

Le projet AMMA, un exemple d'étude intégré et multidisciplinaire sur un système climatique régional

AMMA : African Monsoon Multidisciplinary Analysis

THIERRY LABEL

IRD, LTHE (UMR 5564, CNRS, INPG, IRD, UJF)
1025 Avenue de la Piscine, Domaine Universitaire de St Martin d'Herès, BP 53, 38041 Grenoble cedex 9
Tél : +33 (0)4 76 82 52 85, Fax : - 476 82 52 86, e-mail : thierry.label@hmg.inpg.fr

JEAN-LUC REDELSPERGER

CNRS, CNRM (UMR 6143, CNRS, Météo-France)
42, Avenue Gaspard Coriolis, 31057 Toulouse cedex
Tél : +33 (0)5 61 07 94 75, e-mail : redels@meteo.fr

Initiated by the French community, the AMMA international project aims to improve our knowledge and understanding of the West African monsoon and its variability with an emphasis on daily-to-interannual timescales. AMMA is motivated by an interest in fundamental scientific issues and by the societal need for improved prediction of the WAM and its impacts on water resources, health and food security for West African nations.

I ■ INTRODUCTION

Face aux limites actuelles des modèles de climat pour simuler les climats régionaux et donc anticiper sur leur évolution future, des études spécifiques sont nécessaires. Le projet AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine) s'inscrit dans la lignée des projets impulsés au début des années 1990, pour mieux comprendre la variabilité du cycle de l'eau à l'échelle de grands bassins versants (Mississippi, Mackenzie, Amazone, Mer Baltique, Mousson Asiatique), dans un contexte de climat évolutif. En se positionnant sur l'Afrique de l'Ouest AMMA vient boucher le trou existant sur l'Afrique de ce dispositif d'observation des grands climats régionaux. L'Afrique de l'Ouest est une région où l'incertitude des prédictions des modèles est forte et qui a souffert d'une sécheresse particulièrement longue et éprouvante pour les populations à la fin du XX^e siècle, sans que les mécanismes de cette sécheresse soient encore bien compris, ni reproduits par les modèles. C'est sur cette région qu'a été forgée par Charney [1] la première théorie de rétro-action positive entre surfaces continentales et climat à l'échelle régionale. Cette théorie n'a pas été réellement validée par la modélisation et de nombreux facteurs supplémentaires non pris en compte par Charney ont été identifiés depuis. La communauté scientifique n'a toujours pas quantifié quelle est la part de l'océan et quelle est la part de l'évolution des surfaces continentales (déforestation, changement d'usage des terres) dans la variabilité du climat ouest-africain. Enfin, l'équilibre socio-économique très fragile de la région constitue une autre raison de s'intéresser à son climat, à sa variabilité et à sa possible évolution dans les cent ans à venir.

Le projet AMMA [2] est une combinaison assez unique en son genre de campagnes de mesures multi-échelles – aussi bien dans le temps que dans l'espace – et d'études multidisciplinaires. Il a démarré en 2002 et son programme

d'observation durera jusqu'en 2010 ; il réunit des atmosphériciens (dynamiciens, chimistes aérosolistes), des océanographes et des spécialistes des surfaces continentales (hydrologues, écologues), mais aussi une communauté travaillant sur les impacts (sécurité alimentaire, ressources en eau, santé, socio-économistes). Dans cette présentation, l'accent sera mis sur la composante *surfaces continentales et hydrologie* du projet.

II ■ VARIABILITÉ DE LA MOUSSON OUEST-AFRICAINE ET IMPACT HYDROLOGIQUE

La problématique « Climat et Hydrologie » de la mousson ouest-africaine est parfaitement représentée par la Figure 1 montrant l'évolution de la pluviométrie sur le bassin du Niger en amont de Niamey (1 Million de km²) et des débits associés à l'exutoire :

1. après une période continuellement humide d'une vingtaine d'années (1950-1969), la pluviométrie de la région a été marquée par une sécheresse pratiquement ininterrompue de 28 ans ; la période récente (1998-2006) montre un retour à une prédominance de la variabilité interannuelle telle qu'observée au cours de la première moitié du XX^e siècle. Non seulement la période sèche a été particulièrement longue et continue, mais elle a touché tout le Sahel [3] avec une égale intensité et s'est étendue également à toute l'Afrique de l'Ouest lors des années 1970-1990. Cela constitue le plus fort « accident » climatique observé sur la planète au cours du siècle passé.

2. L'impact de cette sécheresse sur le cycle hydrologique a été extrêmement net : on voit sur la figure que pour superposer au mieux les indices pluviométriques et de débit il a fallu diviser l'échelle des débits par deux ce qui traduit une amplification par un facteur 2 du déficit pluviométrique en

déficit d'écoulement. On sait par ailleurs que lors des deux paroxysmes secs 1971-1973 et 1981-1987 les conséquences pour les populations ont été très brutales, entraînant des famines et des migrations massives vers les villes.

● II.1. LE DÉFI CLIMATIQUE

Par rapport aux observations, les modèles climatiques sont en défaut sur plusieurs points importants :

- i. ils reproduisent mal la dynamique saisonnière moyenne et la variabilité interannuelle de la mousson africaine [4] ;
- ii. leur régime pluviométrique, en terme de fréquence et d'intensité des événements pluvieux est erroné.
- iii. ils n'identifient pas clairement la période de sécheresse ;

Les deux premiers points ne sont pas spécifiques à la mousson africaine ; ils se retrouvent sur d'autres régions du globe et tiennent en partie à des défauts bien identifiés dans

les modèles (résolution, paramétrisation de la convection, rôle des nuages bas sur les océans, représentation des effets des nuages et des aérosols). L'incapacité à bien déceler l'épisode de sécheresse conduit les climatologues à s'interroger sur les causes principales de cette sécheresse – qui ne seraient pas bien prises en compte dans leurs modèles – et les utilisateurs des sorties de modèles climatiques à se poser des questions sur leur pertinence pour juger des impacts potentiels de la variabilité/modification du climat. Pour les modélisateurs du climat le défi réside dans les interactions d'échelle et de processus complexes qui pilotent un système climatique régionale telle que la mousson africaine (Fig. 2). Pour mieux appréhender ces interactions il faut observer les processus sous-jacents dans différents contextes pour lesquels les interactions ne vont pas jouer dans le même sens. Pour cela, on doit mettre en place des dispositifs d'observations spécifiques fonctionnant plusieurs années, selon une stratégie d'observations emboîtées, décrite plus loin en section III.

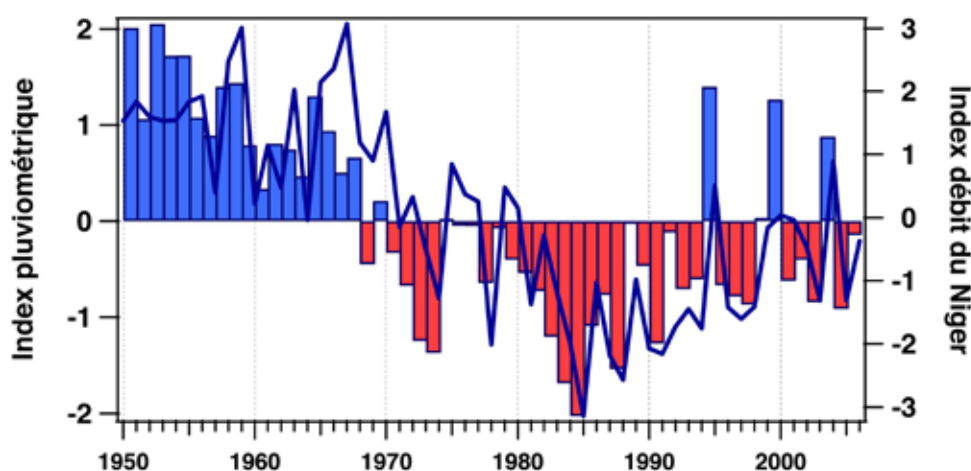


Figure 1 : Indice des débits du Niger à Niamey (courbe continue bleue) superposé à l'indice pluviométrique des pluies krigées sur la partie sahélienne du bassin.

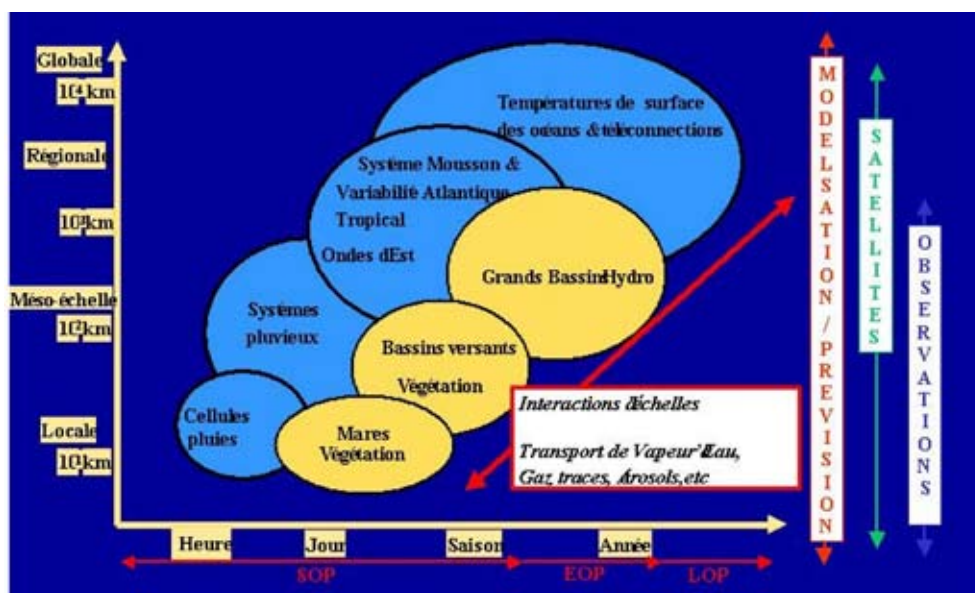


Figure 2 : Les échelles d'intérêts de la Mousson Africaine en regard de ses processus clefs et de ses composantes (AMMA International Science Plan, 2005).

● II.2. L'IMPACT HYDROLOGIQUE ET LE RÔLE DES SURFACES CONTINENTALES

L'amplification du déficit pluviométrique par le système hydrologique du fleuve Niger n'est pas une surprise en soi, ce type de comportement étant fréquemment observé en hydrologie. On est loin cependant de connaître quelle est la part dans cette amplification de la simple accumulation de facteurs non linéaires locaux – associés par exemple aux effets de seuil du ruissellement hortonien prédominant en zone semi-aride – et quelle est celle des facteurs liés aux interactions au sein du système hydrologique lui-même, d'une part, entre les surfaces et l'atmosphère, d'autre part. En 1975, Charney [1] a émis l'hypothèse que la sécheresse sahélienne résultait de la disparition de la végétation (liée au surpâturage), qui entraînait une augmentation de l'albedo, se traduisant elle-même par une modification de la circulation au sein de la cellule de Hadley, conduisant à une augmentation de la subsidence sur le Sahel. Cette hypothèse ne prenait pas en compte les effets associés aux modifications du cycle de l'eau dans un tel schéma ; les modèles de climat, tout en montrant une évidente sensibilité de la circulation régionale aux modifications de grande ampleur et grande échelle des conditions de surface [5, 6], n'ont pas non plus confirmé la théorie de Charney, qui a néanmoins eu le mérite de mettre au centre de la discussion la question des éventuelles rétroactions positives entre les surfaces continentales et la dynamique des climats. Depuis, deux autres aspects importants du problème sont apparus.

D'une part, la disparition de la végétation primaire sur toute la sous-région, le plus souvent au profit des cultures, a profondément modifié le cycle de l'eau, faisant baisser l'évapotranspiration et augmenter le ruissellement local, non seulement en termes relatifs mais aussi en valeur absolue malgré la baisse sévère de la pluviométrie [7]. A petite échelle une grande partie du Sahel est donc caractérisée par une forte hausse du ruissellement qui se traduit dans ce paysage bien souvent endoréique par l'apparition de mares plus nombreuses et durant plus longtemps. Pour autant les écoulements sur les grands bassins ont partout baissé dans des proportions analogues à celles enregistrées sur le Niger [2]. Les hydrologues ne disposent pas actuellement de modèles couplant la dynamique de la végétation au cycle de l'eau et sont donc incapables de représenter correctement ces phénomènes de transition d'échelle, liés à plusieurs facteurs ; réinfiltration du ruissellement local dans le lit des cours d'eau sableux dès que leur pente diminue, reprise évaporatoire dans les mares, augmentation du stockage dans les nappes réalimentées directement à partir de ces mêmes mares.

Un autre facteur totalement différent, mais qui joue un rôle majeur dans la dynamique de la mousson d'Afrique de l'ouest, est l'augmentation de la température moyenne de l'océan tropical, environ 0,5°C depuis les années 1950. Plusieurs publications (e.g. [8]) ont mis en évidence la sensibilité de la mousson à la température de l'océan atlantique tropicale. Les upwellings du golfe de Guinée jouent un rôle important dans le déclenchement de la mousson sur le continent en accroissant le gradient d'énergie statique humide qui constitue un puissant moteur d'instabilité. Les études de sensibilité dans les modèles confirment la sensibilité de

la dynamique de la mousson aux modifications de température océaniques mais ils ne savent pas discerner comment cette sensibilité se combine avec, ou à l'inverse inhibe, la sensibilité à la modification de la couverture végétale sur le continent (facteur qui agit directement sur le cycle de l'eau et aussi sur les gradients d'énergie statique humide). Il est nécessaire de progresser sur ces différentes questions afin de donner quelque crédibilité aux conclusions qui peuvent être tirées des études sur l'impact hydrologique de la variabilité ou de la modification climatique en Afrique de l'Ouest.

III ■ LES ENJEUX DU PROGRAMME AMMA

Mieux comprendre les rôles respectifs de l'océan – dont les modifications sont plutôt liées à l'évolution du climat global de la planète – et des surfaces continentales – dont les modifications sont plutôt liées à des évolutions régionales d'origine anthropique – est un des objectifs majeurs du programme AMMA. Le second est de produire les connaissances permettant qu'une meilleure compréhension du fonctionnement d'ensemble du système de mousson soit associée à une vision plus fine des effets de sa variabilité aux échelles pertinentes pour l'hydrologie, l'agronomie et l'épidémiologie (paludisme, méningite). Faire en sorte que les résultats des recherches multidisciplinaires d'AMMA soient effectivement intégrés dans les activités de prévision et de décision constitue son troisième grand défi.

Une partie importante des recherches menées dans AMMA est de nature disciplinaire, car liée à l'exploration de certains processus clefs considérés individuellement, par exemple : le déclenchement et l'organisation de la convection (dynamique de l'atmosphère), la mise en place des upwellings en liaison avec la circulation dans l'Atlantique tropical (océanographie), le rôle de la végétation et des états de surface dans la partition ruissellement/infiltration (hydrologie – surfaces continentales), l'impact des aérosols sur le bilan radiatif et le cycle des espèces chimiques tels que les NO_x, l'Ozone et les composants organiques volatils (chimie atmosphérique et aérosols). Cette liste est loin d'être exhaustive mais donne un aperçu de la diversité des questions disciplinaires posées. Pour autant, le véritable défi d'AMMA se situe au niveau de la science intégrative qui s'articule autour de trois grandes questions, pour ce qui est de la sphère géophysique :

1. Les interactions de la mousson d'Afrique de l'Ouest et du climat global du point de vue de la dynamique et de la chimie atmosphériques, ce qui inclue aussi le rôle des aérosols dans la dynamique de mousson via leur impact sur le bilan radiatif.

2. Le cycle de l'eau au sein de la mousson ouest-africaine, aux échelles locale, méso et régionale, ce qui inclue à la fois la composante hydrologique continentale et la composante atmosphérique.

3. Rôle des interactions entre les surfaces (océaniques, d'une part, continentales, d'autre part) et l'atmosphère dans la dynamique et la variabilité de la mousson, impact sur le régime des précipitations aux différentes échelles d'intérêt pour l'hydrologie, l'écologie et l'agronomie.

La mousson d'Afrique de l'Ouest représente un archétype idéal pour étudier les interactions d'échelles dans un système

de mousson [9] : elle se caractérise au premier ordre par une symétrie zonale, avec deux jets d'est bien définis en moyenne et haute troposphère ainsi que des entités météorologiques (lignes de grains, ondes d'est) bien identifiées. Etudier de telles interactions d'échelles, et en particulier celles reliant la convection et la dynamique atmosphérique avec les états de surface, sera très utile pour les autres systèmes de mousson et indispensable pour améliorer les modèles couplés océan-continent-atmosphère utilisés pour les prévisions météorologiques et climatiques, non seulement régionalement mais aussi pour le reste de la planète.

IV ■ LES CAMPAGNES DE MESURES

Le caractère multi-échelle du système étudié a conduit à définir une stratégie d'observation reposant sur l'imbrication des domaines et des périodes d'observation, et sur l'utilisation de différentes plate-formes instrumentées complémentaires (bateaux, sites sol, ballons, moyens aéroportés, capteurs spatiaux). Cette stratégie résulte également des compromis à trouver en regard du coût de déploiement d'instruments lourds et de leurs limitations en terme d'échantillonnage temporel et spatial, alors même que l'on cherche à documenter l'ensemble du spectre des échelles mises en jeu.

Le premier objectif est de documenter le gradient éco-climatique qui caractérise au premier ordre la région d'étude d'AMMA. Le second est de couvrir les différentes échelles identifiées plus haut en combinant des capteurs aux proprié-

tés complémentaires. Par exemple, les moyens aéroportés fournissent des cas d'étude très finement documentés sur des zones assez vastes, tandis que les observations sol ne permettent qu'un suivi local mais continu temporellement. Pour optimiser l'échantillonnage, les mesures sol sont organisées en réseaux à couverture régionale relativement homogène et en sites densément instrumentés (Fig. 3).

● IV.1. UN EMBOÎTEMENT DE ZONES DE MESURE

- A l'échelle régionale, une priorité incontournable est le renforcement des capacités des réseaux opérationnels sur le continent et plus spécifiquement du réseau de radio-sondages (une vingtaine de stations de différents niveaux de priorité selon la période de mesure considérée). Cette échelle inclut les mesures océaniques réalisées au cours des campagnes EGEE, la mise en place d'un transect sahélien pour le suivi journalier des aérosols désertiques, et l'étude de plusieurs bassins versants et sites de méso-échelle assurant un bon échantillonnage de toute la région.

- Les études de méso-échelle sont concentrées sur trois sites d'observations densifiées du cycle hydrologique, de la végétation et des flux de surface (Gourma Malien, Kori de Dantiandou dans le Sud-Ouest Nigérien ; haut bassin de l'Ouémé au Bénin).

- L'échelle convective/locale est l'échelle des super-sites (100 à 1000 km²) ou de sites intensifs locaux localisés à l'intérieur des sites de Méso-Echelle.

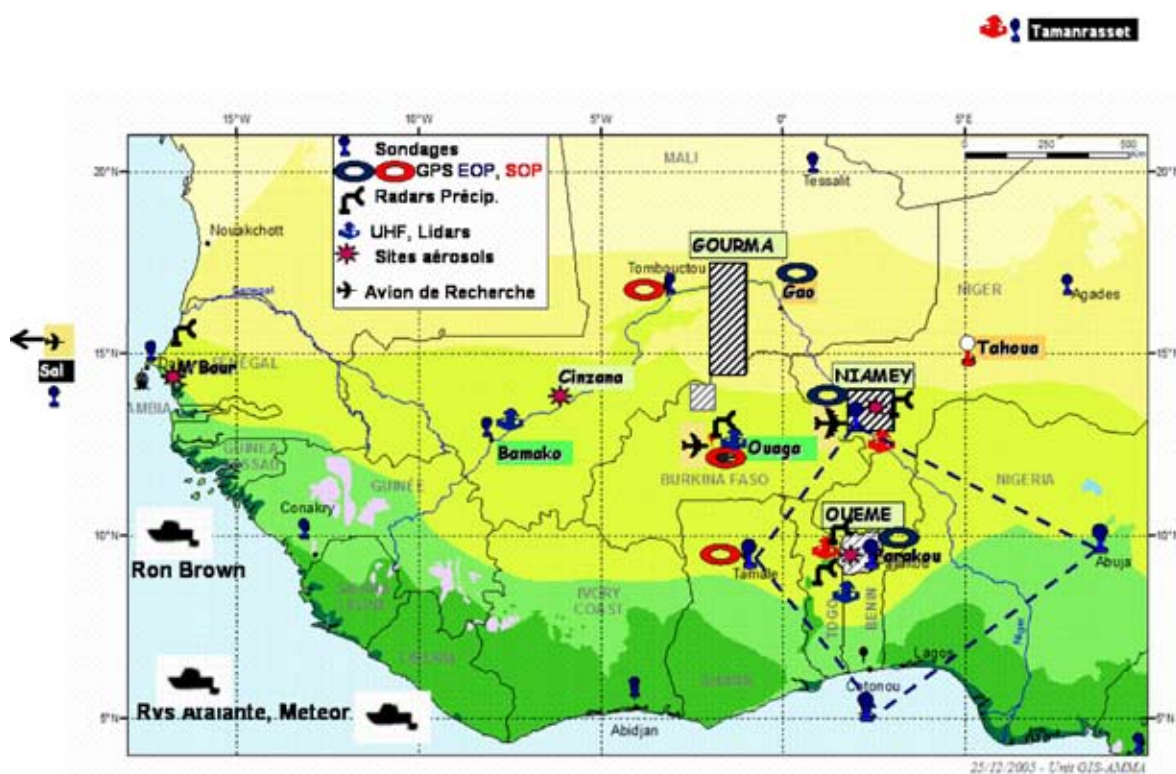


Figure 3 : Le dispositif d'étude régional. Les sites de méso-échelle sont les zones hachurées. Un détail des mesures sur le site de méso-échelle de l'Ouémé est donné en Figure 4.

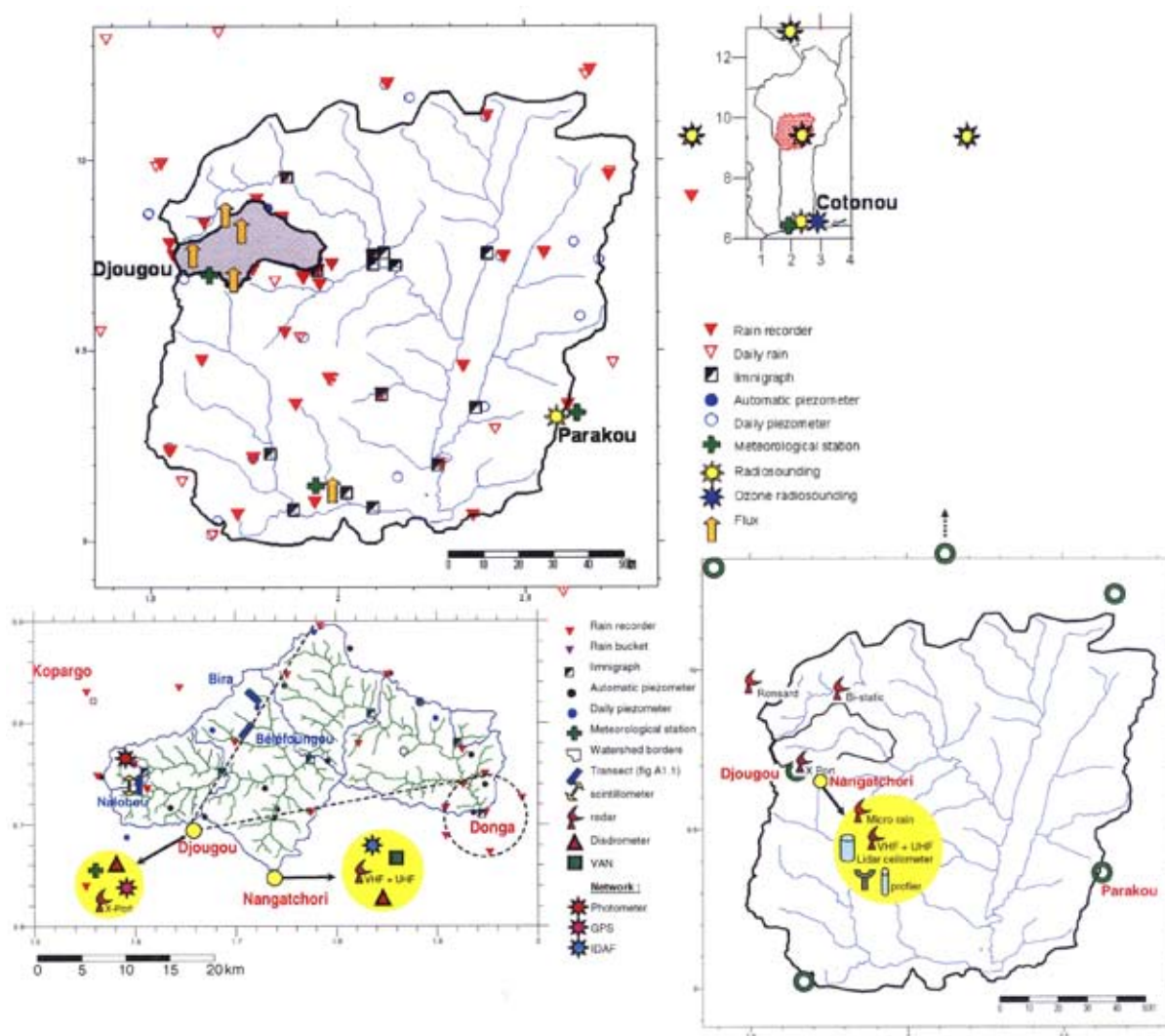


Figure 4 : Les différents dispositifs de mesure sur le bassin de l’Ouémé, un des trois sites de méso-échelle AMMA. *En haut (a) : dispositif EOP sur l’ensemble du bassin ; en bas gauche (b) : dispositif EOP sur le surpersite de la Donga ; en bas droite (c) : instruments SOP, essentiellement concentrés sur la Donga, avec un réseau de détecteurs d’éclairs (anneaux verts) couvrant tout le bassin de l’Ouémé.*

● IV.2. UN EMBOÎTEMENT DE PÉRIODES DE MESURE

Les différentes composantes du cycle de l’eau à l’origine de la variabilité interannuelle de la mousson africaine et l’influence de cette variabilité sur la composition atmosphérique font l’objet d’un programme d’observations à long terme (LOP, 2001-2010) L’objectif est de documenter finement le cycle saisonnier moyen et ses modulations entre années sèches et humides. Ce suivi décennal permettra également d’étudier les effets cumulatifs des séries d’années sèches et humides. En complément, l’évolution de la couverture végétale, qui contrôle le bilan hydrique et les émissions d’aérosols terrigènes ou carbonés, sont suivies sur le terrain et par télédétection.

Durant une période de trois ans (EOP, 2005-2007), le dispositif LOP est renforcé pour fournir des observations plus détaillées sur certains processus couplés susceptibles de jouer un rôle important dans la variabilité interannuelle. Les compartiments concernés – couche limite de surface et couche limite atmosphérique, profils océaniques, circulations d’eau dans le sol, concentrations au sol et intégrées sur la verticale et distribution verticale des aérosols désertiques – sont particulièrement difficiles à instrumenter. Ce dispositif regroupe 41 instruments, souvent sophistiqués et coûteux à déployer, ce qui explique la durée limitée de cette période d’observation renforcée.

Le cœur du dispositif expérimental AMMA est constitué par la période d’observations intensives (SOP, 2006), dont l’objectif principal était d’acquérir de jeux de données per-

mettant d'étudier de façon détaillée un cycle saisonnier en terme de processus, et plus particulièrement les systèmes météorologiques lors des différentes phases de la mousson : (i) la saison sèche précédant la mousson (janvier-février), (ii) l'établissement de la mousson (Juin), (iii) la mousson au stade mature (Juillet – Août), et (iv) la fin de la mousson (Septembre). Au sein de ces différentes phases, des moyens aéroportés et sol seront déployés de façon coordonnée et selon une stratégie d'intégration des échelles et des disciplines incluant les données spatiales et la modélisation numérique. Six avions de recherche ont été déployés : le BAe146 britannique, le Falcon 20 et l'ATR-42 de SAFIRE (Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement, France), le Falcon 20 du DLR (Allemagne), le M55 du consortium Européen -Geophysica et le DC8 de la NASA. Plusieurs campagnes ballons se sont déroulées parallèlement pour documenter la couche limite, la haute troposphère et la stratosphère. Trois bateaux ont croisé dans l'Atlantique tropical et le golfe de Guinée. Les mesures au sol sur les super-sites et les cadences de radio-sondage ont encore été intensifiées, avec en particulier le déploiement de radars, lidars et radiomètres au cours de la SOP. Au total ce sont plus d'un millier de capteurs qui ont été mis en œuvre, mobilisant de 700 à 800 scientifiques.

● IV.3 PREMIER BILAN

Malgré les difficultés inhérentes à un tel déploiement d'instrumental en zone tropicale et dans un environnement logistique difficile, les campagnes de mesures renforcées de 2005 et intenses de 2006 se sont globalement bien déroulées. En 2005, quelques instruments importants n'ont pu être déployés à temps pour documenter tout le cycle saisonnier mais en 2006, on peut estimer que 85 % du dispositif a été opérationnel. Une telle combinaison de mesures simultanées sur terre, dans les airs et sur l'océan n'avait encore jamais été réalisée à une telle échelle. L'objectif est aujourd'hui de mener à bien une campagne EOP 2007 permettant de documenter la totalité d'un autre cycle saisonnier pour disposer de situations contrastées par rapport à celles observées en 2006 et, partiellement, en 2005. Certaines communautés ont déjà la certitude de résultats novateurs, comme par exemple sur les transports au sein de la troposphère et de la troposphère vers la stratosphère, sur les bilans régionaux d'aérosols, sur la circulation océanique dans le golfe de Guinée et sur les échanges océan-atmosphère. L'assimilation en temps réel des données océanographiques au centre de données CORIOLIS, et des données du réseau de radio-sondage (entièrement remis à niveau et opérant occasionnellement à haute fréquence temporelle) par les centres de prévision numérique vont permettre de tester l'apport du supplément d'observations AMMA pour la qualité des simulations des modèles atmosphériques globaux.

En 2005, le dispositif EOP a permis d'installer plusieurs stations de mesure des flux de chaleur sensible et latente (ainsi que des flux de CO₂) dans la couche de surface, couplées à des mesures d'humidité des sols. Ces mesures, réalisées sur tout le transect éco-climatique qui va du golfe de Guinée au nord du Sahel seront maintenues jusqu'en 2008 et,

si possible au delà, dans le cadre d'une collaboration avec nos partenaires africains. Il n'existe aucune mesure équivalente en Afrique ; elles vont permettre de valider les modèles hydrologiques et de faire évoluer les couplages avec les modèles de végétation.

V ■ CONCLUSIONS

Le projet AMMA constitue une opportunité pour la communauté hydrologique de travailler sur les interactions d'échelle au sein des systèmes climatiques régionaux afin d'aborder de manière plus pertinente l'étude de l'impact hydrologique de la variabilité du climat et de son éventuel modification sur le long terme. Il s'agit de questions conceptuellement complexes qui nécessitent de développer une culture transdisciplinaire. A cet titre, au delà de ce qui en est attendu concernant une meilleure connaissance du système de mousson ouest-africain, AMMA peut contribuer à faire émerger de nouvelles approches, aussi bien instrumentales qu'en modélisation, qui seront utiles à toute autre étude portant sur les liens entre climat et hydrologie.

VI ■ REMERCIEMENTS

Basé sur une initiative française, AMMA a été élaboré par un groupe international de scientifiques et est actuellement financé par un grand nombre d'agence, spécialement en France, Royaume Uni, Etats Unis d'Amérique et Afrique. AMMA a reçu une contribution majeure de la Communauté Européenne dans le cadre du 6^e PCRD. Des informations détaillées sur la coordination et les financements peuvent être trouvées sur le site international d'AMMA <http://www.amma-international.org>.

Le projet AMMA n'aurait pu être lancé sans le soutien des organismes de recherche Français et la confiance qu'ils ont placée dans le projet scientifique dès le début. Les programmes de l'INSU (PATOM, PNCA, PNEDC, PNTS, PNRH, PNBC) ont permis de construire une base solide à cet édifice complexe, avec les contributions du CNES, CNRS, IFREMER, IRD, Météo-France, des Universités Françaises et des Ministères de la Recherche et des Affaires Etrangères. Un projet si ambitieux n'a pas pu se construire sans des efforts coordonnés de très nombreuses personnes depuis les personnels administratifs jusqu'aux directions des organismes en passant par les personnels de la DT/INSU et de SAFIRE mis à lourde contribution. Nous aimerions toutes les remercier pour leur confiance, leur enthousiasme et leur contribution à AMMA.

VII ■ REFERENCES

- [1] CHARNEY J. G. (1975) — Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quart. Jour. Roy. Met. Soc.* **101** : 193-202
- [2] REDELSPERGER J.-L., THORNCROFT C., DIEDHIU A., LEBEL T., PARKER D., POLCHER J. (2006) — African Monsoon, Multidisciplinary Analysis (AMMA) : An International Research Project and Field Campaign. *Bulletin of the American Meteorological Society.* **87** : 1739-1746

- [3] LEBEL T., DIEDHIOU A., LAURENT H. (2003) — Seasonal cycle and interannual variability of the Sahelian rainfall at hydrological scales. *J. Geophys. Res.* **108**, 8389 : doi 10.1029
- [4] D'ORGEVAL T. (2006) — Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6. *Impact du changement climatique sur le cycle de l'eau en Afrique de l'Ouest : Modélisation et incertitudes*. 188 p
- [5] ZHENG X., ELTAHIR E. A. B. (1998) — The role of vegetation in the dynamics of West African monsoons. *J. Climate*. **11** : 2078-2096
- [6] DICKINSON R. E., HENDERSON SELLERS A. (1988) — Modelling tropical deforestation : A study of GCM land-surface parametrizations. *Quart. J. Roy. Soc.* **114(B)** : 439-462
- [7] SEGUIS L., MILESI G., PEUGEOT C., MASSUEL S., FAVREAU G. (2004) — Simulated impacts of climate change and land-clearing on runoff from a small Sahelian catchment. *Hydrol. Processes*. **18** : 3401-3413
- [8] FONTAINE B., BIGOT S. (1993) — West African rainfall deficits and sea-surface temperatures. *Int. J. Climatology*. **13** : 271-285
- [9] REDELSPERGER J. L., DIONGUE A., DIEDHIOU A., CERON J.P., DIOP M., GUEREMY J.F., LAFORE J.P. (2002) — Multi-scale description of a Sahelian synoptic weather system representative of the West African monsoon. *Quart.J. Roy Meteorol. Soc.* **128** : 1229-1257