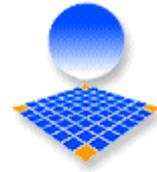




**HydroSciences  
Montpellier**



UNIVERSITE MONTPELLIER 2

**Mémoire**

**Habilitation à Diriger des Recherches**

**Variabilité pluie-débit en Afrique de  
l'Ouest et Centrale au 20<sup>ème</sup> siècle :  
changements hydro-climatiques,  
occupation du sol et modélisation  
hydrologique**

**Université  
des Sciences et Techniques  
Montpellier 2**

**Ecole Doctorale 148 Terre, Eau, Espace**

**Gil Mahé**

**Juin 2006**

**Ce mémoire a été soutenu publiquement le 21 juin 2006 à la Maison des Sciences de l'Eau de Montpellier devant un Jury composé de :**

<b>Michel Desbordes</b>	<b>HSM Montpellier</b>	<b>Président</b>
<b>Bernard Fontaine</b>	<b>CRC Dijon</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Sylvain Bigot</b>	<b>LTHE Grenoble</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Mike Bonell</b>	<b>UNESCO Paris</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Bernard Pouyaud</b>	<b>IRD Montpellier</b>	<b>Examineur</b>
<b>Jean-Marie Fritsch</b>	<b>IRD Johannesburg</b>	<b>Examineur</b>
<b>Eric Servat</b>	<b>HSM Montpellier</b>	<b>Examineur</b>

## Avant-propos

Il me paraît essentiel de rappeler, même sommairement, à travers ces quelques lignes, qu'une trajectoire professionnelle hérite de la qualité et des compétences des collègues que l'on a la chance de côtoyer, et se fonde également sur la chaleur de l'environnement familial et amical. Ce mémoire témoigne modestement de la richesse d'un travail collectif réalisé au sein de l'ORSTOM/IRD.

Je le dédie à mon épouse Sophie, et à mes trois enfants Léa, Anouk et Tom, qui ont accepté les contraintes –et les bonheurs– d'une vie itinérante ; à mes parents qui se sont toujours inquiétés de savoir si mes études me feraient vivre ; à Jean Citeau qui m'a accueilli à Dakar ; à feu le Professeur Fontes qui m'a honoré d'une bourse MRT à Orsay/Paris 11 ; à Philippe Hisard qui m'a encadré en DEA ; à Jean-Claude Olivry qui m'a pris sous son aile et accompagné depuis mes débuts et pendant 10 ans en me communicant son savoir et sa passion de l'hydrologie africaine ; à Eric Servat qui m'a fait confiance et offert à HydroSciences Montpellier un espace où évoluer ; à André Mahieux, Michel Gréard et Jean-Pierre Bricquet qui m'ont appris le terrain au Mali ; à Jean-Emmanuel Paturel, complice de bureau et de selle ; à toute l'équipe VAHYNE : Sandra Ardoin-Bardin, Jean François Boyer, Agnès Crès, Alain Dezetter, Claudine Dieulin, Hélène Niel, Nathalie Rouché, Denis Ruelland ; au personnel du laboratoire d'hydrologie de Montpellier de 1987 à 1994 et en particulier Bernard Pouyaud, Anne Crespy, François Delclaux, Yann L'Hôte et feu Jacques Lérique ; à mes compagnons à Dakar : Hervé Demarcq, Cintia Uvo, Philippe Goryl, André Pesin, Christophe Nivelet et tout le personnel du CRODT ; à mes compagnons à Bamako : Arber Dicko, Marcel Kuper, Jean-François Leroux, Didier Orange, tout le personnel du centre IRD, et aussi aux regrettés Kayes Koumaré et Bertrand Marieu ; à mes compagnons à Ouagadougou : François Blanchet, Michel Gautier, Harouna Karambiri, Christophe Laroche, Amadou Hama Maiga, Hama Yacouba, à tout le personnel de l'EIER et de l'IRD et feu Julien Bassolé ; à mes compagnons à Norwich : Declan Conway, David Viner, Mike Hulme et tout le personnel du CRU ; à mes compagnons camerounais : Luc Sigha-Nkamdjou, Daniel Sighomnou, Gaston Liénou, Jacob Nwalal ; à tous mes autres partenaires de FRIEND-AOC et aux étudiants que j'ai encadrés, et enfin à mes compagnons à la MSE et à HSM, qui me pardonneront de ne pas les citer exhaustivement, à l'exception de Nicole Couesnon, dont le talent n'a d'égal que la bonne humeur.

J'ai omis très certainement de nommer beaucoup de mes collègues et amis avec qui j'ai travaillé au cours de mes séjours et voyages, mais je garde le souvenir de chaque rencontre.



# Sommaire



<b>Curriculum Vitae</b>	11
<b>Lexique des abréviations utilisées</b>	15
<b>Introduction, ou Intégration dans une hydrologie en mutation à l'ORSTOM</b>	21
Brève histoire de l'hydrologie à l'ORSTOM	23
Hydrologie et climat à l'ORSTOM	25
Intégration, rencontres et chemin à l'ORSTOM	27
<b>1 Affectations et parcours scientifique</b>	29
1.1 Lieux, programmes, structures d'accueil et partenaires successifs	31
Formation – Montpellier et Sénégal – Hydrologie, océan et atmosphère.	31
Mali – Hydrologie grands bassins, terrain.	31
Angleterre – Modélisation hydrologique, modèles climatiques.	32
Burkina-Faso – Occupation du sol, anthropisation, petits bassins.	33
Montpellier – Hydrologie régionale, ressources en eau, impacts climatiques et anthropiques	33
1.2 Résumé des travaux	34
<b>2 Environnement de mes recherches</b>	37
2.1 Des projets élaborés et menés en partenariat étroit	39
2.1.1 Equipes et partenaires du Sud	39
Cameroun	39
Burkina-Faso	40
Mali	40
Sénégal et Mauritanie	41
Maroc	41
2.1.2 Equipes et partenaires du Nord	42
2.1.3 Participations à des grands programmes	42
Programmes internationaux	42
Programmes nationaux	43
2.2 Formation	43
2.2.1 Stagiaires encadrés	43
2.2.2 Que sont-ils devenus ?	45
2.2.3 Publications des stagiaires de DEA et thèse	46
2.2.4 Thèses et DEA en cours	46
2.2.5 Formations assurées	47
2.3 Animation et Administration de la Recherche	47
2.3.1 Animation	47
2.3.2 Administration	48
2.3.3 Reviewing	49
2.4 Expertise et valorisation	49
2.4.1 Expertise	49
2.4.2 Valorisation	50
<b>3 Publications</b>	51
Revue internationale de rang A	53
Revue internationale autres avec comité de lecture	54
Revue nationale	56
Publications autres	56
Actes de conférences révisés et publiés	57
Participation à ouvrages	58

Articles d'interviews pour les journaux	58
Mémoires	59
Cartes, atlas, annuaires	59
Autres conférences et posters	59
Rapports, notes, projets	63
Autres Publications de stagiaires encadrés	65
<b>4 Variabilités hydro-climatologique et environnementale en Afrique de l'Ouest et Centrale : une approche des mécanismes à l'origine du changement des relations pluie-débit au cours du 20<sup>ème</sup> siècle</b>	<b>69</b>
4.1 Introduction	71
4.2 La sécheresse en Afrique de l'Ouest et Centrale	73
4.2.1 Conséquences socio-économiques et impacts sur les hydrologies nationales	73
4.2.2 Déficits de précipitations	75
Etude à l'échelle sous-continentale	75
Etude à l'échelle régionale et des bassins-versants	79
Corrélations avec des facteurs du climat	80
<i>Facteurs océaniques, atmosphériques et continentaux</i>	80
4.2.3 Situations « sèches » et « humides » au Sahel	85
4.2.4 Prévision saisonnière des pluies	85
4.2.5 Conclusion	87
4.3 Variabilité des débits en Afrique de l'Ouest et Centrale	87
4.3.1 Bilans hydrologiques à l'échelle sous-continentale	88
Bilans d'apports en eaux douces à l'océan	88
4.3.2 Etudes locales par bassins-versants	91
Fleuve Ogooué	92
Rivières Camerounaises	93
Fleuve Congo	93
Fleuve Niger	93
Rivières sahéliennes du Burkina-Faso, du Niger et de Mauritanie	95
4.3.3 Variabilité des relations pluie-débit	95
Afrique équatoriale	95
Afrique tropicale humide	96
Afrique tropicale sèche à semi-aride	97
4.4 Impact sur les transports de matières	99
4.4.1 Fleuve Niger	99
4.4.2 Rivières camerounaises	100
4.4.3 Campagnes en cours	101
4.4.4 Conclusion	103
4.5 Modélisation hydrologique des relations pluie-débit	104
4.5.1 Application de modèles conceptuels	104
4.5.2 Performances et limites	104
4.5.3 Changements d'états de surface	105
Evolution naturelle des états de surface	105
Relations homme-climat-environnement	107
Prise en compte des changements d'états de surface en modélisation	108
<i>Le Nakambé à Wayen au Burkina-Faso</i>	108

4.6	Prédiction des ressources en eau	110
4.6.1	Prévision pour l’Afrique de l’Ouest et Centrale	110
	Modélisation de 350 bassins-versants	110
4.6.2	Prévision pour le delta intérieur du Niger	113
	Relation entre hauteurs d’eau aux stations hydrométriques et surfaces inondées	113
4.7	Conclusion	116
4.7.1	Des changements hydroclimatiques majeurs : témoins de la non-linéarité des relations pluie-debit	116
4.7.2	Modélisation des ressources en eau à grande échelle d’espace et de temps	117
	<i>Modelisation hydrologique conceptuelle</i>	117
4.7.3	Occupation du sol et états de surface	118
	<i>Relations homme-climat-environnement</i>	118
	<i>Traitement d’images satellitaires</i>	119
4.7.4	Scénarios climatiques et impacts sur les ressources en eau et la santé	119
4.7.5	L’apport du terrain	120
4.7.6	Perspectives pour le développement	120
<b>5</b>	<b>Impact des changements d’occupation du sol sur les régimes hydrologiques et les ressources en eau des grands bassins : Perspectives scientifiques</b>	<b>123</b>
5.1	Hydrologie, environnement, impacts et ressources : le continent africain au cœur des agendas politiques.	125
5.2	Occupation du sol et états de surface : un axe de recherche majeur en Afrique de l’Ouest.	126
5.3	Le projet MOHYCAN : Modélisation Hydrologique, Climat et Anthropisation des grands cours d’eau.	128
5.3.1	Contexte du projet et questions émergentes	128
5.3.2	Objectifs du projet MOHYCAN	128
	Plan de recherche	128
	a Variabilité hydroclimatique	129
	<i>Bases de données et politique de dissémination de l’information</i>	129
	<i>Perspectives de recherche à développer.</i>	130
	b Modélisation des ressources en eau à grande échelle d’espace et de temps	131
	<i>Adéquation entre disponibilité des données et type de modélisation</i>	131
	<i>Entrée pluie</i>	132
	<i>Entrée évaporation</i>	133
	<i>Développements en modélisation conceptuelle</i>	133
	<i>Capacité en eau des sols</i>	134
	<i>Perspectives</i>	135
	c Occupation du sol et états de surface	135
	<i>Actions à entreprendre</i>	135
	<i>Données spatiales et cartographie</i>	135
	<i>Collecte et acquisition de données de terrain spécifiques</i>	136
	<i>Utilisation des données socio-économiques</i>	136
	d Impacts sur les ressources en eau, la santé, scénarios climatiques.	138
	<i>Actions à développer</i>	138

5.3.3 Mise en œuvre	139
Principaux chantiers	139
<i>Mali</i>	139
<i>Burkina-Faso</i>	139
<i>Mali</i>	139
Insertion dans des programmes de recherche nationaux et internationaux et les problématiques de recherche d'HydroSciences Montpellier	140
<i>Grands Bassins</i>	140
<i>Activités de MOHYCAN dans le programme AMMA</i>	141
5.4 Conclusions. Résultats attendus.	141
5.4.1 Collaborations à développer	141
Inter-équipes à HSM	141
Partenariat	142
Observations et bases de données	142
Principaux résultats attendus	143
<b>Références</b>	145

# Curriculum Vitae



# Curriculum Vitae

Gil MAHE

Né le 17 septembre 1963

Marié, 3 enfants

CR1 à l'Institut de Recherche pour le Développement – IRD-ex-ORSTOM  
Département Milieu et Environnement. Affecté à l'UMR HydroSciences Montpellier, Maison des  
Sciences de l'Eau, depuis le 12/09/2003. Equipe VAHYNE- Variabilité hydrologique et impacts sur les  
ressources en eau.

Recruté à l'IRD le 15 septembre 1993. A l'IRD depuis janvier 1987 (DEA)

## *Formation*

1984 DEUG Sciences de la Nature et de la Vie / Paris 12

1986 Maîtrise de Géologie / Paris 11 Orsay

1986 Maîtrise de Géophysique/Géochimie/ Paris 11 Orsay

1987 DEA National d'Hydrologie - Ressources en Eau/ Paris 11 Orsay

1988/1989 VSN IRD-Dakar - CRODT

1992 Nouvelle thèse en Sciences de la Terre – Paris 11 Orsay

*« Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle. Analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. »*

**Prix 1994** de la "Fondation Georges Hachette 1902", de la **Société de Géographie de Paris**, pour ma thèse éditée par l'IRD en mai 1993.

Membre de la Société de Géographie de Paris

Membre du Comité National Français des Sciences Hydrologiques

Membre de l'Association Africaine d'Hydrologie

# Principales qualifications

Docteur en Sciences de la Terre de l'Université Paris Sud (géologie, géophysique, hydrogéologie et géochimie isotopique), spécialisé en hydrologie et climatologie à l'ORSTOM (puis IRD) au cours d'un troisième cycle et de plusieurs affectations en Afrique de l'Ouest : Sénégal (1,5 ans), Mali (4,5 ans) et Burkina-Faso (4 ans), et d'un séjour d'1 an à la Climatic Research Unit de l'Université d'East Anglia à Norwich (UK). Compétences en traitement des données hydro-climatiques et de flux de matières, et en modélisation hydrologique conceptuelle ; connaissances en télédétection, océanographie et météorologie tropicales, et utilisation de sorties de modèles climatiques. Participation à deux programmes sur le fleuve Niger au Mali : EQUANIS (PEGI-GBF) et GIHREX, le premier sur la qualité des eaux et le second sur une approche intégrée de l'environnement. Organisation de nombreuses campagnes de mesures sur les fleuves Niger et Sénégal au Mali (bassins amont et delta intérieur), et au Burkina-Faso (affluents de rive droite du fleuve Niger). Coresponsable depuis 1999 de l'animation d'un groupe de recherche de l'UNESCO/FRIEND-AOC sur la variabilité des ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale, et en contact permanent avec un réseau de partenaires africains. Responsable ou participant à plusieurs programmes en Afrique de l'Ouest : responsable IRD du projet ICCE-BF (AMMA) au Burkina-Faso sur Erosion environnement et changement climatique ; responsable de l'axe 1 -hydrologie- du programme Corus-Coton au Mali, participant du programme PNRH au Mali sur l'apport de la télédétection en modélisation hydrologique grand bassin. Responsable de l'équipe VAHYNE, et de l'animation de l'Axe 3 (Variabilité hydrologique : analyse, mécanismes et impacts sur les ressources en eau), à l'UMR Hydrosiences de Montpellier. Membre élu de la CSS1 à l'IRD. Membre d'un groupe de travail UNESCO sur hydrologie et états de surface.

## Langues

Anglais : très bon niveau, lu, écrit, parlé (1 year in UK)

Allemand : 9 ans en scolaire, niveau ancien.

Bambara (Dioula) : principale langue du Mali, langue parlée en Côte d'Ivoire, en Guinée et au Burkina Faso : niveau de connaissances moyen, parlé

Wolof : principale langue du Sénégal, niveau de connaissances moyen, parlé

## Formation Permanente

### *Anglais :*

Formation continue annuelle :

Montpellier 1993

Bamako 1995 à 1997

Ouagadougou 2001 et 2002

Formation intensive :

Montpellier 1 semaine 1996

### *SIG Arcinfo-Arcview :*

Formation initiale Montpellier 1 semaine 1999

Formation avancée Montpellier 1 semaine 2000

### *Langage DELPHI 6*

Formation initiale Montpellier 1 semaine 2005

### *Ecole de Physique des Houches :*

Joint meeting WAMP (West African Monsoon Project)/ GT Mousson Africaine/ CATCH : **Atmosphère et hydrologie dans le projet AMMA**. 19-22 Septembre 2001, Les Houches, France.

**Lexique  
des abréviations  
utilisées**



<b>ABN</b>	Autorité du Bassin du Niger (Niamey, <b>Niger</b> )
<b>ACMAD</b>	African Centre of Meteorological Application for Development (Niamey, <b>Niger</b> )
<b>AGRHYMET</b>	Agro-Hydro Meteorological Center (Niamey, <b>Niger</b> )
<b>AISH</b>	Association Internationale des Sciences Hydrologiques
<b>AMMA</b>	Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine
<b>API</b>	Action Programmée Incitative
<b>ASECNA</b>	Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar
<b>ATI</b>	Action Transversale Incitative (IRD)
<b>AVHRR</b>	Advanced Very High Resolution Radiometer
<b>BUMANI</b>	Integrated Water Resources Management in arid/semi-arid regions of Western Africa ( <b>Burkina-Faso–Mali–Niger</b> ) in a context of demographic, agricultural and industrial growth
<b>CAMES</b>	Conseil Africain et Malgache pour l'Enseignement Supérieur
<b>CCF</b>	Centre Culturel Français
<b>CEPMMT</b>	Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (Reading, <i>Angleterre</i> )
<b>CESBIO</b>	Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (UMR, <i>Toulouse</i> )
<b>CIEH</b>	Centre Inter-Africain d'Etudes Hydrauliques (Ouagadougou, <b>Burkina-Faso</b> )
<b>CGIAR</b>	Consultative Group on International Agricultural Research
<b>CILSS</b>	Comité Inter-africain de Lutte contre la Sécheresse au Sahel
<b>CIRAD</b>	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
<b>CNRST</b>	Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (Bamako, <b>Mali</b> )
<b>CORUS</b>	Programme de COopération pour la Recherche Universitaire et Scientifique, MAE
<b>CPEA</b>	Challenge Program Eau et Alimentation (CPWF) du CGIAR
<b>CPWC</b>	Cooperative Program on Water and Climate
<b>CPWF</b>	Challenge Program Water and Food (CPEA en français)
<b>CRC</b>	Centre de Recherche de Climatologie de l'Université de Bourgogne ( <i>Dijon</i> )
<b>CRDI</b>	Centre de Recherches pour le Développement International ( <i>Canada</i> )
<b>CREPA</b>	Centre Régional pour l'Eau Potable et l'Assainissement à faible coût
<b>CRH</b>	Centre de Recherches Hydrologiques (IRGM, Yaoundé, <b>Cameroun</b> )
<b>CRODT</b>	Centre de Recherche Océanographique de Dakar Thiaroye ( <b>Sénégal</b> )
<b>CRU</b>	Climatic Research Unit (University of East Anglia, Norwich, <i>Angleterre</i> )
<b>DGIRH</b>	Direction Générale de l'Inventaire des Ressources Hydriques ( <b>Burkina-Faso</b> )
<b>DIVHA</b>	Dynamiques, Impacts et Valorisations des Hydro-Aménagements (US-IRD, Montpellier)
<b>DNHE</b>	Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie ( <b>Mali</b> )
<b>DSF</b>	Département Soutien et Formation aux Communautés Scientifiques du Sud (IRD)
<b>ECCO-PNRH</b>	Ecosphère Continentale, processus et modélisation. Programme National de Recherche en Hydrologie (SDU)
<b>ECHEL-Eau</b>	Projet « Outils de gestion intégrée des ressources en eau : applications aux bassins du Limpopo, du Mékong et du Niger ». FSP du MAE intégré au CPEA
<b>EIER</b>	Ecole Inter-Etats d'Ingénieurs de l'Équipement Rural (Ouagadougou, <b>Burkina-Faso</b> )
<b>ENI</b>	Ecole Nationale d'Ingénieurs (Bamako, <b>Mali</b> )
<b>ENSO</b>	El Niño Southern Oscillation
<b>EPFL</b>	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne ( <i>Suisse</i> )
<b>EQUANIS</b>	Etude de la qualité des apports du Niger au Sahel (IRD <b>Mali</b> )

<b>ESCD</b>	Echange Scientifique de Courte Durée (bourse IRD)
<b>ETP</b>	Evapotranspiration Potentielle
<b>ETR</b>	Evapotranspiration Réelle
<b>ETSHER</b>	Ecole de Techniciens Supérieurs en Hydraulique pour l'Équipement Rural (Ouagadougou, <b>Burkina-Faso</b> )
<b>FRIEND-AOC</b>	Flow Regimes from International and Experimental Network Data – Afrique de l'Ouest et Centrale (UNESCO)
<b>FSP</b>	Fond de Solidarité Prioritaire (MAE)
<b>G-EAU</b>	Gestion de l'Eau, Acteurs et Usages (UMR <i>Montpellier</i> )
<b>GAC</b>	Global Area Coverage (NOAA)
<b>GCM</b>	Global Circulation Model
<b>GIHREX</b>	Gestion Intégrée, Hydrologie, Ressources Exploitable dans le Delta Intérieur du Niger (IRD <b>Mali</b> )
<b>GIRE</b>	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
<b>GIREN</b>	Gestion Intégrée des Ressources en Eau du fleuve Niger (Bamako, <b>Mali</b> )
<b>GR2M</b>	Global Runoff 2 paramètres Mensuel
<b>GWP</b>	Global Water Partnership
<b>HELP</b>	Hydrology, Environment and Life Policy (UNESCO)
<b>HSM</b>	UMR HydroSciences Montpellier – IRD, CNRS, UM1, UM2
<b>HYCOS-AOC</b>	Hydrological Cycle Observing System – Afrique de l'Ouest et Centrale
<b>ICCE-BF</b>	Impact du changement climatique sur les processus de dégradation de l'environnement dans le Nord du Burkina Faso : Application à l'identification des zones à risque majeur d'érosion et de perte de fertilité ( <b>Burkina-Faso</b> )
<b>IER</b>	Institut d'Économie Rurale ( <b>Mali</b> )
<b>INCO-DEV/FP</b>	International Cooperation – Specific Support Action for Developing Countries / Framework Program for Research and Technological Development
<b>INERA</b>	Institut de l'Environnement et de la Recherche Agricole ( <b>Burkina-Faso</b> )
<b>IPR</b>	Institut Polytechnique Rural (Katibougou, <b>Mali</b> )
<b>IRGM</b>	Institut de Recherches Géologiques et Minières ( <b>Cameroun</b> )
<b>ISFRA</b>	Institut Supérieur de Formation à la Recherche Appliquée ( <b>Mali</b> )
<b>ISRA</b>	Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (Dakar, <b>Sénégal</b> )
<b>IWMI</b>	International Water Management Institute
<b>JEA</b>	Jet d'Est Africain
<b>JET</b>	Jet d'Est Tropical
<b>LPASF</b>	Laboratoire de Physique Atmosphérique Siméon Fongang (UCAD, Dakar, <b>Sénégal</b> )
<b>LECOM</b>	Laboratoire des Eaux Continentales de l'ORSTOM au Mali (IRD, Bamako, <b>Mali</b> )
<b>LOCEAN</b>	Laboratoire d'Océanographie et du Climat, Expérimentations et Approches Numériques (UMR, <i>Paris</i> )
<b>MAE</b>	Ministère des Affaires Étrangères
<b>MES</b>	Matières En Suspension
<b>MOHYCAN</b>	Modélisation Hydrologique Climat et Anthropisation des Grands Cours d'Eau (thème 1, Axe 3, HSM)
<b>NDVI</b>	Normalized Difference Vegetation Index
<b>NEPAD</b>	New Partnership for Africa's Development
<b>NOAA</b>	National Oceanic and Atmospheric Administration
<b>OBHI</b>	Observatoires Hydrologiques et Ingénierie (US IRD, <i>Montpellier</i> )
<b>OIEau</b>	Office International de l'Eau
<b>OMM</b>	Organisation Météorologique Mondiale

<b>OMVS</b>	Organisation de mise en valeur de la vallée du fleuve Sénégal ( <b>Sénégal, Mali, Mauritanie, Guinée</b> )
<b>ONG</b>	Organisation Non Gouvernementale
<b>ORSC</b>	Office de la Recherche Scientifique Coloniale
<b>PEGI-GBF</b>	Programme d'Etude de la Géosphère Intertropicale – Grands Bassins Fluviaux
<b>PIRAT</b>	Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Atlantique Tropical
<b>PHYSICA</b>	Processus Hydrologiques sous Influences Climatiques et Anthropiques (Thème 23, Axe 3, HSM)
<b>PRESAO</b>	Prévision Saisonnière en Afrique de l'Ouest
<b>PUB</b>	Prediction in Ungauged Basins (Programme décennal AISH)
<b>SCAC</b>	Service de Coopération et d'Action Culturelle (MAE)
<b>SIEREM</b>	Système d'Information Environnementale pour les Ressources en Eau et leur Modélisation
<b>TOA</b>	Terre Océan Atmosphère (ancien Département de l'ORSTOM)
<b>TSM</b>	Températures de Surface de la Mer (SST)
<b>UCAD</b>	Université Cheik Anta Diop Dakar ( <b>Sénégal</b> )
<b>UCAM</b>	Université Caddi Ayyad de Marrakech ( <b>Maroc</b> )
<b>UEA</b>	University of East Anglia (Norwich, <i>Angleterre</i> )
<b>UEMAC</b>	Union Economique et Monétaire d'Afrique Centrale
<b>UICN</b>	Union Mondiale pour la Nature
<b>UTIS</b>	Unité de Traitement d'Images Satellitaires (CRODT- Dakar, <b>Sénégal</b> )
<b>VAHYNE</b>	Variabilité Hydrologique et Impacts sur les ressources en Eau
<b>VRE</b>	Variabilité des Ressources en Eau (thème de recherche de FRIEND-AOC)
<b>VSN(A)</b>	Volontaire Service National (Actif)
<b>WBM</b>	Water Balance Model
<b>WHC</b>	Water Holding Capacity
<b>ZITC</b>	Zone InterTropicale de Convergence
<b>ZSP</b>	Zone de Solidarité Prioritaire (MAE)



# **Introduction**

**Ou**

**Intégration dans une  
hydrologie en mutation  
à l'ORSTOM**



Ce mémoire constitue une occasion de témoigner d'un parcours lié à l'originalité du statut de chercheur à l'ORSTOM/IRD, où nous avons une triple tutelle : Recherche, Coopération et Affaires Etrangères.

Pour comprendre comment ma carrière a pris la direction de l'hydroclimatologie, il faut décrire brièvement l'environnement scientifique à l'ORSTOM, en particulier en hydrologie, avant le passage à l'IRD qui ne date que de 1999.

## **Brève histoire de l'hydrologie à l'ORSTOM**

Par l'arrêté du 4 novembre 1943 (paru au J.O. le 5-11-1943) l'Etat crée l'ORSC (Office de la Recherche Scientifique Coloniale) : il sépare alors une "science coloniale" de la "science nationale" (CNRS(a)), avec pour mission l'inventaire scientifique et la mise en valeur économique des colonies. L'ORSC devient l'ORSOM en 1945, puis ORSTOM, et s'il existait déjà plusieurs centaines de stations pluviométriques sur l'ensemble de la zone grâce à la création en 1921-1922 des services météorologiques d'Afrique occidentale et équatoriale et du Congo, la situation était beaucoup moins brillante pour l'information hydrologique : on connaît peu de choses à l'époque sur les véritables caractéristiques hydrologiques des grands fleuves tropicaux, leur régime, l'importance de l'écoulement, les débits de crues ou de basses eaux. Les conditions d'écoulement et l'importance des crues des cours d'eau sahéliens étaient quant à elles totalement inconnues (Olivry et Sircoulon, 1998). D'abord envisagée comme science de l'ingénieur, la collaboration en hydrologie se développe sur de grands projets des services coloniaux des travaux publics, de l'agriculture, de la production électrique, des voies navigables. Une des forces de ce partenariat a été de favoriser un inventaire systématique des ressources en eau et la connaissance hydrologique de base. Une des premières composantes de cette action a été le développement des réseaux hydrologiques de base. Mais aux indépendances, la question de savoir quelle recherche mener à l'ORSTOM paraît jusqu'à un certain point moins importante que l'expatriation et la présence françaises (Waast, 2004). La nécessité pour les états de se doter de structures nationales s'accompagne de la mise en place de nombreux partenariats de coopération, et l'ORSTOM recrute alors beaucoup d'hydrologues, à la fois pour maintenir et développer les réseaux de mesures et les activités à but finalisé, et aussi pour commencer à former les futurs cadres et techniciens des réseaux nationaux. Il faut rappeler la création en 1960 du CIEH, qui va pendant 34 ans favoriser l'émergence et la cohabitation de communautés africaines et africanistes d'hydrologues opérationnels et d'autres plus axés sur la recherche fondamentale.

Les hydrologues sont de 1949 à 1977 dirigés par Jean Rodier, ingénieur en chef d'EDF, reconnu par tous comme le père de l'hydrologie tropicale africaine. Sur tous les terrains des ex-colonies françaises les hydrologues de l'ORSTOM parcourent les bassins-versants, installent les réseaux de mesures et en assurent le suivi et la maintenance, en reprenant parfois pour les plus anciennes, les stations installées par les missionnaires religieux ou les compagnies de navigation dès le début du siècle (Congo à Brazzaville, Niger à Koulikoro, Sénégal à Bakel) ; 1500 stations seront ainsi implantées en zone intertropicale. L'objectif est la connaissance des régimes hydrologiques afin de mettre en valeur les ressources fluviales et en particulier hydro-électriques. Pendant plusieurs décennies les hydrologues de l'ORSTOM vont ainsi sillonner un grand nombre de pays tropicaux et équatoriaux, résidant souvent près de leurs lieux de mesure, dans des conditions de vie très difficiles et sous une discipline stricte. Le budget de l'hydrologie à l'ORSTOM est alors très important. La plupart des barrages qui existent en Afrique subsaharienne francophone aujourd'hui, ainsi que les normes hydrologiques utilisées en construction, ont été définis grâce à ces études. Rodier, puis certains autres « pionniers », jalonnent les travaux de l'ORSTOM de nombreuses publications dont certaines font date : en

1964 l'étude des « régimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'ouest du Congo » publié par l'ORSTOM (Rodier, 1964), les synthèses sur petits bassins versants en 1965 par Rodier et Auvray et en 1972 par Dubreuil *et al.*, et en 1984 Rodier et Roche signent le « répertoire mondial des crues maximum observées » publié par l'IAHS (1984). L'implantation des bassins versants expérimentaux a représenté une vraie nouveauté en France, à côté des réseaux plus classiques. L'ensemble des données acquises a été de nouveau valorisé en 1994 (Nouvelot), dans un « Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique tropicale et équatoriale », puis dans le Bulletin FAO d'irrigation et Drainage 54 (FAO, 1995a), auquel ont largement contribué Nouvelot et Lamachère de l'IRD, ainsi que Rodier.

En 1964 sous la présidence de Guy Camus l'ORSTOM se dote de comités techniques qui supervisent des travaux dont la vocation recherche s'affirme. En hydrologie, la finalité, initialement appliquée (pour fournir les normes hydrologiques nécessaires aux aménageurs), s'enrichit alors d'une approche de recherche fondamentale, basée sur l'étude de petits bassins versants représentatifs, nécessaires à l'étude des mécanismes de formation des crues. La revue Cahiers Hydrologiques, éditée par l'ORSTOM est créée la même année. Mais la recherche finalisée et l'hydrologie opérationnelle sont encore largement dominantes dans les travaux effectués.

A partir du milieu des années 1970 débute un lent retrait de l'ORSTOM en Afrique. Certains pays comme Madagascar, le Maroc ou le Gabon ne désirent plus cette forme de présence française. Dans d'autres pays la gestion des réseaux nationaux est prise en main par des équipes nationales comme au Cameroun dès le début des années 1980. Dès 1976 (Lerique *et al.*) les hydrologues de l'ORSTOM publient un document sur le renforcement des capacités hydrologiques des services nationaux au Sahel. Les premiers hydrologues africains ont souvent réalisé de longs stages auprès de leurs collègues de l'ORSTOM dans différents pays d'Afrique. Le statut de chercheur de l'ORSTOM est jusqu'alors acquis à la suite d'une formation interne à l'ORSTOM, et donc sans lien universitaire autre que le DEA (à partir de 1968) en ce qui concerne en particulier les hydrologues. Au début des années 1980 se met en place une réforme importante du statut des personnels de l'ORSTOM, qui devient un EPST et dont tous les agents deviennent fonctionnaires. L'Institut est refaçonné pour travailler pour le développement, en coopération et sous tutelle également de la recherche. A partir de la réforme mise en place en 1984 les chercheurs de l'IRD ne seront plus recrutés que sur thèse, et les anciens chercheurs seront fortement invités à obtenir aussi ce diplôme.

Jusque dans les années 1980 il n'était pas demandé aux hydrologues de publier dans des grandes revues internationales, l'essentiel de leur travail était résumé dans des rapports de campagne, des études de terrain et des monographies hydrologiques. Ce genre de rapport permettait une parfaite traçabilité des différentes actions menées au fil du temps par des équipes successives sur les mêmes stations hydrologiques ; elle font d'ailleurs souvent défaut aujourd'hui. A partir de la fin des années 1980 la situation avait évolué et publier était souhaitable, en particulier dans les publications éditées par l'ORSTOM comme les Cahiers Hydrologiques, devenus Hydrologie Continentale en 1985, avant d'être intégrés dans la Revue des Sciences de l'Eau en 1996 ; et la Veille Climatique Satellitaire, éditée conjointement avec MétéoFrance, en version bilingue.

L'expulsion en 1989 des agents de l'ORSTOM du centre d'Adiopodoumé en Côte d'Ivoire, une des plus grandes et des plus anciennes implantations de l'ORSTOM outre-mer, annonçait une série d'évènements qui ont accéléré la mutation de l'hydrologie au début des années 1990 : les guerres civiles au Togo, au Congo et en Centrafrique ont été accompagnées par le rapatriement des français et la fin des activités hydrologiques dans ces pays. A la fois conséquence de situations politiques confuses et de choix scientifique de l'ORSTOM, depuis le milieu des années 1990 les hydrologues de l'ORSTOM n'ont plus en charge aucun réseau africain, hormis dans le

cadre de grands programmes ou de convention sur le fleuve Sénégal avec l'OMVS, et sur le fleuve Niger avec le projet EQUANIS/PEGI-GBF jusqu'en 1998.

C'était aussi une époque de réformes à l'ORSTOM. L'audit de l'ORSTOM au début des années 1990 avait abouti à une première ré-organisation de l'ORSTOM en 9 grands programmes pluri-disciplinaires sous la direction du Président Némou. A peine deux ans plus tard l'ORSTOM était divisé en près de 100 unités de recherche mono-disciplinaires, sous la mandature du Président Lazar, qui actait le changement de nom de l'ORSTOM en IRD. La lecture de l'ouvrage de Pierre Dubreuil (2003) « La science hydrologique : du service des colonies à l'aide au développement, essai historique » renseignera en détail le lecteur sur cette période.

La présence de l'IRD aujourd'hui chez nos partenaires est prioritairement associée à des équipes de recherche académiques, d'Universités ou de grandes Ecoles, et l'on constate un éloignement croissant entre les chercheurs et les personnels des services techniques nationaux. Par manque de moyens financiers ces services techniques ne peuvent assurer le fonctionnement des réseaux de mesure nationaux, ce qui accélère l'éloignement des deux communautés dans la plupart des états. Cette pénurie de moyens techniques induit également une dépendance des chercheurs nationaux à des financements extérieurs pour réaliser des mesures, sans référence ni cohérence avec le réseau national, et isolées dans le temps et dans l'espace. Dans certains états il n'y a plus de suivi hydrologique national depuis le départ de l'ORSTOM il y a plus de 20 ans, comme au Gabon, et au Cameroun en partie.

Pour tenter de pallier ces insuffisances, l'ORSTOM, puis l'IRD, sont associés depuis plus de 10 ans avec l'OMM dans le cadre du programme HYCOS-AOC tout d'abord, puis dans ses déclinaisons Niger-HYCOS et Volta-HYCOS, qui ont pour objectif la mise en place d'un réseau minimum permanent de suivi hydrologique dans la sous-région, dans un cadre financier et institutionnel international. Ces travaux ont été précédés au début des années 1990, par une première collaboration de l'ORSTOM à un projet financé par la Banque Mondiale –le Water Assessment- sur un inventaire des ressources en eau. Depuis 12 ans également le programme FRIEND-AOC de l'UNESCO, dans lequel l'ORSTOM, puis l'IRD, joue un rôle prépondérant, a permis l'émergence et la structuration d'une communauté de chercheurs de la sous-région, autour de thèmes de recherche majeurs en hydrologie et climat. Ces deux initiatives HYCOS et FRIEND ont un rôle transversal structurant vis-à-vis des communautés scientifiques et techniques nationales, pesant positivement dans les efforts de recherche nationaux.

## Hydrologie et climat à l'ORSTOM

A la fin des années 1980, à la différence de l'océanographie, la climatologie n'était pas un domaine d'intérêt majeur pour l'ORSTOM, et Philippe Hisard a participé à l'émergence d'une communauté ORSTOM autour de cette discipline quand il a lancé à la fin des années 1980 son « BLOC » -Bulletin de Liaison Océan Climat-. Bien que débuté au sein de l'UR A2 de François Jarrige, l'intégration de chercheurs ayant comme centre d'intérêt le climat et l'atmosphère n'a connu un fort développement qu'à partir du projet HAPEX-Sahel dans le courant des années 1990. L'ASECNA et l'Université de Dakar, en collaboration avec la Météorologie Nationale, avaient pourtant abrité depuis longtemps des météorologues, atmosphériciens et climatologues de renom, qui avaient acquis une connaissance très fine de la circulation atmosphérique d'Afrique de l'Ouest, tels Dhonneur (1985), Leborgne (1996) et Leroux (1983). On ne saurait oublier le rôle structurant qu'à joué durant cette période de transition le Département des Eaux Continentales, sous la Direction de Bernard Pouyaud. Dans son bastion, le Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier, les hydrologues, toutes sensibilités confondues, se sont cotoyés durant de nombreuses années (une douzaine), permettant une connexion forte entre les chercheurs, et un fertile brassage de savoirs. D'une certaine façon, il a été le creuset de nombreuses vocations de

jeunes hydrologues, dont moi-même, un appel à la pluri-disciplinarité, et probablement aussi le germe de la future Maison des Sciences de l'Eau de Montpellier.

Les relations entre la variabilité des pluies et celle du climat en général : vents, humidité, températures de la mer, sont abordées depuis une quinzaine d'années à l'IRD, à travers des initiatives individuelles dans le cadre de participations à des programmes de recherche pluridisciplinaires (HAPEX, GEWEX, etc). Ce sujet a permis le rapprochement de plusieurs communautés : atmosphériciens, climatologues et océanographes, travaillant ensemble, en particulier sur la réalisation et l'analyse de sorties de modèles couplés océan-atmosphère.

L'IRD affiche aujourd'hui la variabilité climatique et ses impacts sur les ressources en eau comme thématique scientifique majeure dans plusieurs UMR, dont l'UMR HydroSciences Montpellier. Depuis sa restructuration en 2003 l'UMR LOCEAN abrite une composante, dirigée par l'IRD, d'études diagnostiques des variations climatiques et de ses impacts sur la santé, l'agriculture et les ressources en eau. La définition d'indicateurs locaux dans le temps et l'espace permet d'aborder la notion de prévisibilité de la qualité globale de la saison des pluies.

Après les deux paroxysmes de sécheresse en Afrique de l'Ouest en 1972/1973 et 1983/1984, il était nécessaire d'étudier les longues chroniques temporelles de pluies et de débits afin d'évaluer l'extension géographique de cette sécheresse et ses caractéristiques : organisation spatiale, limites, récurrences. Ces travaux se sont vus facilités par le rôle d'ensembliser qu'à joué l'ORSTOM dans deux grands projets. Au début des années 1980, l'ORSTOM s'est vu confier une tâche de collecte et de critique des données de pluies journalières de 13 états membres de l'ASECNA, des origines des mesures à 1965, puis jusqu'à 1980, publiées par le CIEH, l'ASECNA et l'ORSTOM ((a) et (b)), puis une tâche d'inventaire des données hydrologiques et pluviométriques existantes jusqu'à 1990 dans le cadre du Water Assessment (1992), financé par la Banque Mondiale. D'autre part le Laboratoire Hydrologique de l'ORSTOM à Montpellier a rassemblé sous forme numérique pendant près de 15 ans les données hydrologiques archivées dans chaque pays par les équipes d'hydrologues de l'ORSTOM, créant une base de données hydrologiques africaine qui contient des données plus ou moins actualisées jusque vers 1995-2000, et dont l'Unité de Service OBHI a hérité aujourd'hui.

La base de données de pluies collectées et valorisées par l'ORSTOM a servi à un grand nombre de projets de recherche en hydrologie et climat, et a permis la réalisation d'une carte des pluies annuelles moyennes en Afrique de l'Ouest et Centrale (L'Hôte et Mahé, 1996). Cette base de données a été pour partie intégrée dans de nombreuses bases internationales et a enrichi par exemple les bases NOAA, CRU, CRC, et d'autres.

Le bilan hydrologique des apports en eaux douces à l'océan atlantique a été rendu possible par la compilation de 40 années de travaux de centaines d'hydrologues français et africains, qui ont permis d'une part l'édition de chroniques de débits journaliers remontant pour certaines à 1902 (Bakel, Sénégal), et d'autre part à l'édition de monographies hydrologiques faisant un point complet de l'hydrologie et du climat sur les bassins. La réforme de l'ORSTOM en EPST en 1984, la modification des missions de l'Institut et le désengagement rapide des tâches de réseau, ont accéléré cette synthèse à la fin des années 1980. Ces bases de données pluies et débits ont été utilisées pour de grands projets hydrologiques sur des grands fleuves internationaux –Niger, Sénégal, Volta, Logone et Lac Tchad, Gambie, fleuves du Cameroun, entre autres.

L'étude des longues séries de débits a permis de développer également des études d'impact du changement climatique, qui s'imposaient afin d'évaluer les répercussions de la sécheresse sur les régimes hydrologiques et les ressources en eau.

La persistance de la sécheresse a fait s'interroger sur la notion de variabilité et de changement climatique. La variabilité de ces régimes met en évidence plusieurs éléments clés pour la compréhension du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant tropical : la variabilité de la répartition spatio-temporelle des pluies sur le bassin, la variabilité du niveau des eaux souterraines, et la variabilité des états de surface liée à celle de l'occupation du sol. Dans ce cas là

également l'expérience de l'ORSTOM a permis de valoriser des travaux anciens de suivi d'états de surface et d'occupation du sol avec des mesures de débits effectuées sur un réseau de petits bassins versants expérimentaux, par l'application de modélisation hydrologique. La synthèse de Casenave et Valentin (1988, 1992) sur les connaissances des conditions du ruissellement en fonction des états de surface et de la couverture végétale est toujours la référence en Afrique de l'Ouest.

## **Intégration, rencontres et chemin à l'ORSTOM**

Quand je démarre mon stage de DEA en 1987 l'ORSTOM est en mutation, mais l'hydrologie reste une activité majeure à l'ORSTOM qui gère encore certains réseaux nationaux. L'océanographie est également une activité majeure, et je vais réaliser mon stage de DEA sous le suivi conjoint d'un hydrologue, Jean Claude Olivry et d'un océanographe, Philippe Hisard.

Ils me proposent un sujet à deux entrées, un bilan hydrologique à l'échelle sous-continentale et une approche d'hydro-climatologie, qui va déterminer la suite de ma carrière : relier hydrologie et températures de surface de la mer pour tenter d'apporter des éléments de réponse aux « anomalies » pluviométriques et hydrologiques qui viennent d'être observées durant les paroxysmes de sécheresse de 1972-73 et 1983-84. Je vais ainsi à la suite de mon DEA partir au CRODT à Dakar comme VSN dans une équipe d'océanographie du département TOA (Terre Océan Atmosphère), sous la responsabilité de Jean Citeau, et participer, modestement, au montage de la première station de réception Météosat africaine en 1988. Jean Citeau me fait participer à ses travaux sur la détermination par satellite des TSM dans l'océan atlantique intertropical. Très intéressé aussi par le climat et l'atmosphère, il me fait alors découvrir les réanalyses du CEPMMT, avec lesquelles je vais travailler durant ma thèse, et qui me permettent de décrire la variabilité atmosphérique, en relation avec la variabilité des pluies et des TSM.

Le sujet de la thèse que je vais développer dans les 3 années suivantes sera une approche de la variabilité hydrologique et pluviométrique sur la façade atlantique de l'Afrique, liée au flux de mousson, ainsi qu'une recherche des causes possibles de cette variabilité à travers les variables atmosphériques et océaniques en relation avec le climat.

Je souhaite ici remercier mes maîtres, Jean-Claude Olivry, Philippe Hisard et Jean Citeau, qui m'ont offert leurs connaissances et leurs hypothèses, que j'ai adoptées en débutant ma carrière. Je souhaite également honorer la mémoire du Professeur Jean Charles Fontes, qui a été mon responsable de DEA et de thèse à l'Université Paris XI, et qui m'a témoigné une grande confiance en m'offrant une bourse de thèse à mon retour de VSN. Je nourris toujours des regrets de ne pas avoir eu le temps de lui témoigner pleinement ma reconnaissance. Il est en effet décédé sur les routes maliennes au retour d'une mission de terrain en 1994, quelques semaines avant que je rejoigne moi-même le Mali en affectation.

J'ai à ce moment là quitté une nouvelle fois la France pour rejoindre mon poste au Mali, où j'ai débuté une nouvelle partie de ma carrière. J'ai eu la grande chance de travailler sur le fleuve Niger, en compagnie de techniciens de l'ORSTOM très expérimentés, André Mahieux et Michel Gréard, et d'un chercheur, Jean-Pierre Bricquet, avec qui j'ai appris l'essentiel de ce que je connais aujourd'hui en hydrologie de terrain. Le programme de recherche développé alors par Jean-Claude Olivry au Mali était basé sur la gestion du réseau hydrologique des stations majeures sur le fleuve Niger jusqu'à l'aval du delta intérieur. Il s'agissait d'une des dernières occasions de vivre cette expérience du travail qui avait été mené pendant des décennies à l'ORSTOM, et je l'ai saisie, au détriment sans doute, et en toute connaissance de cause, d'une certaine production scientifique.

Durant ces années j'ai pu sur le terrain développer des relations de travail mais aussi personnelles et amicales avec des collègues africains, issus de l'Ecole ORSTOM ou de la

recherche académique. Ensuite le programme FRIEND a permis de développer l'expérience relationnelle unique des hydrologues de l' ORSTOM à travers tous les pays de la région.

J'ai alors choisi d'effectuer un nouveau changement d'orientation, qui me permettrait de faire fructifier de façon plus académique mon expérience, en rejoignant pour un an la Climatic Research Unit à Norwich au Royaume-Uni, dirigée alors par Mike Hulme, et dans le cadre de ma nouvelle équipe dirigée par Eric Servat. J'y ai développé avec Declan Conway (Lecturer à la Faculté d'Environnement de l'UEA), mes connaissances sur l'utilisation des sorties de GCM et sur la modélisation hydrologique conceptuelle. A la suite de cette année anglaise, j'ai rejoint l'EIER au Burkina-Faso où j'ai participé au développement du programme FRIEND-AOC, initiative du Programme Hydrologique International de l'UNESCO, dans le cadre du programme VAHYNE dirigé par Eric Servat. J'ai durant ces 4 ans au Burkina-Faso travaillé également sur l'impact des changements d'états de surface sur l'hydrologie sahélienne, en m'aidant de la modélisation hydrologique, sur l'exemple d'une rivière burkinabé.

Je développe depuis mes recherches sur ce sujet, en étendant cette problématique à toute la bande sahélienne et semi-aride d'Afrique de l'Ouest, la plus sensible aux changements climatiques. J'ai gardé également le contact avec l'UEA à Norwich avec qui je développe depuis plusieurs années des relations dans le cadre de travaux de thèse de Sandra Ardoin puis dans celui d'un programme Alliance.

**1**

# **Affectations et parcours scientifique**



## 1.1 Lieux, programmes, structures d'accueil et partenaires successifs

**Formation – Montpellier et Sénégal** – *Hydrologie, océan et atmosphère*. Géologue et géophysicien de formation, à Orsay, j'ai acquis durant mon DEA et ma thèse à l'ORSTOM (inscrit à Orsay sous la responsabilité du Pr. JC Fontes) les bases de connaissances sur l'hydrologie, la climatologie et la météorologie en Afrique intertropicale, sur l'océanographie de l'Atlantique tropical et sur l'utilisation des ré-analyses de modèles de climat (CEPMMT, Reading). J'ai séjourné 1 an et demi au CRODT à Dakar (Sénégal).

Année : **1987**

Structure : Université Paris 11, Orsay, Pr. J.C. Fontes ; Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM **Montpellier**, J.C. Olivry et P. Hisard.

Programme : *DEA* : Hydrologie, Océanographie, Climatologie, Programme *PIRAT*.

Années : **1988/1989**

Structure : Unité de Traitement d'Images Satellitaires (UTIS) du CRODT (Centre de Recherches Océanographiques de Dakar Thiaroye) à **Dakar** (Sénégal), J. Citeau.

Programme : *VSNA*. Océanographie et télédétection de l'Atlantique intertropical et Climatologie de l'Afrique de l'Ouest et Centrale et de l'Atlantique intertropical.– Réception des images Météosat. Températures de surface de la mer. Suivi de la position de la ZITC à partir d'archives NOAA et d'images - Météosat. Utilisation de sorties de modèles de climat.

Partenaires : ISRA (Institut Sénégalais de Recherches Agricoles), ASECNA.

Années : **1989/1992**

Structure : Université Paris 11, Orsay, Pr. J.C. Fontes ; Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM **Montpellier**, J.C. Olivry et CRODT à **Dakar** J. Citeau.

Programme : *Thèse*. Traitement de données hydrologiques, océanographiques et satellitaires (**Météosat**). Critique et analyse statistique des données. **Relations pluies-débits, calcul de bilans hydrologiques. Météorologie et Climatologie tropicale. Océanographie**. Séjour à **Dakar** (UTIS – CRODT) et à Bamako (Hydrologie), programmes *PIRAT* puis *PEGI*.

Partenaires : UTIS/ISRA, Services Nationaux africains, EDF International ; Programme FIRE, Institut des Applications de la Télédétection, CCR, Ispra.

Années : **1992/1993**

Structure : Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM **Montpellier**, UR 2A, J.C. Olivry

Programme : Programmes *PIRAT* et *PEGI-GBF*. Suite de la thèse + **Essais d'une centrale d'acquisition automatique de mesures en hydrologie fluviale**.

Partenaires : UTIS/ISRA, Société AUTEG.

**Mali** – *Hydrologie grands bassins, terrain*. A la suite de mon recrutement à l'ORSTOM j'ai passé plus de 4 années au Mali où j'ai intégré le projet EQUANIS (PEGI-GBF), d'étude de la qualité des apports du Niger au Sahel, apports liquides, solides et dissous. J'ai bénéficié d'une formation de terrain par plusieurs « anciens » de l'ORSTOM, et j'ai acquis une bonne expérience des mesures hydrologiques en régime tropical sur grands et petits bassins, et en particulier sur le fleuve Niger. Parallèlement j'ai participé, sur le terrain et au laboratoire, aux mesures des matières solides et dissoutes, des flux de méthane, de vapeur d'eau, des métaux trace, des poussières atmosphériques (capteur pyramidal, breveté IRD, mis en place dans le réseau IDAF), et aux prélèvements pour les mesures isotopiques de l'eau.

Durant cette période j'ai été sollicité par le programme FRIEND-AOC, coordonné par Eric Servat depuis Abidjan, pour participer au développement de ce réseau régional de recherche en hydrologie, en particulier au Mali. A la suite de la mise en place d'une réforme à l'IRD, j'ai choisi de poursuivre, à partir de 1998 mes activités dans le cadre de l'équipe dirigée par Eric Servat sur l'hydroclimatologie de l'Afrique de l'Ouest et Centrale, et les impacts de la variabilité du climat sur les ressources en eau.

Avant la fin de mon affectation au Mali, dans le cadre pluridisciplinaire d'une nouvelle réforme mise en place alors à l'ORSTOM, j'ai participé au Mali à la rédaction du projet GIHREX (1997-2000), et j'ai en particulier rédigé le volet Hydrologie. Ce projet avait pour objectif la gestion intégrée de l'hydrologie et des ressources exploitables dans le Delta Intérieur du fleuve Niger au Mali. J'ai organisé la première année d'étude de ce volet puis l'ai laissé à mon remplaçant au Mali.

Pour accompagner la mise en place de ce programme, j'ai créé le Laboratoire des Eaux Continentales de l'ORSTOM au Mali (LECOM) avec les collègues hydrologues, biologistes et géographes du projet, afin de mutualiser les compétences et les moyens autour de ce nouveau projet pluridisciplinaire. Durant cette période j'ai également organisé les missions de terrain sur le fleuve Niger, nécessitant la coordination d'importants moyens logistiques.

Années : **1994/1998**

Structure : Laboratoire des Eaux Continentales de l'ORSTOM **Bamako** (Mali), UR 22 (Dynamique, enjeux et usages des hydrosystèmes régionaux), J.C. Olivry puis J.M. Fritsch.

Programme : **EQUANIS/PEGI-GBF, FRIEND-AOC** et **GIHREX**. Etude de la qualité des apports du Niger Supérieur au Sahel. Variabilité des **flux hydriques** et de matières. Variabilité climatique. Variations hydroclimatiques dans le **bassin du Fleuve Niger** : pluies et débits, **tarissements, eaux souterraines. Campagnes de terrain** : jaugeages, mesures de paramètres physico-chimiques et du flux de méthane, prélèvements de **matières en suspension**.

Partenaires : Météorologie malienne, Service de l'Hydraulique, Ecole Nationale d'Ingénieurs, Ecole Normale Supérieure, Centre National de la Recherche Scientifique et Technique, Institut Polytechnique Rural, Institut Supérieur de Formation à la Recherche Appliquée, Université du Mali, Institut d'Economie Rurale.

**Angleterre** – *Modélisation hydrologique, modèles climatiques*. J'ai rejoint en 1998 la Climatic Research Unit (CRU) de l'Université d'East Anglia (UEA), à Norwich (Angleterre), pour démarrer les activités dans ma nouvelle équipe. J'ai mis en place un partenariat avec le CRU, qui se poursuit actuellement, sur l'étude de la variabilité hydroclimatique en Afrique (données historiques et prévisions climatiques). J'ai acquis lors de mon séjour des connaissances en modélisation hydrologique conceptuelle que j'ai appliquées aux rivières d'Afrique de l'Ouest et Centrale. J'ai poursuivi également durant mon séjour en Angleterre la supervision d'activités de recherche au Mali dans le cadre du programme GIHREX.

Année : **1998/1999**

Structure : Climatic Research Unit, University of East Anglia, **Norwich** (UK). UR Modélisation des Ressources en Eau, E. Servat.

Programme : Programme **VAHYNE**. Variabilité hydrologique et **modélisation des ressources en eau**. Modélisation du bilan hydrique des sous bassins du fleuve Niger. **Sensibilité du modèle** aux différents modes de calcul de l'**ETP** et à différentes sources de données de **précipitations**.

Partenaires : DNHE et Météorologie Nationale du Mali, Laboratoire des Eaux Continentales de l'ORSTOM au Mali, Plymouth Marine Laboratory (UK).

**Burkina-Faso** – *Occupation du sol, anthropisation, petits bassins*. Puis j'ai intégré mon poste au Burkina-Faso à l'EIER, Institution avec laquelle l'IRD a coordonné conjointement le thème «Variabilité des Ressources en Eau (VRE)» du programme FRIEND-AOC de l'UNESCO.

Lors de ce séjour de 4 ans j'ai participé au développement du réseau FRIEND-AOC et à l'animation du thème VRE, j'ai développé des recherches sur les changements environnementaux, et en particulier les changements d'états de surface et leur impact sur les régimes hydrologiques, et j'ai initié un programme de recherche conjoint avec l'EIER et les Institutions de recherche burkinabés, le programme ICCE-BF, qui a été intégré et développé dans le cadre du grand programme AMMA, dont il reçoit un financement. J'ai effectué au Burkina une importante activité de formation, au sein de l'Ecole et en soutien à nos activités de recherche. J'ai enfin mis en place un projet de recherche au Cameroun, en partenariat avec nos collègues du Centre de Recherches Hydrologiques de Yaoundé, sur les impacts climatiques et anthropiques sur la variabilité des ressources en eau au Cameroun, et en particulier sur les changements de régimes de débits solides.

Années : **1999/2003**

Structure : EIER - Ecole Inter-Etats d'Ingénieurs de l'Équipement Rural, **Ouagadougou** (Burkina-Faso); UMR HydroSciences Montpellier, E. Servat.

Programme : Programme **VAHYNE**. Analyse de la **Variabilité Hydrologique et Impacts climatiques et anthropiques sur les Ressources en Eau** en Afrique de l'Ouest et Centrale. **Coordination régionale** dans *FRIEND-AOC* UNESCO/PHI VI. **Modélisation** du bilan hydrique mensuel. Liens avec les modifications environnementales.

Partenaires : EIER - Institut National d'Études et de Recherches Agronomiques - CNRST - Univ. Ouagadougou - Direction Générale de l'Inventaire des Ressources Hydrauliques - Météorologie Nationale (Burkina-Faso) ; Univ. Nationale du Bénin - DNH (Bénin) ; Centre de Recherches Hydrologiques/IRGM - Univ. Yaoundé I (Cameroun) ; Centre de Recherche Géographique et de production Cartographique (Congo) ; Institut d'Écologie Tropicale - Institut de Géographie Tropicale - Direction de l'Eau (Côte d'Ivoire) ; Institut de Recherche en Sciences Humaines (Gabon) ; Water Research Institute (Ghana) ; DNH – Météo. Nationale (Guinée) ; DNH – Météo. Nationale – Université - Ecole Nationale d'Ingénieurs - Institut Polytechnique Rural (Mali) ; AGRHYMET - Autorité du Bassin du Niger - (Niger) ; Univ. Cheikh Anta Diop (Sénégal) ; DREM (Tchad) Climatic Research Unit/School of Development Studies/Univ. East Anglia/ Norwich (UK) ; Univ. Lille - Centre de Recherche en Climatologie/Univ. Dijon (France).

**Montpellier** – *Hydrologie régionale, ressources en eau, impacts climatiques et anthropiques*. De retour à Montpellier j'ai pris la Direction de l'équipe VAHYNE et j'ai continué à soutenir les projets camerounais et burkinabés, que j'ai complété par notre participation à un programme au Mali sur l'impact de la culture du coton sur l'environnement : pédologie, hydrologie, chimie et transports de matières.

J'ai mis en place à travers ces trois programmes un dispositif de mesures hydrologiques sur des petits bassins versants sahéliens tout le long de cette bande climatique, du Mali au Cameroun, qui vont être réalisées simultanément durant les années 2005 et 2006, c'est-à-dire durant les années d'observations renforcées du programme AMMA. Pour ce programme AMMA, des observations seront également effectuées en milieu sahélien près de Niamey par une autre équipe de l'IRD. Ces travaux de recherche sur petits bassins-versants sahéliens sont un préalable nécessaire à la compréhension des changements des relations pluie-débit observées depuis 30 ans en Afrique de l'Ouest et au Sahel en particulier.

Ce dispositif de recherche s'appuie sur des équipes de recherche associées au Mali (IPR et ENI), au Burkina-Faso (EIER) et au Cameroun (CRH), qui coordonnent localement la réalisation

de nos activités de recherche, encadrent des doctorants et participent à la recherche de financements. Ce partenariat très étroit n'a été rendu possible que par notre participation au développement du réseau FRIEND-AOC, ciment de la recherche en hydrologie régionale en Afrique de l'Ouest et Centrale.

Années : **2003 à ce jour**

Structure : Laboratoire HydroSciences Montpellier, Maison des Sciences de l'Eau, **Montpellier**.

Programme : Equipe **VAHYNE**. Analyse de la Variabilité Hydrologique et Impacts sur les Ressources en Eau en Afrique de l'Ouest et Centrale. **Ressources en eau, environnement et climat : modélisation hydrologique, flux de matières, changements hydrologiques, anthropisation, occupation du sol, impact du changement climatique**. Responsable de l'équipe VAHYNE. Co-coordination régionale dans *FRIEND-AOC* UNESCO/PHI VI. Participation au programme AMMA.

Partenaires : EIER - Institut National d'Etudes et de Recherches Agronomiques - CNRST - Univ. Ouagadougou - Direction Générale de l'Inventaire des Ressources Hydrauliques - Météorologie Nationale (Burkina-Faso) ; Centre de Recherches Hydrologiques/IRGM - Univ. Yaoundé I (Cameroun) ; DNH – Météo. Nationale – Ecole Nationale d'Ingénieurs - Institut Polytechnique Rural - CIRAD (Mali) ; Université de Nouakchott, Département de Géologie (Mauritanie) ; Université Cheikh Anta Diop, Département de Géologie – Laboratoire de Physique Atmosphérique, Dakar (Sénégal) ; Climatic Research Unit/School of Development Studies/Univ. East Anglia/ Norwich (Angleterre) ; Univ. Lille I - Centre de Recherche en Climatologie/Univ. Dijon (France).

## 1.2 Résumé des travaux

Après les deux paroxysmes de sécheresse en Afrique de l'Ouest en 1972/1973 et 1983/1984, les données de pluies existantes révèlent que les variations enregistrées depuis 1970 ne connaissent pas d'équivalent depuis le début du siècle. Il s'agit d'un changement climatique majeur et sans précédent dans l'histoire enregistrée du climat.

La modification des régimes des pluies sur le pourtour du golfe de Guinée et en Afrique de l'ouest trouve des éléments d'explication dans l'analyse du fonctionnement de la machine océan/atmosphère et de sa variabilité. La variabilité pluviométrique peut être associée à des anomalies dans la répartition ou l'amplitude de certains paramètres climatiques : TSM, JEA, JET, ZITC, anticyclone de Sainte-Hélène. Mes études ne me permettent pas de définir l'origine de ces anomalies, reliées pour une grande part à l'ensemble de la circulation atmosphérique et océanique de la planète, suivant des périodes plus ou moins longues allant de quelques jours (fluctuations de la ZCIT) à quelques années (signal ENSO).

Mais l'analyse des relations entre ces différentes variables permet de décrire deux fonctionnements contrastés de la machine atmosphère/océan aboutissant à des déficits ou des excédents de pluies en Afrique de l'Ouest. La définition d'indicateurs locaux dans le temps et l'espace permet d'aborder la notion de prévisibilité de la qualité globale de la saison des pluies : sèche ou humide.

L'étude des longues séries de débits permet d'évaluer les répercussions de la sécheresse sur les régimes hydrologiques et les ressources en eau. La persistance de la sécheresse fait s'interroger sur la notion de variabilité et de changement climatique.

La ressource en eau de surface est conditionnée par les régimes d'écoulements. L'analyse des bilans hydrologiques de cours d'eau d'Afrique de l'Ouest et Centrale révèle une très grande variabilité des régimes liée à la variabilité des pluies intra et inter-annuelle. On peut la résumer à 3 cas : Afrique équatoriale, Afrique de l'ouest au régime tropical humide, et Afrique sahélienne et semi-désertique. En régime tropical humide on observe une diminution accrue des débits due à un impact retardé et cumulé du déficit de pluie sur le niveau des nappes. En région sahélienne à

sub-désertique l'impact anthropique est perceptible et semble s'ajouter à l'impact climatique pour entraîner une augmentation des coefficients d'écoulement depuis 30 ans. Enfin, en Afrique équatoriale, déficits pluviométriques et hydrologiques sont proportionnels.

Parallèlement à l'étude des longues chroniques de pluies et débits, j'ai étudié l'impact de la variabilité hydroclimatique sur les ressources en eau et les transports de matières dans les rivières. J'ai participé à la caractérisation du régime de transport de MES et matières dissoutes sur le fleuve Niger et ses affluents, et sur sa variabilité en fonction des variations hydrologiques. J'ai également dirigé une étude d'actualisation des connaissances sur le transport des MES sur 6 rivières camerounaises, et sur les relations avec le changement climatique et la déforestation. Dans le but de pouvoir prédire les hauteurs d'eau dans le delta intérieur du Niger en fonction des variations climatiques présumées, j'ai dirigé la réalisation d'un atlas dynamique des relations entre surfaces inondées et hauteurs d'eau aux stations principales du réseau hydrométrique dans le delta intérieur du Niger grâce à l'analyse de 10 années d'images NOAA. J'ai enfin initié et participé à la mise en place d'un protocole d'étude d'impact des changements climatiques sur les ressources en eau de 350 grands bassins versants africains, sur la base de scénarios climatiques réalisés au Laboratoire à partir de sorties du GCM HadCM3, scénario A2, scénario « réaliste », le plus utilisé.

La variabilité des régimes hydrologiques met en évidence plusieurs éléments clés pour la compréhension du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant tropical : la variabilité de la répartition spatio-temporelle des pluies sur le bassin, la variabilité du niveau des eaux souterraines, et la variabilité des états de surface liée à celle de l'occupation du sol. En ce qui concerne les régimes tropicaux humides, à une seule crue annuelle, on montre l'importance des apports souterrains dans l'élaboration de l'hydrogramme annuel et l'impact du déficit prolongé de la pluie sur la baisse du niveau des nappes, grâce au coefficient de tarissement. En milieu sahélien et semi-aride, on suppose que l'augmentation des coefficients d'écoulement provient de la dégradation des états de surface. Les coefficients d'écoulement augmentent naturellement depuis la région de pluies annuelles 700/800 mm (limite sud du Sahel), vers le nord (et également vers le Sud, mais pour d'autres raisons-ETP satisfaite). La diminution des pluies depuis 1970 a eu pour effet de décaler vers le sud les limites climatiques, et ainsi d'augmenter les coefficients d'écoulement des bassins versants de cette région. Il en est résulté une augmentation des écoulements, alors que la pluviométrie a diminué depuis 1970.

Pour mettre en évidence l'importance de ces différents éléments, la modélisation hydrologique est d'une grande utilité. Compte tenu des contraintes liées à l'environnement de travail, les données ne sont mobilisables qu'au pas de temps mensuel pour de grandes surfaces de plusieurs centaines de milliers de km<sup>2</sup> couvrant plusieurs pays. L'objectif final du programme VAHYNE est de proposer des simulations des ressources futures en eaux de surface pour les grands bassins africains. Chaque bassin est modélisé pour obtenir un jeu de paramètres calibrés et validés sur une période historique. La modélisation utilisée est de type conceptuelle semi-distribuée, au pas d'espace du demi degré carré et au pas de temps mensuel. Les modèles utilisés sont de type GR2M et WBM, modifiés pour permettre la comparaison de plusieurs procédures de calage type Rosenbrock ou Nelder et Meade (Simplex), ou imbriquées de type Rosen-Simplex. Ces modèles donnent d'excellents résultats sur les bassins tropicaux humides à une seule crue. Les résultats sont beaucoup moins bons en région sub-équatoriale et équatoriale à deux crues annuelles. Ils sont également moins bons en région sahélienne où les écoulements ne sont significatifs que durant quelques mois par an (4 à 5 mois). Il a donc été nécessaire de chercher un moyen d'améliorer les performances de ces modèles en introduisant des modifications pour prendre en compte dans un premier temps les changements d'états de surface en région sahélienne.

Afin de tester l'hypothèse de l'augmentation des coefficients d'écoulement j'ai modifié la variable d'entrée « capacité en eau du sol » des modèles hydrologiques mensuels type GR2M ou

Water Balance Model. La WHC est habituellement fixée à une seule valeur durant toute la durée de la modélisation. J'ai calculé des chroniques de WHC évolutives dans le temps, pour chaque maille, sur la base d'études diachroniques de l'occupation du sol obtenues par comparaison des états de surface à plusieurs années d'intervalle (photos aériennes et images satellites). Grâce aux mesures de coefficients d'écoulement réalisées par des équipes d'agronomes, pédologues et hydrologues, sur des petits bassins versants représentatifs, j'ai pu attribuer des coefficients d'écoulement moyens pour les principaux types d'occupation du sol, avec une gradation nord-sud de ces valeurs. Les résultats des calibrations et validations des modèles hydrologiques mensuels montrent une amélioration nette des résultats des modèles à partir du fichier de WHC évolutif dans le temps, en milieu sahélien.

Les travaux futurs vont concerner la recherche d'améliorations de la modélisation pour des régions tropicales humides à semi-arides, avec un intérêt accru pour l'intégration de variables dérivées des états de surface, sur des chantiers en cours au Mali et en projet au Maroc.

Depuis 15 ans en Afrique de l'Ouest, ayant vécu dans 3 pays de la région et travaillé dans un grand nombre d'autres, j'ai focalisé mes recherches sur une problématique majeure pour le développement :

**« Décrire, comprendre et prévoir les variations des régimes hydrologiques et des ressources en eau dans un contexte de changement climatique et d'évolution environnementale et anthropique rapide, dans des régions tropicales équatoriales à sub-désertiques ».**

Ma démarche comprend :

- la caractérisation de la variabilité des régimes de pluies et écoulements (solides et liquides), et leurs relations avec l'océan et l'atmosphère ;
- la modélisation des relations pluie/débit à l'aide de modèles de bilans hydrologiques pour des mailles de 0,5° carré ;
- la simulation des régimes hydrologiques au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle suivant les prédictions de pluie et évaporation des scénarios climatiques ;
- l'étude des impacts anthropiques sur l'environnement dans un contexte climatique changeant, et en particulier l'étude des conditions de ruissellement de surface, appréhendées à l'échelle des petits et des grands bassins.

J'ai eu l'occasion au sein des divers programmes auxquels j'ai participé d'aborder plusieurs spécialités liées à l'hydrologie : climatologie, télédétection, océanographie, météorologie et dynamique atmosphérique, géochimie, agronomie et pédologie. J'ai eu l'occasion aussi de développer l'intégration de ma discipline dans un programme pluridisciplinaire au Mali dans le cadre de GIHREX et suis toujours en relation avec des océanographes travaillant sur l'impact des apports en eaux douces sur les zones côtières.

Il est fondamental de travailler de pair avec des spécialistes d'autres disciplines : sciences humaines et sociales, agronomes, pédologues, pour déterminer les clés de lecture de l'environnement en adéquation avec l'échelle des grands bassins versants. La télédétection est aussi utilisée comme complément intégrateur des informations provenant des enquêtes de terrain, et constitue également une source de données spatialisées. Mes travaux les plus récents concernent l'amélioration des modèles hydrologiques par la prise en compte d'indicateurs environnementaux plus développés, en Afrique sub-saharienne et prochainement au Maghreb.

**2**

# **Environnement de mes recherches**



## 2.1 Des projets élaborés et menés en partenariat étroit

Une de mes préoccupations est d'accompagner nos collègues et leurs équipes dans un déroulement de leurs activités de recherche qui leur permette d'une part d'être reconnus dans la communauté scientifique internationale, et d'autre part de répondre à des questions de développement, qu'ils contribuent à identifier.

Les problématiques scientifiques majeures du sous-continent en hydrologie sont évaluées et discutées depuis plus de 10 ans de façon collégiale au sein des différents thèmes de recherche du groupe FRIEND-AOC. HydroSciences Montpellier et l'équipe VAHYNE en particulier, participent à l'initiative FRIEND-AOC depuis son origine, et sont en relation étroite avec les partenaires africains. A HSM nous préparons nos projets en partenariat avec la communauté des hydrologues d'Afrique de l'Ouest, en suivant les recommandations issues des groupes de travail de FRIEND-AOC, et en utilisant également les outils mis à disposition à travers cette initiative : formations collégiales, échanges scientifiques Sud-Sud, ateliers scientifiques, conférences. A travers nos projets communs, nous les accompagnons dans l'encadrement des étudiants, leurs offrons des possibilités de formations continues, les associons à des manifestations internationales et les incitons à publier dans les revues de grande audience. Le Département Soutien et Formation aux communautés scientifiques du Sud de l'IRD nous offre également de précieux outils et financements pour nous accompagner : bourses de thèse, bourses de formation continue et d'échange scientifique de courte durée, soutien à des jeunes équipes de recherche.

J'ai eu l'occasion de collaborer avec de très nombreuses équipes et Institutions africaines au fil de mes affectations dans plusieurs pays. Avant de détailler mes collaborations actives dans les programmes actuels, je rappellerai que de façon officielle durant des programmes antérieurs, j'ai travaillé au Sénégal avec l'ISRA, la Météorologie Nationale et l'ASECNA, en Guinée avec la Direction de l'Hydraulique, au Niger avec AGRHYMET, au Bénin avec l'Université d'Abomey-Calavi, au Mali avec entre autre la Météorologie Nationale, la DNHE, la Direction régionale de l'Hydraulique de Tombouctou, l'IER, et depuis quelques mois avec l'Université Caddi Ayyad de Marrakech.

### 2.1.1 Equipes et partenaires du Sud

avec lesquels j'ai engagé des collaborations, programmes de recherche et des encadrements d'étudiants.

#### Cameroun

Nous avons monté un projet de recherche avec nos collègues du Centre de Recherches Hydrologiques (CRH) de Yaoundé, dépendant de l'Institut de Recherches Géologiques et Minières (IRGM). Ce programme a pour but l'« Analyse de l'impact des changements climatiques et anthropiques sur les régimes hydrologiques et les ressources en eau au Cameroun ». Le projet a reçu un financement de 3 ans de mesures par le SCAC de Yaoundé (2002-2004), pour 6 bassins versants représentant les différents écosystèmes du pays. Nous avons obtenu du DSF une bourse de thèse (2003-2005) pour Gaston Liéno, inscrit à l'Université de Yaoundé I, et une bourse ESCD pour Daniel Sighomnou, Directeur du CRH (2002-2004) durant laquelle il a rédigé sa thèse d'Etat à l'Université de Yaoundé I. L'équipe locale encadre également plusieurs étudiants en maîtrise et DEA, et un en thèse. Elle a obtenu également un crédit de fonctionnement de Jeune Equipe Associée à l'IRD pour 2 ans (2004-2005). J'y suis

intervenir sous forme de missions de terrain, et les thésards ont pu grâce à leurs bourses séjourner dans nos Laboratoires de Ouagadougou et Montpellier pour travailler avec moi. Le CRH coordonne par ailleurs le réseau FRIEND-AOC et abrite également la coordination du thème Qualité des eaux.

## Burkina-Faso

La collaboration avec l'EIER (Ecole Inter-états d'Ingénieurs de l'Équipement Rural), devenue le Groupe des Ecoles EIER-ETSHER (Ingénieurs et techniciens), est ancienne dans l'équipe avec des affectations depuis 1996. L'EIER fait partie des membres fondateurs de FRIEND-AOC et a coordonné pendant 6 ans avec l'équipe VAHYNE le thème Variabilité des Ressources en Eau, et coordonne le thème Ecohydrologie depuis 2 ans. En 2000 et 2001 nous avons eu avec l'EIER une intense activité d'animation et de soutien au réseau de recherche FRIEND-AOC. J'ai incité l'EIER à signer une convention d'association de recherche avec l'UMR HydroSciences Montpellier pour deux chercheurs de l'EIER, Philippe Gineste et Lamine Mar. Nous avons ensuite monté en 2002 un projet de recherche dans le cadre du programme AMMA, dont nous avons la responsabilité conjointe. Ce projet reçoit un financement sur fonds européens AMMA pour la période 2005-2009, et est soutenu par l'EPFL. Nous avons réalisé de nombreux encadrements d'étudiants à Ouagadougou dans le cadre de nos activités : élèves ingénieurs, stagiaires postgrade, mais aussi deux DEA de l'Université Montpellier 2 : un étudiant burkinabé, Pierre Diello, et un étudiant nigérien, Mohamed Hamatan, en préparation de leurs projets de thèse dans le cadre du programme AMMA. Ces deux DEA ont été financés par les SCAC de Niamey et de Ouagadougou. Un troisième DEA a été réalisé à Montpellier en 2004 par un étudiant mauritanien, Mohamed Vilaly, sur financement du SCAC de Nouakchott. Le projet de thèse de Pierre Diello a reçu une bourse de thèse de l'IRD, pour l'étude des relations homme-climat-environnement dans le Sahel burkinabé. Mohamed Hamatan a reçu une bourse IRD pour faire sa thèse au Niger dans le cadre de AMMA avec une autre équipe de l'IRD, et Mohamed Vilaly a reçu une bourse de thèse du gouvernement mauritanien dans le cadre de l'ATI Santé à Dakar. Enfin, nous avons obtenu l'inscription du bassin du Nakambé dans les bassins de référence du programme HELP de l'UNESCO.

## Mali

Au **Mali**, comme pour le projet camerounais et le projet burkinabé, la problématique centrale du programme est **l'étude des interactions homme-environnement**, en particulier au Sahel, dans des milieux où l'équilibre fragile des écosystèmes est modifié depuis 30 ans à la fois par la rupture climatique majeure de 1970, par l'augmentation de la population, par l'évolution rapide des sociétés africaines et des techniques utilisées, et dans le centre du pays par la culture extensive du coton.

Nous collaborons avec l'Institut Polytechnique Rural (IPR) de Katibougou, l'Université de Bamako, le CIRAD et l'Ecole Nationale d'Ingénieurs (ENI) à la co-direction d'un programme de recherche financé par le Ministère des Affaires Étrangères (programme Corus). Le principal objectif du programme Corus-Coton (2004-2006) est l'étude des « *Pratiques de gestion des écosystèmes de savane au Mali et leurs conséquences sur les sols, les eaux et la biodiversité* ». J'organise et coordonne la partie hydrologie du projet, dont je suis responsable, et les aspects pédologie, agronomie et socio-économie sont développés par l'IPR, le CIRAD et l'ENI. Je suis co-encadrant d'un étudiant en thèse, Aboubacar Bengali, qui débute un doctorat à l'ISRA (Université de Bamako) sur le thème des relations entre « changements d'états de surface, pratiques agricoles autour du coton, et perte de fertilité des sols ». Par ailleurs, nous collaborons avec la Direction Nationale de l'Hydraulique et l'Équipe DIVHA (IRD) de l'UMR G-Eau pour la

mise en place du FSP Echel-Eau sur le fleuve Niger, dans le cadre du Challenge Program Water and Food de l'IWMI, qui a pour vocation finale d'étudier les possibilités d'aménagement du fleuve Niger tout en préservant un équilibre entre la qualité de l'eau et des écosystèmes, la disponibilité en eau pour les différents usages et les nécessités du développement.

J'ai signé en 2001, une convention pour Fatogoma Bamba, chercheur de l'ENI associé à l'UMR HydroSciences Montpellier, dans le cadre de la thèse de Sandra Ardoin sur le fleuve Sénégal et de la thèse de Adama Mariko sur l'inondation dans le Delta intérieur.

J'ai été responsable de la thèse de Adama Mariko de 1999 à 2003, après qu'il a bénéficié d'une bourse du SCAC de Bamako pour aller suivre un DEA à Toulouse, dans le cadre du programme GIHREX, dont j'ai rédigé le volet hydrologie. Il a rejoint l'Université Montpellier 2 et le programme VAHYNE ensuite pour sa thèse. L'ensemble de sa formation de DEA et de thèse a été financé par le SCAC de Bamako.

## **Sénégal et Mauritanie**

Le Département de Géologie de l'Université de Nouakchott et le Département de Géologie de l'Université Cheik Anta Diop de Dakar soutiennent la thèse d'un étudiant boursier du gouvernement mauritanien, Mohamed Vilaly, sur les relations entre les changements d'états de surface, les ressources en eau, les activités socio-économiques et la santé (paludisme) en environnement rural du Sahel mauritanien, avec le soutien de l'ATI Santé, pilotée par Jean-François Trape, médecin de l'IRD Dakar. Il est accueilli par le LPASF à l'UCAD. Les changements climatiques ont des répercussions sur les états de surface et l'environnement, sur la répartition de certains vecteurs de maladies (tiques, moustiques) et sur les activités économiques, que le doctorant contribue à étudier par le biais d'enquêtes de terrain (états de surface et épidémiologie), d'analyse de l'évolution de l'occupation du sol par images satellitales, et par étude de chroniques de données climatologiques.

Je participe à l'encadrement d'une deuxième thèse dans ce programme Santé-climat, elle est réalisée par Moussa Mbaye, inscrit à l'Université Paris 7, et accueilli à HydroSciences Montpellier sous bourse IRD du DSF. Elle concerne un environnement urbain, la ville de Saint Louis du Sénégal, et a pour objectif la perception du risque hydrologique par les habitants et l'évolution des pathologies liées à l'eau dans un contexte climatique et hydrologique changeant. Un partenariat important est développé pour cette thèse avec l'Université Gaston Berger de Saint Louis du Sénégal.

Par ailleurs, mes relations avec l'Université Cheik Anta Diop sont déjà anciennes dans le cadre de FRIEND-AOC, et l'UCAD abrite la base de données du réseau FRIEND-AOC ainsi que la coordination du thème Etiage et dynamique des eaux souterraines. J'ai également été sollicité par l'IRD pour suivre la mise en place du Master Eau de l'UCAD en 2006.

## **Maroc**

Je débute une collaboration avec l'Université Caddi Ayyad de Marrakech avec une perspective de développement d'un programme d'étude de l'évolution des ressources en eau par rapport au changement climatique à l'échelle nationale. Je collabore avec l'UMR CESBIO et l'UCAM sur la modélisation hydrologique d'un bassin versant du haut atlas, le bassin de la Rerhaya, pour documenter les connaissances sur l'hydrologie de ces bassins montagneux et la possibilité de leur modélisation. HSM est également sollicité pour participer à la mise en place du Master Eau de l'UCAM. Enfin, j'espère faire redémarrer les activités de FRIEND-Méditerranée à partir de Marrakech et ainsi développer des collaborations avec les partenaires de l'ensemble du Maghreb.

## 2.1.2 Equipes et partenaires du Nord

Je collabore avec Sylvain Bigot anciennement à l'Université de Lille 1, UMR 8141 « Laboratoire de Géographie des milieux anthropisés », et depuis peu à l'Université Joseph Fourier de Grenoble, dans le cadre d'un programme PNRH en démarrage au Mali, pour la préparation de la réponse à l'appel d'offre Echel-Eau sur le fleuve Niger, et sur l'encadrement de Moussa Mbaye.

Dans le cadre de sa thèse, Sandra Ardoin a réalisé un stage au Centre de Recherches de Climatologie, UMR 5220 CNRS, Université de Bourgogne, avec qui j'ai des contacts sur l'analyse de données climatiques depuis de nombreuses années

Dans le cadre de la réponse à l'appel d'offre API AMMA 2005, je réalise avec l'UMR LEGOS à Brest le bilan d'apport en eaux douces à l'océan atlantique pendant les années d'observations renforcées de AMMA (2005-2007).

Enfin, après une année passée à l'Université d'East Anglia, Norwich (Royaume Uni) (1998-1999), j'ai continué à collaborer avec la Climatic Research Unit (Jean Palutikof et David Lister) pour le traitement et l'analyse de bases de données, et avec la Faculté d'Environnement (Declan Conway) dans le cadre d'un programme financé par l'Alliance franco-britannique.

Bien que ma participation dans ce programme soit très modérée, je cite la collaboration avec le CEMAGREF d'Anthony, placée dans le cadre d'un programme financé par le PNRH sur la période 2003-2005, qui avait pour objectif de déterminer les paramètres minimum à considérer pour obtenir une simulation satisfaisante des écoulements, et dans le cadre du programme PUB de l'AISH (Prédiction sur les bassins non jaugés).

## 2.1.3 Participations à des grands programmes

Les programmes auxquels je participe en partenariat sont placés sous l'égide de programmes nationaux ou internationaux.

### Programmes internationaux

#### **FRIEND-AOC (Flow Regimes from International and Experimental Network Data – Afrique de l'Ouest et Centrale)**

Activités de recherche et d'animation au sein du programme depuis 1995 au Mali, puis comme co-coordonateur du thème « Variabilité des Ressources en Eau » depuis fin 1999.

**HELP (Hydrology for the Environment, Life and Policy), UNESCO.** Le bassin versant du Nakambé (ex-Volta Blanche) au Burkina-Faso a été intégré aux bassins de référence du programme HELP, qui encourage les nouvelles approches dans la gestion intégrée des bassins-versants.

#### **AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine)**

Responsable pour l'IRD du programme ICCE-BF au Burkina-Faso, composante burkinabé du programme AMMA pour l'hydrologie de surface. Ancrage de ce projet dans les WP 1.1 (West African monsoon and the global climate), 1.2 (The water cycle), 2.3 (Physical and biological processes over land surfaces) et 3.3 (Water Resources), période 2004-2006.

Responsable d'une action de recherche dans le cadre du WP 2.2 (Oceanic processes)

#### **ALLIANCE**

Responsable du développement d'un programme de recherche de type « Alliance », franco-britannique entre HydroSciences Montpellier et l'Université d'East Anglia (UEA), période 2004-2005.

### **CHALLENGE PROGRAM WATER AND FOOD du Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR).**

Dans le cadre du Fond mobilisateur ECHEL-EAU du Ministère des Affaires Etrangères, pour développer des recherches sur la Gestion intégrée dans les bassins fluviaux du Niger, du Limpopo et du Mékong, en appui au Challenge Program Water and Food coordonné par l'IWMI : développement d'un volet modélisation hydrologique conceptuelle du fleuve Niger par l'équipe VAHYNE, en association avec l'US DIVHA de l'IRD (UMR G-Eau).

### **FP6-INCO DEV**

Participation à une réponse à appel d'offre.

Integrated Water Resources Management in arid/semi-arid regions of Western Africa (Burkina Faso – Mali – Niger) in a context of demographic, agricultural and industrial growth. BUMANI

Participation aux études sur la partie Niger, Komadugu river, Niger/Nigéria.

## **Programmes nationaux**

### **PEGI-GBF (Programme d'Etude de la Géosphère Intertropicale – Grands Bassins Fluviaux ; sous-groupe français de IGBP (International Geosphere Biosphere Program))**

Participation au programme EQUANIS PEGI/GBF de 1993 à 1996, à Montpellier puis à Bamako (Mali).

### **ECCO/PNRH (ECosphère COntinentale, processus et modélisation) / (Programme National de Recherche en Hydrologie),**

Responsable d'un programme financé par le PNRH en 2001 et 2002 (HSM/IRD, LTHE, UEA)

Participant à un programme PNRH en cours (2003-2005) avec le CEMAGREF et l'EIER

Co-rédacteur et participant à un programme accepté au PNRH ECCO-2005/2006 « Intégration de la variabilité spatio-temporelle des pluies et des états de surface dans la modélisation des ressources en eau du fleuve Niger ».

Participant à une lettre d'intention au PNRH ECCO-2005 pour un soutien à une initiative de mutualisation des efforts de recherche français dans le cadre de la décennie PUB de l'AISH (Prédiction sur les bassins non jaugés)

**CORUS – Coton, au Mali.** Le Programme CORUS du Ministère des Affaires Etrangères Français, a été spécialement conçu pour faire émerger des compétences scientifiques dans le cadre d'un partenariat entre des équipes de recherche des pays appartenant à la Zone de Solidarité Prioritaire (ZSP) et françaises. Le programme CORUS-Coton, est réalisé au Mali avec l'IPR, l'ENI et l'Université de Bamako, sur la période 2004-2006.

## **2.2 Formation**

### **2.2.1 Stagiaires encadrés**

J'ai participé depuis 1994 principalement, à l'encadrement de nombreux stagiaires de tous niveaux. Au Mali l'absence d'Université d'une part, et de graves troubles scolaires entraînant plusieurs années blanches d'autre part, n'ont pas permis de trouver un étudiant à placer en thèse pendant mon séjour. Les deux étudiants qui ont débuté une thèse ont arrêté en cours de route pour intégrer des entreprises privées. Et Adama Mariko n'a pu débiter sa thèse que dans le courant de mon affectation au Burkina-Faso. L'ouverture récente de l'Université de Bamako permet de démarrer une thèse en 2004/2005.

Au Mali j'ai effectué des démarches pour organiser un DEA de Sciences de l'Eau, en collaboration avec l'ISFRA, l'ENI et l'ENSUP, mais elles n'ont pas abouti car l'ISFRA n'avait pas à l'époque l'agrément du CAMES (Conseil Africain et Malgache pour l'Enseignement Supérieur).

J'ai été rapporteur des thèses de P. Valimba (Rhodes University, South Africa) et de Daniel Sighomnou (Université Yaoundé 1, Cameroun), et membre du jury de thèse de Adama Mariko (Université Montpellier 2).

Les bourses CFI correspondent à des contrats de formation-insertion de l'IRD mis en place durant les années 1990 pour des période de deux ans pour des chercheurs du Sud déjà en poste dans des administrations locales. Les échanges Sud-Sud Friend sont des bourses d'un mois destinées à des chercheurs du Sud pour effectuer des stages dans d'autres Laboratoires du Sud. Les stages Postgrade sont des bourses de 1 à 2 ans dispensées par l'EPFL et la Coopération Française pour permettre à des jeunes ingénieurs de l'EIER d'effectuer des travaux de recherche après leur diplôme. Les VCI sont des Volontaires Civils à l'International, qui ont remplacé les VSN depuis la fin du service militaire obligatoire, la durée d'un VCI peut aller jusqu'à deux ans.

Dans le tableau 1 je synthétise les formations que j'ai encadrées.

Ingénieur	Thèse	DEA/ DESS	Licence/ Maîtrise	Master 2	DEUG/ BTS	Bourse CFI	Stage Postgrade	Echange Sud / Sud - Friend	VSN-VCI Post doc	Autres	Total	
Nivelet	Picouet <sup>2</sup>	Wotling	Diabaté		Rochard	Bamba	Diello	Soumaguel	Leroux	Form.prof		
Aznar	Ouedraogo <sup>2</sup>	Thareau	Dembélé			Kondé	Hamatan	Dessouassi	Nguyen	Stage 3 <sup>ème</sup>		
Dessouassi	Mariko	Diello	Plouzane					Liéno	Girard	TPE 1 <sup>ère</sup>		
Koné	Ardoin	Hamatan	Denat/Larguier					Sangaré				
Manga	(Valimba) <sup>1</sup>	Vilaly										
Démé	Sighomnou <sup>1</sup>	Rescan										
Dray	<b>Liéno</b> <sup>1</sup>			<b>Trouillet</b>								
Ould	<b>Diello</b>											
Diarra	<b>Bengali</b> <sup>2</sup>											
Kouwonou	<b>Vilaly</b>											
Ndiaye	<b>Mbaye</b>											
Guimard												
Pin												
	<b>13 (8)</b>	<b>11 (9)</b>	<b>6 (3)</b>	<b>4 (2)</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>(2)</b>	<b>(2)</b>	<b>(4)</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>50 (30)</b>

NB : *En cours* ; <sup>1</sup> : Rapport de thèse ; <sup>2</sup> : Encadrement secondaire ; (étudiants du Sud)

### Tableau 1

Synthèse des formations encadrées.

Les 3 stagiaires « **Autres** » sont :

Evaluation des activités d'un groupe d'élèves de première S du Lycée Saint Exupéry à Ouagadougou au Burkina-Faso, en Travaux Personnels Encadrés, sur la qualité de l'eau de boisson à Ouagadougou en 2000.

Encadrement d'une élève de 3<sup>ème</sup> du Collège de la Voie Domitienne du Crès (34) 2004, pour un stage d'une semaine de découverte du monde de la recherche.

Encadrement d'un adulte en stage de réinsertion professionnelle à Montpellier en 2004, pendant un mois, sur un sujet de documentation.

## 2.2.2 Que sont-ils devenus ?

Comme tous les formateurs je pense, j'ai toujours eu le souci du devenir professionnel des étudiants que j'ai encadré. J'ai même accepté que des étudiants africains arrêtent leur thèse ou leur contrat de formation en cours de route afin qu'ils puissent saisir des opportunités d'embauche immédiate, denrées rares en Afrique.

Je reprends la liste de noms du tableau 1 et donne, pour les étudiants dont j'ai pu suivre le déroulement de carrière, les affiliations les plus récentes à ma connaissance.

**Nivelet** : après son diplôme d'ingénieur de l'Ecole Polytechnique de Grenoble, a arrêté sa thèse commencée à l'IRD sur bourse MRT, et est responsable de projet chez Bouygues Telecom

**Dessouassi** : après son diplôme d'ingénieur ENI de Bamako, est retourné au service hydrologique du Bénin où il est devenu responsable opérationnel ; puis il a intégré ABN (Niamey, Niger) où il est responsable opérationnel pour les 9 pays du bassin.

**Démé** : après son diplôme d'ingénieur EIER, a été embauché au CREPA à Dakar (Sénégal).

**Dray** : après son diplôme d'ingénieur Agronomique de Rennes, est partie faire une thèse, toujours en cours, en Australie à Canberra, à l'Australian Research Institute où elle est Research Fellow.

**Ould** : après son diplôme d'ingénieur EIER, a été embauché en Mauritanie au Ministère de l'hydraulique.

**Diarra** : après son diplôme d'ingénieur EIER, a trouvé une bourse pour partir à l'EPFL pendant 1 an suivre une formation postdoctorale.

**Picouet** : vacataire chargée de cours à l'EPFL.

**Ouedraogo** : consultant en bureau d'étude au Burkina-Faso et au Mali.

**Mariko** : Professeur d'hydrogéologie et de géophysique à l'ENI à Bamako, Mali.

**Ardoin** : recrutée sur un poste d'ingénieur d'études à l'IRD.

**Valimba** : chercheur à l'Université de Dar es Salam, Tanzanie

**Sighomnou** : Directeur du Centre de Recherche Hydrologique de Yaoundé, Cameroun ; puis détaché à l'ABN Expert hydrologue pour la mise en place du programme HYCOS-Niger.

**Wotling** : après son DEA a fait une thèse avec l'IRD à Tahiti, et a été après quelques années de contrats, embauché par la Direction Régionale de l'Environnement de Nouvelle Calédonie

**Thareau** : après son DEA, a été contractuelle des Volontaires du Progrès et responsable de projet au Mali pendant plusieurs années.

**Diabaté** : après son diplôme de l'ENI à Bamako a été embauché quelques années à l'ONG Vision Mondiale, puis a été plusieurs années responsable de chantier sur la construction de la ligne haute tension du barrage de Manantali (Sénégal, Mali, Mauritanie).

**Bamba** : après ses contrats de recherche à l'ORSTOM, a été embauché comme Professeur d'hydrologie à l'ENI, Bamako, Mali.

**Kondé** : après son CFI à l'ORSTOM a réintégré le CNRST du Mali.

**Soumaguel** : après son contrat à l'ORSTOM a obtenu une bourse pour une année d'études postgrade à l'EIER de Ouagadougou, puis a été embauché par la Direction Régionale de l'Aménagement et de l'Équipement Rural de Mopti au Mali.

**Leroux** : après son VSNA à l'ORSTOM Bamako, a été embauché par l'IFREMER à Brest.

**Nguyen** : après son VSNA à l'ORSTOM Bamako, a été embauché chez EDF

**Girard** : après son VSNA à l'IRD Ouagadougou, a rejoint son affectation dans la fonction publique et a démarré une thèse avec le CEMAGREF Bordeaux sur l'hydrologie rurale dans les Andes équatoriennes, et a séjourné un an en Equateur.

**Sangaré** : après son stage, a retrouvé son poste d'ingénieur de l'hydraulique en Guinée.

**Rescan** : a trouvé après son DEA un emploi temporaire.

**Pin et Rochard** : pas de nouvelles.

Les autres sont toujours dans les études.

## 2.2.3 Publications des stagiaires de DEA et thèse

### 1994

Wotling G. (1994). Analyse de la variabilité spatio-temporelle des précipitations annuelles liées à la mousson africaine de 1951 à 1989. Application de la méthode du vecteur régional (MVR). Mémoire de *DEA National d'Hydrologie*, option Gestion et Valorisation de l'Eau. ORSTOM - UMII LHM, Montpellier, 121 p.

### 1999

Picouet C. (1999). Géodynamique d'un hydrosystème tropical peu anthropisé : le bassin supérieur du Niger et son delta intérieur. *Thèse Sciences (Hydrologie-Hydrochimie), Université Montpellier 2*, 454 p.

### 2001

Ouédraogo M. (2001). Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau de l'Afrique de l'Ouest – Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale. *Thèse Science de l'eau dans l'environnement continental, Université de Montpellier 2*

### 2002

Diello P. (2002). Relations entre NDVI, pluies et états de surface au Burkina-Faso - cas du bassin du Nakambé. *DEA Science de l'eau dans l'environnement continental, Université de Montpellier 2*.

Hamatan M. (2002). Synthèse et évaluation des prévisions saisonnières en Afrique de l'Ouest. *DEA Science de l'eau dans l'environnement continental, Université de Montpellier 2*.

### 2003

Mariko A. (2003). Caractérisation et Suivi de la Dynamique de l'Inondation et du Couvert Végétal dans le Delta Intérieur du Niger (Mali) par Télédétection. *Thèse Science de l'eau dans l'environnement continental, Université de Montpellier 2*.

### 2004

Ardoin S. (2004). Variabilité hydro-climatologique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne (Logone-Chari, Sénégal, Gambie). *Thèse Science de l'eau dans l'environnement continental, Université de Montpellier 2*.

Sighomnou D. (2004). Variabilité du climat : implication sur les ressources en eau du Cameroun. *Thèse d'Etat, Université de Yaoundé 1*.

Valimba P. (2004). Rainfall variability in southern Africa, its influences on streamflow variations and its relationships to climatic variations. *PhD, Rhodes University, Grahamstown, South Africa*.

Vilaly A. (2004). Télédétection des états de surface au Sahel burkinabé et relations avec l'hydrologie. *DEA Hydrologie Avignon*. MTD/MSE, 3S/HSM.

### 2005

Rescan M. (2005). Prévision des ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale jusqu'en 2099 par application des sorties du modèle d'évolution du climat HadCM3 à un modèle hydrologique. *DEA UM2 Montpellier*.

## 2.2.4 Thèses et DEA en cours

### Thèses

Liéno G. Impact des modifications du climat sur l'Hydrologie et les transports solides de 6 rivières camerounaises. *Université de Yaoundé 1*.

Diello P. Relations homme-climat-environnement dans le Sahel Burkinabé, impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique. *Université Montpellier 2*.

Bengali A. Relations entre utilisation des terres, évolution des surfaces végétales, variabilité des pluies et désertification dans les régions cotonnières au Mali. ISFRA, *Université de Bamako*.

Vilaly A. Impact du changement climatique sur l'occupation du sol et l'hydrologie dans le Sahel mauritanien : relations avec les activités socio-économiques et la santé. *Université Cheikh Anta Diop, Dakar*.

Mbaye M. Analyse de la vulnérabilité des sociétés et des milieux à la variabilité hydroclimatique à Saint Louis du Sénégal et cas particulier des pathologies liées à l'eau. *Université Paris 7*.

## DEA

Trouillet T. Modélisation hydrologique du Bassin versant du Rheraya, Haut Atlas, Marrakech. Mémoire de Master 2, HydroSciences Montpellier, *Université Montpellier 2*.

### 2.2.5 Formations assurées

- Encadrement d'un stage de terrain d'une journée pour les élèves en formation avancée en hydrologie à l'IRD Montpellier, 1993.
- Préparation et animation d'une session de formation au logiciel MVR (Méthode du Vecteur Régional), 2 jours à Abidjan en janvier 1997, dans le cadre de l'UNESCO/FRIEND-AOC.
- Cours de 2 heures à l'EIER en formation professionnelle pour le CEFOC (Centre de Formation Continue) « Apport de la science et de la technique pour la gestion intégrée des ressources en eau », en 2000.
- 20 heures de travaux dirigés en modélisation hydrologique et de démonstration de logiciels hydrologiques à des élèves en formation post-universitaire « Mobilisation des Ressources en Eau » à l'EIER (responsable Lamine Mar), 2000.
- Organisation d'un stage de formation d'une semaine aux SIG appliqués à l'hydrologie pour les hydrologues du réseau FRIEND-AOC, à l'EIER de Ouagadougou (Burkina-Faso), octobre 2001.
- Cours de 3 heures aux DEA d'Hydrologie de Montpellier en janvier 2005 sur : Etats de surface, climat et écoulements au Sahel

## 2.3 Animation et Administration de la Recherche

### 2.3.1 Animation

- Initiateur et co-responsable du Laboratoire des Eaux Continentales de l'Orstom au Mali (LECOM), 1997 et 1998, regroupant des équipes pluridisciplinaires (hydrologie, biologie, géographie).
- Participation au Comité d'organisation d'un colloque de « Sensibilisation des communicateurs aux problèmes d'eau et d'environnement au Mali » à Bamako en mars 1997.
- Correspondant pour l'AIEA à Bamako : échantillonnage des pluies pour analyses isotopiques, 1996-1998.
- Organisateur d'une formation collective sur SIG et Hydrologie et
- Co-organisateur d'un atelier scientifique sur le thème « Variabilité des ressources en eau » à Ouagadougou en octobre 2001, dans le cadre du programme FRIEND-AOC.
- Organisation du Comité de pilotage du programme FRIEND-AOC à Dakar en juin 2002.
- Membre du Comité d'organisation de la conférence ENVIROWATER 2002 à Ouagadougou à l'EIER.
- Responsable de l'équipe VAHYNE de l'UMR Hydrosciences Montpellier depuis janvier 2004.
- Coordinateur de l'Axe 3 de l'UMR Hydrosciences : « Variabilité hydrologique : analyse, mécanismes et impacts sur les ressources en eau » depuis mars 2005.
- Co-animateur du thème « Variabilité des ressources en eau » du programme FRIEND-AOC de l'UNESCO depuis 1999.
- Organisateur d'un Séminaire International (conférence + atelier scientifique) UNESCO/FRIEND à Montpellier en novembre 2005 sur « Impacts climatiques et anthropiques sur la variabilité des ressources en eau » (UNESCO/IRD/AISH).

- Co-organisateur de l'atelier scientifique et du comité de pilotage du groupe FRIEND-AOC en novembre 2005 à Montpellier.
- Co-organisateur, avec l'Université d'East Anglia et le British Council, d'un atelier sur le thème « Climate-Society interactions. Case studies from Africa », à l'adresse des jeunes chercheurs, au British Council à Paris en janvier 2006.

## 2.3.2 Administration

- Membre élu de la Commission Scientifique Sectorielle n°1 de l'IRD, période 2003-2007
- Membre du Comité de Gestion et du Conseil du Laboratoire HydroSciences Montpellier.
- Membre du Comité d'évaluation de l'UMR CESBIO en 2006, pour le quadriennal 2007-2010.
- Représentant de l'IRD au Mali et Directeur de Centre par intérim pendant 2 mois en 1994.
- Mise en place des conventions d'accueil à l'UMR HydroSciences Montpellier des chercheurs associés de l'EIER (Burkina-Faso) et de l'ENI (Mali).
- Co-rédacteur du projet GIHREX au Mali (1997-2000) « *Gestion Intégrée, Hydrologie et Ressources Exploitable dans le Delta Intérieur du Niger* », rédacteur du volet hydrologie.
- Rédacteur et responsable d'un projet PNRH sur « *L'Utilisation des sorties de modèles de GCM en entrée des modèles hydrologiques pour la prévision des ressources en eau à long terme* » (2001-2002).
- Rédacteur et responsable du projet « *Impacts des modifications du Climat sur l'hydrologie et les transports solides au Cameroun* », comprenant la responsabilité scientifique de deux thèses dont une thèse d'état, financées par l'IRD, et le fonctionnement du projet sur 3 ans financé par le MAE (2002-2005).
- Responsable France d'un programme franco-britannique dans le cadre des contrats « Alliance » du British Council et du MAE (Egide), sur « *Description et analyse de la variabilité hydrologique en Afrique au 20<sup>ème</sup> siècle* » (2004-2005).
- Co-rédacteur du projet ICCE-BF « *Impact du changement climatique sur les processus de dégradation de l'environnement dans le Nord du Burkina Faso : Application à l'identification des zones à risque majeur d'érosion et de perte de fertilité* », avec l'EIER de Ouagadougou (composante du programme AMMA), et responsable du projet pour l'IRD, financements IRD (dont une thèse), EPFL, EIER et CEE (2004-2006).
- Co-rédacteur du projet Corus-Coton au Mali « *Pratiques de gestion des écosystèmes de savane au Mali et leurs conséquences sur les sols, les eaux et la biodiversité* », avec l'IPR de Katibougou et le Cirad de Sotuba au Mali,
- Responsable de l'Axe 1 hydrologie et co-responsable d'une thèse, financement MAE (2004-2006).
- Développement d'un volet climat dans le cadre de l'ATI Santé de l'IRD, et d'un projet de thèse à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar « *Impact du changement climatique sur l'occupation du sol et l'hydrologie dans le Sahel mauritanien : relations avec les activités socio-économiques et la santé* » sur financement MAE (2005-2007)
- Responsable du volet « *Bilan des apports fluviaux au golfe de Guinée* » dans le cadre du WP2.2 du programme AMMA concernant « *La compréhension, la caractérisation et l'amélioration des simulations des couches limites océanique et atmosphérique, qui régissent les échanges air-mer et le flux de mousson* », soumis à financement dans le cadre de l'API AMMA (2005-2007).
- Rédacteur du projet MOHYCAN dans le cadre de la prospective scientifique du quadriennal 2007-2010 du Laboratoire HydroSciences Montpellier.
- Rédacteur de la synthèse de l'Axe 3 « *Variabilité Hydrologique : analyse, mécanismes et impacts sur les ressources en eau* » dans le cadre de la prospective scientifique du quadriennal 2007-2010 du Laboratoire HydroSciences Montpellier.

## 2.3.3 Reviewing

Membre du Comité de rédaction de la revue Sud Sciences et Technologie éditée par le groupe des Ecoles EIER-ETSHER.

Relecteur pour plusieurs revues : Hydrological Sciences Journal, Environmental Modelling, Progress in Oceanography, Vertigo, Sud Sciences Technologie, Comptes Rendus Géosciences, Water Resources Research.

## 2.4 Expertise et valorisation

### 2.4.1 Expertise

#### UNESCO - 1995

Réunion du groupe d'experts pour la réalisation du Global Water Assessment « Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World », Chapter 2 : the supply, availability and use of the world's water resources. Présentation à Paris en novembre 1995 des données synthétiques sur les pluies et les écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale.

#### OCDE/Club du Sahel - 1996

A la demande du bureau de Paris de l'OCDE, réalisation d'une synthèse des connaissances en hydroclimatologie pour les pays du CILSS.

Mahé G. (1996). Quelques éléments de réflexion sur l'état et l'évolution des ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Note pour Le Club du Sahel/OCDE, Bamako, 9 p.

#### Sous-traitant pour Hydroconsult International. Barrage de Tossaye - 1997

Participation aux campagnes de terrain sur le site prévu pour le barrage de Tossaye au Mali sur le fleuve Niger. Mesures des débits liquides et solides.

Mahé G. et Dicko-Biga H. (1997). Rapport de mission à Tossaye du 06 au 09 janvier 1997, ORSTOM Bamako, 14 p.

#### UICN - 2002

Participation à une Commission d'experts pour l'élaboration d'un document de travail pour l'UICN sur "Le changement climatique, l'eau et les zones humides en Afrique de l'Ouest.

Mahé G. (2002). Impacts and Vulnerability of the Water/Wetland Resources to Climate Change. In : Climate Change, Water and Wetlands in West Africa: Building linkages for their Integrated Management, (Oyebande L., Amani A., Mahé G., Niang-Diop I., Contributors), IUCN-BRAO Working Paper, 9 p.

#### OMM / UNESCO – 2003-2005

Dans le cadre du World Climate Program – Water (OMM-UNESCO), invité à un atelier d'experts « Hydrologic Sensitivity to Climate Conditions », à Wallingford, décembre 2003. Invité comme expert « Afrique » au comité de pilotage du WCP-Water à Wallingford en juin 2005.

#### SIEE - 2004

Participant à un projet déposé par le groupe SIEE en réponse à l'appel d'offre lancé par l'Autorité du Bassin du Niger (ABN) concernant l'« Etude Préliminaire du Modèle Mathématique du Bassin du Niger ».

#### UNESCO - 2005

Membre d'un groupe d'experts sur les relations entre variabilité climatique, changement d'occupation du sol et hydrologie. Activités prévues sur la période 2005-2009 : ateliers scientifiques, conférences et comités de pilotage.

## 2.4.2 Valorisation

- Thèse publiée par IRD Editions en 1993, et prix Georges Hachette de la Société de Géographie de Paris en 1994.
- Participation aux manifestations du Cinquantenaire de l'ORSTOM, Bamako, 1994.
- Journée Internationale de l'Eau à Bamako en 1995 et 1997 : présentation de « L'état des ressources en eau sur la planète ».
- Exposé des outils informatiques du Laboratoire d'Hydrologie de l'IRD Bamako lors des 3<sup>èmes</sup> Journées Informatiques de Bamako, en mai 1996.
- Publication de la carte des précipitations moyennes annuelles 1951-1989 en Afrique de l'Ouest et Centrale par IRD Editions, et diffusion auprès des ONG, organismes scientifiques, bibliothèques, bailleurs de fonds, services nationaux et Institutions régionales et internationales.
- Organisation conjointe ORSTOM/Association Malienne d'Hydrologie, d'une session spéciale de sensibilisation des communicateurs aux problèmes de l'eau et d'environnement en novembre 1996.
- Animation des Portes ouvertes du LECOM à Bamako en mars 1997.
- Journée d'information FRIEND-AOC au Mali, IRD-ORSTOM Bamako, avril 1997.
- Conférences d'information sur le programme AMMA, Bamako Mali en 2001 et 2002, à destination des acteurs de la recherche et de l'enseignement supérieur.
- Invitation par le Ministère des Affaires Etrangères Français à Bamako pour le Salon International de l'Eau comme en février 2004.
- Réalisation d'un Diaporama de 16 minutes sur le Delta intérieur du Niger avec une sociologue, Marie Laure De Noray, sur financement du Département communication de l'IRD (DIC).
- Invitation par la DIC et le CCF de Bamako pour animer une conférence sur « Le fleuve Niger face au changement climatique et aux aménagements », dans le cadre de la manifestation « L'eau, un besoin vital », à Bamako en janvier 2004.
- Invité à présenter le fleuve Niger aux 8<sup>èmes</sup> rencontres africaines de Montpellier, Mairie de Montpellier, avril 2004.
- Conférence invitée à FRIEND-2006 à Cuba, pour présenter les impacts anthropiques sur les écoulements en Afrique.
- Interview pour des radios, télévisions nationales (Sénégal, Gabon, Mali), et pour des journaux : Le Monde, Le Figaro, La Croix, Sciences et Vie Junior, Jeune Afrique, Afrique Agriculture, Grands Reportages

**3**

# **Publications**



## A. Revue internationale de rang A

- 95-1 Mahé G., Lericque J., Olivry J.C. (1990). L'Ogooué au Gabon. Reconstitution des débits manquants et mise en évidence de variations climatiques à l'équateur. *Hydrologie Continentale*, edn. ORSTOM, Paris, 5, 2 : 105-124.
- 94-1 Mahé G., Delclaux F., Crespy A. (1994). Elaboration d'une chaîne de traitement pluviométrique et application au calcul automatique de lames précipitées (bassin-versant de l'Ogooué au Gabon). *Hydrologie Continentale*, vol 9, n°2, 169-180.
- 95-1 Koffi B., Grégoire J.M., Mahé G., Lacaux J.P. (1995). Remote sensing of bush fires dynamics in Central Africa from 1984 to 1988 : analysis in relation to vegetation and pluviometric regional patterns. *Atmospheric Research*, 39, 179-200.
- 97-1 Bricquet J.P., Bamba F., Mahé G., Touré M., Olivry J.C. (1997). Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique. *Revue des Sciences de l'eau*, 3, 321-337.
- 99-1 Mahé G., Olivry J.C. (1999). Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Series IIa, vol. 328, 621-626.
- 00-1 Mahé G., Olivry J.C., Dessouassi R., Orange D., Bamba F., Servat E. (2000). Relations eaux de surface – eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, Série IIa, 330, 689-692.1997
- 01-1 Laraque A., Mahé G., Orange D., Marieu B. (2001). Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during the twentieth century. *Journal of Hydrology*, 245, 1-4, 104-117.
- 01-2 Mahé G., L'Hôte Y., Olivry J.C., Wotling G. (2001). Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa – 1951-1989. *Hydrological Sciences Journal*, 46, 2, 211-226.
- 02-1 L'Hôte Y., Mahé G., Somé B., Triboulet J.P. (2002). Analysis of a Sahelian annual rainfall index updated from 1896 to 2000 ; the drought still goes on. *Hydrological Sciences Journal*, vol 47, 4, 563-572.
- 03-1 L'Hôte Y., Mahé G., Somé B. (2003). The 1990s rainfall in the Sahel: the third driest decade since the beginning of the century. Reply to discussion. *Hydrological Sciences Journal*, 48, 3, 493-496.
- 03-2 Paturol J.E., Ouédraogo M., Mahé G., Servat E., Dezetter A., Ardoin S. (2003). Influence of the spatialization of data on the modelling of monthly river regimes in West Africa. *Hydrological Sciences Journal*. Volume 48, Number 6, December 2003 : 881-890.
- 03-3 Paturol J.E., Ouédraogo M., Servat E., Mahé G., Dezetter A., Boyer J.F. (2003). The concept of hydropluviometric normal in West and central Africa in a context of climatic variability. *Hydrological Sciences Journal*, 48, 1, 125-137.
- 05-1 Mahé G., Paturol J.E., Servat E., Conway D., Dezetter A. (2005). Impact of land use change on soil water holding capacity and river modelling of the Nakambe River in Burkina-Faso. *Journal of Hydrology*, 300 ; 1-4 ; 33-43.
- 05-2 Diello P., Mahé G., Paturol J.E., Dezetter A., Delclaux F. (2005). Relations indices de végétation pluie au Burkina-Faso : cas du bassin- versant du Nakambé. *Hydrological Sciences Journal*, 50, 2, 207-222.
- 05-3 Liéno G., Mahé G., Olivry J.C., Naah E., Servat E., Sigha-Nkamdjou L., Sighomnou D., Ndam Ngoupayou J., Ekodeck G.E., Paturol J.E. (2005). Régimes des flux des matières solides en suspension au Cameroun : revue et synthèse à l'échelle des principaux écosystèmes ; diversité climatique et actions anthropiques. *Hydrological Sciences Journal*, 50, 1, 111-124.

### Sous-presse

- SP-1 Conway D., Mahé G. (sous-presse). Riverflow modelling in two large river basins : the Parana (subtropical) and the Niger (tropical). *Hydrological Processes*.
- SP-2 Mahé G., Bamba F., Soumaguel A., Orange D., Olivry J.C. (sous-presse). Water losses in the Niger River inner delta: water balance and flooded surfaces. *Hydrological Processes*.

### En révision

- ER-1 Mar, A.L., Gineste P., Hamatan M., Mahé G. (). Modélisation Débit-durée-Fréquence appliquée à des bassins versants de grande taille du Burkina Faso. *Hydrological Sciences Journal*.

ER-2 Mariko A., Mahé G., Orange D., Servat E., Nonguierma A. (). Monitoring of flood propagation into the Niger Inner Delta : Prospects with the Low Resolution NOAA/AVHRR Data. *International Journal of Remote Sensing*.

ER-3 Paturel J.E., Barrau C., Mahé G., Dezetter A., Servat A. (). Impact of Changing Climate on Water Resources in Western and Central Africa. *Hydrological Sciences Journal*.

### **Soumis**

S-1 Citeau J., Gaye A. T., Mahé G., de Felice P. (). Some features of West African climate related to satellite observations of water vapor. *Soumis à Journal of Climate*.

S-2 Liéno G., Mahé G., Servat E., Sighomnou D. (2005). Changes in hydrological regimes of rivers of Equatorial Africa : an impact of climate change to the Equator ? *Soumis à Hydrological Processes*.

S-3 Mahé G., Girard S., New M., Paturel J.E., Cres A., Dezetter A., Servat E. (). Comparison of several rainfall data sources in Burkina Faso and impact on monthly gridded rainfall and river flow simulations. *Soumis à Hydrological Sciences Journal*.

S-4 Paturel J.E., Girard S., Mahé G., Ardoin S., Dezetter A., Servat E. (). Runoff simulation in West Africa: implementation of a spatialized monthly modeling process. *Soumis à Hydrological Sciences Journal*.

## **B. Revues internationales autres avec comité de lecture**

88-1 Citeau J., Bergès J.C., Demarcq H., Mahé G. (1988). The watch of ITCZ migrations over the tropical atlantic ocean as an indicator in drought forecast over Sahelian areas. *Tropical Ocean Atmosphere Newsletter*, n°45 : 1-3.

89-1 Mahé G., Demarcq H., Citeau J. (1989). Evolution des températures de surface de l'upwelling équatorial atlantique de 1964 à 1988. *Veille Climatique Satellitaire*, Ed. ORSTOM-METEO FRANCE, 33, 37-43.

91-1 Mahé G., Olivry J.C. (1991). Changements climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale, du mensuel à l'interannuel. In: Hydrology for the water management of large river basins. F.H.M. Van de Ven, D. Gutknecht, D.P. Loucks & K.A. Salewicz Eds, Congrès AISH, Vienne, Autriche, 13-15 août 1991, *Publication AISH n°201*. 163-172.

93-1 Mahé G., Citeau J. (1993). Relations océan-atmosphère-continent dans l'espace africain de la mousson atlantique. Schéma général et cas particulier de 1984. *Veille Climatique Satellitaire* Ed. ORSTOM-METEO FRANCE, 44, 34:54.

93-2 Olivry J.C., Bricquet J.P., Mahé G. (1993). Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide ?. In : Gladwell J.S. (Ed.) : Hydrology of warm humid regions, 4ème Assemblée AISH, Yokohama, Japon, 13-15 Juillet 1993, *publication AISH n°216*, 67-78.

95-1 Mahé G., Olivry J.C. (1995). Variations des précipitations et des écoulement en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989, *Sécheresse*, n°1, vol 6, 109-117.

95-2 Wotling G., Mahé G., L'Hôte Y., Le Barbé L. (1995). Analyse par les vecteurs régionaux de la variabilité spatio-temporelle des précipitations annuelles liées à la mousson africaine. *Veille Climatique Satellitaire*, 52, 58-73.

96-1 Bricquet J.P., Mahé G., Bamba F., Olivry J.C. (1996). Changements climatiques récents et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali). Conférence à la Mémoire de Jean Rodier : L'Hydrologie Tropicale. Géoscience et outil pour le développement. Mélanges à la mémoire de Jean Rodier (1914-1994). Paris 3-4 mai 1995. *AISH, Publ. 238*. Chevallier P. & Pouyau B. (ed). IAHS, Wallingford (UK), P. 157-166.

97-1 Bricquet J.P., Mahé G., Bamba F., Diarra M., Mahieux A., Des Tureaux T., Orange D., Picouet C., Olivry J.C. (1997). Erosion et transport particulaire par le Niger : du bassin supérieur à l'exutoire du delta intérieur (bilan de cinq années d'observations). *IAHS Publ. n°246*, Regional Hydrology : concepts and models for sustainable water resource management, Proceedings of III<sup>rd</sup> International Conference on FRIEND'97, Postojna, Slovenia, 335-346.

97-2 Orange D., Wesselink A., Mahé G., Feizouré C. (1997). The effects of climate changes on river baseflow and aquifer storage in Central Africa. Proceedings of Rabat Symposium, 5<sup>th</sup> IAHS Assembly, *IAHS Publ. 240*, Sustainability of water ressources under increasing uncertainty, 113-123.

- 98-1 Bricquet J.P., Gourcy L., Mahé G., Orange D., Picouet C., Olivry J.C. (1998). Dissolved matter fluxes in the Niger river's inner Delta. In : Hydrology in the humid tropic environment, Johnson I. & Fernandez Jauregui C.A. (Sci. Ed.), Proc. of the IAHS Symp.. Kingston, Jamaïca, 17-22 Nov. 1996, **IAHS Publ. n° 253**.
- 98-2 Mahé G., Dessouassi R., Cissoko B., Olivry J.C. (1998). Comparaison des fluctuations interannuelles de piézométrie, précipitation et débit sur le bassin versant du Bani a Douna. . In : Servat E., Hugues D., Fritsch J.M. & Hulme M. (Eds) : Water Ressources Variability in Africa during the XX<sup>th</sup> Century. Proceedings de la conférence ABIDJAN'98, ORSTOM/AISH/UNESCO, **Pub. AISH no 252**, 289-295.
- 98-3 Olivry J.C., Bricquet J.P., Mahé G. (1998). Variabilité de la puissance des crues des grands cours d'eau d'Afrique intertropicale et incidence de la baisse des écoulements de base au cours des deux dernières décennies. In : Servat E., Hugues D., Fritsch J.M. & Hulme M. (Eds) : Water Ressources Variability in Africa during the XX<sup>th</sup> Century. Proceedings de la conférence ABIDJAN'98, ORSTOM/AISH/UNESCO, **Pub. AISH no 252**, 189-197.
- 00-1 Paturol J.E., Mahé G. (2000). Bilan de 5 années d'activités du projet FRIEND-AOC. **Sud Sciences et Technologies**. EIER, Ouagadougou, n°5, 55-59.
- 01-1 Ouédraogo M., Paturol J.E., Mahé G., Servat E., Dezetter A., Conway D. (2001). Influence de la nature et de l'origine des données sur la modélisation hydrologique de grands bassins versants en Afrique de l'Ouest. In : Soil-Vegetation-Atmosphere transfer schemes and large-scale hydrological models (Dolman A.J., Hall A.J., Kavvas M.L., Oki T, Pomeroy J.W., Sci. Eds.). Proc. 6<sup>th</sup> IAHS Scientific Assembly, Maastricht, the Netherlands, **Pub. AIHS n° 270**, 209-214.
- 01-2 Sultan B., Servat E., Maley J., Mahé G. (2001). Inter-relations entre les forêts tropicales et la variabilité climatique : une synthèse des études récentes. **Sécheresse**, 12 (4), 221-229.
- 02-1 Girard S, Paturol J.E., Mahé G., Ouattara F, L'Aour A., New M. (2002). Spatialisation des pluies au Burkina Faso : impact de la méthode et de la source des données. **Sud Sciences et Technologies**, EIER, Ouagadougou, 9, 4-11.
- 02-2 Mahé G., Dray A., Paturol J.E., Crès A., Koné F., Manga M., Crès F.N., Djoukam J., Maïga A.H, Ouédraogo M., Conway D., Servat E. (2002). Climatic and anthropogenic impacts on the flow regime of the Nakambe River in Burkina. In : FRIEND 2002 Regional Hydrology : Bridging the gap between research and practice (H. Van Lannen and S. Demuth Sci. Eds.), Proc. Friend Conf., Cape Town, South Africa, 2002, **IAHS Pub. n° 274**, 69-76.
- 02-3 Ouédraogo M., Paturol J.E., Mahé G., Servat E. (2002). Conséquences des déficits pluviométriques observés depuis le début des années 1970 en Afrique de l'Ouest et Centrale : normes hydrologiques, gestion et planification des ressources en eau. In : FRIEND 2002 Regional Hydrology : Bridging the gap between research and practice (H. Van Lannen and S. Demuth Sci. Eds.), Proc. Friend Conf., Cape Town, South Africa, 2002, **IAHS Pub. n° 274**, 149-156.
- 02-4 Paturol J.E., Koukponou P., Ouattara F., L'aour A., Mahé G., Crès F.N., (2002). Variabilité du climat du Burkina Faso au cours de la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle. **Sud Sciences et Technologies**, EIER, Ouagadougou, n° 8, 41-49.
- 02-5 Sangaré S., Mahé G., Paturol J.E., Bangoura Y. (2002). Bilan hydrologique du fleuve Niger en Guinée de 1950 à 2000. **Sud Sciences et Technologies**, EIER, Ouagadougou, 9, 21-33.
- 03-1 Ardoin S., Niel H., Servat E., Dezetter A., Boyer J.F., Mahé G., Paturol J.E. (2003). Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest : caractérisation de la situation de la décennie 1990. In : Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions. (E. Servat, W. Najem, C. Leduc and A. Shakeel Sci. Eds.), Proc. Conf., Montpellier, France, 2003, **IAHS Pub. n° 278**, 223-228.
- 03-2 Dezetter A., Delclaux F., Leconte J. Servat E., Mahé G., Paturol J.E. (2003). Prise en compte de la végétation à l'aide de données NOAA AVHRR dans la modélisation pluie débit en Afrique de l'Ouest. In : Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions. (E. Servat, W. Najem, C. Leduc and A. Shakeel Sci. Eds.), Proc. Conf., Montpellier, France, 2003, **IAHS Pub. n° 278**, 144-150.
- 03-3 Diello P., Paturol J.E., Mahé G. (2003). Approche d'identification d'un réseau climatique pour le suivi des modifications du climat au Burkina Faso. **Sud Sciences et Technologies**, EIER, Ouagadougou, 10, 18-25.
- 03-4 Liéno G., Sighomnou D., Sigha-Nkamdjou L., Mahé G., Ecodeck G.E., Tchoua F. (2003). Système hydrologique du Yaéré (Extrême-Nord Cameroun), changements climatiques et actions anthropiques : conséquences sur le bilan des transferts. In : Hydrology of Mediterranean and Semiarid

- Regions. (E. Servat, W. Najem, C. Leduc and A. Shakeel Sci. Eds.), Proc. Conf., Montpellier, France, 2003, *IAHS Pub. n° 278*, 403-409.
- 03-5 Mahé G., Leduc C., Amani, A., Paturel J.E., Girard S., Servat E., Dezetter A. (2003). Augmentation récente du ruissellement de surface en région soudano-sahélienne et impact sur les ressources en eau. In : Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions. (E. Servat, W. Najem, C. Leduc and A. Shakeel Sci. Eds.), Proc. Conf., Montpellier, France, 2003, *IAHS Pub. n° 278*, 215-222.
- 03-6 Mar, A.L., Gineste P., Hamatan M., Mahé G. (2003). Modélisation Débit-durée-Fréquence appliquée à des bassins versants de grande taille du Burkina Faso. *Sud Sciences et Technologies*, EIER, Ouagadougou, 11, 20-26.
- 03-7 Paturel J.E., Ouédraogo M., Mahé G., Servat E., Dezetter E. (2003). Utilisation de modèles hydrologiques pour évaluer les ressources en eau de surface et leur évolution spatio-temporelle - application à l'Afrique de l'ouest. In : Water Resources Systems, Water availability and global change, Proc. Conf., Sapporo, Japon, 2003, *IAHS Pub. 280*, 117-123.
- 04-1 Hamatan M., Mahé G., Servat E., Paturel J.E., Amani A. (2004). Synthèse et évaluation des prévisions saisonnières en Afrique de l'Ouest. *Sécheresse*, 15, 3, 279-286.
- 05-1 Ardoïn-Bardin S., Dezetter A., Servat E., Mahé G., Paturel J.E., Dieulin C., Casenave L. (2005). Évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau d'Afrique de l'Ouest et Centrale. *AISH Pub.* 296, 194-202.
- 05-2 Liéno G., Mahé G., Servat E., Lubès-Niel H., Olivry J.C., Sighomnou D., Ekodeck G.E., Dezetter A. (2005). Changements des régimes hydrologiques des rivières du sud-Cameroun : un impact du changement climatique en zone équatoriale ? *AISH Pub.* 296, 158-168.
- 05-3 Liéno G., Mahé G., Servat E., Tégofack R., Sahagu J., Nwalal J., Issa, Olivry J.C., Ekodeck G.E. (2005). Transport de matières en suspension au Cameroun dans un contexte hydroclimatique déficitaire. *AISH Pub.* 291, 161-171.
- 05-4 Mahé G., Olivry J.C., Servat E. (2005). Sensibilité des cours d'eau ouest-africains aux changements climatiques et environnementaux : extrêmes et paradoxes. *AISH Pub.*, 296, 169-177.
- 05-5 Sigha-Nkamdjou L., Sighomnou D., Liéno G., Ndam J.R., Bello M., Kamgang R., Ekodeck G.E., Ouafô M.R., Mahe G., Paturel J.E., Servat E. (2005). Impact des modifications climatiques et anthropiques sur les flux de matières de quelques bassins fluviaux du Cameroun. *AISH Pub.* 292, 291-300.

### C. Revue nationale

- 97-1 Mahé G., Bricquet J.P., Soumaguel A., Bamba F., Diabaté M., Diarra M., Henry Des Tureaux T., Kondé C., Leroux J.F., Olivry J.C., Mahieux A., Olivry J.C., Orange D., Picouet C. (1997). Bilan hydrologique du Niger à Koulikoro depuis le début du siècle. *Acta Hydrotechnica* 15/18, Ljubljana, Slovénie, 191-200. LOC Proceedings of oral presentation, Conférence Internationale FRIEND'97, Postojna, Slovenia, Sep.-Oct. 1997.
- 98-1 Bamba F., Diabaté M., Mahé G., Diarra M. (1998). Variabilité hydrologique sur le haut-bassin du fleuve Niger. *Revue malienne de science et de technologie*, 4, 6-22, CNRST, Bamako, Mali.
- 03-1 Ardoïn S., Dezetter A., Servat E., Mahé G., Paturel J.E., Dieulin C., Boyer J.F. (2003). Analyse de la variabilité des ressources en eau en Afrique de l'Ouest sahélienne par modélisation hydrologique à grand pas de temps et d'espace. *Le Journal de l'Eau et de l'Environnement*, ENSH, Blida, Algérie, 5-13.
- 03-2 Mariko A., Mahé G., Servat E. (2003). Les surfaces inondées dans le delta intérieur du fleuve Niger au Mali par NOAA/AVHRR. *Bulletin SFPT*, 172, 61-68.
- 04-1 Mahé G., L'Hôte Y. (2004). Sahel : une sécheresse persistante et un environnement profondément modifié. *La Météorologie*, 8<sup>ème</sup> série, 44, 2-3.

### *En révision*

- Dembélé L., Orange D., Mahé G., Ballo A. (). Synthèse analytique de deux modèles d'inondation du delta intérieur du Niger. *Revue Malienne de Sciences et de Technologies*.

### D. Publications autres

- 88-1 Citeau J., Berges J.C., Demarcq H., Mahé G. (1988). Position de la zone intertropicale de convergence et température de surface de l'océan. *Veille Climatique Satellitaire*, n°21 : 3-7.
- 88-2 Citeau J., Demarcq H., Mahé G., Franc J. (1988). Une nouvelle station est née. *Veille Climatique Satellitaire*, n°25 : 23-29.
- 88-3 Citeau J., Mahé G., Demarcq H. (1988). Position de la zone intertropicale de convergence le long de 28°W. Index de précipitation de Lamb et débit du fleuve Sénégal. *Veille Climatique Satellitaire* n° 22 : 3-5.
- 88-4 Citeau J., Mahé G., Demarcq H. (1988). Position de la zone intertropicale de convergence à 28°W. *Veille Climatique Satellitaire* n° 23 : 3-4.
- 88-5 Citeau J., Mahé G., Demarcq H. (1988). Position de la zone intertropicale de convergence à 28 degrés W. *Veille Climatique Satellitaire* n° 25 : 5-6.
- 88-6 Citeau J., Mahé G., Demarcq H., Marec L. (1988). Position de la zone intertropicale de convergence et observation d'ondes longues et de tourbillons équatoriaux. *Veille Climatique Satellitaire*, n°24 : 3-10.
- 93-1 Mahé G., Delclaux., Crespy A (1993). Chaîne de traitement pluviométrique du Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM. *La Gazette Informatique, ORSTOM*, Montpellier, n°26, 13 p.
- 94-1 Wotling G., Mahé G. (1994). Les données pluviométriques mondiales du fichier G.H.C.N. *La Gazette Informatique, ORSTOM*, Montpellier, n° 29, 4 p.
- 96-1 Mahé G. (1996). Quelques éléments de réflexion sur l'état et l'évolution des ressources en eau en Afrique de l'Ouest. *Note pour Le Club du Sahel/OCDE*, Bamako, 9 p.
- 00-1 Mahé G. (2000). Evolution des ressources en eau sur le bassin du Bani et à Djenné. *Djenné Patrimoine* n°10. Bamako. Mali, p. 6-8.
- 02-1 Mahé G. (2002). Impacts and Vulnerability of the Water/Wetland Resources to Climate Change. In : Climate Change, Water and Wetlands in West Africa: Building linkages for their Integrated Management, (Oyebande L., Amani A., Mahé G., Niang-Diop I., Contributors), *IUCN-BRAO Working Paper*, 9 p.
- 02-2 Mahé G. (2002). Le fleuve Congo et la sécheresse. *Coraf Action*, N°22, 6-7.
- 03-1 Diarra S., Kuper M., Mahé G. (2003). Flood management in the Niger river inland Delta in Mali. *Prospect paper. WMO/GWP Associated Programme on Flood Management*. DNH. Bamako Mali, 25 p.
- 03-2 L'Hôte Y., Mahé G. (2003). Sahel, une sécheresse persistante. *Fiche d'actualité scientifique* n°178. Juin 2003. *IRD*.
- 03-3 Mahé G., Servat E. (2003). Les paradoxes de la sécheresse. *Sciences au Sud*, spécial 2003 : Les méandres de l'Eau. Ed. *IRD*. Paris
- 04-1 Mahé G., Servat E. (2004). Sécheresse, les cours d'eau s'en mêlent. *Coraf Action* n° 30, janvier-mars, p. 5.

## E. Actes de conférences révisés et publiés

- 91-1 Citeau J., Mahé G., Goryl P. (1991). Some elements for understanding and forecast the West African monsoon using Meteosat and ECMWF data. Abstracts of the XVI<sup>th</sup> *Assembly of the EGS*, Wiesbaden, Germany, 22-26 April 1991, Springer Verlag Editions.
- 92-1 Mahé G., L'Hôte Y. (1992). Utilisation de la Méthode du Vecteur Régional pour la description des variations pluviométriques interannuelles en Afrique de l'Ouest et centrale de 1951 à 1989. In : Le Barbé L. & Servat E. (Eds.) : Régionalisation en hydrologie : application au développement. *Huitièmes Journées Hydrologiques de l'ORSTOM*, Montpellier, 22-23 Septembre 1992, ORSTOM Ed., 1995, p. 175-192.
- 95-1 Mahé G. (1995). Modulation annuelle et fluctuations interannuelles des précipitations sur le bassin-versant du Congo. In : Boulègue J. & Olivry J.C. (Eds.) : *Actes du Colloque PEGI* Grands Bassins Fluviaux Péri-Atlantiques : Congo, Niger, Amazone, INSU, CNRS, ORSTOM, 22-24 nov. 1993, Paris, 13-26.
- 95-2 Olivry J.C., Mahé G., Bricquet J.P. (1995). Les études du PEGI sur le bassin du Congo-Zaïre dans le contexte déficitaire des ressources en eau de l'Afrique humide. In : Boulègue J. & Olivry J.C. (Eds.)

: *Actes du Colloque PEGI* Grands Bassins Fluviaux Péri-Atlantiques : Congo, Niger, Amazone, INSU, CNRS, ORSTOM, 22-24 nov. 1993, Paris, 3-12.

- 97-1 Bamba F., Diabaté M., Mahé G., Diarra M. (1997). Bilans hydrologiques pour des affluents majeurs du fleuve Niger : le Bani, le Sankarani, le Tinkisso et le Milo. Atelier Scientifique FRIEND-AOC UNESCO/PHI, Cotonou, 14-15 déc. 1995, *Documents Techniques en Hydrologie, UNESCO PHI-V*, n°16, pp. 65-82.
- 97-2 Bricquet J.P., Bamba F., Mahé G., Touré M. Olivry J.C. (1997). Variabilité des ressources en eau de l'Afrique atlantique. Atelier Scientifique FRIEND-AOC UNESCO/PHI, Cotonou, 14-15 déc. 1995, *Documents Techniques en Hydrologie, UNESCO PHI-V*, n°16, pp. 83-94.
- 02-1 Kuper M., Mullon C., Poncet Y., Benga E., Morand P., Orange D., Mahé G., Arfi R., Bamba F. (2002). La modélisation intégrée d'un écosystème inondable : le cas du delta intérieur du Niger. In : *Séminaire International GIRN-ZIT, Colloques et séminaires, IRD*, 773-798.
- 02-2 Laë R., Mahé G. (2000). Crue, inondation et production halieutique dans le Delta Central du Niger : Un modèle prédictif des captures en poisson. In : *Séminaire International GIRN-ZIT, Colloques et séminaires, IRD*, 865-882,
- 02-3 Mahé G., Bamba F., Orange D., Fofana L., Kuper M., Marieu B., Soumaguel A., Cissé N. (2002). Dynamique hydrologique du delta intérieur du Niger (au Mali). In : *Séminaire International GIRN-ZIT, Colloques et séminaires, IRD*, 179-195.
- 02-4 Mariko A., Mahé G., Orange D., Royer A., Nonguierma A., Amani A., Servat E. (2002). Suivi des zones d'inondation du delta intérieur du Niger : perspectives avec les données basse résolution NOAA/AVHRR. In : *Séminaire International GIRN-ZIT, Colloques et séminaires, IRD*, 231-244.
- 02-5 Orange D., Mahé G., Dembélé L., Diakité C.H., Kuper M., Olivry J.C. (2002). Hydrologie, agro-écologie et superficies d'inondation dans le delta intérieur du Niger. In : *Séminaire International GIRN-ZIT, Colloques et séminaires, IRD*, 209-229.
- 02-6 Picouet C., Orange D., Mahé G., Olivry J.C. (2002). Rôle du delta intérieur du fleuve Niger dans la régulation des bilans de l'eau et de sédiments. In : *Séminaire International GIRN-ZIT, Colloques et séminaires, IRD*, 245-258.

## F Participation à ouvrages

- 91-1 Citeau J., Mahé G., Demarcq H. (1991). Dynamique de la zone intertropicale de convergence et climat des régions sahéliennes. In : Cury P. et Roy C. (Eds) : *Variabilité, instabilité et changement des pêcheries ouest-africaines. ORSTOM ed*, 141-146.
- 91-2 Mahé G. (1991). La variabilité des apports fluviaux au golfe de Guinée utilisée comme indice climatique. In : Cury P. et Roy C. (Eds.) : *Variabilité, instabilité et changement des pêcheries ouest-africaines. ORSTOM ed*, 147-161.
- 97-1 Mahé G., Bamba F., Bricquet J.P., Diabaté M., Diarra M., Leroux J.F., Soumaguel A. (1997). Régionalisation hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale et au Mali. Contribution au Chapitre 2 (Regimes) de *Third General FRIEND Report*, period 1994-1997. Publié par les Presses du CEMAGREF sous la direction de G. Oberlin. 93-95.
- 98-1 Mahé G. (1998). Freshwater supply to the Atlantic Ocean : local and regional variations from Senegal to Angola. In : *Global versus local changes in upwelling systems*. Durand M.H., Cury P., Mendelsohn R., Roy C., Bakun A. & Pauly D. (Eds. Sci.), *ORSTOM Ed.*, 127-138.
- 02-1 Oyebande L., Amani A., Mahé G., Niang-Diop I., (2002). *Climate Change, Water and Wetlands in West Africa: Building linkages for their Integrated Management. IUCN-BRAO Working Paper*. Ouagadougou, Burkina-Faso.
- 04-1 Mahé G., Servat E., Maley J. (2004). Climatic variability including ENSO events (droughts, extreme events). In : *"Forests - Water - People in the Humid Tropics : Past, Present and Future Hydrological Research for Integrated Land and Water Management."* Cambridge University Press, 267-286.

## G. Articles d'interviews pour les journaux

*La Croix* 16 juin 2003 : Le Sahel progresse moins vite. A la Une-Sciences.

*Le Monde* 16 juillet 2003 : Trois décennies de sécheresse persistante au Sahel  
*Le Figaro* 23 juillet 2003 : Désespérante sécheresse au Sahel.  
*Sciences et Vie Junior* n° 173, février 2004 : Sahel, Une sécheresse dont nous sommes responsables ?  
*Jeune Afrique* 11 mai 2004 : Comment sauver le fleuve Niger.  
*Le Monde* 30 novembre 2004 : Trente années de sécheresse au Sahel. Supplément au Monde n° 186<sub>14</sub>.  
*Terre Sauvage*, n°205, mai 2005 : Fleuve Niger, p.14-27, par Raquel Hadida.  
*La Croix* 14 mars 2006 : Le changement climatique aggrave-t-il la sécheresse ? par Marie Verdier.  
*Afrique Agriculture* mars 2006, Agriculture et sécheresse au Sahel, par Yves Topol.

## H. Mémoires

- 86-1 Brière N., Gonzalez De Linares F., Mahé G. (1986). Apport du paléomagnétisme dans l'étude des rotations du nord-est de la Grèce (Sithonia) et en Turquie occidentale (région d'Izmir). Rapport de stage de *Maîtrise de Géologie/Géophysique*. Centre des faibles radioactivités, CNRS, Gif sur Yvette / Département des Sciences de la terre, Université Paris-Sud, Orsay, 79 p.
- 87-1 Mahé G. (1987). Etude de la variabilité des apports hydriques continentaux dans le golfe de Guinée, en liaison avec son hydrologie océanique de surface. Mémoire de *D.E.A. National d'Hydrologie*, filière "Ressources en Eau". Université d'Orsay (Paris XI), Centre ORSTOM de Montpellier. 138 p.
- 93-1 Mahé G. (1993). Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. *Thèse*, Université Paris XI-Orsay, 1992, ORSTOM Editions, Coll. Etudes et Thèse, Paris, 438 p.

## I. Cartes, atlas, annuaires

- 88-1 Citeau J., Demarcq H., Mahé G., Zogbi R. (1988). *Cartes des températures de surface en Atlantique tropicale* élaborées à partir de Météosat-2 pour la période 1982-1984. *Projet CEE-CLI-052-F*. CRODT-ISRA. 9 p. + 26 cartes.
- 94-1 Mahé G., L'Hôte Y. (1994). *Carte des pluies annuelles moyennes en Afrique de l'Ouest* pour la période 1970-1989. Participation à un poster en collaboration avec le Laboratoire d'Etudes Agraires de l'Orstom Montpellier : "L'Afrique de l'Ouest à une saison des pluies, du pasteur sahélien au producteur de coton." In : "Les paysans du monde", *Exposition permanente d'Agropolis Museum. Montpellier*.
- 96-1 L'Hôte Y., Mahé G. (1996). *Afrique de l'Ouest et Centrale, Précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989)*. Echelle 1/6 000 000<sup>ème</sup>. *Collection des cartes ORSTOM*, ORSTOM Ed.
- 96-2 Mahé G. (1996). *Annuaire des précipitations mensuelles et annuelles de la Guinée Konakry* de l'origine des stations à 1995. *ORSTOM Bamako. Projet FRIEND-AOC*, 62 p.
- 96-3 Soumaguel A., Mahé G., Diarra M., Camara A. (1996). *Annuaire des précipitations mensuelles et annuelles de l'origine des stations à 1995 au Mali*. Tome 1 (A à K) 77p., tome 2 (L à Z) 58 p., tome 3 (postes récents ou projets) 22 p. *ORSTOM et Météorologie Nationale du Mali*, Bamako.

## J. Autres conférences et posters

### *Autres conférences*

- 88-1 Citeau J., Demarcq H., Mahé G. (1988). A simple and reliable method for atmospheric effect removal from Météosat IR data in SST extraction. *2ème colloque franco-japonais d'océanographie*. 3-13 octobre 1988, Shimizu, 16 p.
- 89-1 Demarcq H., Citeau J., Mahé G. (1989). Restitution de la température de surface de la mer à partir du satellite Météosat II. In : Instituto Nacional de Meteorologia, Madrid, (Ed.) : *7th Météosat scientific user's meeting*, EUMETSAT, European Organisation for Meteorological Satellites, Darmstadt, 27-30 septembre 1988, 12 p.
- 93-1 Mahé G., Citeau J. (1993). Analyse des variations bimensuelles des situations atmosphériques et océaniques de 1980 à 1987 en Afrique de l'Ouest et centrale. Comparaison avec les variations spatio-

- temporelles de précipitations. *Premier Congrès de la Société Météorologique Africaine*, Nairobi, Fév. 1993, 20 p.
- 96-1 Bamba F., Diabaté M., Mahé G., Diarra M. (1996). Rainfall and runoff decrease of five river basins of the tropical upstream part of the Niger river over the period 1951-1989. In : Roald L.A. (Ed.) : Global hydrological change, *EGS XXI<sup>th</sup> Gen. Ass.*, La Haye, Pays Bas, 6-10 mai 1996, 16 p.
- 96-2 Bamba F., Mahé G., Bricquet J.P. et Olivry J.C. (1996). Changements climatiques et variabilité des ressources en eau des bassins du Haut Niger et de la Cuvette Lacustre. In : Fritsch J.M., Paturel J.E. & Servat E. (Eds) : Réseaux hydrométriques, réseaux télématiques, réseaux scientifiques : nouveaux visages de l'Hydrologie Régionale en Afrique, *XIIèmes Journées Hydrologiques de l'ORSTOM*, Montpellier, CD-Rom ORSTOM, 26 p.
- 96-3 Laraque A., Orange D., Mahé G., Marieu B., Olivry J.C. (1996). Evolution des écoulements sur le versant droit du bassin zaïrois et répercussion sur le régime hydrologique du fleuve. In : *Journées Bultot*, Tropical Climatology Meteorology and Hydrology, Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer, Bruxelles, 22-24 mai 1996, 20 p.
- 96-4 Mahé G. et Orange D. (1996). Climatologie de l'Afrique. Communication orale, *Session spéciale de sensibilisation des communicateurs aux problèmes d'eau et d'environnement*, Ass. Malienne d'Hydrologie et ORSTOM, Bamako, novembre 1996, 20 p.
- 96-5 Olivry J.C., Orange D., Picouet C., Bricquet J.P., Mahé G., Droux J., Laraque A., Fritsch J.M. (1996). Transport particulaire dans le delta central du Niger (bilan de 4 années d'observations). Proceedings des *Journées Scientifiques du GIP-Hydrosystèmes*, Toulouse, mars 1996, 13 p.
- 96-6 Orange D. et Mahé G. (1996). Hydrologie des fleuves et rivières d'Afrique. Communication orale, *Session spéciale de sensibilisation des communicateurs aux problèmes d'eau et d'environnement*, Ass. Malienne d'Hydrologie et ORSTOM, Bamako, novembre 1996, 30 p.
- 97-1 Bamba F., Mahé G. (1997). Variabilité climatique et comportement de la cuvette lacustre du Niger depuis le début du siècle. *Atelier Scientifique* sur le thème : « Variabilité climatique, eau et agriculture - Problèmes de sécurité alimentaire en Afrique sub-saharienne ». ORSTOM, UNESCO, Cotonou, Bénin, 22-23 juillet 1997, 9 p.
- 97-2 Laraque A., Mahé G. (1997). Variações dos regimes pluviométricos e hidrológicos na Africa Central desde o início do século. *XII Simposio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Vitoria (ES), Brésil, 16-20 nov. 97, pp 407-414.
- 99-1 Conway D., Mahé G. (1999). Riverflow modelling in two large river basins : the Parana (subtropical) and the Niger (tropical). . In : Hydrological and Geochemical Processes in large river basins, *Symposium International AISH*, Manaus, Brazil, 16-19 nov. 1999, CD-Rom Manaus'99-HiBAm, 8p.
- 99-2 Mahé G., Bamba F., Soumaguel A., Orange D., Olivry J.C. (1999). Pertes en eau dans le delta intérieur du fleuve Niger : bilan hydrologique et relation avec les surfaces inondées. In : Hydrological and Geochemical Processes in large river basins, *Symposium International AISH*, Manaus, Brazil, 16-19 nov. 1999, CD-Rom Manaus'99-HiBAm, 6p.
- 99-3 Mahé G., Conway D., Bamba F. (1999). Modélisation du bilan hydrique mensuel du bassin du fleuve Niger. *Séminaire Scientifique FRIEND/AOC-ZTH*, Yaoundé, Cameroun, 30 nov.-2 déc. 1999, 8 p, Edn. UNESCO.
- 01-2 Mariko A., Mahé G., Orange D., Servat E., Amani A. (2001). Utilisation de la télédétection NOAA/AVHRR et analyse hydrologique de l'inondation du delta intérieur du Niger (Mali). *Cinquième colloque international sur le « Recours à la télédétection en hydrologie »*. CEMAGREF, Montpellier, 2-5 octobre 2001.
- 01-3 Servat E., Mahé G., Maley J. (2000). Climatic variability including ENSO events (droughts, extreme events). In : Forests - Water - People in the Humid Tropics : Past, Present and Future Hydrological Research for Integrated Land and Water Management. *UNESCO Workshop*, Kuala Lumpur, Malaysia, July 2000.
- 02-1 Diello P., Paturel J.E., Ouattara F., Mahé G. (2002). Identification d'un réseau climatique optimal pour le suivi des modifications du climat au Burkina Faso. *Conférence internationale ENVIROWATER 2002*, Ouagadougou, BurkinaFaso, 5-8 Novembre.
- 02-2 Girard S., Paturel J.E., Mahé G., Ouattara F. (2002). Comparaison de plusieurs sources de données pluviométriques sur le Burkina Faso - impact sur l'estimation des pluies annuelles sur le pays, *ENVIROWATER 2002*, Ouagadougou, Burkina Faso, 5-8 Novembre 2002

- 02-3 Girard S., Paturel J.E., Mahé G., Ouattara F., L'Aour A. (2002). Comparaison de plusieurs sources de données pluviométriques sur le Burkina Faso - impact sur l'estimation des pluies annuelles, *Journée Scientifique EIER-ETSHER*, Ouagadougou, Burkina Faso, 30 mai 2002.
- 02-4 Liéno G., Sighomnou D., Sigha-Nkamdjou L., Mahé G., Ekodeck G.E., Djeuda Tchampta B., Tchoua F. (2002). Impacts des fluctuations climatiques et des activités anthropiques sur le bilan hydrologique et des transports solides dans les Yaérés (Plaine d'inondation dans l'extrême-nord Cameroun). *ENVIROWATER 2002*, Ouagadougou, Burkina Faso, 5-8 Novembre 2002
- 02-5 Liéno G., Mahé G., Sigha-Nkamdjou L., Sighomnou D., Ndam J.R., Kengni L. (2002). Régimes de flux des matières à l'échelle des principaux écosystèmes du Cameroun. *Réunion de coordination du thème « Flux de matières », FRIEND-AOC*, Cotonou, 3-4 mai 2002.
- 02-6 Mahé G., Dray A., Paturel J.E., L'Aour A., Kone F., Manga M., Crès F.N., Djoukam J., Maïga A., Ouédraogo M., Conway D., Servat E. (2002). Impact climatique et anthropique sur le régime hydrologique du Nakambé au Burkina Faso, *Journée Scientifique EIER-ETSHER*, Ouagadougou, Burkina Faso, 30 mai 2002
- 02-7 Mahé G., Paturel J.E., Conway D., Servat E., Ouédraogo M. (2002). Impact of land use change on soil water holding capacity and river modelling of the Nakambe River in Burkina-Faso, *EGS, XXVII Assembly*, Nice, April 2002
- 02-8 Poncet Y., Kuper M., Mullan C., Morand P., Orange D., Mahé G., Benga E. (2002). Modelling a large tropical flooded area : a transdisciplinary approach. *Third International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWER)*. July 22-26, Dresden, Germany.
- 02-9 Sigha-Nkamdjou L., Sighomnou D., Mahé G. (2002). Vers une étude régionale des transferts de matières. *Réunion de coordination du thème « Flux de matières », FRIEND-AOC*, Cotonou, 3-4 mai 2002.
- 03-1 Liéno G., Mahé G., Sigha-Nkamdjou L., Sighomnou D., Ekodeck G.E., Tchoua F. (2003). Régimes de flux de matières solides en suspension à l'échelle des principaux écosystèmes du Cameroun : diversité climatique et actions anthropiques. In : Water Resources Systems global Change, Risk Assessment and Water Management. *Conf., AISH*, Sapporo, Japon, 2003.
- 03-2 Mahé G., Paturel J.E. (2003). Changements climatiques au XXème siècle – cas de l'Afrique de l'Ouest et Centrale. *Atelier de restitution des résultats du groupe VAHYNE*, Ouagadougou – Burkina Faso, 10 juin 2003.
- 03-3 Mariko A., Mahé G., Orange D., Servat E. (2003). Analyse en Composantes Principales des Images NDVI/SPOT4 VEGETATION : Application à l'étude de la variabilité interannuelle de l'inondation dans le Delta intérieur du Niger au Mali de 1998 à 2002. *Colloque AMMA : Analyse Multi-disciplinaire de la Mousson Africaine*, Cotonou, novembre 2003
- 04-1 De Noray M.L., Mahé G. (2004). Le Delta intérieur du fleuve Niger. Diaporama. *Centre Culturel Français de Bamako*, 16 min.
- 04-2 Diello P., Servat E., Mahé G., Paturel J.E. (2004). Interrelations Homme-Climat-Environnement dans le Sahel Burkinabé : impacts sur les ressources en eau, les états de surface et la modélisation hydrologique. *Journées Scientifiques EIER-ETSHER*, Ouagadougou, décembre 2004.
- 04-3 Mahé G. (2004). Le fleuve Niger face aux changements climatiques et aux aménagements humains. Diaporama. Conférence invitée. *Salon International de l'Eau. Bamako*, février 2004.
- 04-4 Mariko A., Mahé G., Servat E. (2004). Impact de la variabilité hydroclimatique sur les surfaces lacustres par NOAA/AVHRR durant la dernière décennie du XX siècle : cas du Delta intérieur du Niger au Mali. *Colloque « Zones lacustres d'Afrique tropicale »*, Ndjamena, 2-4 novembre 2004.
- 04-5 Paturel J.E., Boubacar I., L'Aour A., Boyer J.F., Dieulin C., Rouche N., Ouédraogo M., Ardoin-Bardin S., Dezetter A., Mahé G., Niel H., Servat E. (2004). Développement de grilles pluviométriques mensuelles en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Journées Scientifiques EIER-ETSHER*, Ouagadougou, décembre 2004.
- 04-6 Paturel J.E., Boubacar I., L'Aour A., Mahé G., Niel H., Ardoin-Bardin S., Dezetter A., Servat E., Dieulin C. (2004). Manifestation des changements pluviométriques au cours du XXème siècle en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Journées Scientifiques EIER-ETSHER*, Ouagadougou, décembre 2004.
- 04-7 Yacouba H., Karambiri H., Boubacar I., Mahé G., Paturel J.E., Gautier M., Diello P., Guilliod M., Bassolé J. (2004). Impact du changement climatique sur l'hydrodynamisme et l'érosion des sols dans le

bassin supérieur du Nakambé. *Journées Scientifiques EIER-ETSHER*, Ouagadougou, décembre 2004.

- 05-1 Diello P., Paturol J.E., Mahé G., Karambiri H., Servat E. (2005). Caractérisation de l'évolution de trois classes d'occupation du sol dans le Sahel burkinabé à partir d'une modélisation démographique et d'images satellites : application à la modélisation hydrologique. Communication orale. Abstracts book. *First International AMMA conference*, Dakar.
- 05-2 Karambiri H., Yacouba H., Sanou D., Diello P., Guillod M., Mahé G., Paturol J.E. (2005). Caractérisation de la réponse hydrologique et de l'érosion hydrique d'un petit bassin versant sahélien : bassin versant de Tougou au nord du Burkina-Faso. Communication orale. Abstracts book. *First International AMMA conference*, Dakar.
- 05-3 Mariko A., Mahé G., Servat E. (2005). Impact de la variabilité hydroclimatique sur la dynamique spatio-temporelle de l'inondation en zone lacustre sahélienne par NOAA/AVHRR sur la période 1990-2000 : cas du Delta intérieur du Niger au Mali. Communication orale. Abstracts book. *First International AMMA conference*, Dakar.
- 05-4 Paturol J.E., Casenave L., Servat E., Mahé G., Ardoin S., Dezetter A. (2005). Analyse des prévisions climatiques issues de Modèles de Circulation Générale Atmosphère-Océan et impact sur le pourtour méditerranéen. *Conférence WATMED2*, Ressources en eau en Méditerranée, Marrakech, novembre 2005.
- 05-5 Ardoin-Bardin S., Mahé G. (2005). Evaluation of the impact of climatic changes on the water resources of West and Central Africa. *FRIEND International Seminar*, Montpellier, 22-24 Nov.
- 05-6 Diello P., Mahé G., Paturol J.E., Karambiri H., Servat E. (2005). Diminution des pluies et augmentation des écoulements au Sahel : relation entre hydrologie, dégradation du sol et dynamique de la population. *FRIEND International Seminar*, Montpellier, 22-24 Nov.

### Posters

- 94-1 Olivry J.C., Bricquet J.P., Touré M., Gourcy L., Bamba F., Diarra M., Mahé G., Godeau F. (1994). Hydrological and ecological aspects of the lasting degradation of the water resources in the Sahelian basin of the Niger river. Poster présenté à *l'Assemblée Internationale de la Société Européenne de Géophysique (EGS)*, Grenoble, France, mai 1994.
- 97-1 Bricquet J.P., Bamba F., Mahé G., Touré M., Olivry J.C. (1997). Hydrologie générale et variabilité interannuelle des fleuves et rivières de l'Afrique Atlantique. Poster, *5th AISH Assembly*, Rabat, Maroc, April 23-May 3, 1997.
- 97-2 Bricquet J.P., Mahé G., Olivry J.C., Gourcy L. (1997). Dissolved matter fluxes in the Niger river's inner delta. Poster proceedings, Hydrochemistry, *5th AISH Assembly*, Rabat, Maroc, April 23-May 3, 1997.
- 97-3 Laraque A., Orange D., Marieu B., Mahé G., Olivry J.C. (1997). The spatial and temporal variability of rainfall and hydrological regimes in Central Africa from the beginning of the century up to now. Poster, Sustainability of water resources under increasing uncertainty, *5th IAHS Assembly*, Rabat, Maroc, April 23-May 3, p.5-8.
- 97-4 Mahé G., Bamba F. et Soumaguel A. (1997). Variabilité hydroclimatique sur le bassin du fleuve Niger. Poster, Journée Mondiale de l'Eau, 22 mars 1997, *Portes ouvertes du LECOM*, ORSTOM, Bamako.
- 97-5 Mahé G., Bamba F., Diabaté M., Diarra A., Diarra M. (1997). The reduction of the water resources on upper basins of the Niger river : hydrological balances and analysis of the depletion curves (1951-1989). Poster proceedings, Sustainability of water resources under increasing uncertainty, *5th IAHS Assembly*, Rabat, Maroc, April 23-May 3, p.9-12.
- 97-6 Orange D., J.P. Bricquet, Mahé G. (1997). Transport particulaire dans la cuvette lacustre. Poster, Journée Mondiale de l'Eau, 22 mars 1997, *Portes ouvertes du LECOM*, ORSTOM, Bamako.
- 97-7 Paturol J.E., Servat E., Mahé G., Bricquet J.P., Lubès-Niel H., Olivry J.C. (1997). Variations hydroclimatiques sur le bassin du Niger. Acta Hydrotechnica 15/19, Ljubljana, Slovénie, 169-173. LOC Proceedings of poster presentation, *Conférence Internationale FRIEND'97*, Postojna, Slovenia, Sep.-Oct. 1997.
- 98-1 Orange D., Mahé G. (1998). Variabilité hydropluviométrique d'un bassin tropical humide sous forêt : le cas de l'Uélé. In : Servat E., Hugues D., Fritsch J.M. & Hulme M. (Eds) : Water Resources

Variability in Africa during the XX<sup>th</sup> Century. Poster, *Conférence ABIDJAN'98, ORSTOM/AISH/UNESCO*.

- 00-1 Mahé G., Hisard P. (2000). The coastal drought of Ghana : an analysis of monthly rainfall. Geophysical Research Abstracts, Vol 2, 2000, CD-Rom EGS, *EGS XXV General Assembly*, Nice, France, April 2000.
- 02-1 Blanchet F., Denon K., Diarra D., Mahé G., Paturel J.E. (2002). Possibility of improvement of rice growing under controlled submersion in Mali (Office Riz Segou) using «real time» hydrological data. In : FRIEND 2002 Regional Hydrology : Bridging the gap between research and practice (H. Van Lannen and S. Demuth Sci. Eds.), *Proc. Friend Conf.*, Cape Town, South Africa, CD Poster Paper Proceedings.
- 02-2 Diello P., Paturel J.E., Ouattara F., Mahé G. (2002). Approche d'identification d'un réseau climatique pour le suivi des modifications du climat au Burkina Faso. In : FRIEND 2002 Regional Hydrology : Bridging the gap between research and practice (H. Van Lannen and S. Demuth Sci. Eds.), *Proc. Friend Conf.*, Cape Town, South Africa, CD Poster Paper Proceedings.
- 02-3 Mariko A., Mahé G., Royer A., Orange D., Amani A., Servat E., Nonguierma A., Dezetter A., Nguetora M., Paturel J.E. (2002). Analyse multispectrale des données de basse résolution NOAA/AVHRR appliquée à l'identification des milieux inondés en zone soudano-sahélienne. In : FRIEND 2002 Regional Hydrology : Bridging the gap between research and practice (H. Van Lannen and S. Demuth Sci. Eds.), *Proc. Friend Conf.*, Cape Town, South Africa, CD Poster Paper Proceedings.
- 02-4 Paturel J.E., Ouattara F., Mahé G., Lubes-Niel H., L'Aour A., Servat E. (2002). Evolution du climat au Burkina-Faso au cours de la seconde moitié du XX<sup>ième</sup> siècle. In : FRIEND 2002 Regional Hydrology : Bridging the gap between research and practice (H. Van Lannen and S. Demuth Sci. Eds.), *Proc. Friend Conf.*, Cape Town, South Africa, CD Poster Paper Proceedings.
- 05-1 Mahé G., Rescan M., Dezetter A., Ardoin S., Dieulin C. (2005). Water resources prediction in West and Central Africa for the 21<sup>st</sup> century. Poster. Abstracts book. *First International AMMA conference*, Dakar.

## **K. Rapports, notes, projets**

- 88-1 Mahé G., Olivry J.C., Lérique J. (1988). La variabilité du régime des tributaires du Golfe de Guinée : indice de crises ou de changements climatiques ? In : Olivry J.C. (Ed.) : Géodynamique de l'Hydrosphère Continentale, *Rapport d'activité* de l'UR 107, 1983-1987, 115-121.
- 93-1 Maley J., Mahé G. (1993). *Compte rendu* de l'Atelier Scientifique « Séries climatiques récentes de l'Afrique Centrale atlantique (Cameroun, Gabon, Congo) », Programme ECOFIT. 2-3 juin 1993, ORSTOM Montpellier, 8 p.
- 93-2 Olivry J.C., Mahé G. (1993). Mise au point d'une station automatique de mesure de paramètres de la qualité des eaux. *Compte-rendu de fin d'étude* d'une recherche financée par le Ministère de la Recherche et de la Technologie. Décision d'Aide n° 89.L.0215. ORSTOM, Montpellier, 90 p. + annexes.
- 94-1 Mahé G. (1994). Inventaire des stations utilisées dans la chaîne de traitement pluviométrique du Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM Montpellier, *Note interne*, ORSTOM, Montpellier, 89 p.
- 94-2 Mahieux A., Mahé G., Koumaré K. (1994). *Rapport de mission* Delta Central 03/15 Octobre 1994. Programme Equanis/PEGI-GBF, ORSTOM Bamako, 37 p.
- 95-1 Mahé G., Henry Des Tureaux T., Koumaré K. (1995). *Rapport de mission* Delta Central 03/17 Mai 1995. Programme Equanis/PEGI-GBF, ORSTOM Bamako, 48 p.
- 96-1 Leroux J.F., Droux J.P., Mahé G. (1996). Pluviométrie 1994/1995 de trois bassins versants maliens : Dounfing, Bélékoni et Djitiko. *Rapport interne*, Laboratoire d'Hydrologie, ORSTOM, Bamako, 66 p.
- 96-2 Mahé G., Henry Des Tureaux T., Koumaré K. (1996). *Rapport de mission* Delta Central 30-01/16-02 1996. Programme Equanis/PEGI-GBF, ORSTOM Bamako 49 p.
- 97-1 Kondé C., Orange D., Mahé G. et Gourcy L. (1997). Première quantification des flux de méthane produits dans le delta intérieur du fleuve Niger. *Rapport interne*, ORSTOM, Laboratoire d'Hydrologie Bamako, CNRST, 25 p.

- 97-2 Mahé G. et Dicko-Biga H. (1997). **Rapport de mission** à Tossaye du 06 au 09 janvier 1997, ORSTOM Bamako, 14 p.
- 97-3 Mahé G. et Equipe Eaux Continentales (1997). **Compte-rendu** de la première réunion du Laboratoire des Eaux Continentales de l'ORSTOM au Mali : bilan 1996, état d'avancement des activités et des projets et bibliographie 1996/1997. LECOM, ORSTOM Bamako, Mali, 21 février 1997, 28 p.
- 97-4 Mahé G., Marieu B., Picouet C. (1997). **Rapport de mission** Delta Intérieur du fleuve Niger. 8 au 25 août. ORSTOM, LECOM, 22 p.
- 97-5 Mahé G., Orange D. (1997). **Fiche projet** « Dynamique et Modélisation de l'Inondation dans le Delta Intérieur du Niger », groupe CERDIN, Bamako, 6p.
- 97-6 Marieu B., Mahé G. (1997). **Rapport de mission** Douana-Macina-Mopti, du 13 au 17 novembre. ORSTOM/ Lecom, Bamako, 7 p.
- 97-7 Orange D., Arfi R., Bénech V., Mahé G., Morand P., Olivry J.C., Poncet Y. (1997). **Projet GIHREX**, Gestion intégrée, hydrologie, ressources et systèmes d'exploitation du Delta Intérieur du Niger. Doc. de projet, programme 621/UR2 « Grands Bassins Tropicaux : Dynamiques et Usages », ORSTOM, Paris.
- 98-1 Marieu B., Bamba F., Bricquet J.P., Cissé N., Gréard M., Henry Des Tureaux T., Mahé G., Mahieux A., Olivry J.C., Orange D., Picouet C., Sidibé M., Touré M. (1998). Actualisation des données hydrométriques du fleuve Niger au Mali pour EQUANIS. **Rapport final EQUANIS. Programme PEGI/GBF/EQUANIS**, ORSTOM/LECOM-CNRST-DNHE, Bamako, Mali, 82 p.
- 99-1 Bamba F., Fofana M.L., Mahé G. (1999). Spatialisation des données hydrologiques dans le Delta Intérieur du Niger. **Rapport d'étude, projet Gihrex**, IRD-ENI-Météorologie Nationale, IRD Bamako, 61 p.
- 02-1 CNRST/EIER-ETSHER/Univ. Ouagadougou/DIRH/DMN (2002). **Projet** « Impact du changement climatique sur les processus de dégradation de l'environnement dans le Nord du Burkina Faso : Application à l'identification des zones à risque majeur d'érosion et de perte de fertilité ». **Projet au Programme AMMA** d'Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine.
- 03-1 Diello P., Paturel J.E., Mahé G. (2003). Approche d'identification d'un réseau climatique pour le suivi des modifications du climat au Burkina Faso. **Sud Sciences et Technologies**, EIER, Ouagadougou, 10, 18-25.
- 04-1 Mahé G. (2004). **Rapport d'activités de l'Equipe VAHYNE**, HydroSciences Montpellier.
- 05-1 Mahé G. (2005). **Rapport de prospective de l'Axe 3** du Laboratoire HydroSciences Montpellier pour le quadriennal 2007-2010 : Variabilité hydrologique : analyse, mécanismes et impacts sur les ressources en eau.

## Autres Publications de stagiaires encadrés

### 1988

Nivelet C. (1988). Influence de la variabilité de la vapeur d'eau en Afrique et en Atlantique intertropical sur l'évolution du climat sahélien. Rapport de stage 2<sup>ème</sup> année. Filière REA. Institut National Polytechnique de Grenoble. ENSHMG. ISRA. ORSTOM. Sénégal. 56 p.

### 1994

Wotling G. (1994). Analyse de la variabilité spatio-temporelle des précipitations annuelles liées à la mousson africaine de 1951 à 1989. Application de la méthode du vecteur régional (MVR). Mémoire de DEA National d'Hydrologie, option Gestion et Valorisation de l'Eau. ORSTOM - UMII LHM, Montpellier, 121 p.

### 1995

Diabaté M. (1995). Etude des variations hydroclimatiques sur le bassin-versant du Bani de 1950 à 1990. Mémoire d'Ingénieur de l'ENI, Option Génie Civil, Aménagements Hydrauliques, ENI/ORSTOM, Bamako, 64 p.

### 1996

Bamba F. (1996). Bilans hydrologiques 1951-1989 pour des bassins-versants du Haut Niger et analyse de l'évolution des tarissements. Mémoire de fin de 1<sup>ère</sup> année de Contrat Formation Insertion (CFI), ORSTOM/CNRST, Bamako, 28 p.

Kondé C. (1996). Revue bibliographique sur les émissions de méthane en zone humide. Rapport interne, ORSTOM, Laboratoire d'Hydrologie Bamako, CNRST, 15 p.

Soumaguel A. (1996). Annuaire des précipitations annuelles sur le bassin du Niger supérieur et le Delta Central de 1924 à 1995. Rapport d'activité, Friend AOC, ORSTOM, Laboratoire d'Hydrologie, Bamako, 46 p.

Soumaguel A. (1996). Première exploitation des fichiers opérationnels des pluies sur le bassin versant du Niger : étude témoin. Rapport d'activité, programme Friend AOC, ORSTOM Bamako, 31 p.

Soumaguel. A. (1996). Elaboration des fichiers Opérationnels pour le calcul Régionalisé des pluies par la méthode du vecteur Régional (MVR) sur le bassin versant du Niger. Rapport d'activité FRIEND-AOC, Bamako, ORSTOM, Laboratoire d'hydrologie, 35 p.

### 1997

Aznar C. (1997). Notice d'utilisation du logiciel Hydro. ORSTOM/Lecom, Bamako, 11 p.

Aznar C. (1997). Estimation des écoulements annuels au Mali : amélioration de la présentation et des fonctionnalités du logiciel Hydro. Rapport de stage 2<sup>ème</sup> année ISIM (Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier), ORSTOM/Lecom, Bamako, 36 p.

Bamba F. (1997). Changements climatiques et variabilité des ressources en eau des bassins du Haut Niger et de la Cuvette Lacustre. Mémoire de fin de 2<sup>ème</sup> année de Contrat Formation Insertion (CFI), ORSTOM/CNRST, Bamako, 26 p.

Bamba F. (1997). Evaluation du volume de l'écoulement de base sur le bassin du Bani à Douna. Rapport de stage de formation-insertion. Janvier-décembre 1997. ORSTOM/CNRST Bamako, 10 p.

Dessouassi R. (1997). Variabilité du niveau et de la qualité chimique des eaux souterraines dans le haut bassin du fleuve Niger au Mali. Comparaison avec la variabilité des écoulements de surface. Mémoire d'Ingénieur ENI, Spécialité Génie Civil, ORSTOM, Bamako, 110 p.

Dessouassi R. (1997). Variabilité du niveau et de la qualité chimique des eaux souterraines dans le haut bassin du fleuve Niger au Mali. Comparaison avec la variabilité des écoulements de surface. Rapport d'activité FRIEND-AOC, ORSTOM Bamako, 22 p.

Kondé C. (1997). Caractérisation et variabilité du flux de méthane produit dans le delta central du Niger. Rapport de stage de formation-insertion. Janvier-décembre 1997. ORSTOM/CNRST Bamako, 23 p.

Rochard L. (1997). Caractéristiques hydrologiques et usages agricoles de la retenue collinaire de Ntonimba (Kati). Stage de 1<sup>ère</sup> année de BTSA Gestion et maîtrise de l'eau au LEGTA de Rennes Le Rheu, 9 p.

Thareau E. (1997). Dynamique du système agraire et impact socio-économique de la retenue collinaire de Ntonimba. Mémoire de DESS Développement Agricole. IEDES, Paris I Sorbonne, ORSTOM/Lecom Bamako, 114 p. 1998

**1998**

- Bamba F. (1998). Bilan des travaux réalisés avec l'ORSTOM sur la période 1991-1998. ORSTOM, LECOM, Bamako, 15 p.
- Dembélé L. (1998). Bibliographie sur l'inondation dans le delta intérieur du Niger au Mali. Mémoire de maîtrise ENSUP, Bamako Mali.

1999

- Picouet C. (1999). Géodynamique d'un hydrosystème tropical peu anthropisé : le bassin supérieur du Niger et son delta intérieur. Thèse Sciences (Hydrologie-Hydrochimie), Université Montpellier, 454 p.

**2000**

- Koné F. (2000). Suivi piézométrique au Burkina Faso – Bilan de 20 années d'observation, Mémoire d'ingénieur, EIER, Ouagadougou
- Manga M. (2000). Essai de détermination des influences climatiques naturelles et anthropiques dans la variabilité des régimes hydrologiques des rivières Nakambé à Wayen et Gorouol à Korizena, Mémoire d'ingénieur, EIER, Ouagadougou

**2001**

- Démé K. (2001). Evolution comparée de l'occupation des sols et des écoulements sur le bassin versant du Nakambé. Mémoire d'ingénieur, EIER, Ouagadougou
- Diello P. (2001). Identification d'un réseau hydroclimatique pour suivre les modifications du climat en Afrique de l'Ouest. Rapport de stage à la recherche, EIER, Ouagadougou
- Dray A. (2001). Prise en compte de l'occupation des sols dans la modélisation des écoulements du Nakambé à Wayen. Mémoire d'Ingénieur, ENSA de Rennes
- Hamatan M. (2001). Modélisation débit – durée - fréquence appliquée aux grands bassins versants du Burkina Faso. Rapport de stage à la recherche, EIER, Ouagadougou
- Liéno G. (2001). Rapport de stage d'échange scientifique FRIEND-AOC. IRD Ouagadougou, 8 p.
- Ould M. (2001). Détermination de ruptures statistiques dans les séries chronologiques des paramètres météorologiques – application aux bassins des Voltas et du Niger, Mémoire d'ingénieur, EIER, Ouagadougou
- Ouédraogo M. (2001). Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau de l'Afrique de l'Ouest – Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse Science de l'eau dans l'environnement continental, Université de Montpellier

**2002**

- Diarra G. (2002). Analyse de la variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale au XXème siècle. Mémoire d'ingénieur, EIER, Ouagadougou
- Kouwonou Y. (2002). Synthèse des acquis sur la dynamique du cycle hydrologique et l'évolution des états de surface sur le Nakambé (Burkina Faso). Mémoire de fin d'études, EIER, Ouagadougou
- Diello P. (2002). Relations entre NDVI, pluies et états de surface au Burkina-Faso - cas du bassin du Nakambé. DEA Science de l'eau dans l'environnement continental, Université de Montpellier.
- Girard S. (2002). Simulation des écoulements en Afrique de l'Ouest : mise en œuvre d'une procédure de modélisation mensuelle spatialisée. Rapport de VCI, 1ère partie, IRD Ouagadougou, 17 p.
- Girard S. (2002). Logiciel de modélisation hydrologique mensuelle spatialisée. Mode opératoire. Rapport de VCI, 2ème partie, IRD Ouagadougou, 35 p.
- Hamatan M. (2002). Synthèse et évaluation des prévisions saisonnières en Afrique de l'Ouest. DEA Science de l'eau dans l'environnement continental, Université de Montpellier.
- Sangaré S. (2002). Bilan hydrologique du Niger en Guinée de 1950 à 2000. Rapport de stage d'échange scientifique FRIEND-AOC. IRD Ouagadougou, 24 p.

**2003**

- Ndiaye B. (2003). Impact du climat et des aménagements sur le régime hydrologique du Mouhoun. Mémoire de fin d'études, EIER, Ouagadougou.
- Mariko A. (2003). Caractérisation et Suivi de la Dynamique de l'Inondation et du Couvert Végétal dans le Delta Intérieur du Niger (Mali) par Télédétection. Thèse Science de l'eau dans l'environnement continental, Université de Montpellier.

**2004**

- Ardoin S. (2004). Variabilité hydro-climatologique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne (Logone-Chari, Sénégal, Gambie). Thèse Science de l'eau dans l'environnement continental, Université de Montpellier.
- Plouzane M. (2004). Détermination de la date de début de mousson en Afrique de l'Ouest. Projet Industriel de fin d'études. ISIM, Montpellier.
- Sighomnou D. (2004). Variabilité du climat : implication sur les ressources en eau du Cameroun. Thèse d'Etat, Université de Yaoundé.
- Valimba P. (2004). Rainfall variability in southern Africa, its influences on streamflow variations and its relationships to climatic variations. Rhodes University, Grahamstown, South Africa.
- Vilaly A. (2004). Télédétection des états de surface au Sahel burkinabé et relations avec l'hydrologie. DEA Hydrologie Montpellier. MTD/MSE, 3S/HSM.
- 2005**
- Denat L., Larguier C. (2005). Hydrologie au Maroc. Synthèse bibliographique. Mémoire de Master 1, UM2, Montpellier.
- Rescan M. (2005). Prévision des ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale jusqu'en 2099 par application des sorties du modèle d'évolution du climat HadCM3 à un modèle hydrologique. DEA UM2 Montpellier.
- Guimard L. (2005). Analyse spatio-temporelle des bilans en eau en vue de la modélisation pluie débit des ressources en eau au sahel. Stage Ingénieur 2<sup>ème</sup> année, ENSAM Bordeaux.
- 2006**
- Trouillet T. (2006). Modélisation hydrologique du Bassin versant du Rheraya, Haut Atlas, Marrakech. Mémoire de Master 2, HydroSciences Montpellier, Université Montpellier 2.



# 4

## **Variabilités hydro- climatologique et environnementale en Afrique de l'Ouest et Centrale :**

**Une approche des mécanismes à  
l'origine du changement des  
relations pluie-débit au cours du  
20<sup>ème</sup> siècle**



## 4.1 Introduction

Le changement climatique abrupt intervenu vers 1970 en Afrique subsaharienne a provoqué un changement des régimes de précipitations et d'écoulements très important en Afrique de l'Ouest, également perceptible jusqu'à la forêt équatoriale. Du fait de la situation économique très défavorisée de la plupart des pays de la sous-région d'Afrique de l'Ouest et Centrale, les conséquences de la sécheresse sont amplifiées, car les états n'ont pas les moyens de venir en aide aux populations les plus touchées ni de pallier les conséquences du changement climatique. Cette pénurie économique entraîne également un désintérêt pour les activités de veille scientifique et de recherche, si elles n'ont pas de retombées financières à court terme. Ainsi, depuis plus de 20 ans dans certains pays, les données hydrologiques sont inexistantes ou de très mauvaise qualité, et ne permettent pas d'étudier comment ont évolué les relations pluie/débit par rapport aux changements environnementaux. Dans la plupart des états par ailleurs, les données hydrologiques, et surtout les données météorologiques sont devenues payantes, afin que les services nationaux trouvent des moyens de subsistance. Ceci rend encore plus difficile le travail de nos collègues africains qui ont très peu de ressources propres. Une part importante de mon activité à l'ORSTOM puis à l'IRD consiste à aider au développement des capacités scientifiques des partenaires, sous différentes formes, décrites au paragraphe 2.1.

Les développements scientifiques que j'expose dans ce mémoire ont bénéficié des échanges avec mes collègues africains. Le développement croissant des réflexions autour des thématiques scientifiques du réseau FRIEND-AOC a apporté un éclairage grandissant à mes travaux en relation avec les priorités du Sud.

Les effets de la sécheresse se font sentir sur les précipitations dans toute l'Afrique de l'Ouest et Centrale, mais ne se traduisent pas toujours par une rupture dans les séries temporelles, comme l'indiquent les tests statistiques sur les séries de pluies par régions ou par bassins-versants. L'Afrique de l'Ouest est plus touchée par cette baisse, et le Sahel est particulièrement suivi car les précipitations y sont juste assez abondantes pour y permettre la survie.

Avec une optique à long terme de prévision de la qualité de la saison des pluies, les précipitations au Sahel, mais aussi ailleurs en Afrique de l'Ouest, sont corrélées à des facteurs océaniques et atmosphériques en relation avec le climat de la mousson. Les facteurs qui sont étudiés dans ce mémoire sont les vents en altitude (jets d'est africain et tropical), l'humidité atmosphérique, la température de surface de la mer, la position en latitude de la ZITC, et la position du centre de l'anticyclone de Sainte-Hélène. On met ainsi en évidence deux situations types très contrastées selon la situation d'excédent ou de déficit de pluie au Sahel. Ces résultats sont utilisés pour améliorer la qualité de la prévision saisonnière des pluies -PRESAO- réalisée par l'ACMAD et AGRHYMET à Niamey. On suggère également les modalités de relations possibles entre les anomalies de pluies côtières autour du golfe de Guinée et l'évolution des TSM dans l'Atlantique équatorial, en relation avec la physique du déplacement d'ondes océaniques stimulées par le renversement des alizés.

Enfin, concernant les pluies, on s'interroge sur une éventuelle reprise des précipitations depuis la fin des années 1990 au Sahel et sur son apparent reverdissement.

Par leur nature ponctuelle, la représentativité spatiale des données de précipitations est imparfaite, et dépend de plusieurs facteurs, dont la densité de stations et le relief. Par l'effet intégrateur du bassin-versant, les pluies sont transformées en débits pour de grandes surfaces. Les débits de surface sont à l'origine de la plus grande part des eaux consommées quotidiennement par les populations africaines dans les agglomérations et en milieu rural. La connaissance des régimes hydrologiques est également indispensable à la définition des normes de construction des ouvrages d'art et hydrauliques.

Un premier bilan hydrologique à l'échelle sous-continentale permet d'évaluer les apports en eaux douces à l'océan Atlantique, information utile aussi aux océanographes s'intéressant aux eaux côtières. Ensuite, des études locales par bassins-versants permettent d'étudier la variabilité des relations pluie-débit. Le haut bassin du fleuve Niger, le delta intérieur et le Niger moyen sont ainsi étudiés en détail, ainsi que plusieurs rivières d'Afrique Centrale au Cameroun, au Congo et au Gabon, qui nous montrent que les régimes pluviométriques et hydrologiques subissent également de profonds changements dans ces régions humides.

On distingue trois grandes régions suivant l'évolution de la relation pluie-débit depuis le début de la sécheresse : les zones équatoriale, tropicale humide et tropicale sèche à semi-aride.

On décrit aussi comment ont évolué les transports de MES dans ces différentes zones ; les MES sont responsables du colmatage des retenues d'eau et de la création de bancs mouvants dans le fond des rivières, qui entravent la navigation. On s'interroge sur la variabilité du transport de MES par rapport au changement climatique depuis 1970.

Dans les régions équatoriales pluies et débits tendent à évoluer proportionnellement, souvent sans tendance à long terme d'une modification de leurs relations. Dans les régions tropicales humides, premier paradoxe hydrologique : le déficit d'écoulement est beaucoup plus élevé que le déficit de pluie. Nous montrons que cela peut s'expliquer en grande partie par la baisse du niveau des nappes, qui contribuent ainsi de moins en moins à soutenir les crues et les étiages. En milieu sahélien, et c'est le second paradoxe hydrologique d'Afrique de l'Ouest, les coefficients de ruissellement, et souvent aussi les débits en valeur brute, augmentent depuis la fin des années 1970, malgré la baisse des pluies. Cette observation est à rapprocher, mais en sens inverse, de l'augmentation continue du niveau de la nappe du Continental Terminal dans la région de Niamey.

La modélisation hydrologique des relations pluie-débit est un exercice indispensable dans une perspective de prévision des ressources en eau. On montre l'application de deux modèles hydrologiques conceptuels, GR2M et WBM, au pas de temps mensuel. Ces modèles peuvent donner d'excellents résultats en milieu tropical sec à une seule crue, et de moins bons dans les régions sahéliennes.

On teste les performances et les limites de ces modèles sur quelques exemples.

L'augmentation des débits au Sahel est corrélée à l'accroissement des activités humaines. Les activités agricoles modifient les états de surface, sachant qu'un sol cultivé ruisselle plus qu'un sol en végétation naturelle, et beaucoup moins qu'un sol nu. On étudie les relations homme-climat-environnement sur l'exemple du fleuve Nakambé à Wayen au Burkina-Faso. On montre que la prise en compte des changements d'états de surface dans la modélisation hydrologique permet d'améliorer significativement la performance de simulation du régime hydrologique.

L'un des objectifs majeurs du programme de recherche en cours est l'application de nos connaissances des régimes hydrologiques, de leur variabilité et des meilleures méthodes de modélisation, pour la prévision des ressources en eau pour le futur. Dans ce cadre je présente deux résultats majeurs du programme VAHYNE : la prévision des ressources en eau de surface au 21<sup>ème</sup> siècle, sur la base de l'application aux modèles pluie-débit de scénarios climatiques issus de sorties de GCM, sur près de 350 bassins versants ; et les résultats d'une étude destinée à la prévision des surfaces inondées dans le delta intérieur du Niger, à partir d'une étude de 10 années d'images NOAA, où l'on établit des relations entre hauteurs d'eau aux stations hydrométriques et surfaces inondées.

## 4.2 La sécheresse en Afrique de l'Ouest et Centrale

### 4.2.1 Conséquences socio-économiques et impacts sur les hydrologies nationales

Sircoulon (1976, 1989, 1998) a été l'un des premiers à l'ORSTOM à établir une synthèse de la sécheresse pluviométrique et hydrologique qui a frappé durement en 1972 et 1973 les jeunes états africains aux économies en pleine construction, et qui a provoqué un premier mouvement de migration vers les villes de certaines populations rurales et nomades dont les modes de subsistance avaient été trop altérés. On constate alors les premiers effets du changement climatique sur les états de surface, avec une rapide disparition des zones de pâture dans les régions sahéliennes et semi-désertiques, et le début de la désertification après plusieurs années de déficit pluvieux (Chevallier *et al.*, 1985), projet Mare d'Oursi. Les débits des rivières tropicales humides sont aussi fortement diminués, sans que l'on ait à l'époque une idée précise de ce qui entraîne une telle diminution et les auteurs préfèrent parler d'anomalie plutôt que de changement de régime hydrologique (Dubreuil *et al.*, 1976 ; Klein 1976, Lamagat et Molinier, 1983). Le fleuve Sénégal n'est plus navigable pour les gros navires et la superficie du Lac Tchad s'amenuise dramatiquement (Citeau *et al.*, 1988a). Après ce premier paroxysme de sécheresse, la pluviométrie remonte légèrement, sans atteindre toutefois la moyenne des années antérieures à 1970 (figure 1)(Mahé et L'Hôte, 2004). Le déficit pluvieux se stabilise jusqu'au début des années 1980, et les économies de ces états souffrent comme le reste de la planète du premier choc pétrolier qui augmente le prix des marchandises importées. La deuxième sécheresse de 1982-1984 est la plus intense du siècle en Afrique de l'Ouest et Centrale, le déficit pluvieux y est le plus important du siècle en 1983 (Lamb, 1982 ; Nicholson, 1983 ; Hulme, 1992 ; Janicot, 1992 ; Moron, 1994 ; Paturel *et al.*, 1997, 1998 ; Mahé et Olivry, 1999). Les années suivantes seront également très déficitaires en pluie, faisant de la décennie 1980 la plus sèche du siècle (assèchement du Niger à Niamey en 1984). Les économies fragiles des états africains aux ressources financières très faibles ne sont pas en mesure de faire face aux défis socio-économiques majeurs qui apparaissent. Plusieurs facteurs aggravent les conséquences de la sécheresse. D'une part cette seconde sécheresse très intense et très longue provoque un afflux massif de population vers les villes qui déstabilise les organisations sociales et économiques, ensuite la population commence à augmenter rapidement du fait d'un taux de natalité très élevé, alors que les rendements agricoles s'effondrent (Marchal, 1985), il en résulte une augmentation rapide des surfaces cultivées. La pénurie financière, un manque d'organisation et une aide internationale non coordonnée, ralentissent la mise en place d'actions fortes et organisées contre les effets de la sécheresse sur les pratiques agricoles, l'environnement, la gestion des ressources naturelles. Il faut toutefois noter des initiatives de préservation et restauration des zones dégradées qui sont menées dès la fin des années 1980 par des ONG souvent, et qui reçoivent très tôt le soutien de la coopération allemande (Reij et Thiombiano, 2003) et d'une communauté scientifique de plus en plus large, il s'agit de construction de diguettes ou de cordons pierreux, de restauration de haies végétales, de reforestation, d'application de techniques culturelles adaptées comme le zaï (Roose *et al.*, 1996 ; 1999), etc., dont la multiplication dans le courant de la décennie 1990 entraîne des effets visibles dans le paysage.

Un autre effet des faillites financières de ces états « sous perfusion » des aides du Nord est la déstructuration des services publics. La recherche et les services nationaux, déjà fragilisés par des situations économiques vacillantes, sont des victimes « collatérales » des ajustements structurels demandés aux états par les grandes institutions financières pour sortir les finances publiques de la crise (Global Policy Network, (a) – GPN provides up-to-date analysis and statistics on labor market trends). C'est également dans le courant des années 1980 que

l'ORSTOM cède aux états la gestion propre de leurs services hydrologiques nationaux, responsables de l'entretien et du développement des réseaux de mesures hydrométriques, des tournées de mesures de débit, du recrutement de la formation et de la rémunération des observateurs aux stations hydrométriques, et en fin de compte de l'évaluation de la variabilité et de la disponibilité en eaux de surface, et souterraines. Dans le contexte général de déficit financier, dans de nombreux pays il n'y aura tout simplement pas de « relève » à l'ORSTOM dans ses fonctions de service national hydrologique, bien que les personnels soient présents, mais sans aucun moyen de fonctionnement. Les grands programmes régionaux HYDRONIGER, OMVS (Sénégal), OMVG (Gambie), OMS Oncho, assurent un minimum de suivi, mais les Etats s'acquittent difficilement de leurs cotisations, et le suivi régional reste chaotique.

Au commencement de la décennie 1990 la situation de la recherche et de l'hydrologie en Afrique de l'Ouest et Centrale est très mauvaise. Dans de nombreux états les observateurs n'étant plus payés, les relevés de hauteurs d'eaux ne sont plus effectués depuis plusieurs années, interrompant de façon très dommageable des séries souvent vieilles de plusieurs décennies. C'est la période où la Banque Mondiale finance le Water Assessment, qui lancera l'initiative HYCOS (Water Assessment, 1992).

Il apparaît également que plusieurs grands barrages construits dans les années 1960 et 1970 sont très peu remplis par rapport à leur capacité, car ils ont été construits à partir de normes hydrologiques calculées sur des données anciennes correspondant à des périodes plus humides. Le pont sur le Bani au Mali (figure 2) est un autre exemple d'une construction largement surdimensionnée par rapport au nouveau niveau des crues : prévu pour laisser passer une crue dépassant 9 m à l'échelle le pont ne voit plus passer de crues supérieures à 6 m depuis 20 ans. Les barrages sur le Bandama en Côte d'Ivoire et sur la Volta (Akosombo) au Ghana sont dramatiquement peu remplis, ce qui désorganise les projections de rentabilisation. Le niveau des nappes ne cesse de s'approfondir dans les régions tropicales humides, comme dans le nord de la Côte d'Ivoire où un rapport (Savané et Sangaré, 1997) mentionne la nécessité de sur-creuser la plupart des forages villageois. La navigation fluviale est fortement entravée par une réduction des périodes navigables et l'augmentation des bancs de sables, sur les fleuves Niger et Sénégal par exemple. De nombreux cours d'eau anciennement pérennes s'assèchent désormais tous les ans (Bani au Mali par exemple).

Le CIEH accueille en 1986 une conférence sur la révision des normes hydrologiques suite à la sécheresse. L'ORSTOM et EDF-International participent à cette conférence qui intéresse tous les acteurs du développement et qui jette les bases de la réflexion sur la nécessité de calculer de nouvelles normes pour les constructions dans la région.

Au début des années 1990 il apparaît donc nécessaire et urgent de réaliser plusieurs travaux :

1. la compilation des données de pluies et débits existantes et à jour pour toute l'Afrique de l'Ouest et Centrale ;
2. l'analyse de la variabilité des précipitations et des débits ;
3. l'analyse des conséquences de cette variabilité sur les régimes hydrologiques, la disponibilité en eau, les transports de MES, les activités socio-économiques, etc.
4. la recherche des causes de cette variabilité, ce qui mène vers la climatologie et la modélisation des relations pluie-débit pour les besoins de prédiction et la compréhension des mécanismes ;
5. la proposition de nouvelles normes hydrologiques ;
6. la prévision des ressources en eau pour le futur.

Par ma formation initiale de géologue, j'ai appris à observer l'environnement par une approche naturaliste et « globaliste » et à embrasser d'emblée la notion d'échelles imbriquées, tant au niveau spatial que temporel. Mes premières expériences à l'ORSTOM en DEA puis en VSNA ont continué à développer ma préférence pour l'observation des phénomènes et la

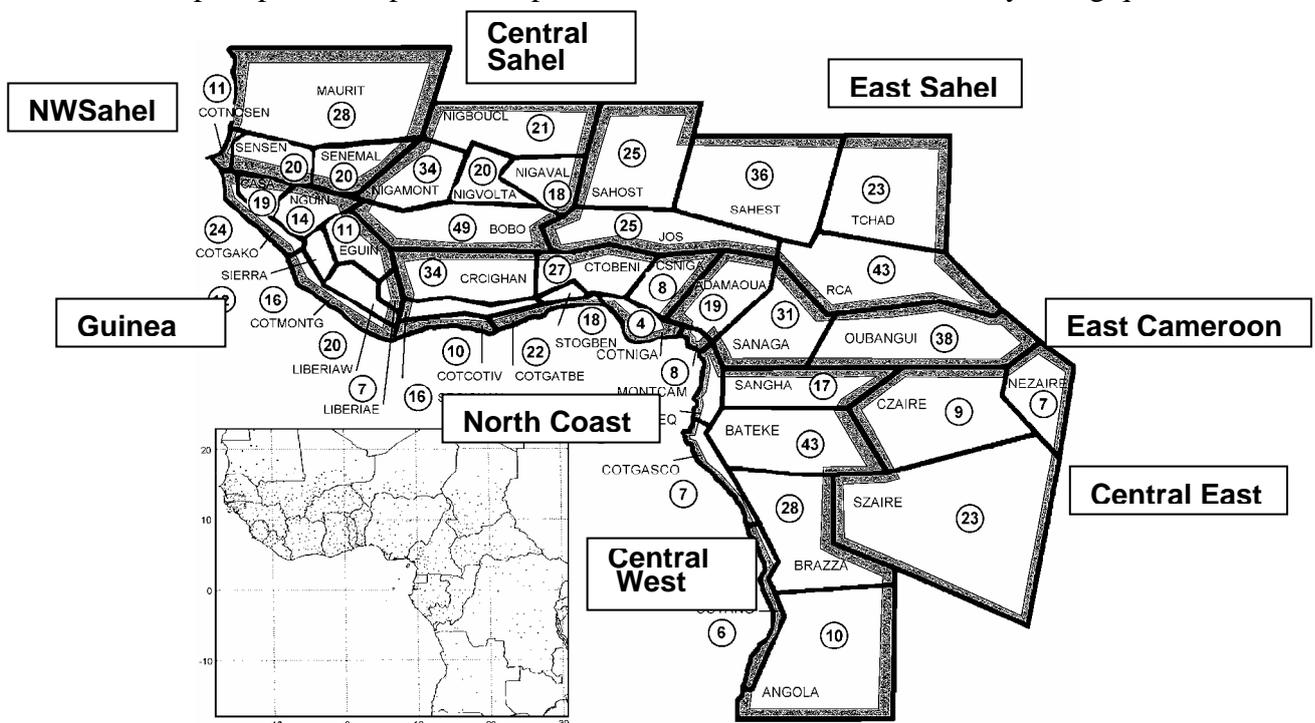
recherche de mécanismes à grande échelle. Je commencerai ce mémoire par des résultats sur les points 1 et 2, ainsi que les relations avec la climatologie et l'océanographie du point 4. J'ai ensuite travaillé sur le point 3 sur un grand nombre de fleuve d'Afrique de l'Ouest et Centrale, et je continue à le faire. Une meilleure connaissance de la variabilité du climat, des pluies et des débits (point 5) et de ses conséquences m'a amené à m'interroger sur les non-linéarités spatiale et temporelle des relations pluie-débit et à m'intéresser aux possibilités de prévision (points 4 et 6), dans cet environnement africain changeant, tant du point de vue humain que climatique et environnemental. Tout espoir de prévisibilité des ressources en eau en Afrique tropicale précède à mon sens une vision intégrée et une lecture multi-disciplinaire des relations homme-climat-environnement.

## 4.2.2 Déficients de précipitations

Un préalable à toute étude hydrologique est la caractérisation des régimes pluviométriques et le calcul des précipitations spatialisées par bassin versant. Ceci implique une critique de la qualité des données et l'analyse des longues chroniques, pour déterminer la variabilité des régimes, les tendances et les relations avec les signaux climatiques majeurs régionaux et planétaires.

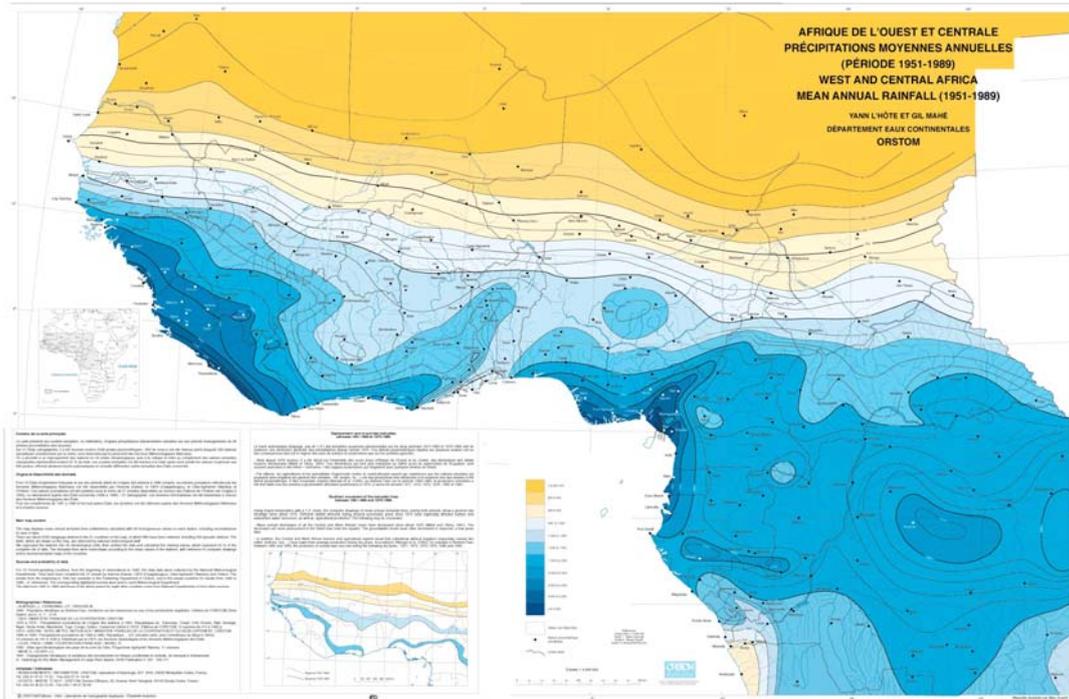
### Etude à l'échelle sous-continentale

L'étude à l'échelle sous-continentale permet la production de grilles de données de pluies utilisées pour deux objectifs principaux : la description de la variabilité spatiotemporelle de la pluie et l'étude de ses relations avec l'océan et l'atmosphère à l'échelle continentale et planétaire, et le calcul de précipitations spatialisées par bassin versant, entrées du bilan hydrologique.

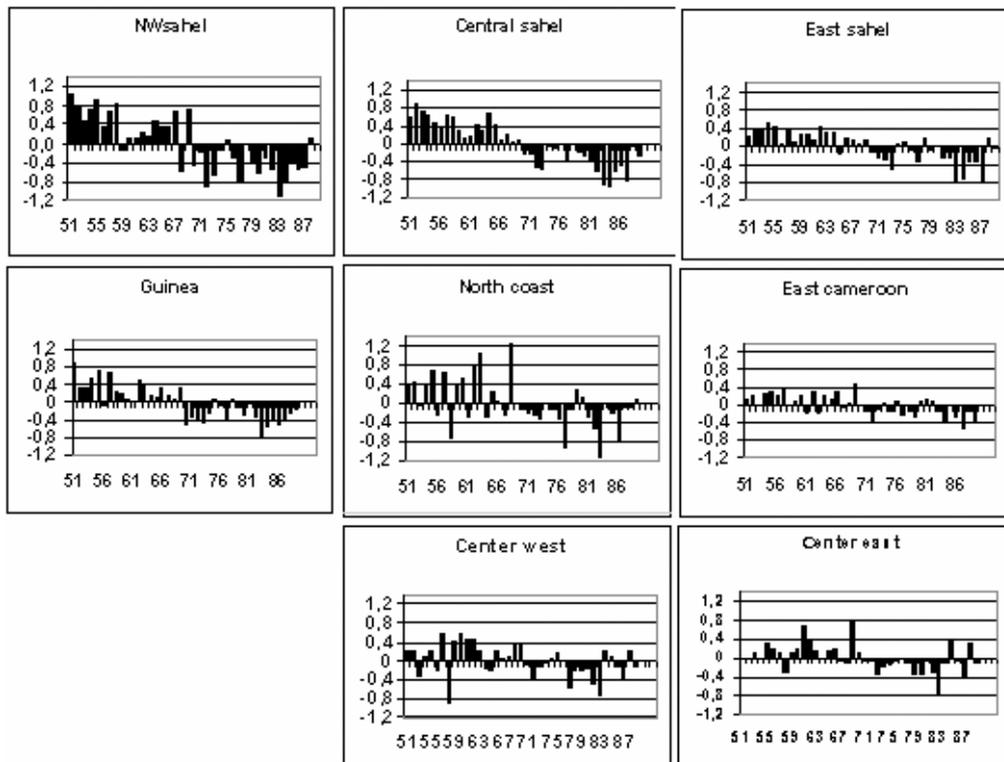


**Figure 1**

Les 44 unités climatiques définies pour l'homogénéisation régionale des données de précipitation et le nombre de postes utilisés. En encadré la situation des 896 postes pluviométriques utilisés (Mahé *et al.*, 2001).



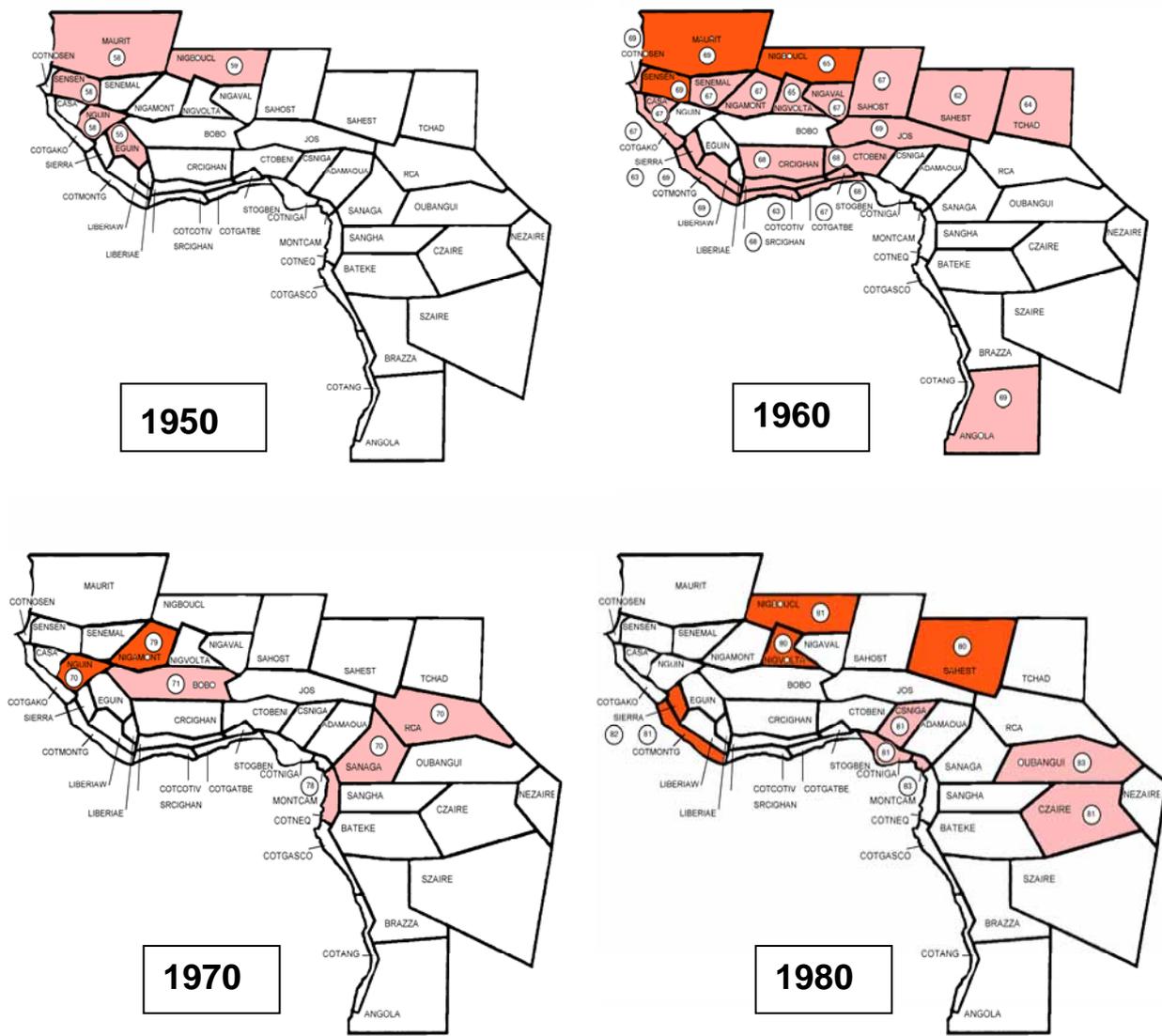
**Figure 2**  
Carte des pluies moyennes interannuelles sur l’Afrique de l’Ouest et Centrale (période 1951-1989), L’Hôte et Mahé (1996).



**Figure 3**  
Indices de pluie annuelle pour les huit grandes régions définies figure 1 (Mahé *et al.*, 2001)

La mise à jour des données de près de 896 postes sur la période 1951-1989 (figure 1) a précédé la réalisation d’une carte des précipitations annuelles moyennes en Afrique de l’Ouest et Centrale (figure 2)(L’Hôte et Mahé, 1996).

Ce travail a été rendu possible par la mise en place d'une chaîne de traitement informatique des données pluviométriques, depuis les données brutes jusqu'à la spatialisation et à la cartographie avec les collègues du Laboratoire d'Hydrologie de l'IRD Montpellier (Mahé *et al.*, 1994). J'ai également décrit à cette occasion le déplacement vers le Sud des isohyètes en Afrique tropicale au sud du Sahara au cours des années 1970-1989 par rapport à la période plus humide 1951-1969 (figure 2).



**Figure 4**  
 Dates d'occurrences de ruptures statistiques dans les séries chronologiques (tests de Pettitt et de Hubert), rose : première rupture, orange : seconde rupture ; par décennies (Mahé *et al.*, 2001).

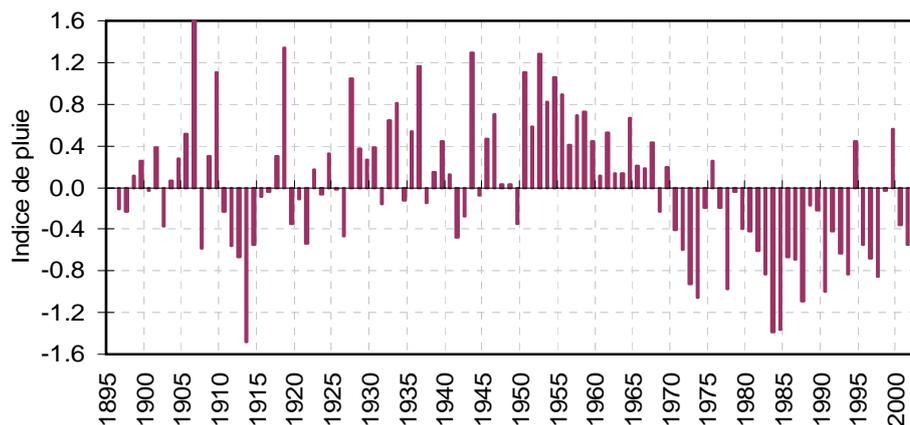
Le traitement des données de pluies est un domaine où les chercheurs de l'IRD ont beaucoup travaillé depuis Hiez (1977) et Brunet-Moret (1979). Les différentes méthodes d'interpolation (spline, krigeage, moyenne arithmétique, Thiessen), ne donnent pas de différences notables s'agissant de l'interpolation des pluies annuelles sur l'Afrique de l'Ouest (Wotling *et al.*, 1995 ; Mahé *et al.*, 2001). Ceci est de moins en moins vérifié quand on se rapproche du pas de temps journalier et de l'évènement pluvieux (Ali *et al.*, 2005). Plus récemment, une approche quantifiée

de l'impact de la source de données et de la méthode d'interpolation sur les performances de la modélisation hydrologique mensuelle (Mahé *et al.*, 2006a), sur quelques exemples au Burkina-Faso, fait ressortir que les différences de densité du réseau de stations utilisé dans notre cas d'étude introduisent des écarts de 4 à 8% sur les pluies moyennes par pas d'espace (demi-degré carré), et que la méthode d'interpolation utilisée génère des différences de l'ordre de 3 à 4% (krigeage, spline ou inverse distance pondérée). Pour une maille d'un demi-degré carré les différences sur les valeurs de pluie peuvent dépasser fréquemment 10%. Ces biais ont un impact amplifié sur la modélisation hydrologique, où avec le modèle GR2M les différences de performance, mesurées avec le coefficient de Nash, atteignent 20 à 30% en saison des pluies et jusqu'à 60% en saison sèche.

Les précipitations diminuent dans toute l'Afrique de l'Ouest et Centrale au cours des décennies 1970 et 1980 (figure 3). Les déficits les plus importants ont été enregistrés dans toute l'Afrique de l'Ouest et Centrale durant la période 1983-1984, l'année 1983 étant la plus sèche du siècle de la Mauritanie à l'Angola. Les déficits sont plus faibles en direction de l'Afrique Centrale et Equatoriale (Mahé et Olivry, 1991, 1995, 1999). C'est principalement le nombre d'évènements pluvieux qui a diminué durant le cœur de la saison des pluies, même si ce résultat très général peut-être localement contrarié, comme dans le cas de notre étude dans le nord du Burkina-Faso (paragraphe 4.4.3.). Au Sud de 9-10°N, la durée de la saison des pluies est également modifiée selon les années (LeBarbé *et al.*, 2002).

Des ruptures dans les séries pluviométriques sont détectées dans la plupart des unités climatiques et des bassins versants en Afrique de l'Ouest. En Afrique Equatoriale, on observe des tendances à la baisse des pluies depuis 20 ans, mais qui ne s'accompagnent pas toujours de ruptures (figure 4) (Paturel *et al.*, 2003b ; Laraque *et al.*, 2001 ; Mahé *et al.*, 2001).

Un des faits marquants des dernières décennies est la diminution persistante des pluies, dans toute l'Afrique de l'Ouest mais surtout au Sahel, étudiée en détail afin d'apporter des éléments objectifs au débat émergeant sur la fin possible de la sécheresse, et constatant que la sécheresse n'était toujours pas terminée en 2002 (figure 5)(L'Hôte *et al.*, 2002 ; 2003 ; Ozer *et al.*, 2003 ; Daï *et al.*, 2004 ; Mahé et L'Hôte, 2004), malgré quelques années de meilleures pluviométrie depuis 1994. Tout se passe comme si depuis le début des années 1970 la variabilité climatique oscillait autour d'une nouvelle norme plus faible de 15 à 20%, avec une période de sécheresse plus intense durant les années 1980, qui peut être corrélée à une variabilité climatique exacerbée au niveau planétaire à cette période (épisodes El Niño plus forts, éruption volcanique de grande ampleur du volcan El Chichon en 1982, etc...). Depuis le milieu des années 1990, la pluviométrie a retrouvé une moyenne proche de celle des années 1970, ce qui fait dire que la sécheresse n'est pas terminée, au sens où la pluviométrie des années précédant 1970 n'est pas atteinte. Malheureusement, l'utilisation de moyennes sur des périodes de référence glissantes de 30 ans, préconisée par l'OMM, conduit aujourd'hui à utiliser la référence 1970-2000 (pour autant que nous puissions obtenir des données récentes...). De ce fait, la moyenne a tendance à remonter par rapport à la période glissante précédente.



**Figure 5**

Indice de pluie au Sahel de 1896 à 2002 (L'Hôte *et al.*, 2002, 2003).

De plus la référence à une période « normale » définie sur des années « sèches » conduit à voir évoquer fréquemment, dans la presse mais aussi dans des publications scientifiques, la fin de la sécheresse par un effet de calcul. Il faut rappeler, et au vu de la figure 5 l'on ne peut pas s'y tromper, que la pluviométrie a baissé durablement en Afrique de l'Ouest depuis plus de 35 ans, sans retour à des valeurs moyennes comparables à celles qui prévalaient avant 1970.

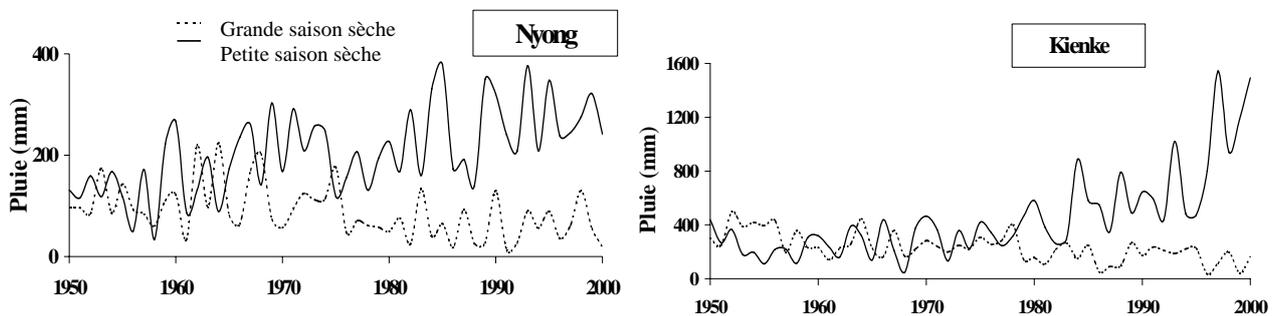
### **Etude à l'échelle régionale et des bassins-versants**

Le calcul des pluies moyennes par bassin versant est indispensable à l'établissement des bilans hydrologiques, qui renseignent ensuite sur l'évolution des relations pluie-débit. Sur l'Afrique tropicale à une seule saison des pluies, le signal est globalement identique à celui observé pour toute la sous-région, c'est-à-dire une diminution de l'amplitude. En Afrique équatoriale les deux saisons des pluies présentent des variabilités distinctes qui apportent un éclairage intéressant pour la compréhension des mécanismes climatiques à l'œuvre dans la mousson d'Afrique de l'Ouest.

L'Afrique équatoriale n'est pas médiatisée pour sa sécheresse. Les précipitations y sont abondantes, et la famine ne menace pas les populations même durant les années déficitaires en pluie. Néanmoins, on y a constaté un changement de régime pluviométrique important, à l'origine de modifications majeures des régimes hydrologiques des rivières de la région (Mahé *et al.*, 1990). L'Afrique Equatoriale est le lieu d'une activité atmosphérique intense qui est en relation avec l'Afrique tropicale à travers les cellules de Hadley. L'étude des anomalies des précipitations dans ces régions peut nous apporter des informations déterminantes pour la compréhension des modifications de la dynamique atmosphérique liées à la mousson ouest-africaine.

Ainsi on met en évidence une diminution des pluies de grande saison sèche (décembre à février) dans le sud du Cameroun et une augmentation des pluies durant la petite saison sèche (juillet-août)(Mahé *et al.*, 2005a), qui a des répercussions, comme nous le verrons plus loin, sur les débits. De même sur le bassin de l'Ogooué au Gabon, en régime équatorial pur, on observe depuis les années 1960/1970 un changement de répartition des précipitations au cours de la 1<sup>ère</sup> saison des pluies entre février et mai : le total saisonnier varie peu, mais les pluies sont mieux réparties entre les mois, avec là aussi une conséquence majeure sur le régime de l'Ogooué (Mahé *et al.*, 1990). Des résultats identiques sont observés dans le sud du Cameroun, sous régime équatorial (Liéno *et al.*, 2005a ; 2006), où l'on observe (figure 6) que les pluies de petite saison sèche, en juillet-août, augmentent depuis 30 ans.

Ces différences d'évolution temporelle des précipitations vont avoir des répercussions contrastées sur les écoulements, du fait entre autre de la non linéarité des relations pluie-débit (détaillées plus loin).



**Figure 6**

Précipitations saisonnières sur deux bassins du Sud Cameroun en climat équatorial (Liéno *et al.*, soumis).

Ces changements de régime pluviométrique peuvent nous fournir des indications précieuses sur l'évolution de la dynamique atmosphérique et de ses liens avec les températures de surface de l'océan. Par exemple, l'augmentation des pluies de juillet-août proche de l'équateur est un indicateur d'une migration moins durable qu'avant de la ZITC vers le nord durant la saison des pluies d'Afrique de l'Ouest. De même la répartition des pluies plus importante durant la première saison des pluies sur les bassins équatoriaux sera mise en relation, au chapitre suivant, avec une migration hivernale moins prononcée vers le sud de la ZITC.

## **Corrélations avec des facteurs du climat**

### ***Facteurs océaniques, atmosphériques et continentaux***

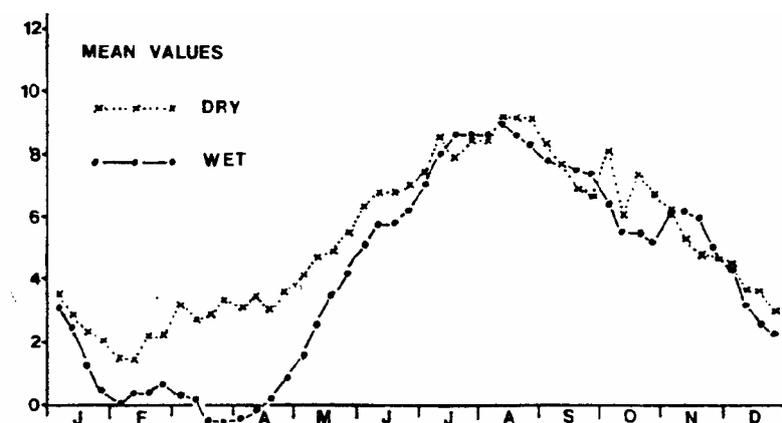
Afrique tropicale et Afrique équatoriale doivent leur humidité au passage plus ou moins prolongé du flux de mousson en provenance de l'Océan Atlantique Sud, qui est à l'origine des pluies dans toute l'Afrique de l'Ouest, et sur la façade occidentale de l'Afrique Centrale jusqu'au nord de l'Angola. Les variations climatiques en régions tropicales et équatoriales sont donc en partie liées aux variations d'activité de ce flux de mousson. La variabilité des précipitations peut être analysée à travers le suivi de paramètres atmosphériques et océaniques, intervenant dans ou sur les différentes phases d'activité du flux de mousson, depuis l'évaporation et la circulation des masses d'air au-dessus de l'Océan, jusqu'aux mécanismes générateurs de pluies sur le continent. Une bibliographie complète sur ce sujet figure dans ma thèse (Mahé, 1993), mais mériterait bien sûr d'être réactualisée. Le déroulement de ce chapitre met en évidence quelques résultats importants acquis durant cette phase de mes travaux, et pour quelques exemples fait référence à des travaux plus récents sur le sujet.

A partir des analyses du CEPMMT (Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme) de Reading (Grande Bretagne), on peut étudier la variabilité de plusieurs paramètres tels le contenu en vapeur d'eau et le flux de vapeur d'eau, qui donnent un aperçu de la "qualité" du flux de mousson ; les vents méridiens et zonaux sur plusieurs niveaux de pression, et en particulier les jets africain et tropical au-dessus de l'Afrique de l'Ouest, qui soufflent d'est en ouest, et dont on connaît par des études antérieures l'influence sur la pluviosité dans les régions sahélo-soudaniennes (voir par exemple Janicot, 1992 ou Fontaine et Janicot, 1992). La position en latitude de la zone intertropicale de convergence (ZCIT) le long du méridien 28°W, au milieu de l'Atlantique, renseigne également d'une manière originale sur l'état d'équilibre entre les masses d'air boréales et australes.

Comparativement avec les variables atmosphériques continentales, assez peu de travaux se sont intéressés aux relations entre l'atmosphère et la ZITC au-dessus de l'Atlantique et les pluies en Afrique (Hastenrath 1984, 1991). Sans ignorer ce qui a pu être écrit depuis 15 ans, on peut noter que récemment Gu et Adler (2006), intéressés par les relations entre TSM, ZITC et le climat global, repèrent la position de la ZITC à partir des estimations de pluies obtenues par satellite. Ils indiquent une relation entre la position en latitude de la ZITC et le signal ENSO uniquement entre avril et juillet. D'autres comme Janicot (Janicot *et al.*, 1996) ont déjà noté une relation entre les pluies en Afrique de l'Ouest et le signal ENSO.

Dans une recherche des causes possibles de la variabilité hydroclimatique en Afrique, nous avons analysé les migrations en latitude de la ZITC, les champs de paramètres atmosphériques (vents, vapeur d'eau), et océaniques (TSM) et en particulier l'upwelling équatorial Atlantique, pour des composites d'années « humides » et « sèches » en terme de pluviométrie continentale.

Concernant la ZITC, les résultats de l'étude sur 8 années permettent d'établir des climatologies et de distinguer clairement deux types de variations en période de déficit prononcé et en période moyenne à excédentaire en pluie au Sahel. Les migrations saisonnières latitudinales de la ZITC à 28°W présentent des caractéristiques différentes suivant la qualité de la saison des pluies à venir au Sahel (figure 7), qui contiennent une information prédictive (Citeau *et al.*, 1988a ; Mahé et Citeau 1993). Sultan et Janicot (2000) ont confirmé récemment par l'analyse spatio-temporelle de la distribution des pluies l'existence de deux phases distinctes dans la mise en place de la mousson sur l'Afrique de l'Ouest, articulées autour d'une migration rapide mi juin de la ZITC au-dessus du continent depuis une position proche de la côte nord du golfe de Guinée vers une position axée autour de 10°N. C'est le moment où l'on observe (figure 7) un arrêt de la progression vers le nord de la ZITC dans l'Atlantique intertropical (Mahé et Citeau, 1993). L'étude de l'évolution moyenne du contenu en vapeur d'eau de la colonne d'atmosphère entre 1000 et 300 hPa, sur la période 1980-1987, à partir des réanalyses du CEPMMT offre de plus quelques éléments d'interprétation supplémentaires (Mahé, 1993) : le mois de juin correspond à une pause également dans la courbe ascendante du contenu en vapeur d'eau au-dessus de Ndjamena, dans le Sahel oriental, et seulement à un très léger fléchissement au-dessus de Dakar, alors que dans le Sahel central, au-dessus de Bamako et Ouagadougou par exemple, le maximum de vapeur d'eau est déjà atteint début juin. Bien que basées sur des réanalyses anciennes du CEPMMT, fournies en 1988, les conclusions ci-dessus contiennent probablement une part informative intéressante.



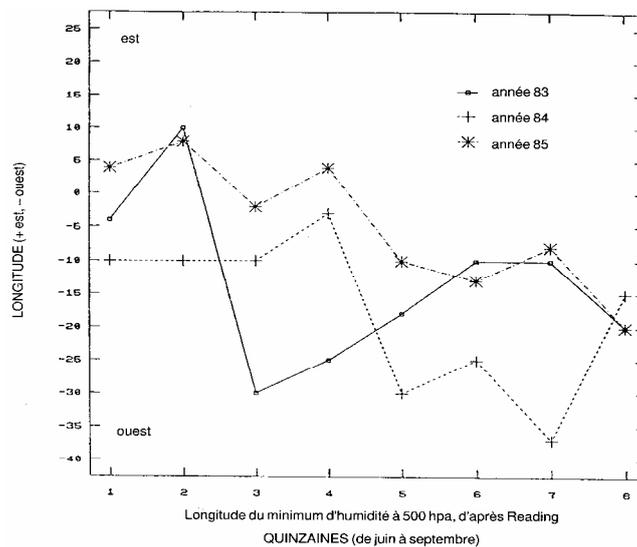
**Figure 7**

Positions hebdomadaires moyennes de la ZITC à 28°W en années sèches et humides au Sahel (Citeau *et al.*, 1988).

Nous avons également mis en évidence une relation entre l'intensité de l'activité pluvieuse du flux de mousson sur l'Afrique de l'Ouest (voire Centrale) durant l'été boréal, et la variation de la longitude du centre de l'anticyclone de Sainte Hélène à 500 hPa dans l'Atlantique austral, définie soit primitivement à partir des images de synthèse de contenu en vapeur d'eau issues des analyses du CEPMMT (Mahé et Citeau, 1993), soit plus tard à partir du canal vapeur d'eau de Météosat (Citeau *et al.*, 1991). En effet il a été remarqué en 1984 que pour une longitude plus occidentale (vers le Brésil) du centre de l'anticyclone, les pluies diminuaient fortement sur l'Afrique de l'Ouest sauf sur les côtes nord et est du golfe de Guinée, où par contre des pluies exceptionnelles étaient enregistrées ; le contraire étant également remarqué (figure 8). La reproductibilité de cette relation reste largement à démontrer, au-delà de la période 1980-1987, mais l'exemple frappant de 1984 illustre bien une situation qui devrait suggérer réflexion.

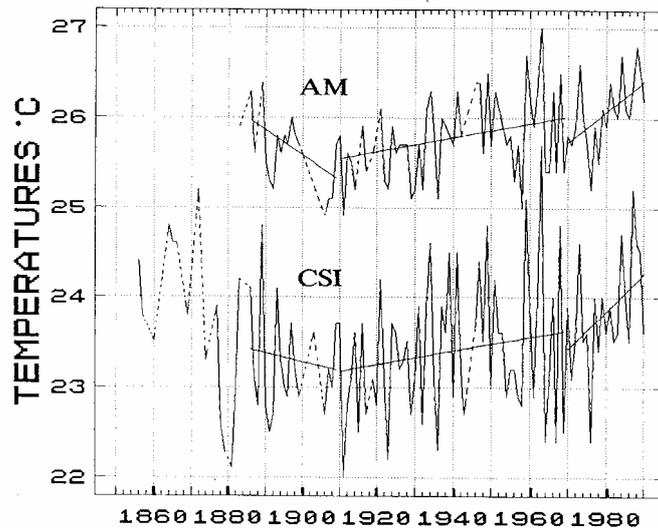
A partir des données de température de surface océaniques des navires marchands enregistrées depuis 1854, on a mis en évidence un réchauffement de l'Atlantique équatorial Est d'environ 0,8°C depuis 1910, ainsi qu'un affaiblissement accru de l'activité de l'upwelling équatorial depuis 1970 entre juillet et septembre principalement (figure 9), soit pendant la saison des pluies sahéliennes (Citeau *et al.*, 1988b).

Les corrélations entre pluies et TSM en Afrique de l'Ouest et Centrale (par unités climatiques (figure 1)) (Wotling *et al.*, 1995) montrent que le facteur de variabilité principal des pluies en Afrique de l'Ouest et Centrale est fortement lié à l'indice des TSM inter-hémisphériques de Folland *et al.* (1986) (figure 10). Le deuxième axe de variabilité met en évidence la limite de 10°N entre la zone côtière nord du golfe de Guinée et la zone soudano-sahélienne (figure 11), mise en évidence également par Janicot et Sultan (2001). L'apport de la télédétection et en particulier de l'imagerie Météosat a été prépondérant pour l'étude des TSM en Atlantique équatorial, en permettant de mieux définir l'évolution des structures océaniques. La méthode de restitution des TSM développée par l'équipe de l'UTIS à Dakar comportait un algorithme de correction atmosphérique original qui prenait en compte les données bateau (Demarcq *et al.*, 1989).



**Figure 8**

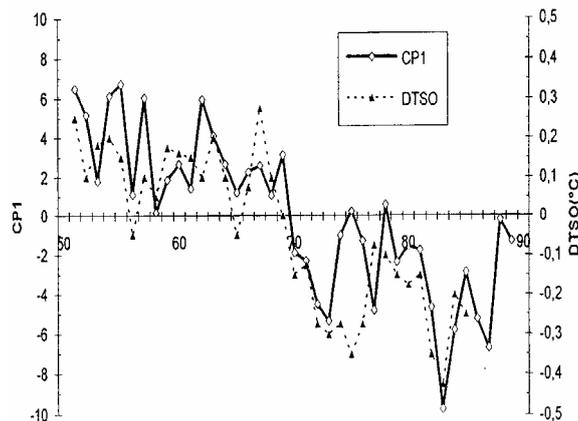
Longitudes du minimum de vapeur d'eau (d'après les analyses du CEPMMT), en valeurs bimensuelles de juin 1 à septembre 2, pour l'année 1984 comparée aux années 1983 (année sèche) et 1985 (année moyenne) (Mahé et Citeau, 1993).



**Figure 9**

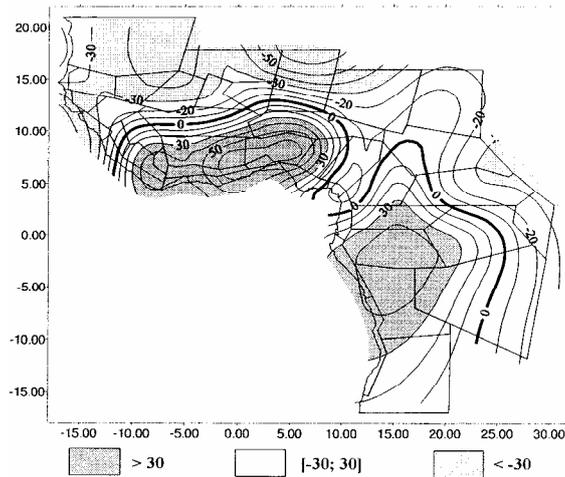
Températures de surfaces marines dans la zone d'étude de l'upwelling équatorial atlantique (2°N-2°S-8°W-12°W). Moyennes annuelles (AM) et indices de saison froide (CSI, moyenne des mois de juillet à septembre). Les traits discontinus indiquent une rupture dans les séries de données. Les tendances pour trois périodes sont tracées : 1886-1909 ; 1910-1969 ; 1970-1990 (Mahé et Citeau, 1993).

L'étude des vents zonaux et méridiens et de la vapeur d'eau issus des analyses journalières spatialisées du Modèle climatique du CEPMMT sur la période 1980 à 1987 a apporté des premiers éléments qui ont permis de confirmer le modèle de circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest schématisé dès les années 1980 par Fontaine et Janicot (1992). L'évolution des climatologies par quinzaines de chaque paramètre ainsi que leurs relations ont été analysées et critiquées. On met ainsi en évidence, entre autre, une relation entre la vitesse du Jet d'Est Africain (JEA, moyenne troposphère) et son contenu en vapeur d'eau, une relation entre flux de mousson et JEA en Afrique de l'Ouest à travers la variable vapeur d'eau, ainsi qu'une relation en altitude entre les régions équatoriales humides et le domaine soudano-sahélien du JEA (Mahé et Citeau, 1993).



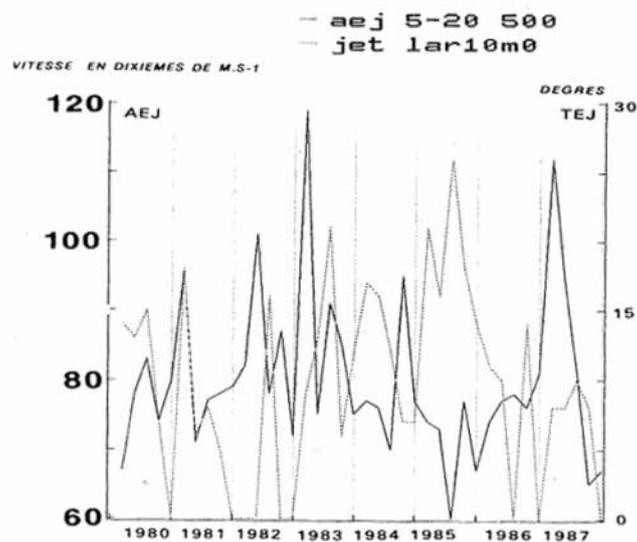
**Figure 10**

Evolution comparée de la première composante principale de l'ACP sur les 44 vecteurs régionaux avec la différence inter hémisphérique de température de surface des océans (DTSO, Folland *et al.*, 1896) (Wotling *et al.*, 1995).



**Figure 11**

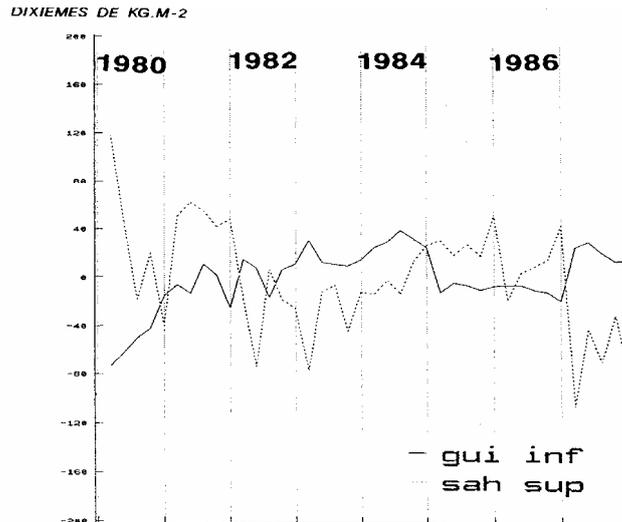
Courbes d'iso corrélations (x 100) traduisant l'influence dans l'espace de la deuxième composante principale de l'ACP sur les 44 vecteurs régionaux (Wotling *et al.*, 1995).



**Figure 12**

Comparaison de la vitesse de l'AEJ à 500 hPa (à gauche) et de l'évolution conjointe de la largeur entre les plages 10 m.s-1 du TEJ sur le méridien origine (à droite), respectivement en dixièmes de m.s-1 et degrés de latitude. 5 valeurs bimensuelles de juillet 1 à septembre 1 (Mahé et Citeau, 1993).

On a également mis en évidence que pour une année de pluies moyennes (1985) le JET (haute troposphère) est plus rapide que durant les années sèches au Sahel. La relation inverse est observée avec le JEA (figure 12). On a enfin noté une relation inversement proportionnelle du contenu atmosphérique en vapeur d'eau entre la moyenne troposphère au dessus du Sahel (AEJ) et la basse troposphère sur la côte nord du golfe de Guinée (flux de mousson) (figure 13).



**Figure 13**

Vapeur d'eau dans les niveaux Guinée Inf (1000-700 hPa) (trait continu) et Sahel Sup (700-300 hPa) (trait pointillé) de 1980 à 1987 à raison de 5 valeurs bimensuelles par an de juillet 1 à septembre 1 (Mahé et Citeau, 1993).

### 4.2.3 Situations « sèches » et « humides » au Sahel

Ces recherches ont abouti à l'établissement d'un modèle relationnel océan-atmosphère-continent, valable principalement pour les variations de pluies en domaine sahélo-soudanien, mais également dans une moindre mesure pour la côte nord du golfe de Guinée. Il met particulièrement en évidence les variations des paramètres étudiés pour deux situations climatiques "très déficitaire" ou "normale à excédentaire" au Sahel. Dans le cas d'une année sèche typique au Sahel les variables climatiques présentent la configuration suivante (et inversement pour une année humide) :

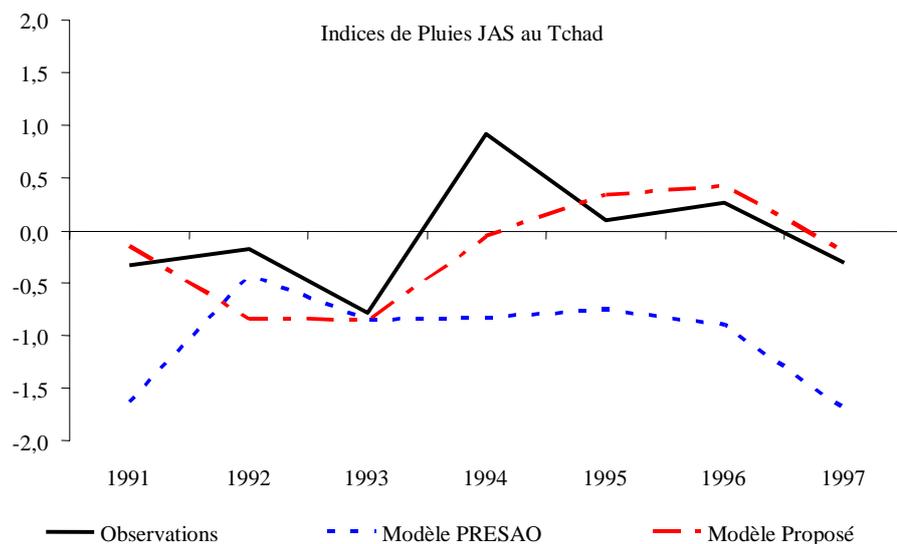
- position de la ZITC à 28°W très au nord de l'équateur en mars-avril, avec des passages rares voire inexistants au sud de l'équateur ;
- anomalie positive de TSM dans la région de l'upwelling équatorial Atlantique entre juillet et septembre ;
- le centre de l'anticyclone des Açores situé plus à l'ouest, vers les côtes brésiliennes ;
- anomalie positive du contenu en vapeur d'eau dans les basses couches de la troposphère (1000-700 hPa) sur la côte nord du golfe de Guinée ;
- anomalie négative du contenu en vapeur d'eau dans les hautes couches de la troposphère au dessus du Sahel (700-300 hPa) ;
- vitesse du JEA plus rapide (à 500 hPa, entre 5 et 20°N), 8 à 12 m.s<sup>-1</sup> au lieu de 6 à 8 m.s<sup>-1</sup> ;
- un JET axé plus au nord (9-18°N au lieu de 3-9°N), plus large et moins rapide.

Les derniers travaux de Citeau *et al.* (2006) analysent des données issues du sondeur atmosphérique vertical TIROS, sensible à la vapeur d'eau atmosphérique entre 500 et 250 mba. Ils montrent une corrélation négative significative (-0.66) entre les pluies au Sahel et l'humidité dans la haute troposphère au Sahel (10°N-20°N, 10°W-10°E), ce qui confirme les conclusions de la thèse de Mahé (1993). Ceci tendrait à penser qu'en situation humide au Sahel, l'humidité moyenne en haute troposphère diminuerait, en association avec un fort TEJ et un AEJ plus faible, et peut-être également du fait d'une condensation plus importante de vapeur d'eau dans les phénomènes convectifs.

### 4.2.4 Prévision saisonnière des pluies

Compte tenu de la forte corrélation entre les pluies au Sahel et l'humidité atmosphérique de haute troposphère, Citeau *et al.* (2006) suggèrent que cette variable soit utilisée pour améliorer la qualité des prévisions saisonnières des pluies au Sahel. Fontaine *et al.* (1999) et Philippon et Fontaine (2002) suggèrent déjà une amélioration en intégrant l'énergie statique humide aux prévisions basées sur les TSM du PRESAO. Hamatan *et al.* (2004) réalisent une évaluation des PRESAO (ACMAD-AGRHYMET) réalisées à Niamey depuis 1998 et indiquent également des améliorations possibles des scores de prévision des pluies et des débits (figure 14) en modifiant une zone océanique choisie pour les TSM en Atlantique équatorial, pour qu'elle soit plus en relation avec l'apparition de l'upwelling équatorial atlantique (2°N-2°S-8°W-12°W). Ils indiquent également que les scores de prévision saisonnière sont jusqu'à présent relativement modestes et ne permettent pas à l'heure actuelle de réaliser des prévisions diffusables par les services nationaux, qui pourraient guider efficacement les populations dans leurs choix de gestion de l'eau ou de calendrier agricole.

Il serait très souhaitable de pouvoir rapidement modifier les algorithmes de prévision sur lesquels sont basées les prévisions du PRESAO, à partir des récentes améliorations possibles démontrées par plusieurs études, et de tester leur efficacité a posteriori dans un premier temps, avant d'en faire un outil diffusable.



**Figure 14**

Evaluation des modèles de prévision saisonnière des pluies. Indices de pluie Juillet-Août-Septembre au Tchad de 1991 à 1997 (Hamatan *et al.*, 2004).

Les relations entre les TSM dans le golfe de Guinée (upwelling équatorial atlantique) avec les pluies en Afrique de l'ouest intriguent depuis longtemps par l'apparence qu'elles donnent d'une relation bi-univoque, largement utilisée dans les modèles de prévision de la qualité de la saison des pluies au Sahel, comme dans le PRESAO par exemple. Le long des côtes du golfe de Guinée, il y a de plus une certaine concordance entre l'apparition saisonnière de TSM refroidies et la diminution des précipitations, phénomène qui s'estompe vers l'intérieur des terres (Mahé et Hisard, 2000).

L'hydroclimat océanique côtier du golfe de Guinée possède une cohérence spatio-temporelle logique que le simple déterminisme par la migration nord-sud de la ZITC ne semble pas capable de lui donner. Cette cohérence découle de la propagation, d'abord le long de l'équateur vers l'est, puis de façon réfléchie et symétrique vers les pôles le long des côtes, d'ondes d'upwelling ou de downwelling (Moore *et al.*, 1978 ; Servain *et al.*, 1982 ; Picaut, 1983), qui trouvent leur origine

dans l'Atlantique occidental, au large du Brésil, sous l'impulsion de l'amplification saisonnière du vent, accompagnant la migration vers le nord de la ZITC (Servain et Seva, 1987). Comme le montre la figure 7, certaines années la remontée de la ZITC est très rapide en avril, correspondant à un déclenchement des vents quasi-impulsionnel, d'autres années ce mouvement est beaucoup plus lent. Les modalités de déplacement de la ZITC et du renforcement des vents dans l'Atlantique occidental ont une grande importance sur la variabilité de la saison des pluies de mars à mai en Afrique Centrale voisine de l'Atlantique. Ce sujet mériterait des développements importants pour la qualité de la prévision des pluies en Afrique Centrale.

## 4.2.5 Conclusion

Cette connaissance approfondie des régimes climatiques liés à la mousson ouest-africaine permet d'éclairer utilement notre compréhension de l'évolution des relations pluie-débit. Pour les régions d'Afrique centrale et équatoriale à deux saisons des pluies, les changements climatiques provoquent des modifications dans la répartition saisonnière des pluies, qui vont avoir des répercussions très importantes sur les débits, décrite dans le chapitre suivant, prouvant d'une part que l'Afrique Centrale n'est pas épargnée par les changements climatiques depuis 30 ans, et d'autre part, que même sous l'équateur où les pluies sont quasi-ininterrompues et l'environnement forestier toujours vert, les relations pluie-débit peuvent considérablement être altérées par des petits changements de régime pluviométrique. Concernant l'Afrique de l'Ouest, il apparaît de plus en plus certain qu'il y a une relation importante entre le recyclage de l'humidité au-dessus des régions tropicales humides et la pluviométrie au Sahel, et par conséquent que la déforestation et autres changements d'états de surface dans les pays riverains du golfe de Guinée joue un rôle qu'il faudra clarifier dans les années à venir si l'on veut mieux comprendre la variabilité des pluies au Sahel.

Les régimes hydrologiques subissent la variabilité des pluies de façon non linéaire, en fonction de facteurs liés à la distribution spatio-temporelle des pluies principalement, mais aussi suivant l'évolution de l'occupation du sol et des états de surface, ceci variant suivant les régions étudiées. L'examen approfondi de ces relations est l'objet du chapitre suivant.

## 4.3 Variabilité des débits en Afrique de l'Ouest et Centrale

L'étude de la variabilité des écoulements renseigne sur la transformation du signal pluie à la surface continentale, les bassins-versants étant à la fois des intégrateurs des modifications climatiques, comparativement aux informations très ponctuelles issues des postes pluviométriques, mais également des lieux d'échanges complexes entre l'eau, le sol et l'atmosphère, qui rendent la modélisation des relations pluie-débit très difficile.

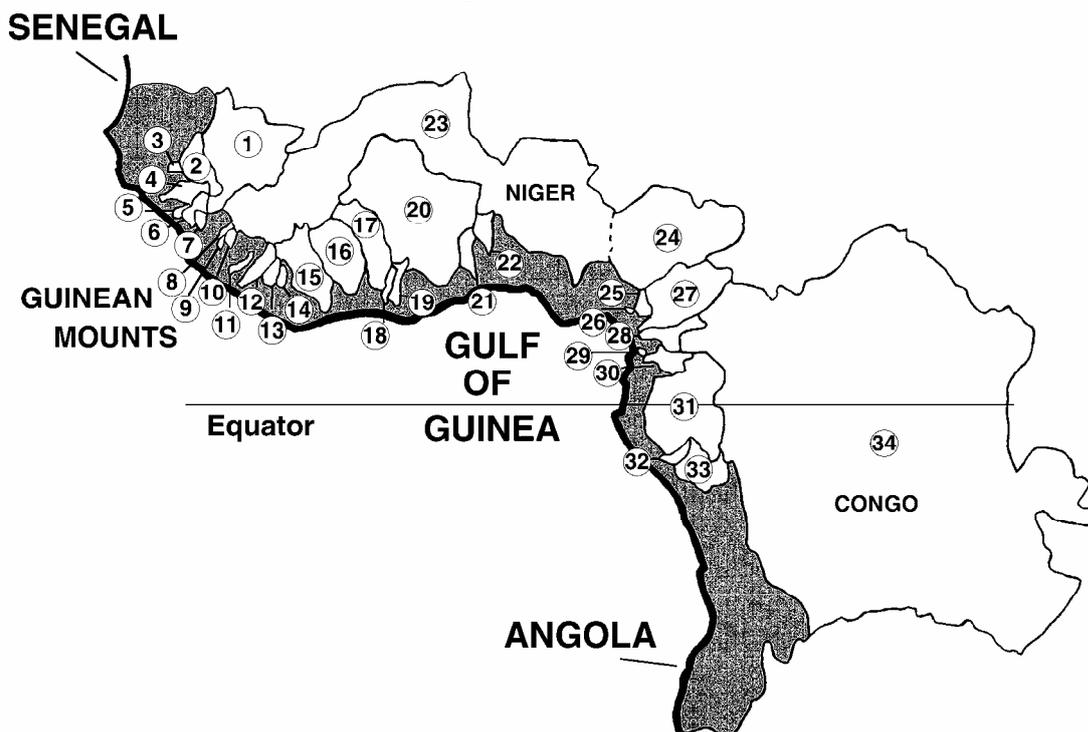
La connaissance des débits des rivières est utile à de nombreux usages. C'est tout d'abord une variable essentielle pour l'étude des ressources en eau de surface, à l'échelle des bassins versants, que ce soit pour estimer les volumes écoulés vers les océans ou les lacs, ou qui pourront remplir des retenues d'eau pour l'eau potable ou l'électricité, ou que ce soit pour calculer les niveaux et les périodes de retour de crues exceptionnelles nécessaires au dimensionnement d'ouvrages. L'étude des basses eaux nous renseigne également sur l'état des nappes phréatiques, qui participent dans une majorité des cas à l'écoulement. Dans le bilan hydrologique annuel simple, l'évapotranspiration réelle (ou déficit hydrologique) est la différence entre la somme des pluies tombées sur le bassin et les écoulements de surface, plus ou moins une variation de stock,

considérée généralement comme négligeable sur un cycle annuel. L'évolution du coefficient de ruissellement, rapport de l'écoulement sur les pluies, est extrêmement variable à toutes les échelles de temps (journalier à annuel) et souligne toute la difficulté de l'étude des relations pluie-débit. Dans le bilan hydrologique mensuel on ajoute un réservoir sol qui se remplit et complète l'évapotranspiration potentielle avant l'écoulement de surface. Cette valeur de stock d'eau dans le sol a longtemps été considérée comme constante pour un climat et un sol donnés, et on montrera que les changements climatiques et anthropiques provoquent des modifications importantes du niveau de ce stock d'eau, responsable de la variabilité importante de la relation pluie-débit observée dans la région au cours du siècle dernier.

### 4.3.1 Bilans hydrologiques à l'échelle sous-continentale

#### Bilans d'apports en eaux douces à l'océan

Les bilans hydrologiques annuels ou par décennies ont été calculés pour la période 1951-1989 aux exutoires de 34 fleuves principaux ; les apports des zones côtières, bassins non jaugés, ont également été calculés car ils représentent environ 1/5ème du total des écoulements (figure 15, tableau 2) (Mahé, 1998 ; Mahé et Olivry, 1999). Ils ont permis l'établissement de la première chronique 1951-1989 des apports annuels d'eau douce à l'océan atlantique entre le Sénégal et l'Angola, ainsi que sa décomposition régionale.

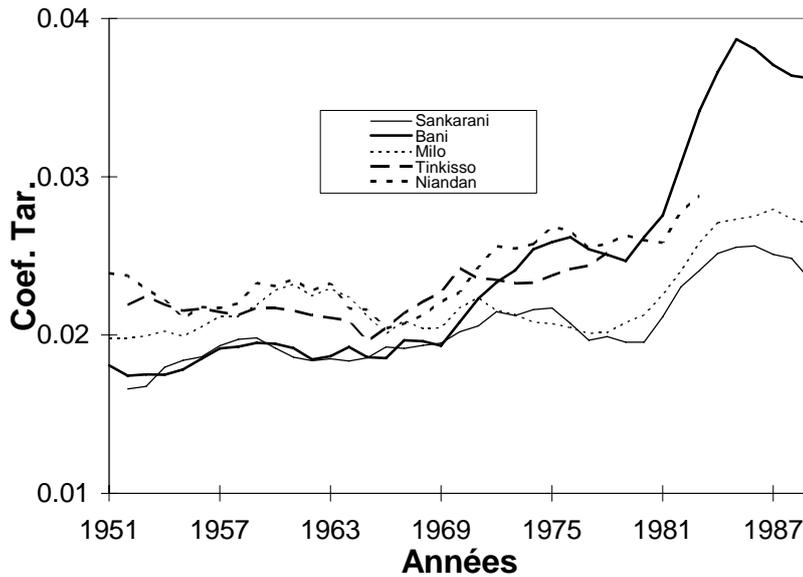


**Figure 15**

Les 34 principaux bassins-versants étudiés sur la période 1951-1989.  
En sombre les zones côtières non contrôlées sur la période (voir tableau 2) (Mahé et Olivry, 1999).

Ces bilans hydrologiques indiquent que toute l'Afrique de l'Ouest et Centrale est soumise à la sécheresse, à des degrés divers, mais que les effets de celle-ci sont plus importants en Afrique de l'Ouest. La diminution des débits y est en effet beaucoup plus forte que celle des pluies, en

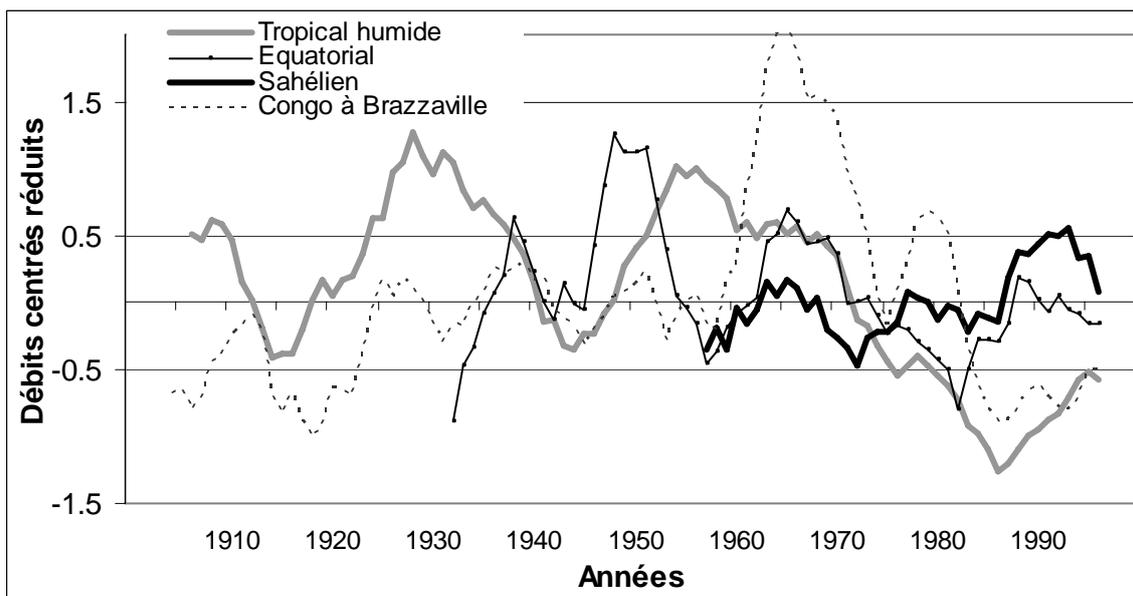
relation avec l'augmentation des coefficients de tarissement des rivières de la région (Olivry, 1983 ; Olivry *et al.*, 1993 ; Bricquet *et al.*, 1997a ; Mahé et Olivry, 1999)(figure 16).



**Figure 16**

Coefficients de tarissement pour les principaux affluents du fleuve Niger de 1951 à 1989 en  $\text{jour}^{-1}$  (Bricquet *et al.*, 1997)

La variabilité des écoulements depuis le début du siècle (figure 17) est de même sens que celle des pluies, sauf pour le Sahel. Tous les cours d'eau au sud de 750 mm voient leurs débits diminuer, mais les cours d'eau équatoriaux ne présentent pas dans l'ensemble de tendance à long terme à la baisse (Liéno *et al.*, 2006). Le fleuve Congo, dont des affluents sont soumis aux régimes tropicaux nord et sud présente une baisse plus prononcée des écoulements durant les 30 dernières années, et possède un régime particulier (Mahé, 1995 ; Laraque *et al.*, 2001). Le maximum du Congo au début des années 1960 correspond à une synchronisation exceptionnelle des crues des deux hémisphères, du fait de décalage dans les saisons des pluies.



**Figure 17**

Variations des écoulements pour les 4 grandes zones hydro-climatiques, de 1901 à 2000 (Mahé *et al.*, 2005).

REGION	N°	RIVER	GAUGING STATION	BASIN SURFACE KM <sup>2</sup>	% OF TOTAL SURFACE	Observation Period
Senegal-Fouta	1	SENEGAL	Bakel	218 000	2.83	1951-1989
Senegal-Fouta	2	GAMBIE	Gouloumbo	42 200	0.55	1951-1989
Senegal-Fouta	3	CASAMANCE	Kolda	3 700	0.05	1967-1986
Senegal-Fouta	4	CORUBAL	Saltinho Amont	23 800	0.31	1977-1989
Senegal-Fouta	5	FATALA	Bindan	5 100	0.07	1971-1986
Senegal-Fouta	6	KONKOURE	Amaria	16 200	0.21	1951-1989
Senegal-Fouta		<i>Ungauged catchments</i>		230 000	3.0	
Guinee	7	KOLENTE	Tassin	6 600	0.09	1954-1980
Guinee	8	ROKEL	Bumbuna	4 000	0.05	1970-1978
Guinee	9	PAMPANA	Matatota	2 400	0.03	1972-1977
Guinee	10	SEWA	Jaïama	6 900	0.09	1972-1977
Guinee	11	MANO	Mano Mines	5 500	0.07	1951-1979
Guinee	12	ST PAUL	Mount Coffe	21 400	0.28	1958-1978
Guinee	13	ST JOHN	St John Falls	11 400	0.15	1958-1978
Guinee	14	CESTOS	Sawolo	4 600	0.06	1960-1979
Guinee		<i>Ungauged catchments</i>		120 000	1.6	
Nordgolf	15	SASSANDRA	Gaoulou	70 600	0.92	1953-1986
Nordgolf	16	BANDAMA	Daboitié	60 000	0.78	1951-1985
Nordgolf	17	COMOE	Mbasso	70 500	0.92	1951-1986
Nordgolf	18	BIA	Ayamé	10 000	0.13	1951-1989
Nordgolf	19	TANO	Alenda	16 000	0.21	1956-1978
Nordgolf	20	VOLTA	Senchi Halcrow	394 000	5.11	1951-1979
Nordgolf	21	MONO	Tététou	20 500	0.27	1952-1988
Nordgolf	22	OUEME	Pont de Savé	23 600	0.31	1951-1984
Nordgolf		<i>Ungauged catchments</i>		210 000	2.7	
Niger	23	NIGER	Onitsha	1 100 000	14.28	1951-1989
Adamaoua	24	SANAGA	Edéa	132 000	1.71	1951-1980
Adamaoua	25	WOURI	Yabassi	8 200	0.11	1951-1984
Adamaoua	26	MUNGO	Mundame	2 400	0.03	1952-1984
Adamaoua		<i>Ungauged catchments</i>		215 000	2.8	
Equateur	27	NYONG	Dehane	26 400	0.34	1951-1984
Equateur	28	KIENKE	Kribi	1 100	0.01	1956-1983
Equateur	29	NTEM	Nyabessan	26 300	0.34	1951-1984
Equateur	30	OGOOUE	Lambaréné	203 000	2.64	1951-1989
Equateur	31	NYANGA	Tchibanga	12 400	0.16	1954-1982
Equateur	32	KOUILLOU	Sounda	56 600	0.73	1952-1985
Equateur		<i>Ungauged catchments</i>		150 000	2.0	
Congo	33	CONGO	Brazzaville	3 550 000	46.08	1951-1989
Angola		<i>Ungauged catchments</i>		551 000	7.0	

**Tableau 2**

Principales données géographiques des 34 fleuves étudiés (Mahé et Olivry, 1999).

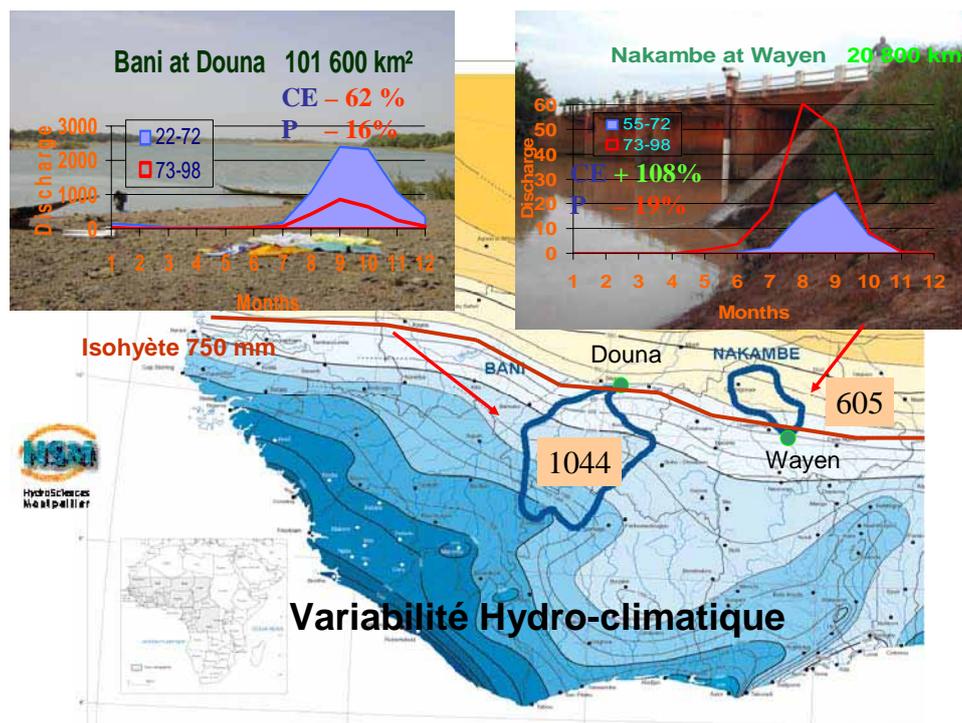
Paradoxalement, en Afrique de l'Ouest la variabilité des pluies est exacerbée au niveau du sol par la nature non-linéaire des relations pluie-débit. Au nord de l'isohyète 750 mm de pluies annuelles, les écoulements des cours d'eau sahéliens augmentent (figure 18, tableau 3) (Mahé *et al.*, 2005a).

Au sud, autre paradoxe, les débits diminuent beaucoup plus que les pluies. Les deux exemples donnés en figure 18 sont les plus extrêmes : une diminution de 62% du coefficient de ruissellement du fleuve Bani à Douna au Mali pour une baisse de pluie de 16%, et une augmentation de coefficient d'écoulement de 108% du Nakambé à Wayen au Burkina-Faso pour une baisse de pluie de 19% (Mahé *et al.*, 2005b).

Rivière	Station	Climat	Coeff. d'écoul. av. 1972 %	Coeff. d'écoul. ap.1972 %	Ratio ap./av. 1972 %	Pluie ap./av. 1972 %
Nakambe	Wayen	Sahélien	1.4	2.9	<b>108</b>	-19
Gorouol	Koriziena	Sahélien	4.5	8.8	<b>95</b>	-18
Gorouol	Dolbel	Sahélien	6.6	8.6	<b>32</b>	-20
Gorouol	Alcongui	Sahélien	1.6	2.2	<b>40</b>	-18
Dargol	Tera	Sahélien	6.2	8.4	<b>37</b>	-20
Dargol	Kakassi	Sahélien	3.9	6.2	<b>57</b>	-19
Sirba	Garbe Kourou	Sahélien	2	3.2	<b>61</b>	-17
Goroubi	Diongore	Sahélien	2.3	2.3	<b>0</b>	-13
Diamangou	Tamou	Sahélien	3.5	2.3	<b>-35</b>	-14
Tapoa	Campement W	Soudano-guinéen	0.9	1	<b>10</b>	-14
Mékrou	Barou	Soudano-guinéen	11.5	7.3	<b>-37</b>	-8
Bani	Douna	Soudano-guinéen	15.8	6	<b>-62</b>	-16

**Tableau 3**

Coefficients d'écoulement de rivières sahéliennes et soudano-guinéennes, avant et après 1972, ratio, et ratio de pluie sur les bassins avant et après 1972 (Mahé *et al.*, 2003).



**Figure 18**

Pluies et débits pour 2 rivières d'Afrique de l'Ouest, avant et après la rupture climatique (Mahé, 2004).

### 4.3.2 Etudes locales par bassins-versants

A des échelles locales, nous avons travaillé sur plusieurs bassins versants : Ogooué, Congo, Sénégal, Niger, Cameroun, etc. Parmi ces travaux ceux sur le fleuve Niger illustrent plusieurs aspects particuliers de l'hydrologie tropicale et des problématiques de développement : relations

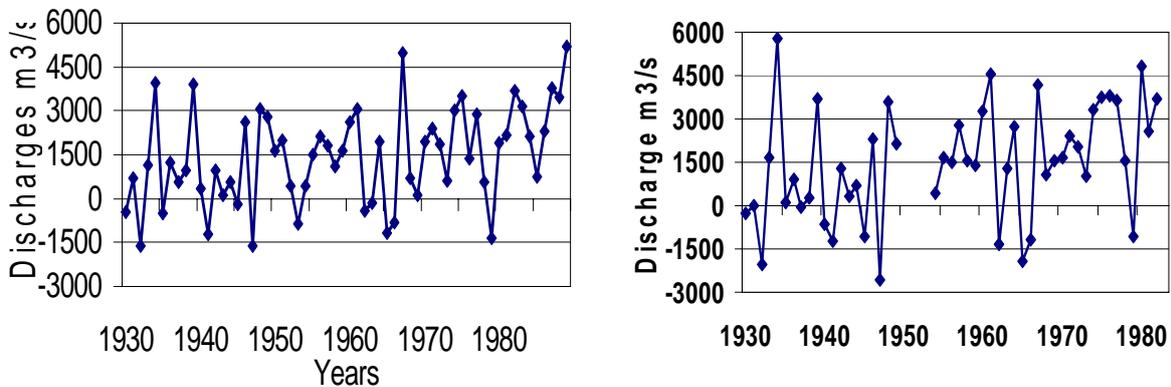
eaux de surface-eaux souterraines, prévision des surfaces inondées, dégradation des états de surface et occupation du sol, qualité des eaux,...

Les études par bassins-versants mettent en évidence différents types d'évolution des relations pluie-débit suivant les contraintes climatiques et anthropiques.

## Fleuve Ogooué

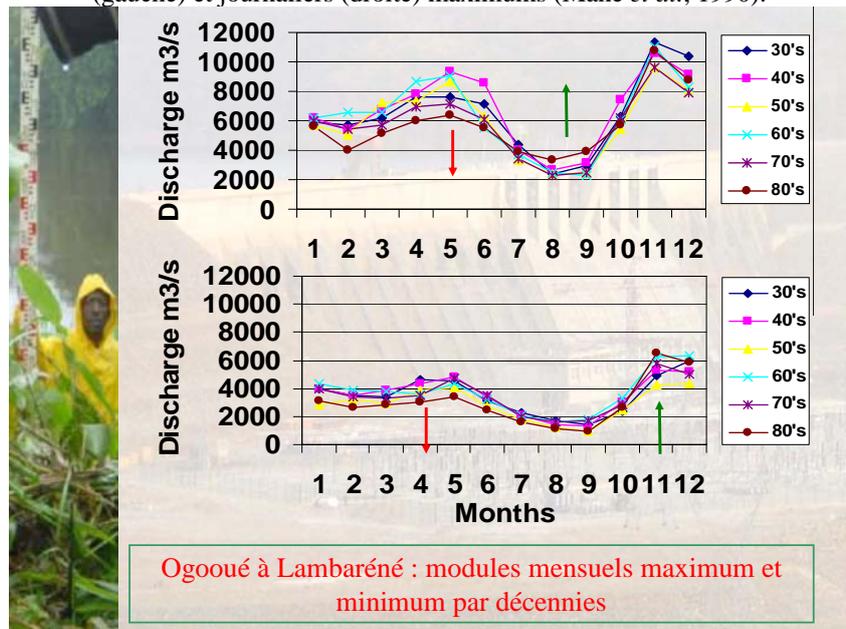
C'est historiquement sur ce fleuve, au bassin-versant presque exclusivement situé en territoire gabonais, qu'a été mise en évidence pour la première fois l'évolution différente des crues de printemps et automne (boréals) à l'équateur (Mahé *et al.*, 1990). Curieusement la crue de printemps est de plus en plus faible depuis les années 1960 (figure 19), dans une proportion que n'explique pas un fléchissement seulement léger des pluies saisonnières.

La figure 20 indique que ce sont les débits maximums et minimums de tous les mois de printemps qui diminuent. Les mêmes observations sont effectuées pour les débits du Kouilou à la station de Sounda au Congo (Bricquet *et al.*, 1997a). On y voit également que les débits de grande saison sèche (août et septembre) augmentent durant les années 1980, comme c'est le cas pour les rivières du sud Cameroun (tableau 4).



**Figure 19**

Ogooué à Lambaréné (Gabon, 203 000 km<sup>2</sup>), différence entre débits mensuels saisonniers (gauche) et journaliers (droite) maximums (Mahé *et al.*, 1990).



**Figure 20**

Ogooué à Lambaréné (Gabon, 203 000 km<sup>2</sup>), débits mensuels maximums (haut) et minimums (bas) par décennies (d'après Mahé *et al.*, 1990).

## Rivières Camerounaises

En plus de la diminution des modules mensuels de grande saison sèche déjà évoquée, le tableau 4 indique que les modules de printemps diminuent sur les 3 bassins étudiés, comme c'est le cas pour l'Ogooué, depuis les années 1970, tandis que l'évolution est plutôt à la hausse pour les modules d'automne.

Bassin versant	décennie	Module annuel (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Ecart à la moyenne (%)	débit de printemps, mamj (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Ecart à la moyenne (%)	débit d'automne, son (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Ecart à la moyenne (%)
Nyong	1950	144,3	-2,3	103,3	7,4	229,6	-10,7
	1960	165,6	12,1	110,4	14,8	276,8	7,7
	1970	134,3	-9,1	88,4	-8,2	245,7	-4,4
	1980-87	146,5	-0,8	82,8	-14,0	276,0	7,4
	1990-91	168,1	13,8	99,2	3,1	314,3	22,3
	1998-01	134,8	-8,7	64,3	-33,2	241,0	-6,2
Kienké	1955-59	50,4	1,6	45,0	5,8	92,0	-7,7
	1960	51,4	3,7	48,0	13,0	101,0	1,4
	1970	49,0	-1,2	40,8	-4,0	103,8	4,2
	1980-87	47,9	-3,3	38,1	-10,2	99,5	-0,2
	1990-91	49,2	-0,8	40,5	-4,6	102,0	2,4
Ntem	1953-59	249,8	-5,5	246,9	-1,4	412,4	-11,2
	1960	322,2	21,8	328,4	31,2	518,0	11,6
	1970	244,1	-7,7	230,8	-7,8	444,3	-4,3
	1980	241,6	-8,6	195,3	-22,0	482,4	3,9

**Tableau 4**

Modules annuels et saisonniers pour 3 bassins du sud Cameroun (Liéno *et al.*, soumis).

## Fleuve Congo

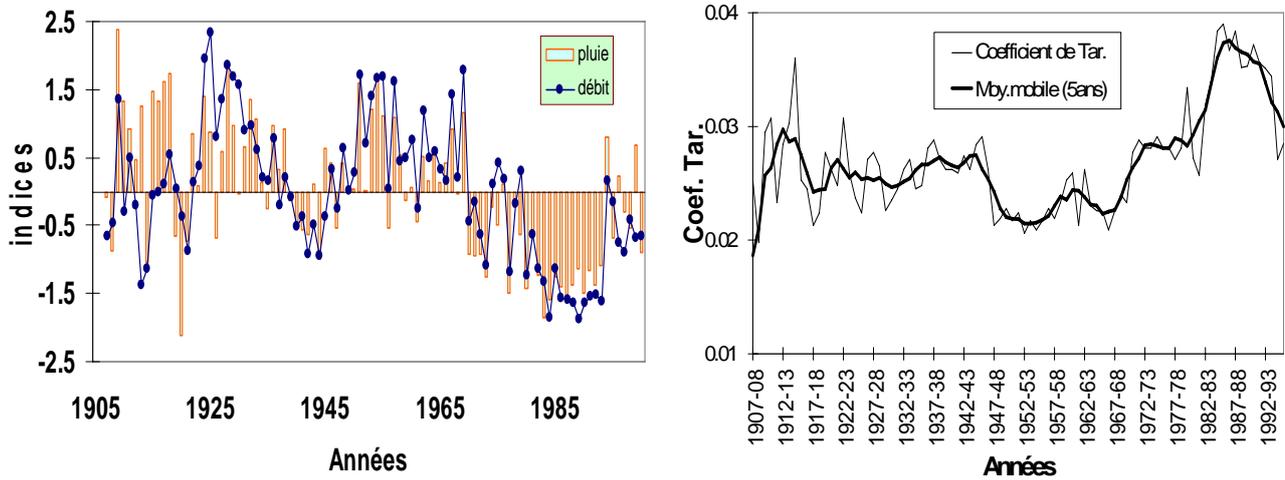
Le bassin du fleuve Congo dépasse 3 millions de km<sup>2</sup>, ce qui représente près de la moitié du bassin-versant « global » tributaire de la façade atlantique de l'Afrique. Il y a en permanence une région du bassin du Congo où la saison des pluies est à son maximum, ce qui assure à ce grand fleuve un débit toujours très important et une faible variabilité inter-mensuelle. Néanmoins, la diversité des régimes climatiques à l'origine de son régime hydrologique particulier lui confère une sensibilité aux évolutions climatiques des deux hémisphères, en particulier de celle de la partie nord de son bassin, sensible aux variations climatiques liées à la mousson d'Afrique de l'Ouest et à la diminution des pluies depuis 1970, accentuée dans les années 1980 (Laraque *et al.*, 2001)(figure 17).

## Fleuve Niger

La série des débits du fleuve Niger est une des plus anciennes d'Afrique, et on peut constater depuis 1907 (figure 21) une grande variabilité naturelle du régime interannuel, marquée depuis la fin des années 1960 par une diminution prolongée des débits, et surtout par une augmentation très importante du coefficient de tarissement ( $Q_t = Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)}$ ) (Roche, 1963).

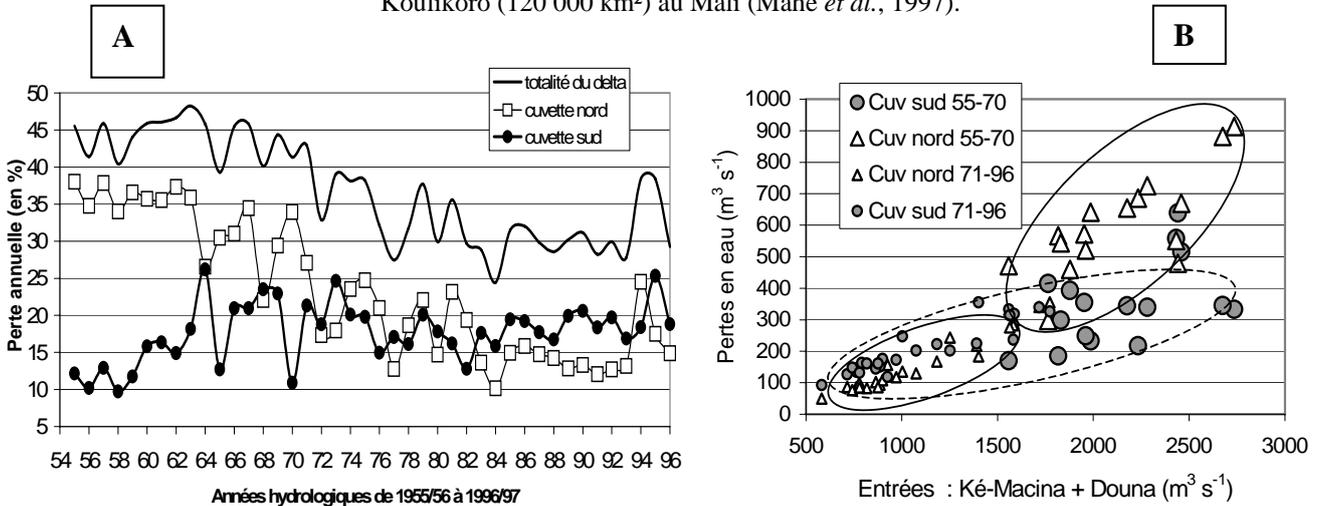
La baisse des débits est amplifiée par rapport à celle des pluies depuis les années 1970, de telle sorte que pour une même pluie, l'écoulement est très inférieur depuis la sécheresse par

rapport à la « crue équivalente » avant 1970, comme l'illustre le cas de 1994 (figure 21). On met également en évidence un changement de fonctionnement hydrologique du Delta Intérieur depuis la sécheresse (figure 22) (Mahé *et al.*, 2006b ; Mahé *et al.*, 2002a) : les pertes en eau dans la cuvette Sud deviennent plus importantes qu'au Nord à partir du milieu des années 1970, en relation avec une alimentation très réduite des lacs périphériques, alors que dans le Sud, même en année de faible hydraulicité, l'inondation couvre une surface minimum.



**Figure 21**

Pluies, débits (1907-2000) et coefficients de tarissement (1907-1993) sur le fleuve Niger à Koulikoro (120 000 km<sup>2</sup>) au Mali (Mahé *et al.*, 1997).



**Figure 22**

**A** : Comparaison des pertes annuelles en eau entre l'entrée et la sortie du delta avec les pertes de la « cuvette sud » et de la « cuvette nord », les pertes en eau étant entendues comme la différence entre les volumes écoulés entrants et sortants.

**B** : Pertes annuelles en eau (en m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) dans les cuvettes sud et nord du delta intérieur du Niger pour les périodes avant et après sécheresse (respectivement 1955-1970 et 1970-1996). Enveloppe en pointillés pour la cuvette sud ; enveloppes en trait plein pour la cuvette nord (d'après Mahé *et al.*, 2006b).

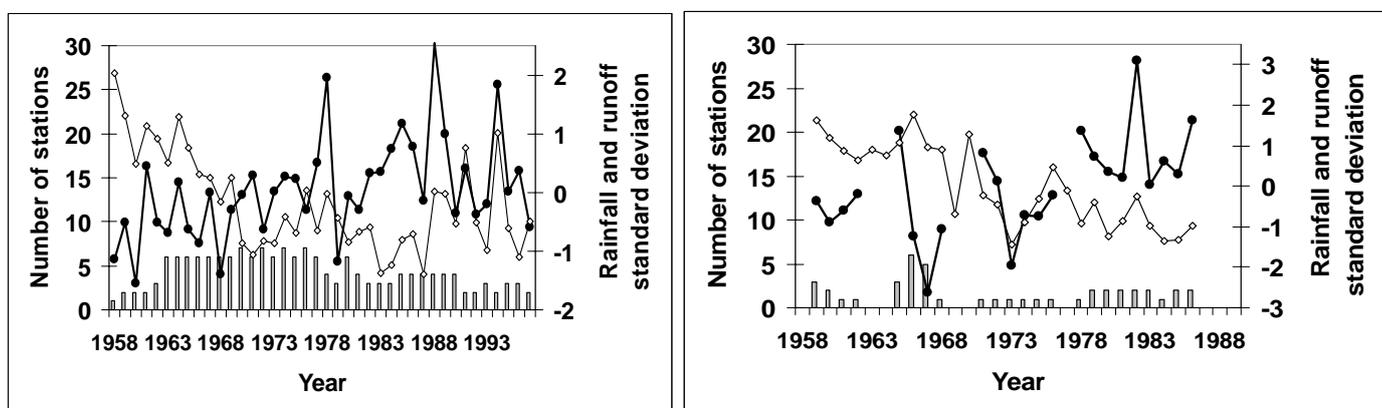
Enfin, Amani et Nguetora (2002) et Mahé *et al.* (2003) ont montré que le régime hydrologique du fleuve est modifié depuis les années 1980, par une augmentation des apports de rive droite en provenance du Burkina-Faso : la crue « soudano-guinéenne », retardée par le delta

intérieur, en provenance de Guinée et du Mali et formée au cours de la saison des pluies de l'année N-1 a toujours été depuis 1923 plus importante en début d'année N que la crue « sahélienne » de l'année N-1 formée durant la saison des pluies. A partir de 1980 il est fréquent d'observer que la crue sahélienne excède en débit la crue « soudano-guinéenne ». Ceci illustre les deux paradoxes hydrologiques en Afrique de l'Ouest : la diminution amplifiée des écoulements en milieu soudano-guinéen, et l'augmentation des débits en milieu sahélien.

### Rivières sahéliennes du Burkina-Faso, du Niger et de Mauritanie

Peu de rivières sahéliennes ont été observées durant de longues périodes de temps. Les premières investigations sur des rivières sahéliennes datent du milieu des années 1950, dans le cadre de suivis expérimentaux de quelques années. La plupart des stations suivies ont été momentanément abandonnées, pour n'être réactivées qu'au début de la décennie 1960 lors de la mise en place des réseaux hydrologiques nationaux avec l'aide de la France et de l'ORSTOM. Des suivis périodiques ont concerné ainsi la Mauritanie, le Burkina-Faso et le Niger principalement, ainsi que le nord Cameroun. Les suivis les plus longs et complets dans le temps concernent certaines stations du nord du Burkina-Faso sur le haut bassin de la Volta, et le nord-est du Burkina-Faso/l'ouest du Niger pour des affluents de rive droite du fleuve Niger.

Ce sont ces stations qui ont fonctionné de façon plus ou moins continue sur la période 1960-1995, qui permettent le tracé de l'évolution des débits de la région « Sahel » sur la figure 17. Ces résultats sont confirmés par l'analyse récente d'observations anciennes sur des cours d'eau du sud de la Mauritanie, affluents au fleuve Sénégal (figure 23, Mahé, 2006) : Gorgol Blanc, Gorgol Noir, Niordé et Ghorfa.



**Figure 23**

Standard deviation for rainfall (white dots) and runoff coefficients (black dots) variability for Sahelian river basins of Burkina-Faso and Niger (left, bars: number of basins per year –max: 7) ; and of Mauritania (right, bars: number of basins per year –max: 8) (Mahé, 2006\*).

### 4.3.3 Variabilité des relations pluie-débit

#### Afrique équatoriale

En Afrique Equatoriale on n'observe pas de tendance généralisée à une diminution des pluies depuis les années 1970 ou 1980. La baisse des pluies est le plus souvent ponctuelle et entraîne une baisse des débits peu amplifiée par rapport à celle des pluies. Malgré tout les régimes

\* Mahé G. (2006) The impacts of land use/land cover change and climate variability on the hydrology of the Sahel. AISH Pub n° 308.

hydrologiques de certains cours d'eau équatoriaux sont très sensibles à des petits changements dans la répartition intra-saisonnière des pluies. Ceci indique d'une part que la variabilité hydroclimatique est importante à l'équateur, et d'autre part reflète un changement durable et à grande échelle de la circulation atmosphérique tropicale/équatoriale en Afrique au cours des dernières décennies.

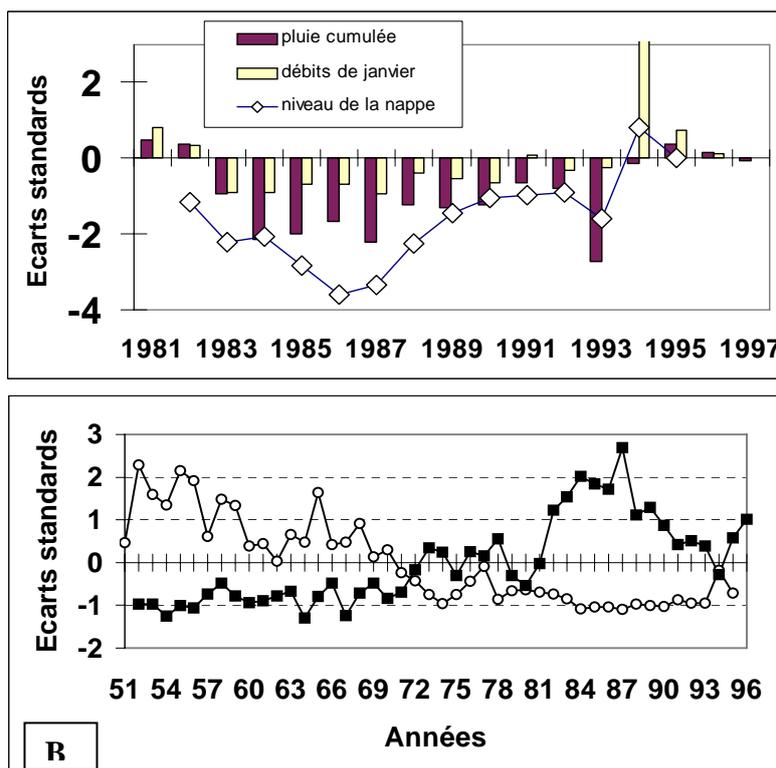
### **Afrique tropicale humide**

En région tropicale non sahélienne, au sud de l'isohyète 800 mm, les écoulements souterrains constituent une part non négligeable de l'hydrogramme. On observe pour toutes les rivières des tarissements plus rapides depuis la sécheresse, ce qui traduit une diminution du niveau moyen des nappes. Le cumul de déficits de pluie engendre une baisse importante des apports en eaux souterraines, qui se répercute sur les régimes hydrologiques annuels moyens : les pointes de crues sont moins fortes et écourtées, les étiages sont plus rapides et plus sévères. (Orange *et al.*, 1997 ; Sangaré *et al.*, 2002 ; Ouedraogo *et al.*, 2002).

La baisse des nappes a été confirmée pour le Bani à Douna, concomitante à une augmentation des coefficients de tarissement et à une diminution des étiages (figure 24) (Mahé *et al.*, 2000). La baisse des nappes a aussi été observée sur la plupart des aquifères au Burkina-Faso, à partir des données piézométriques nationales (Koné, 2000).

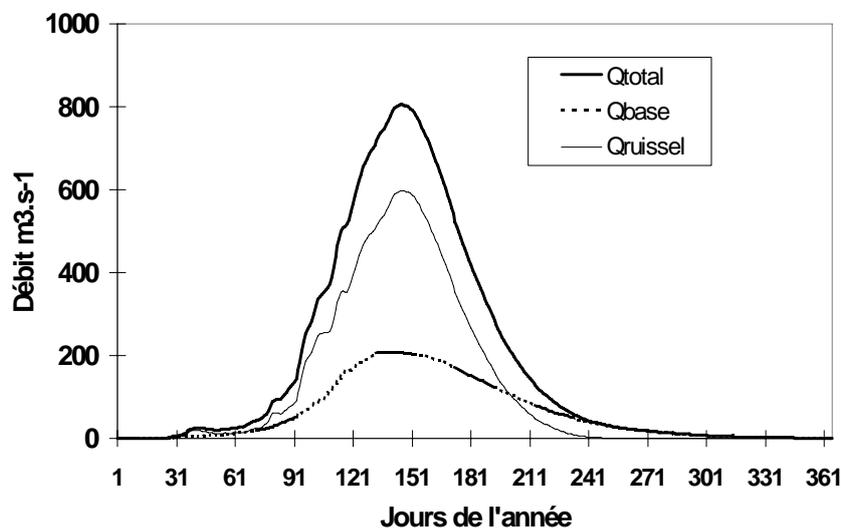
Sur le Bani on a décomposé l'hydrogramme en écoulement de surface et souterrain, en utilisant la courbe de tarissement que l'on a prolongée en remontant le temps jusqu'à la date du maximum de niveau piézométrique. Sur la période 1984-1996, la date d'apparition moyenne du tarissement est le 27 décembre. Le maximum de débit de base correspond au maximum de niveau piézométrique, en moyenne le 15 septembre, soit 10 jours avant le maximum de ruissellement (et d'écoulement total) le 24 septembre. On voit sur la figure 25 que les écoulements souterrains représentent 25 à 30 % des écoulements en année moyenne sur la période 1984-1996, période trop courte pour donner plus qu'une valeur approximative, d'autant plus que la variabilité interannuelle est élevée.

Le débit du Bani n'a été en 1994/95 que de 6 % supérieur à sa normale 1951-1996. Comparativement pour le Niger à Koulikoro on a observé +15% de pluie et +5% de débit en 1994/95 (Bricquet *et al.*, 1996). Dans les deux cas l'augmentation d'écoulement est inférieure à celle des pluies. Le niveau de la nappe en 1994/95 est le plus haut de la série 1981/95. La recharge des nappes du Bani et la réponse hydrologique se réalisent avec rapidité. Mais le débit de janvier de la crue 1994/95 reste très inférieur à celui des années précédant 1970. En 1995 et 1996, le niveau d'étiage diminue rapidement, à relier sans doute avec une faible capacité de stockage des aquifères du sud Mali. La différence de réponse entre le Niger et le Bani est peut-être à relier à une différence de propriété des aquifères. Les apports souterrains ne semblent pas avoir augmenté autant à partir des aquifères de Guinée, car la différence entre pluie et écoulement est plus élevée pour le Niger à Koulikoro. Ceci pourrait traduire une recharge plus lente des aquifères et pourrait également signifier que cette partie de bassin nécessiterait une période de pluies excédentaires plus longue que le sud Mali pour retrouver un même niveau de nappe.



**Figure 24**

**A :** Débits de janvier du Bani à Douna, cumul des précipitations annuelles sur le bassin, et cumul des fluctuations interannuelles de niveau de la nappe (en valeurs centrées réduites).  
**B :** Coefficients de tarissement du Bani à Douna (carrés)(en  $j^{-1} \cdot 1000$ ), et débits de janvier (ronds)(en écarts centrés réduits) (Mahé *et al.*, 2000).



**Figure 25**

Hydrogramme annuel moyen en  $m^3 \cdot s^{-1}$  du Bani à Douna : écoulement total, ruissellement de surface et débit de base (Mahé *et al.*, 1998).

## Afrique tropicale sèche à semi-aride

Dans les régions sahéliennes les nappes participent peu aux écoulements qui sont constitués essentiellement de ruissellement direct ou retardé. Sur le Nakambé à Wayen (Burkina-Faso), on a

constaté une fluctuation du niveau des nappes profondes en fonction de la variabilité des pluies (Koné, 2000), qui ne peut donc pas expliquer l'augmentation de débits. Casenave et Valentin (1988) nous indiquent qu'au Sahel le facteur prépondérant de la génération de l'écoulement est les états de surface ; alors qu'en région tropicale plus humide, le type de sol devient l'élément essentiel. Le tableau 3 illustre l'évolution des coefficients de ruissellement sur des rivières disposées du nord au sud dans un axe parallèle au fleuve Niger, depuis le nord du Bénin, en climat tropical humide, jusqu'au nord du Burkina-Faso en climat nord sahélien (tropical sec à semi-aride). Après 1972 ces coefficients diminuent dans les régions humides alors qu'ils augmentent dans les régions plus sèches, avec une zone intermédiaire intéressante, située entre les isohyètes 700 à 800 mm de pluie annuelle, où la forte pression agricole semble être en grande partie responsable de l'augmentation du coefficient pour la Tapoa, dont le bassin est densément couvert de plantations de coton. Le bassin qui lui est adjacent au nord, le Diamangou, est lui recouvert de forêts classées et protégées, et le coefficient d'écoulement diminue après 1972, comme pour les autres rivières de région plus humide. Le bassin de la Tapoa est situé dans une région où l'évolution attendue serait une diminution des débits après 1970, mais où il est probable que la trop grande intensification de la culture du coton a provoqué une dégradation accélérée des états de surface.

Il existe peu d'études sur le changement de régime hydrologique des bassins sahéliens. Néanmoins Pouyaud (1987) avait montré ce phénomène sur des tout petits bassins dans le nord du Burkina-Faso, et plus récemment Seguis *et al.*, (2004) l'ont à nouveau montré au Niger sur un tout petit bassin sahélien, qui a vu sa surface cultivée passer de 6% en 1950 à 56% en 1992, de pair avec une augmentation du débit de 30 à 70%.

Les coefficients d'écoulement sont naturellement plus élevés dans les régions semi-arides qu'au Sahel, du fait de la nature des sols, très pauvres ou inexistants. Les minimums de coefficients d'écoulement sont observés autour des isohyètes 700/800 mm annuels, soit à la transition entre le Sahel et la zone soudanienne, c'est-à-dire le début de l'Afrique « humide », où les écoulements souterrains prennent une importance non négligeable dans l'élaboration de l'hydrogramme annuel. Dans cette zone, presque toute l'eau de pluie est consommée en évapotranspiration, et très peu est infiltrée ou redistribuée en surface. Vers le sud, les régions plus humides, les propriétés des sols et une plus forte pluviométrie permettent à une quantité d'eau plus importante de ruisseler en surface. Vers le nord des sols plus pauvres et plus imperméables augmentent la portion ruisselée en surface. Il est donc naturel que la diminution des pluies depuis les années 1970 s'accompagne d'une augmentation des coefficients d'écoulement des rivières. Il n'existe malheureusement pas de bassin témoin où l'homme ne serait pas intervenu pour modifier l'environnement. Nous ne pouvons donc pas clairement distinguer les parts anthropiques et climatiques à l'origine de cette dégradation des états de surface et la modification des écoulements. Quelques indices nous permettent d'avancer tout de même dans notre réflexion. Leduc *et al.*, (1997, 2001), Favreau *et al.*, (2002) et Gaultier (2004) ont montré une augmentation du niveau des nappes, liées au Continental Terminal, dans la région de Niamey depuis les années 1950. Ils ont relié cette augmentation à une augmentation très importante des surfaces cultivées, au détriment des surfaces en végétation naturelle. La recharge des nappes, sans rentrer dans les détails, se fait par infiltration autour de mares, très nombreuses, qui occupent le lit d'anciens cours d'eau dans des dépressions sableuses interdunaires. Ces multiples zones endoréiques concentrent le ruissellement de surface, celui-ci augmentant il contribue de plus en plus à rehausser le niveau de la nappe. Cette augmentation est observée dès la fin des années 1950 et se poursuit de façon identique durant les années 1960, 1970 et suivantes. En l'absence de diminution notable de pluie avant 1970, l'on peut penser que l'augmentation du niveau de la nappe doit être reliée avant tout à la dégradation des états de surface liée aux activités humaines dans cette région. On suppose donc que l'augmentation des coefficients de ruissellement au Sahel n'est pas qu'un phénomène lié au changement climatique, ce qui se vérifie tout particulièrement au nord

dans la partie très peuplée, cultivée, et peu arborée, lorsque disparaissent les pâturages suite à la sécheresse. Un autre indice est donné par le Dargol à la station de Tera, qui est le bassin probablement le moins anthropisé de tous ceux du tableau 3 : on y observe la plus faible augmentation du coefficient de ruissellement, alors que le bassin le plus anthropisé, celui du Nakambé, enregistre la plus forte augmentation.

## 4.4 Impact sur les transports de matières

Le transport de MES par les rivières a de nombreuses conséquences sur l'écologie et la morphologie des cours d'eau et des zones inondables, sur l'ensablement des lits, pouvant perturber la navigation, et sur l'envasement des retenues d'eau, diminuant leur capacité de stockage. Le lien étroit qui existe entre transport de MES et débit amène à se poser la question de l'impact des changements de régimes hydrologiques depuis 1970 sur le transport de MES.

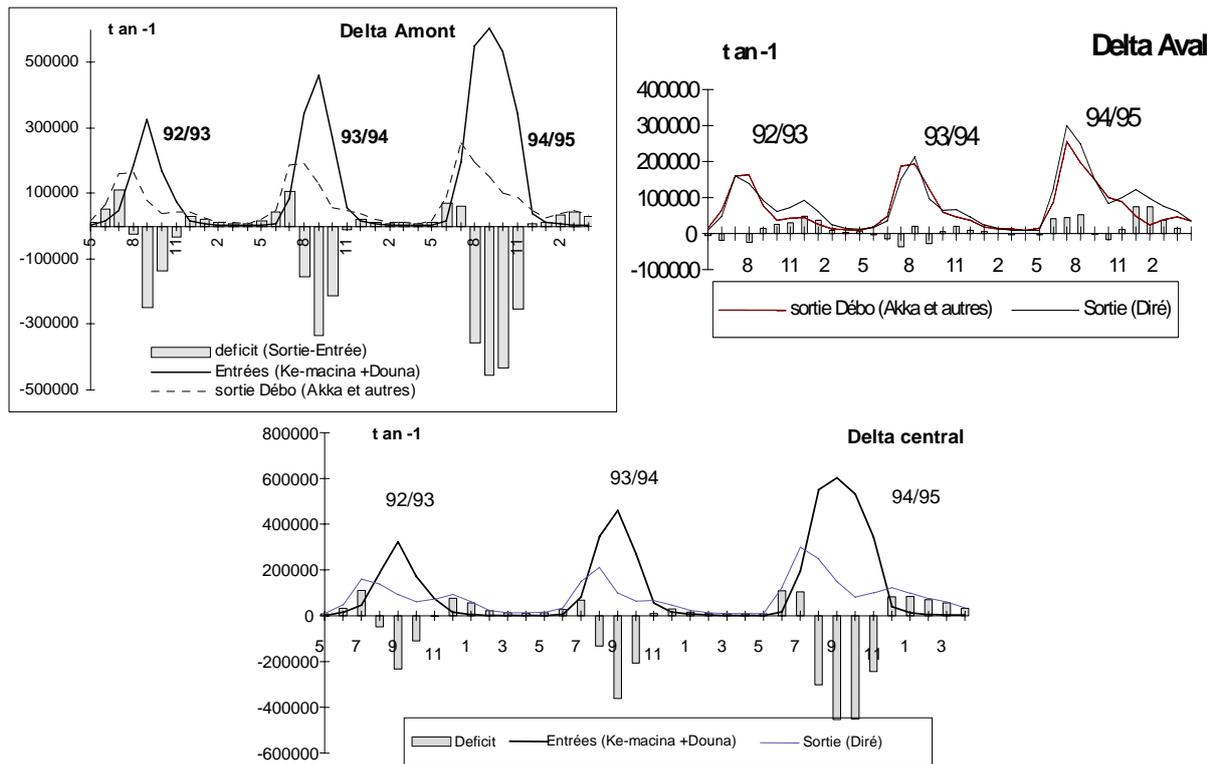
### 4.4.1 Fleuve Niger

Nous avons caractérisé les régimes de flux de matières dissoutes et solides sur le fleuve Niger (Bricquet *et al.*, 1997b ; Bricquet *et al.*, 1998 ; Picouet *et al.*, 2002a) (tableau 4, figure 26). Le fleuve Niger apporte en entrée du Delta entre 1000 et 2500 tonnes de matières en suspension (MES) selon les années sèches ou humides, ce qui est très peu comparé aux autres rivières (Picouet *et al.*, 2001, 2002b). La concentration en matières dissoutes est également très faible et dominée par les silicates. De 30 à 60% des MES sont piégées dans le centre du Delta ; mais grâce à une reprise d'érosion dans sa partie aval, les pertes de MES en sortie à Diré ne sont que de 20 à 40%. A l'échelle du bassin versant de Koulikoro (120 000 km<sup>2</sup>) les quantités de MES transportées sont proportionnelles au débit, et ne représentent que quelques % des matières arrachées aux versants. Diallo (2000) a estimé à 7% la proportion des sédiments qui est transférée jusqu'à l'exutoire d'un bassin de 103 km<sup>2</sup> (Djitiko) affluent montagneux du Niger au Mali.

	Flow	Dissolved matter tonnage	Concentration
	(10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> )	(10 <sup>3</sup> t)	(g.m <sup>-3</sup> )
<b>Inputs Ké Macina + Douna</b>	24.22	1189	(49.1)
<b>Upstream losses</b>	3.72	213	
<b>Outputs Lake Debo</b>	20.5	976	(47.6)
<b>Downstream losses</b>	2.46	87	
<b>Output to Diré</b>	18.04	889	(49.2)
<b>Total losses</b>	6.18	300	

**Tableau 4**

Bilan de matières dissoutes du fleuve Niger dans le Delta intérieur en 1992/1993 (Bricquet *et al.*, 1998).



**Figure 26**

Variations mensuelles du bilan sorties-entrées des transports particuliers dans le delta central du Niger de 1992 à 1994 (Bricquet *et al.*, 1997)

#### 4.4.2 Rivières camerounaises

Au **Cameroun** (figure 27), nous avons réalisé une étude dont l'objectif était, en partenariat avec le CRH de Yaoundé, d'évaluer comment les régimes hydrologiques sont modifiés depuis la rupture climatique de 1970 dans les différents écosystèmes du pays, et, si les régimes de flux de matières ont été également modifiés, la part anthropique dans ce changement (due à la déforestation par exemple dans le sud, ou aux activités agricoles dans le nord) (Liéno *et al.*, 2003, 2005b, 2005c).

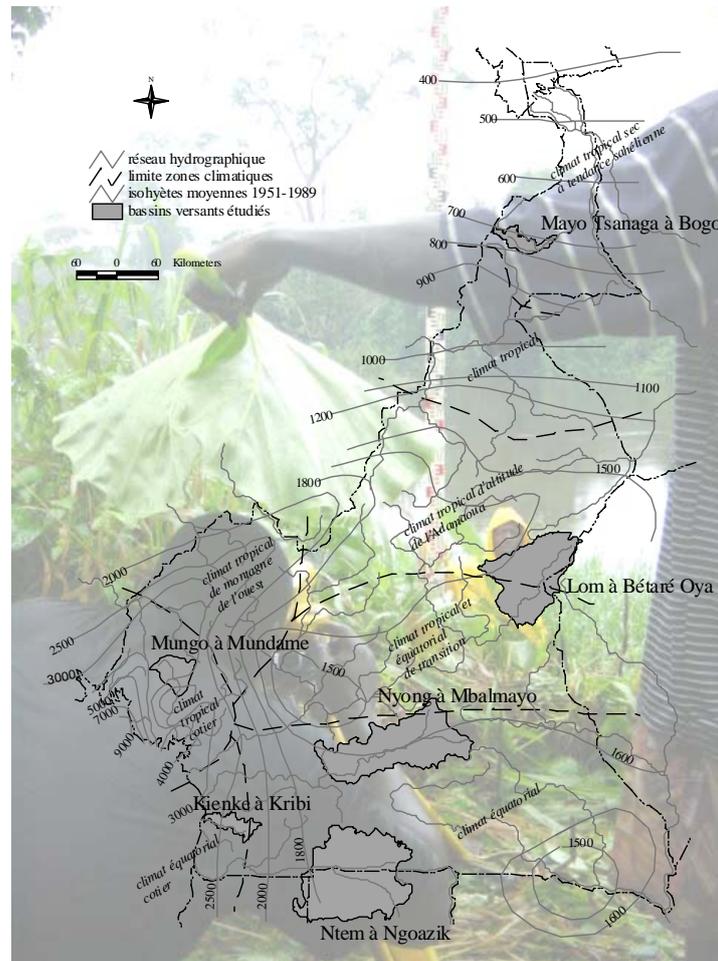
Rivière	Période de mesure	Flux (tonnes)
<b>Lom</b>	sept 2002 - févr 2003	178
	mars 2003 - nove 2003	339
<b>Mungo</b>	nove 2002 - févr 2003	21
	mars 2003 - nove 2003	143
<b>Kienke</b>	sept 2002 - févr 2003	21
	mars 2003 - nove 2003	33

**Tableau 5**

Bilan de transport de MES entre septembre 2002 et novembre 2003 sur 3 fleuves camerounais (Liéno *et al.*, 2005 B-3).

Les premiers résultats sur les flux de matières (tableau 5) indiquent des ordres de grandeur comparables aux mesures anciennes, et soulignent toujours la très faible concentration en MES des rivières équatoriales. Leur exploitation est en cours dans le cadre d'une thèse. Sur le bassin le plus au nord du pays, le Mayo Tsanaga, la quantité de MES transportée a beaucoup augmenté

entre 1968 et 2004, malgré une baisse des débits, suite probablement à la réduction du couvert végétal. On pourrait s'attendre au cours des années de forte hydraulicité à des flux de MES atteignant  $400 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ , soit le double des valeurs mesurées par le passé sur le Mayo Tsanaga.



**Figure 27**

Bassins versants étudiés au Cameroun ; unités climatiques et isohyètes interannuelles (d'après Liéou *et al.*, 2005, A-3).

### 4.4.3 Campagnes en cours

Les conséquences de la dégradation des états de surface sur l'hydrologie sont exacerbées en milieu sahélien. Il m'a semblé utile de promouvoir depuis quelques années des projets qui permettent de recueillir des mesures hydrologiques récentes dans ce milieu, afin de documenter précisément l'évolution des relations pluie-débits-états de surface. Le premier bassin sahélien sur lequel j'ai pu relancer des mesures est le bassin du Mayo Tsanaga dans le nord Cameroun. C'est un bassin un peu particulier : globalement « sahélien », sa tête de bassin est plus humide et reçoit plus de 800 mm de pluies annuelles. Il est de plus montagneux. Ce n'est pas un bassin représentatif des écoulements typiquement observés sur les bassins sahéliens d'Afrique de l'Ouest.

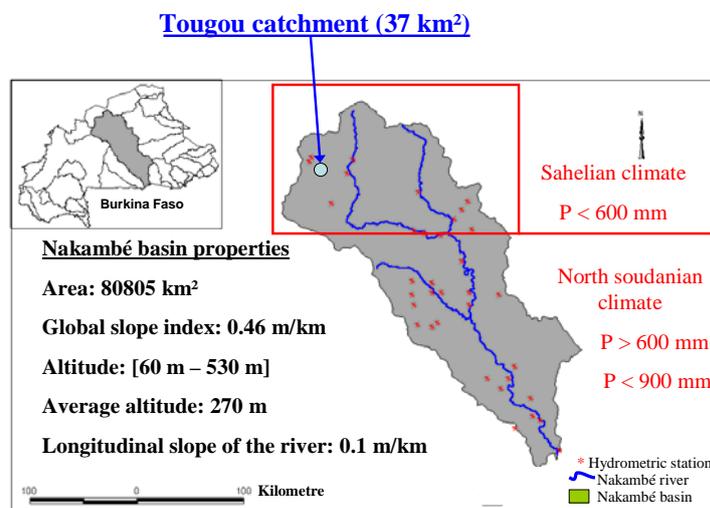
Au **Burkina-Faso** nous travaillons avec l'EIER de Ouagadougou et avec les principaux autres acteurs de la recherche du pays : CNRST, INERA, Université, Météorologie Nationale et Direction de l'Hydraulique, dans le cadre du projet ICCE-BF « *Impact du changement climatique sur les processus de dégradation de l'environnement dans le Nord du Burkina Faso : Application*

à l'identification des zones à risque majeur d'érosion et de perte de fertilité » (ICCE-BF, 2003), intégré au programme AMMA. Les problèmes d'érosion et de fertilité sont prépondérants au Burkina-Faso du fait d'une densité de population rurale élevée et de la très forte pression agricole sur les terres, et d'un état de dégradation avancé de la surface du sol dans un environnement sahélien fragile. Nous avons identifié un petit bassin versant sahélien (Tougou, figures 28 et 29), représentatif de l'environnement sahélien dans le nord du Burkina-Faso et disposant de mesures anciennes remontant à la fin des années 1980. Nous y développons un ensemble de mesures en hydrologie, pédologie et socio-économie, pour évaluer les tendances évolutives de l'environnement sur des petits bassins représentatifs des types d'occupation du sol les plus fréquents (sol nu, cultures, végétation naturelle). Nous utilisons des données satellitales et de photos aériennes pour évaluer l'évolution de l'occupation du sol depuis plusieurs décennies sur ce site (Diello *et al.*, 2004, 2005 ; Karambiri *et al.*, 2005). Les mesures en cours ne permettent pas encore des comparaisons avec les années anciennes, mais les premiers résultats indiquent une forte variabilité des débits et des flux de MES :

**2004:** 42 évènements pluvieux  
 Pluie annuelle = 350 mm  
 Débit annuel = 35 mm  
 Coefficient d'écoulement Kr = 10%

**2005:** 33 évènements pluvieux  
 Pluie annuelle = 449 mm  
 Débit annuel = 86 mm  
 Coefficient d'écoulement Kr = 19%

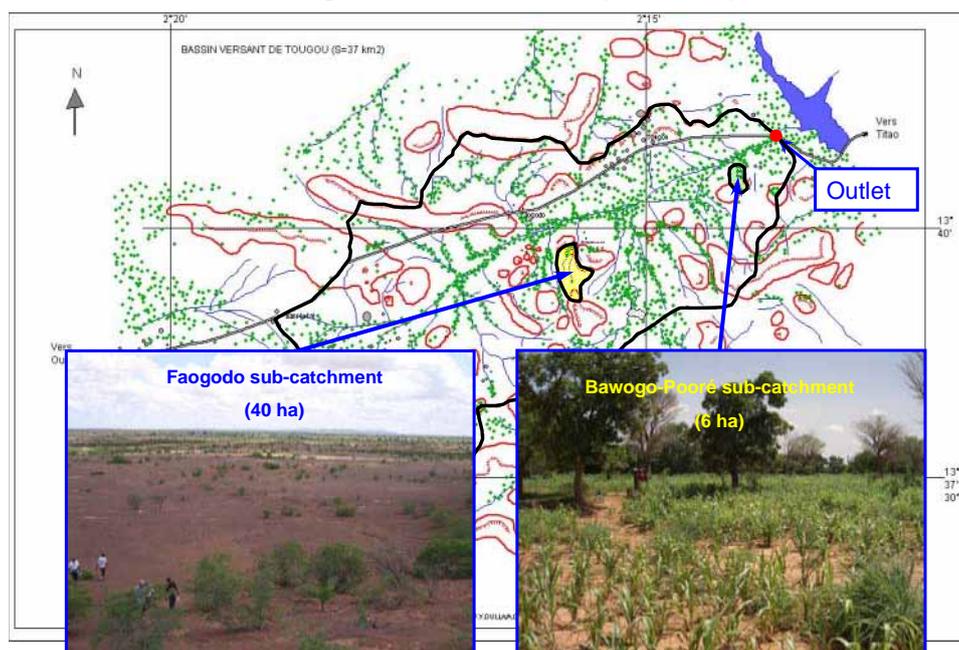
Les mesures effectuées sur parcelles de 1 m<sup>2</sup> indiquent en 2004 des coefficients d'écoulement de 4 à 20% sur parcelles cultivées et de 18 à 85% sur sols nus, et en 2005 de 17 à 38% sur parcelles cultivées tandis que les coefficients varient peu sur sol nu (22 à 86%).



**Figure 28**

Situation du bassin versant de Tougou dans le bassin du Nakambé au Burkina-Faso, site du développement du programme ICCE-BF dans le cadre de AMMA (Yacouba *et al.*, 2004).

## Tougou catchment (37 km<sup>2</sup>)



**Figure 29**

Le bassin versant de Tougou : situation des deux sous-bassins étudiés et types d'environnements dégradé (Faogodo) et cultivé (Bawogo-Pooré) (Karambiri *et al.*, 2005).

Enfin, dans le cadre d'un projet sur les « Pratiques de gestion des écosystèmes de savane au Mali et leurs conséquences sur les sols, les eaux et la biodiversité », des mesures sont en cours depuis 2004 sur des petits bassins maliens, 2 situés en zone soudanienne et un, le bassin de Korokoro, situé à l'est de Bamako à la limite sud-sahélienne. Les premiers résultats ne concernent que la physique des sols (Diallo, 2006). Dès 2007 nous serons en mesure d'évaluer sur un nombre important de sites en milieu sahélien et nord soudanien l'évolution du transport de matières en fonction de l'évolution de l'hydroclimat et de l'occupation des sols.

### 4.4.4 Conclusion

Il y a des différences marquées entre l'évolution des séries de pluies et de débits en Afrique de l'Ouest et Centrale, qui traduisent la non-linéarité des relations pluie/débit. La rupture climatique de 1970 provoque en Afrique tropicale humide une diminution amplifiée des débits, moins marquée en Afrique équatoriale. Les coefficients de tarissement augmentent et indiquent une diminution des apports de nappe, vérifiée au Mali sur le bassin du Bani à Douna. Les débits augmentent au Sahel, en relation avec les changements d'états de surface depuis la sécheresse. Ceci a des conséquences importantes sur les notions de normes hydrologiques, qui varient selon les périodes de référence choisies (Ouédraogo *et al.*, 2002 ; Paturel *et al.*, 2003b), et sur le transport de MES dont les premiers résultats indiquent une augmentation depuis les années 1970 en milieu sahélien.

Suivant ce constat nous avons travaillé sur l'origine de la variabilité paradoxale des écoulements au Sahel et sur leur modélisation.

## 4.5 Modélisation hydrologique des relations pluie-débit

### 4.5.1 Application de modèles conceptuels

La modélisation des régimes hydrologiques des cours d'eau tropicaux humides à une seule crue (haut-bassin versant du Niger par exemple) est de très bonne qualité (Ouédraogo *et al.*, 2001 ; Paturel *et al.*, 2003a ; Conway, 1997 ; Conway et Mahé, 2006) avec des modèles conceptuels semi-spatialisés de type WBM (Water Balance Model, Vörösmarty *et al.*, 1989, 1991) ou GR2M à un seul réservoir sol, à l'échelle mensuelle (Makhlouf et Michel, 1994 ; Mouehli *et al.*, 2006 ).

Ces modèles fonctionnent sur la base du bilan hydrologique simplifié. Pour chaque pas de temps mensuel, l'ETP prélève sa part du bilan d'eau, le reste de la pluie d'une part remplit le réservoir (représenté par une capacité en eau du sol, WHC) et d'autre part peut s'écouler directement. Le réservoir rend à chaque pas de temps un volume d'eau, fonction inverse exponentielle de la quantité d'eau dans le réservoir, qui s'additionne à l'écoulement direct (éventuel), pour former pour chaque maille la production d'écoulement. Les productions sont sommées sur l'ensemble du bassin au même pas de temps, sans considérer de décalage. Ceci induit une limite d'utilisation à des bassins dont le temps de transfert entre l'amont et l'exutoire est très inférieur au mois.

Sans entrer dans le détail de ces deux modèles, qui se trouvent dans les références citées, la différence principale entre GR2M et WBM est que en entrée de WBM l'ETP est prélevée à la pluie avant l'entrée dans le réservoir, tandis que dans GR2M le rapport pluie/ETP est calé, pour tenir compte d'effets d'interception.

Dans WBM le premier paramètre calé est l'écoulement direct.

Ensuite l'écoulement retardé, au même pas de temps mais sortant du réservoir, est calé aussi bien dans WBM que dans GR2M.

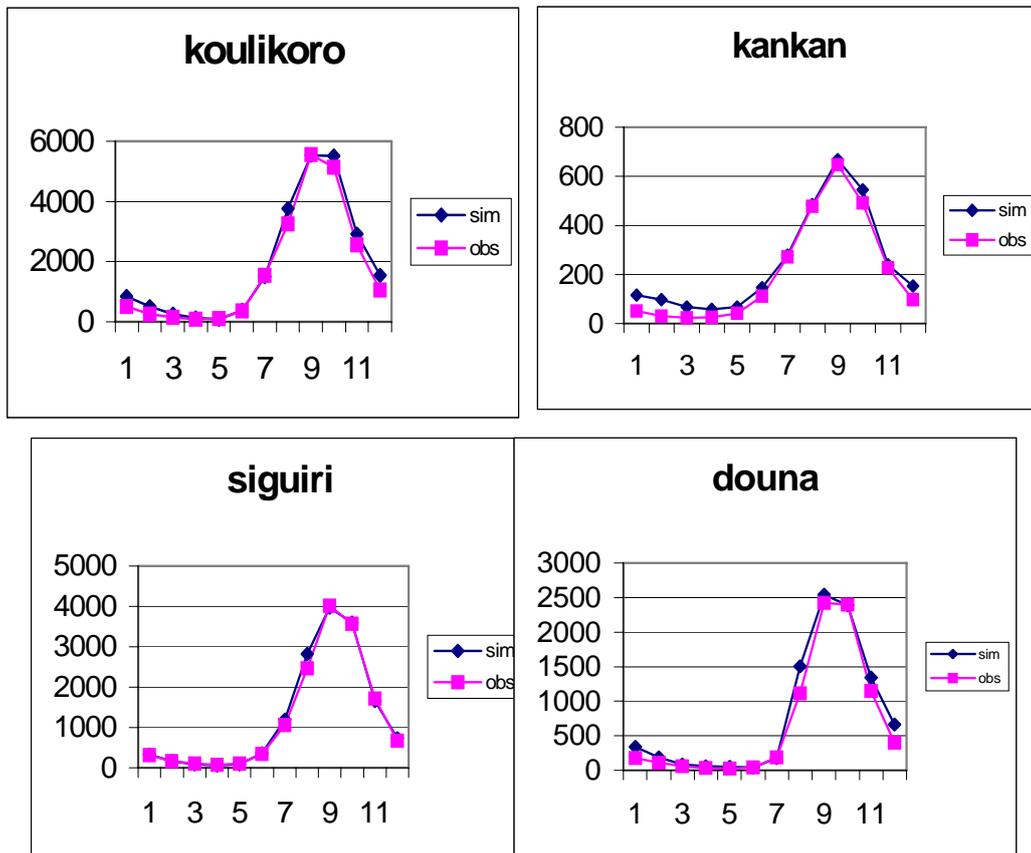
On voit donc que WBM est plus proche du concept brut de bilan hydrologique, tandis que GR2M intègre de façon très empirique une notion d'interception.

Le choix de ces modèles s'explique par plusieurs contraintes. La première est la disponibilité des données de pluie en entrée. On sait qu'une part prépondérante de la performance des modèles conceptuels est expliquée par la distribution de la seule entrée pluie (Hreiche *et al.*, 2003). La contrainte majeure pour cette variable est la densité de stations et la mise à disposition des données par les services nationaux. En Afrique de l'Ouest et Centrale la distance entre deux stations est rarement inférieure à 50 km, dans les meilleurs cas, et plus souvent entre 50 et 100 km. La disponibilité des données mensuelles est d'autre part beaucoup plus aisée et rapide que celle des données journalières, dont l'accès est toujours retardé et soumis à des aléas conjoncturels plus ou moins importants selon les états et les services. Nous avons donc choisi de travailler à l'échelle du demi-degré carré, qui permet une représentativité optimisée du champ de pluie calculé à partir du réseau d'observation au sol, et qui par ailleurs est une échelle spatiale utilisée en modélisation climatique régionale, domaine avec lequel nous avons des interactions à l'aval de notre modélisation (voir chapitres suivants).

### 4.5.2 Performances et limites

Les performances de ces modèles s'avèrent maximales à reproduire un hydrogramme tropical de type unitaire à une seule crue bien identifiée, avec des écoulements significatifs

pendant 8 à 10 mois de l'année au minimum, remise à zéro du réservoir chaque année et étiage quasi-nul. C'est le cas des sous-bassins du haut Niger : Milo à Kankan, Niandan à Baro, Niger à Siguiri et à Koulikoro, par exemple (figure 30). Sur cette figure le modèle utilisé est une version du modèle WBM à 3 jeux de paramètres dans l'année selon le rapport pluie/ETP. Afin de pouvoir comparer GR2M et WBM, cette version du modèle WBM n'a pas été retenue dans la suite des travaux, mais c'est celle qui donne les coefficients de Nash les plus élevés (jusqu'à 0.95 pour le Niger à Siguiri), et c'est une piste qui mériterait d'être approfondie.

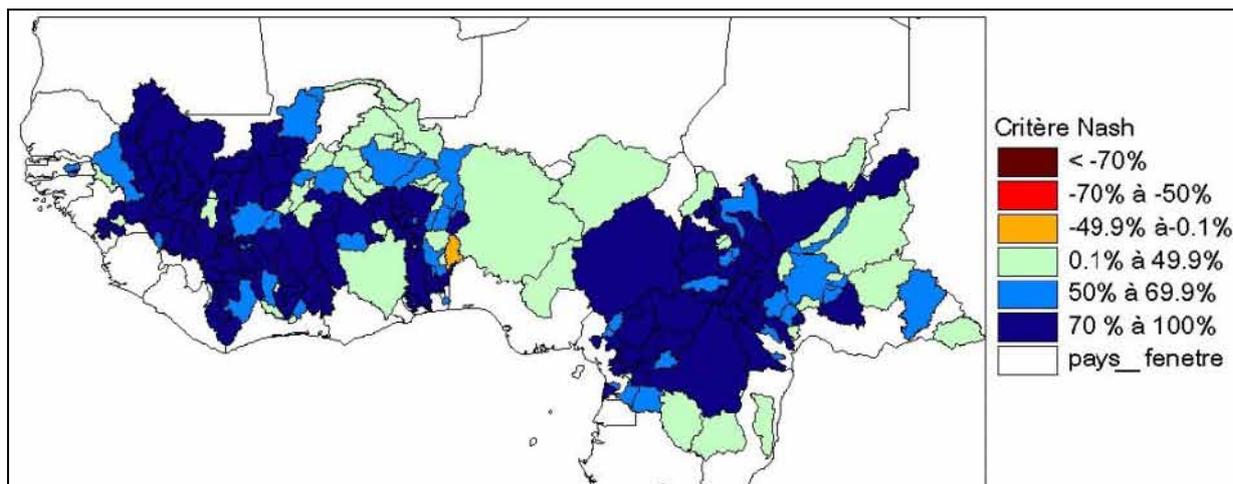


**Figure 30**

Débits mensuels moyens interannuels (1950-1989) observés (carrés) et simulés (losanges), de janvier à décembre en m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, pour cinq sous-bassins du fleuve Niger. Modèle WBM (Mahé *et al.*, 1999 J-2).

Ces modèles sont beaucoup moins performants à reproduire les écoulements des cours d'eau sahéliens (figure 31, Rescan, 2005 ; Mahé *et al.*, 2005c), d'autant moins d'ailleurs que ceux-là augmentent depuis 30 ans alors que les pluies diminuent.

Dans le but d'améliorer la modélisation de ces cours d'eau sahéliens, et en considérant toujours la contrainte du pas de temps et du pas d'espace liée à la zone d'étude et à la taille des bassins, il était nécessaire de contraindre le modèle à prendre en compte les changements d'états de surface.



**Figure 31**  
Cartographie du critère de Nash des calages simples sur la période 1950 – 1995 (Mahé *et al.*, 2005 J-1)

### 4.5.3 Changements d'états de surface

#### Evolution naturelle des états de surface

La diminution des pluies en Afrique de l'Ouest depuis 35 ans s'est accompagnée d'une évolution de l'environnement vers un nouvel équilibre entre pluie et biomasse. Les limites bioclimatiques ont migré vers le sud (Mahé et L'Hôte, 1996). La limite entre climat sahélien et soudanien est marquée par les isohyètes annuelles 700/800 mm. Au sud de cette limite les écoulements de surface sont complétés durant tout ou partie de l'année par des écoulements souterrains, et la pluie est suffisamment élevée pour excéder, de plus en plus vers les régions les plus humides (vers le sud en général), la demande évapotranspiratoire. Les coefficients d'écoulement sont donc plus élevés vers le sud.

Vers le nord la pluie est presque toujours inférieure à la demande évapotranspiratoire, les écoulements souterrains sont très ponctuels dans le temps et apportent peu au total écoulé en surface. Le résultat est un coefficient d'écoulement très faible à l'interface 700/800 mm (moins de 1% parfois), car il reste assez de végétation, sur un sol pas encore trop déstructuré, pour retenir de l'eau évapotranspirable. Encore plus vers le nord, dans des régions de plus en plus arides, une plus grande dénudation et des sols par ailleurs de moins en moins riches en matière organique, induisent des coefficients d'écoulement de nouveau plus élevés.

Des travaux indiquent que les paramètres de morphologie des bassins n'influent pas de manière générique sur les écoulements, au contraire de la répartition de la pluie dans le temps et dans l'espace (Merz et Blöschl, 2004). Mais on peut penser aussi que ces faibles coefficients d'écoulements sont également en partie le produit des très faibles pentes au Sahel, qui permettent la formation de nombreuses petites zones endoréïques au sein des bassins.

**L'aridification des états de surface est d'abord due au forçage climatique.** Des botanistes, comme Birnbaum (2005) au Mali, le distinguent clairement dans l'évolution floristique en Afrique de l'Ouest. Dans la frange sahélienne la diminution des précipitations fragilise l'environnement, à pression anthropique identique ou croissante.

Dans une grande partie du Sahel, la baisse des pluies entraîne un changement de végétation dans les zones hautes des bassins, qui produisent moins de matière organique ; les sols

s'appauvrissent et sont plus sensibles à l'érosion, les écoulements depuis ces zones hautes augmentent, la dégradation s'accélère vers les vallées. Des éléments de géomorphologie et de végétation désertiques apparaissent dans le paysage (passage progressif à des écoulements de type oued)(figure 32).



**Figure 32**

Paysages dégradés du Nord sahélien du Burkina-Faso. A gauche, un plateau aux grands arbres morts, dont le sol est presque totalement dénudé, colonisé par des arbustes et acacias résistants de régions semi-arides. A droite, une vallée en tête de petit bassin, très dégradée, dont le cours d'eau voit son lit s'ensabler et ses berges se creuser. On aperçoit au fond à gauche la partie basse de la rivière encore végétalisée.

## **Relations homme-climat-environnement**

**L'impact anthropique se surimpose à l'impact climatique.** Les activités anthropiques traditionnelles ne sont plus en équilibre avec l'évolution climatique de l'environnement, et accélèrent la dégradation des états de surface. La pression anthropique croît et l'environnement subit une aridification accélérée, qui entraîne une perte rapide de fertilité des sols et leur dégradation en surface, et ralentit considérablement leur vitesse de régénération (Casenave et Valentin, 1988).

L'environnement naturel pur n'existe pas. La grande majorité des paysages, au sud du Sahara, est issue d'une interaction plus ou moins proche avec les activités humaines, agropastorales principalement mais également liée aux hydro-aménagements. L'anthropisation a abouti à la sélection parmi les essences d'origine de celles qui résistaient le mieux aux contraintes humaines (coupe, feux, piétinement, broutage, etc.). Les reliquats d'essences naturelles sont confinés dans les espaces inexploitable par l'homme (Birnbaum, 2005). D'autre part la population africaine a doublé depuis le début de la sécheresse. Il est donc difficile de déterminer les parts anthropiques et climatiques à l'origine des modifications hydrologiques.

Les activités humaines modifient l'occupation du sol et les états de surface associés, ce qui entraîne une modification des relations pluie-débit sur les bassins-versants. En milieu sahélien la déforestation/le défrichage, puis les cultures, entraînent une augmentation de la susceptibilité des sols au ruissellement de surface, surtout en début de saison des pluies quand le sol est à nu et fraîchement labouré. La réduction, voire l'annulation du temps de jachère (Floret, 1998 ; Sodter *et al.*, 2003), ainsi que des pratiques culturales pas assez économes de la matière organique, accélèrent l'appauvrissement des sols en éléments nutritifs. Avec le temps, et l'absence de pratiques conservatoires, ces sols cultivés deviennent plus sensibles à l'érosion et

à l'apparition de ravines. Les sols surexploités qui sont abandonnés laissent souvent place à des surfaces imperméables qui favorisent le ruissellement et diminuent d'autant l'infiltration.

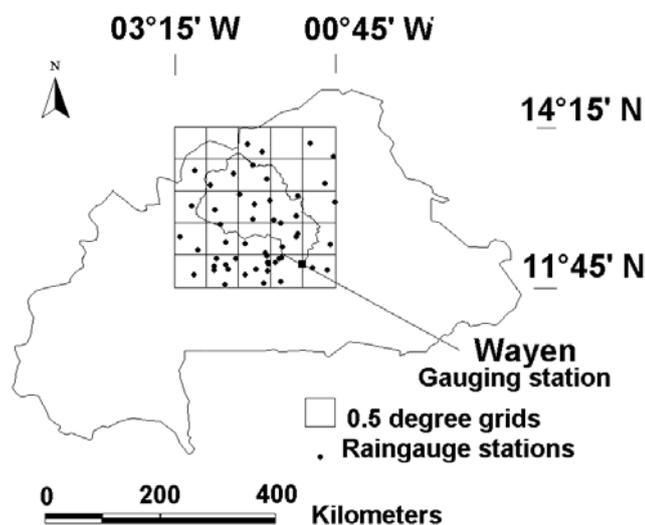
Les activités humaines, principalement agro-pastorales, ont pour conséquence directe une réduction de la biomasse par rapport à un environnement naturel, dont les effets à long terme sur l'environnement s'apparentent à ceux de la diminution de la pluie, c'est un des principes de la désertification. La dégradation du milieu par rapport à l'environnement moyen local s'observe aussi dans des milieux qui auraient pu en être épargnés sans les activités humaines (cas du sud-ouest du Burkina-Faso, bassin du Diamangou)(Mahé *et al.*, 2003).

Enfin, l'équipe VAHYNE travaille depuis quelques années sur les relations homme-climat-environnement, au Burkina-Faso (thèse de Diello en cours, Diello *et al.*, 2005), sur les relations dynamiques entre climat, anthropisation et paysage. On s'intéresse aux relations entre l'évolution de l'occupation du sol et des variables intégratrices descriptives du type densité de population et facteurs socio-économiques (Diello *et al.*, 2005). En milieu forestier plus humide, comme en Côte d'Ivoire (Brou, 2001 ; Brou *et al.*, 2005 a et b ; Oszwald *et al.*, 2003), bien que la pression agricole soit tout aussi élevée qu'au Sahel -entre 1960 et 1993, la superficie totale des zones non exploitées est passée de 12 millions d'hectares à moins de 4 millions d'hectares en Côte d'Ivoire-, les répercussions sur les régimes hydrologiques sont beaucoup plus visibles au Sahel.

### Prise en compte des changements d'états de surface en modélisation

#### *Le Nakambé à Wayen au Burkina-Faso*

La dégradation des états de surface aboutit à une imperméabilisation de la surface du sol et réduit proportionnellement l'infiltration (Fournier *et al.*, 2000 ; Karambiri *et al.*, 2003). La variable susceptible de varier suivant cette contrainte physique est la capacité en eau du sol. Cette variable est disponible à partir de fichiers partagés de la FAO (FAO, 1995b). Un autre fichier dérivé est issu de Dunne et Willmott (1996).



**Figure 33**

Situation du bassin-versant du Nakambé à Wayen (Burkina-Faso) (Mahé *et al.*, 2005a).

Parmi tous les bassins sahéliens pour lesquels il existe une série de données de débits, le bassin du Nakambé à Wayen (figure 33) (Mahé *et al.*, 2005a) est le meilleur exemple car il

possède une longue chronique de débits de bonne qualité, remontant à la décennie 1950, absolument nécessaire pour établir des comparaisons avant et après la rupture climatique (Hubert *et al.*, 1989). En faisant varier annuellement le niveau d'eau dans le réservoir sol en fonction des changements d'occupation du sol (et par là des états de surface)(Dray, 2001), les performances de la modélisation en ont été améliorées (tableau 6)(Mahé *et al.*, 2002b, 2005a).



**Figure 34**

Classification du sol et changements en % d'occupation du sol dans chaque cellule en : 1965, 1975, 1985 et 1995, pourcentage de réduction en 1995, par rapport aux valeurs initiales (*D&W* ou *FAOavg* et *FAOmax*). Le tableau indique les changements décennaux de trois classes d'occupation du sol exprimées en pourcentages de la surface du bassin du Nakambé, et l'impact résultant sur la WHC. Deux cas : conditions initiales antérieures à 1965 (haut), conditions initiales en 1965 (bas) (Mahé *et al.*, 2005a).

Les cellules de 0,5 degré carré ont été renseignées par analyse de photos aériennes et images satellites sur leur composition en végétation naturelle (+ jachère), sols cultivés et sols nus. Les valeurs théoriques des capacités en eau des sols proviennent de la carte des sols de la FAO. A partir de mesures de ruissellement effectuées dans la région par diverses équipes, nous avons associé à chaque type d'occupation du sol un coefficient de ruissellement. Le changement d'occupation du sol provoque un changement de coefficient de ruissellement moyen pour chaque cellule. En milieu sahélien, la forte imperméabilité des sols autorise l'addition des apports latéraux le long des pentes jusqu'aux biefs. L'augmentation des

coefficients de ruissellement se traduit alors de façon linéaire en diminution d'infiltration, et enfin en diminution de la capacité en eau des sols (figure 34).

En utilisant un fichier de données de capacités en eau du sol évolutif dans le temps, le critère de Nash est significativement amélioré dans la plupart des essais de modélisation que nous avons effectués, aussi bien en calibration qu'en validation (tableau 6).

Model	Data	File source	Fixed WHC		Time varying WHC		Model	Data	File source	Fixed WHC		Time varying WHC	
			Calib.	Val.	Calib.	Val.				Calib.	Val.	Calib.	Val.
GR2M	Precip.	WHC	%	%	%	%	WBM	Precip.	WHC	%	%	%	%
	CRU	FAO avg	50.6	37.0	<b>+16.7</b>	<b>+26.2</b>		CRU	FAO avg	70.8	-4.3	<b>+4.2</b>	<b>+17.1</b>
		FAO max	61.5	47.5	<b>+5.7</b>	<b>+15.8</b>			FAO max	51.6	36.3	<b>+26.5</b>	<b>-30.6</b>
		D&W	64.5	47.7	<b>+4.7</b>	<b>+10.6</b>			D&W	61.1	39.4	<b>+0.8</b>	<b>+4.7</b>
IRD		FAO avg	52.3	36.8	<b>+20.2</b>	<b>+26.9</b>	IRD	FAO avg	67.0	41.6	<b>+5.6</b>	-7.7	
		FAO max	66.7	50.0	<b>+5.7</b>	<b>+13.9</b>		FAO max	77.5	70.3	-7.2	-4.8	
		D&W	67.7	48.9	<b>+4.5</b>	<b>+9.3</b>		D&W	63.5	40.4	<b>+3.3</b>	-2.2	

**Tableau 6**

Résultats de la modélisation hydrologique ; critères de Nash en calibration et validation, pour des valeurs de WHC fixes ou évolutives dans le temps (Mahé *et al.*, 2005a).

Les orientations les plus récentes de cette activité m'amènent à mieux prendre en compte l'évolution spatio-temporelle de l'occupation des sols dans la modélisation hydrologique. Une bonne représentation de l'occupation du sol sur de grandes échelles d'espace et de temps passe par une analyse de données satellitales, qui est entreprise dans le cadre d'un programme PNRH sur le haut bassin du Niger en milieu soudano-guinéen, et dans le cadre d'une thèse au Burkina-Faso (Diello *et al.*, 2005). Dans cette étude nous cherchons également à intégrer dans les modèles hydrologiques une valeur qui tienne compte du type d'activité humaine sur le bassin : densité de population, ethnies et paramètres associés : pratiques de gestion du foncier, et pratiques agricoles et pastorales, qui doivent définir un « indicateur environnemental ».

## 4.6 Prédiction des ressources en eau

L'objectif du programme VAHYNE d'HydroSciences est l'estimation des ressources en eau au cours du 21<sup>ème</sup> siècle à partir de scénarios climatiques issus de GCM.

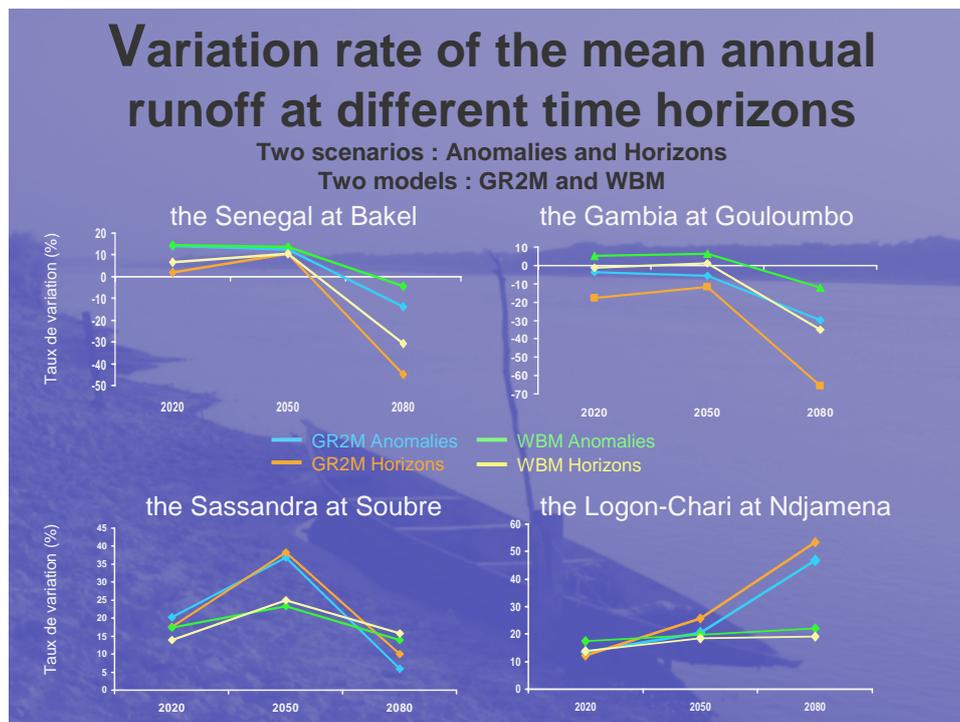
### 4.6.1 Prévision pour l'Afrique de l'Ouest et Centrale

#### Modélisation de 350 bassins-versants

Cette partie a nécessité une étude préalable afin de choisir un processus de traitement unique pour tous les bassins, pour pouvoir comparer les résultats entre eux. Les choix ont porté sur : le modèle hydrologique ; les sources de données ; les périodes de calibration et validation du modèle ; le modèle de circulation générale (GCM) et le scénario d'émission de gaz à effet de serre ; le type de construction des séries de pluies et ETP à partir des prévisions issues des GCM. Les premiers résultats (Ardoin *et al.*, 2005) concernent certains grands bassins : Logone-Chari, Sénégal, Gambie et Sassandra et ont été développés dans le cadre de la thèse de Ardoin-Bardin (2004). Le modèle utilisé est GR2M, les données de débit proviennent de la base de données environnementales SIEREM (2004) du programme VAHYNE, et les données de

pluies et ETP observées sont issues de la base du CRU établie par New *et al.* (2000). Le GCM utilisé est le HadCM3, scénario A2 (business as usual) qui se base sur une poursuite des activités humaines à un rythme le plus probable possible, sans majorer ou minorer à l'excès l'impact des dispositions qui seront prises pour atténuer l'effet de serre.

Les séries de données de chaque rivière sont calibrées puis validées sur les périodes d'observation. Les scénarios climatiques fabriqués suivant une méthodologie décrite dans Ardoin *et al.* (2005) sont utilisés en entrée du modèle hydrologique, qui pour chaque rivière paramétrée, indique la variabilité hydrologique prédite au cours du 21<sup>ème</sup> siècle (figure 35).



**Figure 35**

Taux de variation des débits annuels moyens à différents horizons temporels, d'après les anomalies de température et de précipitations issues du modèle HadCM3, scénario A2 (d'après Ardoin-Bardin, 2004).

Deux scénarios d'anomalies différents sont élaborés et appliqué aux deux modèles hydrologiques. La dispersion des résultats, issus d'un seul GCM, incite à une grande prudence dans l'interprétation des sorties de GCM, surtout si elles sont filtrées à nouveau à travers un nouvel algorithme, comme le modèle hydrologique par exemple.

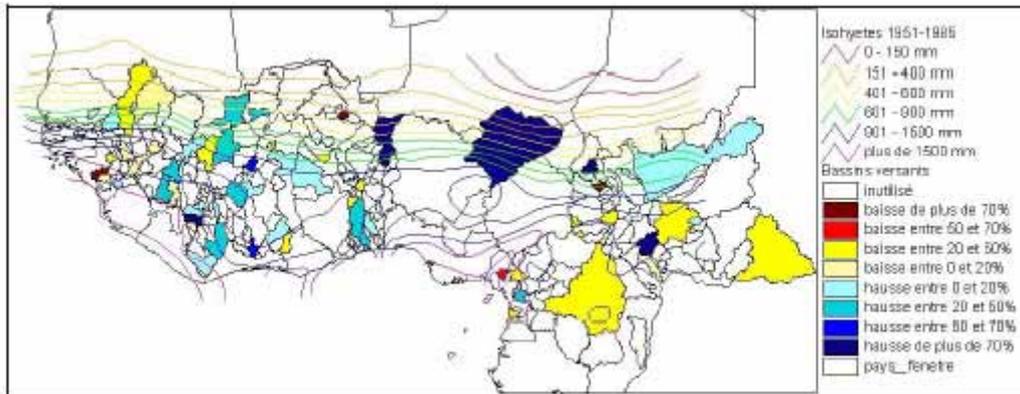
Néanmoins, cette expérience a été étendue, toujours à partir des sorties du seul modèle HadCM3, aux 350 bassins versants de plus de 2000 km<sup>2</sup> couvrant l'Afrique de l'Ouest et Centrale (Rescan, 2006 ; Mahé *et al.*, 2005c), tout en connaissant la représentativité des sorties de ce modèle par rapport à celles d'autres modèles de l'IPCC (2003), étudiée par Casenave (2004).

Le modèle GR2M a été calibré et validé pour chaque bassin sur la période post 1970, qui d'après Ardoin-Bardin (2004) est la méthode qui donne les meilleurs résultats d'ensemble, par rapport à une calibration-validation sur des périodes faisant intervenir des années pré-1970.

Les résultats concernent trois horizons temporels : 2020, 2050 et 2080. En 2020 et 2050 on observe une variabilité importante en Afrique de l'Ouest, sauf sur trois régions : le nord-ouest (Sénégal-Guinée-Mauritanie) et le nord du bassin congolais, où les débits diminuent dès l'horizon 2020 ; et le bassin du Chari où les débits augmentent. En 2080, la diminution des

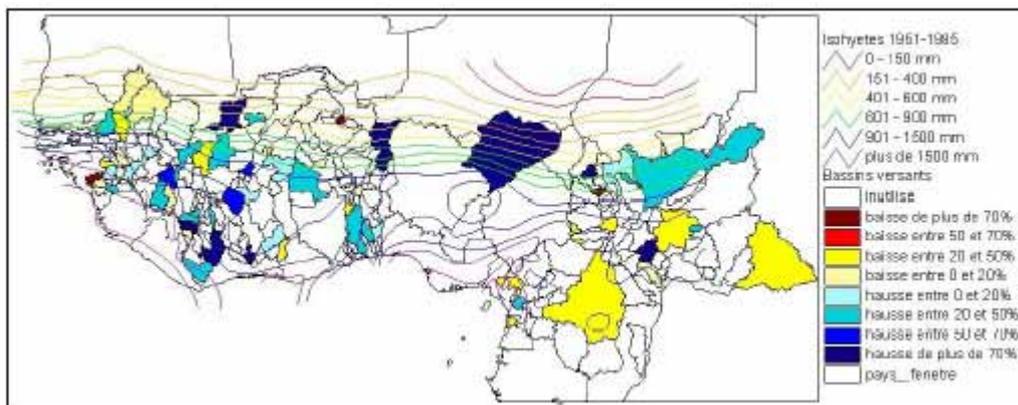
débits est généralisée en Afrique de l'ouest. La dynamique saisonnière des écoulements devrait aussi être altérée, en particulier l'amplitude et la date d'occurrence du maximum de crue.

Il faut noter que l'augmentation de l'ETP, dûe à celle de la température, viendrait dès 2050 ou en 2080, inverser une tendance à une légère augmentation des pluies qui pourrait se dessiner dans le centre et l'est du Sahel (figures 36, 37, 38).



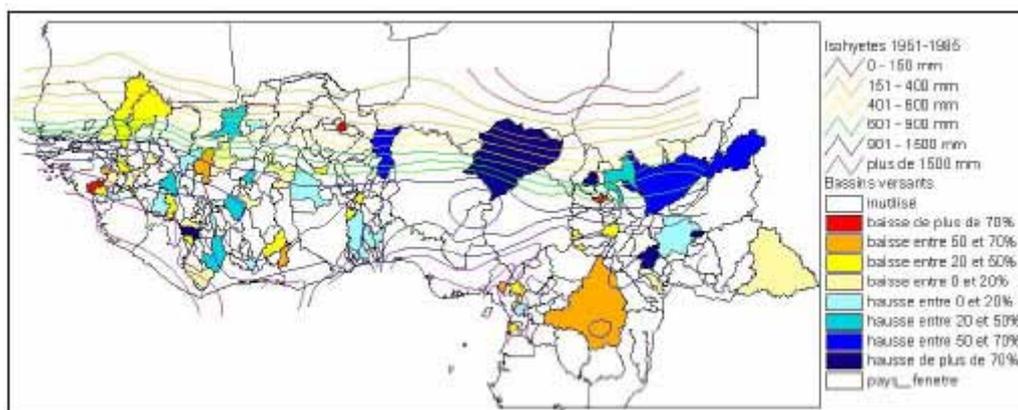
**Figure 36**

Runoff future variability in 2020 / 1966-1995 (Rescan, 2005).



**Figure 37**

Runoff future variability in 2050 / 1966-1995 (Rescan, 2005).



**Figure 38**

Runoff future variability in 2080 / 1966-1995 (Rescan, 2005).

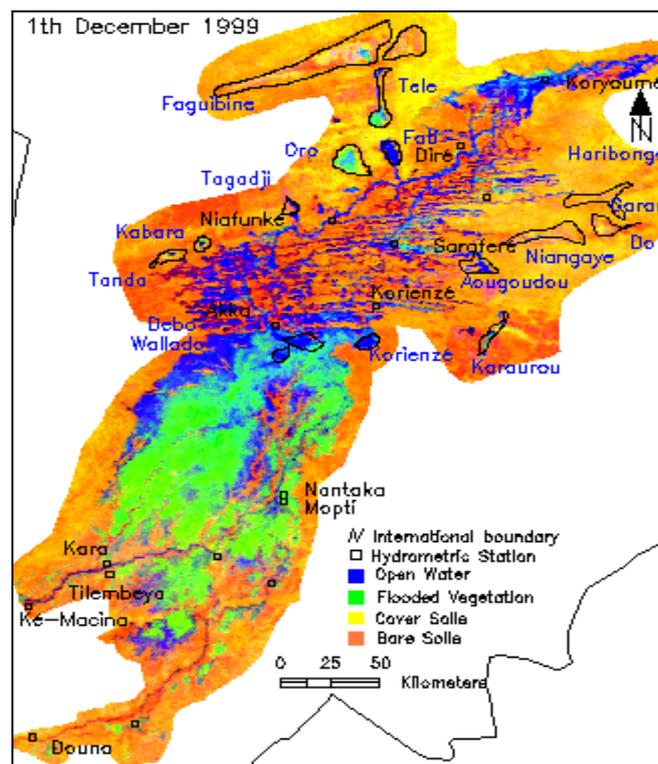
## 4.6.2 Prévision pour le delta intérieur du Niger

### Relation entre hauteurs d'eau aux stations hydrométriques et surfaces inondées

Le delta intérieur du fleuve Niger est une plaine d'inondation qui s'étend sur près de 40 000 km<sup>2</sup>, arrosée par les apports interannuels du Niger et du Bani, qui se rejoignent à Mopti dans la partie sud (amont) du delta, caractérisés par une très forte irrégularité interannuelle, qui a des répercussions majeures sur le transport particulaire (tableau 7).

C'est également une région couverte de près d'un million de personnes, qui concentre une très forte activité agro-pastorale et de pêche, dont les produits économiques débordent bien au-delà des frontières du Mali.

Nous avons étudié à partir d'images NOAA, les surfaces inondées dans le Delta intérieur au Mali (figure 39) durant les années 1990, et leurs relations avec les hauteurs d'eau aux stations hydrométriques principales (figure 40), permettant d'envisager une prévision des hauteurs d'eau dans le Delta aval avec plusieurs semaines d'avance (Mariko, 2003 ; Mariko *et al.*, 2002, 2003), à des fins essentiellement agricoles et halieutiques (Laë et Mahé, 2002).



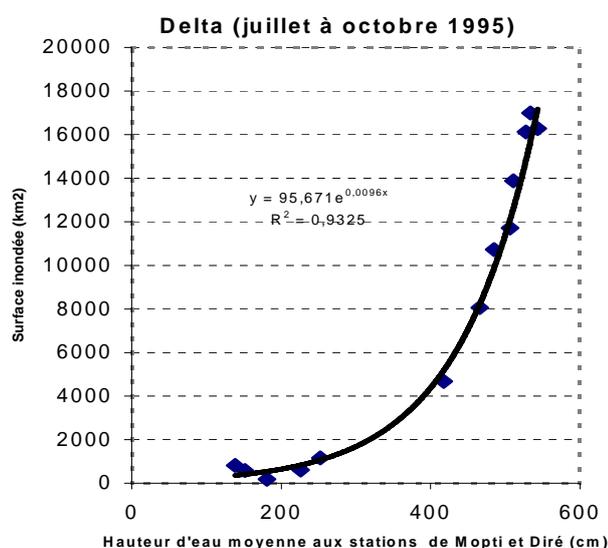
**Figure 39**

Delta intérieur du fleuve Niger au Mali. Zones inondées en eaux libres (bleu) et en végétation (vert). Composition des canaux de NOAA-AVHRR. (Mariko *et al.*, 2003).

	1992/1993	1994/1995
Entrées delta	1 034	2 311
Sortie lac Débo	703	1 028
<b>Perte Amont</b>	<b>331</b>	<b>1 283</b>
Sortie Diré	790	1 411
<b>Perte Aval</b>	<b>87 (gain)</b>	<b>382 (gain)</b>
<b>Perte Totale</b>	<b>244</b>	<b>901</b>

**Tableau 7**

Bilan des flux de matières particulaires dans le delta central du Niger en milliers de tonnes (Bricquet *et al.*, 1997).



**Figure 40**

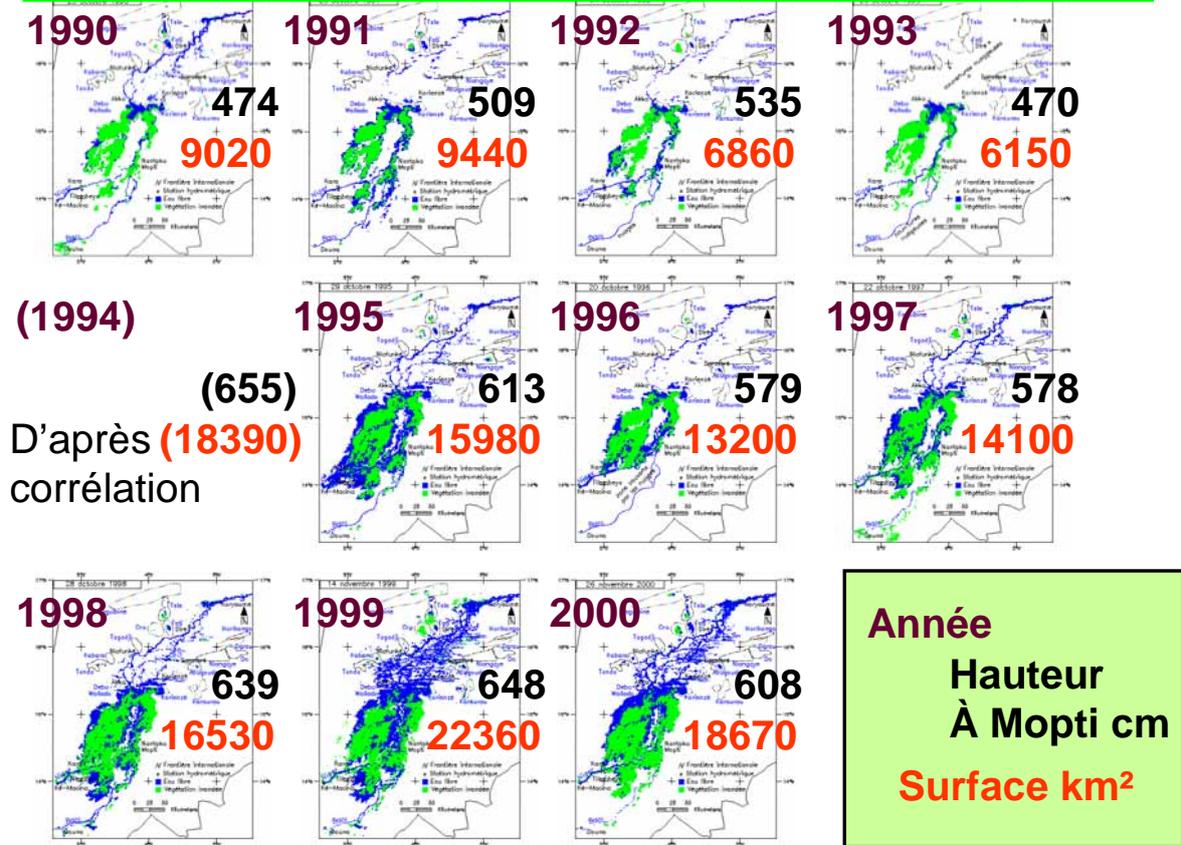
Delta intérieur du fleuve Niger au Mali. Relation hauteur d'eau moyenne (Mopti-Diré) et surface inondée en 1995. En photo, le Lac Débo au centre du Delta (Mariko *et al.*, 2003).

Les données NOAA à la résolution du kilomètre sont suffisantes pour appréhender un degré de détail intéressant des régions inondées, alors que les données Météosat ne permettent pas cette précision. D'autres produits sont plus précis comme Landsat ou Spot, mais présentent des contraintes rédhibitoires : nombre de scènes à acquérir trop élevé induisant un coût d'étude prohibitif, et surtout trop faible répétitivité des prises de vues, ne permettant pas d'approche dynamique ni d'être assuré d'avoir chaque année une image proche du maximum d'inondation.

L'inondation occupe des superficies très différentes chaque année, selon l'hydraulicité (figure 41). La relation entre les surfaces inondées et les hauteurs d'eau à des stations hydrologiques de référence permet d'envisager une prévision des hauteurs d'eau dans la partie nord (aval) du delta, du fait du retard d'un à deux mois environ entre les maximums de crue du sud au nord du bassin.

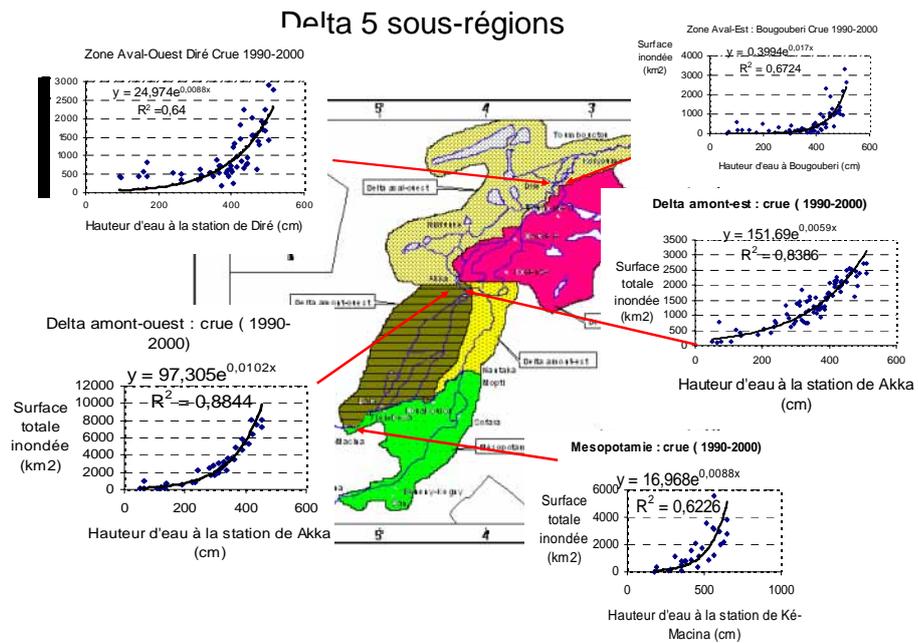
La relation hauteur/surface inondée est déclinée suivant plusieurs sous-régions internes au delta, en fonction de la disponibilité de séries de données hydrométriques permettant la corrélation (figure 42).

**Surfaces Maximales Inondées à l'Automne Oct/Nov**



**Figure 41**

Cartes des surfaces inondées annuelles en octobre/novembre dans le delta intérieur du fleuve Niger. L'eau libre est en bleu, l'eau recouverte de végétation flottante en vert. Aux côtes à l'échelle de Mopti correspondent des surfaces inondées en km² (Mariko, 2003).



**Figure 42**

Courbes de corrélation hauteurs/surfaces inondées pour 5 stations et régions principales du delta intérieur du Niger au Mali (Mariko, 2003).

## 4.7 Conclusion

### 4.7.1 Des changements hydroclimatiques majeurs : témoins de la variabilité et de la non-linéarité des relations pluie-débit

La taille de la zone d'étude -23 pays et plus de 8 millions de km<sup>2</sup>- oblige à une recherche permanente de données pour compléter les fichiers existants et ainsi permettre les meilleures calibrations des modèles hydrologiques. Des données hydro-climatiques mais aussi environnementales enrichissent la banque de données SIEREM créée dans l'équipe à Montpellier, et interrogeable sur Internet. Nous générons des fichiers de données opérationnels pour les modèles hydrologiques : grilles de 0,5° carré, et utilisons des fichiers produits par d'autres laboratoires comme ceux du CRU. Pour la prévision des futures ressources en eau nous utilisons des données de réanalyses de GCMs, à partir desquelles il faut générer des scénarios climatiques.

L'analyse des séries de pluies et débits sur les bassins versants met en évidence une grande variabilité spatio-temporelle et la non-linéarité des relations pluie-débit.

Le changement de régime hydrologique n'est pas proportionnel à celui de la pluie, il est issu d'une modification des coefficients de ruissellement : diminution au sud de la limite 700/800 mm de pluies annuelles et augmentation au nord.

Au sud la diminution est due en particulier à la baisse de la contribution des nappes aux écoulements annuels (Bricquet *et al.*, 1996 ; Mahé *et al.*, 2000); au nord les écoulements augmentent du fait de l'accroissement du coefficient de ruissellement (Leduc *et al.*, 2001 ; Seguis *et al.*, 2003) dû à la dégradation des états de surface.

Les pluies, très variables depuis le début du siècle, ont été plus faibles sur toute l'Afrique de l'Ouest et Centrale depuis la décennie 1970 (Laraque *et al.*, 2001 ; Lubes-Niel *et al.*, 2001 ; Sangaré *et al.*, 2002 ; Ardoin *et al.*, 2003a, 2003b, Bigot *et al.*, 2003 ; Paturol *et al.*, 2005) . Cette variabilité entraîne des modifications des régimes hydrologiques, aussi bien dans les répartitions saisonnières de flux que pour l'estimation de valeurs caractéristiques.

La variabilité des écoulements depuis le début du siècle se distingue selon 3 grandes régions : l'Afrique Centrale où aucune tendance à long terme n'est identifiable, l'Afrique tropicale humide où, à une très grande variabilité, s'ajoute un déficit accru dans les années 1980 et 1990, et l'Afrique sahélienne (au nord de 750 mm) où les débits augmentent depuis le début des années 1970 (Mahé *et al.*, 2003, 2005a). Quand au fleuve Congo (la moitié des apports à l'Atlantique), il présente une variabilité propre à la mesure de son bassin de 3 millions de km<sup>2</sup>.

En régime sahélien les pluies ont diminué de 20% et les débits ont augmenté de 30 à 100 %, le passage du déficit à l'excédent du Sud au Nord étant montré par Mahé *et al.* (2003, 2005b) sur les débits des petits affluents de rive droite du fleuve Niger à la frontière entre Burkina-Faso et Niger.

En régime tropical humide, les pluies ont diminué de 10 à 20%, et les débits ont diminué de 40 à 60 % (Mahé et Olivry, 1999 ; Mahé *et al.*, 2005a). Dans ce type de régime l'apport en eaux souterraines est important, et le déficit cumulé de pluies depuis plusieurs décennies a entraîné une baisse du niveau des nappes, qui amplifie le déficit d'écoulement de surface. La baisse du niveau des nappes est généralisée à la majeure partie des bassins versants des régions tropicales humides. Elle provoque l'augmentation durable des coefficients de tarissement et l'apparition d'étiages très faibles à nuls sur des cours d'eau anciennement pérennes.

Le changement de régime hydrologique n'est donc pas proportionnel à celui de la pluie, il est issu d'une modification des coefficients de ruissellement : diminution au sud de la limite 700/800 mm de pluies annuelles et augmentation au nord. Au nord les écoulements

augmenteraient du fait de l'accroissement du coefficient de ruissellement dû à la dégradation des états de surface.

Cette variabilité entraîne une nécessaire réflexion sur le choix des périodes de référence (Paturel *et al.*, 2003b, 2003c) pour le calcul des normes hydrologiques en matière de construction d'ouvrages (Ouédraogo *et al.*, 2002), basée sur des analyses statistiques et fréquentielle utilisant en particulier des outils statistiques mis au point par l'IRD lors de programmes précédents (Khronostat, Safarhy).

Les transports solides ont également changé dans de nombreuses régions, du fait des modifications hydroclimatiques et de l'évolution des activités humaines. Au Cameroun les premiers résultats sur les flux de matières (Liéno *et al.*, 2003, 2005a et b ; Sigha-Nkamdjou *et al.*, 2005) mettent en évidence une augmentation des flux de MES en milieu sahélien du nord Cameroun, qui peut être reliée à la diminution des pluies et à l'augmentation des surfaces cultivées et de l'érodibilité des sols.

Cette thématique reste incontournable dans les projets futurs, et se retrouve dans le projet MOHYCAN sous l'axe « variabilité hydrologique ».

## **4.7.2 Modélisation des ressources en eau à grande échelle d'espace et de temps**

### **Modélisation hydrologique conceptuelle**

Une chaîne de modélisation pluie-débit au pas de temps mensuel et au demi-degré carré a été mise en place (Ardoin *et al.*, 2003b, 2005 ; Paturel *et al.*, 2003, 2005). Elle permet de simuler les écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale, sur la base de plusieurs modèles conceptuels, GR2M, Yates et Water Balance Model (WBM). Ces modèles fonctionnent sur un bilan hydrologique simplifié et des besoins restreints en données (Ambroise, 1999). Ce dernier point est important, car un des objectifs initiaux de cette modélisation est de fournir à nos partenaires des pays du Sud des outils performants et peu gourmands en données. Les réseaux nationaux de mesure en Afrique de l'Ouest et Centrale présentent de nombreux dysfonctionnements, et il est difficile de réunir toutes les données nécessaires à un pas de temps inférieur au mois. Les modèles utilisés doivent être adaptables aux contraintes majeures de disponibilité et de qualité des données dans le contexte africain d'une part, et d'autre part être exploitables en simulation de régimes hydrologiques futurs, sur la base des données issues des GCM.

Néanmoins, l'échelle du bassin versant et du demi degré carré, et l'échelle de temps mensuelle nous semblent réalistes pour analyser la transformation pluie-débit par rapport à la disponibilité des données d'entrée, et pertinentes par rapport aux objectifs de prévision, de planification et de gestion intégrée des ressources en eau, pour des régions de quelques milliers à plusieurs centaines de milliers de km<sup>2</sup>.

Les modèles conceptuels GR2M, WBM et Yates (1997) sont réunis dans une plateforme d'assistance à la modélisation hydrologique interfacée pour PC qui comprend aussi plusieurs méthodes d'optimisation -Rosen-Simplex, Nelder et Meade-, et qui offre le choix de plusieurs sources de fichiers de données pour les entrées débits, pluies, évapotranspirations et capacités en eau du sol. Cette plate-forme synthétise un savoir-faire développé depuis de longues années dans l'équipe et auquel chacun a apporté sa contribution. Elle constitue un outil de partenariat précieux qui pourra être installé chez les partenaires et pour lequel une formation pourra être réalisée dans le cadre de FRIEND-AOC.

Ces modèles font appel en entrée, à des pluies, des évapotranspirations potentielles et à des capacités en eau du sol, reliées aux classes de sol de la FAO et apparentées à la capacité de

rétenion en eau maximale du sol. Ces données sont spatialisées lors de la mise en œuvre de ces algorithmes. Nous utilisons plusieurs jeux de données sur l'Afrique de l'Ouest (Mahé *et al.*, 2002, 2005).

Les modèles pluie débit conceptuels utilisés (Water Balance Model et GR2M) utilisent une fonction de production de même type. Celle-ci est basée sur le fonctionnement d'un réservoir « sol » permettant de prendre en compte l'état général d'humidité du bassin versant. Le paramètre représentant la taille de ce réservoir est assimilé à une capacité en eau du sol (WHC), fixe dans le temps, déterminée à l'aide de la carte FAO (1995b) des sols, et spatialisée par demi degré carré.

Mais, les performances de la modélisation sont médiocres en milieu sahélien en particulier parceque les données en entrée des modèles ne prennent pas en compte l'évolution environnementale. Malgré ces contraintes, au terme du programme VAHYNE les objectifs ont été atteints, à savoir : calibration et validation de 350 bassins d'Afrique de l'Ouest et Centrale avec le modèle GR2M (après avoir testé les performances de plusieurs modèles et avoir retenu le plus performant en moyenne).

Des travaux récents sur le bassin versant du Nakambé (Burkina Faso) (Mahé *et al.*, 2005) ont montré que les performances de ces modèles sont améliorées par l'utilisation d'un fichier de données de capacité en eau du sol évolutives dans le temps, suivant l'évolution de l'occupation du sol en trois classes : sol nu, végétation naturelle (y compris jachères) et sols cultivés. Par ailleurs on trouve dans la littérature, agronomique principalement, des mesures de ruissellement et d'infiltration sur des zones types correspondant aux trois classes citées plus haut. Ces résultats nous permettent de générer les modifications des capacités en eau des sols, en considérant une relation linéaire entre l'augmentation du coefficient de ruissellement et la diminution de l'infiltration.

Appréhender l'évolution de la capacité en eau du sol au demi-degré carré et au pas de temps décennal ou interannuel est très certainement trop éloignée de l'échelle des processus pour espérer améliorer la compréhension des phénomènes à l'interface sol-atmosphère. Néanmoins, la méthodologie mise au point sur l'exemple du Nakambé permet d'améliorer les performances de la modélisation hydrologique au pas de temps mensuel. Tout en conservant les mêmes contraintes spatiales et temporelles, il est possible d'améliorer la prise en compte de l'évolution des états de surface et des relations pluie-débit à partir de résultats d'études menées à l'échelle des évènements (ou journalière) sur petits bassins versants.

### **4.7.3 Occupation du sol et états de surface**

#### **Relations homme-climat-environnement**

Tous les paysages, au sud du Sahara, sont issus d'une interaction proche ou lointaine avec les activités humaines, agro-pastorales principalement mais également liée aux hydro-aménagements. D'autre part la population africaine a doublé depuis le début de la sécheresse. Il est donc difficile de déterminer les parts anthropiques et climatiques à l'origine des modifications hydro-climatiques. Il est pourtant très important de déterminer quel est le degré de pression humaine sur l'environnement si l'on souhaite pouvoir convaincre les politiques qu'une forte implication humaine est nécessaire pour la préservation de l'environnement.

L'étude des relations homme-climat-environnement nécessite de collaborer avec des spécialistes de sciences sociales et humaines, qui aident à déterminer les différents niveaux de relations entre l'homme, son milieu et les contraintes socio-économiques. La diminution progressive du couvert végétal naturel au sud de la Côte d'Ivoire par exemple (Brou *et al.*,

1998) met clairement en évidence comment les activités humaines peuvent modifier l'environnement sur de grandes surfaces. Ce qui est visible aisément dans un milieu forestier vierge à l'origine, l'est beaucoup moins dans un milieu naturellement très anthropisé comme le Sahel où se pratiquent pastoralisme et cultures extensives depuis toujours, au gré des fluctuations climatiques.

### **Traitement d'images satellitaires**

Il est aujourd'hui incontournable de connaître l'évolution des états de surface pour améliorer la modélisation de la dynamique des ressources en eaux de surface. Selon les objectifs et les surfaces à traiter, on a utilisé des capteurs basse résolution et haute répétitivité comme NOAA-AVHRR pour caractériser la dynamique de l'inondation dans le delta intérieur du Niger au Mali, sur la période 1990-2000, ou l'évolution des NDVI issus des données NOAA pour étudier les relations avec la pluie et la végétation sur le Burkina-Faso. Des images à plus haute résolution des séries Landsat sont utiles pour caractériser l'évolution de l'occupation du sol depuis 1973 pour des bassins-versants de grande taille (plusieurs dizaines de milliers de km<sup>2</sup> par exemple). La série Spot permet de travailler également sur de grandes surfaces, mais avec une répétitivité moindre que Landsat et pour des surfaces plus petites.

Nos développements les plus récents ont permis de caractériser l'évolution de l'occupation du sol sur le haut bassin du Niger à Koulikoro de 1973 à 2003 (120 000 km<sup>2</sup>), à partir de scènes Landsat tirées de trois générations de capteurs MSS, TM et ETM.

Dans un futur proche il sera également essentiel de tirer profit des couvertures photographiques aériennes des années 50 à 70, pour établir les bases de connaissance sur l'occupation des sols avant les premières images satellitaires.

## **4.7.4 Scénarios climatiques et impacts sur les ressources en eau et la santé**

Dans le programme VAHYNE, comme dans MOHYCAN, la finalité des études est l'évaluation de l'impact de changements climatiques :

- sur les régimes hydrologiques et les ressources en eau, à l'échelle des grands bassins ;
- sur les états de surface et l'occupation du sol (relation avec l'évolution de la contrainte anthropique) ;
- sur la santé, à travers la sensibilité des vecteurs au climat et à l'environnement.

A la fin du programme VAHYNE, bien que plusieurs études doivent encore être valorisées, nous avons simulé les écoulements mensuels pour 350 bassins versants pour 2 scénarios climatiques, établis dans l'équipe à partir des sorties de 4 GCM -HadCM3, CSIRO, NCAR, ECHAM 4, avec le scénario A2 d'émission de gaz à effets de serre et d'évolution socio-économique.

Les deux thèses en cours dans le cadre du programme ATI-Santé nous renseigneront sur les relations climat-santé dans des environnement urbain (Saint Louis du Sénégal) et rural (sud mauritanien), à travers l'étude conjointe de l'évolution du nombre de cas de paludisme.

De nombreux développements sont attendus dans le prochain programme, en particulier l'utilisation de sorties de modèles régionaux, qui simulent de bien meilleure façon la saisonnalité et l'amplitude des variations pluviométriques sur l'Afrique de l'Ouest.

## 4.7.5 L'apport du terrain

Les mesures de terrain sont nécessaires pour deux objectifs. Le premier est la validation au sol de données satellitales NOAA et Landsat, dans le cas du Delta Intérieur et du Nord du Burkina-Faso en particulier. La seconde est l'acquisition d'informations sur les facteurs conditionnels du ruissellement de surface dans les régions où les relations pluie-débit ont été fortement modifiées depuis 1970, afin d'améliorer la prise en compte des états de surface dans les modèles hydrologiques. Pour mettre en évidence des modifications des régimes hydrologiques solides et liquides, nous avons lancé au cours des dernières années des campagnes de mesures de débits liquides et solides sur des bassins-versants représentatifs au Cameroun, au Burkina-Faso et au Mali pour mettre à jour nos connaissances hydrologiques en particulier en milieu sahélien, suite au changement des conditions de surface responsables des modifications majeures des régimes hydrologiques sahéliens. Peut-être serait-il également intéressant de compléter plus tard ces mesures par des campagnes de mini-simulateur de pluie, dont les résultats pour le Sahel ont été synthétisés, et en partie réalisés, par Casenave et Valentin (1988, 1992).

## 4.7.6 Perspectives pour le Développement

Les champs d'applications sont de deux ordres : sur le plan des connaissances fondamentales, nous contribuons à l'amélioration des connaissances sur le fonctionnement hydrodynamique des écosystèmes d'Afrique tropicale et équatoriale, et en particulier sur les impacts climatiques et anthropiques sur les régimes hydrologiques : flux liquides et solides, érosion. Sur un plan pratique, ces connaissances permettent d'évaluer la variabilité des ressources en eau : régimes, volumes et qualité, avec des répercussions dans plusieurs domaines : évaluation des risques hydrologiques, avec une réflexion sur la notion de norme hydrologique ; dimensionnement d'ouvrages pour l'irrigation, l'alimentation en eau potable, l'électricité ; érosion et environnement ; santé et qualité des eaux ; pêches ; etc.

Les projets que nous développons actuellement répondent à ces questions de développement fondamentales. Je citerai deux exemples de programmes en cours au Cameroun et au Burkina-Faso, qui ont été élaborés conjointement avec nos partenaires au cours d'affectations ou de missions longues, et qui sont développés en grande partie par des équipes locales, dont les techniciens, ingénieurs et chercheurs ont bien souvent été formés par l'ORSTOM puis l'IRD depuis 20 ou 25 ans, et avec lesquelles nous collaborons dans un second temps sous forme d'encadrement de thèses, et de missions plus ou moins longues.

**L'ensemble de ces programmes met en évidence l'importance d'élaborer nos projets de recherche en collaboration avec les partenaires et Institutions africains ainsi qu'avec les grandes agences de développement, afin de pouvoir proposer des programmes qui répondent aux attentes des opérateurs scientifiques et économiques. L'Afrique de l'Ouest est très sous-équipée en grandes infrastructures hydrauliques. Au cours de la prochaine décennie de nombreux projets vont être étudiés et réalisés afin de répondre aux impératifs de croissance économique des pays de la région. Les changements climatiques de ces 35 dernières années ont permis d'observer que les relations pluie-débit sont très variables, en particulier dans les régions sahéliennes et semi-arides, et que l'action de l'homme sur l'environnement a des répercussions importantes, voire majeures, sur les conditions du ruissellement en surface. Nos programmes en cours et nos projets sont élaborés en tenant compte de ces contraintes, et en particulier au Sahel et en régions semi arides dans l'objectif de mettre à jour nos connaissances sur l'hydrologie pour permettre un**

développement mieux géré. Les Universités africaines sont parfois très jeunes, ne disposent pas toujours de 3<sup>ème</sup> cycles, et ne sont pas attractives pour les étudiants africains qui préfèrent nettement s'expatrier pour étudier, ce qui les conduit souvent à rester dans leurs pays d'accueil. Si l'on veut franchir une nouvelle étape dans le développement de la recherche en Afrique, il paraît aujourd'hui incontournable d'aider au renforcement de l'offre d'études en 3<sup>ème</sup> cycle en sciences de l'eau et de l'environnement en Afrique, et de la capacité d'accueil des étudiants dans leurs pays ou des pays voisins.



# 5

**Impact des changements  
d'occupation du sol sur les  
régimes hydrologiques et  
les ressources en eau des  
grands bassins :**

**Perspectives  
scientifiques**



## 5.1 Hydrologie, environnement, impacts et ressources : le continent africain au cœur des agendas politiques.

Depuis quelques années la communauté internationale se mobilise autour de l'Afrique (Afrique noire et Maghreb), sur des questions fondamentales de partage d'eaux transfrontalières, de mobilisation des ressources en eau et de prévision de ressources futures, d'atténuation des effets du changement climatique, d'accès à des eaux de qualité, de conservation des sols et de biodiversité. Plus récemment des actions concrètes ont été lancées qui débouchent sur des programmations d'activités de développement et recherche. Le NEPAD (Nouveau Partenariat pour le Développement de l'Afrique) place comme une de ses priorités la « lutte contre les changements climatiques en Afrique » (NEPAD, 2005a, b, c), soutenu par le gouvernement britannique, durant sa période de présidence de l'Union Européenne, et par le G8 (Le Monde, 2005). Il y a plusieurs priorités affichées par le NEPAD parmi lesquelles :

- le renforcement de la gestion des bassins hydrographiques partagés, où les perspectives des organismes de bassin (comme l'ABN –Autorité du Bassin du Niger) doivent englober les questions de variabilité du climat et des changements climatiques à court et moyen terme dans leurs plans de travail ;

- l'élaboration de stratégies sous-régionales pour les ressources en eau, qui formulera des solutions pratiques de gestion de la demande pour s'adapter aux changements climatiques. Cette action sera basée sur le rassemblement d'informations météorologiques et hydrologiques fiables, nécessaires pour des évaluations d'impacts et des prévisions à court terme solides.

Parallèlement les zones humides constituent des espaces de plus en plus protégés (UICN, 2004 ; NEPAD, 2005c), pour préserver les équilibres des écosystèmes et la biodiversité. Dans ce contexte il a également été recommandé :

- d'élaborer une approche transfrontière de la gestion des zones humides et des bassins hydrographiques ;

- d'évaluer et atténuer les changements climatiques et prévoir leurs impacts sur les zones humides et la population ;

- de construire un réseau de centres d'excellence régionaux dans les domaines des sciences et de la gestion de l'environnement.

Quelques bassins versants ont été mentionnés par le CILSS (Comité Inter-africain de Lutte contre la Sécheresse au Sahel) et l'UEMAC (Union Economique et Monétaire d'Afrique Centrale) comme des enjeux prioritaires : Volta, Lac Tchad, Sénégal, Gambie, Mono, Congo et transfert des eaux de l'Oubangui vers le Lac Tchad.

L'Europe a lancé une Initiative Européenne sur l'Eau lors de la conférence de Johannesburg en 2002. Cette initiative repose sur cinq composantes, dont les deux premières sont dédiées à l'Afrique :

- une composante "accès à l'eau et à l'assainissement", avec un accent sur l'assainissement en zone périurbaine, portée par le Danemark ;

- une composante "Gestion Intégrée des Ressources en Eau" (GIRE), animée par la France, qui porte en particulier sur les bassins transfrontaliers, qui couvrent la plus grande partie du continent et concentrent l'essentiel des ressources en eau superficielles et souterraines.

Le Ministère français des Affaires Étrangères a mandaté l'Office International de l'Eau (OIEau, 2005) pour l'assister dans la phase d'analyse et de proposition sur le volet "grands fleuves" avec la caractérisation de 10 bassins transfrontaliers majeurs en Afrique, dont les quatre premiers sur lesquels démarrera la mise en œuvre de l'Initiative Européenne : Lac Tchad, Lac Victoria, Orange, Volta ; la Coopération française soutenant aussi le Niger à travers le FSP

Mobilisateur Echel-Eau (Fond de Solidarité Prioritaire). Ce FSP a pour objectif de développer des recherches sur la gestion intégrée dans les bassins fluviaux du Niger, du Limpopo et du Mékong, en appui au Challenge Program Water and Food (CPWC, ou CPEA en français) du Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR), coordonné par l'IWMI (International Water Management Institute).

L'OIEau participe également à la mise en place du plan d'action pour la Méditerranée, dont certains domaines prioritaires d'intervention sont : gestion locale des ressources à l'échelle des bassins hydrographiques ; élaboration de scénarios nationaux et locaux à l'horizon 2025 permettant de fixer des objectifs précis et de prendre des mesures en vue d'une gestion durable de l'eau. Ces thèmes prioritaires devront comprendre les actions horizontales suivantes : renforcement des capacités institutionnelles et de la formation ; échange d'informations et de connaissance ; transfert de savoir-faire et de technologie.

Enfin, de nombreuses initiatives ont pour objectif de développer le dialogue entre les bailleurs de fonds, les gestionnaires de la ressource, les chercheurs et la société civile. En réponse à un besoin de coordination accrue pour une gestion durable des ressources en eau, et après les conférences de Dublin et de Rio sur les ressources en eau et le climat en 1992, a été créé en 1996 le Global Water Partnership, qui a pour objectif la promotion et l'implémentation de la gestion intégrée des ressources en eau, à travers le développement d'un réseau mondial mettant en relation les ressources financières, techniques et politiques. Dans ce sillage on citera par exemple le Programme de coopération sur l'eau et le climat (CPWC) et une de ses composantes le « Dialogue international sur l'eau et le climat ». Le CPWC a pour objectif d'améliorer les capacités des gestionnaires des ressources en eau de faire face à la variabilité croissante du climat mondial, en établissant des plateformes de rencontres et de dialogue entre gestionnaires et décideurs, et en facilitant l'accès aux informations générées par les chercheurs. Le CPWC a un rôle d'animation dans la préparation des forums mondiaux de l'eau. En parallèle a été créé le Conseil Mondial de l'Eau (World Water Council) qui siège à Marseille, dont les objectifs sont à peu près identiques. D'autres initiatives se sont développées depuis telle celle du CRDI, le centre de recherche Canadien pour le développement. Le CRDI se penche depuis plusieurs années sur l'utilisation des résultats de recherche par les décideurs des pays en développement. Pour l'appuyer dans ses démarches, le Bureau régional de l'Afrique occidentale et centrale a créé en 2001 la Commission des conseillers régionaux, composée de chercheurs et de décideurs de l'Afrique de l'Ouest et du Centre. Sous l'impulsion de cette commission, le bureau régional a prévu des rencontres nationales entre chercheurs et décideurs. En février 2006 cette rencontre a eu lieu à Bamako sur le thème « Sécheresse et désertification en Afrique du Centre et de l'Ouest : le cas du Mali ». La sécheresse qui sévit au Mali, pays à vocation agropastorale, depuis plus de 30 ans, freine le développement du secteur agricole, qui contribue à hauteur de 45 % au PIB et occupe 80 % de la population. Entraînant la désertification, elle contribue à l'insécurité alimentaire. La recherche de solutions passe forcément par la recherche scientifique, et l'on dispose d'ailleurs de nombreux résultats de recherche sur la sécheresse et la désertification. Mais ces résultats ont-ils influé sur la prise des décisions politiques ?

## **5.2 Occupation du sol et états de surface : un axe de recherche majeur en Afrique de l'Ouest**

Les sociétés scientifiques accompagnent ce mouvement de mutualisation des objectifs et des moyens vers les pays du Sud, et l'Afrique en particulier, avec par exemple le démarrage de la décennie PUB à l'AISH (Prediction on Ungauged Basins Prediction sur les bassins non jaugeés, de l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques) de 2003 à 2012 ; le succès

des programmes FRIEND (Flow Regimes from International and Experimental Network Data) de l'UNESCO ; ou la mise en place de grands programmes de recherche internationaux via l'Union Européenne (AMMA - Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine, AMMA, 2002, 2003, 2004) ou l'IWMI (Challenge Program Water and Food) sur la gestion intégrée des ressources en eau sur des grands fleuves dont le fleuve Niger.

Mais plusieurs points particuliers sont à considérer. La plupart des états d'Afrique de l'Ouest sont dans des situations socio-économiques trop précaires pour faire face tout simplement aux impacts de la variabilité climatique des 35 dernières années, qu'elle soit ou non une manifestation « avancée » du changement climatique. D'autre part, on commence à mesurer, au Sahel en particulier, que la pression anthropique sur l'environnement peut avoir des conséquences plus importantes sur l'environnement que l'impact naturel des changements climatiques observés depuis la rupture 1970.

Pour l'heure, les grands projets scientifiques en cours en hydrologie abordent des sujets comme la mousson africaine –mécanismes atmosphériques, interface surface-atmosphère, impacts sur les ressources et la santé ; la gestion intégrée des ressources en eau ; le suivi de la végétation au Sahel. Dans tous ces projets la modélisation des relations pluie-débit, à l'échelle des processus ou à l'échelle globale, rencontre le problème de l'évaluation de la variabilité spatio-temporelle des états de surface.

L'augmentation de la population mondiale, et en particulier africaine, provoque une anthropisation croissante de l'environnement, dont les modifications génèrent des perturbations importantes voire majeures des régimes hydrologiques de surface et souterrains, qu'il est nécessaire d'appréhender à plusieurs échelles. La taille des grands bassins nécessite d'employer des outils de modélisation adaptés. La modélisation à base physique des processus élémentaires du cycle hydrologique est attractive car elle permet de comprendre en détails les interactions entre les différents compartiments du cycle hydrologique. Malheureusement, elle nécessite la disponibilité d'une masse d'informations considérable sur l'environnement, à des échelles spatiales et temporelles très fines (au minimum l'évènement pluvieux), ce qui la rend inapplicable pour de grandes surfaces, par l'impossibilité de réunir les observations hydrologiques et les informations environnementales nécessaires. De ce fait on utilise la modélisation conceptuelle pour les grands bassins ne disposant pas de bases de données suffisantes, ce qui est le cas en Afrique. Les modèles conceptuels peuvent fonctionner au pas de temps mensuel et nécessitent en entrée seulement des données de pluie, d'ETP et des capacités de stockage (WHC) dans le (ou les) réservoir(s) du modèle.

La WHC est susceptible de varier en fonction des états de surface et de la capacité des sols à infiltrer une partie des précipitations. Afin de pouvoir prendre en compte dans la modélisation la variabilité spatio-temporelle de la WHC il est nécessaire de pouvoir évaluer l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol pour de grands bassins versants et sur des séries chronologiques longues, et si possible remontant à des années antérieures à 1970, qui a marqué une rupture climatique en Afrique de l'Ouest.

L'héritage scientifique et « partenarial » de l'ORSTOM/IRD, et l'expérience acquise par le programme VAHYNE, nous permettent à HSM de proposer un projet centré sur l'étude de l'évolution des états de surface et la prise en compte de cette évolution dans la modélisation hydrologique, afin d'améliorer la simulation des ressources en eau pour le futur.

Ces axes de recherche sont abordés dans le projet MOHYCAN, que je porte à HSM pour le prochain quadriennal 2007-2010.

## 5.3 Le projet MOHYCAN : Modélisation Hydrologique, Climat et Anthropisation des grands cours d'eau.

### 5.3.1 Contexte du projet et questions émergentes

L'influence du changement climatique sur l'environnement et les sociétés, et également leurs « stratégies d'adaptation », sont actuellement des préoccupations politiques et scientifiques prioritaires dans les pays du Sud, et en particulier en Afrique (Oyebande *et al.*, 2002).

Le programme de recherche VAHYNE (Analyse de la Variabilité Hydrologique et Impacts sur les ressources en Eau) de l'UMR Hydrosociétés, se termine en 2006. Il avait pour but de décrire, comprendre et prévoir les variations des régimes hydrologiques et des ressources en eau dans un contexte de changement climatique et d'évolution environnementale et anthropique rapide, dans des régions tropicales équatoriales à sub-désertiques. Durant ce programme on a mis en évidence la diversité des relations pluie-débit en Afrique de l'Ouest et Centrale et on a montré sur quelques exemples l'importance de la prise en compte de la dynamique de l'occupation du sol dans la modélisation hydrologique, préalable à la simulation des ressources en eau pour le futur.

### 5.3.2 Objectifs du projet MOHYCAN

Le projet que nous voulons développer est centré sur l'apport de l'hydrologie à la compréhension des modifications environnementales liées aux changements climatiques et anthropiques des grands cours d'eau d'Afrique de l'Ouest.

Il vise à améliorer le fonctionnement des modèles conceptuels sur grands bassins tropicaux, et à mettre en place les éléments nécessaires à la définition d'une nouvelle fonction de production mieux adaptée à la prise en compte des changements d'occupation du sol et d'état de surface des bassins versants, et aux nouvelles données spatiales disponibles, issues de la télédétection en particulier. Nous aiderons à définir les conditions du ruissellement dans des régions où elles ont été modifiées depuis quelques décennies, en prenant en compte l'anthropisation sous différents aspects pour décrire de façon détaillée les interactions homme-climat-environnement. Enfin, par des simulations nous pourrions estimer l'impact des changements climatiques sur l'environnement et les ressources en eau en prenant en compte des facteurs anthropiques, et nous participerons à des applications en santé.

#### Plan de recherche

Le développement de ce projet se fera suivant **quatre axes** :

- 1 : Variabilité hydroclimatique
- 2 : Modélisation des ressources en eau à grande échelle d'espace et de temps
- 3 : Occupation du sol et états de surface
- 4 : Scénarios climatiques et impacts sur les ressources en eau et la santé

Au sein du collectif MOHYCAN je porterai plus particulièrement les développements du point 2 et ses relations avec le point 3 (modélisation), tout en ayant en charge l'animation et la

coordination du projet dans son ensemble. Néanmoins dans les autres points, j'envisage de développer certains aspects.

## **a Variabilité hydroclimatique**

Les résultats du programme VAHYNE ont mis en évidence la grande variabilité spatio-temporelle des relations pluie-débit en Afrique de l'Ouest, qui nécessite de prendre en compte les données les plus récentes dans toute analyse de série chronologique. L'échelle sous-continentale de notre approche oblige à une recherche permanente de données, à leur critique et à leur saisie, pour compléter les fichiers existants et ainsi permettre les meilleures calibrations des modèles hydrologiques.

L'analyse de l'évolution du climat et des régimes hydrologiques est un travail préliminaire indispensable à toute étude qui s'intéresse à une évolution et une variabilité.

La caractérisation des régimes pluviométriques et le calcul des précipitations spatialisées par bassin versant nécessitent une critique de la qualité des données et l'analyse de longues séries chronologiques, pour déterminer la variabilité des régimes pluviométriques, les tendances et les relations avec les signaux climatiques majeurs régionaux et planétaires.

La plupart des fichiers de climatologie type CRU ou NOAA ne contiennent d'une part pas toutes les données existantes, et d'autre part ne mentionnent que rarement les critiques qui ont été apportées aux séries de données avant leur intégration dans les bases disséminées. Il a été montré que plus la densité de stations pluviométriques, utilisées pour le calcul des pluies sur le bassin, est élevée, meilleures sont les performances des simulations hydrologiques. Il apparaît donc important de rechercher et d'utiliser le plus grand nombre d'information possible.

La critique des données pluviométriques peut dans une certaine mesure être effectuée a posteriori. Il n'en va pas de même pour les données de débit puisqu'il est rare d'avoir accès aux fichiers de jaugeages et aux barèmes d'étalonnage qui ont servi aux services nationaux à effectuer les traductions des hauteurs d'eau observées aux stations en débits.

Dans ce sens, il est fondamental d'accompagner cette étape d'actions de recherche méthodologiques sur des analyses comparées et régionales des séries chronologiques disponibles pour les variables hydroclimatiques qui seront accessibles. C'est à la fois une autre manière d'exploiter ou de valoriser toute l'information accumulée et un objectif de prospection méthodologique. Ces données doivent permettre de tester ou de mettre au point des nouveaux outils d'analyse à l'échelle régionale, basées en particulier sur l'analyse multivariée.

### ***Bases de données et politique de dissémination de l'information***

Nous avons mis en place un système d'informations environnementales pour les ressources en eau et leur modélisation (SIEREM, 2004) (Boyer, 2003 ; Boyer *et al.*, 2004), qui gère des données pluviométriques, climatiques, débitométriques et cartographiques sur toute l'Afrique (Dieulin, 2003) et le bassin méditerranéen. Un algorithme de calcul des capacités en eau du sol à l'échelle de notre modélisation grands bassins (demi-degré carré) a été développé dans ce cadre (Dieulin, 2005 ; Dieulin *et al.*, 2005). SIEREM doit être doté d'utilitaires graphiques et cartographiques. Nous proposons de les réaliser au cours du programme MOHYCAN, avec comme objectif la création d'une base de données cartographiques en accès libre sur le Web et des possibilités de téléchargement de données concernant les bassins-versants. D'autre part un inventaire des données pluviométriques et hydrologiques est disponible, qui renvoie vers les Services Nationaux des pays partenaires pour l'obtention des données brutes.

Nous allons par ailleurs calculer des grilles de pluies mensuelles par interpolation et les proposer en téléchargement sur le site. Cette base de données cartographiques sera couplée à la base de données hydroclimatologique, par interfaçage dans une plate-forme de modélisation

optimisant l'exploitation des méthodes d'analyse des données et l'utilisation des modèles, et qui sera destinée à être installée chez les partenaires.

Un certain nombre de produits du site SIEREM sont destinés à être téléchargeables en accès libre sur Internet, comme les grilles de pluies mensuelles, les fichiers de forme liés aux bassins-versants. L'objectif est de faire de cette base de données cartographiques sur les bassins d'Afrique de l'Ouest et Centrale, la référence commune à toutes les études sur ce sujet. Il s'agit d'une forme de capitalisation de la « mémoire » hydrologique de l'ORSTOM/IRD.

### *Perspectives de recherche à développer*

Base de toute étude environnementale, l'analyse des séries d'observations de terrain met en évidence les caractéristiques de la variabilité spatiale et temporelle du climat en Afrique de l'Ouest et Centrale (pluies et débits principalement). Préalable à toute étude sur la variabilité des ressources en eau, nous poursuivrons nos investigations sur l'évolution hydroclimatique, qui permet de mettre en évidence les régions où les relations pluie-débit semblent avoir été modifiées. Ceci nous amène à nous intéresser à l'étude des impacts anthropiques sur l'environnement dans un contexte climatique changeant, et en particulier l'étude des conditions de ruissellement de surface, appréhendés à l'échelle des petits et des grands bassins ; ceci dans le but d'améliorer les performances de la modélisation hydrologique.

Suivant ce constat nous avons travaillé sur l'origine de cette variabilité paradoxale au Sahel et sur l'importance de prendre en compte l'évolution de l'occupation du sol pour améliorer les performances de la modélisation.

Les premiers résultats sur le bassin du Nakambé (ex-Volta Blanche) au Burkina-Faso méritent d'être étendus à un plus grand ensemble d'exemples dans la bande sahélienne.

L'augmentation des débits sur les cours d'eau sahéliens ne peut être identifiée que sur les cours d'eau strictement sahéliens. Sur les séries de débits de cours d'eau prenant leur source en régime plus humide, cette augmentation n'est pas observée, même si une partie importante du cours d'eau circule en zone sahélienne (comme le Baoulé au Mali).

Les cours d'eau sahéliens pour lesquels on dispose de séries de données anciennes et suffisamment longues se situent au Burkina-Faso et au Niger –ce sont les affluents de rive droite du fleuve Niger-, et quelques-uns dans le sud de la Mauritanie dont les données sont de qualité moyenne, et présentent des lacunes temporelles. Il existe par ailleurs plusieurs petits bassins expérimentaux qui ont été suivis pendant quelques années durant les années 1950 à 1980, et qui peuvent servir de base à des études comparatives.

C'est vers ces bassins et ces pays que nous encourageons et participons au développement de projets ayant pour objectif la mesure des écoulements en milieu sahélien. Les mesures acquises permettront d'évaluer comment les changements environnementaux peuvent être associés aux changements de régime hydrologique observés pour les rivières sahéliennes. Ces mesures permettront également de redéfinir les normes hydrologiques « modifiées » pour les cours d'eau sahéliens.

Nous avons déjà relancé des mesures hydrologiques sur les petits bassins de Koumbaka au Mali, dans le cadre d'un projet financé par le PNRH sur la période 2005-2006, et nous allons développer sur ce bassin une comparaison de diverses approches de modélisation menées au sein de l'axe 3 de HSM par les programmes MOHYCAN et PHYSICA, durant le prochain quadriennal.

Une question en milieu sahélien est en effet de savoir à partir de quelle surface de bassin l'augmentation des débits observée sur les petits bassins continue à s'observer. Le schéma qui est derrière cela est que si la surface du bassin est importante, il y a des zones d'épandage où la reprise par évaporation annule le phénomène et que donc la taille du bassin est importante sur sa persistance ou non, sachant que les phénomènes pluvieux sont limités dans l'espace à l'échelle de l'événement.... Les premiers résultats à l'échelle du Nakambé (20 800 km<sup>2</sup>), bassin

également très riche en retenues d'eau, incitent à penser que la dynamique globale visible à l'échelle mensuelle et au demi-degré carré, l'emporte sur les processus locaux et événementiels. Mais nous allons également tester des modèles globaux journaliers (type GR4J) sur quelques petits bassins sahéliens, afin d'étudier si l'évolution des relations pluie-débit dans un contexte de changement climatique et anthropique à l'échelle événementielle.

En résumé, 5 directions me semblent importantes à suivre au cours du projet MOHYCAN en ce qui concerne ce premier axe de recherche :

- Collecte de données hydroclimatiques, critique et implémentation de base de données,
- Partage sur site web de produits de données élaborés,
- Analyse de séries chronologiques : comparaison avec des données historiques et avec des signaux climatiques,
- Evolution de la relation pluie-débit,
- Comparaison d'approches multi-échelles spatiales et temporelles sur les bassins versants.

Sur cette thématique l'objectif est d'encadrer un étudiant en thèse sur l'analyse des changements des relations pluie-débit au Sahel.

## **b Modélisation des ressources en eau à grande échelle d'espace et de temps**

Il est nécessaire d'utiliser des modèles hydrologiques pour simuler les écoulements passés et futurs. Il faut développer notre connaissance de l'applicabilité de ces modèles à nos objets d'étude et aux échelles spatio-temporelles que nous pouvons utiliser. Il est également important de mener une réflexion sur la sensibilité de ces modèles à différents facteurs : types et qualité des données d'entrée, choix des périodes de calage-validation, algorithmes de fonction critère, équifinalité. J'interviendrai dans l'équipe essentiellement sur le premier point : l'amélioration des performances des modèles hydrologiques passe tout d'abord par un travail de sélection et de critique des variables d'entrée. L'utilisation d'informations spatialisées, et de plus en plus d'origine spatiale, contribue à cette amélioration, qui pourra conduire, et c'est un des objectifs de MOHYCAN, à redéfinir une fonction de production pour ces modèles hydrologiques sur la base de données de plus en plus observées et évolutives, plutôt que indirectes et fixes ou peu variables, comme c'est le cas pour l'ETP et la WHC par exemple.

### *Adéquation entre disponibilité des données et type de modélisation*

L'AISH vient de lancer la décennie internationale (2003-2012) de la prédiction sur les bassins versants non jaugeés (Prediction on Ungauged Basins – PUB), problématique récurrente et toujours sans véritable réponse en hydrologie, où le modèle universel n'existe pas. En Afrique, aux problèmes de méthodologie s'ajoutent des insuffisances chroniques des services nationaux dans la collecte des données. Peu de bassins sont suivis régulièrement, alors que les relations pluie-débit peuvent évoluer rapidement dans le temps au Sahel par exemple et nécessiteraient des mesures en continu et sur de longues périodes de temps.

La modélisation pluie-débit est toujours largement tributaire de la disponibilité de ces données, nécessaires pour déterminer les valeurs des paramètres d'une majorité de modèles existants, qu'ils soient conceptuels ou à base physique. La qualité des données en entrée des modèles est un facteur limitant de la qualité des simulations.

Dans ce contexte, la quantité et la qualité d'informations disponibles en Afrique de l'Ouest et Centrale, et la résolution spatiale et temporelle des GCM (Louvet *et al.*, 2005) que la communauté climatique est en mesure de fournir nous incite à continuer de travailler au pas

d'espace du demi degré carré, et au pas de temps mensuel, sachant que dans la plupart des pays les seules données qui peuvent être mises à jour dans des délais raisonnables sont les données mensuelles. Sachant que de ce fait tous les processus explicatifs ne sont pas accessibles, nous collaborerons aussi avec des équipes travaillant sur des petits bassins, à l'échelle des processus (rapprochement par exemple avec l'équipe PHYSICA de HSM, ou le Département Ressources en Eau, du Groupe des Ecoles EIER-ETSHER au burkina-Faso).

Nous allons dans MOHYCAN explorer deux types de modèles. Dans un premier cas, nous allons comparer le modèle HYDRA, qui a été utilisé dans un précédent projet sur la reconstruction du paléolac Tchad (Delclaux *et al.*, 2005 ; Leblanc *et al.*, 2005a, 2005b) et le modèle GR2M sur un cas d'étude précis, dans le cadre de propositions de projets à l'ANR 2006 sur le Lac Tchad (Lézine *et al.*, 2006) et sur l'Afrique de l'Ouest (Moron *et al.*, 2006). Dans le cas du Lac Tchad nous allons également continuer dans la voie de modèles simples (GR2M par exemple) en complexifiant notre représentation en faisant intervenir d'autres variables. Dans ce second cas, nous pouvons explorer plusieurs points, et en particulier développer une meilleure connaissance des bassins sur lesquels nous travaillons : extraire toute l'information possible des MNT (Kenward *et al.*, 2000), des photos aériennes et images satellites, des cartes pédologiques, des cartes géologiques, des cartes de végétation ; construire une base de données de quelques bassins sur lesquels on pourra entreprendre toutes les comparaisons.

### *Entrée pluie*

Le calcul des grilles de pluies est une source d'incertitude importante (Fekete *et al.*, 2004 ; Mahé *et al.*, 2005), car les jeux de données initiales employés sont extrêmement variables. D'autre part les jeux de données utilisés sont la plupart du temps différents en nombre de postes, en qualité de la critique et en type de méthode d'interpolation. Ces différences peuvent avoir un impact élevé sur les résultats de la modélisation.

Une première étude de Diello *et al.* (2005) a eu pour objectif d'utiliser les chroniques de NDVI de la NOAA de 1980 à 1998 pour caractériser l'évolution de l'occupation du sol et de la pluie, avec des résultats peu concluants pour l'occupation du sol, et un peu plus intéressants pour la pluie.

Avec les données de Météosat seconde génération (MSG), une variable rattachée à une probabilité de pluie peut être discrétisée à un pas d'espace de 3 km, au pas de temps de 15 minutes. La représentativité de ces estimations de pluie par satellite est-elle plus élevée que celle des pluies au sol classiquement interpolées ?

Nous avons travaillé à partir de plusieurs sources de données provenant de l'IRD, de la Climatic Research Unit (CRU, Univ. East Anglia, Norwich, UK), et des météorologies nationales. Nous avons employé plusieurs méthodes de spatialisation : krigeage et spline, les données du CRU ayant été traitées par spline, et inverse pondérée sur certaines zones (Ouédraogo *et al.*, 2001 ; Girard *et al.*, 2002 ; Mahé *et al.*, 2006). La densité du réseau de stations pluviométriques et la méthode d'interpolation entraînent des différences entre grilles que l'on peut chiffrer, respectivement, de 4 à 8 %, et de 3 à 4%. Ainsi pour une maille de grille, les différences observées atteignent parfois 12%. Il faut noter que les données de base sont identiques (celles collectées par les services des météorologies nationales). Les différences observées sur les valeurs calculées de pluies moyennes par unité de surface proviennent d'erreurs dans la saisie et la transmission des données, de défaut de critique, du type de spatialisation, et surtout de la densité de stations utilisées.

En fonction des grilles de pluie utilisées, les débits simulés diffèrent de 30% en moyenne, la différence pouvant aller jusqu'à 100% suivant les caractéristiques pendant la crue. Il faut noter que sur les bassins étudiés, ce n'est pas toujours le plus grand nombre de stations qui donne les grilles les plus performantes, là encore la qualité de la source de données est importante.

### *Entrée évaporation*

L'ETP est le terme prépondérant du bilan hydrologique, mais c'est aussi le moins bien estimé. Peut-on utiliser certains produits de la télédétection pour évaluer l'ETP ou l'ETR ?

Les modèles conceptuels sont peu sensibles à l'entrée ETP, comparativement à l'entrée pluie. Les modèles sont sensibles essentiellement à la pluie, et très peu à l'ETP (Ardoin *et al.*, 2001). La formulation de Penman-Monteith donne cependant les meilleurs résultats par rapport à celle de la FAO (Penman modifié) et à celle du CRU (Thom et Oliver)(Paturel *et al.*, 2003a). Il semble même (Hreiche *et al.*, 2002) que pour ces modèles le critère le plus important relié à la pluie serait la modulation du signal pluie, aussi bien temporelle que spatiale.

Pour les bassins sahéliens, on comprend que l'ETP ait peu d'influence sur les performances des modèles, car la pluie est presque toujours inférieure à l'ETP, d'une part, et d'autre part l'infiltration est très faible et largement dépassée quantitativement en surface par le ruissellement direct ou très peu retardé.

Par contre dans les régions plus humides, où les pluies excèdent l'ETP durant de nombreux mois de l'année, une mauvaise estimation de cette dernière pourra avoir des conséquences importantes sur les performances des modèles. C'est probablement une raison qui intervient pour expliquer que les modèles conceptuels basés sur une entrée ETP fonctionnent très mal pour les bassins à deux crues annuelles.

Deux voies sont ouvertes pour essayer d'améliorer la prise en compte de l'évapotranspiration dans la modélisation. Les deux sont basées sur l'utilisation d'information spatiale. La première consiste à calculer une ETP à partir des températures de surface. Le champ de valeurs obtenues serait infiniment plus discrétisé et réaliste que les produits ETP disponibles dans les bases de données internationales, qui ne sont élaborés qu'à partir de rares mesures au sol. La seconde consisterait à calculer une ETR à partir des produits satellitaires, ce qui nous obligerait à modifier la fonction de production des modèles, qui réalisent jusqu'à présent une abstraction de l'ETP sur la pluie.

### *Développements en modélisation conceptuelle*

Parallèlement, la réflexion doit se poursuivre sur les concepts de la modélisation globale ou semi-distribuée, que nous utilisons à cette échelle des grands bassins, sur le choix des variables représentatives, l'impact de qualité et de la densité de l'information, l'analyse des erreurs des entrées et des sorties des modèles, les problèmes d'équifinalité, etc.

Le modèle qui donne généralement les meilleurs résultats en calage et en validation est le modèle GR2M. Cependant le modèle WBM donne également de très bons résultats, et parfois les meilleurs par exemple sur le haut bassin du fleuve Niger. Le modèle de Yates donne des résultats satisfaisants, et est d'un grand intérêt dans l'optique de la décennie PUB : ses paramètres, au nombre de trois, sont prédéfinis à l'aide de grilles de type climat-végétation et ne nécessitent donc aucun calage. Il rend alors possible son utilisation sur des bassins où on ne dispose d'aucune information. La première grille de type climat-végétation a été publiée par Holdridge en 1947. Depuis, des mises à jour ont été effectuées, en particulier par Leemans (1990).

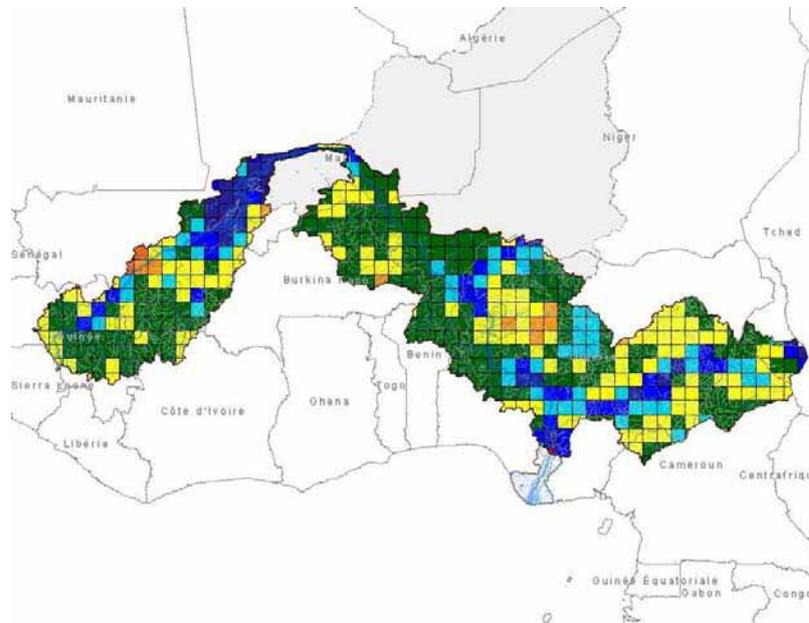
La combinaison modèle-grille « CRU, GR2M, ETP PEN (Penman-Monteith) et WHC FAOmax » a été retenue dans le cas de traitement automatisé d'un grand nombre de bassins versants. Cette combinaison donne de bons résultats sauf dans une bande sahélienne entre Ouagadougou et Niamey, sous la boucle du Niger, où le modèle ne donne pas satisfaction. Dans cette région la diminution de la pluviométrie n'entraîne pas une diminution des débits mais au contraire une augmentation des écoulements depuis 1970. En appliquant les autres modèles disponibles, les résultats ne sont pas meilleurs.

Une des questions majeures est de savoir si le fait de semi-distribuer l'information à l'intérieur du bassin-versant améliore la performance du modèle, par rapport à l'utilisation

d'une seule valeur globale de chaque variable pour le bassin-versant. Les premiers résultats sur le sujet (Paturel *et al.*, 2005 ; Périn *et al.*, 2005) indiquent des performances comparables et quelquefois meilleures avec la version globale de GR2M par rapport à la version semi-distribuée. C'est une question importante à développer dans MOHYCAN, parallèlement à la poursuite d'une recherche d'une meilleure spatialisation des données d'entrée, qui permettra à l'issue du projet de quantifier plus précisément les termes de l'alternative.

### *Capacité en eau des sols*

Jusqu'à présent, cinq grilles de données sol ont été utilisées, toutes des variantes du fichier de données sols de la FAO : 3 variables sont calculées à partir des valeurs minimum, maximum et moyennes de capacité en eau du sol de la FAO (WHCmin, max et moy), la quatrième fournie par le CRU provient des résultats des travaux de Dunne et Willmott (1996), et la dernière résulte de la classification de Saxton. Les meilleurs résultats ont été obtenus presque exclusivement avec les données de la FAO WHC max (figure 43).



**Figure 43**

Carte des capacités en eau du sol par demi-degré carré pour le fleuve Niger à Onitsha (1 388 334 km<sup>2</sup>), données issues de la FAO (FAO, 1995b), valeurs maximales. Extrait du système d'information SIEREM (2004).

En utilisant un fichier de données de capacités en eau du sol évolutif dans le temps, le critère de Nash est significativement amélioré dans la plupart des essais de modélisation que nous avons effectués, aussi bien en calibration qu'en validation, comme le montrent les résultats du tableau 6, obtenus pour le bassin du Nakambé à Wayen (20800 km<sup>2</sup>) au Burkina-Faso (Mahé *et al.*, 2005).

Les données NDVI disponibles au format GAC sur la période 1982-1999 ne permettent pas de distinguer une évolution sensible de l'occupation du sol sur le bassin du Nakambé à Wayen (Diello, 2002)

A partir des images spatiales, photos aériennes ou images satellite à haute résolution de type Landsat ou Spot, on aura des informations spatialisées et de qualité sur l'évolution de l'occupation du sol depuis près de 50 ans.

### *Perspectives*

Les développements en modélisation conceptuelle vont concerner plusieurs aspects de méthodologie liés à l'application des algorithmes et aux critères d'évaluation des performances. Il est tout aussi important en parallèle d'étudier la sensibilité des modèles à la qualité des données d'entrée. Nous allons généraliser l'utilisation de données spatiales permettant des suivis sur de grandes surfaces et sur de longues périodes temporelles. Cette problématique croisée spatialisation/modélisation hydrologique va structurer les activités de l'équipe MOHYCAN dans les années à venir. Chacun des aspects méthodologiques abordés fera l'objet de propositions de stages de Master en France et en Afrique, et un étudiant béninois est candidat à un sujet de thèse sur ces développements méthodologiques approfondis, mais reste toujours en attente d'obtention de bourse.

## **c Occupation du sol et états de surface**

Il apparaît essentiel d'améliorer nos connaissances sur les relations homme-climat-environnement et leurs répercussions sur les états de surface, les régimes hydrologiques et les ressources en eau, sur plusieurs échelles temporelles (du mois au siècle)(Vörösmarty *et al.*, 1991).

### *Actions à entreprendre*

Il est nécessaire d'améliorer nos connaissances sur la relation occupation du sol/ruissellement dans le but de mieux prendre en compte l'évolution des états de surface sur notre modélisation, et améliorer la génération des fichiers évolutifs de WHC. Trois pistes sont en ce moment étudiées. Il s'agit de l'exploitation de l'imagerie spatiale, satellitale ou photographique ; d'une meilleure appréciation au sol des relations pluie-débit sur environnements types ; et d'une utilisation de données socio-économiques.

### **Données spatiales et cartographie**

Les données satellitales permettent un suivi depuis les années 1970 de l'occupation du sol. On a pu tester sur un bassin versant sahélien l'intérêt d'utiliser ces données pour évaluer à grande échelle les changements d'états de surface et leur impact sur la capacité en eau des sols, et par là sur la modélisation (Vilaly, 2004). Est-ce que ces résultats sont confirmés sur d'autres bassins sahéliens ? Est-ce que cette méthodologie est applicable et utile en climat plus humide en Afrique de l'Ouest et en climat sud-méditerranéen ?

Nous souhaitons maintenant généraliser notre démarche sur de plus grandes surfaces au Sahel. L'étape préliminaire à l'extension de cette démarche de cartographie de l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol et des états de surface en Afrique sahélienne et semi-aride est la mise au point d'une méthodologie par analyse diachronique d'images spatiales depuis 1950. Il est indispensable de pouvoir remonter à des images précédant la rupture climatique de 1970 et les modifications environnementales associées.

Les informations de base pour cette étude sont les photographies aériennes disponibles à l'Institut Géographique National et dans les services nationaux de chaque état, et les images satellitaires acquises à partir de 1972 par les capteurs embarqués à bord de la série de satellites Landsat en particulier, puis Spot ensuite. Il existe également des études ponctuelles, et souvent par pays, des couvertures végétales et pédologiques, qui renseignent sur l'occupation du sol à un instant donné.

Compte tenu de l'ampleur de la tâche pour couvrir tous les pays, il est proposé au laboratoire un premier sujet de thèse sur des zones test afin d'étudier différentes méthodologies, qui pourraient être appliquées par la suite à l'ensemble de la région. Il faut définir une méthodologie, ainsi que les sites d'étude les plus propices en fonction de plusieurs critères :

disponibilité des photos aériennes et des images satellitaires, partenariats possibles en Afrique avec les services cartographiques, disponibilité d'études anciennes localisées d'évolution des états de surface qui peuvent servir de référence. La finalité hydrologique de cette étude pourra être prise en compte en choisissant des zones où existent des données hydrologiques anciennes et de bonne qualité ainsi qu'une bonne couverture pluviométrique, pour pouvoir tester la significativité du produit obtenu à travers la modélisation hydrologique.

Ce sujet nécessitera de développer des algorithmes originaux de traitement d'images satellitaires afin de mettre en cohérence des signaux reçus sur des fréquences et à des résolutions différentes, dans un environnement changeant.

Dans notre démarche de télédétection de l'occupation du sol nous avons pour le moment choisi de suivre uniquement 3 classes d'occupation : végétation naturelle, cultures et sols nus, qui ont des réponses très contrastées au Sahel en terme de ruissellement de surface : respectivement 13 à 18%, 20 à 25% et 50 à 55% en moyenne, du sud au nord du bassin du Nakambé à Wayen au Burkina-Faso.

Il est possible d'améliorer l'expression de la diversité de paysages et des réponses hydrologiques associées en effectuant une analyse plus fine des états de surface. Il est ainsi assez simple d'ajouter une quatrième classe : les eaux libres. Ce type de surface est en pleine expansion au Sahel avec la construction de nombreux ouvrages de retenue d'eau, de toutes tailles. Par exemple il existe sur le bassin du Nakambé à Wayen (20 800 km<sup>2</sup>) près de 240 barrages pour un volume stocké de près de 400 millions de mètres cubes par an depuis 2000, contre 170 millions en 1994 et 55 millions en 1965. Le passage d'une surface de végétation naturelle ou de culture à une surface d'eau libre s'accompagne d'une augmentation du coefficient de ruissellement de 2,5 ou de 4 pour la même surface, à supposer qu'il n'y ait pas d'infiltration. L'augmentation des surfaces en eau libre depuis 40 ans pourrait être de plusieurs pourcent de la surface du bassin du Nakambé, avec des conséquences importantes sur les écoulements, qu'il faut mettre en évidence.

#### **Collecte et acquisition de données de terrain spécifiques**

Il est important de pouvoir acquérir des informations hydrologiques et environnementales sur des environnements spécifiques. Nous devons pouvoir être renseignés sur le ruissellement sur des petits bassins représentatifs de quelques environnements/paysages types, que l'on va retrouver par patches au sein de mosaïques composant les bassins versants. Un second intérêt se situe dans la comparaison du ruissellement sur un même petit bassin à des périodes de climat et d'occupation humaine très différentes, constituant un témoignage précieux de l'évolution des relations pluie-débit.

Il ne rentre pas dans le cadre du projet MOHYCAN d'étudier l'évolution du ruissellement sur tous les types d'environnement. Nous sommes en particulier intéressés par les environnements sahéliens et semi-arides. Par contre, ce projet peut être l'occasion de compléter un dispositif régional mis en place dans plusieurs pays de la sous-région à travers le programme AMMA au Bénin, au Niger et au Burkina-Faso, et le programme Corus Mali.

Il manque à ce dispositif un petit bassin situé en climat nord-sahélien, dont on connaisse les écoulements et les états de surface depuis plusieurs décennies. Le bassin de Koumbaka près de Mopti au Mali, remplit les conditions recherchées. Ce bassin a été étudié par les hydrologues de l'ORSTOM entre 1955 et 1957, et une cartographie de l'occupation du sol et des états de surface a été réalisée à cette même époque. Le sous-bassin de Sinkoroni a fait l'objet d'une couverture des états de surface en 1988, ainsi que de deux années de mesures d'écoulement en 1991-1992. La Mare d'Oursi au Burkina-Faso, pourrait aussi répondre en partie à nos critères de choix.

Il existe par ailleurs peu d'exemples d'augmentation des écoulements dans un contexte de déficit pluviométrique (Bruijnzeel, 2004). Quelles sont les raisons qui font que cette évolution de la relation pluie-débit est peu observée ailleurs ? Quels sont les facteurs prépondérants à

l'origine de cette modification des états de surface ? Il sera intéressant de rechercher des résultats obtenus dans des contextes climatiques proches, pour analyser les facteurs conditionnels des régimes hydrologiques et des états de surface (géographie, morphologie, occupation humaine, répartition des pluies et des températures, etc.).

### **Utilisation de données socio-économiques**

Avant les premières images satellitales de 1972-1973 il n'existe pas de moyen simple de connaître l'évolution des états de surface sur de grandes superficies, correspondant à la taille des grands bassins versants étudiés dans MOHYCAN. Les photos aériennes qui ont été réalisées depuis les années 1950 n'ont jamais été exploitées pour de grandes surfaces, car il faut plusieurs centaines ou milliers de photos (selon l'échelle) pour couvrir l'équivalent d'une image Landsat.

Malgré tout, il est primordial d'arriver à extraire de ces photos des informations sur le passé de l'occupation du sol. Ces photos sont les seuls témoignages spatialisés des états de surface avant 1970. C'est la raison pour laquelle nous proposons une étude méthodologique sur l'utilisation de ces photos pour de grandes surfaces.

Parallèlement, il existe des témoignages indirects de l'occupation du sol, qui sont liés à la densité de population et aux activités socio-économiques associées. Les données de recensement ou les statistiques agricoles traduisent l'évolution de la population de façon très discrétisée, si l'on peut avoir accès aux données d'enquêtes villageoises. Ces données peuvent être reliées à l'occupation du sol. Il s'agit bien sûr d'une approximation. On sait par exemple au Burkina-Faso que les populations ont des rapports différents au foncier, et donc qu'il n'existe pas de relation unique entre le nombre d'habitants et les surfaces cultivées ou les jachères. Au Burkina-Faso dans la province de la Gnagna vers Bogandé en zone sahélienne, les populations appliquent un droit du sol particulier qui retire la jouissance à l'exploitant si le terrain n'est pas cultivé pendant plus de deux ans. Pour éviter la perte de terres cultivables, les populations labourent de grandes surfaces et limitent au maximum le temps de jachère, voire l'annulent, alors que la pression anthropique ne le justifie pas d'un point de vue purement nutritionnel ou économique. D'autres populations pratiquent une culture intensive jusqu'à épuisement des sols, sans jachère, puis migrent vers de nouveaux territoires. En cette matière, les comportements ont évolué au cours des dernières décennies du fait de plusieurs facteurs : la diminution des pluies et les changements environnementaux associés, l'augmentation de la population, la mécanisation des cultures et l'accroissement de la logique de marché, responsables d'une augmentation de la dépendance des cultivateurs envers des produits importés (semences, engrais, pesticides, etc...)(Sodter *et al.*, 2003).

Néanmoins, à l'échelle de nos grands bassins versants, il est envisageable d'utiliser une relation linéaire entre la densité de population et l'occupation du sol. Une des questions à laquelle nous devons répondre est : sur quels critères discrétiser l'évolution de l'occupation du sol (et donc des WHC) entre deux scènes, séparées de 10 ans par exemple ? L'exploitation des données de population à travers un modèle de population permet de répondre en grande partie à cette question, en fournissant des chiffres probables de l'évolution de la population annuelle à partir des données de recensement (Delmas, 2004). Une corrélation entre WHC et population entre deux scènes permet alors de discrétiser de la façon la plus probable l'évolution des valeurs de WHC pour de grandes surfaces. Cette approche est en cours d'expérimentation dans le cadre de la thèse de Diello (Diello *et al.*, 2005).

Si possible deux thèses seront développées sur ce sujet, l'une en France, l'autre au Mali en co-encadrement avec nos collègues maliens, sur deux aspects :

La mise au point d'une méthodologie combinant photographies aériennes et images satellite pour l'établissement de longues chroniques d'évolution de l'occupation du sol ;

L'amélioration de la méthodologie de transfert des données évolutives d'occupation du sol dans la modélisation hydrologique.

## **d Impacts sur les ressources en eau, la santé, scénarios climatiques**

Evaluer l'impact de scénarii climatiques sur la production future des ressources en eau est un objectif de développement que nous nous sommes fixé dans le cadre du programme VAHYNE et que nous souhaitons poursuivre et développer dans le cadre de MOHYCAN.

Les modèles de circulation générale (GCM) fournissent des simulations d'évolution climatique jusqu'à la fin du siècle. Les publications du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) (ou IPCC, 2003), soulignent la forte probabilité d'une augmentation de température de l'air de plusieurs degrés d'ici à 2100. Les prédictions de pluie associées sont peu fiables dans leur répartition spatiale voire même saisonnière, en particulier sur l'Afrique. Les séries de températures et de quelques autres variables climatiques sont utilisées pour calculer les ETP futures, et les séries issues des GCM sont préalablement traitées suivant un algorithme permettant la génération de séries de pluies mensuelles réalistes, tenant compte de l'anomalie intrinsèque des données des GCM, à laquelle sont appliqués les moyennes et écarts-types de séries fictives observées, selon 2 procédures appelées « Anomalies » et « Horizons ». Les hypothèses que nous faisons en préalable sont difficilement contournables à l'heure actuelle : même répartition saisonnière de la pluie future que celle de la période de référence de la pluie fictive, pas de changement de l'occupation du sol, et pas de changement de la relation pluie-débit. Un premier GCM a été utilisé : Hadley CM3, de Reading, avec le scénario classique A2 (business as usual-scénario réaliste)(Ardoin *et al.*, 2005). Les séries de pluies et ETP futures sont ensuite introduites en entrée des modèles hydrologiques type GR2M, pour chaque rivière dont les paramètres ont été préalablement calés et validés sur la période d'observations historiques postérieure à 1970, c'est à dire prenant déjà en compte le changement climatique survenu en Afrique de l'Ouest depuis 1970.

Ardoin-Bardin (2004) a mis en place et testé une chaîne de traitement de données pour la simulation de l'évolution des ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale pour le XXIème siècle. Rescan (2005) et Mahé *et al.* (2005) ont utilisé cette chaîne de traitement pour un ensemble de 350 bassins versants d'Afrique de l'Ouest et Centrale dont les caractéristiques sont disponibles sur le site SIEREM.

Les résultats ont mis en évidence la grande variabilité des évolutions hydrologiques selon le type d'algorithme de création de série de pluies, le type de modèle et les différentes périodes du futur. Ils indiquent une diminution accrue des débits en Afrique de l'Ouest, et une légère augmentation aux latitudes sahélo-soudaniennes en Afrique Centrale. Ces résultats ne sont issus que des prédictions du modèle HadCM3, scénario A2 (évolution « réaliste » du taux de CO<sub>2</sub>), qui sont proches de celles des autres GCM pour l'Afrique de l'Ouest mais avec des différences en Afrique Centrale (Casenave, 2004). Quelles sont les perspectives avec d'autres modèles climatiques que celui utilisé ?

### ***Actions à développer***

Il est indispensable de reproduire cette opération à partir des sorties de plusieurs autres GCM. Nous sommes à une période où selon la plupart des scénarios climatiques issus des GCM l'augmentation de température du globe devrait commencer à s'accélérer. L'évolution du climat au cours des prochaines années permettra-t-elle de valider certaines hypothèses sur le réchauffement de la planète, et si oui, y aura-t-il des conséquences mesurables sur l'hydrologie et l'environnement en Afrique, différentes de celles que l'on observe déjà ?

Nous allons participer à une ANR (Moron *et al.*, 2006) afin de tester des produits pluviométriques issus de GCM dans notre chaîne de traitements hydrologiques. Dans ce projet nous souhaitons suivre trois objectifs :

- Valider les sorties « pluie » des simulations des GCM pour des périodes historiques, en utilisant les séries de débits comme intégrateur des pluies sur les bassins, le principe étant que plus les pluies simulées sont réalistes, plus les performances de la simulation hydrologique seront élevées ;
- Comparer les pluies issues de plusieurs GCM ou scénarios d'émissions ;
- Evaluer à partir de plusieurs sorties de GCM la variabilité des régimes hydrologiques et des ressources en eau associées pour plusieurs centaines de bassins d'Afrique de l'Ouest et Centrale.

A l'heure actuelle les deux thèses que nous co-encadrons dans l'ATI Santé ne nous permettent pas d'envisager de démarrer une autre étude approfondie sur ce sujet, mais nous avons demandé un post-doc de deux ans dans le cadre de l'ANR pour développer une partie actions prévues sur ce thème, en complément de sujet de Master.

### 5.3.3 Mise en œuvre

#### Principaux chantiers

##### *Mali*

Je propose de développer le programme MOHYCAN à travers 1 chantier principal au Mali, où sont déployés des moyens techniques et humains dans le cadre du programme PNRH tout d'abord (Dezetter *et al.*, 2005), renforcés dans le cadre du programme Echel-Eau. C'est au Mali que sera déployé l'essentiel de nos moyens humains et financiers dans les années qui viennent. Les objets étudiés varient en taille : plusieurs milliers à dizaines de milliers de km<sup>2</sup> pour les principaux sous-bassins du fleuve Niger, plusieurs centaines de milliers de km<sup>2</sup> pour les stations principales du fleuve Niger à partir du delta intérieur, et quelques km<sup>2</sup> à quelques dizaines de km<sup>2</sup> pour des bassins versants représentatifs. Sur ces derniers bassins nous allons développer avec l'équipe PHYSICA de l'Axe 3 de HSM, une comparaison du modèle à base physique qu'ils utilisent avec les modèles conceptuels utilisés pour les grands bassins. Nous aiderons aussi à y déterminer avec des spécialistes en pédologie et agronomie des unités de paysage pour lesquelles ces partenaires pourront acquérir des informations sur les relations pluie, débit, états de surface et anthropisation.

##### *- Burkina-Faso*

Au Burkina-Faso il n'y aura pas de chantier à proprement parler. Nos actions de recherche et partenariat sont en phase de fin de mesures et très largement supportées par nos collègues burkinabés. Ces activités ne nécessitent plus d'investissements humains et matériels en dehors d'un soutien d'encadrement de doctorants jusqu'en 2007 ou 2008. Les résultats obtenus sur le bassin versant du Nakambé à Wayen et à Tougou, seront utilisés pour la génération des fichiers de WHC évolutives en région sahélienne. Néanmoins, nous envisageons de poursuivre notre collaboration à travers une co-direction de thèse sur deux sujets éventuels : l'exploitation des mesures effectuées à Tougou, hydrologie et transport de matières, érosion ; et un second sujet sur les relations entre changement climatique, action anthropique et dynamique des écoulements au Sahel.

##### *- Maroc*

Il est envisagé également de co-encadrer un travail de thèse à Marrakech, dirigé par le CESBIO, sur l'application de GR4J à des bassins versants de montagne, dans un environnement où diminution des pluies depuis 1974 et augmentation de la pression anthropique ont dégradé les états de surface.

## Insertion dans des programmes de recherche nationaux et internationaux et les problématiques de recherche d'HydroSciences Montpellier

Les développements du projet MOHYCAN s'insèrent essentiellement dans la problématique « Grands Bassins » de l'Axe 3 de HSM « Variabilité Hydrologique, analyse, mécanismes et impacts sur les ressources en eau ». MOHYCAN hérite aussi des acquis de son association avec l'EIER dans le cadre du programme AMMA, deuxième problématique de l'Axe 3. Enfin, les études d'impact de la variabilité hydroclimatique et la santé sont menées dans le cadre d'une ATI-Santé lancée par l'IRD en 2003.

### ***Grands Bassins***

Durant le prochain quadriennal la problématique Grands Bassins correspond à des grands programmes de recherche structurants des deux projets MOHYCAN et PHYSICA de l'Axe 3. MOHYCAN participe à plusieurs programmes ou projets au Mali :

- PNRH (Dezetter *et al.*, 2005), programme porté par VAHYNE, qui se déroule sur 2005 et 2006, préliminaire au projet proposé par HSM pour Echel-Eau : apports de données spatialisées à la modélisation conceptuelle du fleuve Niger ;
- CORUS-Coton (Diallo, 2003). Il s'agit d'un projet financé par le SCAC de Bamako au Mali, sur 3 ans de 2004 à 2006, piloté par l'Institut Polytechnique Rural de Katibougou sur le thème « Pratiques de gestion des écosystèmes de savane au Mali et leurs conséquences sur les sols, les eaux et la biodiversité », en zone cotonnière. Ce projet doit aboutir à l'amélioration des connaissances sur les écosystèmes de savane anthropisés, et à la définition de modes et de stratégies d'exploitation compatibles avec les ressources disponibles. VAHYNE coordonne l'axe 1 : étude du climat et des écoulements, dont l'objectif est, sur 3 petits bassins de 40 à 120 km<sup>2</sup> en zone sud-sahélienne à soudanienne (750 à 1100 mm), d'étudier le ruissellement et ses relations avec l'occupation du sol. Le but est d'extrapoler ces connaissances aux grands bassins de la région, dans le cadre de la modélisation pluie-débit, en complément des informations tirées de la télédétection. Les questions majeures sont de savoir si on observe, comme au Burkina-Faso, une augmentation des écoulements en zone sud-sahélienne, et si les cultures intensives de coton ont un impact sur les états de surface dans des régions plus humides, qui sont « a priori » moins sujets à des dégradations durables et à l'augmentation des écoulements.
- ECHEL-Eau (2003). C'est un projet lancé par le MAE sous forme d'un FSP, en appui au CPAE, qui propose, sur la période 2006-2009, de développer des outils permettant d'analyser et de structurer la connaissance de la ressource en eau pour faciliter les processus de décision. Par une démarche impliquant conjointement acteurs et chercheurs, le projet analysera les processus biophysiques en jeu, évaluera les aménagements hydrauliques et leurs règles de gestion et identifiera les processus de décision et schémas institutionnels concernés, afin de développer des outils d'aide à la décision pertinents s'appliquant à différentes échelles spatiales et temporelles. Ces outils serviront à identifier les principaux enjeux liés à la ressource en eau et à développer différents scénarii concernant sa disponibilité en intégrant des facteurs clés de changement : états de surface (occupation du sol, pratiques culturelles), variations climatiques et évolution des aménagements hydrauliques. Nous y proposons l'étude de la variabilité hydroclimatique, la modélisation conceptuelle des relations pluie-débits sur les grands bassins, et en particulier le haut bassin avant le delta intérieur, la télédétection de l'occupation du sol et des états de surface, et l'application de scénarios climatiques à la modélisation hydrologique afin de déterminer l'évolution future des régimes. Ce projet s'accompagne

d'une première phase appelée BFP (Basin Focal Project) de deux ans, qui a pour but de faire une synthèse des connaissances et d'approfondir quelques questions de recherche majeures qui seront identifiées.

### ***Activités de MOHYCAN dans le programme AMMA***

HSM/VAHYNE et l'EIER pilotent depuis 2003 le projet ICCE-BF (2003) « Impact du changement climatique sur les processus de dégradation de l'environnement au Burkina-Faso. Application à l'identification des zones à risque majeur d'érosion et de perte de fertilité dans le bassin supérieur du Nakambé ». L'objectif de ce projet est de mieux comprendre l'impact du changement climatique sur les processus de dégradation de l'environnement dans le bassin supérieur du Nakambé. Dans ce bassin, la combinaison des facteurs climatiques et des activités anthropiques donne lieu à des formes de dégradation allant de la disparition des formations forestières à l'apparition des sols nus avec formation de croûtes superficielles (Karambiri *et al.*, 2003). Ce bassin a été intégré comme site prioritaire d'études du programme AMMA. MOHYCAN encadre en 2006 la fin des travaux de thèse de Pierre Diello, sur l'amélioration de la modélisation hydrologique au Sahel par prise en compte de l'évolution de l'occupation du sol. Ces résultats sont utiles pour caractériser l'évolution récente des relations pluie-débit dans toute la bande sahélienne, et seront utilisés au Mali dans le cadre du projet ECHEL-Eau.

Enfin, on retrouve la thématique des « impacts » dans les deux problématiques : c'est un Workpackage de AMMA, et c'est une des issues du programme sur le fleuve Niger (impacts des changements climatiques et anthropiques sur la gestion intégrée des ressources en eau du fleuve Niger). C'est également le cœur de la problématique de l'ATI-Santé. Dans le cadre de cette ATI-Santé, MOHYCAN assure un encadrement associé à deux étudiants en thèse travaillant au Sénégal et en Mauritanie, sous la direction de médecins et de géographes. Nous aidons à la définition des variables hydroclimatiques pertinentes pour la comparaison avec des données humaines et biologiques liées à la santé, dans le cadre d'études des conditions de migration de vecteurs de maladies suite au changement climatique.

## **5.4 Conclusions. Résultats attendus.**

### **5.4.1 Collaborations à développer**

#### **Inter-équipes à HSM**

Le rapprochement débuté entre les deux thèmes MOHYCAN et PHYSICA durant le précédent quadriennal va s'intensifier, par la définition d'objets d'étude communs en télédétection et par la comparaison des apports des données spatialisées dans les différentes modélisations, source probable d'amélioration de notre compréhension du fonctionnement des bassins versants étudiés.

Les deux thèmes doivent développer des complémentarités sur le bassin de Koumbaka au Mali dans le cadre du projet ECHEL-Eau au Mali, durant le prochain quadriennal, à partir de suivis de végétation, occupation du sol / états de surface, voire précipitations, obtenus par télédétection. Cette complémentarité peut s'exprimer dans deux directions : l'assimilation de données et la réalisation (et l'utilisation) de chroniques de données environnementales, à des résolutions utiles aux deux approches (pluies à 3 km avec Météosat Seconde Génération – MSG, et chroniques d'évolution de l'occupation du sol avec Landsat par exemple, à 30 m). MOHYCAN souhaite acquérir des informations sur l'évolution des écoulements sur des unités

paysagères et des petits bassins versants représentatifs (pour les besoins de la caractérisation de l'évolution des coefficients de ruissellement), et PHYSICA souhaite approfondir la connaissance des mécanismes à cette même petite échelle et explorer les conditions d'un transfert de sa méthodologie vers les échelles supérieures (Massuel *et al.*, 2005 ; Messenger *et al.*, 2005). Les deux thèmes vont continuer à développer une modélisation semi-distribuée (Varado, 2004), prenant en compte l'évolution spatio-temporelle de la végétation et des états de surface. Grâce à la télédétection et à une approche spatiale de résolution fine, il sera possible de mieux appréhender les impacts climatiques et anthropiques sur l'environnement et leurs conséquences sur les processus et les régimes hydrologiques.

## **Partenariat**

Nos partenaires sont associés à la définition des objectifs scientifiques des projets développés dans les prochaines années. Cette collaboration étroite est facilitée par l'existence des réseaux FRIEND (AOC pour Afrique de l'Ouest et Centrale, et AMHY pour Alpes et Méditerranée), qui donnent à nos collègues du Sud depuis une dizaine d'années un cadre de réflexion mobilisateur et très enrichissant, dans lequel ils peuvent développer et s'approprier régionalement des problématiques de recherche de portée internationale. A travers le projet FRIEND sont développées des actions de formation collective, des échanges Sud-Sud, des réponses internationales à des appels d'offre de recherche régionaux, etc. De ce fait, nous apprécions et accompagnerons le soutien du département DSF de l'IRD à FRIEND-AOC pour les années à venir, qui ouvre des perspectives optimistes d'élaboration de projets régionaux de qualité avec nos partenaires, que ce soit dans le cadre du projet ECHEL-Eau ou dans celui d'un appel d'offre probable sur le Lac Tchad.

## **Observations et bases de données**

La base de toutes nos activités est la mesure et la collecte de données de terrain. Nous avons besoin des données des services nationaux et nous effectuons également des mesures renforcées sur nos sites principaux. Un problème majeur depuis 20 ans est la diminution en qualité et en quantité des données acquises et transmises par les services nationaux, auquel s'ajoute le problème croissant du coût de ces données. Nous devons en permanence sensibiliser nos partenaires sur la nécessité de maintenir des réseaux de mesures actifs et en bon état, en eaux de surface, et aussi en eaux souterraines dont le suivi est trop souvent négligé. Nous maintiendrons nos partenariats dans le suivi d'observatoires comme l'ORE (Observatoire Régional de l'Environnement) AMMA-CATCH (Bénin-Niger-Mali), ainsi que notre collaboration avec l'unité de service de l'IRD OHBI (Observatoires Hydrologiques) au Burkina-Faso. Des réseaux de chercheurs comme ceux de FRIEND (UNESCO), qui partagent une base de données communes, permettent la capitalisation et le partage de données régionales, qui facilitent les études transfrontalières, à condition que ces réseaux soient gérés sur le long terme et deviennent un véritable outil communautaire.

Il faut valoriser les données acquises à travers des bases visibles sur Internet, donnant accès à des données élaborées et à des inventaires. C'est l'objectif de la base SIEREM (Système d'Informations Environnementales pour les Ressources en Eau et leur Modélisation) (Boyer *et al.*, 2004) qui devra être exploitée dans le thème MOHYCAN. Elle permettra des comparaisons avec d'autres bases de données existant pour l'Afrique, comme celle du CRU (Climatic Research Unit-Norwich, UK) (New *et al.*, 1999, 2000 ; Mitchell et Jones, 2005).

## Principaux résultats attendus

- La poursuite de l'analyse de la variabilité du climat, à partir de séries chronologiques longues de pluies et débits, et autres paramètres climatiques (humidités, températures, ETP, etc.).
- L'amélioration de nos connaissances sur l'évolution des écoulements en régions semi-arides du fait des influences anthropiques et climatiques : mesures et modélisation.
- La documentation des changements d'état de surface et d'occupation du sol des bassins versants étudiés.
- La production de cartes de ressources en eau par demi degré carré sur l'Afrique de l'Ouest et Centrale, et la recherche d'un calcul d'erreur permettant de moduler les valeurs précédentes.
- L'exploration des performances de plusieurs modèles conceptuels et des résultats de la modélisation en fonction de plusieurs facteurs environnementaux, par exemple :
  - pluies issues de Météosat 5 par rapport aux pluies interpolées classiques ;
  - fichiers sols évolutifs dans le temps sur des bassins versants allant jusqu'à 300 000 km<sup>2</sup>, au lieu de 21 000 km<sup>2</sup> actuellement ;
  - données issues du MNT du SRTM à 90 mètres ;
- L'exploration de la prise en compte de différentes échelles spatiales dans GR2M, pour les données de pluie et de capacité en eau des sols.
- La mise en service d'un site Web d'accès aux informations de la base SIEREM.
- La proposition d'éléments en vue de définir une nouvelle fonction de production conceptuelle sur la base de plusieurs pistes explorées dans l'étude :
  - la notion de capacité en eau du sol comme variable spatio-temporelle à mesurer ;
  - la production d'écoulement sur des pas d'espaces variables, des formes irrégulières par exemple ;
  - l'impact de la pente sur la fonction de production, impact direct ou en relation avec les états de surface ;
  - l'introduction d'un « buffer » correspondant au haut bassin délimité par les parties amont des barrages, qui ne produisent pas d'écoulement vers l'aval avant le remplissage des retenues d'eau, ce qui induit un début de ruissellement uniquement sur la partie centrale du chevelu, et un retard généralisé du début de la crue, ainsi que des pertes par évaporation sur les retenues.
- Les études développées doivent permettre l'encadrement du travail de thèse de jeunes chercheurs, africains en particulier. Les deux sujets majeurs à développer sont d'une part
  - l'analyse des changements hydrologiques au Sahel, à la lumière des connaissances actuelles sur l'évolution des relations pluie-débit, et sur la base des mesures effectuées depuis plusieurs années au Mali, au Niger, au Cameroun, et éventuellement au Niger,et d'autre part
  - la contribution à l'étude des changements d'occupation du sol à partir de longues chroniques d'observations spatiales (1950-2000) et leur corrélation avec les changements hydrologiques.
- Enfin, nous devons avoir le souci de la communication de nos résultats, afin d'aider à une orientation des choix des décideurs et des bailleurs de fonds qui soit plus en phase avec les enjeux environnementaux et leurs conséquences majeures.



# Références



- ABN ( ) <http://www.abn.ne>
- AISH ( ) <http://www.cig.ensmp.fr/~iahs/>
- Ali A., Amani A., Diedhiou A., Lebel T. (2005) Rainfall estimation in the Sahel. Part 2: Evaluation of Raingauge Networks in the CILSS Countries and Objective Intercomparison of Rainfall Products. *J. of Applied Meteor.*, 44, 11, 1707–1722.
- Amani A., Nguetora M. (2002) Evidence d’une modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Niamey. *IAHS Pub. n° 274*, 449-456.
- Ambroise B. (1999) Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré: 2 – Modélisation systémique et dynamique. *Rev. Sci. Eau* 12, 1, 123-153.
- AMMA - livre blanc (2002) [http://amma.mediasfrance.org/france/livre\\_blanc.pdf](http://amma.mediasfrance.org/france/livre_blanc.pdf)
- AMMA ( ) <http://www.amma-international.org/>
- AMMA-API (France) (2004)[http://amma.mediasfrance.org/france/API2004\\_plan.pdf](http://amma.mediasfrance.org/france/API2004_plan.pdf)
- AMMA-API (France) (2005)[http://amma.mediasfrance.org/france/API2005\\_plan.pdf](http://amma.mediasfrance.org/france/API2005_plan.pdf)
- Ardoin S., Dezetter A., Servat E., Bocquillon C. (2001) Redéfinition des fonctions de production des modèles globaux de relation pluie-débit en milieu semi-aride africain. *C.R.A.S. Série (IIa)*, 333, 10, 611-616.
- Ardoin S., Lubès-Niel H., Servat E., Dezetter A., Boyer J.F., Mahé G., Paturel J.E. (2003a) Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l’Ouest : caractérisation de la situation de la décennie 90. *AISH Pub.* 278, 223-228.
- Ardoin-Bardin S., Dezetter A., Servat E., Mahé G., Paturel J. E., Dieulin C., Boyer J. F. (2003b) Analyse de la variabilité des ressources en eau en Afrique de l’Ouest sahélienne par modélisation hydrologique à grand pas de temps et d’espace. *Journal de l’Eau et de l’Environnement*, 3, 5-13.
- Ardoin-Bardin S. (2004) Variabilité hydro-climatologique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne (Logone-Chari, Sénégal, Gambie). Thèse Science de l’eau dans l’environnement continental, Université de Montpellier 2.
- Ardoin-Bardin S., Dezetter A., Servat E., Mahé G., Paturel J.E., Dieulin C., Casenave L. (2005) Évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau d’Afrique de l’Ouest et Centrale. *AISH Pub.* 296, 194-202.
- Bigot S., Brou Y.T., Szarzynski J., Koli B.Z. (2003) Variabilité bioclimatique dans la région du Parc National de la Comoé (Côte d’Ivoire) : variations inter-annuelles et rythmes journaliers. *Géotrope*, Edition Universitaire de Côte d’Ivoire (EDUCI).
- Birnbaum P. (2005) Mali, un oasis pour la biodiversité. Dossier Environnement et Développement Durable. *Futura Sciences*. <http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier570-1.php>
- Boyer J.F. (2003) Développements et technologies mises en œuvre à l’IRD pour la construction du Système d’Information Environnemental sur les Ressources en Eau et leur Modélisation - SIEREM. Séminaire Gestion et mise à disposition des données environnementales. Lyon, France, CEMAGREF, 2003.
- Boyer J.F., Servat E., Dieulin C. (2004) A specific method of modeling and designing environmental information systems. The example of SIEREM, an environmental information system for water resources. *Conférence Internationale BALWOIS*. Ohrid, Macédoine, 2004. p. 385. Abstract.
- Bricquet J.P., Mahé G., Bamba F., Olivry J.C. (1996) Changements climatiques récents et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali). *AISH Publ.* 238, 157-166.
- Bricquet J.P., Bamba F., Mahe G., Toure M. et Olivry J.C. (1997a) Evolution récente des ressources en eau de l’Afrique Atlantique. *Revue des Sciences de l’Eau*, 3, 321-337.

- Bricquet J.P., Mahé G., Bamba F., Diarra M., Mahieux A., Des Tureaux T., Orange D., Picouet C., Olivry J.C. (1997b) Erosion et transport particulaire par le Niger : du bassin supérieur à l'exutoire du delta intérieur (bilan de cinq années d'observations). IAHS Publ. n°246, 335-346.
- Bricquet J.P., Gourcy L., Mahé G., Orange D., Picouet C., Olivry J.C. (1998) Dissolved matter fluxes in the Niger river's inner Delta. IAHS Publ. n° 253, 435-446.
- Brou T.Y., Servat E., Paturel J.E. (1998) Contribution à l'analyse des interrelations entre activités humaines et variabilité climatique : cas du sud forestier ivoirien. CRAS, Paris, 327, série II a, 833-838.
- Brou Y.T. (2001). Etude du fonctionnement des écosystèmes naturels en Côte d'Ivoire : suivi du stress hydrique à partir des données NDVI et proposition d'aménagement, Géotrope, Presse Universitaire de Côte d'Ivoire (PUCI), n°1, pp 41-49.
- Brou Y.T., Akindes F., Bigot S. (2005a) Perceptions sociales et gestion communautaire de la variabilité climatique en Côte d'Ivoire. Cahiers Agricultures, Agence Universitaire de la Francophonie (AUF), accepté, à paraître au premier trimestre 2005.
- Brou Y.T., Oszwald Y., Bigot S., Servat E. (2005b) Risques de déforestation dans le domaine permanent de l'État en Côte d'Ivoire : quel avenir pour ses derniers massifs forestiers ? TELA2004004, Revue de télédétection de l'Agence Universitaire de la Francophonie, pour le vol. 5, n° 1-2-3, 2005, p 17-33.
- Bruijnzeel L.A. (2004) Tropical forests and environmental services: Not seeing the soil for the trees? In Environmental Services and Land use Change: Bridging the Gap between Policy and and Research in Southeast Asia. TP Tomich, M van Noordwijk, DE Thomas (Eds). A special issue of Agriculture, Ecosystems and Environment, Vol. 104 (1) (September 2004).
- Brunet-Moret Y. (1979) Homogénéisation des précipitations. Cahiers Orstom, Série hydrologie XVI(3 et 4), 147-170. Paris.
- Casenave A., Valentin C. (1988) Les états de surface de la zone sahélienne. CEE/Orstom Paris, Coll. Didactiques, 202 p.
- Casenave A., Valentin C. (1992) A runoff capability classification system based on surface features criteria in the arid and semi-arid areas of West Africa. Journal of Hydrology, 130, 231-249.
- Casenave L. (2004) Hydro-climatic variability: comparison of different global circulation model in western Africa. Master thesis. University of Chalmers, Sweden. 52 p.
- CGIAR ( ) <http://www.cgiar.org>
- Chevallier P., Claude J., Pouyaud B., Bernard A. (1985) Pluies et crues au Sahel : hydrologie de la mare d'Oursi (Burkina-Faso) (1976-1981). Travaux et Documents de l'ORSTOM n°190, Paris, 260 p.
- CIEH (1986) Colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse, Bulletin de liaison du CIEH, n° 28-29, Ouagadougou
- CIEH, ASECNA, ORSTOM (a) Annales des Précipitations Journalières de l'Origine des Stations à 1965. CIEH - Secrétariat d'Etat aux Affaires Etrangères chargé de la Coopération - ORSTOM. Bénin, 1973, 522 p.; Burkina-Faso, 1977, 686 p.; Cameroun, 1978, tome 1, 512 p. tome 2, 906 p.; Centrafrique, 1990, 678 p.; Congo, 1981, 1026 p.; Gabon, 1979, 404 p.; Côte d'Ivoire, 1973, 688 p.; Mali, 1974, 1082 p.; Mauritanie, 1977, 314 p.; Niger, 1976, 506 p.; Sénégal, 1976, 872 p.; Tchad, 1973, 644 p.; Togo, 1977, 578 p.
- CIEH, ASECNA, ORSTOM (b) Annales des Précipitations Journalières de 1966 à 1980. CIEH - ASECNA - ORSTOM. Bénin, 1989, 298 p.; Burkina Faso 1989, 656 p.; Cameroun, 1990, 747 p.; Centrafrique, 1990, 450 p.; Congo, 1989, 642 p.; Gabon, 1989, 279 p.; Côte d'Ivoire, 1989, 609 p.; Mali, 1989, 782 p.; Mauritanie, 1990, 181 p.; Niger, 1990, 372 p.; Sénégal, 1990, 675 p.; Tchad, 1990, 466 p.; Togo, 1989, 369 p.
- CILSS ( ) <http://www.cilssnet.org>

- Citeau J., Bergès J.C., Demarcq H., Mahé G. (1988a) The watch of ITCZ migrations over the tropical atlantic ocean as an indicator in drought forecast over Sahelian areas. Tropical Ocean Atmosphere Newsletter, n°45 : 1-3.
- Citeau J., Demarcq H., Mahé G., Franc J. (1988b) Une nouvelle station est née. Veille Climatique Satellitaire, n°25, 23-29.
- Citeau J., Gaye A. T., Mahé G., de Felice P. (2006). Some features of West African climate related to satellite observations of water vapor. Soumis à Journal of Climate.
- Citeau J., Mahé G., Goryl P. (1991) Some elements for understanding and forecast the West African monsoon using Meteosat and ECMWF data. Abstracts of the XVI<sup>th</sup> Assembly of the EGS, Wiesbaden, Germany, 22-26 April 1991, Springer Verlag Editions.
- CNRS (a) <http://www.cnrs.fr/Archives/ARISC/travaux/FTP/FTPmac/chrono.doc>
- Conway D. (1997) A water balance model of the Upper Blue Nile in Ethiopia. Hydrol. Sci. J., 42, 841-859.
- Conway D., Mahé G. (2006) Riverflow modelling in two large river basins : the Parana (subtropical) and the Niger (tropical). A paraître dans Hydrological Processes.
- CPWC ( ) <http://www.waterandclimate.org>
- CRDI ( ) <http://www.idrc.ca>
- Dai A.G., Lamb P.J., Trenberth K.E., Hulme M., Jones P., Xie P. (2004) The recent Sahel drought is real. International Journal of Climatology, 24, 11, 1323-1331.
- Delclaux F., Faroux C., Favreau G., Lemoalle J., Ngo-Duc T. (2005) Sensitivity of hydrological model to land surface model outputs: application to lake Chad basin, Central Africa. EGU, General Assembly 2005, 24-29 april 2005, Vienna (Austria)
- Delmas B. (2004) Dossier "démographie mathématique": Pierre-François Verhulst et la loi logistique de la population. Mathematics and Social Sciences, n°167, 51-81.
- Demarcq H., Citeau J., Mahé G. (1989) Restitution de la température de surface de la mer à partir du satellite Meteosat II. In : Instituto Nacional de Meteorologia, Madrid, (Ed.) : 7th Meteosat scientific user's meeting, EUMETSAT, European Organisation for Meteorological Satellites, Darmstadt, 27-30 septembre 1988, 12 p
- Dezetter A., Bigot S., Ferry L., Diallo D., Mariko A. (2005) Intégration de la variabilité spatio-temporelle des pluies et des états de surface dans la modélisation des ressources en eau du fleuve Niger. Programme national ANR/ECCO.
- Dhonneur G. (1985) Traité de météorologie tropicale. Ed. MétéoFrance.
- Diallo D. (2000) Erosion des sols en zone soudanienne du Mali: transfert des matériaux érodés dans le bassin versant de Djitiko (Haut Niger). Université Joseph Fourier; IRD, Grenoble I, France.
- Diallo D. (2003). Projet CORUS-Coton « Pratiques de gestion des écosystèmes de savane au Mali et leurs conséquences sur les sols, les eaux et la biodiversité ». IPR, CIRAD, IRD, SCAC, Mali.
- Diallo D. (2006) Pratiques de gestion des écosystèmes de savane au Mali et leurs conséquences sur les sols, les eaux et la biodiversité. Rapport intermédiaire, projet CORUS, IPR, Bamako, Mali.
- Diello P. (2002) Relations entre NDVI, pluies et états de surface au Burkina-Faso - cas du bassin du Nakambé. DEA Science de l'eau dans l'environnement continental, Université de Montpellier 2.
- Diello P., Servat E., Mahé G., Paturel J.E. (2004) Interrelations Homme-Climat-Environnement dans le Sahel Burkinabé : impacts sur les ressources en eau, les états de surface et la modélisation hydrologique. Journées Scientifiques EIER-ETSHER, Ouagadougou, décembre 2004.
- Diello P., Paturel J.E., Mahé G., Karambiri H., Servat E. (2005) Caractérisation de l'évolution de trois classes d'occupation du sol dans le Sahel burkinabé à partir d'une modélisation

- démographique et d'images satellites : application à la modélisation hydrologique. Communication orale. Abstracts book. First International AMMA conference, Dakar.
- Dieulin C. (2003) Carte des bassins hydrographiques d'Afrique de l'Ouest et Centrale - 2e prix du concours de posters. SIG2003, conférence francophone ESRI. Issy les Moulineaux, France, 2003. Poster.
- Dieulin C. (2005) Calcul des capacités en eau des sols (WHC) à partir de la carte des sols de la FAO. Note technique, 7 p.
- Dieulin C., Boyer J.F., Ardoin-Bardin S. (2005). Exploitation d'une base de données sol par SIG pour la modélisation Hydrologique. Conférence Internationale : Gestion Intégrée des Ressources en Eaux et Défis du Développement Durable (GIRE3D), Marrakech, 23-25 mai 2006. Soumis.
- Dray A. (2001) Prise en compte de l'occupation des sols dans la modélisation des écoulements du Nakambé à Wayen. Mémoire d'Ingénieur, ENSA de Rennes
- Dubreuil P., Chaperon P., Guiscafré J., Herbaud J. (1972) Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux de l'ORSTOM (1951-1969). Orstom Ed., 916 p.
- Dubreuil P., Cruette J., Dubée G., Lamagat J.P. (1976) Détermination des causes des anomalies des crues du Niger (Mali) : rapport de la première année d'études sur les anomalies. ORSTOM, Paris, 18 p.
- Dubreuil P. (2003) La Science Hydrologique : du service des colonies à l'aide au Développement, essai historique. L'Harmattan, 333 p.
- Dunne K.A., Willmott C.J. (1996) Global distribution of plant-extractable water capacity of soil. *International Journal of Climatology*, 16, 841-859.
- ECHEL-Eau (2003) Projet « Outils de gestion intégrée des ressources en eau : application aux bassins du Limpopo, Mékong et Niger ». Fond de Solidarité Prioritaire, Ministère des Affaires Etrangères Français.
- FAO (1995a) Crues et apports. Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche. *Bulletin FAO d'Irrigation et de Drainage* n°54.
- FAO (1995b) Digital Soil Map of the World. Version 3.5. CD Rom, FAO/UNESCO.
- Favreau G., Leduc C., Marlin C., Dray M., Taupin J.D., Massault M., Le Gal La Salle C., Babic M. (2002) Estimate of recharge of a rising water table in semiarid Niger from  $^3\text{H}$  and  $^{14}\text{C}$  modeling, *Ground Water*, 40, (2), 144-151.
- Fekete B.M., Vorosmarty C.J., Roads J.O., Willmott C.J. (2004) Uncertainties in Precipitation and Their Impacts on Runoff Estimates. *J. Climate*, 17, 294-304.
- Floret C. (1998) Raccourcissement du temps de jachère, biodiversité et développement durable en Afrique Centrale (Cameroun) et en Afrique de l'Ouest (Mali, Sénégal) : rapport final. ORSTOM, Dakar, Sénégal.
- Folland C.K., Palmer T.N., Parker D.E. (1986) Sahel rainfall and worldwide sea temperature 1901-85. *Nature*, 320, 602-607.
- Fontaine B., Janicot S. (1992) Wind-field coherence and its variations over West Africa. *Journal of Climate*, 5,5, 512-524.
- Fontaine B., Philippon N., Camberlin P. (1999) An improvement of June-September rainfall forecasting in the Sahel based upon region April-May moist static energy content (1968-1997). *Geophysical Research Letters*, 26,14, 2041-2044.
- Fournier J., Serpantie G., Delhoume J.P., Gathelier, R. (2000) Rôle des jachères sur les écoulements de surface et l'érosion en zone soudanienne du Burkina: Application à la gestion des terres cultivées. *Sud Sciences & Technologies, EIER/ETSHER*, 5, 4-14.
- FRIEND ( ) <http://ne-friend.bafg.de/servlet/is/Entry.7397.Display/>

- Gaultier G. (2004) Recharge et paléorecharge d'un aquifère semiaride en milieu sahélien (Niger oriental) : approche géochimique et hydrodynamique. Thèse, université De Paris-sud / orsay.
- Girard S, Paturol J.E., Mahé G, Ouattara F, L'Aour A., New M. (2002) Spatialisation des pluies au Burkina Faso : impact de la méthode et de la source des données. *Sud Sciences et Technologies, EIER, Ouagadougou*, 9, 4-11.
- Global Policy Network (a) <http://www.gpn.org/> - Un rapport synthétique par pays sur les grandes étapes de l'histoire socio-économique.
- Gu G.J., Adler R.F. (2006) Interannual rainfall variability in the tropical Atlantic region. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 111 (D2), Art. No. D02106 JAN 19 2006
- Hamatan M., Mahé G., Servat E., Paturol J.E., Amani A. (2004) Synthèse et évaluation des prévisions saisonnières en Afrique de l'Ouest. *Sécheresse*, 15, 3, 279-286.
- Hastenrath S. (1984) Interannual variability and annual cycle: mechanism of circulation and climate in the tropical Atlantic sector. *Mon. Weath. Rev.*, 112 : 1097-1107.
- Hastenrath S. (1991) *Climate dynamics of the tropics updated edition from: climate and circulation of the tropics*. Atmospheric Sciences Library. Kluwer Academic Publishers, 488 p.
- Hiez G. (1977) L'homogénéité des données pluviométriques. *Cahiers Orstom, Série hydrologie XIV(2)*: 129- 172. Paris.
- Hreiche A., Mezher D., Bocquillon C., Dezetter A., Servat E., Najem W. (2002) Parallel Processing for a Better Understanding of Equifinality in Hydrological Models. *Integrated Assessment and Decision Support, Proceedings of the First Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society*. 2002. Rizzoli A.E. et Jakeman A.J. éd. sc., iEMSs. 1, 410-415.
- Hreiche A., Bocquillon C., Najem W., Servat E., Dezetter A. (2003) Calage d'un modèle conceptuel pluie-débit journalier à partir de bilans annuels. *IAHS Pub.* 278, 87-93.
- Hubert P., Carbonnel J.P., Chaouche A. (1989) Segmentation des séries hydro-météorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J. of Hydrology*, 110, 349-367.
- Hulme, M. (1992) Rainfall Changes in Africa: 1931-60 to 1961-90. *Int. J. of Climatology* 12, 685-699.
- IAHS (1984) *World Catalogue of Maximum Observed Floods* (Rodier J. A. & Roche M., Sci. Eds.), IAHS Publ. 143. IAHS Press, Wallingford, UK.
- ICCE-BF (2003) Impact du changement climatique sur les processus de dégradation de l'environnement au Burkina Faso : Application à l'identification des zones à risque majeur d'érosion et de perte de fertilité dans le bassin supérieur du Nakambé. *Projet de recherche IRD/HSM-EIER sur le bassin de Tougou, site AMMA*.
- IPCC (2003) Intergovernmental Panel on Climate Change, third assesment report. WMO, UNEP.
- IWMI ( ) <http://www.iwmi.cgiar.org/>
- Janicot S. (1992) Spatiotemporal variability of West African Rainfall. Part I : Regionalization and typings. *Journal of Climate*, 5, 5, 489-497.
- Janicot S, Moron V, Fontaine B. (1996) Sahel droughts and ENSO dynamics. *Geophysical Research Letters*, 23, 5, 515-518.
- Janicot S., Sultan B. (2001) Intra-seasonal modulation of convection in the West African monsoon. *Geophysical Research Letters*, 28, 3, 523-526.

- Karambiri H., Ribolzi O., Delhoume J. P., Ducloux J., Coudrain-Ribstein A., Casenave A. (2003) Importance of soil surface characteristics on water erosion in a small grazed Sahelian catchment. *Hydrological Processes*, 17(8): 1495-1507.
- Karambiri H., Yacouba H., Sanou D., Diello P., Guilliod M., Mahé G., Paturel J.E. (2005) Caractérisation de la réponse hydrologique et de l'érosion hydrique d'un petit bassin versant sahélien : bassin versant de Tougou au nord du Burkina-Faso. Communication orale. Abstracts book. First International AMMA conference, Dakar.
- Kenward T., Lettenmaier D. P., Wood E. F., Fielding E. (2000) "Effects of Digital Elevation Model Accuracy on Hydrologic Predictions." *Remote Sensing of Environment*, 74, 432–444.
- Klein J.C. (1976) Détermination des causes des anomalies de la crue du Niger : rapport intérimaire de la seconde phase d'étude (1977-1979). Rapport ORSTOM, Paris, 79 p.
- Koné F. (2000) Suivi piézométrique au Burkina Faso – Bilan de 20 années d'observation, Mémoire d'ingénieur, EIER, Ouagadougou, Burkina-Faso.
- L'Hôte Y., Mahé G. (1996) Afrique de l'Ouest et Centrale. Précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989). Echelle 1/6 000 000<sup>ème</sup>. Coll. des cartes ORSTOM, IRD Ed.
- L'Hôte Y., Mahé G., Somé B., Triboulet J.P. (2002) Analysis of a Sahelian annual rainfall index updated from 1896 to 2000 ; the drought still goes on. *Hydrological Sciences Journal*, vol 47, 4, 563-572.
- L'Hôte Y., Mahé G., Somé B. (2003) The 1990s rainfall in the Sahel: the third driest decade since the beginning of the century. Reply to discussion. *Hydrological Sciences Journal*, 48, 3, 493-496.
- Laë R., Mahé G. (2000) Crue, inondation et production halieutique dans le Delta Central du Niger : Un modèle prédictif des captures en poisson. In : Séminaire International GIRN-ZIT, Colloques et séminaires, IRD, 865-882,
- Lamagat J.P., Molinier M. (1983) Etude des anomalies des crues du Niger. Travaux et Documents de l'ORSTOM, n° 161, 112 p.
- Lamb P. (1983) Persistence of subsaharan drought. *Nature*, 299 : 46-48.
- Laraque A., Mahé G., Orange D., Marieu B. (2001) Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during the twentieth century. *Journal of Hydrology*, 245, 1-4, 104-117.
- Le Barbe L., Lebel T., Tapsoba D. (2002) Rainfall variability in West Africa during the years 1950-90. *Journal of Climate*, 15, 2, 187-202.
- Le Monde (2005) Blair et Berlusconi d'accord sur les thèmes du G8: Afrique et climat. *Lemonde.fr*, 27/05/05.
- Leblanc M., Leduc C., Stagnitti S., Van Oevelen PJ, Jones C., Mofor L., Razack M., Favreau G. (2005a) Evidence for a vast lake Chad during the late quaternary from satellite data. *Palaeogeogr, Palaeoclimatol, palaeoecol.* (sous presse).
- Leblanc M., Favreau G., Nazoumou Y., Leduc C., Stagnitti S., Van Oevelen PJ, Delclaux F. Lemoalle J., Maley J. (2005b) Reconstruction of Lake MegaChad using February 2000 Shuttle Radar Topographic Mission data. *Palaeogeogr, Palaeoclimatol, palaeoecol.* (accepté).
- LeBorgne J. (1996) La dégradation actuelle du climat entre Sahara et équateur. Presses Universitaires de Dakar.
- Leduc C., Bromley J., Schroeter P. (1997) Water table fluctuation and recharge in semi-arid climate: Some results of the HAPEX-Sahel hydrodynamic survey (Niger). *Journal of Hydrology*, 189, (1-4), 123-138.
- Leduc C., Favreau G., Schroeter P. (2001) Long-term rise in a sahelian water-table: the Continental Terminal in South-West Niger. *Journal of Hydrology*, 243, (1-2), 43-54.

- Leemans R. (1990) Possible Changes in Natural Vegetation patterns due to a global warming. WP-08, IIASA-Laxenburg, Austria, 105-122.
- Lerique J., Pouyaud B., Claude J., Hoorelbeck J., Chouret A., Hoepffner M. (1976) Programme de renforcement des services agrométéorologiques et hydrologiques des pays du Sahel : rapport d'activité premier semestre 1977. Réseau et service hydrologique 1. du Sénégal, 2. de Haute Volta, 3. de Mauritanie, 4. du Tchad, 5. du Niger. 6. Compo. ORSTOM, Paris.
- Leroux M. (1983) Le climat de l'Afrique tropicale. - Thèse d'Etat, 1980, Dijon - 2 tomes, Ed. Slatkine / OMM, Genève
- Lézine A.M., Hely C., Delclaux F. (2006) CAHO. Le Climat de l'Afrique à l'Holocène : le début et la fin de la Période Humide Africaine. Projet soumis à l'ANR Blanc 2006.
- Liéno G., Sighomnou D., Sigha-Nkamdjou L., Mahé G., Ekodeck G.E., Tchoua F. (2003).Système hydrologique du Yaéré (Extrême-Nord Cameroun), changements climatiques et actions anthropiques : conséquences sur le bilan des transferts. IAHS Pub. n° 278, 403-409.
- Liéno G., Mahé G., Servat E., Lubès-Niel H., Olivry J.C., Sighomnou D., Ekodeck G.E., Dezetter A. (2005a) Changements des régimes hydrologiques des rivières du sud-Cameroun : un impact du changement climatique en zone équatoriale ? AISH Pub. 296, 158-168.
- Liéno G., Mahé G., Olivry J.C., Naah E., Servat E., Sigha-Nkamdjou L., Sighomnou D., Ndam Ngoupayou J., Ekodeck G.E., Paturel J.E. (2005b) Régimes des flux des matières solides en suspension au Cameroun : revue et synthèse à l'échelle des principaux écosystèmes ; diversité climatique et actions anthropiques. Hydrological Sciences Journal, 50, 1, 111-124.
- Liéno G., Mahé G., Servat E., Tégofack R., Sahagu J., Nwalal J., Issa, Olivry J.C., Ekodeck G.E. (2005c) Transport de matières en suspension au Cameroun dans un contexte hydroclimatique déficitaire. AISH Pub. 291, 161-171.
- Liéno G., Mahé G., Servat E., Sighomnou D. (2006) Changes in hydrological regimes of rivers of Equatorial Africa : an impact of climate change to the Equator ? Soumis à Hydrological Processes.
- Louvet S., Richard Y., Fontaine B. (2005) Changements d'échelles et sorties climatiques régionalisées. Environnement, Risques et Santé, 4, 2, 95-100.
- Lubès-Niel H., Séguis L., Sabatier R. (2001) Etude de stationnarité des caractéristiques des événements pluvieux de la station de Niamey sur la période 1956-1998. *C.R.Académie des Sciences de Paris Série (II)*, 333, 10, 645-650.
- MAE (2003) Ministère des Affaires Etrangères. Initiative européenne sur l'eau : gestion intégrée des ressources en eau en Afrique. Application aux fleuves transfrontaliers africains. Document de travail : proposition pour les prochaines étapes. Paris. Nov. 2003, 9 p.
- Mahé G., Lerique J., Olivry J.C. (1990) L'Ogooué au Gabon. Reconstitution des débits manquants et mise en évidence de variations climatiques à l'équateur. Hydrologie Continentale, edn. ORSTOM, Paris, 5, 2, 105-124.
- Mahé G., Olivry J.C. (1991) Changements climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale, du mensuel à l'interannuel. In: Hydrology for the water management of large river basins. F.H.M. Van de Ven, D. Gutknecht, D.P. Loucks & K.A. Salewicz Eds, Congrès AISH, Vienne, Autriche, 13-15 août 1991, Publication AISH n°201. 163-172.
- Mahé G. (1993) Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Thèse, Université Paris XI-Orsay, 1992, ORSTOM Editions, Coll. Etudes et Thèse, Paris, 438 p.

- Mahé G., Citeau J. (1993) Relations océan-atmosphère-continent dans l'espace africain de la mousson atlantique. Schéma général et cas particulier de 1984. *Veille Climatologique Satellitaire* Ed. ORSTOM-METEO FRANCE, 44, 34:54.
- Mahé G., Delclaux F., Crespy A. (1994) Elaboration d'une chaîne de traitement pluviométrique et application au calcul automatique de lames précipitées (bassin-versant de l'Ogooué au Gabon). *Hydrologie Continentale*, vol 9, n°2, 169-180.
- Mahé G. (1995) Modulation annuelle et fluctuations interannuelles des précipitations sur le bassin-versant du Congo. In : Boulègue J., Olivry J.C. (Eds.) : Actes du Colloque PEGI Grands Bassins Fluviaux Péri-Atlantiques : Congo, Niger, Amazone, INSU, CNRS, ORSTOM, 22-24 nov. 1993, Paris, 13-26.
- Mahé G., Olivry J.C. (1995) Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989, *Sécheresse*, n°1, vol 6, 109-117.
- Mahé G. (1996) Quelques éléments de réflexion sur l'état et l'évolution des ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Note pour Le Club du Sahel/OCDE, Bamako, 9 p.
- Mahé G. et Dicko-Biga H. (1997) Rapport de mission à Tossaye du 06 au 09 janvier 1997, ORSTOM Bamako, 14 p.
- Mahé G. (1998) Freshwater supply to the Atlantic Ocean : local and regional variations from Senegal to Angola. In: *Global versus local changes in upwelling systems*. Durand M.H., Cury P., Mendelsohn R., Roy C., Bakun A., Pauly D. (Eds. Sci.), ORSTOM Ed., 127-138.
- Mahé G., Olivry J.C. (1999) Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Series IIa*, vol. 328, 621-626.
- Mahé G., Hisard P. (2000) The coastal drought of Ghana: an analysis of monthly rainfall. *Geophysical Research Abstracts*, Vol 2, 2000, CD-Rom EGS, EGS XXV General Assembly, Nice, France, April 2000.
- Mahé G., Olivry J.C., Dessouassi R., Orange D., Bamba F., Servat E. (2000) Relations eaux de surface – eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Série IIa*, 330, 689-692.
- Mahé G., L'Hôte Y., Olivry J.C., Wotling G. (2001) Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa – 1951-1989. *Hydrological Sciences Journal*, 46, 2, 211-226.
- Mahé G. (2002) Impacts and Vulnerability of the Water/Wetland Resources to Climate Change. In : *Climate Change, Water and Wetlands in West Africa: Building linkages for their Integrated Management*, (Oyebande L., Amani A., Mahé G., Niang-Diop I., Contributors), IUCN-BRAO Working Paper, 9 p.
- Mahé G., Bamba F., Orange D., Fofana L., Kuper M., Marieu B., Soumaguel A., Cissé N. (2002a) Dynamique hydrologique du delta intérieur du Niger (au Mali). In : *Séminaire International GIRN-ZIT, Colloques et séminaires*, IRD, 179-195.
- Mahé G., Dray A., Paturol J.E., Crès A., Koné F., Manga M., Crès F.N., Djoukam J., Maïga A.H, Ouédraogo M., Conway D., Servat E. (2002b) Climatic and anthropogenic impacts on the flow regime of the Nakambe River in Burkina. *IAHS Pub. n° 274*, 69-76.
- Mahé G., Leduc C., Amani, A., Paturol J.E., Girard S., Servat E., Dezetter A. (2003) Augmentation récente du ruissellement de surface en région soudano-sahélienne et impact sur les ressources en eau. *IAHS Pub. 278*, 215-222.
- Mahé G., L'Hôte Y. (2004) Sahel : une sécheresse persistante et un environnement profondément modifié. *La Météorologie*, 8<sup>ème</sup> série, 44, 2-3.
- Mahé G., Olivry J.C., Servat E. (2005a) Sensibilité des cours d'eau ouest-africains aux changements climatiques et environnementaux : extrêmes et paradoxes. *AISH Pub.*, 296, 169-177.

- Mahé G., Paturel J.E., Servat E., Conway D., Dezetter A. (2005b) Impact of land use change on soil water holding capacity and river modelling of the Nakambe River in Burkina-Faso. *Journal of Hydrology*, 300, 1-4, 33-43.
- Mahé G., Rescan M., Dezetter A., Ardoin S., Dieulin C. (2005c) Water resources prediction in West and Central Africa for the 21<sup>st</sup> century. Poster. Abstracts book. First International AMMA conference, Dakar.
- Mahé G. (2006) The impacts of land use/land cover change and climate variability on the hydrology of the Sahel. Invited paper, 5<sup>th</sup> FRIEND World Conference « Water Resource Variability: Processes, Analyses and Impacts ». 27/11-01/12 2006, Havana, Cuba
- Mahé G., Girard S., New M., Paturel J.E., Cres A., Dezetter A., Servat E. (2006a) Comparison of several rainfall data sources in Burkina Faso and impact on monthly gridded rainfall and river flow simulations. *Soumis à Hydrological Sciences Journal*.
- Mahé G., Bamba F., Soumaguel A., Orange D., Olivry J.C. (2006b) Water losses in the Niger River inner delta: water balance and flooded surfaces. *Hydrological Processes*.
- Makhlouf Z., Michel C. (1994) A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, 162, 299-318.
- Marchal, J.Y. (1985) La dérouté d'un système vivrier au Burkina: agriculture extensive et baisse de production. In : *Economie des Vivres*, juillet-décembre 1985, 265–280.
- Mariko A., Mahé G., Orange D., Royer A., Nonguierma A., Amani A., Servat E. (2002) Suivi des zones d'inondation du delta intérieur du Niger : perspectives avec les données basse résolution NOAA/AVHRR. In : *Séminaire International GIRN-ZIT, Colloques et séminaires*, IRD, 231-244.
- Mariko A. (2003) Caractérisation et Suivi de la Dynamique de l'Inondation et du Couvert Végétal dans le Delta Intérieur du Niger (Mali) par Télédétection. Thèse Science de l'eau dans l'environnement continental, Université de Montpellier.
- Mariko A., Mahé G., Servat E. (2003) Les surfaces inondées dans le delta intérieur du fleuve Niger au Mali par NOAA/AVHRR. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, 172, 61-68.
- Massuel S., Cappelaere B., Seguis L. (2005) Upscaling a small-catchment model for surface water regionalization in Sahelian endoreic landscape. *Journal of Hydrology*, Soumis.
- Merz R., Blöschl G. (2004) Flood frequency regionalisation—spatial proximity vs. catchment attributes, *J. Hydrology*, 302,1-4, 283-306.
- Messenger C., Grasseau G., Gallée H., Vauclin M., Brasseur O., Cappelaere B., Peugeot C., Séguis L., Léger L., Girou D. (2005) A Regional modelling of the interactions between atmosphere and land surface applied to the West African monsoon. Part I: Atmospheric forcing of the hydrologic model over the Sirba basin, Burkina Faso/Niger. *Climate Dynamics*, accepté.
- Mitchell T. D., Jones P. D. (2005) An improve method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, 25, pp 693–712.
- Moore D.W., Hisard P., MacCreary J., Merle J., O'Brien J.J., Picaut J., Verstraete J.M., Wunsch C. (1978) Equatorial adjustment in the eastern Atlantic. *Geophys. Res. Lett.*, 5, 8 : 637-640.
- Moron V. (1994) Guinean and Sahelian rainfall anomaly indices at annual and monthly scales (1933-1990). *Int. J. Climatol.*, 14, 325-341.
- Moron V., Philippon N., Sultan B., Ardoin-Bardin S., Barbier B., Hall N. (2006) PREVAISTRO. Prévisibilité de la Variabilité Intra-Saisonnière des pluies Tropicales. Projet soumis à l'ANR Blanc 2006.
- Mouelhi S., Michel C., Perrin C., Andréassian V. (2006) Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318, 1-4, 200-214.

- NEPAD ( ) <http://www.nepad.org>
- NEPAD (2005a) Développement d'un plan d'action sur l'environnement du NEPAD. Domaine d'intervention 5 : lutte contre les changements climatiques en Afrique. PNUE, AMCEN, FEEM, NEPAD, 46 p.
- NEPAD (2005b) Développement d'un plan d'action sur l'environnement du NEPAD. Domaine d'intervention 1 et 6 : lutte contre la dégradation des sols, la sécheresse et la désertification, et gestion transfrontalière des ressources naturelles. PNUE, AMCEN, FEEM, NEPAD, 38 p.
- NEPAD (2005c) Développement d'un plan d'action sur l'environnement du NEPAD. Domaine d'intervention 2 : conservation des zones humides en Afrique. PNUE, AMCEN, FEEM, NEPAD, 78 p.
- New M., Hulme M., Jones P. (1999) Representing twentieth century space-time climate variability. Part I: Development of a 1961-1990 mean monthly terrestrial climatology. *J. Climate*, 12, 829-856.
- New M., Hulme M., Jones P. (2000) Representing twentieth century space-time climate variability. Part II: development of a 1901-1996 monthly grids of terrestrial surface climate. *J. Climate*, 13, 13, 2217-2238.
- Nicholson S.E. (1983) Sub-Saharan rainfall in the years 1976-1980: evidence of continued drought. *Mon. Weath. Rev.*, 111 : 1646-1654.
- Nouvelot J.F. (1994) Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique tropicale et équatoriale. CIEH, Orstom, Montpellier. pp. 539.
- OIEau ( ) <http://www.oieau.fr/>
- Olivry J.C. (1983) Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Ségambie et aux Iles du Cap Vert. Examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitations). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, XX, 1 : 47-69.
- Olivry J.C., Bricquet J.P., Mahé G. (1993) Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide ? AISH pub. n°216, 67-78.
- Olivry J.C., Sircoulon J. (1998) Evolution des recherches hydrologiques en partenariat en Afrique subsaharienne : l'exemple des pays francophones. *Revue des Sciences de l'Eau*, numéro spécial, 61-75.
- Orange D., Wesselink A., Mahé G., Feizouré C. (1997) The effects of climate changes on river baseflow and aquifer storage in Central Africa. *IAHS Publ.* 240, 113-123.
- Oszwald Y., Bigot S., Kergomard C., Brou Y.T. (2003) Dynamiques et représentations spatiales de la déforestation en Côte d'Ivoire : l'exemple de la forêt classée du Haut Sassandra (1986-2001). *Photo-Interprétation*, p 3-41.
- Ouedraogo M., Patrel J.E., Mahé G., Servat E., Dezetter A., Conway D. (2001) Influence de la nature et de l'origine des données sur la modélisation hydrologique de grands bassins versants en Afrique de l'Ouest. *Pub. AIHS n° 270*, 209-214.
- Ouedraogo M., Patrel J.E., Mahé G., Servat E. (2002) Conséquences des déficits pluviométriques observés depuis le début des années 1970 en Afrique de l'Ouest et Centrale : normes hydrologiques, gestion et planification des ressources en eau. *IAHS Pub. n° 274*, 149-156.
- Oyebande L., Amani A., Mahé G., Niang-Diop I. (2002) Climate Change, Water and Wetlands in West Africa: Building linkages for their Integrated Management. IUCN-BRAO Working Paper. Ouagadougou, Burkina-Faso.
- Ozer P., Erpicum M., Demaree G., Vandiepenbeeck M. (2003) The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydrological Sciences Journal*, 48, 3, 489-492.
- Patrel J.E., Servat E., Kouamé B., Lubes H., Ouedraogo M., Masson J.M. (1997) Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part two : An integrated regional approach. *Journal of Hydrology*, 191 (1997), 16-36.

- Paturel J.E., Servat E., Delattre M.O., Lubes-Niel H. (1998) Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrological Sciences Journal*, 43(6), 937-946.
- Paturel J. E., Ouédraogo M., Mahé G., Servat E., Dezetter A., Ardoin S. (2003a) The influence of distributed input data on the hydrological modelling of monthly river flow regimes in West Africa. *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques*, 48, 6, 881-890.
- Paturel J. E., Ouédraogo M., Servat E., Mahé G., Dezetter A., Boyer J.F. (2003b) The concept of hydropluviometric normal in West and Central Africa in a context of climatic variability. *Hydrological Sciences Journal*, 48, 1, 125-137.
- Paturel J.E., Ouédraogo M., Mahé G., Servat E., Dezetter E. (2003c) Utilisation de modèles hydrologiques pour évaluer les ressources en eau de surface et leur évolution spatio-temporelle - application à l'Afrique de l'ouest. *IAHS Pub.* 280, 117-123.
- Paturel J.E., Laroche C., Mounirou L. (2005). Premiers résultats du programme national ACI/ « ECCO » : Détermination de la connaissance minimale nécessaire sur un bassin versant pour l'estimation des paramètres d'un modèle pluie-débit. Rapport interne, HSM, Montpellier.
- Perrin C., Laroche C., Paturel J.E. (2005) Détermination de la connaissance minimale nécessaire sur un bassin versant pour l'estimation des paramètres d'un modèle pluie-débit. Rapport d'activité 2003-2005 du PN/ACI « ECCO ».
- Philippon N., Fontaine B. (2002) The relationship between the sahelian and previous 2nd guinean rainy seasons: a monsoon regulation by soil wetness ? *Annales Geophysicae*, 20, 575-582
- Picaut J. (1983) Propagation of the seasonal upwelling in the eastern equatorial Atlantic. *J. Phys. Oceanogr.*, 13 : 18-37.
- Picouet C., Hingray B., Olivry J.C. (2001) Empirical and conceptual modelling of the suspended sediment dynamics in a large tropical African river: the Upper Niger river basin. *Journal of Hydrology*, 250, (1-4), 19-39.
- Picouet C., Orange D., Mahé G., Olivry J.C. (2002a) Rôle du delta intérieur du fleuve Niger dans la régulation des bilans de l'eau et de sédiments. In : Séminaire International GIRN-ZIT, Colloques et séminaires, IRD, 245-258.
- Picouet C., Dupre B., Orange D., Valladon M. (2002b) Major and trace element geochemistry in the upper Niger river (Mali): physical and chemical weathering rates and CO<sub>2</sub> consumption. *Chemical Geology*, 185, (1-2), 93-124.
- Pouyaud B. (1987) Variabilité spatiale et temporelle des bilans hydriques de quelques bassins versants d'Afrique de l'ouest en liaison avec les changements climatiques. *IAHS publ.* n°168, 447-461.
- Reij C., Thiombiano T. (2003) Développement rural et environnement au Burkina Faso : la réhabilitation de la capacité productive des terroirs sur la partie nord du Plateau Central entre 1980 et 2001. Ouagadougou, Ambassade des Pays-Bas, GTZ, PATECORE, USAID.
- Rescan M. (2005) Prévision des ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale jusqu'en 2099 par application des sorties du modèle d'évolution du climat HadCM3 à un modèle hydrologique. DEA UM2 Montpellier.
- Roche M. (1963) Hydrologie de surface. ORSTOM, Paris, 430p.
- Rodier J. (1964) Régimes Hydrologiques de l'Afrique noire à l'est du Congo. ORSTOM. Paris
- Rodier J., Auvray C. (1965) Estimation des débits de crues décennales pour les bassins de moins de 200 km<sup>2</sup> en Afrique occidentale. CIEH/ORSTOM, 30 p.
- Roose E., Kabore V., Guenat C. (1996) Le zaï : fonctionnement, limites et améliorations d'une pratique africaine de réhabilitation de la végétation de la productivité des terres dégradées de la région Soudano-Sahélienne. *Cahiers ORSTOM Pedologie*, 28, 2, 159-174.

- Roose E., Kaboré V., Guenat C. (1999) Zai practice: a West African traditional rehabilitation system for semi-arid degraded lands: a case study in Burkina Faso. In: *Arid Soil Research and Rehabilitation*, vol. 13, 343–355.
- Sangaré S., Mahé G., Paturel J.E., Bangoura Y. (2002) Bilan hydrologique du fleuve Niger en Guinée de 1950 à 2000. *Sud Sciences et Technologies, EIER, Ouagadougou*, 9, 21-33.
- Savané I., Sangaré Y. (1997) Evolution climatique de la région nord-ouest de la Côte d'Ivoire de 1935 à 1992 et son influence sur la réserve d'eau souterraine et sur l'agriculture. In : *Premier atelier scientifique du projet Friend-AOC, Cotonou, Documents Techniques en Hydrologie, PHI-V, n°16*, 127-146.
- Séguis L., Cappelaere B., Peugeot C., Leduc C., Milesi G. (2003) Influences de la sécheresse et du défrichement sur les écoulements d'un petit bassin sahélien. *Publ. AISH n° 278*, 429-434.
- Séguis L., Cappelaere B., Milesi G., Peugeot C., Massuel S., Favreau G. (2004) Simulated impacts of climate change and land-clearing on runoff from a small Sahelian catchment. *Hydrological Processes*, 18, 17, 3401-3413.
- Servain J., Picaut J., Merle J. (1982) Evidence of remote forcing in the equatorial Atlantic ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 12, 457-463.
- Servain J., Seva M. (1987) On relationships between tropical Atlantic sea surface temperature, wind-stress and regional precipitation indices: 1964-1984. *Ocean Air Interactions*, 1, 183-190.
- SIEREM (2004) *Système d'Information Environnemental pour les Ressources en Eau et leur Modélisation*. HydroSciences, Montpellier, France. <http://www.hydrosciences.org>
- Sigha-Nkamdjou L., Sighomnou D., Lienou G., Ndam J.R., Bello M., Kamgang R., Ekodeck G.E., Ouafô M.R., Mahe G., Paturel J.E., Servat E. (2005) Impact des modifications climatiques et anthropiques sur les flux de matières de quelques bassins fluviaux du Cameroun. *AISH Pub. 292*, 291-300.
- Sircoulon J. (1976) Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale : comparaison avec les sécheresses "1913" et "1940". *Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie*, 13, 2, 75-174.
- Sircoulon J. (1989) Effets des sécheresses sur l'hydrologie de surface. *La Houille Blanche*, 7-8, 505-516.
- Sircoulon J. (1998) Cinquante ans d'études hydrologiques en Afrique de l'Ouest. In : Demarée, G., Alexandre, J., De Dapper, M. (Eds.), *Tropical climatology, meteorology and hydrology, in memoriam Franz Bultot (1924-1995)*. International Conference, 22-24 mai 1996, Bruxelles, Belgique ; 457-469.
- Sodter F., Coulibaly Y., Lacombe B., Ouédraogo S., Sangli G., Traoré S. (2003) *Terres et jachère dans le Bwamu de Bondoukuy : tensions entre tradition, migration et modernité : deux enquêtes sur les chefs d'exploitation 1999-2001*. IRD, Ouagadougou, Burkina-Faso, 121 p.
- Sultan B, Janicot S. (2000) Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability. *Geophysical Research Letters*, 27, 20, 3353-3356.
- UICN ( ) <http://www.uicn.org>
- UICN (2004) *Réduire la vulnérabilité aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification : éléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation*. (Niasse M., Afouda A. et Amani A., Eds), UICN Gland, Suisse et Cambridge, Royaume-Uni, 82 p.
- Varado N. (2004) *Contribution au développement d'une modélisation hydrologique distribuée. Application au bassin versant de la Donga, au Bénin*. Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble, 319 pp.

- Vilaly A. (2004) Télédétection des états de surface au Sahel burkinabé et relations avec l'hydrologie. DEA Hydrologie Montpellier. MTD/MSE, 3S/HSM.
- Vörösmarty C.J., Moore B., Grace A.L., Gildea M.P., Melillo J.M., Peterson B.J., Rastetter E.B., Steudler P.A. (1989) Continental Scale Models of Water Balance and Fluvial Transport - An Application to S. America. *Global Biogeochemical Cycles* 3, 241-265.
- Vörösmarty C.J., Moore B., Grace A., Peterson B.J., Rastetter E.B., Melillo J. (1991) Distributed parameter models to analyse the impact of human disturbance of the surface hydrology of a large tropical drainage basin in southern Africa. *IAHS Pub.* 201, 233-244.
- Waast R. (2004) 1944-2004 Soixante ans de recherche au Sud. *Sciences au Sud*, 26,1-4.
- Water Assessment (1992) Evaluation hydrologique de l'Afrique sub-saharienne. Pays de l'Afrique de l'Ouest. Mott MacDonald International, BCEOM, SOGREAH, ORSTOM, Eds. Sci. Financement Banque Mondiale, PNUD, BAD, MFC.
- Wotling G., Mahé G., L'Hôte Y., Le Barbé L. (1995) Analyse par les vecteurs régionaux de la variabilité spatio-temporelle des précipitations annuelles liées à la mousson africaine. *Veille Climatique Satellitaire*, 52, 58-73.
- WWC ( ) <http://www.worldwatercouncil.org/>
- Yates D.N. (1997) Approaches to continental scale runoff for integrated assessment models. *J. of Hydrology*, 201, 289-310.

