



HAL
open science

Les leçons de l'expérience AMMA en matière de prévision numérique du temps

Fatima Karbou, Florent Beucher, Olivier Bock, Jean-Philippe Lafore, Mumba Ziloré, Jean-Blaise Ngamini, Mathieu Nuret, Florence Rabier, Jean-Luc Redelsperger

► **To cite this version:**

Fatima Karbou, Florent Beucher, Olivier Bock, Jean-Philippe Lafore, Mumba Ziloré, et al.. Les leçons de l'expérience AMMA en matière de prévision numérique du temps. *La Météorologie*, 2012, 8 (Special-AMMA), pp.49. 10.4267/2042/48132 . hal-03973845

HAL Id: hal-03973845

<https://hal.science/hal-03973845v1>

Submitted on 5 Feb 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les leçons de l'expérience AMMA en matière de prévision numérique du temps

Fatima Karbou⁽¹⁾, Florent Beucher⁽¹⁾, Olivier Bock⁽²⁾,
Jean-Philippe Lafore⁽¹⁾, Ziloré Mumba⁽³⁾, Jean-Blaise Ngamini⁽⁴⁾,
Mathieu Nuret⁽¹⁾, Florence Rabier⁽¹⁾ et Jean-Luc Redelsperger⁽⁵⁾

(1) CNRM-GAME, Météo-France et CNRS

(2) LAREG, IGN

(3) ACMAD

(4) ASECNA

(5) Laboratoire de physique des océans

Résumé

Peut-on prévoir avec précision la mousson de l'Afrique de l'Ouest et notamment son démarrage, sa durée et son intensité ? S'il reste encore du chemin à parcourir avant de réaliser de telles prévisions, des études récentes menées dans le cadre de l'expérience AMMA (Analyses multidisciplinaires de la mousson africaine) ont permis de faire progresser considérablement la prévision numérique du temps dans cette région.

Abstract

What we learned about numerical weather prediction with AMMA?

How accurate are the West African Monsoon analyses and forecasts? Can we accurately predict the monsoon onset, duration and intensity? While there is still some way to go before making such forecasts, recent studies conducted within the framework of the African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA) experiment made it possible to improve considerably the numerical weather prediction in this region.

Les observations *in situ*, de surface et d'altitude, représentent encore aujourd'hui les observations de référence pour les modèles de prévision numérique du temps (PNT). Ces modèles n'ont cessé d'évoluer au cours des dernières décennies en intégrant des paramétrisations physiques de plus en plus proches des processus qu'elles décrivent, en utilisant des méthodes mathématiques de plus en plus compliquées et en exploitant des observations de différentes natures. La formidable augmentation de la puissance des calculateurs a été déterminante dans de nombreuses avancées comme la mise en œuvre de modèles météorologiques à haute résolution spatiale pour décrire plus finement les processus de petite échelle. Cependant, quelle fiabilité accorder aux modèles de PNT dans des régions très peu observées ou pour des phénomènes météorologiques non encore bien compris ? L'Afrique de l'Ouest est une région qui cumule ces deux inconvénients et la représentation précise de son système de mousson dans les modèles demeure encore aujourd'hui un défi scientifique aux enjeux sociétaux majeurs. Les faiblesses des modèles dans cette région du monde reflètent souvent des lacunes dans la représentation paramétrée de certains phénomènes physiques,

exacerbées par le manque d'observations qui seraient nécessaires pour ajuster les modèles. Parmi ces faiblesses, on peut citer la représentation imparfaite du cycle hydrologique (Meynadier et al., 2010b), les biais potentiels dans les mesures d'humidité des radiosondages qui peuvent altérer les prévisions de pluie (Nuret et al., 2008) et le peu de données de télédétection spatiale assimilées dans les régions tropicales qui sont souvent couvertes par les nuages.

La remise en état et la densification du réseau d'observation *in situ* en Afrique de l'Ouest fut l'une des actions phares du programme AMMA (Analyses multidisciplinaires de la mousson africaine) dès son lancement en 2002 (Parker et al., 2008). En effet, créer et maintenir un réseau d'observations à but opérationnel coûte très cher, en particulier dans des régions comme l'Afrique de l'Ouest où le réseau a subi d'importantes dégradations dans le passé. La dégradation du réseau fut telle qu'aucune donnée de radiosondage n'était exploitée dans des zones clés du point de vue météorologique : la zone du flux de mousson au sud de 10° N, la zone amont du jet d'est africain à 10° E et la région du Sahel comprise entre 15° N et 20° N. Or, il est incontestablement difficile de réaliser des progrès dans la

des données MSG⁽¹⁾ (projet PUMA⁽²⁾) financées par l'organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques, EUMETSAT. De plus, une source complémentaire de données a été mise à disposition du Centre africain des applications de la météorologie au développement (ACMAD) au Niger par le biais du système SYNERGIE⁽³⁾ de Météo-France afin de rendre disponibles les analyses et les prévisions météorologiques. Mis à part les données, analyser et prévoir les caractéristiques synoptiques de la mousson nécessitent également la mise en place d'un cadre conceptuel adapté pouvant aider les prévisionnistes à effectuer leurs diagnostics. Pour répondre à ce besoin, l'approche WASA/F (West African Synthetic Analysis/Forecasting) fut développée et peut être considérée, à plusieurs égards, comme l'une des principales réalisations du programme AMMA (voir encadré page précédente).

Le réseau de radiosondages AMMA

Parker et al. (2008) ont décrit en détail l'état de vétusté du réseau des stations de radiosondages en Afrique de l'Ouest et ont présenté les stratégies à adopter pour le rénover et le densifier. Parmi les succès marquants de l'expérience AMMA figure la remise en service de stations qui n'avaient pas fonctionné depuis longtemps, une vingtaine d'années pour quelques stations. Ce fut le cas par exemple pour les stations de Tamale (Ghana, inactive depuis 1981), Abidjan (Côte-d'Ivoire, inactive depuis 2001), Ngaoundéré (Cameroun, aucune mesure de cette station n'a alimenté le GTS), Conakry (Guinée) et Tessalit (active en 2007-2008). Trois nouvelles stations ont été créées dans la zone côtière, à savoir Cotonou et Parakou au Bénin et Abuja au Nigeria. La figure 1 montre l'évolution du réseau de radiosondages en termes de densité et de nombre d'observations suite à la phase de rénovation du réseau (symboles et chiffres en noir). On y constate que beaucoup de stations ont été réactivées et que davantage de données ont été transmises via le GTS pour le grand avantage des centres de PNT. Entre 2005 et 2009, ce sont plus de 13 500 mesures de

radiosondages haute résolution qui ont été transmises via le GTS et stockées dans la base de données AMMA (<http://amma-international.org/database> ; Fleury et al., 2011).

Ces succès ne doivent cependant pas occulter des difficultés rencontrées pendant la campagne d'observation, parfois sérieuses, et dont il faut tirer des leçons. Pour garantir la libre concurrence et comme c'est d'usage dans le monde entier, les agences partenaires africaines ont dû faire appel à plusieurs fournisseurs pour l'achat d'équipements de radiosondage. Cela a eu pour conséquence le déploiement de différents types de sondes sur le terrain, ce qui en soi n'est pas très grave, sauf que chaque sonde présente un biais en humidité relative différent et variable selon l'heure de la journée. Les modèles Vaisala RS80-A sont connus pour avoir un biais sec en humidité important de jour, moindre la nuit, tandis que les modèles Vaisala RS92 ont un biais sec modéré dans la journée et faiblement humide pendant la nuit. Les sondes françaises MODEM M2K2 présentent un biais sec important de jour, et humide modéré de nuit. Face à ces incertitudes sur le biais en humidité des radiosondages, des études d'évaluation ont été menées en exploitant des estimations du contenu intégré en vapeur d'eau issues des mesures de stations GPS (Global Positioning System) au sol pendant la période d'observation spéciale d'AMMA en 2006 (photo 2 ; Bock et al., 2008). Ces études ont permis de documenter les biais des radiosondes dans le dessein de mettre en

œuvre des protocoles de correction des mesures de sondage. C'est ainsi que deux méthodes distinctes ont été développées. Nuret et al. (2008) ont proposé une méthode statistique de correction des biais fonction de la température et de l'humidité, en utilisant des mesures nocturnes des sondes Vaisala RS-92 utilisées comme référence. Dans un premier temps, ce schéma a été appliqué pour corriger les biais des modèles RS80-A. Par la suite, les modèles de sondes SnowWhite ont été utilisés comme référence absolue pour corriger les mesures de l'ensemble des sondes Vaisala (les mesures corrigées sont disponibles dans la base de données AMMA). Agustí-Panareda et al. (2009) ont utilisé la même méthode statistique de correction du biais des radiosondages en fonction de l'humidité, de l'angle d'élévation solaire, du type de sonde et du profil vertical de la pression atmosphérique issu des prévisions à courte échéance du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT). Cette méthode est désormais opérationnelle au CEPMMT. Les mesures nocturnes du modèle Vaisala RS92 sont utilisées encore comme référence et les fonctions de correction ont été appliquées à tous les types de sondes (Vaisala RS80-A, Vaisala RS92 et MODEM M2K2). L'application de cette méthode pour corriger les biais des radiosondages ne réduit pas toutes les incertitudes de mesure de l'humidité sur la verticale, car la méthode elle-même est basée sur plusieurs approximations (biais nul pendant la nuit pour les sondes de référence en plus du biais du modèle météorologique qui reste difficile à déterminer). En particulier, des incertitudes subsistent pour les mesures d'humidité dans les basses couches atmosphériques.

Il s'avère donc clairement que la campagne AMMA a joué un rôle déterminant dans le processus de modernisation qu'a connu le réseau d'observation de l'ASECNA. Grâce aux soutiens financiers, humains, logistiques et scientifiques de AMMA, ce réseau de radiosondages a réussi sa transition vers une nouvelle génération de sondes numériques et a probablement été sauvé de la disparition pure et simple (l'année 2005



Photo 2 - Lâcher de radiosonde pendant la campagne d'observation en 2006. (© Eric Brun)

(1) MSG : Météosat seconde génération.

(2) PUMA : Préparation à l'utilisation de MSG en Afrique.

(3) SYNERGIE : Système numérisé d'exploitation rationnelle et de gestion interactive et évolutive des informations météorologiques pour le prévisionniste.

coïncidant avec la date de fin de production des modèles analogiques). Une autre réalisation du programme AMMA fut de soutenir les efforts de l'ASECNA pour améliorer la formation de son personnel et fiabiliser les installations de lancement (par exemple abri de gonflement des ballons, générateurs d'hydrogène, communications y compris par satellite) pour plusieurs stations (comme Dakar, Abidjan et Douala). Il est maintenant essentiel (Science Plan for AMMA Phase 2 ; Redelsperger et al., 2010) de préserver tous ces efforts sur le long terme, objectif difficile, car il est plus facile d'obtenir des moyens pour une campagne de recherche que pour soutenir des observations pérennes.

Apport des données *in situ* et de télédétection spatiale pour les modèles de PNT

Les études menées dans AMMA pour la correction des biais de radiosondages, ont donc abouti à la mise en place de protocoles de correction des mesures d'humidité. La méthode développée par Agustí-Panareda et al. (2009) a été privilégiée pour corriger les mesures supplémentaires acquises pendant AMMA avant d'étudier leur impact sur les analyses et prévisions de la mousson de l'Afrique de l'Ouest dans les modèles de PNT. Faccani et al. (2009) ont étudié l'impact de ces données en utilisant le modèle global ARPÈGE⁽¹⁾. Les auteurs ont réalisé plusieurs expériences d'impact en utilisant différents scénarios pour les mesures *in situ* : utilisation du réseau d'observation tel qu'il était avant AMMA, utilisation des données acquises pendant AMMA, avec ou sans correction des biais d'humidité des radiosondages. Les résultats ont montré que le modèle ARPÈGE produisait de meilleurs résultats, en termes d'analyses et de prévisions, quand toutes les données *in situ* de AMMA sont utilisées et corrigées du biais en humidité. L'impact des données supplémentaires de AMMA dans ARPÈGE a été évalué avec succès en comparant les analyses du contenu intégré en vapeur d'eau (TCWV⁽²⁾) avec des mesures GPS indépendantes, également acquises pendant AMMA. L'apport des mesures *in situ* de AMMA a été également jugé positif à l'examen des prévisions à courte échéance des précipitations du modèle

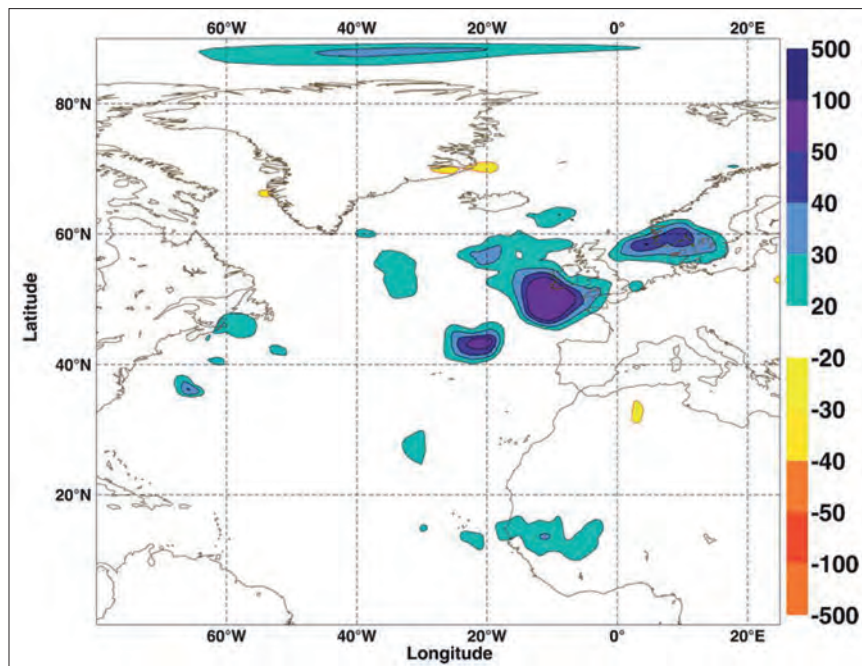


Figure 2 - Différences des écarts quadratiques moyens des erreurs de prévision à 48 heures d'échéance de la hauteur du géopotential à 500 hPa entre l'expérience utilisant toutes les mesures de radiosondages AMMA, avec correction de biais et celle utilisant seulement le réseau pré-AMMA, sur la période allant du 1^{er} août au 14 septembre 2006 (extraite de Faccani et al., 2009). Les valeurs positives (en bleu) signalent une amélioration de la prévision par les données d'AMMA (l'échelle des couleurs est en mètres).

comparées à des estimations indépendantes de la pluie⁽³⁾. La figure 2 montre l'impact des données additionnelles de AMMA sur les prévisions de hauteur de géopotential. On constate que les erreurs de prévision sont réduites et que le bénéfice de l'assimilation de données supplémentaires de radiosondages se propage vers les latitudes tempérées, et ce jusqu'à trois jours d'échéance (Faccani et al., 2009). Des expériences d'impact similaires menées au CEPMMT (Agustí-Panareda et al., 2010a) ont montré que les mesures de radiosondage supplémentaires de AMMA avaient un impact significatif sur les analyses de température dans les basses couches sur le Sahel et sur la structure du jet d'est africain. L'impact sur les prévisions fut plus modéré que celui constaté dans le modèle ARPÈGE.

Une autre réussite de AMMA fut de soutenir des recherches en vue d'utiliser le plus de données de télédétection spatiale possible sur l'Afrique de l'Ouest. En effet, les modèles de PNT avaient tendance à n'utiliser que très peu d'observations de télédétection

spatiale au-dessus des surfaces continentales. Par conséquent, les analyses atmosphériques des modèles étaient très peu contraintes par les observations sur ces zones. Or, ce sont les analyses/prévisions (ou souvent les réanalyses) des modèles qui servent d'outils pour les études de processus et de climat. Il y avait donc une marge de progression considérable des modèles de PNT dans ce domaine. Des études ont donc été menées d'abord pour améliorer la représentation de la surface, en température et en émissivité, dans les systèmes d'assimilation de PNT. Ces travaux ont été entrepris d'abord dans une optique « micro-onde ». En effet, ces types de mesures (principalement les mesures des instruments AMSU-A et -B⁽⁴⁾, et MHS⁽⁵⁾ à bord des satellites sur orbite polaire) sont moins sensibles aux nuages que les mesures dans l'infrarouge, ce qui représente un atout considérable dans les régions tropicales souvent nuageuses. En juillet 2008, une nouvelle modélisation de l'émissivité de surface a été mise en œuvre dans les systèmes d'assimilation des modèles opérationnels de Météo-France suivant la méthode décrite dans Karbou et al. (2006, 2010a). Ce développement a rendu possible l'assimilation des observations de télédétection qui renseignent sur la température et l'humidité atmosphériques près de la surface. Il est à noter que ce sont des observations qui sont généralement rejetées du processus d'assimilation dans les modèles. Des études de faisabilité ont

(1) ARPÈGE : Action de recherche petite échelle, grande échelle.

(2) TCWV : Total Column Water Vapor.

(3) Il s'agit des produits CPC du National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Prediction Center's (NOAA/CPC) disponibles depuis le site suivant : <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/fews/rfe.shtml>.

(4) AMSU-A et -B : Advanced Microwave Sounding Unit-A and -B.

(5) MHS : Microwave Humidity Sounder.

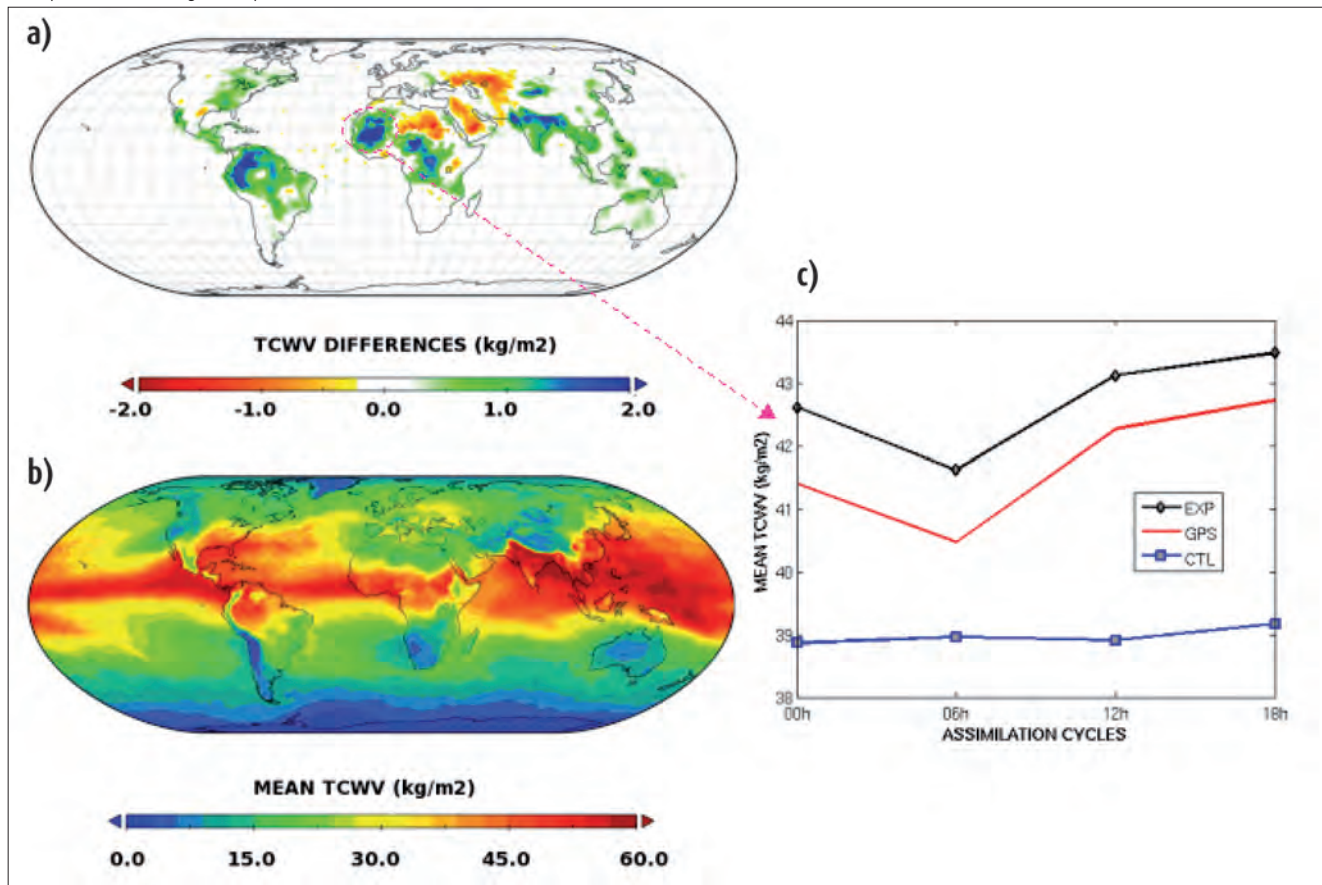
été menées afin d'apprécier le potentiel de ces observations de télédétection : en plus d'une expérience de contrôle, une expérience d'assimilation a été effectuée durant l'été 2006, bénéficiant du pic d'observations AMMA (SOP, périodes d'observations spéciales). Les deux expériences diffèrent uniquement par l'assimilation ou non des observations qui mesurent indirectement la température et l'humidité dans une couche de 5-6 kilomètres d'épaisseur dans l'atmosphère près de la surface. L'assimilation de ces observations a eu des conséquences importantes sur des paramètres clefs du cycle de l'eau. Des changements ont été observés sur les analyses d'humidité et les prévisions de pluie. Le changement de l'humidité se caractérise par un dipôle sur les tropiques : plus d'humidité au-dessus de l'Inde, l'Amérique du Sud et l'Afrique de l'Ouest et assèchement de l'atmosphère au-dessus de l'Arabie et de l'Afrique du Nord-Est (voir la figure 3 (a et b)). Ce changement concerne non seulement la surface mais plusieurs niveaux de l'atmosphère (jusqu'à 500 hPa) et a été évalué avec succès à l'aide de mesures indépendantes (GPS, voir la figure 3c). Notons également un

impact fort sur la baroclinie de l'atmosphère et la circulation avec un renforcement du jet d'est africain. Les changements dans les analyses et les prévisions ont eu pour effet une mousson africaine mieux organisée avec une zone de convergence intertropicale plus forte. Les erreurs de prévisions ont été largement réduites au-dessus des tropiques avec pour conséquence une amélioration des prévisions sur les latitudes moyennes à 48 et 72 heures d'échéances (Karbou et al., 2010b).

Nous avons montré que des efforts très importants sont déployés afin d'accroître le réalisme des modèles de PNT. Cependant, l'évaluation des sorties de ces modèles reste assez difficile à réaliser dans des régions telles que l'Afrique de l'Ouest où l'on manque cruellement de mesures. Les protocoles opérationnels d'évaluation existent bien dans différents centres météorologiques mais ces protocoles utilisent rarement des mesures indépendantes (non assimilées par les modèles). Ce type de diagnostics sert à vérifier le bon fonctionnement de l'assimilation (les analyses proches des observations) mais reste discutable car les comparaisons sont faites avec des

données ayant déjà servi lors de l'assimilation. De ce point de vue, la campagne AMMA a offert une occasion unique à une large communauté de chercheurs pour indépendamment évaluer les développements en modélisation et en assimilation de données. Les mesures de TCWV par GPS ont été précieuses pour évaluer les analyses et les prévisions des modèles près de la surface (Bock et al., 2008 ; Bock et Nuret, 2009). En plus des mesures GPS, des profils de dropsondes larguées depuis des ballons dérivants à une vingtaine de kilomètres d'altitude du Niger et jusqu'au-dessus de l'océan Atlantique ont été également collectés entre août et septembre 2006. Il s'agit là encore de données complémentaires pouvant servir à évaluer les sorties des modèles (Drobinski et al., 2012). Seule la confrontation des sorties des modèles avec des mesures indépendantes permet d'identifier les faiblesses mais aussi les forces de ces modèles, d'où l'importance des campagnes de mesures. C'est d'autant plus utile que d'autres recherches sont nécessaires afin d'améliorer l'usage des observations de télédétection spatiale (mieux exploiter les mesures dans l'infrarouge au-dessus des

Figure 3 - (a) Différences moyennes d'analyses du contenu intégré en vapeur d'eau (expérience ayant utilisé plus de données satellitaires moins expérience de contrôle) pendant le mois d'août 2006. Les valeurs négatives (positives) indiquent que le contrôle est plus humide (sec) que l'expérience. (b) Analyses moyennes du contenu intégré en vapeur d'eau dans l'expérience de référence pendant le mois d'août 2006. (c) Cycle diurne du contenu intégré en vapeur d'eau à proximité de Tombouctou avec des valeurs estimées à partir de mesures GPS et d'analyses provenant du contrôle (CTL) et de l'expérience (EXP). Les statistiques sont calculées sur 45 jours (du 1^{er} août au 14 septembre 2006). Figure adaptée de Karbou et al., 2010b.



continents, assimiler les observations en ciel nuageux/pluvieux) et pour améliorer les paramétrisations physiques dans les modèles et en particulier la représentation de la convection qui constitue un défi majeur en PNT.

Amélioration des modèles : l'espoir de la haute résolution

Les scores actuels de la PNT sous les tropiques sont bien inférieurs à ceux des moyennes et hautes latitudes. Ainsi, la prévision des ondes d'est africaines excède difficilement 2 jours comme le suggère par exemple l'étude de Torn (2010). L'auteur a utilisé un filtre de Kalman d'ensemble (EnKF) couplé au modèle de prévision WRF (Weather Research and Forecasting) pour générer des analyses et des prévisions d'ensemble des ondes d'est africaines, ce qui lui a permis d'évaluer l'impact des erreurs dans les conditions initiales sur les prévisions de ces ondes d'est, en termes d'amplitude et de position. Les progrès réalisés dans l'analyse et en particulier sur la variable humidité ont un impact positif sur la prévision, mais ne suffisent pas à améliorer très fortement les résultats de la PNT. Une raison majeure réside dans une incapacité des paramétrisations actuelles à représenter la convection sur l'Afrique de l'Ouest et son couplage avec la surface, la couche limite et les couches sèches. La mauvaise représentation des interactions entre convection et écoulement, dont les ondes d'est, limite fortement la prévision. La nouvelle génération de modèles opérationnels à haute résolution, tel qu'AROME⁽¹⁾, résolvant explicitement la convection, donne l'espoir de franchir

cet obstacle comme le laissent envisager les études effectuées en amont avec des modèles de recherche tel que Mésos-NH⁽²⁾ (Diongue et al., 2002). AMMA a été l'occasion de tester AROME sur l'Afrique de l'Ouest et sur des cas d'étude bien documentés et précédemment simulés avec Mésos-NH (Barthe et al., 2010). Les prévisions d'AROME apportent des améliorations importantes par rapport aux modèles PNT utilisés jusqu'à présent sur cette région, avec un cycle diurne réaliste et la capacité de représenter le cycle de vie des systèmes convectifs et leur couplage avec les ondes d'est. La figure 4 illustre cette différence de comportement entre les modèles ARPÈGE et AROME concernant la distribution des précipitations quotidiennes par comparaison avec l'estimation du satellite TRMM⁽³⁾ à une échelle commune de résolution de 0,5°. ARPÈGE sous-estime fortement le nombre d'événements pluvieux

supérieurs à 12 mm/jour et surestime au contraire ceux faiblement précipitants. Le modèle AROME à 5 km de résolution horizontale, reproduit correctement la distribution estimée par TRMM, avec toutefois une légère tendance à surestimer tous les régimes.

Remerciements

Les auteurs souhaitent associer de nombreux autres chercheurs à cet article en raison de la forte implication de la communauté scientifique AMMA dans les études autour de la météorologie et des systèmes de prévision : Anna Agustí-Panareda, Peter Bauer, Anton Beljaars, Carla Cardinali, Philippe Cocquerez, Philippe Drobinski, Claudia Faccani, Andreas Fink, Nadia Fourrié, Elisabeth Gérard, Rémi Meynardier, Patrick Moll, Chris Thorncroft et tant d'autres qui figurent parmi eux.

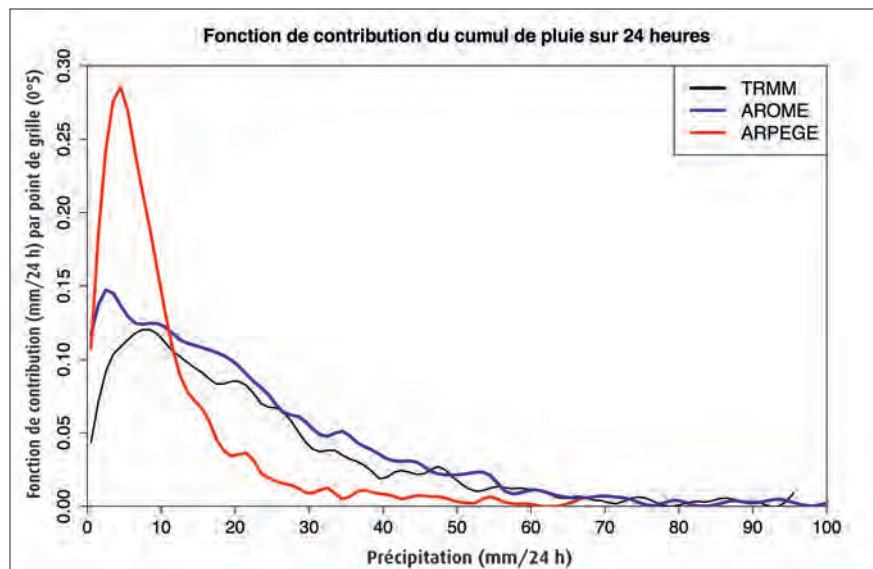


Figure 4 - Contribution au cumul de précipitation sur 24 h à une résolution de 0,5° par tranche de 1 mm/24 h dans la gamme de 1 à 100 mm/24 h, tel qu'estimé par TRMM et simulé par ARPÈGE et AROME du 23 au 27 juillet 2006, sur le domaine 0-20° N et 15° W - 20° E.

(1) AROME : Application de la recherche à l'opérationnel à méso-échelle.

(2) Mésos-NH : modèle numérique à méso-échelle non-hydrostatique.

(3) TRMM : Tropical Rainfall Measuring Mission.