

4.2.3 LOP/EOP

1 Vue d'ensemble

La stratégie d'observation d'AMMA se définit en terme d'échelles spatiales et temporelles. Dans le domaine temporel, on a identifié trois périodes par référence à la densité des observations spécifiques envisagées : LOP, EOP, SOP. Pour bien comprendre comment s'est construit – de manière progressive – cette stratégie, il faut en fait discerner cinq phases : i) la période préliminaire des années 1990 : le projet AMMA n'existe pas encore, mais les éléments de son émergence se situent à cette époque ; ii) une phase préparatoire (2001-2004) au cours de laquelle la stratégie d'observation se précise graduellement et les mesures de terrain sont mises en place ; iii) l'EOP (2005-2007), qui inclut iv) la SOP de 2006 ; v) une phase de suivie post-EOP (2008-2010 ?) au cours de laquelle la priorité sera donnée à la gestion des retombées pour les pays africains (voir schéma ci-dessous).

Dans l'espace on distingue quatre échelles allant du sous-continent ouest-africain (échelle régionale incluant le proche océan) à l'échelle convective (ou locale) en passant par une échelle sous-régionale et la méso-échelle. L'échelle globale est prise en compte par le biais des observations satellitaires et la modélisation ; elle ne fait pas l'objet d'observations spécifiques de terrain mais AMMA s'intègre dans une stratégie globale d'observation du climat et du système terrestre orchestrée notamment dans le cadre des composantes GEWEX et CLIVAR du PMRC.

Entre une stratégie idéale – qui consisterait à instrumenter de manière homogène dans le temps et dans l'espace un certain nombre de sites couvrant le continuum climatique et les éco-systèmes – et la stratégie finalement adoptée, se situe un ensemble de contraintes humaines, opérationnelles, matérielles et financières. A bien des égards la stratégie d'observation de AMMA diffère de celles habituellement utilisées dans les expériences météorologiques. Les périodes d'observation hors-SOP ne consistent pas *seulement* ici à fournir des compléments sur l'environnement de la SOP : plusieurs objectifs de AMMA imposent que les périodes d'observation pré et post SOP possèdent leur propre logique, l'exercice consistant alors à ce que l'ensemble soit le plus cohérent possible.

1.1 Les phases du projet

1.1.1 Période d'avant-projet (1990-2000)

Plusieurs systèmes d'observations ont vu le jour au cours de cette période, essentiellement à des fins de recherche mono-disciplinaire : l'observatoire du Gourma Malien (1985) dédié aux observations de végétation dans un milieu pastoral semi-aride ; le degré carré de Niamey (1990), point d'appui de l'expérience HAPEX-SAHEL (1991-1992), sur lequel un suivi fin de la pluviométrie, du bilan hydrologique de certaines mares et de la recharge des aquifères a été réalisé ; le réseau IDAF de suivi des dépôts d'espèces chimiques, dont la première station a été installée à Lamto en 1990 ; le réseau PHOTONS (première station installée à Banizoumbou en 1995) mesure différents paramètres liés au transport d'aérosols (épaisseur optique, coefficient d'Angstroem, granulométrie des aérosols en suspension entre 0,1 et 30 μm en diamètre), ainsi que le contenu intégré en vapeur d'eau ; le bassin du Haut-Ouémé (1997) formant avec le degré carré de Niamey l'observatoire hydrométéorologique CATCH.

Parallèlement le projet européen WAMP, dédié aux études de modélisation atmosphérique de la mousson ouest-africaine, mettait en évidence un déficit d'observations pour pouvoir progresser dans la modélisation couplée des différentes composantes de ce système climatique.

Il s'est ainsi formé, en France mais aussi en Europe, une communauté multidisciplinaire dont le rassemblement a permis l'écriture en 2000 d'un livre blanc sur la mousson africaine. Les grandes questions scientifiques à traiter et des éléments de stratégie d'observation pour obtenir les données nécessaires ont été récapitulés dans ce livre blanc, qui a servi de base pour l'écriture du plan scientifique international de AMMA.

1.1.2 Phase préparatoire (2001-2004)

Au cours de cette phase, l'accent a été mis sur la création de cohérences entre les différents systèmes d'observation pré-existant et de liens avec les mesures – historiques et en cours – des réseaux opérationnels. Il s'agit donc d'un amalgame d'observations spécifiques à AMMA, d'observations menées à des fins de recherche dans un cadre antérieur à AMMA et d'observations opérationnelles. Ce dispositif concerne surtout les surfaces continentales. Les sites de méso-échelle ont été considérablement renforcés au cours de cette période et plusieurs super-sites ont été mis en place. Le lancement de la procédure ORE par le ministère de la recherche, a grandement contribué aux acquis de cette période. Trois systèmes d'observation formant le noyau de la LOP de AMMA sur les surfaces continentales ont été labellisés ORE : AMMA-CATCH, IDAF, PHOTONS. L'ORE AMMA-CATCH regroupe les deux sites de l'observatoire CATCH et le site du Gourma malien. Les réseaux IDAF et PHOTONS se sont partiellement redéployés pour installer des stations sur les super-sites AMMA-CATCH (voir carte de la figure 1.3 de la section introductive à ce document API).

Concernant les surfaces océaniques, les observations disponibles reposent soit sur des campagnes ponctuelles spécifiques effectuées dans le cadre de programmes internationaux (CLIVAR ; ex : EQUALANT, PIRATA) soit sur des systèmes de réseaux opérationnels de mesure, dont deux ont été également labellisés ORE en 2003 : PIRATA et SSS. PIRATA est un programme tripartite entre les Brésil, les USA et la France, qui consiste à maintenir un réseau de 10 bouées de mesures météo-océanographiques, de type ATLAS, en Atlantique Tropical, et SSS est un programme consistant à collecter des mesures de salinité de surface de l'océan (SSS=Sea Surface Salinity) à partir des navires océanographiques mais aussi de navires marchands spécialement équipés en thermosalinographes. Des profils thermiques sont également obtenus grâce à ce réseau. Il faut également mentionner le projet CORIOLIS, initialisé en 2000, consistant à récolter toutes les mesures réalisées « en route » (température, salinité, courants, profils thermiques...) et qui peuvent être transmises en temps quasi-réel à partir des navires en mer, soit lors de campagnes, soit en transit.

Un bilan des équipements réalisés dans le cadre des ORE sur la période 2002-2004 est donné dans un tableau en annexe.

De nombreux travaux d'analyse des données recueillies sur ces deux phases préliminaires ont été publiés (voir liste bibliographique en annexe).

Il est à noter que le dispositif ORE est en fin de phase initiale et va être repensé, à travers un exercice de prospective auquel les ORE « AMMA » doivent contribuer. Cette mutation des ORE est en phase avec l'entrée de AMMA en période EOP (2005).

Outre les observations proprement dites, la phase préparatoire a permis de mener des missions de reconnaissances, de cartographier la zone d'étude, d'acquérir des éléments de climatologie, de faire des premières estimations de bilan d'eau de surface et d'équiper des super-sites.

1.1.3 EOP (2005-2007)

Dans le prolongement de la phase précédente l'EOP va permettre de continuer à documenter sur plusieurs années le cycle hydrologique et la dynamique de la végétation associée, à étudier les impacts associés et les rétro-actions d'échelle régionale ou méso ; de plus, l'observation pluri-annuelle accroît la probabilité de pouvoir observer certaines situations extrêmes (cas de la pluie centennale de Niamey en 1998). Le renforcement des observations durant l'EOP vise deux objectifs supplémentaires : i) documenter finement des échelles de variabilité non accessibles à la SOP (cycle saisonnier sur l'ensemble de la région, variabilité interannuelle, processus de rétro-action avec les effets mémoire associés) et ii) fournir un cadre pour la SOP (étude des sites, environnement climatique et hydrologique, préparation opérationnelle).

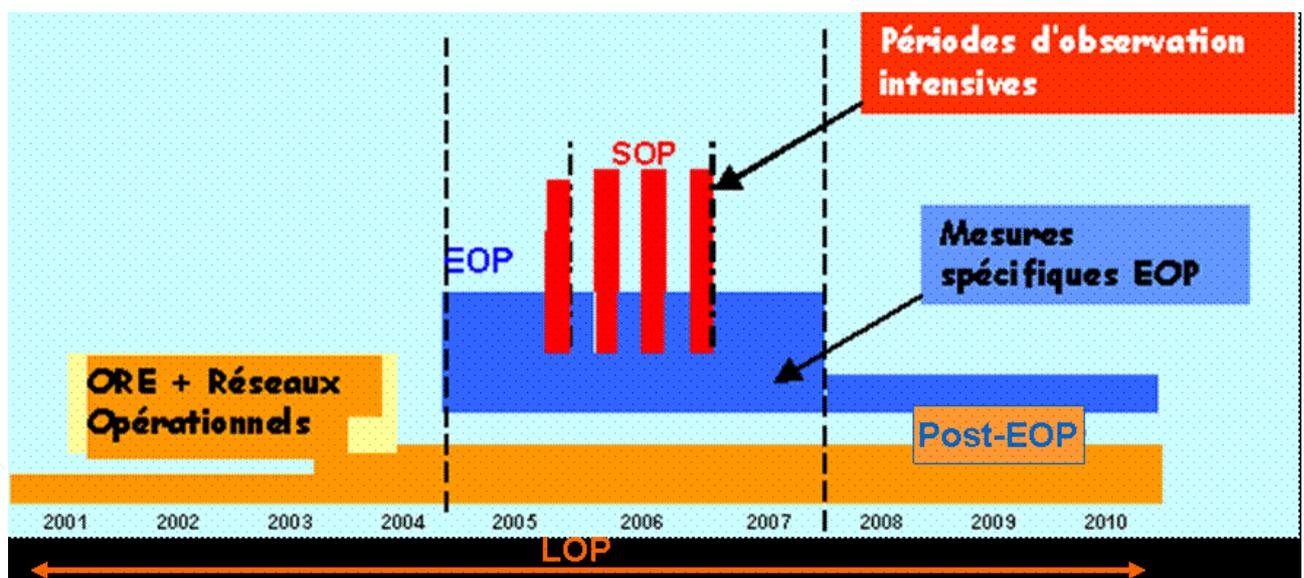
1.1.4 SOP (2006)

La SOP répond à des besoins bien cernés pour traiter certaines composantes atmosphériques – dynamiques et chimie – clefs du système de mousson. Les moyens intensifs déployés (sol, avions, bateaux) garantissent une bonne couverture mais en limitent la durée, du fait des coûts associés.

1.1.5 Phase de suivi post EOP (2008-2010)

Le dimensionnement de la phase de suivi post-EOP dépendra de plusieurs facteurs : engagement des organismes français derrière le dispositif ORE, implication des partenaires institutionnels africains (régionaux et nationaux), à travers le projet européen, le FSP RIPIECSA et d'autres mécanismes de soutien à la recherche en Afrique. L'équipement LOP et EOP étant destiné pour sa plus grande partie à rester en Afrique, son utilisation par des équipes bien formées au cours de l'EOP pourrait permettre un bon suivi post EOP dans plusieurs domaines : cycle de l'eau continental, dynamique de la végétation, aérosols, dépôts d'espèces chimiques.

Le renforcement des réseaux opérationnels (stations de radio-sondage et les réseaux synoptiques de certains pays) devrait également permettre un meilleur suivi météorologique à l'échelle régional pour les années post-EOP.



1.2 Domaines couverts

1.2.1 Le domaine régional

Intégration des différents ensembles sous-régionaux, mesures océaniques, importance de l'intégration avec les mesures satellitaires et la modélisation.

1.2.2 Les dispositifs sous-régionaux

Les dispositifs sous-régionaux tiennent compte de : i) l'existence de sous-domaines climatiques tels que la zone sahélienne au nord de 10°-11°N (faible influence de la première saison des pluies, mise en place de la saison des pluies lors du saut de mousson, prédominance des gros systèmes convectifs mobiles dans la production de la pluie) et la zone au Sud de cette limite ; ii) des limitations pratiques qui font qu'il est impossible de couvrir l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest d'un tissu homogène d'observations que ce soit en LOP, EOP ou SOP. AMMA s'appuie sur cinq dispositifs sous-régionaux :

- La partie océanique du domaine régional.
- Le transect sahélien qui inclut le réseau aérosols *PHOTONS*, un ensemble de 3 stations de suivi des aérosols terrigènes, un ensemble de 5 stations de radio-sondages et un réseau potentiel de trois à quatre radar météorologiques susceptible de permettre un suivi des lignes de grains depuis le Sahel central jusqu'à l'océan atlantique.
- Une fenêtre couvrant le continuum climatique du golfe de Guinée au Nord du Sahel et délimité par les stations de radiosondage d'Abidjan, Bamako, Tombouctou, Agadez, N'Djamena, Douala, Cotonou). Cet hexagone couvre les trois sites de méso-échelle *AMMA-CATCH*, le bassin de la Volta étudié par nos collègues allemands du projet *GLOWA-Volta* et le bassin du Niakambé, étudié par nos partenaires burkinabais de l'EIER.
- Un quadrilatère sud de radiosondages (Cotonou, Tamale, Niamey, Mina, plus Parakou au centre) établi pour l'étude des bilans d'eau, centré sur le site de méso-échelle du haut-bassin de l'Ouémé, qui fonctionnera en EOP.
- Un quadrilatère nord de radiosondages (Parakou, Ouaga, Tombouctou, Tahoua) établi pour l'étude des bilans d'eau, centré sur le site de méso-échelle du degré carré de Niamey, qui fonctionnera uniquement en SOP.

1.2.3 Les sites de méso-échelle

Trois sites de méso-échelle (Gourma et Degré de Niamey au Sahel, Haut Bassin de l'Ouémé en zone soudanienne) feront l'objet d'un suivi sur toute la période du projet, les mesures ayant démarré sur ces trois sites au cours de la période préliminaire à AMMA (voir ci-dessus). Ces trois domaines, qui couvrent chacun une surface comprise entre 10000 km² et 25000 km², sont les sites privilégiés pour les études de : couplage entre dynamique de la végétation et cycle de l'eau, occupation des terres (dynamique de la végétation) et érosion éolienne (Niamey), rétro-actions continent-atmosphère, transférabilité des modèles, fermeture des bilans et également pour l'étude des facteurs d'échelle dans le cycle hydrologique. Les mesures reproduites régulièrement ou de façon continue pendant l'EOP sur ces sites de méso-échelle permettront en outre d'évaluer les variabilités spatiale et saisonnière des mécanismes privilégiés de transport, d'émission et de dépôt des aérosols et des composés gazeux.

Ces sites de méso-échelle abritent des super-sites et des sites intensifs locaux. D'autres bassins sont suivis, mais de manière moins intensive, par nos partenaires européens : bassin de la Volta (projet *GLOWA-Volta*) et bassin du Sénégal (projet *INTEA*). Ils serviront de support pour des études de

transposabilité pour les modèles hydrologiques et pour densifier localement l'échantillonnage des différents champs (pluviométrie, écoulements, recharge, dynamique de la végétation) fournis par les réseaux opérationnels.

Les caractéristiques des trois sites de méso-échelle sont données dans le tableau 3 en annexe.

1.2.4 Les super-sites et les sites intensifs locaux

Ces sites serviront de base à l'étude des processus de petite échelle : gradients pluviométriques liés à la convection, infiltration de l'eau du sol, recharge des nappes, couplage entre végétation et cycle de l'eau. Une liste des super-sites est donnée dans le tableau 4 en annexe.

1.3 Nature des instruments mis en œuvre

1.3.1 Définition des instruments et plate-formes

Un instrument est un capteur ou un ensemble de capteurs dont les mesures permettent de réaliser un échantillonnage spatio-temporel cohérent d'une variable géophysique ou d'un ensemble de variables liées entre elles pour l'étude d'un processus donné. Différents facteurs techniques ou opérationnels (contraintes de mise en œuvre, colocalisation ou, inversement, dispersion géographique) peuvent amener à regrouper plusieurs capteurs en un seul instrument ou, au contraire, à "éclater" des ensembles cohérents de capteurs en plusieurs instruments. La définition des instruments, qui se traduit par la rédaction d'une fiche d'instruments est une étape importante pour la gestion de l'implémentation et pour la constitution de la base de données.

Les plate-formes font référence au support sur lequel sont implantés les instruments : avions, bateaux, sites terrestres (fenêtre sous régionale, site de méso-échelle, super-site).

1.3.2 Classes d'instruments

- **Instrument isolé effectuant des mesures ponctuelles** (ex : station météorologique).
- **Réseau de stations** réalisant un échantillonnage spatio-temporel cohérent sur un super-site ou un site de méso-échelle (typiquement un réseau de pluviographes, de sites de mesure de l'humidité des sols, de mesures du PAR), voire sur une fenêtre sous-régionale (réseau Photons, réseau GPS, réseau de bouées).
- **Instrument isolé réalisant des mesures spatialement intégrées** et/ou à grande couverture spatiale (typiquement un radar).
- **Ensemble d'instruments colocalisés** (étude locale des flux hydriques, instrumentation avion).
- **Campagne de type cartographique** (végétation, géophysique), *uniques ou répétées dans le temps*.
- **Autres mesures** (géochimie).
- **Campagnes océanographiques** (mesures avec un échantillonnage spatial optimal sur une région élargie mais une période limitée, mais répétées dans le temps) ?

1.3.3 Codification

Codification utilisée pour coder les instruments : **Période.TypeMesure_NomPlateform**.

Période : L pour LOP, E pour EOP, S pour SOP

TypeMesure: à définir au cas par cas (ex : RS pour radio-sondage, Rain pour pluie, , etc...).

NomPlateform: voir liste des plate forme (ex : ST pour transect sahélien, Q1 pour quadrilatère EOP vapeur d'eau, N pour site Méso-Echelle Niamey, O pour site Méso-Echelle Ouémé, etc...).

Exemples : AE.RS_Q1 = Ensemble des cinq radio-sondages(RS) du quadrilatère bilan d'eau(Q1) fonctionnant pendant l'EOP(E).

La liste des instruments est donnée en annexe.

2 Stratégie d'échantillonnage

Temporelle : le phasage décrit en section précédente correspond au minimum indispensable pour i) des études fines du cycle saisonnier et de la variabilité interannuelle (les trois années EOP), ii) réaliser un éventail plus large de conditions climatiques et les réponses lentes du système couplé en se concentrant sur les variables les plus facilement accessibles (les années d'encadrement de l'EOP).

Spatiale : une fois les périodes d'observation fixées, la stratégie spatiale est fortement contrainte par les aspects humains, matériels et opérationnels. Des requis minimums ont été établis sur une base disciplinaire, puis une stratégie d'ensemble s'est construite progressivement en fonction des financements envisagés. Malgré des avancées importantes réalisées en 2004 (financements API, IP, NERC), il ne sera pas possible de réaliser un échantillonnage homogène sur tous les sites de méso-échelle, ni de déployer tous les capteurs en théorie accessibles, ceci avant tout pour des raisons de ressources humaines mobilisables.

2.1.1 Echelle régionale

Elle est couverte i) par deux réseaux régionaux (Radio-sondages et GPS) ;ii) par un ensemble de fenêtres sous-régionales inégalement instrumentées. L'observation satellitaire constitue un complément indispensable pour compenser ces hétérogénéités et pour fournir des informations sur les zones non couvertes par les fenêtres sous-régionales. L'utilisation conjointe des données sol localement denses et des données satellitaires à couverture régionale permettra de valider certains produits (par exemple les produits pluie de type *CMAP*, *GPCC* ou les produits aérosols de type *Infrared Difference Dust Index – IDDI –* de METEOSAT ou *Aerosol Index – AI –* de TOMS...) ou de développer de nouveaux algorithmes.

La modélisation régionale : modèles de climat régionaux proposés par les allemands, MM5, MAR couplé ; modèle de végétation du CESBIO ; modèle de transport d'aérosols ; modèle de simulation de champs de pluie.

Liste des instruments :

- **le réseau de radio-sondages** est équipé et financé par diverses sources (les stations en gras-italique sont les stations **GCOS**)
 - réseau opérationnel opéré et financé par ASECNA, avec renforcement des sondages sur financement UE-IP durant la SOP : **Abidjan**, **Niamey**, Agadez, Bamako, Dakar, **Douala**, N'Djamena, Tessalit, **Sal**,
 - stations à créer ou ré-équiper sur crédits UE-IP : Mina (Nigéria), Tamale (Ghana), Tombouctou (Mali)
 - station créée sur crédit ACI Climat (F) : Cotonou
 - station créée par le projet Allemand IMPETUS : Parakou et fonctionnement payé sur IP
 - stations à l'accès encore incertain : **Tamanrasset** (Météorologie Algérienne) et Conakry (la station a existé mais ne fonctionne plus).

Outre la couverture régionale qu'elles assurent, ces **16 stations** sont réparties en différents groupements sous-régionaux décrits en section suivante.

- Quatre autres points de sondage seront disponibles en SOP : deux sur l'océan à bord du Ron Brown et de l'Atalante ; deux sur le continent (stations mobiles ISS, liées à SPOL, sur les sites de Tahoua et Gao)

- Quatre autres stations (Man, Ouagadougou, Sarh, Tambacounda) appartiennent à la zone d'étude mais ont été classées en priorité 2
- Stations des pays périphériques (Nouakchott au Nord-Ouest, Bangui et Brazzaville au Sud-Est, stations d'Afrique de l'Est)

L'ensemble de ces éléments est récapitulé dans le tableau 3 en fin de document.

- **le réseau de GPS** s'appuie sur le réseau IGS déjà en place (Dakar, Yamassoukro, Tamanrasset, Libreville). Il est proposé d'ajouter trois stations sur les sites de Djougou (financement API), Niamey (financement ST), Gao (financement API).
- **les réseaux opérationnels** : synoptiques, pluviométriques, hydrométriques ;

Priorités / Calendrier

Pour le réseau de radio-sondages, des priorités ont été définies dans la stratégie de remise à niveau du réseau de radiosondages, d'une part dans le contexte de base EOP (1 radiosondage par jour de Mars 2005 à Octobre 2007, 2 radiosondages par jour de Mars 2006 à Octobre 2006), d'autre part dans le contexte intensif SOP (Mai à Septembre 2006). Tout d'abord des priorités ont été définies sur le choix des stations elles-mêmes dans le cadre du projet international AMMA d'une part (dont les 16 stations P1), dans le cadre du projet européen AMMA_IP d'autre part (dont 11 stations P1). Ces priorités croisent en partie seulement le réseau des stations gérées par l'ASECNA. On indique aussi dans ce tableau les stations appartenant au réseau GCOS. On indique ensuite le niveau d'équipement sol des stations (MW11 – Digicora I - et MW15 – Digicora II - de Vaisala, STAR de Degreane). Concernant les stations gérées par l'ASECNA, la stratégie de l'ASECNA est de remplacer les stations MW11 par des stations MW15 « rétrofitée » pour suivre les nouvelles sondes RS92, de rétrofiter les stations MW15 pour suivre les sondes RS92, et de remplacer les stations STAR par de nouveaux équipements à définir. Le calendrier proposé par le ARG (AMMA Radiosounding Group) pour la remise à niveau du réseau de radiosondages est le suivant :

Priorités immédiates :

- Mars 2005 : Remise à niveau du réseau de télécommunication sur le réseau existant pour assurer le transfert sur le GTS de tout ce qui fonctionne (financement IP)
- Mai 2005 : Installation des nouvelles stations Cotonou (financement ACI FNS de 220 K€), Tamale (financement IP) et Parakou (créée par le projet IMPETUS, financement IP) ; activation d'une nouvelle station à Minna (financement IP)

Priorités suivantes : Fin 2005

- Remplacement des stations existantes MW11 par stations MW15 rétrofitées sur le réseau ASECNA (financement IP et ASECNA)
- Rétrofit des stations existantes MW15 sur le réseau ASECNA (financement IP et ASECNA)
- Remplacement des stations STAR (financement IP et ASECNA)
- Formation des opérateurs sur le suivi des RS92 (financement IP).

Le financement IP est de l'ordre de 2 M€. On compte sur un démarrage de AMMA_IP au 1^{er} Janvier 2005. Les financements IP seront orientés suivant les priorités P1/P2 définies. Cependant pour Dakar (site proche de la Direction de l'ASECNA) et Niamey (proche de l'EAMAC), l'objectif est de remplacer ces stations plus tôt (Mars 2005 si possible).

Problèmes à traiter

- Le calendrier GCOS est incertain, ce qui pose problème notamment pour la station d'Abidjan qui doit être remise en état (la situation politique en Côte d'Ivoire ne va pas non plus faciliter les choses).
- Le FSP/MAE RIPICESA doit apporter 450 K€ pour le réseau de radiosondages ; cependant là aussi, les incertitudes sur la mise en place de ce projet, prévue initialement avant la fin 2004,

sont non négligeables. Enfin des financements nationaux (NERC, US) sont prévus et consacrés aux phases intensives de la SOP.

- La potentialité de remise à niveau du réseau dépend des coûts des équipements qui seront proposés par les fournisseurs sélectionnés. Actuellement ceci est encore flou et dépendra aussi de la stratégie appliquée en termes d'appels d'offres : par exemple, Vaisala proposerait a priori des prix moins élevés à l'ASECNA qu'à AMMA_IP, mais les procédures d'appel d'offres passant par l'ASECNA risquent de prendre plus de temps.
- accès aux données des réseaux opérationnels pas encore totalement acquis pour toutes les données (à préciser dans le cadre du projet européen, notamment).

2.1.2 Dispositifs sous-régionaux

Cinq dispositifs régionaux, décrits en section 1 (voir aussi carte), ont été formés, dont quatre concernent l'EOP. Chacun de ces sous-domaines correspond à l'étude d'une catégorie de problèmes.

Les domaines d'étude :

- le domaine océanique, principalement le Golfe de Guinée, (en EOP campagnes bi-annuelles EGEE avec le Suroît en 2005 et l'Atalante en 2006-SOP1, et données LOP des ORE et du réseau de marégraphes : instruments EF 11 à EF13 et LF10 à LF14)
- l'hexagone échantillonnant le gradient climatique est centré sur l'étude du cycle saisonnier de la mousson, des rétro-actions et des effets-mémoires ; les radio-sondages (instruments européens avec participation française), le réseau GPS (AE.GPS_1) et les stations de mesure de flux (AE.Flux_G, AE.Flux_Ncw, AE.Flux_O) viennent en appui de ces études ;
- le quadrilatère bilans d'eau (AE.RS_Q1, et tous les instruments du sites de méso-échelle de l'Ouémé) est centré sur l'étude de la fermeture des bilans d'eau et des rétro-actions continent-atmosphère;
- le transect sahélien est dédié aux études de transport d'aérosols (AE.Dust_ST) et de la variabilité saisonnière de ce transport ainsi qu'aux liens entre la convection et le JEA, ainsi qu'à l'étude de la dynamique des systèmes convectifs.

Les liens avec la modélisation

Pour le domaine océanique, des modèles numériques de grande échelle spatio-temporelle (CLIPPER) permettront de conditionner aux frontières des modèles régionaux de plus fines échelles, développés notamment dans le Golfe de Guinée.

Le quadrilatère bilans d'eau définit une zone privilégiée pour l'étude du couplage entre les modèles atmosphériques à aire limitée et les modèles hydrologiques régionaux, type POWER.

Le transect sahélien formé par les trois stations aérosols terrigènes, serviront à valider le modèle émission-transport-dépôt *CHIMERE Dust*.

Compléments à envisager et/ou priorités

- Voir ci-dessous *questions à traiter*.

Priorités en cas de restriction ou de disponibilité tardive des fonds

- En ce qui concerne le réseau de GPS, deux scénarii ont été envisagés. Un scénario complet incluant une station à Conakry a été placé en priorité 2, compte tenu de son coût et malgré son intérêt, compte tenu des incertitudes sur la station de radio-sondage. Le transect retenu (Djougou, Niamey, Gao) met l'accent sur la documentation des variations de vapeur d'eau intégrée en relation avec la dynamique du flux du mousson et du JEA (présence prévue du radar VHF du CNRM et envisagée du lidar allemand en co-localisation à Djougou).

Questions à traiter

- Stratégie réseau sous-régional pour les *stations de flux*. La mesure des flux de surface a fait l'objet d'un financement dans le cadre de l'IP et d'un projet britannique financé par le NERC. Six stations de flux chaleur sensible + rapport de Bowen et trois stations H₂O/CO₂ seront acquises sur ces crédits. L'objectif est de disposer du même nombre de stations H₂O/CO₂ que de stations *chaleur sensible*. A cette fin il est prévu d'installer une station H₂O/CO₂ du réseau CLASSIC sur le site du Gourma et d'acquérir deux stations sur les crédits API pour être installée une sur le super-site de Banizoumbou (Niger) et l'autre sur le super-site de la Donga (Bénin). Les données stations de flux, outre leur intérêt pour des études locales de bilan hydrique et de couplage seront utilisées pour les WPs 1.1, 1.2 et 1.3. La stratégie d'échantillonnage souhaitée diffère pour le WP 1.1 (gradients régionaux d'énergie statique humide, donc répartition sur un transect méridien) et pour le WP 1.2 (fermeture des bilans à la méso-échelle, avec nécessité d'échantillonner les couverts végétaux représentatifs d'une zone donnée). Une stratégie de compromis serait d'installer trois stations sur chaque site de méso-échelle et de répartir les trois stations restantes au Sud (2: Lamto ? et site de GLOWA_VOLTA) et au Nord (1 station à Tessalit, 20°N).
- La disponibilité du *radar VHF* du CNRM en 2005 est peu probable, compte tenu de son emploi sur un autre projet. L'intérêt d'un tel outil capable de documenter en continu les variations de profils de vent et d'humidité (moyennant un nouvel algorithme développé au CNRM) est indéniable, surtout en co-localisation avec le GPS et une station de radio-sondage. Une incertitude demeure néanmoins sur la faisabilité d'une préparation en temps voulu pour cet instrument, des travaux étant à réaliser pour pouvoir l'amener au Bénin.
- L'intégration de la stratégie EOP au niveau européen reste à faire, en particulier pour ce qui concerne cette échelle sous-régionale (prise en compte des mesures sur les sites de GLOWA-VOLTA).

2.1.3 Les sites de méso-échelle et les super-sites

Les mesures des trois sites de méso-échelle principaux présentés en 1.2.3, seront complétées par celles de nos collègues européens du projet GLOWA-VOLTA et Burkinabais sur le bassin du Niakambé (super-sites de TITAO et DANO, tableau 7).

La stratégie générale

Les sites de méso-échelle sont répartis le long du gradient climatique pour permettre une intégration régionale via les mesures satellitales et la modélisation. Il manque un site au sud de 7°N pour que l'ensemble du gradient soit bien documenté, d'autant que sur cette zone la couverture nuageuse rend moins efficace l'imagerie satellitaire.

Les sites de méso-échelle sont documentés par deux types d'instruments. D'une part on dispose de réseaux réalisant un échantillonnage homogène (pour la pluie par exemple les réseaux de pluviographes CL.Rain_G, CL.Rain_N, CL.Rain_O). D'autre part, lorsqu'un tel échantillonnage n'est pas réalisable on identifie des sous-zones qui vont être instrumentées plus densément : ce sont soit les super-sites dont la liste est donnée dans la table 7, soit des versants ou des groupes fonctionnels. Cette instrumentation plus serrée sur des sites qui correspondent aux principaux « hydro-écosystèmes » d'un site de méso-échelle donné vise à permettre l'identification des paramètres des modèles couplés hydrologie-végétation qui seront ensuite utilisés dans les modèles de plus grande échelle. Ces sites sont également les lieux privilégiés de la validation satellitaire.

Sur chaque site de méso-échelle, l'accent a été mis en phase préliminaire sur l'homogénéisation des mesures hydrologiques (pluie, écoulements, nappes) et de végétation (identification des groupes fonctionnels). Pour l'EOP, l'objectif est l'instrumentation en mesures de flux de surface (voir section précédente) et en mesures de dynamique de la végétation à l'échelle d'un groupe fonctionnel (mesure d'indice foliaire et mesure des échanges gazeux à l'échelle des feuilles).

Dans le domaine de la chimie et des aérosols, les sites de méso-échelles serviront de base à l'étude de la caractérisation des mélanges d'aérosols (aérosols désertiques, aérosols carbonés, sulfate, embruns marins, aérosols de pollution) et de la variabilité saisonnière de la composition chimique et des propriétés radiatives de ces mélanges. Les sites de Cotonou et Djougou au Bénin sont les sites privilégiés pour observer les variations saisonnières de l'ozone et du monoxyde de carbone pendant l'EOP.

On disposera ainsi d'un ensemble unique de mesures co-localisées atmosphériques (incluant les GPS et les radars sur le site de l'Ouémé), hydrologiques, de végétation et de chimie-aérosols. Ceci permettra de mettre en œuvre le modèle climatique régional RegCM3 pour réaliser des simulations sur toute la période de l'EOP et des tests de sensibilité aux émissions pour les espèces gazeuses et mélanges d'aérosols à l'échelle régionale. Les mesures à haute résolution des champs pluviométriques permettront de développer des algorithmes de désagrégation pour forcer les modèles hydrologiques à partir des modèles climatiques, comme cela est en cours de test sur la région de Niamey, grâce au suivi réalisé depuis bientôt quinze ans (Onibon et al., 2004).

Compléments à envisager et/ou priorités

Toutes les mesures d'appui aux WP 2.3.3 (intégration régionale via paramétrisation adéquate des modèles de surface) et 4.1.2 (intercomparaison et validation des modèles de surface) sont prioritaires, les mesures d'appui aux WPs 2.3.1, 2.3.2 et 2.4 étant maintenant bien en place ou sur le point de l'être. Les opérations suivantes, encore dépourvues de financement dans le cadre des programmes ECCO, sont donc prioritaires :

- Suivi de la végétation (LAI, Flux de sève, échange gazeux à l'échelle des feuilles) sur le bassin de la Donga.
- Campagnes de scintillométrie (scintillomètre du LTHE disponible pour l'Ouémé ; disponibilité du scintillomètre du CESBIO sur le Gourma à préciser).
- Campagnes ciblées de validation de missions satellitaires (voir WP 4.3) pour l'humidité des sols et la végétation.
- Campagnes complémentaires pour le suivi de l'eau profonde, dont la dynamique, sur le bassin de l'Ouémé tout du moins, joue un rôle dans les écoulements de surface. Mise en œuvre de la RMP (résonance magnétique protonique).

Problèmes à traiter

- A défaut de disposer d'un véritable site de méso-échelle dans la partie sud du domaine d'étude, il était envisagé de relancer les mesures sur le site de Lamto (végétation, flux, bilan hydrique local). Les conditions politiques rendent difficilement envisageables cette action. Des sites de rechange vont être explorés dans le sud du Bénin (P1) ou sur le bassin de la Volta (P2).
- Il existe encore une certaine hétérogénéité entre les trois principaux sites de méso-échelle. Sur le site du Gourma, les mesures hydrologiques sont limitées au suivi d'une mare et ne semblent pas pouvoir être intensifiées par manque de personnel disponible et compte tenu des coûts générés

par l'éloignement du site. Sur le site de l'Ouémé le suivi de la végétation devrait être du niveau de celui réalisé sur les deux autres sites mais, là aussi, les forces manquent.

- Les sites de méso-échelle, et surtout les super-sites, concentrent des capteurs dont l'installation et la maintenance sont souvent délicates. Sur chacun de ces sites un support logistique de base existe puisqu'ils sont suivis depuis plusieurs années dans le cadre des ORE. L'intensification des mesures va néanmoins nécessiter une logistique accrue. Des visites de terrain vont avoir lieu en novembre et décembre 2004 pour définir les besoins et la manière de les satisfaire.

Tableau 1. Stations de radio-sondage AMMA

Station	Coordonnées	AMMA	IP	ASECNA	GCOS	Eqt station	EOP	SOP
Agadez	16 58N ; 07 59E	P1	P1	1		MW11	X	X
Bamako	12 32N ; 07 57W	P1	P1	1		STAR	X	X
Cotonou	06 21N ; 02 23E	P1	P1	1		New station	X	X
Dakar	14 44N ; 17 30W	P1	P1	1	1	MW11	X	X
Minna	09 37N ; 06 32E	P1	P1			New station	X	X
N'Djamena	12 08N ; 15 02E	P1	P1	1		MW15	X	X
Niamey	13 29N ; 02 10E	P1	P1	1	1	MW11	X	X
Parakou	09 21N ; 02 37E	P1	P1			New station	X	X
Tamale	09 30N ; 00 51W	P1	P1			New station	X	X
Tamanrasset	22 48N ; 05 26E	P1	P1		1	MW11	X	X
Tombouctou	16 43N ; 03 00W	P1	P1	1		MW11	X	X
Abidjan	05 15N ; 03 56W	P1	P2	1	1	MW15	X	X
Douala	04 01N ; 09 42E	P1	P2	1	1	MW11	X	X
Sal	16 44N ; 22 57W	P1	P2		1	US	X	X
Conakry	09 34N ; 13 37W	P1	P2			New station		X
Tessalit	20 12N ; 00 59E	P1	P2	1		MW11	Pb logist	
Nouakchott	18 06N ; 17 02W	P2	P2	1		MW15		X
Ouagadougou	12 21N ; 01 31W	P2	P2	1		STAR		X
Addis Abeba	09 02N ; 38 45E	P2	P2		1	MW11		
Bangui	04 24N ; 18 31E	P2	P2	1		STAR		
Man	07 23N ; 07 31W	P2	P2	1		MW15		
Ngaoundere	07 21N ; 13 34E	P2	P2	1		MW15		
Nouadhibou	20 56N ; 15 57W	P2	P2	1		STAR		
Sarh	09 09N ; 18 23E	P2	P2	1		MW11		
Tambacounda	13 46N ; 13 41W	P2	P2	1		STAR		

Tableau 2. Bilan de l'instrumentation super-site acquise ou modifiée durant la phase 2001-2004

Eau et Végétation (CATCH)								
	Végétation		Cycle eau continental				Mesures météorol.	
Site	Groupes fonctionnels	Biomasse	Pluie	Écoulements	Nappes: piézo.	Eau du sol	Stations météo	Bilan radiatif
Banizoumbou	<i>à mettre en place</i>		5+10	9	12	4	1+1	
Djougou/ Donga	<i>à mettre en place</i>		18	6	12+15	2+7	1	
Agoufou	3 groupes identifiés	35 sites (1*1 km ²)	8 4			2	2	2

En italique : stations en cours d'installation ou prévues début 2005, déjà financées

En gras : appareils enregistreurs haute résolution.

Chimie atmosphérique (IDAF)							Aérosols (PHOTONS)		
Site	Dépôts (azote, soufre, carbone)		Emissions (NO _x , COV _s , particules)		Climatologie CO, Ozone, BC, physicochimie aerosol (taille, propriétés)		Aérosols		Bilan radiatif
	ORE-LOP	AMMA-EOP	ORE-LOP	AMMA-EOP	ORE-LOP	AMMA-EOP	ORE	AMMA	
Banizoumbou	IDAF*+				IDAF*+		<i>Photométrie</i>	TEOM	Flux incident (vis./IR)
Djougou/	IDAF*+			Van*	IDAF*+	Van*	<i>Photométrie</i>		
Agoufou	IDAF*						<i>Photométrie</i>		
Cinzana							<i>Photométrie</i>	TEOM	Flux incident (vis./IR)
M'Bour							<i>Photométrie</i>	TEOM	Flux incident (vis./IR)
Lamto	IDAF*+				IDAF*+	Néphélo mètre <i>Grim CO-O3</i>	<i>Photométrie</i>		Flux incident (vis/IR)

IDAF* : chimie pluie, aérosols minéraux, gaz

IDAF+ : station IDAF* avec en supplément collecte aérosol chimie par classe de taille (pour l'organique, inorganique, la masse totale), Aethalomètre.

Van* : CO, Ozone, SO₂, NO_x, Compteur, Granulomètre APS, Mesures de flux (énergie, NO_x, COVB), rayonnement (Vis, IR), météo.

Tableau 3. Liste des instruments EOP

#	Code	PI Name	E-Mail Address	Instrument	Platform
EF1	AE.GPS_1	M.-N. Bouin, O. Bock	bock@aero.jussieu.fr; bouin@ensg.ign.fr	4 GPS stations (optionnel :3)	Meridional Transect
EF2	AE.RadX_O	Marielle Gosset	Marielle.Gosset@hmg.inpg.fr	X Band Hydromet. Radar	Djougou
EF3	AE.Dsd_Or	Marielle Gosset	Marielle.Gosset@hmg.inpg.fr	Disdro Parsival	Djougou
EF4	AE.OSP_Od	Laurent Barthès	barthes@cetp.ipsl.fr	Optical Spectro Pluviometer	Dakar puis Djougou
EF5	AE.VHF_O	B. Campistron		CNRM VHF	Ouémé (Djougou)
EF6	AE.BaCO2_G	Laurent kergoat	Laurent.kergoat@cesbio.cnes.fr	CO2 Baloon	
EF7	AE.Flux_G	Franck Timouk	Franck.timouk@cesbio.cnes.fr	1 CLASSIC H2O flux station	Gourma-Hombori
EF8	AE.Flux_New	Bernard Cappelaere	bernard.cappelaere@mpl.ird.fr	1 H2O flux station	Niamey-Wankama
EF9	AE.Flux_Odc	Sylvie Galle	galle@cixi.isol.ird.fr	1 H2O flux station	Ouémé-Donga
EF11	OE.Navire_GG	Bernard Bourles	bourles@ird.fr	Sea water samples	Atalante in 2005
EF12	OE.XBT_GG	Bernard Bourles	bourles@ird.fr	Temp. profiles with perdable sounds	Guinea Gulf
EF13	OE.CTD_GG	Bernard Bourles	bourles@ird.fr	Seabird 911 sounds (t, salinity, 02)	Guinea Gulf
EF14	CE.SW_G	Patricia de Rosnay	patricia.derosnay@cesbio.cnes.fr	Campbell CS616 for soil moisture	Gourma Meso Site
EF15	CE.VegSoil_G	Josiane Seghieri	seghieri@ird-ml.org	Vegetation monitoring	Gourma Meso Site
LF16	CE.PAR_Ga	Eric Mougin	Eric.mougin@cesbio.cnes.fr	PAR and LAI measurements	Gourma-Agoufou
EF17	CE.Sap_Ga	Valérie Le Dantec	valerie.ledantec@cesbio.cnes.fr	2 sap flow/ soil moisture stations	Gourma-Agoufou
EF18	CE.Rain_Nc	Luc Descroix	descroix@ird.ne		Niamey SS central
EF19	CE.Run_Nc	Luc Descroix	descroix@ird.ne	Network of 9 recording streamgauges	Niamey SS central
EF20	CE.Gwat_Nc	G. Favreau	Favreau@msem.univ-montp2.fr	Level recorders in 6 drilled boreholes	Niamey meso site
EF21	CE.SW_Nc	B. Cappelaere	bernard.cappelaere@mpl.ird.fr	4 sites Watermark et TDR	Niamey SS central
EF22	CE.SWsan_Nc	Luc Descroix	descroix@ird.ne	Soil water neutron probe	Niamey SS central
EF23	CE.Veget_New	Nicolas Boulain	boulain@msem.univ-montp2.fr	Li COR LAI-2000 and Li COR 6400	Niamey-Wankama
EF24	CE.Run_Odc	Luc Seguis	seguis@ird.fr	1 seuil jaugeur on 3 transects: 3 total	Donga, transects
EF25	CE.WChem_O	Christophe Peugeot	peugeot@ird.fr	Chemical Analysis: surf/ground water	Ouémé
EF26	CE.WChem_Od	Luc Seguis	seguis@ird.fr	Chemical Analysis: surf/ground water	Ouémé-Donga
EF27	CE.Gwat_Odc	Luc Seguis	seguis@ird.fr	Network of 27 piezo in drilled wells	Donga, transects
EF28	CE.SW_Odc	Sylvie Galle	galle@cixi.isol.ird.fr	3 stations on 4 transects: 12 in total	Donga, transects
EF29	CE.Veg_Odc	Josiane Seghieri	seghieri@ird-ml.org		
EF30	AE.Dust_ST	Jean-Louis Rajot	rajot@ird.ne	3 sites (TEOM, micro-LIDAR, Photometer)	Sahelian Transect
EF31	AE.RSO3_Od	Valérie Thouret	thov@aero.obs-mip.fr	Ozone Radio-sounding	Djougou
EF32	AE.Aerosol_La	Cathy Liousse	lioc@aero.obs-mip.fr	Aerosol measurements at Lamto	Lamto Station
EF33	AE.VAN_Od	Dominique Serça	serd@aero.obs-mip.fr	Labo Van	Djougou

Tableau 4. Liste des instruments LOP

#	Code	PI Name	E-Mail Address	Instrument	Platform
LF1	AL.Met_Gh	Franck Timouk	Timouk@cesbio.cnes.fr	Station Météo Campbell	Hombori (Gourma)
LF2	AL.Met_Nc	Luc Descroix	descroix@ird.ne	Station Météo Campbell	Banizoumbou (Ny)
LF3	AL.Met_Od	Sylvie Galle	galle@ird.fr	Station Météo Campbell	Djougou (Ouémé)
LF10	OL.SSS_AE	Thierry Delcroix	thierry.delcroix@cnes.fr	Thermosalinographes sur navires	Ships in Equat. Atlantic
LF11	OL.StMet_ST	Bernard Bourles	bourles@ird.fr	Campbell Met. Station	Sao Tomé
LF12	OL.Cot_Afr	Bernard Bourles	bourles@ird.fr	Thermometers Network	
LF13	OL.Buoys_AE	Bernard Bourles	bourles@ird.fr	ATLAS PIRATA buoys	Pirata Network
LF14	OL.Prov_AE	Bernard Bourles	bourles@ird.fr	ARGO Profilers	Ships in Equat. Atlantic
LF15	OL.Drift_AE	Bernard Bourles	bourles@ird.fr	Drifting buoys	Ships in Equat. Atlantic
LF16	CL.Rain_G	François Lavenu	Francois.Lavenu@ird-ml.org	8 recording raingauge network	Gourma meso site
LF17	CL.Rain_N	Thierry Lebel	Thierry.Lebel@hmg.inpg.fr	30 recording raingauge network	Niamey meso site
LF18	CL.Rain_0	Christian Depraetere	Christian.Depraetere@inpg.fr	30 recording raingauge network	Ouémé meso site
LF19	CL.Rain_Od	Luc Le Barbé	Luc.Le-Barbe@ird.fr	Network of 18 recording raingauges	Ouémé-Donga
LF20	CL.Pond_Nc	B. Cappelaere	bernard.cappelaere@mpl.ird.fr	Network of 6 level recorders on pools	Niamey SS central
LF21	CL.Run_O	Christophe Peugeot	peugeot@ird.fr	14 recording streamgauge network	Ouémé meso site
LF22	CL.Run_Od	Luc Seguis	seguis@ird.fr	Network of 6 recording streamgauges	Ouémé-Donga
LF23	CL.ADCP_O	Christophe Peugeot	peugeot@ird.fr	Accoustic Doppler Current Profiler	Ouémé
LF24	CL.Gwat_N	G. Favreau	Favreau@msem.univ-montp2.fr	Level recorders in wells (aquifer)	Niamey meso site
LF25	CL.Gwat_Od	Luc Seguis	seguis@ird.fr	21 village sites (11 recorders)	Ouémé-Donga
LF26	CL.Depot_RW	C. Galy-Lacaux	lacc@aero.obs-mip.fr	5 stations IDAF (4 avec aethalomètre)	Regional Window

Tableau 5. Campagnes de documentation de sites

CF1	CC.geophy_Od_c	Henri Robain	Henri.Robain@bondy.ird.fr	Résistivimètres SYSCAL Pro et R2
CF2	CC.scintil_Od	Jean-Martial Cohard	Jean-Martial.Cohard@hmg.inpg.fr	Scitillomètre flux de chaleur sensible

Tableau 6. Caractéristiques des sites de méso-échelle

Name	Location	Description	African Partners	Scientist in Charge	Period of Activity
Ouémé Catchment (O)	Benin; 9°-10°N; 1.5°-3°E 14200 km ²	Densely instrumented catchment with denser instrumentation on sub-catchments (Donga, Aguima, Ara). Soudanian climate (different types of rain systems) and Savannah vegetation. Global models; impact of climate variability on water resources.	DH, DMN, AC Univ.	C. Peugeot Peugeot@ird.fr	1997-2008
Niamey Area (N)	Niger; 13°-14°N; 1.6°-3°E 14200 km ²	The survey of the “Niamey square degree” started in 1990. Heavy observations in 1992, monitoring from 1994 to 2002, densification starting again in 2003. Sahelian climate with semi-arid vegetation (Millet crops, Tiger bush, ...). Long series of high resolution rain data and groundwater levels.	DMN, Niamey Univ.	L. Descroix Descroix@ird.ne	1990-2008
Gourma Malien (G)	Mali; 14.5°-17.5°N; 2°-1°W 30000 km ²	Sahelian to saharo-sahelian climate (between isohyets 400 and 100 mm). Semi-arid natural vegetation composed of annual grasses and a sparse tree layer. Crops only present in the southern part of the area. 16 vegetation sites monitored since 1984. Also satellite products validation sites (vegetation, soil moisture).	IER, DMN, DH	E. Mougin Mougin@cesbio.cnes.fr	1984-2008

Tableau 7. Liste et caractéristique des super-sites et sites intensifs locaux.

Name	Location	Description	African Partners	Scientist in Charge	Period of Activity
Donga Catchment (Od)	Benin; 9.6°-9.9°N; 1.6°-2°E 590 km ²	Sub-catchment of the Ouémé catchment with a dense recording raingauge network (14 stations) and 5 streamflow stations. Land surface process studies, hydrological modelling, coupling with the sub-surface and the atmosphere.	DH, DMN, AC Univ.	S. Galle /L. Seguis galle@hmg.inpg.fr	2002-2008
Aguima Catchment (Oa)	Benin; 9.10°-9.14°N; 1.90°-2°E, 30 km ²	Sub-catchment of the Ouémé catchment, with a dense recording raingauge network (9 stations, some are in neighbouring catchments) and 5 water level recorders, 3 weather stations. Evaporation and soil moisture measurements. Land-surface process and agricultural studies; hydrological modelling.	DH, DMN, AC Univ.	A. Fink fink@meteo.uni-koeln.de	2001-2008
Niamey Central Super Site (Nc)	Niger; 2°35'-2°48'; 13°25'-13°45', 600 km ²	Kori de Dantiandou and adjacent areas. Dry vegetation cover. Land surface process studies, hydrological modelling, coupling with the sub-surface and the atmosphere. Rainfall vs vegetation spatial relationship, at the local scale	DMN, DRE, Niamey Univ., AGRHYMET Roselt, ICRISAT	L. Descroix Descroix@ird.ne	1991-2008
North Titao catchment	Burkina Faso; 13°40'-14°N, 2°-2°2' W < 50 km ²	Sub-catchment located in the north of the Nakambé basin. Hydrological, erosion, bio climatic, environmental, soil physics and vegetation dynamics studies. Water, matters (solid and dissolved) and energy flux. Three different soil surface types (bare soils, cultivated lands and natural vegetation covered surfaces).	EIER, University of CNRST, DMN, DGIRH	Ouagadougou, H. Yacouba, Hamma.Yacouba@eieretsher.org H. Karambiri, Harouna.Karambiri@eieretsher.org	2004-2009
Dano	Burkina Faso, 11.15°N, 3.07°W, 20km ²	Sudan Savannah, dam at outlet of subcatchment/testsite, micrometeorological system and various devices for C/N/H ₂ O turnover	INERA	H. Kunstmann	2005-2007

*.Local in situ measurements, only used for satellite validation, satellite data being used in Hydrological modelling.

Références Bibliographiques (sélection de quelques publications représentatives)

- Ali A., T. Lebel, A. Amani, 2004. Estimation des pluies au Sahel : utilisation d'un modèle d'erreur pour évaluer réseaux sol et produits satellitaires. *Sècheresse*, **15(3)**, 1-8.
- Ali, A., T. Lebel, A. Amani, 2003. Invariance in the spatial structure of Sahelian rainfields at climatological scales. *J. of Hydrometeor.*, **4(6)**, 996-1011.
- Braud I., de Condappa D., Soria J., Haverkamp R., Angulo R., Galle S. and Vauclin M., in press 2004. Use of scaled forms of the infiltration equation for the estimation of unsaturated soil hydraulic properties (Beerkan method). *European Journal of Soil Science*, **56**.
- Cappelaere B., VIEUX B., PEUGEOT C., MAIA-BRESSON A. et SEGUI S. L., 2003. Hydrologic process simulation of a semiarid, endoreic catchment in Sahelian West Niger. 2. Model calibration and uncertainty characterization. *Journal of Hydrology*, **279**, 244-261.
- Favreau G., LEDUC C., MARLIN C., DRAY M., TAUPIN J.D., MASSAULT M., LE GAL LA SALLE C. et BABIC M., 2002. Estimate of recharge of a rising water-table in semi-arid Niger from 3H and 14C modelling. *Groundwater*, **40(2)**, 144-151.
- Gosset M., I.I. Zawadski, 2001 : Effect of Nonuniform Beam Filling on the Propagation of the Radar Signal at X-Band Frequencies. Part 1 : Changes in the k(Z) Relationship. *J. of Atm. And Ocean. Tech.*, **18**, 1113-1126
- Jarlan L., Mazzega P., Mougin E., Lavenu F., Marty G., Frison P.L., Hiernaux P., 2003, Mapping of sahelian vegetation parameters from ERS scatterometer data with an evolution algorithm, *Remote Sens. Environment*, **87**, 72-84.
- Jarlan L., Mougin E., Frison P.L., Mazzega P., Hiernaux P., 2002, Analysis of ERS wind scatterometer time series over Sahel (Mali). *Remote Sens. Environ.*, **81(2-3)**, 404-415.
- Lacaux, J.-P. et al, Wet depositions in the tropics, Chapter 2 „Biosphere Atmosphere Interactions” Part 2.7 : pp53-55, An Integration and Synthesis of a Decade of Tropospheric Chemistry Research, Series: Global Change - The IGBP Series , Brasseur, Guy P.; Prinn, Ronald G.; Pszenny, Alexander A.P. (Eds.), 2003, XIV, 300 p. 131 illus., Hardcover.
- Mathon V., H. Laurent and T. Lebel, 2002. Mesoscale convective system rainfall in the Sahel, 2002. *J. of Applied Meteor.*, **41**, 1081-1092
- Onibon H., T. Lebel, A. Afouda, G. Guillot, 2004. Gibbs sampling for conditional spatial disaggregation of rain fields, *Water Resources Research*, **40**, W08401, doi: 10.1029.
- Peugeot C., Cappelaere B., VIEUX B., SEGUI S. L. et MAIA-BRESSON A., 2003. Hydrologic process simulation of a semiarid, endoreic catchment in Sahelian West Niger. 1. Model-aided data analysis and screening. *Journal of Hydrology*, **279**, 224-243.
- Sigha-Nkamdjou, L., C. Galy-Lacaux, V. Pont, S. Richard, D. Sighomnou and J. P. Lacaux, 2003. Rainwater chemistry and wet deposition over the equatorial forested ecosystem of Zoétélé (Cameroon), *Journal of Atmospheric Chemistry*, **46**, 173-198, 2003