbit. *J. Appl. Meteorol.*, **39**, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<1965:TSOTTR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<1965:TSOTTR>2.0.CO;2).
- Kummerow, C., and Coauthors, 2001: The Evolution of the Goddard Profiling Algorithm (GPROF) for Rainfall Estimation from Passive Microwave Sensors. *J. Appl. Meteorol.*, **40**, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<1801:TEOTGP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<1801:TEOTGP>2.0.CO;2).
- Lebel, T., and Coauthors, 2010: The AMMA field campaigns: Multiscale and multidisciplinary observations in the West African region. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **136**, 8–33, <https://doi.org/10.1002/qj.486>.
- Leijnse, H., R. Uijlenhoet, and J. N. M. Stricker, 2008: Microwave link rainfall estimation: Effects of link length and frequency, temporal sampling, power resolution, and wet antenna attenuation. *Adv. Water Resour.*, **31**, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.03.004>.
- Levizzani, V., and Coauthors, 2018: The activities of the international precipitation working group. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **144**, <https://doi.org/10.1002/qj.3214>.
- Lorenz, C., and H. Kunstmann, 2012: The Hydrological Cycle in Three State-of-the-Art Reanalyses: Intercomparison and Performance Analysis. *J. Hydrometeorol.*, **13**, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-088.1>.
- Marc, O., A. Stumpf, J.-P. Malet, M. Gosset, T. Uchida, and S.-H. Chiang, 2018: Initial insights from a global database of rainfall-induced landslide inventories: The weak influence of slope and strong influence of total storm rainfall. *Earth Surf. Dyn.*, <https://doi.org/10.5194/esurf-6-903-2018>.
- Marc, O., M. Gosset, H. Saito, T. Uchida, and J. Malet, 2019: Spatial Patterns of Storm-Induced Landslides and Their Relation to Rainfall Anomaly Maps. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 11167–11177, <https://doi.org/10.1029/2019GL083173>.
- Marshall, J. S., and W. M. K. Palmer, 1948: THE DISTRIBUTION OF RAINDROPS WITH SIZE. *J. Meteorol.*, **5**, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1948\)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2).
- Marsily, G. de, R. Abarca-del-Rio, A. Cazenave, and P. Ribstein, 2018: Allons-nous bientôt manquer d'eau ? *La Météorologie*, **2018**, 39, <https://doi.org/10.4267/2042/67429>.
- Mathon, V., and H. Laurent, 2001: Life cycle of Sahelian mesoscale convective cloud systems. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **127**, <https://doi.org/10.1002/qj.49712757208>.

- , ——, and T. Lebel, 2002: Mesoscale Convective System Rainfall in the Sahel. *J. Appl. Meteorol.*, **41**, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<1081:MCSRIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<1081:MCSRIT>2.0.CO;2).
- Matrosov, S. Y., D. E. Kingsmill, B. E. Martner, and F. M. Ralph, 2005: The utility of X-band polarimetric radar for quantitative estimates of rainfall parameters. *J. Hydrometeorol.*, **6**, 248–262, <https://doi.org/10.1175/JHM424.1>.
- Meehl, G. A., and Coauthors, 2000: An Introduction to Trends in Extreme Weather and Climate Events: Observations, Socioeconomic Impacts, Terrestrial Ecological Impacts, and Model Projections * . *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **81**, 413–416, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)081<0413:aittie>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<0413:aittie>2.3.co;2).
- Moumouni, S., M. Gosset, and E. Houngrinou, 2008: Main features of rain drop size distributions observed in Benin, West Africa, with optical disdrometers. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, <https://doi.org/10.1029/2008GL035755>.
- Nesbitt, S. W., and A. M. Anders, 2009: Very high resolution precipitation climatologies from the Tropical Rainfall Measuring Mission precipitation radar. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, <https://doi.org/10.1029/2009GL038026>.
- Ochou, A. D., A. Nzeukou, and H. Sauvageot, 2007: Parametrization of drop size distribution with rain rate. *Atmos. Res.*, **84**, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2006.05.003>.
- Overeem, A., H. Leijnse, and R. Uijlenhoet, 2012: Country-wide rainfall maps from cellular communication networks. 1–5, <https://doi.org/10.1073/pnas.1217961110>.
- Panthou, G., T. Vischel, T. Lebel, G. Quantin, and G. Molinié, 2014: Characterising the space-time structure of rainfall in the Sahel with a view to estimating IDAF curves. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **18**, 5093–5107, <https://doi.org/10.5194/hess-18-5093-2014>.
- Panthou, G., T. Vischel, T. Lebel, G. Quantin, and A. Ali, 2015: Caractérisation de la structure spatio temporelle des pluies extrêmes : Estimation de courbes IDSF pour la région de Niamey. *Houille Blanche*, **2015-January**, 58–63, <https://doi.org/10.1051/lhb/20150034>.
- Paris, A., and Coauthors, 2020: Monitoring hydrological variables from remote sensing and modelling in the Congo River basin. <https://doi.org/10.1002/ESSOAR.10505518.1>.
- Pavelsky, T. M., M. T. Durand, K. M. Andreadis, R. E. Beighley, R. C. D. Paiva, G. H. Allen, and Z. F. Miller, 2014: Assessing the potential global extent of SWOT river discharge observations. *J. Hydrol.*, **519**, 1516–1525, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.044>.
- Pedinotti, V., A. Boone, S. Ricci, S. Biancamaria, and N. Mognard, 2014: Assimilation of satellite data to optimize large-scale hydrological model parameters: A case study for the SWOT mission. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **18**, 4485–4507, <https://doi.org/10.5194/hess-18-4485-2014>.
- Peugeot, C., and Coauthors, 2011: Mesoscale water cycle within the West African Monsoon. *Atmos. Sci. Lett.*, **12**, <https://doi.org/10.1002/asl.309>.
- Prein, A. F., R. M. Rasmussen, K. Ikeda, C. Liu, M. P. Clark, and G. J. Holland, 2017: The future intensification of hourly precipitation extremes. *Nat. Clim. Chang.*, **7**, 48–52, <https://doi.org/10.1038/nclimate3168>.
- Ramarohetra, J., B. Sultan, C. Baron, T. Gaiser, and M. Gosset, 2013: How satellite rainfall estimate errors may impact rainfed cereal yield simulation in West Africa. *Agric. For. Meteorol.*, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.05.010>.
- Richards, F., and P. Arkin, 1981: On the Relationship between Satellite-Observed Cloud Cover and Precipitation. *Mon. Weather Rev.*, **109**, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<1081:OTRBSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<1081:OTRBSO>2.0.CO;2).
- Roca, R., P. Chambon, I. Jobard, P.-E. Kirstetter, M. Gosset, and J. C. Bergés, 2010: Comparing satellite and surface rainfall products over West Africa at meteorologically relevant scales during the AMMA campaign using error estimates. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **49**, <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2318.1>.
- Roca, R., and Coauthors, 2015: The megha-tropiques mission: A review after three years in orbit. *Front. Earth Sci.*, **3**, <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00017>.
- Satgé, F., M.-P. Bonnet, M. Gosset, J. Molina, W. Hernan Yuque Lima, R. Pillco Zolá, F. Timouk, and J. Garnier, 2015: Assessment of satellite rainfall products over the Andean plateau. *Atmos. Res.*, **167**, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.07.012>.
- Seliga, T. A., and V. N. Bringi, 1976: Potential Use of Radar Differential Reflectivity Measurements

- at Orthogonal Polarizations for Measuring Precipitation. *J. Appl. Meteorol.*, **15**, 69–76, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1976\)015<0069:PUORDR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1976)015<0069:PUORDR>2.0.CO;2).
- , and —, 1978: Differential reflectivity and differential phase shift: Applications in radar meteorology. *Radio Sci.*, **13**, 271–275, <https://doi.org/10.1029/RS013i002p00271>.
- Stephens, G. L., and C. D. Kummerow, 2007: The Remote Sensing of Clouds and Precipitation from Space: A Review. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 3742–3765, <https://doi.org/10.1175/2006JAS2375.1>.
- Tabary, P., and G. Scialom, 2001: MANDOP Analysis over Complex Orography in the Context of the MAP Experiment. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **18**, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<1293:MAOCOI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<1293:MAOCOI>2.0.CO;2).
- Testud, J., E. Le Bouar, E. Obligis, and M. Ali-Mehenni, 2000: The rain profiling algorithm applied to polarimetric weather radar. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **17**, 332–356, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017<0332:TRPAAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<0332:TRPAAT>2.0.CO;2).
- , S. Oury, R. A. Black, P. Amayenc, and X. Dou, 2001: The Concept of “Normalized” Distribution to Describe Raindrop Spectra: A Tool for Cloud Physics and Cloud Remote Sensing. *J. Appl. Meteorol.*, **40**, 1118–1140, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<1118:TCONDIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<1118:TCONDIT>2.0.CO;2).
- Thurai, M., G. J. Huang, V. N. Bringi, W. L. Randeu, and M. Schönhuber, 2007: Drop Shapes, Model Comparisons, and Calculations of Polarimetric Radar Parameters in Rain. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **24**, 1019–1032, <https://doi.org/10.1175/JTECH2051.1>.
- , V. N. Bringi, L. D. Carey, P. Gatlin, E. Schultz, and W. A. Petersen, 2012: Estimating the Accuracy of Polarimetric Radar-Based Retrievals of Drop-Size Distribution Parameters and Rain Rate: An Application of Error Variance Separation Using Radar-Derived Spatial Correlations. *J. Hydrometeorol.*, **13**, 1066–1079, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-070.1>.
- Uijlenhoet, R., M. Steiner, and J. A. Smith, 2003: Variability of Raindrop Size Distributions in a Squall Line and Implications for Radar Rainfall Estimation. *J. Hydrometeorol.*, **4**, 43–61, [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2003\)004<0043:VORSDI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2003)004<0043:VORSDI>2.0.CO;2).
- , A. Overeem, and H. Leijnse, 2018: Opportunistic remote sensing of rainfall using microwave links from cellular communication networks. *Wiley Interdiscip. Rev. Water*, **5**, <https://doi.org/10.1002/wat2.1289>.
- Veldkamp, T. I. E., and Coauthors, 2018: Human impact parameterizations in global hydrological models improve estimates of monthly discharges and hydrological extremes: A multi-model validation study. *Environ. Res. Lett.*, **13**, 055008, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab96f>.
- Viltard, N., C. Burlaud, and C. D. Kummerow, 2006: Rain Retrieval from TMI Brightness Temperature Measurements Using a TRMM PR-Based Database. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **45**, 455–466, <https://doi.org/10.1175/JAM2346.1>.
- Vischel, T., G. Quantin, T. Lebel, J. Viarre, M. Gosset, F. Cazenave, and G. Panthou, 2011: Generation of high-resolution rain fields in West Africa: Evaluation of dynamic interpolation methods. *J. Hydrometeorol.*, **12**, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-10-05015.1>.
- Vorosmarty, C., and Coauthors, 2001: Global water data: A newly endangered species. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, **82**, <https://doi.org/10.1029/01E000031>.
- Zahiri, E.-P., M. Gosset, J.-P. Lafore, and V. Gouget, 2008: Use of a radar simulator on the output fields from a numerical mesoscale model to analyze X-band rain estimators. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **25**, <https://doi.org/10.1175/2007JTECHA933.1>.
- Zhang, G., J. Vivekanandan, and E. Brandes, 2001: A method for estimating rain rate and drop size distribution from polarimetric radar measurements. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **39**, 830–841, <https://doi.org/10.1109/36.917906>.

Sites Web et rapports :

<https://www.treehugger.com/world-water-disaster-numbers-4856798>

<https://www.worldwaterday.org/>

<https://meghatropiques.ipsl.fr/mt-validation/>

Center for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 2020. Human cost of disasters, an overview of the last 20 years (2000-2019). Available online: <https://cred.be/sites/default/files/CRED-Disaster-Report-Human-Cost2000-2019.pdf> (last accessed February 2nd, 2021)

-Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations (2011). Water for agriculture and energy in Africa The challenge of climate change - Report of the ministerial conference, 15-17 December 2008, Sirte, Libyan Arab Jamahiriya. FAO report, ISBN 978-92-5-106930-1, available online: <http://www.fao.org/3/i2345e/i2345e00.htm> (last accessed 01 March 2021)

Annexe : Six publications significatives

Sélection des articles :

Dans ce choix de 6 articles qui couvrent le spectre de mes activités, j'ai privilégié ceux qui apportent une réflexion ou méthodologie particulièrement originale, ou marquent une étape importante dans mon cheminement de chercheuse.

1) Zahiri, E.-P., M. Gosset, J.-P. Lafore, and V. Gouget. 2008. "Use of a Radar Simulator on the Output Fields from a Numerical Mesoscale Model to Analyze X-Band Rain Estimators." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 25 (3). <https://doi.org/10.1175/2007JTECHA933.1>.

Ce papier traite de l'estimation quantitative des précipitations en zone tropicale par radar polarimétrique bande X, et prépare les campagnes Xport en Afrique et l'expérience AMMA. Une analyse poussée des algorithmes et incertitudes y est présentée. Un point original est l'utilisation d'un simulateur radar au sein du modèle numérique atmosphérique haute résolution MésoNH, qui permet de générer des lignes de grains africaines avec réalisme. La collaboration initiée avec Météo-France sur ce sujet a débouché sur le développement de l'opérateur d'observation radar utilisé pour l'assimilation de ces données dans le modèle opérationnel AROME. Je dois aussi avouer une certaine tendresse pour cet article de mon premier thésard, EP Zahiri. Il marque le début d'une collaboration fructueuse avec l'équipe du LAPA d'Abidjan où 2 autres thèses ont été encadrées, et avec qui nous portons aujourd'hui le développement du projet Rain Cell.

2) Alcoba, M, M Gosset, M Kacou, F Cazenave, and E Fontaine. 2016. "Characterization of Hydrometeors in Sahelian Convective Systems with an X-Band Radar and Comparison with in Situ Measurements. Part II: A Simple Brightband Method to Infer the Density of Icy Hydrometeors." *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0014.1>.

Ce papier aborde un autre aspect des mesures radar : l'auscultation tri-dimensionnelle et l'analyse des processus microphysiques. Une méthode originale est mise en œuvre pour combiner les mesures radar et un modèle physique simplifié. Ce type d'approche est représentatif de ce que je veux continuer à développer en fusionnant différents types d'information, observations et modèles. Les résultats du papier confirment nos autres analyses (radar polarimétrique dans Cazenave et al. et disdromètre dans Moumouni et al.) et les schémas théoriques, sur l'évolution de la microphysique au sein des lignes de grain africaines, et les différences entre les parties convectives et stratiformes. Cette analyse des propriétés physiques des hydrométéores glacés dans la partie supérieure des précipitations fait le lien avec l'estimation de pluie par satellite micro-onde et a contribué à améliorer ces algorithmes.

3) Doumounia, A, M Gosset, F Cazenave, M Kacou, and F Zougmore. 2014. “Rainfall Monitoring Based on Microwave Links from Cellular Telecommunication Networks: First Results from a West African Test Bed.” *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1002/2014GL060724>.

Cette étude très remarquée et reprise à sa sortie par plusieurs media internationaux (Washington Post ; Courrier international, etc.) démontre pour la première fois en Afrique -où les réseaux pluviométriques sont très insuffisants- qu’une mesure complémentaire est techniquement viable : mesurer la pluie à partir des réseaux de téléphonie mobile. Ce papier et l’attention que les bailleurs du développement lui ont donné (Banque Mondiale ; UNF ; OMM) a marqué le début du projet Rain Cell Africa et de ses sites pilotes. L’estimation de pluie par lien micro-onde est comparée aux pluviographes et au radar Xport qui étaient déployés au Burkina Faso dans le cadre des validations du satellite Megha-Tropiques – valorisant ainsi cette campagne instrumentale.

Au-delà de cet aspect pionnier, les résultats scientifiques sont intéressants. Malgré un lien très long (30 km) et une fréquence d’opération basse (7 GHz) plutôt défavorables à la méthode, ces premiers résultats sont excellents. La méthode permet de détecter 95% des événements pluvieux, avec seulement 5% de fausse alarme et une excellente corrélation des séries pluviométriques journalières entre le lien et le pluviographe. La comparaison à fine échelle (5 min) est également très convaincante avec des corrélations de 0.7 en moyenne au sein des événements. Ceci met en avant un aspect de la méthode que les études en zone tempérées n’avaient pas montré : elle fonctionne particulièrement sur les pluies intenses tropicales car celles-ci atténuent très fortement le signal. Cette validation a ouvert la voie à de nombreux travaux collaboratifs, notamment sur l’utilisation de la méthode en hydrologie urbaine, car c’est dans les villes que le réseau de téléphonie est le plus dense.

4) Gosset, Marielle, Matias Alcoba, Remy Roca, Sophie Cloché, and Guillaume Urbani. 2018. “Evaluation of TAPEER Daily Estimates and Other GPM-Era Products against Dense Gauge Networks in West Africa, Analysing Ground Reference Uncertainty.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 144 (November): 255–69. <https://doi.org/10.1002/qj.3335>.

Cette étude évalue les produits satellitaires les plus représentatifs de l’état de l’art, donc intégrant la constellation satellitaire internationale GPM, en Afrique de l’Ouest. Les résultats permettent de mesurer les progrès faits ces dernières années dans le domaine de l’estimation satellitaire des précipitations, grâce à un système d’observation renforcé (avec notamment l’orbite tropicale du satellite Megha-Tropiques inclus dans GPM), mais également grâce à l’amélioration graduelle des algorithmes (nourris par des campagnes de validation comme les nôtres). Cette bonne capacité des produits à détecter et quantifier les précipitations est une excellente nouvelle pour la communauté scientifique et nos partenaires du Sud puisque ces données sont en accès libre. Comparé à d’autres (nombreux) travaux sur l’évaluation des produits satellitaires notre étude se démarque par certains détails méthodologiques. Nous mettons l’accent sur la notion d’incertitude y compris dans la ‘vérité’ sol. En profitant de la densité de pluviographes des réseaux AMMA-CATCH , nous montrons par des tirs aléatoires dans ces données, que la référence ne devient robuste à l’échelle journalière que pour 5 à 10 pluviographes pour 1°x1°. Ceci met en avant la nécessité de préserver les observatoires de recherche français comme AMMA-CATCH et des réseaux opérationnels de qualité indispensables pour évaluer les satellites.

5) Casse, C., M. Gosset, T. Vischel, G. Quantin, and B.A. Tanimoun. 2016. "Model-Based Study of the Role of Rainfall and Land Use-Land Cover in the Changes in the Occurrence and Intensity of Niger Red Floods in Niamey between 1953 and 2012." *Hydrology and Earth System Sciences* 20 (7). <https://doi.org/10.5194/hess-20-2841-2016>.

Cette étude aborde un problème scientifique et sociétal majeur : la recrudescence des inondations en Afrique sahélienne et les causes (multiples) de ces phénomènes. Il fait suite à une série de nos papiers qui ont démontré la pertinence d'une approche combinant un modèle hydrologique et un produit pluviométrique satellitaire pour simuler les inondations de la période récente, à Niamey. Ici nous utilisons le modèle et différents forçages pluviométriques, in situ et satellitaire, pour analyser les changements sur une période étendue de 60. Cette période est marquée par un changement drastique de l'hydrogramme du Niger à Niamey, et l'apparition puis le renforcement d'un double pic de crue. Notre étude montre que sur les 30 dernières années l'augmentation des inondations est bien expliquée par la variabilité pluviométrique – bien capturée par le produit satellitaire et in situ. Par contre l'évolution de l'hydrogramme entre la période humide (décennies 50-60) et récente, pour des cumuls de pluie proches, n'est reproduite qu'en prenant compte des changements d'états de surfaces, durablement affectés par les sécheresses des décennies 70-80. Le papier apporte des réponses à des questions sur la causalité des inondations récentes, qui agitaient la communauté spécialiste. Il démontre l'effet des changements globaux sur le comportement hydrologique.

Cette étude qui associe l'Autorité du Bassin du Niger a contribué à éveiller leur intérêt pour nos outils de modélisation et d'observation satellitaire. Elle marque le début d'une collaboration renforcée avec eux autour du projet de faire du Niger un bassin pilote en hydrologie spatiale.

6) Marc, O., M. Gosset, H. Saito, T. Uchida, and J. Malet, 2019: Spatial Patterns of Storm-Induced Landslides and Their Relation to Rainfall Anomaly Maps. *Geophys. Res. Lett.*, 46, 11167–11177, <https://doi.org/10.1029/2019GL083173>.

Ce travail illustre la collaboration initiée avec l'équipe d'Odin Marc sur un nouveau thème : le lien entre précipitations extrêmes et glissements de terrain, dont on comprend facilement l'intérêt scientifique et applicatif. Ce problème est une applications directe d'enjeux que j'ai abordés précédemment (dans la thèse de C Guilloteau notamment) : la limite en échelle des produits pluviométriques et les lacunes du système d'observation courant. Les glissements de terrain sont très localisés et leur cause multi-factorielle ce qui complique cette analyse. Leur localisation à partir de l'imagerie satellitaire s'améliore mais demeure incertaine, en particulier pour déterminer l'heure d'occurrence. Avec Odin, nous proposons une approche basée sur la détection d'anomalie de pluie par rapport à la climatologie locale, plutôt que des seuils sur les cumuls. La méthode testée ici au Japon avec des données radar est prometteuse et nous testons son application avec des produits satellitaires sur d'autres sites.