

# Université de Montpellier II

Ecole Doctorale :  
SCIENCES DE LA TERRE, DE L'EAU ET DE L'ESPACE  
Sciences de l'eau dans l'environnement continental



Habilitation à Diriger des Recherches

7 Mars 2006

HYDROLOGIE REGIONALE EN AFRIQUE DE L'OUEST ET  
CENTRALE

Jean-Emmanuel PATUREL





## Exorde

Mon premier contact avec la recherche remonte à l'occasion d'un stage au CNRS, au cours de ma troisième année d'Ingénieur Universitaire, en 1984. Mon travail consistait à aider un thésard à l'établissement d'une liaison entre le stress hydrique d'un arbre fruitier et le diamètre de ses branches afin d'optimiser son approvisionnement en eau. Pour cela, on se basait sur les écrits d'une équipe américaine qui proposait un modèle basé sur des concepts très simples.

... modèle, concepts simples ...

Mon second contact avec la recherche remonte à l'année 1985-1986, année du Diplôme d'Etudes Approfondies national d'Hydrologie au sein du Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Le thème abordé était l'influence de la densité des réseaux pluviométriques sur la détermination des lames précipitées en milieu urbain. S'affranchissant de l'acquisition réelle de données en réalisant de nombreuses simulations de scénarii combinant des pluies et des bassins de forme diverses, et des réseaux de densités et de formes variables, nous avons essayé de justifier le choix de l'équipement nécessaire d'un bassin pour autoriser une estimation de lames d'eau avec un certain niveau de précision.

... simulation, niveau de précision ...

Mon premier contact avec les Pays En Développement remonte à l'année 1987-1988 où je suis arrivé à Ouagadougou, au Burkina Faso, en tant que Volontaire du Service National pour le compte du Comité Inter-états d'Etudes Hydrauliques. J'ai été affecté au sein des départements Hydrologie et Hydraulique Urbaine - Assainissement.

... développement, Afrique, inter-états ...

Mon troisième contact avec la recherche remonte à l'année 1988 où j'ai débuté une thèse au sein du Laboratoire Méthodes du Département Génie Civil et Urbanisme de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. La thèse a eu pour objet la notion de risque en Hydrologie Urbaine et l'analyse des phénomènes pluvieux à une échelle fine d'espace.

... phénomènes pluvieux, risque ...

Au jour d'aujourd'hui, parmi les étudiants africains dont j'ai initié puis suivi les parcours de recherche jusqu'à leur terme, 2 occupent des postes de direction dans des structures privées de leurs pays respectifs et 1 est enseignant-chercheur à l'Université d'Abidjan et est sur le point de passer son HDR. Est-ce satisfaisant ? pour eux, très probablement mais pour le développement de l'appareil de la recherche de leur pays, ça l'est bien moins ...


... encadrement de la recherche, développement ...

L'Habilitation à Diriger des Recherches constitue dorénavant un élément déterminant de la carrière professionnelle. Elle intervient un certain temps après la thèse, temps au cours duquel le candidat a acquis une certaine maturation de ses idées. Il lui faut alors rendre compte de ses capacités à encadrer des jeunes chercheurs.

Le choix pris pour la rédaction de ce document est celui des thématiques de recherche abordées. Il se trouve que ce plan suit le déroulement chronologique de mon parcours scientifique au sein de l'IRD, hier ORSTOM, montrant en cela, une cohérence méthodologique et révélant la permanence d'un questionnement et d'une méthode d'analyse.

Hormis la partie 3, on ne trouvera pas de références bibliographiques dans le document. Cependant, en annexe, j'ai pris le parti de dresser une liste d'ouvrages et d'articles qui me semblent fondamentaux. Ce sont eux qui, tout au long de ma carrière scientifique, ont inspirés ou ont été à la base de mes travaux. J'ai certainement oublié de très nombreux auteurs : qu'ils m'en excusent !

La fin de certains chapitres sera accompagnée de commentaires ou remarques critiques que je peux faire aujourd'hui, aux vues de l'expérience acquise.



## Sommaire général

|  |    |
|--|----|
| <i>Exorde</i>  | 4  |
| <i>Sommaire général</i>  | 6  |
| <i>Préliminaire</i>  | 8  |
| <u><i>Partie 1 – Notice individuelle</i></u>   |    |
| <i>Curriculum Vitae</i>  | 11 |
| <i>Résumé de mes activités depuis 1985</i>   | 12 |
| <u><i>Partie 2 - Présentation des thématiques et des travaux de recherche</i></u>  |    |
| <i>Thématique Hydrologie Régionale : Analyse des Changements Climatiques</i>   | 19 |
| <b>Objectifs du programme ICCARE</b>   | 19 |
| <b>Outils et méthodes développés</b>   | 19 |
| <b>Principaux résultats</b>  | 20 |
| Volet pluviométrie   | 20 |
| Volet écoulements  | 22 |
| Volet modélisation   | 24 |
| <b>Encadrements d'étudiants</b>  | 25 |
| <b>Travaux associés</b>  | 26 |
| Variabilité climatique et écart-type   | 26 |
| Evolution du couvert forestier ivoirien sur la période 1950-1990 en relation avec la variabilité du climat et les activités anthropiques | 27 |
| Analyse au Burkina d'autres paramètres climatiques   | 27 |
| Une appréciation des changements climatiques qu'a connu l'Afrique de l'ouest et centrale au XXème siècle                                 | 28 |
| <b>Principales références bibliographiques</b>   | 29 |
| <i>Commentaires</i>  | 30 |
| <i>Thématique Hydrologie Régionale : Impacts des Changements Climatiques</i>   | 32 |
| <b>Objectifs du programme VAHYNE</b>   | 32 |
| <b>Outil et méthodes développés</b>  | 32 |
| <b>Principaux résultats</b>  | 33 |
| Un résultat paradoxal au Sahel   | 33 |
| Influence des données utilisées et de leur spatialisation sur la performance des modèles   | 33 |
| Mise en œuvre d'une procédure de modélisation mensuelle spatialisée  | 34 |
| Simulations d'écoulement pour différents scénarii « fictifs » de pluie   | 35 |
| <b>Encadrements d'étudiants</b>  | 37 |
| <b>Travaux associés</b>  | 37 |
| SIEREM   | 37 |
| Impact de la variabilité climatique sur les normes hydrologiques   | 37 |
| Impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'ouest et Centrale - Utilisation du modèle de Yates         | 42 |
| Application de plusieurs fonctions critères au calage de GR2M  | 45 |
| <b>Principales références bibliographiques</b>   | 45 |

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Commentaires</i>   | 46        |
| <b><i>Premiers résultats du programme de recherche : ECCO-PNRH 2003</i></b>                                 | <b>48</b> |
| <i>Autres études</i>  | 49        |
| <b><i>Cadre international et national des études menées</i></b>   | <b>51</b> |
| Direction et coordination de programmes de recherche hors ORSTOM-IRD  | 52        |
| Participation à des programmes de recherche hors ORSTOM-IRD   | 53        |
| <br>  |           |
| <b><u><i>Partie 3 – Continuité et inflexion des activités de recherche</i></u></b>                          |           |
| <b><i>Bilan</i></b>   | <b>57</b> |
| <b><i>Perspectives : continuité et inflexion des activités de recherche</i></b>                             | <b>57</b> |
| <b>Contexte scientifique</b>  | <b>57</b> |
| <b>Point de vue personnel sur quelques éléments structurants pour de nouvelles directions de recherches</b> | <b>58</b> |
| Développement d'outils de description et d'analyse de données   | 58        |
| Réflexions sur la modélisation et les problèmes d'échelles  | 58        |
| Analyse de la modélisation hydrologique – cas des modèles GR  | 59        |
| Nouvelles données et nouvelles techniques d'acquisition de données  | 61        |
| Développement d'une modélisation hydrologique   | 62        |
| Mise au point de scénarii climatiques et environnementaux   | 63        |
| <b>Propositions personnelles de bases d'un nouveau projet de recherche pour l'équipe VAHYNE</b>             | <b>64</b> |
| <b>Implication personnelle</b>  | <b>65</b> |
| Amélioration des résultats de la modélisation hydrologique  | 65        |
| Régionalisation   | 68        |
| Incertitudes et erreurs en modélisation   | 69        |
| Mise en place d'une plate-forme informatique  | 70        |
| <b><i>Conclusion</i></b>  | <b>70</b> |
| <br>  |           |
| <b><u><i>Annexes</i></u></b>  |           |
| <b><u><i>Annexe 1 – Liste des publications et communications</i></u></b>                                    |           |
| <b><u><i>Annexe 2 – Quelques articles ou ouvrages de référence utilisés dans mes recherches</i></u></b>     |           |
| <b><u><i>Annexe 3 – Liste des thèses encadrées</i></u></b>  |           |
| <b><u><i>Annexe 4 – Quelques publications personnelles de référence</i></u></b>                             |           |

## Préliminaire

La première partie de ma carrière dans le milieu de la recherche a concerné des thèmes propres à l'Hydrologie Urbaine et au « Génie Urbain ». Je ne m'attarderai pas sur cette partie [**références bibliographiques**<sup>1</sup> : **RS-i 94-1 ; RS-ni 93-1 ; C-ci 93-1, 93-2**]. Je retiendrai cependant 2 aspects particuliers qui me sont apparus au cours de cette période:

- L'enseignement suivi à l'ISIM ainsi que mes premières années de travail m'ont confirmé dans mon impression première : les problèmes liés à l'eau ouvrent sur la transdisciplinarité.
- La recherche n'est pas individuelle. Les résultats acquis résultent de l'apport de chacun des membres du projet, qu'il soit stagiaire, technicien, ingénieur, gestionnaire, chercheur ou directeur. La confrontation permanente des points de vue de chacun au cours de réunions régulières ou d'une partie débouche sur le montage d'un programme de recherche. Le travail présenté ici n'est donc pas uniquement le mien mais il est le bout que j'en vois de ma lorgnette.

C'est un réel changement de thématique que j'opère en intégrant l'ORSTOM, l'Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération, en 1992 : du pas de temps de 6mn, je scrute dorénavant le pas de temps mensuel et annuel ; des zones urbaines avec leurs grands horizons goudronnés barrés de barres d'immeubles, où l'homme donne l'impression de maîtriser son environnement, je découvre alors des immensités où il semble que l'homme n'a pas toujours sa place et où il subit les événements. Heureusement ou malheureusement, tout cela n'est qu'impression ...

Le continent africain, terre de contraste en matière de climat, est très fragilisé du point de vue environnemental (forte pression anthropique sur le milieu, déforestation, désertification, dégradation des sols, ...). Il se révèle, ainsi, un objet d'étude très approprié pour traiter de la variabilité, liée à celle du climat, et de la modélisation des ressources en eau, dans la mesure où son développement repose largement sur la maîtrise de cette dernière. En outre, les régions semi-arides et humides d'Afrique de l'Ouest et Centrale, qui subissent depuis près de trente ans une sécheresse persistante, sont parmi celles pour lesquelles une importante masse de données a pu être collectée depuis de nombreuses années, en particulier par l'ORSTOM-IRD. Cette information disponible constitue un support privilégié pour les travaux de recherche de l'équipe qui s'est structurée autour d'Eric SERVAT et à laquelle j'appartiens depuis mon intégration à l'ORSTOM. Par contre, il ne rentre pas dans nos intentions de traiter nous-même du déterminisme de cette variabilité et de cette instabilité du climat, domaine relevant d'autres compétences et d'autres projets de recherche.

L'approfondissement de l'étude du cycle hydrologique, en particulier à l'échelle régionale, compte tenu de la vulnérabilité climatique et anthropique de l'Afrique de l'Ouest et Centrale constitue la trame principale des travaux entrepris par notre équipe depuis mon intégration. La thématique générale est donc l'**Hydrologie Régionale en Afrique de l'Ouest et Centrale**.

Les objectifs visés consistent à :

- approfondir la connaissance de la variabilité spatiale et temporelle des régimes pluviométriques et hydrologiques au moyen d'ensembles de données des réseaux nationaux afin d'en tirer des enseignements à une échelle qui soit celle de la planification et de l'aménagement régional,
- élaborer des modèles régionaux de production et de transfert des ressources en eau qui puissent intégrer la variabilité climatique et les activités anthropiques,
- élaborer des méthodes pour l'interprétation des prévisions des changements planétaires en mettant l'accent sur leurs impacts sur les régimes hydrologiques.

---

<sup>1</sup> Ces références renvoient à la liste de publication, en annexe.

Ces objectifs ont comme préoccupation commune la gestion intégrée de l'eau dans un environnement vulnérable, rejoignant en cela les recommandations des dernières grandes conférences internationales (Dublin, Rio, Paris, Johannesburg, Kyoto, ...) sur l'Eau.

Le premier point a fait l'objet du programme ICCARE. Quant au second, il fait l'objet du programme VAHYNE qui doit produire le matériel nécessaire au troisième point qui émerge dans les préoccupations scientifiques de notre équipe et qui constituera le programme MOHYCAN (MODélisation HYdrologique, Climat et Anthropisation des grands Cours d'eau).

Ces 3 programmes s'intègrent parfaitement dans les projets de plan du Programme Hydrologique International qui est « le seul programme scientifique et éducatif du système des Nations Unies dans le domaine de l'hydrologie et des ressources en eau qui permette de répondre efficacement à la fois aux besoins des pays en développement et à ceux des pays développés » (Esquisse de projet de plan de la cinquième phase (1996-2001) du PHI - Document UNESCO).

A l'avenir, mes programmes de recherche répondront également aux préoccupations de l'AISH et de l'OMM qui ont lancé l'initiative « Prediction in Ungauged Basins ». A l'occasion de son lancement (Brasilia, 20-22/11/2002), l'initiative de l'AISH a pris la forme d'une décennie (2003-2012) internationale dénommée *PUB*, dont la finalité affichée est la réduction des incertitudes dans la « prédiction » en Hydrologie (le terme générique anglais *prediction* a plusieurs sens en français : prédétermination, simulation et prévision). Cette initiative couvre l'ensemble des branches de l'Hydrologie, quantitative et qualitative, de la neige à l'érosion continentale, des eaux de surface aux eaux souterraines, de la théorie aux applications pratiques. Le problème des bassins non jaugés remonte aux fondements de l'Hydrologie moderne. Il est loin d'avoir reçu une réponse satisfaisante, la plupart des modèles hydrologiques requérant un calage sur les données qui font défaut dans leurs cas. L'initiative *PUB* conduit donc à une série de réflexions critiques sur l'Hydrologie actuelle, sur le calage, la transférabilité/transposabilité des paramètres, les types de modèles existants, les échelles d'espace et de temps et l'utilisation de moyens d'observation « moins conventionnels » (jusqu'à maintenant ...) tels que la télédétection.

# Partie 1 – Notice individuelle

## Curriculum Vitae

PATUREL Jean-Emmanuel, Marie, Joseph

Né le 20 décembre 1961 à Nanterre

Marié

Adresse personnelle : 145, impasse de la voie romaine – Bât. B, Appt. 109 – 34090 Montpellier

Adresse professionnelle : UM II – HydroSciences Montpellier – Case MSE – Place Eugène Bataillon - 34095 Montpellier Cedex 5

tél. : 04 67 14 90 14 ; fax : 04 67 14 90 10 ; courriel : [jean-emmanuel.paturel@msem.univ-montp2.fr](mailto:jean-emmanuel.paturel@msem.univ-montp2.fr)

|   |  |
|---|--|
| <b>Position actuelle :</b>                                    | <b>Chargé de Recherche de 1<sup>ère</sup> classe à l'UR 050 – HydroSciences (HSM) à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD)</b>  |
| <b>Positions successives :</b>                                | Allocataire d'Enseignement et de Recherche Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (01/10/1988-30/09/1992)<br>Chargé de Recherche Stagiaire IRD (01/10/1992-31/03/1994)<br>Chargé de Recherche de 2 <sup>nd</sup> e classe IRD (01/04/1994-30/09/1996)<br><b>Chargé de Recherche de 1<sup>ère</sup> classe IRD (depuis le 01/10/1996)</b>  |
| <b>Affectations successives :</b>                             | Laboratoire Méthodes du Département Génie Civil et Urbanisme à l'INSA de Lyon (01/10/1988 – 30/09/1992)<br>Laboratoire d'Hydrologie de l'IRD à Montpellier (01/10/1992-04/01/1993)<br>Antenne Hydrologique IRD à Abidjan (Côte d'Ivoire) (05/01/1993-06/01/1999)<br>Laboratoire d'Hydrologie IRD à Ouagadougou (Burkina Faso) (07/01/1999-01/09/2003)<br><b>Maison des Sciences de l'Eau (UM II, CNRS, IRD) à Montpellier (depuis le 02/09/2003)</b>   |
| <b>Titres universitaires :</b>                                | Diplôme d'Ingénieur des « Sciences et Techniques de l'Eau » à l'Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier, juin 1985<br>Diplôme de « D.E.A. National d'Hydrologie » à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc Montpellier (Evaluation de l'influence de la densité des réseaux pluviométriques sur la détermination des lames précipitées, septembre 1986)<br>Diplôme de Thèse de « Doctorat Génie Civil et Sciences de la Conception » à l'Institut National des Sciences Appliquées Lyon (Etude des phénomènes pluvieux à une échelle fine d'espace – Contribution à l'analyse du risque en Hydrologie Urbaine », septembre 1991) |
| <b>Activités de recherche :</b>                               | 1985-1986 puis 1988-1992 : Hydrologie Urbaine<br>1993 → ... : Hydrologie Régionale, changements climatiques et modélisation  |
| <b>Coordination de programmes nationaux et internationaux</b> | <b>Co-coordonnateur international</b> du thème Variabilité des Ressources en Eau du projet FRIEND AOC de l'UNESCO<br><b>Membre du comité de pilotage</b> du projet « Prévision dans les bassins non jaugés (PUB) » soumis au Programme National / ACI « ECCO » ECOSPHERE CONTINENTALE : Processus et Modélisation (2005)<br><b>Coordinateur pour l'IRD</b> du projet « détermination de la connaissance minimale nécessaire sur un bassin versant pour l'estimation des paramètres d'un modèle pluie-débit » du Programme National / ACI-FNS : « ECCO » (2003)   |

## Résumé de mes activités depuis 1985

En 1987-1988, j'ai effectué mon Service National au titre de la coopération au Comité Inter états d'Etudes Hydrauliques de Ouagadougou au Burkina Faso où j'ai découvert les pays en développement et la recherche qui pouvait s'y faire. Cette parenthèse n'est certainement pas pour rien dans mon parcours de chercheur à l'IRD ...

Avant mon recrutement par l'IRD en tant qu'hydrologue modélisateur, en 1992, mon apprentissage de la recherche s'est fait par le biais d'un Diplôme d'Etudes Approfondies (1985-1986) et d'une thèse de Doctorat dans le domaine de l'Hydrologie Urbaine (1988-1991). Après 1992, j'ai travaillé à une échelle bien plus grande qui est celle de l'Hydrologie Régionale. Au cours de ces 2 étapes, j'ai assuré des fonctions et responsabilités complémentaires :

➤ de formation

participation à des Travaux Dirigés

responsabilité de module de cours

co-encadrement de stages, PFE (projets de fin d'études), DEA et thèses

➤ de gestion

responsabilité d'actions budgétées de l'IRD

responsabilité de la gestion financière du projet FRIEND AOC

(co)-organisation de conférences nationales et internationales (journées Hydrologie de l'ORSTOM, Abidjan'98, AISH 2005)

➤ et de recherche

animation de groupes de recherche internationaux au sein du projet FRIEND AOC

coordination et participation à des programmes nationaux et internationaux de recherche (PNRH, ICCE-BF, AMMA, Echel-Eau)

participation à des programmes de recherche IRD (ICCARE, VAHYNE)

Ces différentes activités sont regroupées dans les tableaux qui suivent.

|  | Année | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 |
|--|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| <b>Fonctions et responsabilités de formation</b>                     |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| <u>Cours, TD et atelier</u>  |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>INSA 4 : TD de « probabilités et statistiques »</i>               |       |    |    | == | == | == | == | == |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>INSA 4 : TD « aide à la décision - recherche opérationnelle »</i> |       |    |    | == | == | == | == | == |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>EIER FPU : cours de « modélisation hydrologique »</i>             |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | == |    |    |    |    |    |
| <i>EIER FPU : atelier de « modélisation hydrologique »</i>           |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | == | == | == |    |    |
| <u>Encadrement de stages, PFE, DEA, thèses et HDR</u>                |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Stages, PFE et DEA</i>  |       |    |    |    |    |    |    |    |    | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == |
| <i>Thèse de A. A. AKA</i>  |       |    |    |    |    |    |    |    |    | == | == | == | == | == |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Thèse de T. Y. BROU</i>   |       |    |    |    |    |    |    |    |    | == | == | == | == |    |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Thèse de M. OUEDRAOGO</i>   |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | == | == | == | == | == |    |    |    |    |
| <i>Thèse de S. ARDOIN</i>  |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | == | == | == | == |    |
| <i>Thèse d'Etat de D. SIGHOMNOU</i>                                  |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | == | == | == |    |
| <i>Thèse de G. LIENOU</i>  |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | == | == | == | == |
| <i>Thèse de P. DIELLO</i>  |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | == | == | == |
| <i>Thèse de M.A. KOUASSI</i>   |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | == |
| <i>HDR de T. Y. BROU</i>   |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | == | == | == |
| <b>Fonctions et responsabilités de gestion</b>                       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Action budgétée IRD</i>   |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | == | == | == | == | == | == | == |
| <i>Projet FRIEND AOC</i>   |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | == | == | == | == | == | == |
| <i>Activités Labo. Hydrologie Ouagadougou</i>                        |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | == | == | == | == | =  | =  | =  |
| <i>(co)organisation de séminaires nationaux et internationaux</i>    |       |    | == |    | == |    |    | == |    |    | == |    | == |    | == | == | == |    |    | == | == |
| <b>Fonctions et responsabilités de recherche</b>                     |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Animation de groupe de recherche</i>                              |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == |
| <i>Participation à des programmes nationaux de recherche</i>         |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | == |    | == | == | == |
| <i>Activités de recherche</i>  |       | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == |
|  | Année | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 |

➤ formation

mes activités d'enseignement ont concerné les élèves ingénieurs de 4<sup>ème</sup> année de l'INSA de Lyon du département Génie Civil et Urbanisme (96 heures annuelles) et les élèves en Formation Post Universitaire des l'Ecole des Ingénieurs de l'Equipement Rural de Ouagadougou (EIER FPU) au Burkina Faso (4 à 15 heures annuelles)

mes activités d'encadrement de stages ont concerné des élèves ingénieurs ou ingénieurs de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Rennes (ENSA), de l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES) et de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF) ; celles de PFE (Projet de Fin d'Etudes) et DEA ont concerné des élèves ingénieurs ou ingénieurs ou titulaires de maîtrise de l'Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier (ISIM), de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electronique, d'Electrotechnique, d'Informatique, d'Hydraulique et de Télécommunications de Toulouse (ENSEIHT), de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), de l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics de Yamoussoukro en Côte d'Ivoire (ENSTP) et de l'Ecole des Ingénieurs de l'Equipement Rural de Ouagadougou au Burkina Faso (groupe EIER/ETSHER).

➤ gestion

depuis 1999, j'ai assuré la gestion des actions budgétées du Laboratoire d'Hydrologie IRD à Ouagadougou au Burkina Faso et du financement de la Coopération Française pour le projet FRIEND AOC (AB au Niger, au Cameroun, au Mali), financement qui a cessé en 2002

à partir de 1999, j'ai assuré la coordination et la gestion des activités du Laboratoire d'Hydrologie de l'IRD à Ouagadougou, au sein du groupe des écoles EIER/ETSHER.

j'ai (co)organisé plusieurs manifestations nationales ou internationales dont la plus importante a réuni plus de 120 participants venant de plusieurs continents à Abidjan dans le cadre de la conférence Abidjan 98 – Variabilité des ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale

➤ recherche

deux ans après mon intégration à l'ORSTOM et mon arrivée en affectation en Côte d'Ivoire, l'équipe s'est investie dans les projets FRIEND de l'UNESCO et, plus particulièrement, dans sa déclinaison « Afrique de l'Ouest et Centrale ». Je suis actuellement co-coordonnateur international d'un thème de recherche intitulé Variabilité des Ressources en Eau

Je suis responsable pour l'UR050-UMR 5569 de notre participation à un projet accepté en 2003 au Programme National / ACI « ECCO » ECOSPHERE CONTINENTALE : Processus et Modélisation sur le thème de la détermination de la connaissance minimale nécessaire sur un bassin versant pour l'estimation des paramètres d'un modèle pluie débit.

Je suis membre du comité de pilotage et responsable pour l'UR050-UMR 5569 d'un projet soumis en novembre 2004 au Programme National / ACI « ECCO » ECOSPHERE CONTINENTALE : Processus et Modélisation sur le thème de la Prévision dans les bassins non jaugés (PUB).

|   | Année | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 |
|---|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| <b>Développement des connaissances</b>                |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Hydrologie Urbaine</i>                             |       | == | == | == | == | == | == | == | == |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Hydrologie Régionale : analyse des changements</i> |       |    |    |    |    |    |    |    | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == | == |
| <i>Hydrologie Régionale : impact des changements</i>  |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | == | == | == | == | == | == | == | == | == |
| <b>Programmes de recherche</b>                        |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Programme ICCARE</i>                               |       |    |    |    |    |    |    |    |    | == | == | == | == | == | == |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Programme VAHYNE</i>                               |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | == | == | == | == | == | == | == | == |
| <i>Programme PNRH 2001</i>                            |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | == |    |    |    |    |
| <i>Programme ECCO - PNRH 2003</i>                     |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | =  | == | =  |
| <i>Programme ECCO - PNRH 2005 a</i>                   |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | == |
| <i>Programme ECCO - PNRH 2005 b</i>                   |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | == |
|   | Année | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 |

- Hydrologie Urbaine : le thème a été abordé pendant mon Diplôme d'Etudes Approfondies, ma thèse et mon Volontariat du Service National Actif.
- A partir d'octobre 1992, lors de mon recrutement à l'ORSTOM, ma thématique de recherche est devenue toute autre : j'ai changé d'échelle de temps et d'espace pour travailler dans le domaine de l'Hydrologie Régionale.
- Programme ICCARE (Identification et Conséquences d'une variabilité du Climat en AfRIque de l'Ouest non sahélienne) : le programme avait pour objet l'identification d'une variabilité du climat dans la sous-région « Afrique de l'Ouest non sahélienne ». La « sécheresse » (notion très relative voire paradoxale en zone tropicale humide) observée dans l'Afrique sahélienne se fait également ressentir plus au Sud. Ses conséquences peuvent pénaliser de nombreux projets de développement et nuire au bon fonctionnement des aménagements déjà réalisés.
- Programme VAHYNE (analyse de la VAriabilité HYdrologique et impacts sur les ressources eN Eau) : l'ambition de ce projet de recherche est d'apporter une contribution hydrologique, tournée vers les ressources en eau, aux réflexions menées au sein de la communauté scientifique internationale en terme de variabilité et d'instabilité du climat. Les travaux, qui relèvent de l'étude de la variabilité et de la modélisation des ressources en eau, sont basés sur l'analyse de séries de données chronologiques et régionales ainsi que sur la modélisation de la relation pluie-débit.
- Programme PNRH 2001 (Impact des modifications du climat sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest par couplage entre un modèle hydrologique et un modèle atmosphérique régional) : en 2001, le Comité Scientifique du PNRH nous a demandé d'améliorer notre projet en tenant compte des remarques qui nous ont été adressées mais n'a pas donné suite. L'objectif essentiel de notre projet était de simuler l'état probable des ressources en eau en Afrique de l'Ouest au cours des 20-100 prochaines années.
- Programme ECCO – PNRH 2003 (Détermination de la connaissance minimale nécessaire sur un bassin versant pour l'estimation des paramètres d'un modèle pluie-débit) : l'objectif du projet est d'adopter une nouvelle approche pour résoudre la question de l'estimation des paramètres et de déterminer quel niveau minimal d'information est nécessaire pour obtenir une estimation fiable des paramètres des modèles pluie-débit.
- Programme ECCO – PNRH 2005 a (Assimilation de la variabilité spatio-temporelle des pluies et des états de surface dans la modélisation des ressources en eau du fleuve Niger) : l'objectif du projet est d'assimiler des données pluies issues de Météosat et une information évolutive caractérisant les états de surface dans le but d'améliorer les résultats des modèles hydrologiques.
- Programme ECCO – PNRH 2005 b (Prévision dans les Bassins Non jaugés (PUB)) : l'objectif du projet est de mobiliser les hydrologues français autour de la décennie PUB, initiative lancée par l'AISH.



## Partie 2 - Présentation des thématiques et des travaux de recherche

## Thématique Hydrologie Régionale : Analyse des Changements Climatiques

### Objectifs du programme ICCARE

Le programme ICCARE a pour objet l'identification d'une éventuelle variabilité du climat dans la sous-région « Afrique de l'Ouest non sahélienne ». La « sécheresse » observée depuis 1970 dans l'Afrique sahélienne se fait également ressentir plus au sud en zone plus humide (la notion de sécheresse est très relative voire paradoxale en zone tropicale humide). Ses conséquences peuvent pénaliser de nombreux projets de développement et nuire au bon fonctionnement des aménagements déjà réalisés. Cette fluctuation climatique se traduit par des « ruptures » dans les séries chronologiques pluviométriques et hydrométriques. Les manifestations les plus sensibles de ces changements (diminution de la pluviométrie annuelle, du nombre annuel de jours de pluie, des écoulements annuels, décalage et rééquilibrage des saisons de pluies et des crues, ...) ont été analysées ainsi que les modifications des réponses des bassins versants à ces nouveaux facteurs atmosphériques (figure 1). Les données de travail rassemblées nous ont permis de travailler sur les décennies 50 à 80 incluses.

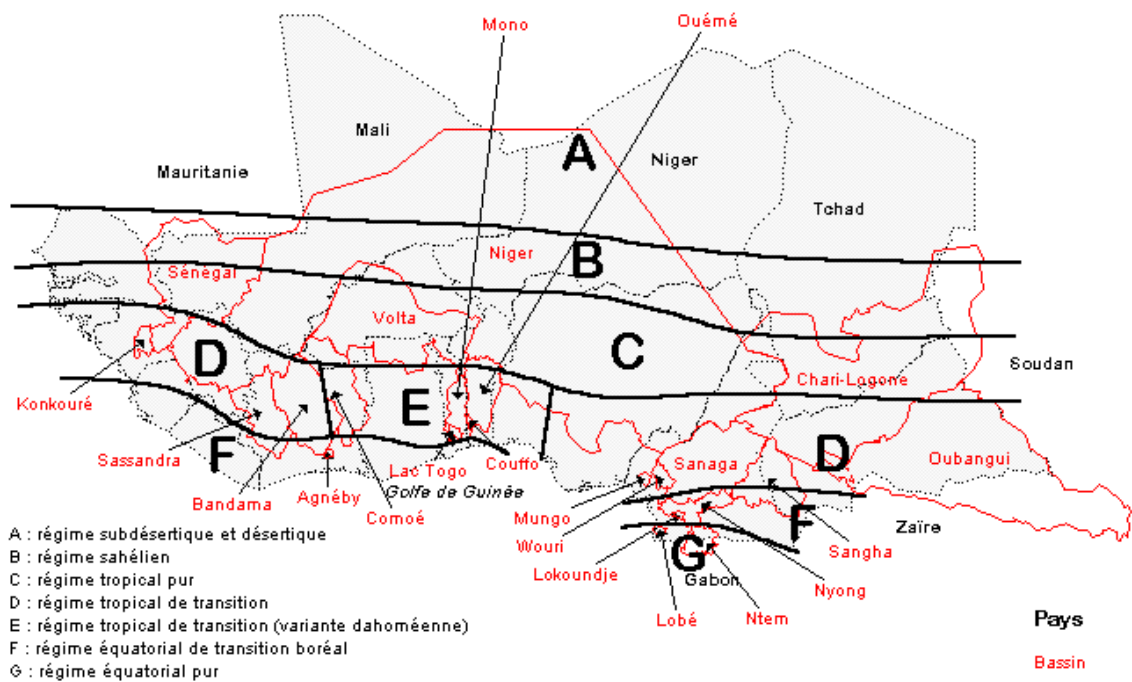


Figure 1 : Afrique de l'Ouest et Centrale – bassins hydrographiques de la zone d'étude du programme ICCARE

### Outils et méthodes développés

Dans la mesure du possible, l'analyse des séries chronologiques des pluies et des débits a privilégié deux approches différentes mais complémentaires :

- à un niveau ponctuel, pour chaque station, des méthodes statistiques permettant de caractériser des fluctuations dans une série chronologique ont été utilisées. Les méthodes statistiques retenues dans le cadre de ce travail : test de corrélation sur le rang pour vérifier le caractère aléatoire d'une série, test de Pettitt, statistique de Buishand, ellipse de contrôle, procédure bayésienne de Lee et Heghinian et procédure de segmentation des séries hydrométéorologiques pour détecter une ou plusieurs ruptures au sein d'une série. L'ensemble de ces méthodes a été rassemblé dans un logiciel appelé Khronostat.

- à un niveau régional, l'évolution de la variable étudiée a été cartographiée. Sur chacun des postes retenus, on a déterminé un indice annuel de la variable, défini comme une variable centrée réduite : 
$$\frac{(X_i - \bar{X})}{S}$$
 avec  $X_i$  : valeur de la variable étudiée à l'année  $i$ ,  $\bar{X}$  : valeur moyenne interannuelle de la variable étudiée sur la période 1950-1989 et  $S$  : valeur de l'écart-type de la variable étudiée sur la période 1950-1989.

Ces approches univariées ont été couplées à une analyse spatio-temporelle généralisée au cas multivarié. Cette méthode, STATIS, permet l'exploration de plusieurs tableaux de données en simultané. Le but de la méthode est la recherche d'une structure commune aux tableaux, appelée interstructure. Cette approche permet ainsi, d'une part, de détecter des ruptures climatiques caractérisées par plusieurs variables pluviométriques et, d'autre part, de répartir spatialement les postes ayant subi des changements similaires sur une période commune.

La méthodologie pour apprécier des modifications du processus de production et de transfert des écoulements relève de l'analyse statistique de modèles de régression non-linéaire. Aux estimations ponctuelles des paramètres obtenues en phase de calage par minimisation de la fonction critère des moindres carrés, sont associées des régions de confiance probabilistes. Son contour est calculé pour un niveau de probabilité donné, égal à  $(1 - \alpha)$  de telle sorte que la région de confiance ainsi délimitée contient le jeu optimum inconnu de paramètres du modèle avec une probabilité approximative égale à  $1 - \alpha$ . La valeur du contour ( $S(\theta)$ ) dépend de la valeur de la fonction critère à l'optimum ( $F_{c_{opt}}$ ) et d'une variable de Fisher ( $F$ ) à  $p$  et  $n-p$  degrés de liberté ( $p$  : nombre de paramètres à optimiser et  $n-p$  : nombre d'observations diminué du nombre de paramètres à optimiser) pour un seuil de confiance  $(1 - \alpha)$  :

$$S(\theta) = F_{c_{opt}} * \left( 1 + \left( \frac{p}{n-p} * F(p, n-p, \alpha) \right) \right)$$

## Principaux résultats

### Volet pluviométrie

[références bibliographiques : RS-i 97-1, 97-2, 97-3, 97-5, 98-1, 98-2, 98-3; RS-ni 95-1, 98-1, 99-1 ; RS-d 96-1, 97-1 ; O-ac 97-1, 97-2 ; C-ci 95-2, 96-1, 96-3, 97-5, 98-3, 98-5, 99-1; C-cn 95-1, 96-2, 96-3 ; W 95-1]

La cartographie des résultats de l'analyse des séries chronologiques montre une tendance générale au glissement des isohyètes vers le sud/sud-ouest, de la décennie 1950 à la décennie 1980. Cette évolution traduit une diminution nette et généralisée de la pluviométrie annuelle sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne (figure 2). D'une manière générale, il apparaît que ce sont les zones à régime pluviométrique extrême qui ont subi les modifications les plus importantes : les plus arrosées (de la Guinée à la Côte d'Ivoire) et les plus arides (la bordure sahélienne au nord de la zone étudiée). Entre les deux, le phénomène est d'intensité plus nuancée.

les différentes procédures statistiques appliquées aux séries de hauteurs annuelles précipitées soulignent l'existence d'une rupture survenue à la fin des années 1960 ou au début des années 1970, et donc en phase avec ce qui a été observé et étudié au Sahel. Les déficits pluviométriques correspondants sont de l'ordre de 20%. Ils atteignent parfois des valeurs supérieures à 25%, notamment sur la côte atlantique ou dans le nord, confirmant ainsi que l'Afrique «humide» a, elle aussi, été sévèrement touchée par cette variabilité pluviométrique.

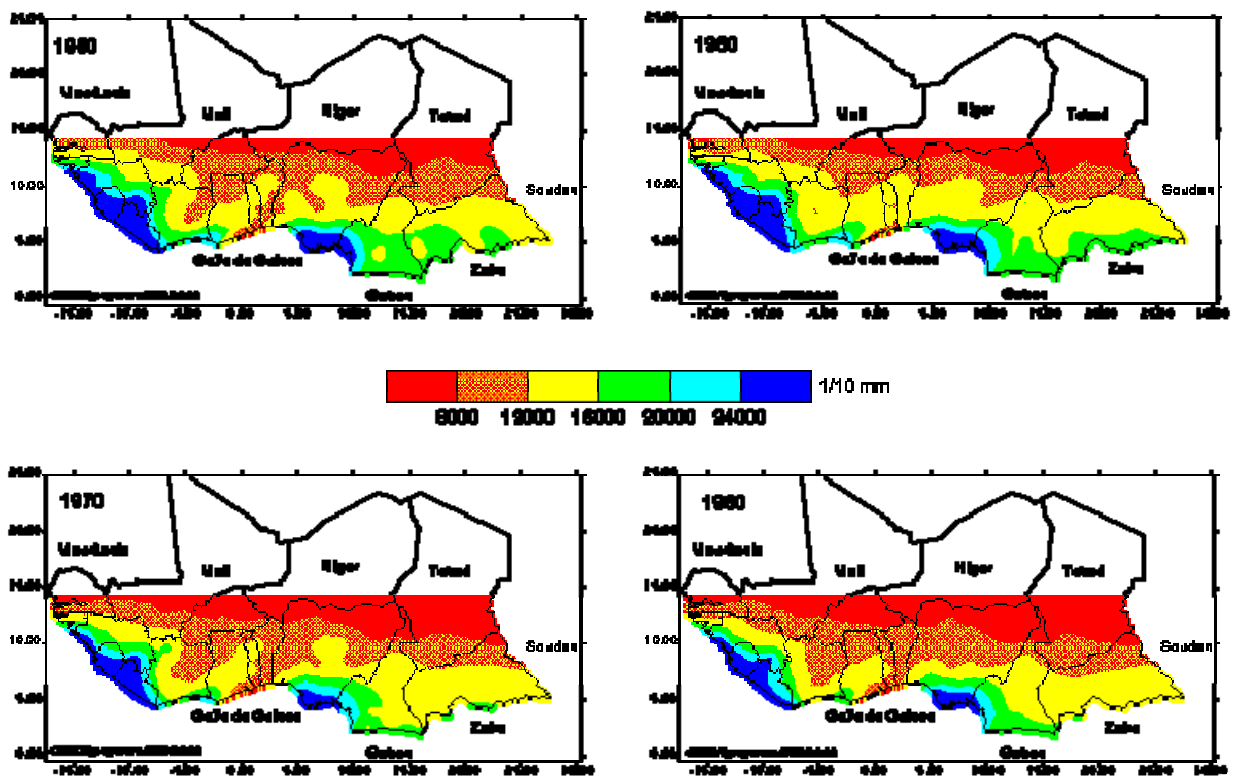


Figure 2 : Afrique de l'Ouest et Centrale - isohyètes interannuelles au cours des décennies 1950 à 1980

D'autres variables permettant une caractérisation plus «qualitative» du phénomène ont également été étudiées. Elles apportent un complément d'information quant aux manifestations de cette variabilité pluviométrique.

- La diminution du nombre annuel de jours de pluie, là où elle a pu être étudiée, est une caractéristique vérifiée du déficit pluviométrique observé.
- Il apparaît que le déroulement des saisons des pluies est légèrement différent de ce qu'il était avant la décennie 1970. Les saisons des pluies sont généralement plus courtes, soit parce qu'elles commencent plus tardivement, soit parce qu'elles finissent plus tôt. De même, les quantités précipitées durant les saisons des pluies ont désormais une répartition qui s'est trouvée modifiée. Cela se traduit par une variation sensible du rapport des hauteurs précipitées des deux saisons des pluies.
- Certaines régions de la zone, et plus particulièrement en Afrique de l'Ouest, ont également vu une diminution des précipitations enregistrées hors saison des pluies. Ce phénomène marque un «renforcement» de la saison sèche qui contribue, tout à la fois, à la baisse des précipitations annuelles et à la nette perception du phénomène par les populations.
- L'analyse menée au pas de temps mensuel montre que la baisse de la pluviométrie est un phénomène qui touche chaque période et chaque saison de l'année sauf dans les zones à 2 saisons des pluies (zone côtière du Golfe de Guinée) où la pluviométrie du mois de la petite saison sèche (août) augmente.

L'approche multivariée confirme les résultats des analyses univariées, tant du point de vue des dates de rupture (fin des années 1960, début des années 1970) que de l'hétérogénéité spatiale et temporelle du phénomène. L'existence de deux axes privilégiés d'hétérogénéité, le premier nord-sud et le second est-ouest, apparaît, en effet, comme l'une des caractéristiques majeures de ce déficit pluviométrique persistant.

L'examen des séries chronologiques depuis l'origine des stations a permis de resituer l'événement observé dans une perspective historique (figure 3). Il apparaît ainsi que, depuis le début du siècle, la région a connu une succession de périodes sèches et humides, sans que l'on puisse toutefois parler de cycles. Le phénomène observé à la fin des années 1960 et au début des années 1970 apparaît comme le plus significatif d'un point de vue statistique. Cette période déficitaire, toujours d'actualité, présente, en outre, une durée et une intensité tout à fait remarquables ; en particulier dans les secteurs ouest et nord de la zone étudiée, où le phénomène revêt un caractère exceptionnel, ce qui n'est sans doute pas le cas plus à l'est.

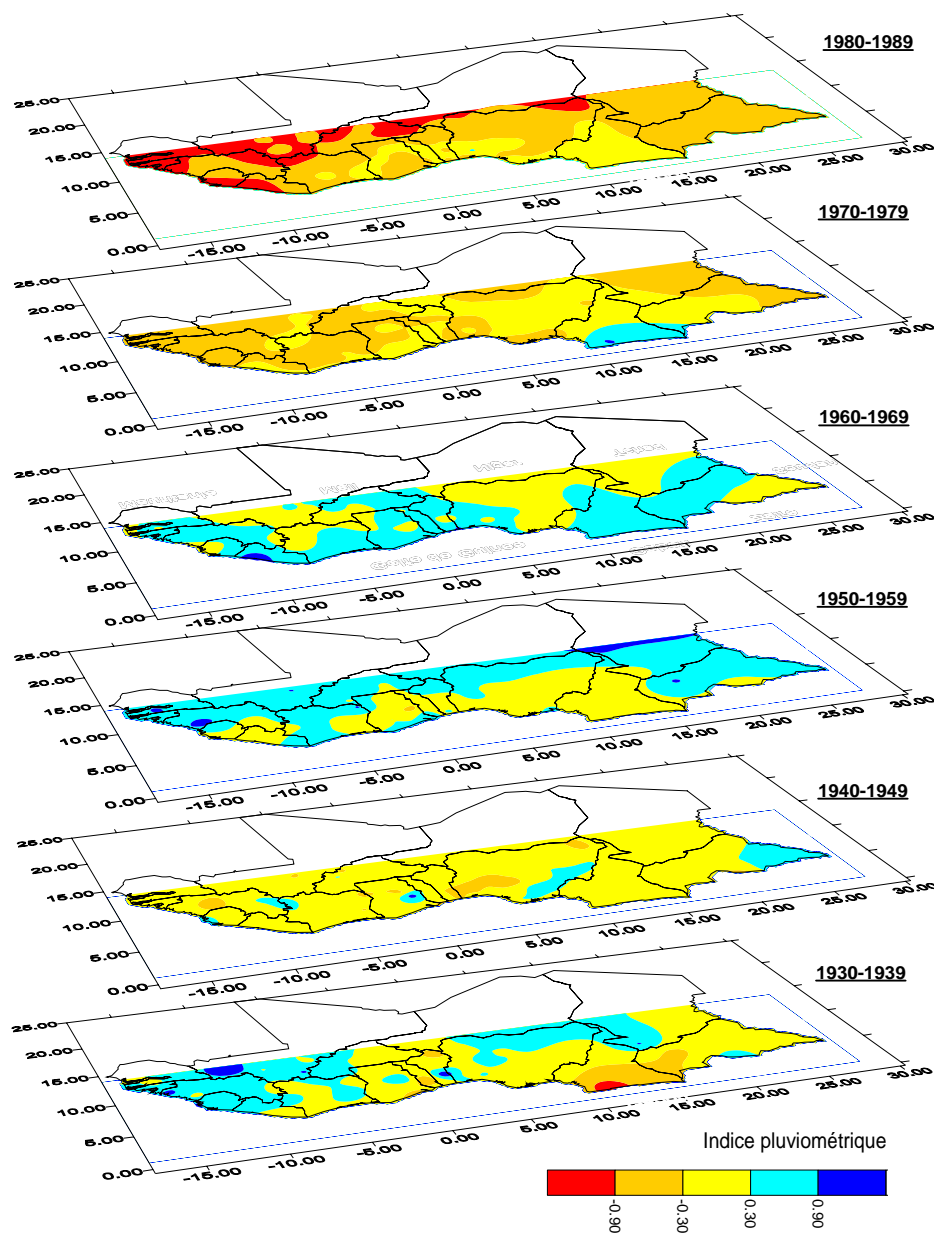


Figure 3 : Afrique de l'Ouest et Centrale – indices pluviométriques interannuels (variables centrées réduites) au cours des décennies 1930 à 1980

#### Volet écoulements

[références bibliographiques : RS-i 96-1, 97-4 ; RS-ni 98-1 ; C-ci 96-2, 97-1, 97-4, 98-1, 98-5 ; C-cn 95-3, W 95-2 ; P-cn 95-1]

[DEA A.A. AKA – Université de Montpellier II]

D'une manière générale, en phase avec la chute des précipitations annuelles, on observe une importante diminution des écoulements. *On verra lors du programme VAHYNE que dans les régions sahéliennes, on observe paradoxalement une augmentation des écoulements.* Les quantités écoulées à l'échelle annuelle, caractérisées par les modules, sont en forte baisse, généralement de 30 à 60 % (figure 4). Ce phénomène est également observé en hautes eaux puisque les débits maximums atteints sont nettement inférieurs à ce qu'ils étaient auparavant. Les débits caractéristiques des valeurs plus moyennes des hydrogrammes, à savoir les DC6, sont également en baisse, et de manière particulièrement sensible puisque dans bon nombre de cas on observe un déficit de plus de 60 %. S'il est particulièrement difficile de quantifier la diminution constatée sur les basses eaux du fait d'une qualité des données par trop insuffisante, l'examen qualitatif montre que le phénomène a également touché les faibles débits. On notera, par ailleurs, qu'aucun paramètre physique, type relief, ne semble avoir réellement joué un rôle modérateur au regard des diminutions constatées des valeurs des variables étudiées.

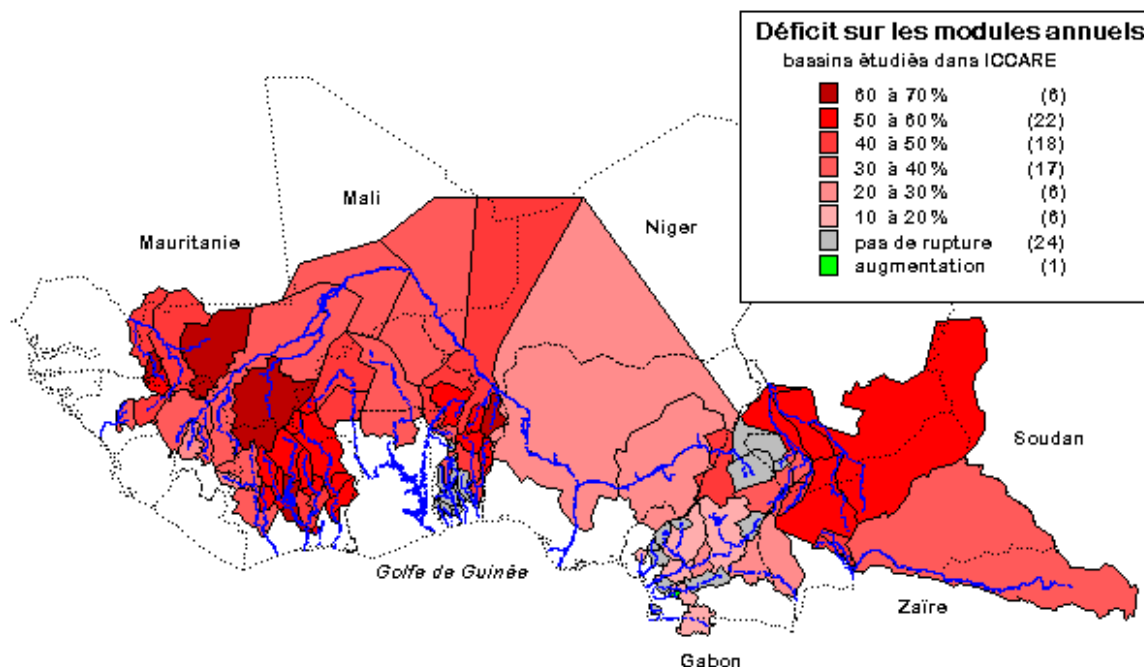


Figure 4 : Afrique de l'Ouest et Centrale – estimation des déficits des modules annuels

Comme pour la pluviométrie, le phénomène est hétérogène au sens où son intensité est variable dans l'espace. Si d'une manière générale, on note que les régions tropicales ont été plus sévèrement touchées que les régions équatoriales, on relèvera également que, au Togo, au Bénin et au Cameroun, les modifications enregistrées sont beaucoup plus faibles que sur le reste de la zone étudiée. Cette constatation est parfaitement conforme à ce qui avait été observé en matière de pluviométrie. Ces trois pays présentent, en effet, une baisse des précipitations généralement inférieure à ce qu'elle est partout ailleurs.

La variabilité constatée au niveau de la pluviométrie a été très nettement accentuée en ce qui concerne les débits. Si l'on compare les précipitations annuelles aux modules, représentatifs des volumes écoulés annuels, on constate que l'on passe d'une diminution de l'ordre de 20 à 25%, en moyenne, à des valeurs beaucoup plus importantes puisque généralement supérieures à 30% et fréquemment comprises entre 40 et 60%. L'effet amplificateur au niveau du débit est donc tout à fait considérable. Il est le fait d'un signal lissé et intégrateur de nombreuses caractéristiques des bassins versants : ruissellement, infiltration, type de végétation, présence et importance de nappes phréatiques, ...

Comme les déficits enregistrés sur les écoulements sont beaucoup plus forts que ceux des pluies, on peut être amené à penser que les niveaux des nappes ont également fortement baissé. L'étude des tarissements le montre assez nettement. Les coefficients de tarissement ont fortement augmenté mais souvent quelques années après les changements mis en évidence sur les modules. Cela traduit probablement une réduction des aquifères en extension et une baisse importante de leurs niveaux piézométriques.

Les études réalisées sur les paramètres de forme montrent que si, dans certains cas, les hydrogrammes de crue apparaissent désormais plus courts et les pointes de crue plus aplaties, il est cependant difficile d'affirmer que la forme des crues ait réellement changé.

### Volet modélisation

[références bibliographiques : RS-i 03-2 ; RS-ni 98-2 ; C-ci 98-4 ; C-cn 95-2, 96-2, 99-2, 00-1 ; P-cn 95-1]

### [DEA M. OUEDRAOGO – Université de Montpellier II]

Suite aux résultats précédents obtenus, à savoir, globalement, une diminution souvent nette de la pluviométrie et plus encore des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale, on s'interroge quant aux modifications qu'a pu subir la dynamique des processus hydrologiques. Les données disponibles couvrent des périodes de durées de 30 à 40 ans pour la majorité des bassins versants traités dans le volet écoulement. Des analyses ont été effectuées testant l'hypothèse de stationnarité des séries chronologiques de pluie, de débit et de coefficients d'écoulement pour 21 bassins versants répartis sur la zone d'étude. Des « ruptures » ont été détectées sur l'une et/ou l'autre des séries pour 15 de ces bassins qui ont fait l'objet de l'étude statistique suivante.

Cette étude a trait à l'estimation de paramètres de modèles non linéaires et propose la construction d'une « région de confiance » des paramètres, dans le cas de modèles non linéaires, calculée pour un niveau de probabilité égal à 95% (figure 5). Les modèles VUB et GR2M, modèles globaux à réservoir, ont été testés. Les deux modèles ont répondu, globalement, de façon identique. Il semble que, sur bon nombre de bassins, les paramètres des modèles sont statistiquement significativement différents d'une période à l'autre. Sur quelques bassins, la structure des modèles retenus ne semble même plus adaptée pour représenter convenablement la liaison Pluie-Débit puisque aucun calage n'est jugé satisfaisant (tableau 1).

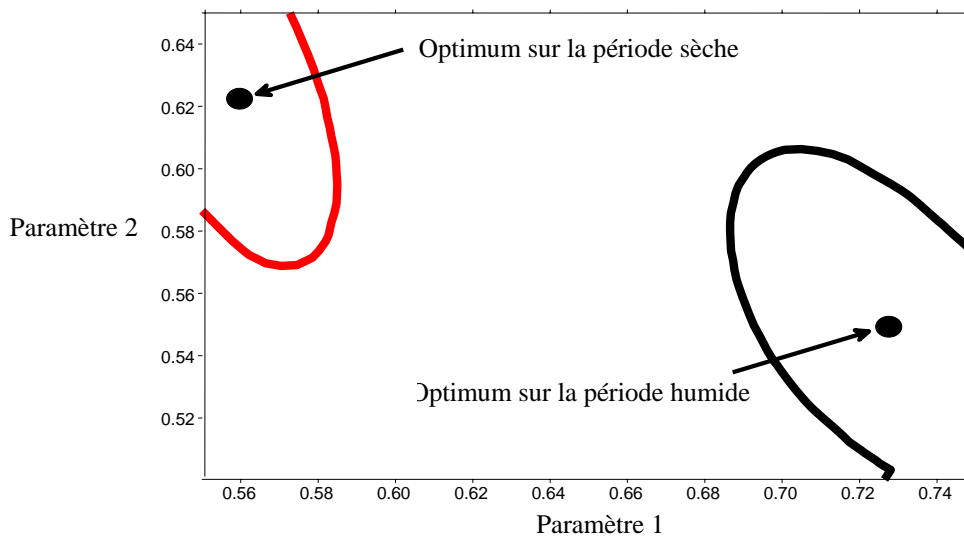


Figure 5 : exemple de « régions de confiance » à 95% pour la Leraba à Yendere

| Nom du bassin      | Avant Rupture / Après rupture |                       |
|--------------------|-------------------------------|-----------------------|
|                    | GR2M                          | VUB                   |
| <i>Comoé</i>       |                               |                       |
| Yendere            | modification                  | modification          |
| <i>Congo-Zaïre</i> |                               |                       |
| Boali Poste        | modification possible         | modification possible |
| <i>Couffo</i>      |                               |                       |
| Lanhounta          | pas de modification           | pas de modification   |
| <i>Lac Tchad</i>   |                               |                       |
| Ouli Bangala       | modification possible (*)     | modification (**)     |
| Bologo             |                               | modification (**)     |
| Tchoa              | modification (**)             | modification (**)     |
| <i>Mono</i>        |                               |                       |
| Dotaikope          | modification                  | modification          |
| Paratao            | modification                  | modification          |
| <i>Niger</i>       |                               |                       |
| Iradougou          | modification                  | modification possible |
| <i>Sanaga</i>      |                               |                       |
| Pont de Magba      | modification                  | modification          |
| <i>Sassandra</i>   |                               |                       |
| Bafingdala         | modification possible         |                       |
| <i>Volta</i>       |                               |                       |
| Lama Kara          | modification possible         | pas de modification   |
| Samandeni          | modification (**)             | modification (**)     |

(\*) région de confiance à 99%

(\*\*) calage impossible

Tableau 1 : Afrique de l'Ouest et Centrale – résultats des modifications possibles de la dynamique des processus hydrologiques

Les résultats montrent que des changements ont affecté la relation Pluie-Débit. Ces changements sont dus, de façon certaine, à des entrées (Pluie) et/ou sorties (Débit) significativement différentes en terme de moyenne et/ou de répartition temporelle mais aussi, peut-être, à des mécanismes de production de l'écoulement différents. Il nous est cependant impossible de quantifier les effets de l'un par rapport aux effets de l'autre.

### Encadrements d'étudiants

Le programme ICCARE a induit 3 thèses :

- Thèse 3<sup>ème</sup> cycle de T. Brou YAO « Analyse et dynamique des précipitations en milieu forestier ivoirien »: Université de Cocody – co-encadrement (50%) – soutenue en 1997. Je développerai plus bas certains de ses résultats.
- Thèse de A. Akpa AKA « Variabilité des écoulements et conséquences sur les activités anthropiques. Cas du bassin versant du Bandama (Côte d'Ivoire) » : Université de Montpellier II – co-encadrement (33%) – soutenue en 1998.
- Thèse de M. OUEDRAOGO « Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau – Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale »: Université de Montpellier II – co-encadrement (75%) – soutenue en 2001. Le travail de Mahaman nous a permis de faire la transition entre le programme ICCARE et le programme VAHYNE. Je développerai plus bas certains de ses résultats.

Les 2 derniers avaient également effectué à l'antenne hydrologique d'Abidjan leurs projets de fin d'études d'élèves-ingénieurs de l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics de Yamoussoukro. Ils ont poursuivi par un DEA à Montpellier sur des thématiques de recherche qu'ils ont développé au cours de leurs travaux de thèses.

Le programme ICCARE a induit également l'encadrement de différents stagiaires qui ont été chargés de développer certains résultats obtenus :

- Elèves-ingénieurs : K. MARTIN (ENSTP), A. VASSILIADIS (ENGREF)
- Etudiants de l'INSET de Yamoussoukro (niveau IUT informatique)
- Elèves-ingénieurs de l'ISIM (départements Eau et Informatique) et de l'EPSI Montpellier : C. BERKHOFF, M.O. DELATTRE, B. KIESSLICH, B. UZEL

### Travaux associés

Les travaux menés dans le cadre du programme ICCARE ont été accompagnés parfois de certaines « explorations » dans des directions connexes. Cela a pu se faire dans le cadre de stage d'élèves-ingénieurs ou de DEA ou, plus simplement, de la curiosité personnelle.

### Variabilité climatique et écart-type

A l'occasion de la conférence en hommage à Jean Rodier, en 1995, certains interlocuteurs ont affirmé que la variabilité ne concernait pas la moyenne pluviométrique mais plutôt sa variance. Les résultats précédents montrent bien que la moyenne pluviométrique a bien changé. Mais qu'en est-il de l'écart-type ?

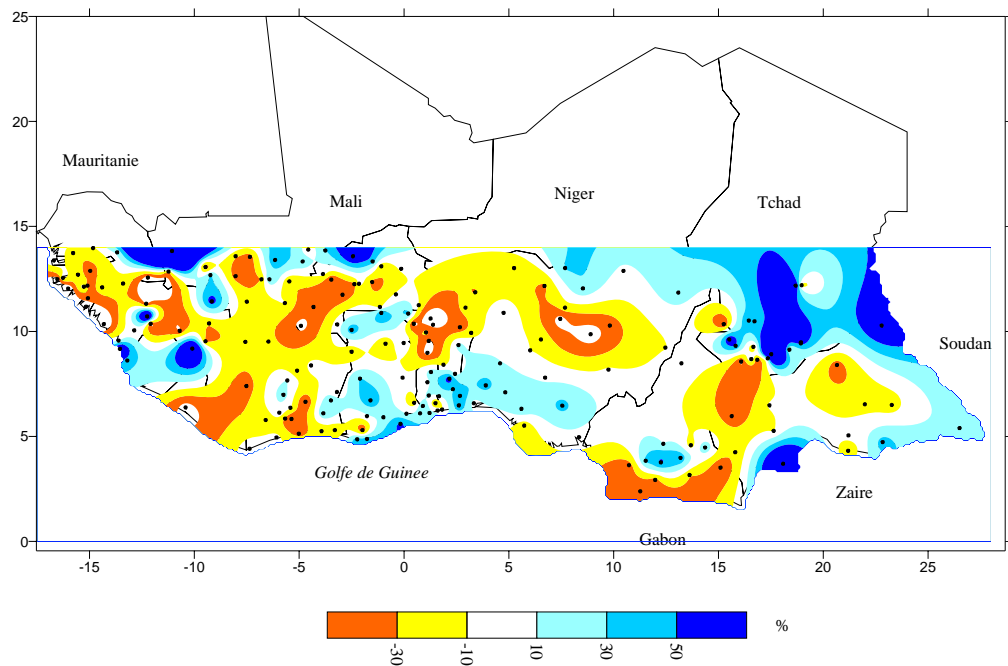


Figure 6 : Ecart relatif entre les écarts-type de la pluviométrie annuelle des périodes 1950-1969 et 1970-1989

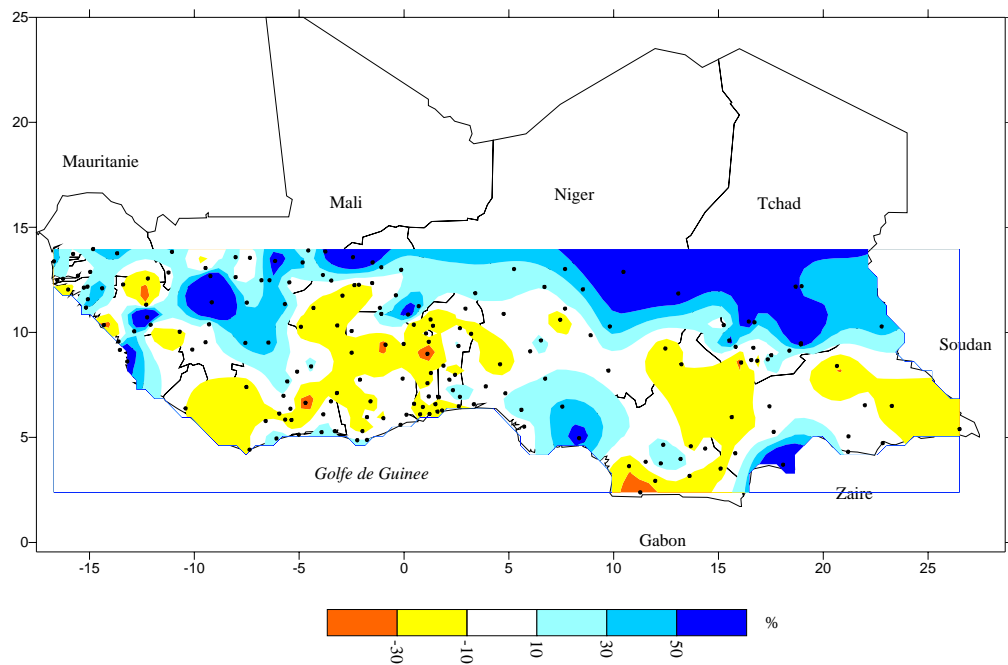


Figure 7 : Ecart relatif entre coefficients de variation de la pluviométrie annuelle des périodes 1950-1969 et 1970-1989

Les figures 6 et 7 montrent les variations relatives (resp. coefficients de variation) des écart-types observés sur les pluviométries annuelles périodes 1950-1969 et 1970-1989.

D'après la figure 6, il semble que les écart-types aient diminué. L'irrégularité interannuelle serait moins grande qu'auparavant. Par contre la figure 7 semble indiquer que le coefficient de variation n'a pas bougé. La pluviométrie annuelle et sa variabilité interannuelle semblent donc avoir évolué d'un même facteur d'échelle.

Evolution du couvert forestier ivoirien sur la période 1950-1990 en relation avec la variabilité du climat et les activités anthropiques

[références bibliographiques : RS-i 98-4 ; C-ci 98-6 ; C-cn 96-1 ; W 95-3]

[thèse de T.Y. BROU]

Le travail de thèse en Géographie de T. Brou Yao a montré un certain parallélisme entre l'évolution du couvert forestier, la variabilité du climat et les activités anthropiques dans le sud de la Côte d'Ivoire sur la période 1950-1990 : la densification et l'augmentation de la production agricole s'accompagne d'une diminution brutale du couvert forestier ; les grands mouvements migratoires de population de l'activité agricole se superposent au schéma de l'évolution de la pluviométrie ; le déplacement de la production cacaoyère et caféière suit le glissement des isohyètes.

Les phénomènes de déforestation, de densification de la production agricole et de diminution de la pluviométrie sont très certainement liés. Mais les liens de cause à effet ne sont pas tous clairement discernables.

Analyse au Burkina d'autres paramètres climatiques

[références bibliographiques : RS-ni 02-1 ; P-ci 02-1]

Cinquante années de mesures climatiques ont permis de définir quelques caractéristiques de l'évolution du climat du Burkina Faso. Comme dans tous les pays tropicaux, c'est la pluviométrie qui donne la meilleure image de l'analyse du climat. La pluviométrie a fortement diminué au cours des décennies 1970 et 1980. Au cours de la décennie 1990, elle a augmentée tout en restant inférieure à ce qu'elle avait été en 1950 ou 1960 : la décennie 1990 apparaît comme une décennie « moyenne » de la période

1950-1999. La pluviométrie du mois de septembre diminue significativement. Cette diminution des pluviométries annuelle et mensuelle s'accompagne d'une diminution du nombre annuel de jours de pluie : les jours pluvieux de l'ordre de 10 à 50 mm/j diminuent significativement.

Les températures conditionnent également le climat d'une région. Au Burkina Faso, l'amplitude thermique diurne a diminué de près d'1°C en moyenne et ce phénomène se poursuit. C'est la température minimale journalière qui a augmenté alors que la température maximale journalière reste inchangée. Cela peut être lié à une augmentation de l'insolation mais qui a cessé après la fin de la décennie 1970.

L'évapotranspiration potentielle n'a pas significativement varié. Cette variable demande d'ailleurs des travaux plus approfondis car la formulation de Penman que la Météorologie Nationale du Burkina Faso utilise n'a jamais été réactualisée et recalée alors que des paramètres comme l'albédo ont très certainement évolué en raison de la modification de l'environnement.

**Une appréciation des changements climatiques qu'a connu l'Afrique de l'ouest et centrale au XXème siècle**

**[références bibliographiques : RS-i 05-7 ; W 03-3, 04-3, 04-4]**

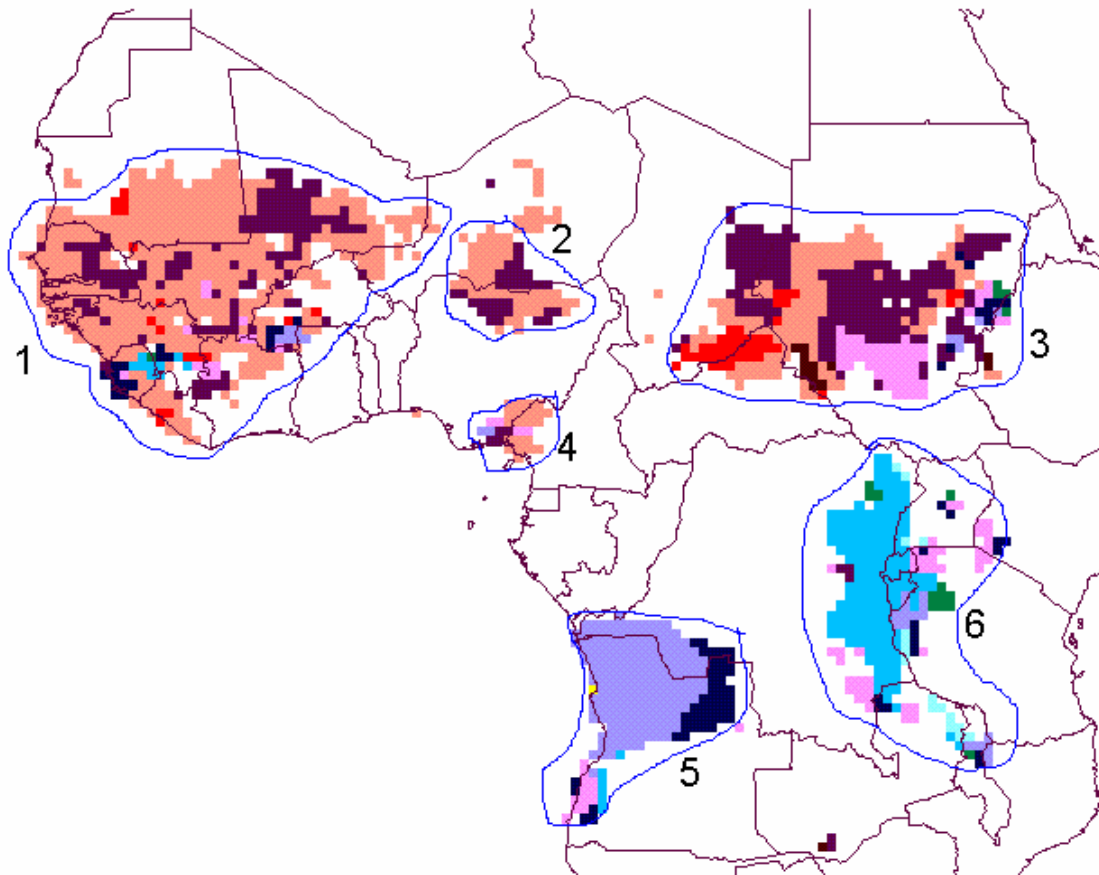
A la fin du programme ICCARE, un important travail de collecte de données climatiques et environnementales s'est poursuivi, avec un double objectif :

- compléter et mettre à jour un Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisation (SIEREM) mis en place par notre équipe,
- permettre une mise à jour régulière des résultats du programme ICCARE.

Des grilles de pluviométrie mensuelle « IRD » de résolution ½ degré carré ont été réalisées sur une zone qui couvre en partie ou en totalité 23 pays. Les limites de la grille produite sont approximativement : 5S → 20N de latitude et 18W → 21E de longitude.

Parallèlement, nous avons pu obtenir de la « Climate Research Unit (CRU) of University of East Anglia » une grille de pluie (résolution au ½ degré carré) qui couvre le siècle dernier et a une emprise plus grande que la grille IRD : la fenêtre retenue est la suivante : 20S → 20N de latitude et 18W → 36E de longitude.

- La grille « IRD » se base sur un nombre plus important de postes pluviométriques, ce qui permet une spatialisation plus fine de la pluviométrie.
- Cependant les tendances générales, temporelles comme spatiales, sont respectées : les tests de détection de rupture (test de Pettitt et segmentation) ont été appliqués sur chacune de ces grilles et aboutissent aux mêmes résultats.
- De ces résultats, il ressort que l'Afrique de l'Ouest et Centrale au cours du siècle dernier a connu des alternances de saisons sèches et humides qui ont eu une ampleur spatiale et temporelle très variable. Au nord de l'équateur, les changements climatiques les plus nets sont des sécheresses alors qu'au sud de l'équateur, ce sont des épisodes plus humides (figure 8).



| Zones de rupture | Période de rupture | Variation relative |
|------------------|--------------------|--------------------|
| 1, 2, 3 et 4     | 1967-1971          | -19 %              |
| 5                | 1941-1945          | +15 %              |
| 6                | 1929-1935          | +12 %              |

Figure 8 : zonation et nature des changements climatiques principaux observés en Afrique de l'Ouest et Centrale au cours du XXème siècle

### Principales références bibliographiques

Ces références bibliographiques résument bien l'ensemble du travail accompli et les principaux résultats obtenus.

**RS-i 97-1** : Servat E, Paturol JE, Lubes H, Kouame B, Ouedraogo M, Masson JM. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea - Part one : detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. Journal of Hydrology, 1997, 191 : 1-15

**RS-i 97-2** : Paturol JE, Servat E, Kouame B, Lubes H, Ouedraogo M, Masson JM. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea - Part two : an integrated regional approach. Journal of Hydrology, 1997, 191 : 16-36

**RS-i 97-5** : Paturol JE, Servat E, Lubes-Niel H, Delattre MO. Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. CRAS - Series IIA - Earth and Planetary Science, Volume 325, Issue 10, November 1997, Pages 779-782

**C-ci 98-5** : Servat E, Paturel JE, Kouamé B, Travaglio M, Ouedraogo M, Boyer JF, Lubès-Niel H, Fritsch JM, Masson JM, Marieu B. Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. 'Abidjan '98' *proc.*, Abidjan, Côte d'Ivoire, 16-19 Novembre 1998, IAHS Publ. n° 252

**RS-i 03-2** : Lubes-Niel H, Paturel JE, Servat E. Study of parameter stability of a lumped hydrologic model in a context of climatic variability. *Journal of Hydrology*, 2003, 278 : 213-230

## **Commentaires**

### Sur les données utilisées

*Jusqu'au désengagement progressif de l'ORSTOM-IRD des services gestionnaires de réseaux de mesures, les données recueillies étaient régulièrement critiquées et corrigées. Depuis, ces services n'ont pu que très rarement accomplir ces tâches. Ils ont rarement été bien aidés par leur gouvernement qui n'a pas jugé utile de leur accorder des crédits suffisants pour fonctionner et travailler correctement (tout comme les bailleurs de fonds d'ailleurs). Cela a une incidence sur la qualité et la quantité des données dont on peut disposer depuis, grosso modo, 1980. Au cours de nos travaux, des critiques de données (voire des compléments) ont pu être effectuées mais elles n'ont probablement pas eu la rigueur du travail des « anciens » : nous n'avions pas à notre disposition l'information brute, le limnigramme ou le carnet de relevés de l'opérateur. L'incertitude que l'on a sur les données utilisées est donc importante mais il faut faire avec !*

### Sur les manifestations de ce phénomène climatique

*Si les causes premières d'apparition de cette baisse de la pluviométrie et de ses conséquences restent, à l'heure actuelle, difficilement explicables, certaines activités humaines ont, sans aucun doute, contribué à accentuer le phénomène. En effet, si la déforestation ne peut pas être tenue comme cause principale de la sécheresse, la surexploitation de la forêt dans bon nombre de régions bordant l'Océan Atlantique et le Golfe de Guinée a très certainement participé à accroître les déficits pluviométriques. Il me semble également raisonnable de s'interroger sur l'éventuel impact qu'a pu avoir le Barrage d'Akosombo sur le fleuve Volta lors de sa construction au milieu des années 60. Ses dimensions gigantesques (400 Km de long, 25 Km de large, 8500 Km<sup>2</sup> de surface, 148 Km<sup>3</sup> en volume) me laissent à penser qu'un tel ouvrage ne peut avoir eu qu'une influence sur le cycle hydrologique de la région.*

*Un travail effectué par un élève-ingénieur a montré qu'il n'y avait pas de corrélations entre les épisodes secs survenus au cours du siècle et le phénomène « El Nino-La Nina ». Seuls, les événements très forts (par exemple 1983-1984) semblent être liés.*

*La manifestation de ce phénomène climatique s'observe non seulement sur les données climatiques mais aussi sur les paysages (sol, faune, végétation, ...). Un travail, encore incomplet, a été mené à partir d'images d'indices de végétation (NDVI) fournies en format HRPT via le senseur AVHRR du satellite NOAA. La végétation, en particulier en milieu sahélien, répond fortement et presque instantanément à la pluie et les indices NDVI devraient pouvoir être de bons indicateurs du suivi de la végétation et du sol et, donc, des impacts climatiques et anthropiques sur le milieu environnemental [DEA P. DIELO – Université de Montpellier II].*

### Sur l'établissement d'une base de données et d'outils y afférents

#### **[références bibliographiques : C-ci 94-1, 94-2, 95-1 ; C-cn 95-4]**

*L'utilisation d'un nombre important de données a nécessité la mise en place d'une base de données régionale qui, dans un premier temps, s'est limitée à des données hydroclimatiques ponctuelles. Rapidement, cela a été jugé insuffisant et est alors née l'idée de monter un système d'information environnementale sur les ressources en eau et leur modélisation. Ce produit qui doit nous permettre d'avoir recours à une information spatialisée pour faciliter les interprétations apparaît comme incontournable dans l'optique des recherches menées en Hydrologie Régionale.*

*L'essentiel des données à analyser sont des données pluviométriques et des données débitométriques au pas de temps mensuel. Ces données nécessitent un important travail de contrôle. Il me semble*

*souhaitable de mettre au point des outils qui permettraient ces contrôles simples. Des corrélations entre postes voisins et des analyses cartographiques pourraient servir de base à ce travail de critique. La récupération de données auprès des services nationaux, telles que des courbes Hauteur-Volume et Hauteur-Surface, courbes de remplissage de barrage, dimensions de déversoirs, ... permettraient de réaliser des bilans d'eau qui complèteraient le travail de critique. L'ensemble de ces éléments permettrait enfin de reconstituer les écoulements naturels de ces bassins parfois fortement anthropisés.*

#### Sur les méthodes statistiques utilisées et développées

*Toutes les approches univariées réalisées dans le cadre du programme ICCARE sont des outils simples et ont été choisies pour leur robustesse. Mais les résultats obtenus ponctuellement par poste et par variable, n'ont pas été toujours faciles à interpréter dans leur ensemble ni à synthétiser.*

*Une analyse spatio-temporelle généralisée au cas multivarié a donc été développée. Cette approche tridimensionnelle doit permettre d'une part de détecter des ruptures climatiques caractérisées par plusieurs variables pluviométriques et d'autre part de répartir spatialement les postes ayant subi des changements similaires sur une période commune.*

*On saisit toute l'importance que peut avoir un tel outil dans le contexte de changement climatique que l'on observe sur l'ensemble de la planète. Un travail plus complet devra être entrepris pour améliorer la méthode, mieux analyser les résultats que l'on peut obtenir et rendre l'outil plus accessible.*

#### Sur la prise en compte de l'anthropisation du milieu

**[référence bibliographique : C-ci 99-1]**

**[Thèse de A.A. AKA]**

*On notera qu'il n'a pas été aisé d'entreprendre le programme ICCARE sans prendre en considération l'influence des activités humaines sur les écoulements et sur le milieu, en général. C'est, en effet, au moment où survenait ce phénomène climatique que bons nombres d'aménagements ont été réalisés sur les différents cours d'eau d'Afrique. Les exemples de déforestation et d'aménagements d'ouvrages hydrauliques comme des barrages contribuent à modifier les caractéristiques de l'écoulement. Les conditions de ruissellement et d'infiltration s'en trouvent, alors, profondément modifiées, et ce de façon parfois irréversible. Les travaux qui ont fait suite aux résultats d'ICCARE se sont attachés à prendre en compte les impacts du climat et de l'activité humaine sur la disponibilité des ressources en eau.*

#### Sur la finalité de nos travaux

*Ces différents résultats ont, bien entendu, de préoccupantes répercussions sur la ressource en eau et son utilisation. Dans les régions les plus au nord, voire dans les régions sahéliennes, les problèmes peuvent se révéler dramatiques du fait d'une ressource naturellement rare et qui devient plus précieuse encore. Tout doit être entrepris pour atteindre une gestion optimale de l'eau disponible. Retenues, adduction d'eau potable, irrigation, ... tous ces usages de l'eau doivent faire l'objet d'une approche intégrée permettant d'exploiter la ressource avec parcimonie et efficacité. Dans les régions plus au sud, l'eau ne manque pas, même si elle est moins abondante qu'elle ne l'était. Mais tous les aménagements entrepris doivent tenir compte de la diminution importante des quantités mobilisables. Faute de quoi, on risque de se heurter à de très sérieux problèmes de fonctionnement et de rentabilité des ouvrages et des systèmes aménagés mis en place. Sans compter que des prélèvements inconséquents, résultats d'une exploitation des ressources réellement disponibles mal réévaluées, auraient, à n'en pas douter, de sérieuses répercussions dans le domaine de l'environnement. Or celui-ci est déjà considérablement fragilisé du fait d'une pression démographique intense dans de nombreuses régions, d'une déforestation excessive et d'une mise en culture qui modifie beaucoup des équilibres préexistants.*

### Objectifs du programme VAHYNE

A l'aube du XXI<sup>ème</sup> siècle, la question sensible concernant les réserves en eau douce et la manière d'en optimiser l'utilisation à l'avenir apparaît désormais incontournable et récurrente, comme l'ont montré diverses conférences ces dernières années (Dublin, Paris, Abidjan, Johannesburg, Kyoto, ...).

Cet intérêt va, aujourd'hui, de pair avec celui qui est manifesté depuis plus d'une trentaine d'années pour l'étude du climat et de sa variabilité, compte tenu des conséquences parfois dramatiques que celle-ci peut entraîner, quelle que soit la région de la planète considérée. Les implications de cette variabilité sur celle des ressources en eau sont particulièrement fortes, et les répercussions de celle-ci touchent, à leur tour, de très nombreux secteurs d'activité : agriculture, énergie, santé, alimentation en eau potable, navigation, ... Ceci est d'autant plus vrai dans les régions tropicales, généralement fragilisées d'un point de vue environnemental (forte pression anthropique, déforestation, dégradation des sols, ...), et pour lesquelles, compte tenu des impératifs de développement, les sollicitations qui s'exercent sur le milieu sont fortes et continues.

L'étude de la variabilité hydrologique qui résulte de cette variabilité du climat, et le développement d'une modélisation pertinente de la relation pluie-débit, qui permette d'en rendre compte, afin d'évaluer l'impact de différents scénarii sur la gestion des ressources en eau, constituent donc le projet de recherches sur lequel nous travaillons actuellement. Il concerne prioritairement des bassins versants de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de Km<sup>2</sup>, échelle de la planification et de l'action en matière de ressources en eau.

Deux objectifs scientifiques étroitement liés sont principalement affichés :

- Modéliser la production des ressources en eau à l'échelle des bassins versants de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de Km<sup>2</sup> ou de grandes unités géographiques.
- Lier la relation pluie-débit à la variabilité du climat pour pouvoir tester différents scénarios de production des ressources en eau.

L'objectif ultime est donc d'apporter des éléments précis de connaissance quant aux manifestations de la variabilité du climat et à leur lien avec la variabilité des ressources en eau. Ceci doit déboucher sur l'élaboration et la mise en œuvre de scénarii permettant l'estimation et la gestion durable des ressources en eau, dans un contexte de recherche permanente d'équilibre entre, d'une part, la pression anthropique qui s'exerce sur les milieux et, d'autre part, les contraintes naturelles et sociétales qu'il convient de prendre en compte.

### Outil et méthodes développés

L'étude des impacts de la variabilité climatique sur les régimes hydrologiques est primordiale pour planifier la gestion de l'eau à grande échelle, particulièrement dans les pays dont le développement en dépend, comme ceux de l'Afrique de l'Ouest. Dans cette optique, une chaîne de modélisation « spatialisée » pluie-débit, à un pas de temps mensuel, a été mise en place (figure 9). Elle a pour objet de simuler les écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale non seulement de nos jours, mais également dans les décennies à venir. Elle se base sur plusieurs modèles conceptuels, GR2M, modèle de Yates et Water Balance Model (WBM). Ces modèles font appel :

- en entrée, à des données pluviométriques, d'évapotranspiration potentielle et une donnée reliée au type de sol et de végétation du bassin versant, qui est proche d'une capacité de rétention en eau du sol,
- en sortie, à une donnée de débit.

Ce sont les données d'entrée qui sont spatialisées lors de la mise en œuvre de ces algorithmes. Nous disposons de plusieurs jeux de grilles de données sur l'Afrique de l'Ouest.

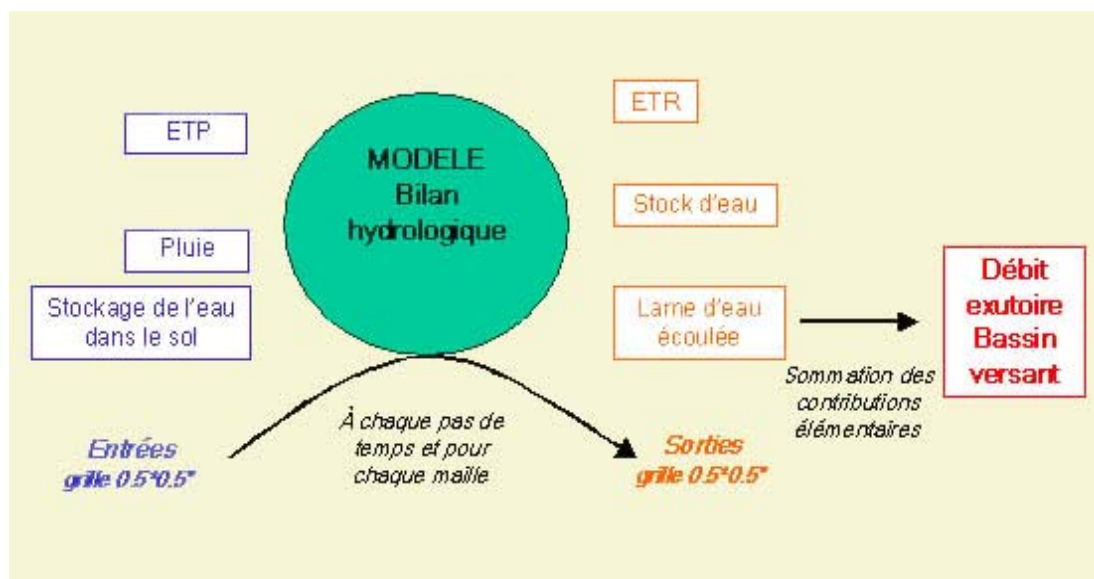


Figure 9 : représentation schématique de la chaîne de modélisation

## Principaux résultats

### Un résultat paradoxal au Sahel

[références bibliographiques : RS-i 05-1 ; C-ci 02-1, 03-1 ; C-cn 02-2]

En poursuivant les travaux d'analyse de données hydropluviométriques au Burkina Faso, nous avons observé une situation paradoxale : en dépit d'une diminution de la pluviométrie annuelle et mensuelle, les écoulements ont augmenté dans les régions sahéniennes, même sur des bassins d'une taille relativement importante : sur le Nakambé à Wayen (# 21 000 km<sup>2</sup>), on observe un doublement du coefficient de ruissellement annuel. Ce résultat avait déjà été observé dès les années 80 par les hydrologues de l'ORSTOM mais ils le limitaient aux têtes de bassin de cette région.

Parallèlement, des travaux de collègues sur la région de Niamey montraient une augmentation du niveau des nappes et l'apparition de nouvelles mares. Une recherche bibliographique plus approfondie a révélé que ce même type de résultats avait été observé en Guinée, au Mali et au Nigeria.

Le lien supposé entre ces 2 résultats est la dégradation des états de surface, provoquée principalement par les activités croissantes des populations mais probablement aussi par la variabilité climatique qui induit une augmentation du ruissellement, même si, paradoxalement, les pluies diminuent. Les augmentations d'écoulement s'observent au nord de l'isohyète 700 mm et leur amplitude est reliée, en partie, au niveau des activités agricoles. Au sud de cette isohyète la variabilité des écoulements suit celle des pluies, avec une zone de transition où la variabilité des écoulements mensuels montre les deux influences : depuis 1970, une augmentation jusqu'en août, puis une diminution en fin de saison des pluies.

Ce résultat nous a incité à développer des travaux couplant climat – environnement - homme qui serviront de base aux projets de recherche à venir.

### Influence des données utilisées et de leur spatialisation sur la performance des modèles [références bibliographiques : RS-i 03-3, 05-4, 05-5 ; RS-ni 02-3 ; C-ci 01-1, 02-5 ; W 02-1]

On s'intéresse à l'influence de la spatialisation des données sur la performance des modèles, compte tenu du fait que la Climate Research Unit de l'University of East Anglia a mis à notre disposition une importante banque de données climatiques. Cette application a concerné deux modèles pluie-débit que l'on souhaite utiliser dans VAHYNE : GR2M et WBM, modèles hydrologiques globaux, pouvant intégrer une information spatialisée, et travaillant au pas de temps mensuel.

A partir des données de pluies disponibles sur près de 300 postes (données CRU et IRD) qui couvrent la zone étudiée, il a été possible de construire trois grilles de précipitations. Les modes de sélection des postes pluviométriques (et donc leur densité) et les méthodes de spatialisation de cette information n'ont pas été les mêmes et ont abouti à des grilles de pluie mensuelles statistiquement significativement différentes les unes des autres (application du test de Student).

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%.

En fonction des grilles de pluie utilisées, cela entraîne des biais importants au niveau des débits simulés, de l'ordre de 30 à 60%.

D'après les essais de modélisation effectués, selon que l'on se trouve en calage ou en validation, les résultats ne sont pas les mêmes. Mais d'une manière générale, le critère « quantité d'information » ne semble pas toujours suffisant pour faire un choix de grille : la grille de pluie obtenue à partir de la plus grande quantité d'information, donc « a priori plus juste », ne donne pas nécessairement les meilleurs résultats en simulation d'écoulement (critère de Nash).

Trois grilles d'évapotranspiration potentielle (ETP) ont été obtenues en appliquant des formulations distinctes d'estimation empirique de l'ETP et la même méthode d'interpolation. Ces grilles sont sensiblement et significativement différentes les unes des autres. Cependant les résultats obtenus en simulation d'écoulement donnent des valeurs de critère d'adéquation (Nash) très proches les uns des autres. Une étude menée auparavant sur l'analyse de la sensibilité des algorithmes de type GR [RS-i 95-1] avait déjà montré que ces modèles étaient peu sensibles à l'entrée ETP ; le résultat obtenu le confirme. Toutefois, si une seule formulation devrait être choisie, celle de « Penman-Monteith » semblerait la mieux convenir aux bassins versants d'Afrique de l'Ouest et Centrale en fonction des modèles choisis.

Cinq grilles de données Sol ont été utilisées. Les 4 premières, variantes de la grille « sol FAO » (fournie par la FAO), sont basées sur des concepts hydrologiques alors que la dernière, la grille « sol CRU » (fournie par le CRU) repose sur des concepts hydrologiques et agronomiques. La déclinaison de grille « sol FAO » qui comporte les valeurs les plus élevées de capacité de rétention en eau (WHC FAOmax) donne très nettement les meilleurs résultats, quels que soient les modèles et les bassins versants choisis. Là encore, la grille « a priori la plus juste » ne donne pas les meilleurs résultats.

Parmi les modèles, le modèle GR2M semble être plus robuste que l'algorithme WBM et adapté au contexte ouest africain : il se cale et se valide généralement mieux.

Ces premiers résultats posent clairement le problème de l'influence de la nature et de l'origine des données sur la modélisation hydrologique à grande échelle en Afrique.

**Mise en œuvre d'une procédure de modélisation mensuelle spatialisée**  
**[références bibliographiques : RS-i 05-4 ; C-ci 03-4, 03-5 ; C-cn 03-1]**

**[thèse de M.OUEDRAOGO et de S. ARDOIN]**

Les essais présentés auparavant nous ont permis de généraliser une procédure de modélisation mensuelle.

La combinaison modèle-grille « CRU, GR2M, ETP PEN (Penman-Monteith) et WHC FAOmax » a été retenue. Elle 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 zone qui se singularise, la diminution de la pluviométrie (de -19% en moyenne pour cette zone) n'entraîne pas une diminution des débits ; au contraire elle entraîne une augmentation des écoulements depuis 1970. En appliquant les autres modèles disponibles, les résultats sont aussi mauvais.

Nous avons comparé les performances du modèle GR2M dans trois cas de figure de calage/validation :

- calage avant 1970 et validation après 1971 ;
- calage après 1971 et validation avant 1970 ;
- calage sur 2/3 de la période après 1971 et validation sur le tiers suivant.

L'alternative calage/validation après 1971 semble plus robuste que les autres. Cela va dans le sens d'une modification de la relation pluie-débit depuis 1970 dans la région.

Il apparaît donc comme difficile de dégager une combinaison unique d'options de modélisation qui puisse être généralisée de façon satisfaisante à l'ensemble de notre zone d'étude qui, à terme, devrait aller du Sénégal au Tchad, d'ouest en est, et du Mali au Gabon, du nord au sud.

### Simulations d'écoulement pour différents scénarii « fictifs » de pluie

Nous avons établi des simulations d'écoulement sur 53 bassins versants d'Afrique de l'Ouest (entre 1 820 et 650 000 Km<sup>2</sup> de superficie) en définissant des scénarii fictifs de pluie. Les 6 chroniques « fictives » sont bâties à partir des chroniques de la grille de pluie du CRU entre 1922 et 1995 que l'on fait varier de +/- 10 à +/- 30%.

Les grilles de pluie, d'ETP et de sol utilisées sont les grilles Pluie-CRU, ETP-Reference Crop et Sol-FAOmax. Le modèle retenu est GR2M.

*Remarque : peu après le moment où a été effectué ce travail, il s'est avéré que la grille d'ETP utilisée « Reference Crop » était fautive. Cela n'a cependant que très peu d'influence sur les résultats obtenus. La première raison est que GR2M, tout comme les autres modèles, est très peu sensible aux données d'entrée ETP. La seconde raison est que le modèle GR2M est suffisamment robuste pour intégrer dans le calage de ses paramètres les erreurs dues à la grille ETP puisque, comme cela a été signalé plus haut, quelque soient les grilles d'ETP choisies, les résultats en simulation d'écoulement sont très proches.*

Le calage des paramètres du modèle, appliqué à chaque bassin, s'effectue sur les données disponibles entre 1971 et 1995.

Les projections de la figure 10 montrent que les changements les plus sensibles pourraient s'observer sur la zone où le modèle est le moins satisfaisant : sous la boucle du Niger. On n'en tirera donc aucun enseignement.

Ailleurs la variation des écoulements serait amplifiée par rapport à la variation de la pluie et ce, de façon plus importante si la pluviométrie augmentait. Les zones les plus arrosées potentiellement, si la répartition de la pluviométrie n'était pas modifiée, seraient les moins sensibles à une quelconque variabilité de la pluviométrie.

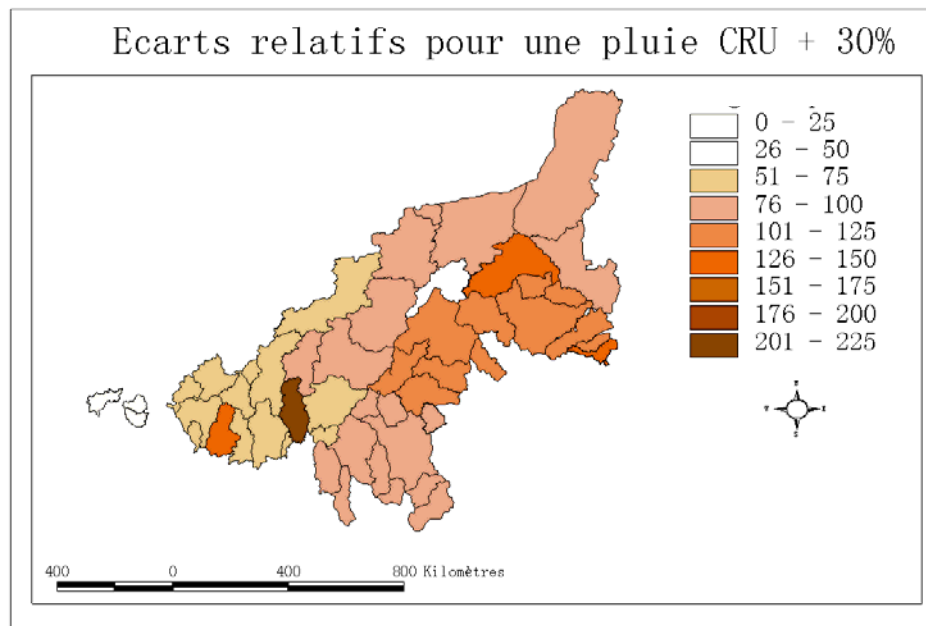
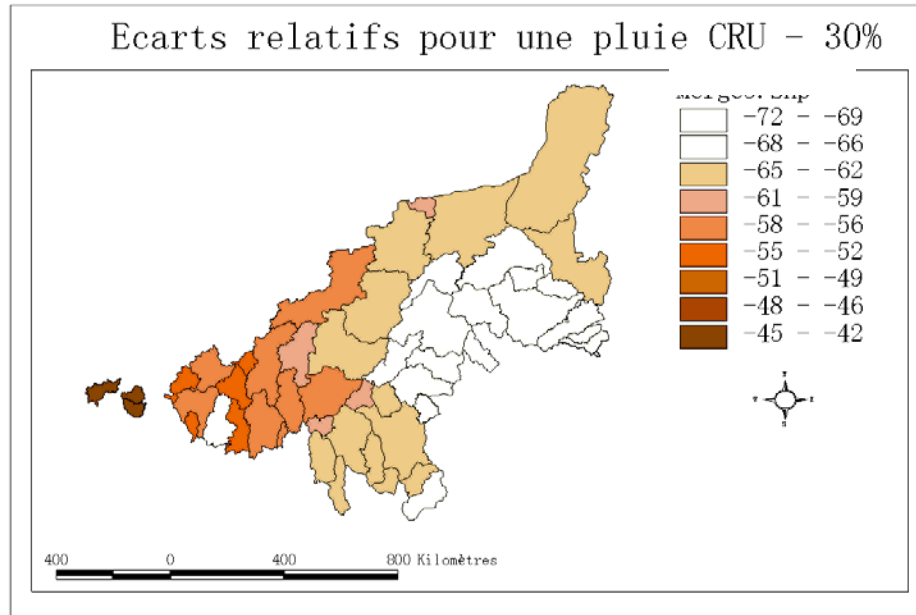
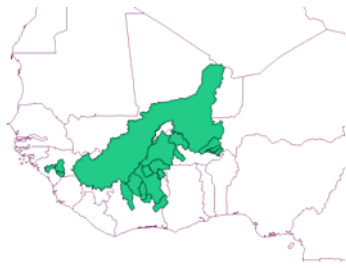


Figure 10 : Ecart relatif moyens sur les écoulements pour 2 scenarii « fictifs » de pluie

## **Encadrements d'étudiants**

Le programme VAHYNE a induit 1 thèse :

- Thèse de S. ARDOIN « Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne »: Université de Montpellier II – co-encadrement (25%) – soutenue en 2003. Les travaux de Sandra ont été menés en parallèle avec les travaux que je menais à Ouagadougou sur la même thématique mais sur un espace géographique différent.

Le programme VAHYNE a induit également l'encadrement de différents stagiaires qui ont été chargés de développer certains résultats obtenus :

- Elèves-ingénieurs : I. BOUBACAR, K. DEME, G. DIARRA, F. KONE, P. KOUKPONOU, Y. KOUWONOU, M. MANGA, S. NOGBOU, P. NONFODJI, M. OULD (Ecole Inter-etats des Ingénieurs de l'Équipement Rural de Ouagadougou)
- Stagiaires d'appui à la recherche à l'EIER (jeunes ingénieurs diplômés) : I. BOUBACAR, G. DIARRA, P. DIELO, M. HAMATTAN
- DEA de C. BARRAU : Université Paul Sabatier de Toulouse – co-encadrement (75%) - soutenu en 2003
- VCI : S. GIRARD
- Elève ENSA Rennes en année de césure : A. DRAY

## **Travaux associés**

Les travaux menés dans le cadre du programme ICCARE ont été accompagnés parfois de certaines « explorations » dans des directions connexes. Cela a pu se faire dans le cadre de stage d'élèves-ingénieurs ou de DEA ou, plus simplement, de curiosité personnelle.

## **SIEREM**

**[références bibliographiques : RS-i 05-7]**

Un point commun à tous les travaux menés au sein de notre équipe est la prise en compte d'informations spatialisées, ou le besoin d'avoir recours à une spatialisation des résultats pour en faciliter l'interprétation ou en souligner la cohérence. Ces travaux nécessitent ainsi l'accès à une base de données spatialisées sur le continent africain. Une réflexion commune à tous les membres de l'équipe a concerné la constitution d'un Système d'Information Environnementale sur les Ressources en Eau et leur Modélisation (SIEREM). Celle-ci s'intègre dans une réflexion plus large, menée au niveau de l'UMR HydroSciences, au sein de laquelle la constitution de bases de données spatialisées et de Systèmes d'Informations Environnementales apparaît comme un produit attendu incontournable des recherches en cours.

## **Impact de la variabilité climatique sur les normes hydrologiques**

**[références bibliographiques : RS-i 03-1 ; C-ci 02-2 ; W 03-2]**

**[thèse de M. OUEDRAOGO]**

La variabilité climatique a nécessairement un impact sur les normes hydrologiques. La question posée est de savoir quelles normes retenir dans les régions d'Afrique de l'Ouest et Centrale touchées, ces dernières années, par une sécheresse importante. Convient-il d'intégrer purement et simplement les années récentes dans la continuité des séries hydrologiques ou doit-on faire l'hypothèse d'une modification plus durable et ne prendre en compte que les données des années postérieures à la date de début de la sécheresse (1970 d'une manière générale)? Les résultats obtenus soulignent la complexité de la notion de norme et les conséquences que peut avoir la prise en compte, ou non, et sous une forme donnée ou pas, des années de sécheresse récente en Afrique de l'ouest.

La figure 11 présente une cartographie des normes pluviométriques calculées pour plusieurs périodes sur la zone test du projet. Les figures 12 et 13 correspondent aux écarts relatifs de « normales » pluviométriques issues de calculs réalisés sur différentes périodes. Elles soulignent ainsi les différences issues de la seule prise en compte des données récentes ou de leur intégration à des séries plus anciennes pour calculer les normes pluviométriques.

Parallèlement, en ce qui concerne les débits, le tableau 2 et la figure 14 présentent, pour des cours d'eau au Burkina Faso, au Mali et en Côte d'Ivoire, des valeurs de modules (m<sup>3</sup>/s) associés à des récurrences humides et leurs variations relatives par rapport à la période 1951-1980. Ces chiffres permettent de se rendre aisément compte des différences qui peuvent être introduites en fonction des périodes de référence retenues pour le calcul des normes hydrologiques.

Au regard de ces résultats, il s'avère que les études de prédétermination des variables hydrologiques et la non-stationnarité des séries posent un réel problème dans l'évaluation des risques. Selon l'attitude adoptée, un aménageur, un projeteur ou un gestionnaire pourront aboutir à des projets très dissemblables d'un point de vue technique et économique, tant au niveau de l'investissement que du fonctionnement.

Pour toute conception d'ouvrage, il paraîtrait sensé de se placer dans les conditions présentant un niveau de risque maximal, par essence très défavorables à son bon fonctionnement. Certains faits viennent cependant infirmer cette hypothèse (augmentation paradoxale des écoulements au Sahel) et souligner la complexité des phénomènes engendrés par la sécheresse persistante.

Les impacts de la variabilité climatique et des changements des états de surface ne peuvent pas être ignorés; sinon cela pourrait avoir des conséquences très dommageables pour la définition, la conception et la durabilité d'un projet de développement régional. D'un point de vue strictement numérique, la sécheresse modifie les données de référence et rend légitime des opérations de révision des normes hydropluviométriques.

| Bassin                  | Période de retour |                      |                      |             |                      |                      |             |                      |                      |
|-------------------------|-------------------|----------------------|----------------------|-------------|----------------------|----------------------|-------------|----------------------|----------------------|
|                         | 50 ans            |                      |                      | 100 ans     |                      |                      | 1000 ans    |                      |                      |
|                         | 51-80             | 51-97                | 71-97                | 51-80       | 51-97                | 71-97                | 51-80       | 51-97                | 71-97                |
| <b>Bandama à Bada</b>   | <b>221</b>        | <b>194</b><br>(-12%) | <b>134</b><br>(-39%) | <b>235</b>  | <b>208</b><br>(-11%) | <b>143</b><br>(-39%) | <b>273</b>  | <b>248</b><br>(-9%)  | <b>169</b><br>(-38%) |
| <b>Mouhoun à Dapola</b> | <b>192</b>        | <b>185</b><br>(-4%)  | <b>138</b><br>(-28%) | <b>202</b>  | <b>196</b><br>(-3%)  | <b>146</b><br>(-28%) | <b>233</b>  | <b>229</b><br>(-2%)  | <b>170</b><br>(-27%) |
| <b>Bani à Douna</b>     | <b>1027</b>       | <b>966</b><br>(-6%)  | <b>422</b><br>(-59%) | <b>1092</b> | <b>1036</b><br>(-5%) | <b>456</b><br>(-58%) | <b>1276</b> | <b>1235</b><br>(-3%) | <b>559</b><br>(-56%) |

Tableau 2 : Valeurs des modules de certains cours d'eau en m<sup>3</sup>/s, associés à des récurrences humides, et variations relatives par rapport à la période 1951-1980

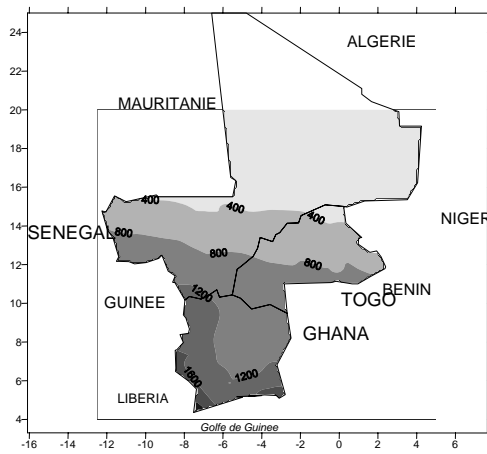
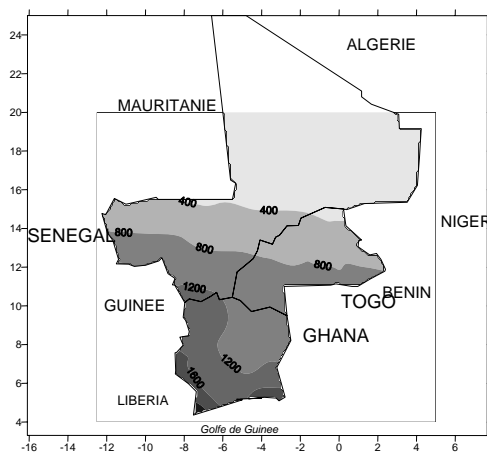
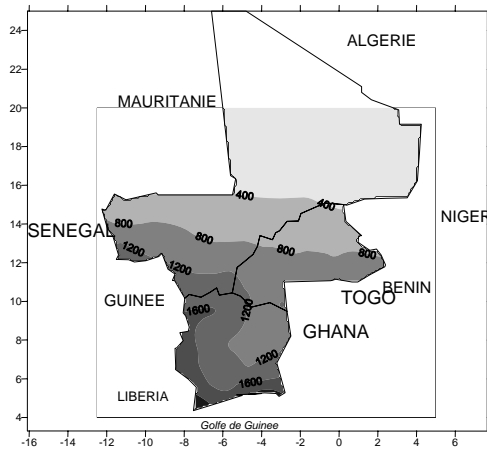


Figure 11 : Normales pluviométriques (mm) 1951-1980, 1961-1990 et 1971-1997 sur la région Côte d'Ivoire – Mali - Burkina Faso

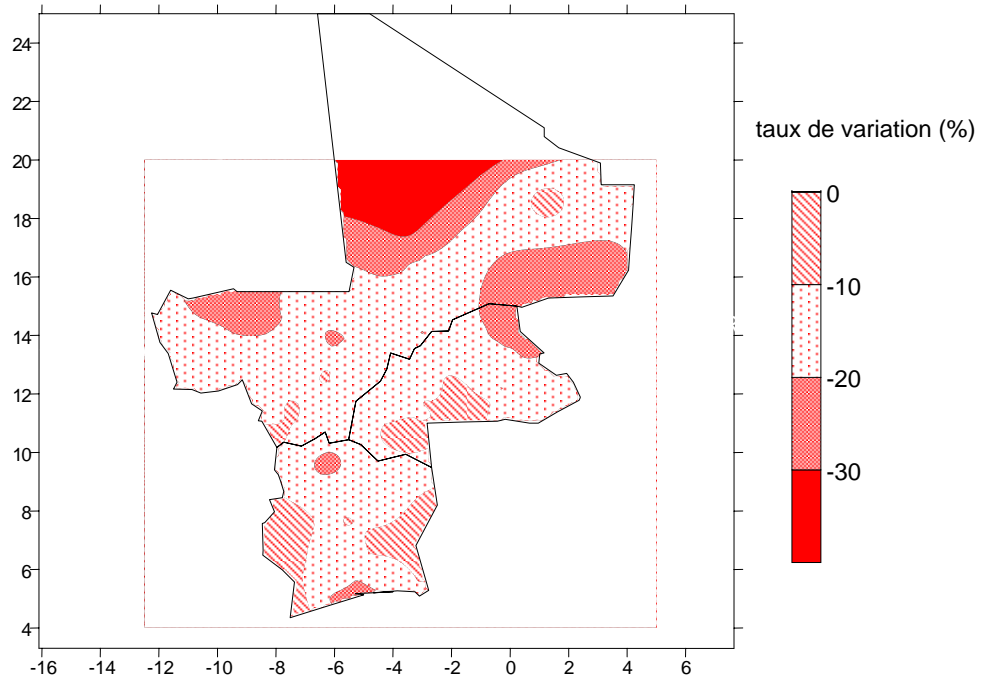


Figure 12 : Variation relative entre la normale "1971-1997" et la normale "1951-1980" sur la région Côte d'Ivoire- Mali - Burkina Faso

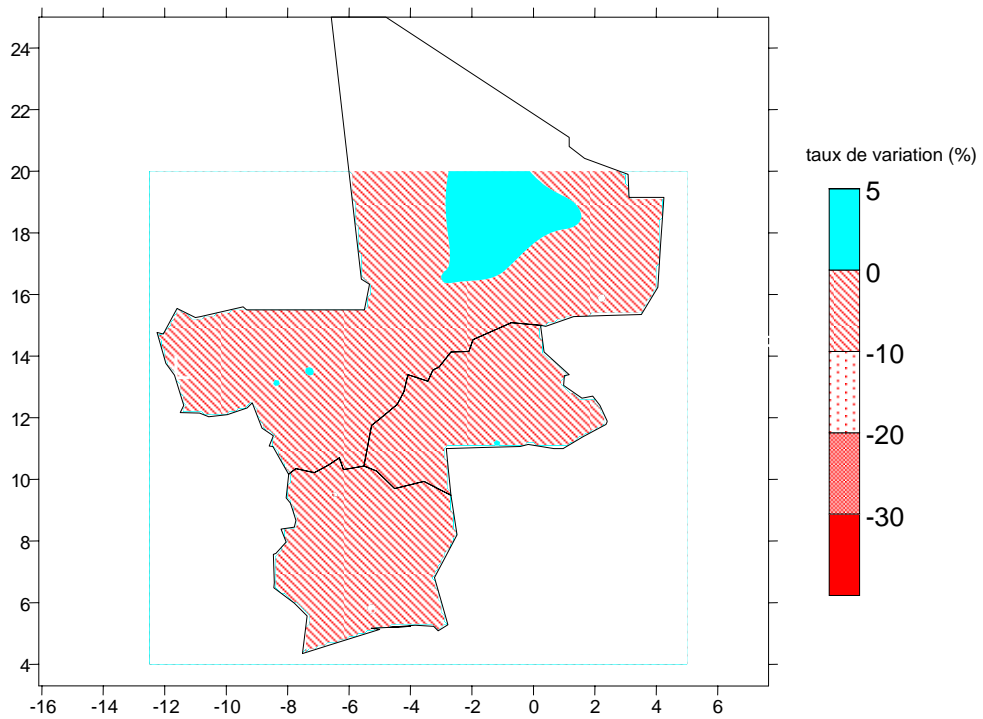


Figure 13 : Variation relative entre la normale "1950-1997" et la normale "1951-1980" sur la région Côte d'Ivoire- Mali - Burkina Faso

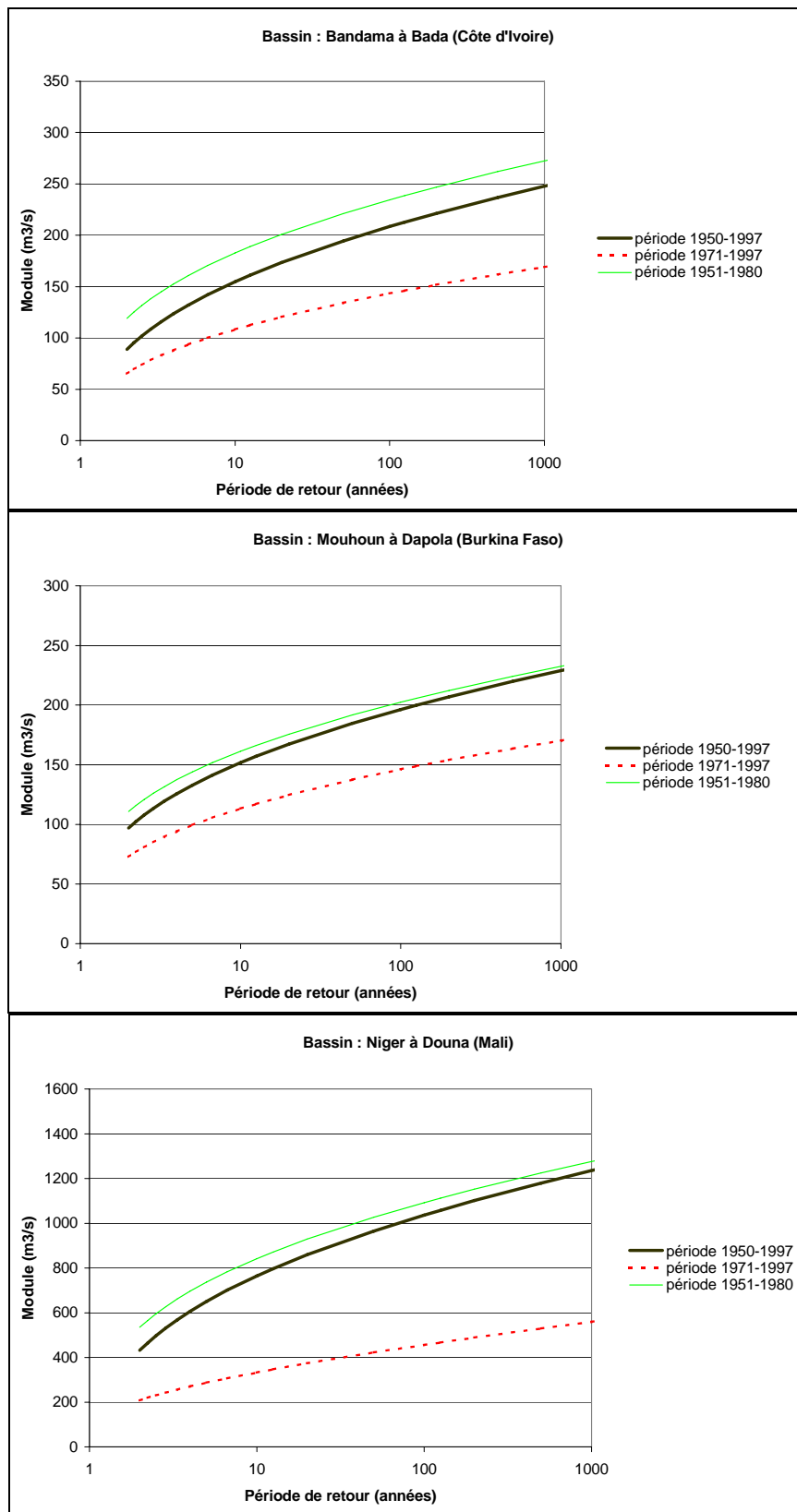


Figure 14 : Courbes d'ajustement du module en fonction des périodes de retour (récurrences humides)

Impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'ouest et Centrale - Utilisation du modèle de Yates  
[références bibliographiques : RS-i 05-6]

[DEA de C. BARRAU – ENSEIHT]

Le modèle de Yates a la particularité que 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, voire très peu. 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 (figure 15).

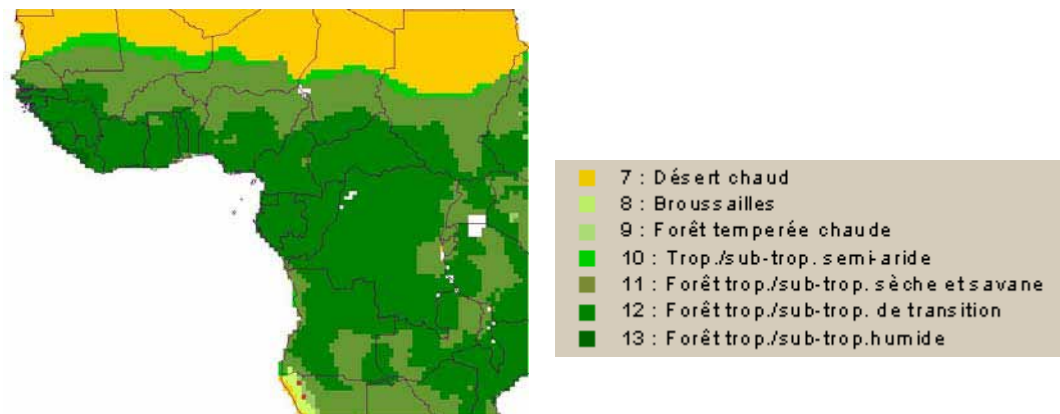


Figure 15 : Grille de végétation correspondant à un doublement de CO2 dans l'air (établie en 1990)

Le schéma de Holdridge (figure 16) associe la distribution de végétation aux variables climatiques que sont la précipitation moyenne annuelle et la bio-température moyenne annuelle (moyenne des températures moyennes mensuelles supérieure à 0°C).

Comparé aux modèles GR2M et WBM, qui ont des configurations conceptuelles très proches, sur des bassins-tests, ce modèle obtient des résultats de simulation de débit très satisfaisants. Nous avons alors décidé de régionaliser à l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest et Centrale les lames d'eau écoulées résultant du modèle de Yates sous forme de grilles de résolution 0.5°x0.5°.

Au préalable, une étude de sensibilité aux variations des données d'entrée et des valeurs des paramètres a permis de faire une première analyse du modèle : le modèle de Yates est plus sensible aux variations des données de pluie qu'à celles des données d'ETP ; il semble moins sensible aux variations des données de pluie que le modèle GR2M mais l'est plus aux variations d'ETP.

Ensuite, comme pour GR2M et WBM, nous avons testé la pertinence des jeux de données d'entrée : quelles grilles d'ETP et de végétation donnent les meilleures simulations au sens du critère de Nash ? Il apparaît très difficile de trouver une organisation géographique de ces « meilleures » grilles et le choix n'est pas simple. La grille d'ETP TO (Thom et Oliver) et la grille de végétation de la figure 15, qui représente les états possibles de la végétation liée à un doublement de la quantité de CO2 dans l'atmosphère (grille établie en 1990), semblent, donner les meilleurs résultats globalement.

Appliquée à notre zone d'étude, il en résulte différentes cartes de lame d'eau comme celles présentées sur la figure 17.

Il a aussi été possible de réaliser des cartes des lames d'eau écoulées caractérisant les écoulements futurs en considérant plusieurs scénarii climatiques qui accentuent le changement climatique observé durant les trente dernières années.

Il ressort de cette étude que les zones situées en régime tropical sont très vulnérables à une modification des données climatiques, confirmant en cela l'extrême fragilité de ces régions d'un point de vue environnemental (forte pression anthropique sur le milieu, déforestation, désertification, dégradation des sols, ...).

**Classification en 38 sous-catégories du modèle de Holdridge (1947)**

|    |                             |
|----|-----------------------------|
| 1  | Polar desert                |
| 2  | Subpolar dry tundra         |
| 3  | Subpolar moist tundra       |
| 4  | Subpolar wet tundra         |
| 5  | Subpolar rain tundra        |
| 6  | Boreal desert               |
| 7  | Boreal dry scrub            |
| 8  | Boreal moist forest         |
| 9  | Boreal wet forest           |
| 10 | Boreal rain forest          |
| 11 | Cool temperate desert       |
| 12 | Cool temperate desert scrub |
| 13 | Cool temperate steppe       |
| 14 | Cool temperate moist forest |
| 15 | Cool temperate wet forest   |
| 16 | Cool temperate rain forest  |
| 17 | Warm temperate desert       |
| 18 | Warm temperate desert scrub |
| 19 | Warm temperate thorn scrub  |
| 20 | Warm temperate dry forest   |
| 21 | Warm temperate moist forest |
| 22 | Warm temperate wet forest   |
| 23 | Warm temperate rain forest  |
| 24 | Subtropical desert          |
| 25 | Subtropical desert scrub    |
| 26 | Subtropical thorn woodland  |
| 27 | Subtropical dry forest      |
| 28 | Subtropical moist forest    |
| 29 | Subtropical wet forest      |
| 30 | Subtropical rain forest     |
| 31 | Tropical desert             |
| 32 | Tropical desert scrub       |
| 33 | Tropical thorn woodland     |
| 34 | Tropical very dry forest    |
| 35 | Tropical dry forest         |
| 36 | Tropical moist forest       |
| 37 | Tropical wet forest         |
| 38 | Tropical rain forest        |

- 1 : Tundra/polar
- 2 : Forest Tundra/Alpine
- 3 : Boreal forest
- 4 : Cool desert
- 5 : Steppe
- 6 : Temperate forest
- 7 : Hot desert
- 8 : Chaparral
- 9 : Warm temperate forest
- 10 : Semi tropical/semi arid
- 11 : Tropical dry forest
- 12 : Tropical seasonal forest
- 13 : Tropical rain forest

**Schéma de la classification climat-végétation de Holdridge utilisée par Yates**

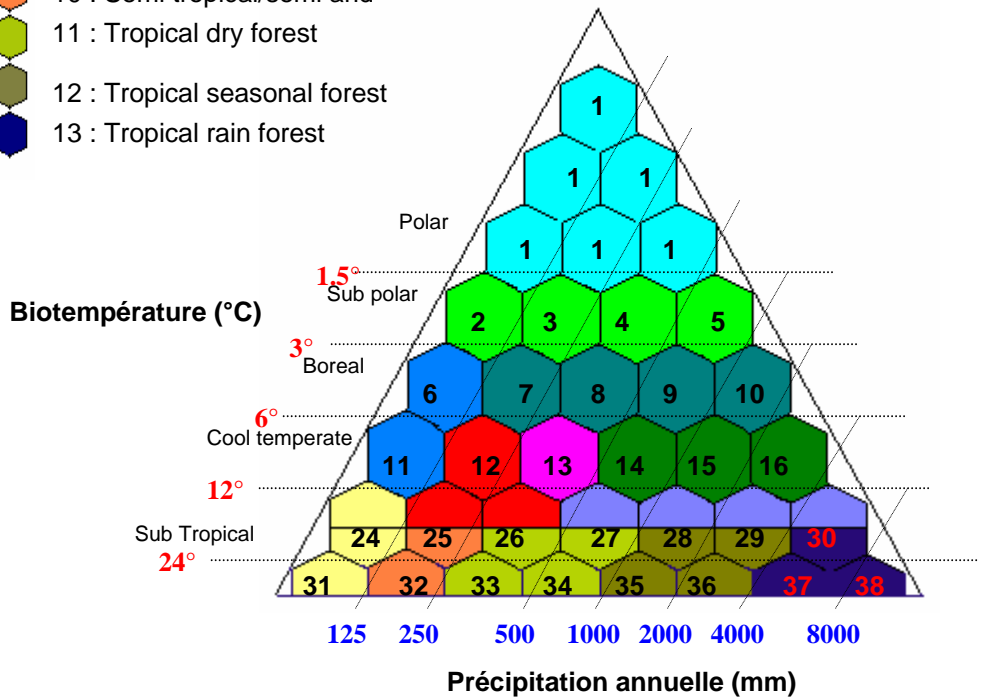


Figure 16 : Schéma de la classification « climat-végétation » de Holdridge utilisée par Yates

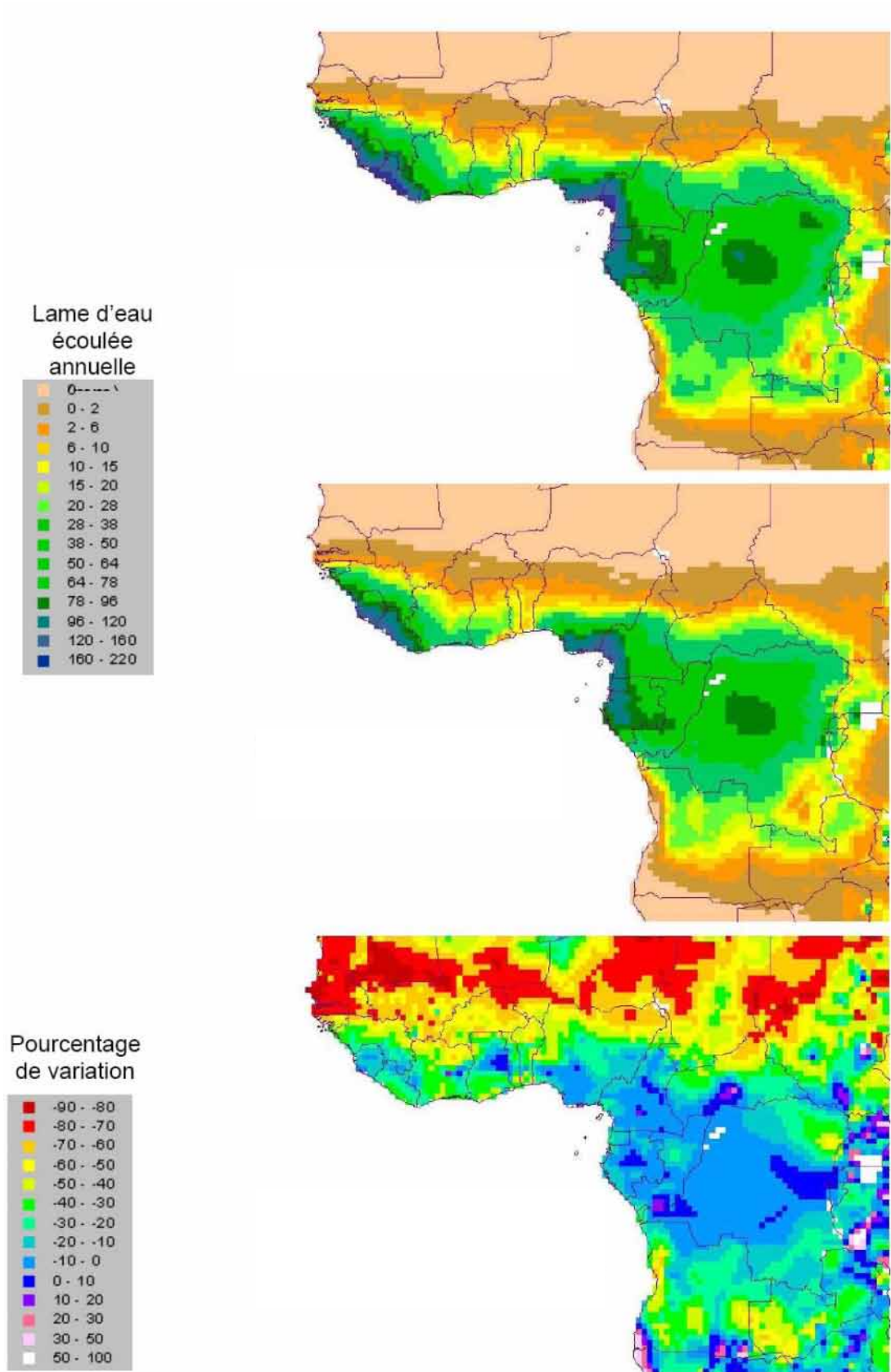


Figure 17 : Lame d'eau moyenne annuelle écoulee avant et après 1970 et écarts relatifs entre les 2 (figures extraites du rapport de DEA de Cédric Barrau).

## Application de plusieurs fonctions critères au calage de GR2M

Classiquement en modélisation Pluie-Débit, on utilise le critère de Nash pour caler et valider son modèle. Avec GR2M, nous avons décidé de choisir d'autres critères et de comparer les résultats obtenus. Trois bassins ont servi de support, limitant en cela la généralisation des résultats : Leraba à Yendéré (5930 km<sup>2</sup>), Mou Houn à Samandeni (4575 km<sup>2</sup>) et Mono à Dotaikope (5590 km<sup>2</sup>).

On a utilisé 4 fonctions critères tirées de la thèse de Charles Perrin :

➤ Nash

$$➤ CR2=100*\left(1-\frac{\sum(\sqrt{Q_{obs}}-\sqrt{Q_{cal}})^2}{\sum(\sqrt{Q_{obs}}-\sqrt{Q_{obs}})^2}\right)$$

$$➤ CR3=100*\left(1-\frac{\sum|Q_{obs}-Q_{cal}|}{\sum|Q_{obs}-Q_{obs}|}\right)$$

$$➤ CR4=100*\left(1-\left|\frac{\sqrt{\sum Q_{cal}}}{\sqrt{\sum Q_{obs}}}-\frac{\sqrt{\sum Q_{obs}}}{\sqrt{\sum Q_{cal}}}\right|\right)$$

Les résultats obtenus montrent :

- en fonction de la fonction critère choisie, les jeux de paramètres obtenus sont très semblables : plage de variation < 10%
- Visuellement Nash donne de meilleurs résultats au sens où le débit maximum calculé est plus proche du débit maximum observé. Cela peut paraître normal d'après la formulation du critère : on donne plus de poids aux fortes valeurs. Les débits calculés sont cependant bien souvent inférieurs aux débits observés.
- Si on reporte la valeur absolue des écarts entre les débits observés et calculés en fonction des débits observés (travail effectué pour la Leraba uniquement), on se rend compte que pour les basses-eaux et les moyennes-eaux, voire une partie des hautes-eaux, Nash est le plus mauvais. Si on classait les critères, on obtiendrait : CR3>CR2>CR4>Nash.
- En calage, pour les 3 bassins, le débit moyen estimé sur la période de calage obtenu d'après Nash, est toujours supérieur au débit moyen observé. Avec CR2 et CR3, il est toujours inférieur. Avec CR4, on obtient pour les 3 bassins un critère qui vaut 100 ...

Les opérations de calage-validation en modélisation Pluie-Débit n'apparaissent jamais pleinement satisfaisantes : on a tendance à surestimer les débits de basses-eaux, sous-estimer les débits de hautes-eaux ; en fonction de la période de calage, on obtient des jeux de paramètres qui peuvent être significativement différents qui peuvent être liés aux données ou à autre chose ; autour des jeux de paramètres, il y a des zones plus ou moins importantes où les jeux de paramètres donnent de valeurs de critères très proches ; ...

## Principales références bibliographiques

Ces références bibliographiques résument bien l'ensemble du travail accompli et les principaux résultats obtenus.

**RS-i 03-1** : Paturol JE, Ouedraogo M, Servat E, Mahé G, Dezetter A. The concept of hydropluviometric normal in West and central Africa in a context of climatic variability. Hydrological Sciences Journal, 2003, 48(1) : 125-137

**RS-i 03-3** : Paturel JE, Ouedraogo M, Servat E., Mahé G, Conway D, Dezetter A. Influence of the spatialization of data on the modelling of monthly river regimes in West Africa. Hydrological Sciences Journal, 2003, 48(6) : 881–890

**RS-i 05-1** : Mahé G, Paturel JE, Servat E, Conway D, Dezetter A. The impact of land use change on soil water holding capacity and river modelling in the Nakambe river, Burkina Faso. Journal of Hydrology, 2005, 300(1-4): 33-43

## **Commentaires**

### Sur le type de modélisation employée

*L'ensemble des résultats de notre équipe nous a mené à une réflexion progressive sur la modélisation hydrologique qui a infléchi les travaux menés et futurs.*

*Les modèles utilisés ont tous plusieurs caractéristiques communes dont la plus importante est que leur utilisation nous est imposée par un choix fait au départ par l'équipe : 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 étant ce qu'ils sont, les données les plus « aisément » disponibles sont des pluies, des débits et, parfois aux stations synoptiques, des estimations d'évapotranspiration potentielle. Le maillage de ces mesures peut donc apparaître très lâche et les modèles utilisés ne peuvent être qu'une image conceptuelle, très lointaine d'une représentation physique et exacte du comportement du bassin. L'échelle spatiale du bassin versant nous semble pertinente pour analyser la transformation pluie-débit ; de même pour l'échelle temporelle mensuelle (voire décadaire) qui nous semble celle à laquelle on peut et on doit avoir une action en matière de prévision, de planification et de gestion intégrée des ressources en eau.*

*Les modèles conceptuels choisis sont des modèles conceptuels de type « à réservoirs », appelés ainsi en raison de la représentation schématique en compartiment ou réservoir des différentes composantes de la transformation de la pluie en un débit à l'exutoire d'un bassin versant. En cela, la modélisation que l'on utilise au sein de notre équipe s'oppose à une modélisation de processus où on essaye de représenter les propriétés et les processus mis en jeu dans les bassins versants. Pour notre part, notre « objectif premier » est de bien reproduire l'écoulement. Bien sûr, on se base sur des concepts simples mais ils ne sont finalement là que pour nous aider à relier « intelligemment » (dans l'état de nos connaissances) nos variables.*

*A ce stade, j'emprunterai une réflexion du Professeur C. Bocquillon dans une note interne : « on confère bien souvent aux modèles conceptuels une réalité physique validant en cela les concepts qui ont servi à les élaborer ; réalité physique dans laquelle les paramètres de ces modèles sont directement assimilés à des caractéristiques intrinsèques du bassin versant ou des écoulements qu'il génère. On pourrait alors parler d'éléments « paramétriseurs ». Dans une telle hypothèse, les différents réservoirs seraient effectivement assimilables à des « compartiments » du sol qui contrôleraient l'évapotranspiration, les écoulements, l'infiltration, ... ». L'utilisation de ces modèles montre que si ces algorithmes sont en mesure de reproduire assez fidèlement ce que l'on mesure, ils ne semblent pas être capables de reproduire les phénomènes d'écoulements tels qu'on les observe, tout du moins dans les régions tropicales. « Les paramètres obtenus à l'issue des calages ne seraient alors que des éléments « calibrateurs », indispensables au bon « réglage » des algorithmes, mais dépourvus de signification physique ».*

### Sur l'influence des données dans la modélisation

*D'après les essais de modélisation effectués, la grille d'entrée de pluie qui résulte de la densité d'information la plus grande, donc « a priori la plus juste », ne donne pas nécessairement les meilleurs résultats en simulation d'écoulement. Il en est de même en ce qui concerne la grille de données « sol » du CRU qui est déterminée à partir d'une information de plus que la grille de la FAO, liée à la couverture végétale.*

*Je ne reviendrai pas sur le commentaire fait plus haut sur les données utilisées qui ne peuvent pas, exclusivement, expliquer ce résultat. J'ajouterai que ces erreurs peuvent être masquées par un calage des paramètres du modèle (« inconvenient » de la robustesse d'un modèle). Il ne faut pas non plus*

*oublier que nous travaillons à des échelles grandes et que l'on peut s'interroger sur la validité réelle d'une donnée pluviométrique ou d'ETP mensuelle mesurée ou calculée en un point et attribuée à une surface voisine de 2 500 Km<sup>2</sup>.*

*Il doit y avoir une relation entre les différentes échelles de temps et d'espace et la représentation conceptuelle des modèles utilisés qu'il nous faut explorer afin de connaître l'information nécessaire pour parvenir à des résultats probants dans le cadre de la modélisation hydrologique choisie. Cela pourrait aider dans le même temps les services nationaux gestionnaires à optimiser leurs réseaux de mesure.*

#### Sur les normes hydrologiques

*La sécheresse conduit à des modifications des habitudes et des comportements qui sont des réponses à des nécessités d'adaptation tant pour ce qui est de la végétation que des pratiques agricoles et des communautés humaines. Ajouté à la non-linéarité de la transformation pluie-débit, cet ensemble de facteurs souligne l'adaptabilité nécessaire que les hydrosystèmes devraient afficher. La prise en compte de nouvelles normes est certainement nécessaire aux vues des résultats présentés, mais elle doit s'accompagner d'autres considérations relatives, notamment, à l'évolution de l'occupation des sols et de la végétation.*

*Il semble nécessaire, aujourd'hui, d'inciter à une réflexion collective associant scientifiques, concepteurs d'ouvrages, décisionnaires et utilisateurs pour que soient définis les aspects méthodologiques d'utilisation opérationnelle de séries chronologiques de référence et la prise en compte des facteurs complémentaires évoqués. Dans le contexte africain, par exemple, la conception de tout ouvrage hydraulique devrait tenir compte du fait que, leur durée de vie étant largement supérieure à 10, 20 ou 30 ans, leur alimentation connaîtra des fluctuations très importantes qui pourront aller jusqu'à un changement de régime hydrologique des cours d'eau concernés. La stratégie de conception devra donc intégrer des principes permettant aux systèmes d'eau de pouvoir résister aux effets de plusieurs années de sécheresse ou, au contraire, à ceux de plusieurs années de surabondance.*

#### Sur les résultats de modélisation obtenus

*Les résultats fournis méritent d'être approfondis. Tout au long du travail, ils nous ont amené également à nous poser des questions plus fondamentales liées bien souvent aux limites de la modélisation hydrologique conceptuelle à grand pas de temps et d'espace :*

- *il semble que lorsque l'on cale le modèle GR2M sur une période où, globalement, les écoulements et la pluviométrie sont plus faibles (i.e. après 1970), on reproduit bien les écoulements sur une période où les écoulements et la pluviométrie sont plus forts (i.e. avant 1970). L'inverse n'est pas vrai. Le modèle calé pour une certaine gamme de débits et de données climatiques reproduirait-il mieux les écoulements importants ou est-ce que cela est dû à la fonction de critère de calage choisi (Nash) qui donne plus de poids à ces valeurs importantes d'écoulement ? Est-ce lié au modèle choisi ? ...*
- *nous pouvons estimer une "région d'indifférence" des paramètres optimisés dans laquelle les valeurs prises par les paramètres diffèrent des valeurs optimales sans dégrader de manière significative l'adéquation de l'hydrogramme simulé avec les observations. Ces « régions d'indifférence » traduisent la non-unicité de la solution vis à vis de l'optimisation d'une fonction critère.*
- *pour juger de la performance de la modélisation, nous nous sommes limités au seul critère de Nash. Or le jugement des performances du modèle peut varier selon la formulation des critères choisis. Et si on basait notre jugement sur plusieurs critères simultanément ?*
- *les essais de modélisation montrent qu'un seul jeu de paramètres ne permet pas de simuler correctement le débit en basses-eaux, le débit en hautes-eaux et le débit en moyennes-eaux. Il est tentant d'introduire des paramètres « saisonniers » qui diffèrent*

*d'une période de l'année à l'autre. Toutefois, il faut se méfier d'une surparamétrisation possible du modèle.*

*Je reviendrai sur ces points dans la partie prospective.*

#### Sur les scénarii climatiques

##### **[thèse de S. ARDOIN]**

*Déterminer l'évolution du climat représente un défi considérable pour les décideurs. L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) ont créé, en 1988, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) ou Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Un des objectifs de ce groupe est d'évaluer les informations disponibles sur l'état de la science dans le domaine des connaissances du système climatique. Malgré des évolutions récentes, les modèles de climat présentent certaines limites : certains processus sont encore mal décrits ; les mailles de calcul des prévisions sont plus importantes que les mailles d'acquisition des données, ce qui entraîne un lissage de la réponse ; le comportement des populations, des gouvernements et des économies qui déterminent les caractéristiques de l'atmosphère est difficile à prévoir. Il en résulte une multiplication de ces modèles à des résolutions spatiales et temporelles différentes et, surtout, aux résultats très différents, voire opposés. Les scientifiques s'accordent à dire que la précipitation n'est pas la variable pour laquelle les GCM sont les plus performants. En revanche, la température serait correctement estimée.*

*Un simple coup d'œil sur les données calculées de précipitations, confirmé par un travail très complet d'une stagiaire à HydroSciences, révèle leur manque de fiabilité, tout du moins en Afrique de l'Ouest et Centrale. Les informations fournies sur la période pour laquelle on dispose d'observations ne correspondent en rien aux valeurs relevées, ne reproduisent pas la variabilité interannuelle constatée et, généralement et se montrent incapables de restituer un semblant de variabilité intra annuelle telle qu'enregistrée : il pleut tous les jours au Burkina Faso, pays sahélien ...*

*Il semble donc peu réaliste de vouloir utiliser les données générées par les modèles pour le XXIème siècle. Leur analyse laisse voir une grande hétérogénéité des prévisions tant d'un point de vue quantitatif que de leur répartition spatiale. Il faut donc encore s'appuyer sur des approches empiriques ou statistiques.*

*Autre écueil et qui n'est pas le moindre : il faut désagréger l'information pluie pour la rendre compatible à l'échelle des modèles utilisés.*

### **Premiers résultats du programme de recherche : ECCO-PNRH 2003**

#### **[références bibliographiques : C-ci 05-3 ; W 04-5, 04-6]**

Les modèles pluie-débit sont devenus au cours des 40 dernières années des outils de gestion de la ressource en eau incontournables car ils offrent de multiples possibilités d'applications dans le domaine de l'ingénieur (gestion, dimensionnement, diagnostic). La majorité des modèles sont dépendants de paramètres dont les valeurs doivent être déterminées par optimisation (calage), en extrayant l'information contenue dans des séries conjointes de pluie et de débit observées. Cette procédure de calage limite actuellement l'application des modèles pluie-débit sur des bassins versants non jaugés.

Cette problématique demeure aujourd'hui un verrou majeur de l'hydrologie et une décade internationale (2003-2012) de la prévision/prédiction sur les bassins versants non jaugés (Prediction on Ungauged Basins - PUB) vient d'être lancée à l'initiative de l'AISH pour tenter de répondre à cette question.

En 2003, Le CEMAGREF d'Antony, le groupe EIER/ETSHER et HydroSciences ont répondu ensemble à l'appel d'offre du Programme National / ACI – FNS « écosphère continentale » sur la thématique de recherche « Hydrologie : cycle de l'eau et flux associés (matières, énergie) ».

L'objectif du projet est de déterminer quel niveau minimal d'information est nécessaire pour obtenir une estimation fiable des paramètres des modèles pluie-débit. Pour cela, on explore les possibilités d'utiliser une connaissance partielle et lacunaire des débits pour l'optimisation des paramètres de modèles hydrologiques et, si cela est possible, une information régionale prédéterminée des paramètres.

Ce travail est mené sur un large échantillon de bassins et couvre des contextes climatiques variés, notamment France, Etats-Unis, Australie, ... et Afrique de l'Ouest. Les modèles pluie-débit utilisés fonctionnent à des pas de temps journalier et mensuel. Ils sont tous issus de la famille des modèles GR. Au sein de ce projet, HydroSciences travaille plus particulièrement au pas de temps mensuel (4 versions globales et une version spatialisée de GR2M) et sur des bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale.

Les approches de prédétermination des paramètres classiquement utilisées se basent sur des liens éventuels entre descripteurs physiques et/ou climatiques du bassin pour expliquer les paramètres des modèles via des relations de régression linéaire établies sur une base régionale. Ces approches n'ont jusqu'à présent permis d'apporter que des résultats très en deçà de ceux qui peuvent être obtenus par calage des modèles, c'est-à-dire en ayant recours à une information sur les débits. Toutefois, il semble qu'aucune régionalisation des valeurs de paramètres d'un modèle hydrologique n'ait été menée à une échelle aussi importante que celle sur laquelle nous allons travailler en Afrique de l'Ouest et Centrale. Pourtant, l'existence de différents régimes hydrologiques sur la zone d'étude devrait pouvoir se traduire par une organisation spatiale des valeurs des paramètres, voire de la performance des modèles : les quelques résultats obtenus sur l'utilisation d'une version spatialisée du modèle GR2M font apparaître une certaine organisation géographique de ses performances en terme du coefficient de Nash. La régionalisation devra prendre en compte, non seulement des descripteurs physiques et/ou climatiques des bassins, mais aussi le contexte particulier de la région Afrique : qualité et quantité de données dont nous disposons, et évolution climatique et/ou anthropique du bassin versant.

Des calages de GR2M spatialisés sur des périodes glissantes mettent en évidence la non stabilité dans le temps des paramètres optimisés. L'analyse de stabilité proposée repose sur l'analyse des « régions d'indifférence » des paramètres optimisés. Cette délimitation de régions d'indifférence pourra préciser les critères de l'étude de régionalisation proposée au-dessus. Une attention toute particulière sera accordée aux bassins emboîtés.

Les différentes versions du modèle ont pu être calées et utilisées en simulation sur les différents bassins. La version spatialisée de GR2M ne semble pas donner les meilleurs ajustements au sens du critère de Nash comparée aux versions globales. Pour les versions globales, les données d'entrée (Pluie, ETP et « sol ») sont estimées par une moyenne surfacique des données estimées sur les mailles contenues entièrement ou partiellement dans le bassin versant. Ce travail sera complété par une analyse des résultats obtenus en ne prenant en compte qu'une information ponctuelle de pluie, d'ETP ou de « sol ».

Actuellement, nous travaillons sur la mise au point et l'évaluation d'une méthodologie d'analyse de l'influence des lacunes ou de la quantité de données disponibles sur la qualité de la modélisation. Deux pistes sont envisagées : identifier des classes de débit ou des phases des hydrogrammes (i.e. mois de début de crue, mois de pointe de crue, ...) qui sont bien/mal reproduites par les modèles.

Ce programme a induit l'encadrement de différents stagiaires qui ont été chargés de développer certaines voies de recherche :

- DEA M. VERNAY
- Elève-ingénieur : M. DUFRESNE (ENGEES)
- Stagiaire d'appui à la recherche : L.A. MOUNIROU (EIER-ETSHER)

## **Autres études**

Parallèlement à ces 3 « grands » programmes que j'ai pu mener jusqu'alors, plus ponctuellement, des travaux avec des stagiaires ont été entrepris pour répondre à des besoins exprimés par des partenaires :

- Optimisation des réseaux hydroclimatiques au Burkina Faso : les changements climatiques et les modifications qu'ils peuvent entraîner comptent parmi les problèmes environnementaux les plus préoccupants que nous connaissons aujourd'hui. Les conséquences de ce phénomène étant d'une portée considérable et dans de nombreux cas imprévisible, il semble indispensable de disposer de réseaux de mesures et/ou de surveillance du milieu, efficaces permettant de fournir des données hydrométéorologiques fiables afin de suivre et de détecter les éventuelles modifications environnementales ceci dans le but de mieux gérer et protéger l'environnement. Pour répondre à cet impératif, les services gestionnaires des réseaux sont amenés à adopter une nouvelle approche de la notion de réseau de mesure à savoir *quelle configuration et quelle densité faut-il donner aux réseaux existant pour atteindre une efficacité maximale à moindre coût* (contraintes budgétaires obligent) ? Cela pose tout naturellement le problème de l'optimisation des réseaux de mesures. C'est dans ce contexte qu'il nous a été proposé d'étudier l'optimisation des réseaux de mesures hydroclimatiques pour suivre les modifications de l'environnement au Burkina Faso. Ce travail n'a pas été mené à son terme. Il n'a concerné que les données climatiques et, très partiellement, les données hydrologiques. Concernant les données climatiques, nous avons, dans une première approche, obtenu par le biais d'un processus de régionalisation à l'échelle du Burkina, des régions homogènes par rapport à un certain nombre de variables climatiques que nous jugeons essentielles pour le suivi du régime du cycle de l'eau. En calquant dessus le réseau synoptique des stations de mesure du Burkina, nous avons montré que le réseau existant apparaissait comme suffisant mais il nécessitait une maintenance et un suivi corrects.
- Prévisions saisonnières en Afrique de l'Ouest [**DEA de M. HAMATAN – Université de Montpellier II**] : l'objectif de cette étude est de faire une évaluation des prévisions saisonnières en Afrique de l'Ouest depuis le début du processus PRESAO en 1998 ; et de mettre au point d'autres paramètres océaniques ou continentaux, susceptibles d'influencer les précipitations de la région ouest africaine. Cette étude a été menée pour quatre pays : le Bénin, la Guinée, le Mali et le Tchad. L'évaluation des prévisions saisonnières sur la période 1991-1997, montre bien l'insuffisance des seules températures de surface de la mer jusqu'ici utilisées par le PRESAO, à expliquer les précipitations en Afrique de l'Ouest. L'utilisation de la fenêtre 8°W-12°W/2°N-2°S à travers les anomalies de températures de surface de la mer, améliore légèrement les scores. Ceci confirme les fortes connexions entre la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et les zones océaniques. Ce qui, du reste, encourage l'exploration d'autres prédicteurs. Une méthode d'évaluation des prévisions saisonnières, a été proposée pour contribuer à simplifier cette tâche lors des prochains PRESAO

De même, l'accès à de nouvelles données, comme les NDVI-AVHRR (indices de végétation), nous ont poussé à nous interroger sur l'utilisation de données issues des méthodes de télédétection pour le suivi de la variabilité climatique des régions sahéliennes d'Afrique de l'Ouest [**DEA P. DIELO – Université de Montpellier II**]. Les relations entre les NDVI-AVHRR et les paramètres climatiques ne sont pas encore parfaitement établies et font l'objet de nombreuses études Cette étude s'est intéressée à la relation entre les NDVI-AVHRR et la pluie au pas de temps décadaire sur le bassin versant du Nakambé au Burkina Faso pour la période 1982-1999. Une similitude marquée dans l'évolution annuelle des deux variables a été mise en évidence. Le NDVI se révèle être fortement corrélé au cumul pluviométrique à l'échelle spatiale du demi-degré carré. Il donne également de bons résultats quand il est utilisé comme moyen de détermination des décades de début et de fin de la saison pluvieuse.

Dans le cadre du montage de la Jeune Equipe associée à l'IRD, 2 des membres du CRH Yaoundé ont souhaité soutenir des travaux de recherche :

- **Thèse d'état de D. SIGHOMNOU – Université de Yaoundé « Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau [référence bibliographique : PC-i 05-1]**: le travail a consisté à mettre à jour la monographie des fleuves et rivières du Cameroun en intégrant plus de 20 années de mesure. Un effort particulier a été porté sur une description fine de la variabilité climatique et hydrologique par des analyses statistiques (emploi de Khronostat), sur la

définition de nouvelles normes hydroclimatiques et sur des perspectives d'évolution des ressources

- **Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle de G. LIENOU – Université de Yaoundé « Variabilité du climat : implication sur les ressources en eau du Cameroun » [référence bibliographique : RS-i 05-3, 05-8 ; C-ci 05-1]:** Les effets de la sécheresse en Afrique Centrale passent par les modifications d'états de surface (disparition du couvert végétal, occupation des sols, leur encreûtement, etc.). La persistance de la sécheresse depuis près de 30 ans entraîne un appauvrissement des nappes souterraines alimentant les cours d'eau en période de tarissement. La crue annuelle sur certains grands cours d'eau du Cameroun est remplacée par plusieurs maximums, fréquemment plus importants que les crues antérieures et de faible durée. Ces crues de récurrence exceptionnelle surviennent au cours des années normalement sèches et rappellent la grande disparité spatiale des impacts des phénomènes climatiques, dont la complexité est renforcée par les activités anthropiques. La modification de l'occupation des sols suite à l'explosion démographique d'une part, et la modification des régimes hydrologiques d'autre part a eu probablement des répercussions sur les flux de matières véhiculées par les rivières. Compte-tenu des connaissances déjà acquises sur la variabilité des pluies et des écoulements, notamment leur hétérogénéité spatiale, il est intéressant de faire le bilan des MES sur un échantillon de bassins-versants représentatifs des différentes du climat du Cameroun.

Malgré la fermeture de l'Antenne Hydrologique IRD à Abidjan, j'ai maintenu de bonnes relations avec nos partenaires ivoiriens. J'ai été contacté récemment par l'Université de Cocody pour participer au montage scientifique d'un travail de thèse qui s'intitulera « **Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique et des actions anthropiques sur les ressources en eau en Côte d'Ivoire** » [thèse de M.A. KOUASSI – Université d'Abidjan].

De même T.Y. BROU nous a sollicité pour l'aider à continuer sa carrière d'enseignant-chercheur à l'Université d'Abidjan. Encore assistant à l'Institut de Géographie Tropicale, il aspire à soutenir dans l'année qui vient une HDR à l'Université de Lille sur le thème : « **Climat, activités anthropiques et écosystèmes naturels en Côte d'Ivoire : étude des relations entre variabilité climatique, mutations socio-économiques et dynamique des paysages** » [HDR de T.Y BROU – Université de Lille]. J'interviens plus particulièrement sur l'aspect variabilité climatique.

## Cadre international et national des études menées

Initiées et fortement structurées par l'IRD, les recherches entreprises par notre équipe n'auraient probablement pas abouti si un partenariat sain et fructueux ne s'était pas mis en place. Ce partenariat s'est fait avec les institutions de Sud, comme avec celles du Nord. Je tiens particulièrement à remercier les chercheurs des premières qui connaissent des conditions de travail bien difficiles qui en rebutteraient plus d'un ! Qu'ils sachent que c'est en partie grâce à eux que je peux rédiger ce document.

- Partenaires du Sud : ABN, AGRHYMET, CNRA, CNRST, directions nationales de l'Eau et de l'Hydraulique, directions nationales de la Météorologie, EIER/ETSHER, ENI, IET, IGT, INERA, IPR, Universités d'Abidjan, d'Abomey-Calavi, de Dakar, de Ouagadougou, de Yaoundé, Rhodes University et tous les membres de FRIEND AOC non cités auparavant.
- Partenaires du Nord : CEMAGREF (Aix, Antony, Lyon), Universités libre de Bruxelles, de Montpellier, de Norwich, de Québec Trois-Rivières.

Les 2 programmes ICCARE et VAHYNE dont j'ai présenté les principaux résultats, s'inscrivent principalement dans le cadre du Projet FRIEND (Flow Regimes from International and Experimental Network Data). Comme je l'ai précisé au-dessus, ils ont nécessité des partenariats mais rien n'avait été clairement formalisé.

Depuis mon retour en France, j'ai été amené à m'investir dans d'autres programmes de recherche ou d'autres environnements de recherche que je vais présenter ci-dessous.

## Direction et coordination de programmes de recherche hors ORSTOM-IRD

### Projet FRIEND du Programme Hydrologique International (PHI) de l'UNESCO

#### [références bibliographiques : RS-ni 00-1 ; W03-1]

FRIEND vise à approfondir la connaissance de la variabilité spatiale et temporelle des régimes hydrologiques au moyen d'ensembles de données régionales, cadre de recherche qui correspond à nos projets.

L'IRD, par l'intermédiaire de l'équipe ICCARE-VAHYNE, est très impliqué dans le projet **FRIEND AOC** (réseau de recherche en partenariat dans le domaine de l'Hydrologie Régionale regroupant l'ensemble des pays d'Afrique de l'Ouest et Centrale). Depuis la mise en place de ce réseau de chercheurs en 1994, un membre de notre équipe a assuré la coordination et l'animation du thème «Variabilité des Ressources en Eau (VRE)». Depuis 1999, j'en assure les fonctions de **coordonnateur international** et, à ce titre, je suis **membre du comité de pilotage** du projet. J'assure non seulement l'animation de cette thématique mais je participe pleinement à celle des autres thèmes (maintenance d'un forum internet propre à VRE, organisation d'ateliers scientifiques, de séminaires de formation, échanges de résultats et de méthodologies, ...). Je suis également amené à **suppléer la coordination générale** pour la rédaction de documents-cadre : bilans et perspectives, demandes de financement, ...

L'objectif de FRIEND est de former des chercheurs, de les maintenir à la recherche dans leur pays, de les aider, moralement et matériellement, à travailler dans des conditions décentes et d'en faire des partenaires de haut niveau. Pour cela, le projet FRIEND AOC est une occasion à saisir car, en construisant une coopération Nord-Sud et Sud-Sud, il permet aux chercheurs du Sud de se documenter, de se déplacer, de communiquer et donc de participer pleinement à la recherche internationale. Malgré les nombreuses difficultés inhérentes aux pays en développement, notre action se concrétise petit à petit et a permis de tisser une «toile de chercheurs» sur l'ensemble de la région Afrique de l'Ouest et Centrale qui se renforce de jour en jour.

Cette idée de réseau d'hydrologie à l'échelle régionale continue à faire son chemin grâce à mon implication et à celle de mes collègues, et les hydrologues africains et africanistes qui participent au réseau sont extrêmement satisfaits de l'existence d'un tel projet qui leur offre un cadre de travail et de réflexion unique.

Parmi les premiers résultats obtenus auxquels j'ai très largement pris part, je peux citer :

- Le **programme AMMA** a très largement fait appel à la communauté scientifique du réseau FRIEND AOC pour son élaboration et son développement.
- Le montage d'un **projet «africain»** au Burkina Faso qui regroupe l'ensemble de la communauté scientifique du Burkina Faso (Université, CNRST, INERA, DGIRH, Météorologie Nationale, EIER/ETSHER) et qui s'intitule **ICCE-BF** (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). Les objectifs de ce programme pluridisciplinaire contribuent à développer des modèles intégrés de ruissellement, végétation et de transfert d'énergie et s'inscrivent dorénavant dans le cadre du programme AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine). Ce projet a été **validé par les instances d'AMMA** et doit obtenir un financement européen pour l'année 2005. Ce programme induit une thèse intitulée «**Impacts climatiques et anthropiques sur les régimes hydrologiques dans le Sahel burkinabè**» [thèse de P. DIEILLO – Université de Montpellier II].

#### **Programme ECCO – PNRH 2003 (Détermination de la connaissance minimale nécessaire sur un bassin versant pour l'estimation des paramètres d'un modèle pluie-débit)**

Ce programme, évoqué plus haut, a été élaboré conjointement avec le CEMAGREF d'Antony et le groupe EIER/ETSHER. J'en assure la **direction et l'animation** au sein de l'UMR HydroSciences Montpellier.

### **Programme ECCO – PNRH 2005 (Prévision dans les Bassins Non jaugés (PUB))**

En juillet 2001, l'Assemblée Générale de l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques (AISH) a décidé de lancer une initiative internationale sur le thème des « bassins versants non jaugés ou insuffisamment jaugés ». Par *bassin non-jaugé*, on entend un bassin pour lequel aucun enregistrement de flux produits par le bassin (qu'il s'agisse d'eau, de matières dissoutes ou en suspension, ...) n'est disponible. Et par *bassins insuffisamment jaugés* ceux pour lesquels des données de flux peuvent exister, sur de trop faibles durées, ou en des points trop à l'aval ou trop à l'amont par rapport au bassin versant cible.

A l'occasion de son lancement (Brasilia, 20-22/11/2002), l'initiative de l'AISH a pris la forme d'une décennie (2003-2012) internationale dénommée *PUB* pour *Prediction in Ungauged Basin*, dont la finalité affichée est la réduction des incertitudes dans la « prédiction » en Hydrologie (le terme générique anglais *prediction* a plusieurs sens en français : prédétermination, simulation et prévision). Cette initiative couvre l'ensemble des branches de l'Hydrologie, quantité et qualité, de la neige à l'érosion continentale, des eaux de surface aux eaux souterraines, de la théorie aux applications pratiques. Dans le cadre du plan de travail scientifique rédigé par un comité de pilotage en 2003, l'ensemble des chercheurs en Hydrologie est invité à se joindre aux groupes de travail qui se constituent autour d'une thématique scientifique et/ou sur une base régionale.

Le problème des bassins non-jaugés remonte aux fondements de l'Hydrologie moderne. Il est loin d'avoir reçu une réponse satisfaisante, la plupart des modèles hydrologiques requérant un calage sur les données qui font défaut dans leurs cas. L'initiative PUB conduit donc à une série de réflexions critiques sur l'hydrologie actuelle, sur le calage, la transférabilité/transposabilité des paramètres, les types de modèles existants, les échelles d'espace et de temps, et l'utilisation de moyens d'observation « moins conventionnels » (jusqu'à maintenant ...) tels que la télédétection. C'est du double constat de l'intérêt scientifique des thématiques s'articulant autour de l'initiative PUB et d'une participation française encore trop limitée aux activités de la décennie internationale qu'a été rédigé une lettre d'intention en réponse à l'appel d'offres ECCO-PNRH 2005. Cette proposition vise à mobiliser les hydrologues français autour de la décennie PUB.

Je suis **co-rédacteur** de cette lettre d'intention, **membre du comité de pilotage** qui s'est monté à cette occasion et **représentant** de l'IRD en son sein.

### **Participation à des programmes de recherche hors ORSTOM-IRD**

#### **Programme AMMA**

Par le biais du programme ICCE-BF évoqué plus haut, je suis **membre** du programme AMMA.

L'objectif global du projet ICCE-BF 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 entre facteurs climatiques et les 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 croûte de battance. Malgré ce niveau de dégradation, ce bassin présente encore un intérêt socio-économique certain. En effet il constitue le bassin du Burkina Faso le plus peuplé avec une densité de 53 habitants/km<sup>2</sup> (MEE) avec une forte activité agropastorale.

#### **Projet HELP de l'UNESCO et de l'OMM**

Le projet de recherche ICCE-BF s'intéresse au bassin du Nakambé au Burkina Faso qui a obtenu le label HELP (Hydrology for the environment, Life and Policy) de l'UNESCO et de l'OMM.

L'initiative HELP vise à établir un réseau mondial de bassins hydrologiques afin de mieux articuler les liens entre l'hydrologie et les besoins de la société. Le rôle crucial joué par l'eau dans la préservation de la santé humaine et environnementale a été largement reconnu par de nombreux forums nationaux et internationaux. Cependant, il n'existe aucun programme destiné à répondre aux grands problèmes de gestion des ressources en eau sur le terrain et à les intégrer aux orientations politiques et à la gestion. L'initiative HELP est conçue pour changer cet état de choses en créant une nouvelle approche de la gestion intégrée des bassins versants. Elle est envisagée comme une initiative, à vocation largement scientifique, orientée vers les problèmes et modulée en fonction de la demande.

Au titre d'hydrologue travaillant sur le bassin du Nakambé, je suis **membre** du réseau HELP.

**Programme ECCO – PNRH 2005 (Assimilation de la variabilité spatio-temporelle des pluies et des états de surface dans la modélisation des ressources en eau du fleuve Niger)**

Le projet envisagé répond aux thématiques prioritaires suivantes définies par l'appel d'offres ECCO-PNRH 2005 :

- Le développement de méthodes portant sur l'assimilation de données et les questions connexes : intégration de données « traditionnelles » et de données spatiales ; combinaison de modèles et données, propagation d'incertitudes.
- La prévision des débits et des flux associés dans les bassins non jaugeés, en soutien à l'action PUB (Prediction in Ungauged Basins) de l'AISH.

La problématique scientifique de ce projet est centrée sur le développement/amélioration des modèles conceptuels utilisés par notre équipe depuis de nombreuses années et sur l'intégration de nouvelles données pas ou peu utilisées (thématiques caractéristiques des projets « PUB »). Les développements qui seront conduits dans ce projet permettront d'ouvrir des perspectives de construction d'une nouvelle fonction de production adaptée aux environnements rencontrés sur le bassin versant du fleuve Niger.

Le projet se décline en deux volets, s'intéressant à l'assimilation des variables pluie et capacité en eau des sols.

Pour le premier volet, il s'agit d'appréhender la variabilité spatio-temporelle de la pluie, donnée d'entrée prépondérante des modèles utilisés. Dans un premier temps, on comparera les estimations fournies par le satellite METEOSAT Seconde Génération (MSG) et les données utilisées classiquement par interpolation de données de stations au sol sur les périodes communes d'observation. Dans un second temps, ces deux jeux de données seront introduits en entrée des modèles pluie débit et les résultats d'estimation des écoulements seront comparés aux données de terrain qui seront collectées pendant la durée du projet et validées. On comparera également l'influence de la répartition spatiale de ces pluies sur le fonctionnement des modèles.

Pour le second volet, il s'agit de caractériser l'évolution de l'occupation du sol sur le bassin du Niger afin de la prendre en compte dans la modélisation. Les travaux de thèse de Mahaman Ouédraogo, confirmés par ceux de Sandra Ardoin, ont montré que l'assimilation d'une donnée « sol » issue d'une carte des sols produite par la FAO aboutissait à de bons résultats en modélisation des écoulements à un pas de temps mensuel.

Les limites bio-climatiques se sont déplacées vers le sud, suivant la migration des isohyètes depuis la sécheresse des années 1970. Parallèlement, les activités humaines, principalement agro-pastorales, ont eu pour conséquence directe une dégradation globale du milieu (réduction importante de la biomasse et imperméabilisation des surfaces en zone sahélienne) par rapport à l'évolution moyenne d'un environnement local « épargné » des influences humaines. Lorsque l'on superpose ces différents impacts, il est difficile de pouvoir de manière simple estimer les modifications de la relation pluie – débit induite. Dans le passé, l'ORSTOM a observé des petits bassins versants représentatifs des paysages types que l'on observe sur le bassin du fleuve Niger comme sur le bassin du Nakambé. La documentation des écoulements actuels sur ces bassins versants est effectuée par une série d'opérations de mesures déjà engagées par HydroSciences dans le cadre de différents projets de recherche au Cameroun, au Burkina Faso, au Mali et au Bénin et par d'autres équipes de l'IRD, au Niger notamment. En utilisant les résultats de ces autres programmes, on pourra comparer les coefficients de ruissellement actuels avec ceux des années 50, avant l'installation de la période sèche actuelle, et être en mesure de mieux mettre en correspondance les variations d'occupation du sol observées et les variations d'écoulement associés. L'introduction de ces variations de coefficients d'écoulement dans la modélisation permettra d'améliorer les performances des simulations d'écoulements sur le long terme.

Je suis **membre** de ce projet.

### **Programme FSP Echel-eau**

La France se propose de jouer un rôle actif dans le *Challenge Programme* « Eau et Alimentation » et ainsi de renforcer son investissement dans ce secteur stratégique, en complément de son soutien au Partenariat Global de l'Eau, de son appui au développement de stratégies durables de gestion des ressources en eau pour les pays de la Zone de Soutien Prioritaire (ZSP) ou d'actions plus localisées telle la mise à disposition d'agents techniques français auprès de gestionnaires nationaux des ressources en eau.

La finalité du projet ECHEL-Eau est de contribuer à la mise en place d'une gestion intégrée efficace et transparente des ressources en eau permettant d'améliorer la productivité de l'eau agricole et de garantir la pérennité des ressources en eau.

Plus particulièrement, et en cohérence avec la stratégie du *Challenge Programme* « Eau et Alimentation » d'associer recherche, vulgarisation et formation, le projet contribuera à :

- Développer des outils de gestion intégrée des ressources en eau.
- Tester ces outils dans les contextes contrastés que sont les trois bassins du Limpopo, du Mékong et du Niger.
- Développer une capacité d'expertise adéquate sur ces trois bassins permettant d'utiliser ces outils d'aide à la décision.

Je suis **membre** de ce projet concernant le volet modélisation du bassin du fleuve Niger.

# Partie 3 – Continuité et inflexion des activités de recherche

## Bilan

La finalité des travaux de l'équipe VAHYNE est la notion de ressource en eau mobilisable et exploitable. Elle conditionne l'échelle de travail : grand pas d'espace (résolution spatiale de 30') et grand pas de temps (mensuel).

L'intérêt manifesté depuis plus d'une trentaine d'années pour l'étude du climat et de sa variabilité, est d'autant plus justifié dans les régions tropicales qu'elles sont généralement fragilisées d'un point de vue environnemental (importance des activités anthropiques, déforestation, dégradation des sols, ...), et que, compte tenu des impératifs de développement, les sollicitations qui s'exercent sur le milieu sont fortes et continues.

Cette variabilité du climat se traduit par une diminution globale de la pluviométrie annuelle de l'Afrique de l'Ouest et Centrale de l'ordre de 15 à 20%, voire 25%. Celle-ci n'est cependant pas homogène dans l'espace. L'existence de deux axes privilégiés d'hétérogénéité, le premier Nord-Sud et le second Est-Ouest, apparaît, en effet, comme l'une des caractéristiques majeures de ce déficit pluviométrique persistant.

Les implications de cette variabilité sur celle des ressources en eau sont particulièrement fortes et inquiétantes, et les répercussions de celle-ci touchent, à leur tour, de très nombreux secteurs d'activité : agriculture, énergie, santé, alimentation en eau potable, navigation, ... Autre implication : la relation pluie-débit semble avoir été modifiée, signe qu'un retour à une situation antérieure n'est pas envisageable à court terme.

Le développement d'une modélisation pertinente de la relation pluie-débit constitue donc un des objectifs des activités de recherches sur lequel nous travaillons actuellement. S'il y a lieu de complexifier les modèles choisis pour prendre en compte les évolutions du milieu qui conditionnent la répartition des ressources en eau, cela se fera toujours dans le même esprit : mettre à disposition de nos partenaires, qui utiliseront en final nos résultats, des outils simples d'utilisation dans leur configuration et peu gourmand en données qui leur sont de plus en plus difficiles d'accès, pour de multiples raisons.

## Perspectives : continuité et inflexion des activités de recherche

### Contexte scientifique

Depuis 1970 en Afrique de l'Ouest et Centrale, l'équilibre climat - environnement - homme s'est fortement fragilisé. Les aménagements urbains et ruraux et les activités humaines ont pris un essor considérable ; les conditions climatiques ont été fortement modifiées ; les conséquences ont été telles que l'environnement a été profondément transformé. La réponse hydrologique à la pluie a également évolué comme l'ont montré nos travaux appuyés par ceux d'autres chercheurs de l'IRD<sup>2</sup>. On aurait pu penser que cette évolution se ferait de façon simple : moins de pluie entraîne moins d'écoulement. Or cela ne s'est pas observé partout, révélant en cela la complexité de la relation pluie-débit. Il apparaît alors que le facteur déterminant de l'écoulement n'est probablement pas que la pluie mais aussi l'environnement. L'environnement joue un rôle prépondérant mais aussi complexe dans la redistribution des eaux de pluie selon les principales composantes du bilan hydrologique (évapotranspiration, écoulement de surface, écoulement souterrain). Le développement économique et l'impact humain ne cessant de croître, on peut sans peine imaginer que cela va induire des transformations du paysage qui vont se poursuivre pendant les décennies à venir (on ne traite pas ici du probable feed-back de l'environnement sur les facteurs socio-économiques).

L'Association Internationale des Sciences Hydrologiques vient de lancer la décade internationale (2003-2012) de la prédiction sur les bassins versants non jaugeés (Prediction on Ungauged Basins -

---

<sup>2</sup> Christian LEDUC et al. (2001). Long-term Rise in a Sahelian Water-Table : the Continental Terminal in South West Niger, Journal of Hydrology, 243, 43-54

PUB)<sup>3</sup>. Dans un contexte africain (et plus généralement dans les Pays En Développement), on pourrait étendre la notion de « bassins non jaugés » à « bassins peu jaugés ».

- peu jaugés du fait de la faible quantité et qualité de l'information hydrologique dont on peut disposer pour une étude de Ressources en Eau ; bien souvent, les services en charge de l'hydrologie ont du mal à pérenniser les tarages et les jaugeages et à maintenir en état de marche les stations de mesures.
- peu jaugés du fait des modifications environnementales qui interviennent au cours du temps et qui ont une influence (certainement de plus en plus forte) sur la relation pluie-débit ; en conséquence, un bassin versant nécessitera un suivi continu dans le temps des stations de mesures.

Cette problématique demeure aujourd'hui un verrou majeur de l'Hydrologie et malgré les efforts consentis pour essayer de lier valeurs des paramètres des modèles et descripteurs des bassins versants, les résultats obtenus ne permettent pas d'envisager actuellement de modélisations pluie-débit fiables à partir de ces estimations de paramètres<sup>4</sup>.

La modélisation pluie-débit est encore aujourd'hui largement tributaire de la disponibilité de ces données et d'autres (si elles existent...), nécessaires pour déterminer les valeurs des paramètres d'une majorité de modèles existants, qu'ils soient « boîte noire » ou à base physique.

### **Point de vue personnel sur quelques éléments structurants pour de nouvelles directions de recherches**

#### **Développement d'outils de description et d'analyse de données**

La perception régionale d'un phénomène climatique, quel qu'il soit, apparaît essentielle à sa caractérisation et à sa compréhension. Elle permet d'en apprécier toute l'hétérogénéité spatiale et temporelle. Par ailleurs, la prise en compte de données autres que les seuls précipitations et débits, lorsqu'elles sont disponibles, conduira à une vision plus complète, et donc plus satisfaisante et plus pertinente, de la variabilité climatique sur le continent africain. L'analyse de ces données doit permettre de situer les phénomènes récents dans une perspective historique riche d'enseignements pour en comprendre, à la fois, les mécanismes et les manifestations et percevoir, peut-être, les signes avant-coureurs.

Les méthodes employées actuellement reposent, généralement, sur des approches ponctuelles, et donc locales, dont on régionalise ensuite les résultats au moyen de différentes techniques de spatialisation. Le besoin existe donc de méthodes permettant directement une analyse "régionale", que l'on peut aussi envisager "multivariée" pour pouvoir traiter simultanément l'ensemble des informations disponibles relatives au phénomène étudié<sup>5</sup>. Les premiers travaux réalisés dans ce domaine dans le cadre du Programme ICCARE doivent être approfondis.

A mon sens, il faudra compléter ces travaux en assortissant les résultats d'analyse, des incertitudes liées aux données et aux outils utilisés.

#### **Réflexions sur la modélisation et les problèmes d'échelles**

Le schéma général que l'on se fabrique de la relation Pluie-Débit via une ETP, une infiltration, ...se calque typiquement sur la représentation que l'on se fait de cette relation à l'échelle d'un événement : il pleut ; une partie de la pluie va être intercepter par la végétation ; une partie va s'évaporer ; une partie va transpirer ; une partie va ruisseler immédiatement ; une partie va s'infiltrer et va participer à la recharge de la nappe ; une partie va participer à un écoulement de sub-surface ; une partie issue d'une pluie précédente va être remise en mouvement ...Elle est proche de la réalité (telle qu'on la conçoit) à

<sup>3</sup> Pub Science Steering Group (2003). PUB Science and Implementation Plan, IAHS, 49p.

<sup>4</sup> Charles PERRIN, Claude MICHEL (2003). Another methodology for a better use of descriptors of ungauged basins in lumped hydrological models. Proceedings of the 8th Conference of the European network of Experimental and Representative Basins (ERB) on Monitoring and modelling catchment water quantity and quality, Ghent, Belgium, UNESCO, IHP Technical Document in Hydrology No.66, 69-76.

<sup>5</sup> Hayet KHODJA (1996). Etude spatio-temporelle de données pluviométriques - Recherche d'une rupture, DEA Biostatistique. USTL, Montpellier

cette échelle mais probablement moins à l'échelle de la décennie, du mois, de la saison ou de l'année. A ces échelles de temps, d'autres facteurs peuvent entrer en ligne de compte, et même, devenir prépondérants : l'antériorité des pluies, la répartition temporelle des événements au sein du pas de temps, l'état de la végétation, les prélèvements, les stockages ...

Le travail effectué par Mouelhi<sup>6</sup> sur l'établissement d'une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier est intéressant à plus d'un titre. Il aborde, directement ou pas, les aspects de changement d'échelle temporelle et les différentes représentations que l'on se fait à ces échelles de la relation pluie-débit. Plus l'échelle de temps est importante, plus les relations sont empiriques, même si elles se basent sur des concepts simples; plus on affine ce pas de temps, plus les concepts se complexifient (et donc les relations), plus le nombre de variables intervenant dans le modèle augmente, plus on essaye d'intégrer des variables physiques (mesurables si cela est possible), ...

Il y a très certainement des « sauts » dans l'échelle de temps des représentations de la relation pluie-débit.

Selon Mouelhi, l'architecture du modèle GR2M est très proche de celle de GR4J mais très différente de GR1A (annuel) et GR0P (pluri-annuel). Il lui semble intéressant de raccorder alors le pas de temps mensuel et le pas de temps annuel en étudiant la modélisation pluie-débit à une échelle de temps saisonnière (trimestrielle ou semestrielle).

La représentation (le modèle) que l'on se fait de la relation Pluie-Débit à une échelle mensuelle n'est probablement pas la meilleure : qu'est ce qu'une pluie, un débit, une ETP à un pas de temps mensuel ? Qu'est ce qu'un écoulement direct ou retardé, à un pas de temps mensuel, en particulier sur un petit bassin versant ?

A ce propos, il est curieux de noter que pour les modèles que nous avons jusqu'alors utilisés, cette notion d'écoulement direct n'apparaissait pas : un coefficient de répartition nul (pas d'écoulement direct) dans GR2M donne de meilleurs résultats, le paramètre lié à l'écoulement direct dans VUB et WBM est bien souvent proche de 0, voire nul ...

De même, les modèles utilisés sont très peu sensibles à l'ETP, donnée parfois bien difficile à acquérir et dont la justesse est encore plus difficile à vérifier. Je reviendrai sur cette donnée un peu plus loin.

Il faut revoir la représentation que l'on se fait du système pluie-débit en fonction de l'échelle de temps à laquelle on travaille. Une réflexion avec des géographes, des agronomes, des pédologues, des géologues, des modélisateurs, des systémiciens, ... doit être menée.

***En fonction de l'échelle de temps à laquelle on travaille, certains facteurs auront un rôle plus important que d'autres dans la description de la relation pluie-débit. Restent à savoir lesquels ?***

Dans l'espace, on pourrait mener parallèlement le même type de réflexion : « sauts », concepts mis en jeu<sup>7</sup>, ...

***Quelles sont les relations entre les différentes échelles de temps et d'espace et la représentation conceptuelle des modèles utilisés qu'il nous faut explorer afin de connaître l'information nécessaire pour parvenir à des résultats probants dans le cadre de la modélisation hydrologique choisie ?***

**Analyse de la modélisation hydrologique – cas des modèles GR**

Mouelhi remarque que le modèle GR4J par agrégation au pas de temps mensuel des sorties journalières, « surclasse » le modèle GR2M. Il impute cela à la répartition des pluies journalières sur le mois. En effet, un nombre faible de jours pluvieux pourrait bien constituer la majorité de la

---

<sup>6</sup> Safouane MOUELHI (2002). Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier, Thèse ENGREF, 323 p.

<sup>7</sup> Christian PUECH (2000). Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes, HDR INPG Grenoble, 105 p.

pluviométrie du mois correspondant. Cette hypothèse peut être une piste d'amélioration des performances du modèle GR2M.

Mais à partir du moment où on souhaite répartir au sein du pas de temps le signal d'entrée, il faut se plonger dans les schémas numériques de résolution. Or quelques travaux montrent que cela n'est pas aussi simple que cela :

- «...L'écriture mathématique des relations entre les flux et les stocks s'exprime par des équations différentielles ... La gestion numérique correcte de ces équations différentielles peut poser des problèmes d'intégration numérique. En effet, un mauvais choix de la méthode d'intégration peut conduire à une dérive de la solution et des résultats inexacts. Ce problème a été peu analysé par les hydrologues qui le considèrent comme une question mathématique hors de leur domaine ...» (Hreiche<sup>8</sup>) ;
- un « mauvais » choix du schéma numérique d'intégration des équations différentielles du modèle peut entraîner l'exploration d'une « mauvaise » partie de l'espace de la fonction critère (résultats partiels obtenus par Chalifour & Dezetter (note orale) sur une version journalière de GR).

***Les hydrologues n'ont-ils pas assez vigilants envers les hypothèses posées, envers les outils numériques qu'ils utilisent ?***

La modélisation Pluie-Débit passe nécessairement par une phase de calage-validation de paramètres. Classiquement, par une méthode ou une autre, on cherche à caler un jeu de paramètres qui optimise une « fonction critère » en mesurant un écart entre les valeurs observées et les valeurs estimées par le modèle. Par la suite, on doit « valider » ce jeu de paramètres. Certains auteurs proposent différentes manières de valider ce jeu « optimal » de paramètres.

Chacune de ces étapes et des méthodes pour y parvenir, mériteraient une analyse critique approfondie et ont d'ailleurs fait l'objet de différents travaux<sup>9</sup>.

Les modèles GR ne posent, a priori, pas trop de problèmes pour l'optimisation des paramètres. Toutefois, 3 pistes complémentaires devraient être explorées à mon sens :

- l'analyse de sensibilité des modèles à leurs paramètres : peu d'attention est donnée à cet aspect. Dans le cadre du programme ICCARE et du projet PNRH, nous avons travaillé avec un outil qui est une région d'indifférence autour d'un jeu de paramètre « optimum » à l'intérieur de laquelle les combinaisons de paramètres donnent des estimations de débit qui sont proches. Il présente un intérêt évident mais il a ses limites (en particulier, il est trop sensible au nombre d'observations). L'étude des modèles utilisés montre que bien souvent le modèle est peu sensible à un de ses paramètres sans toutefois que l'on puisse décider de fixer l'autre à une valeur donnée. Cette faible sensibilité peut être gênante dans la détermination de l'arrêt de l'algorithme d'optimisation et introduire un biais dans l'analyse des résultats. Tout comme elle apparaîtra comme rédhibitoire si on souhaite établir des relations entre celle-ci et des caractéristiques des bassins versants ;
- cette analyse de sensibilité montre qu'il n'existe pas un jeu « unique » optimum de paramètres qui remplit les conditions d'un critère mais qu'un ensemble de n-uplets peut convenir<sup>10</sup> ;

---

<sup>8</sup> Antoine HREICHE (2003). Modélisation conceptuelle de la transformation pluie-débit dans le contexte méditerranéen, Thèse Université de Montpellier et Université St Joseph (Liban), 254 p.

<sup>9</sup> Vijay P. SINGH & Donald K. FREVERT (2002). Mathematical models of large watershed hydrology, Water Resources Publications, LLC, 891 p.

<sup>10</sup> Keith J BEVEN & A. M. BINLEY (1992). The future of Distributed Models: Model Calibration and Uncertainty Prediction, Hydrological Processes 6, 29-44.

- les modèles utilisés seront à l'avenir utilisés pour des objectifs de plus en plus multiples qui vont de la simple simulation d'écoulement à l'aide à la décision en termes d'aménagement. Le multi-objectif devient donc une question incontournable<sup>11</sup>. Les questions qu'il faut se poser sont :

***Quel critère d'optimisation est le plus adapté en fonction des objectifs demandés au modèle ?***

***Faut-il se poser la question en termes d'optimisation multi-critère ?***

- l'établissement d'une représentation efficace des incertitudes ou erreurs du modèle dues à sa structure (ses concepts), ses paramètres, les données d'entrée et propagation de cette incertitude sur les écoulements simulés. Mais aussi erreurs sur les données de sortie qui servent au calage.

***Quel niveau de confiance peut-on accorder aux simulations des modèles ?***

Ce qui est vrai pour GR l'est très certainement pour tous les autres modèles qu'ils soient conceptuels, physiques, ...

### **Nouvelles données et nouvelles techniques d'acquisition de données**

Comme on l'a signalé déjà plus haut, les modèles hydrologiques utilisés jusqu'alors par l'équipe HydroSciences Montpellier ne nécessitent que peu d'informations : pluie, ETP et capacité de rétention en eau du sol. Toutefois, celles-ci ne sont pas toujours disponibles. Des avancées majeures ont été faites au cours des dernières décennies dans les techniques d'acquisition de données de télédétection, satellites [référence bibliographique : C-ci 02-3] et radars, qui pourraient, peut-être, à terme remplacer (ce n'est pas encore le cas) ou, tout du moins, compléter les données que l'on mesure ponctuellement. Ce qui apparaît particulièrement intéressant, ce sont les nombreuses possibilités qu'elles offrent dorénavant : appréciation de la variabilité spatiale des données météorologiques, des caractéristiques du sol, cartographie de l'occupation du sol et du couvert végétal, ... répétitivité à des fréquences plus ou moins importantes des observations.

Autres outils qui deviennent accessibles à tous, les modèles numériques de terrain. En Afrique de l'Ouest et Centrale, il semble qu'il y ait des relations à développer entre le relief, l'occupation de l'espace par l'homme et la dégradation des sols résultants de cette anthropisation et des changements climatiques.

Reste qu'il est très difficile d'utiliser cette information spatialisée alors que nos modèles se basent sur des relations que l'on pourrait qualifier de ponctuelles.

***Faut-il découper l'espace en parties plus petites qui soient proches de la donnée recueillie et agréger ensuite les résultats obtenus ? Ou faut-il agréger cette information et l'attribuer à la surface de travail à laquelle on est ?***

Je reprendrai à mon compte une réflexion du Professeur Bocquillon sur la notion d'hétérogénéité/homogénéité et je la compléterai : soit la représentation spatiale très simple d'une variable quelconque avec des inclusions, représentées par les cercles, qui caractérisent des valeurs différentes de cette variable (figure 18). De nombreuses questions peuvent se poser comme les suivantes :

***A quelle échelle (représentée par les carrés successifs) la surface n'apparaît plus comme hétérogène mais comme homogène ?***

***Est-il intéressant, dans tous les cas, de prendre en compte cette hétérogénéité ? Comment la prendre en compte ? Quelle valeur attribuer à cette variable ?***

---

<sup>11</sup> H.V. GUPTA *et al.* (1998). Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information, Water Resources Research, 34(4), 751-763

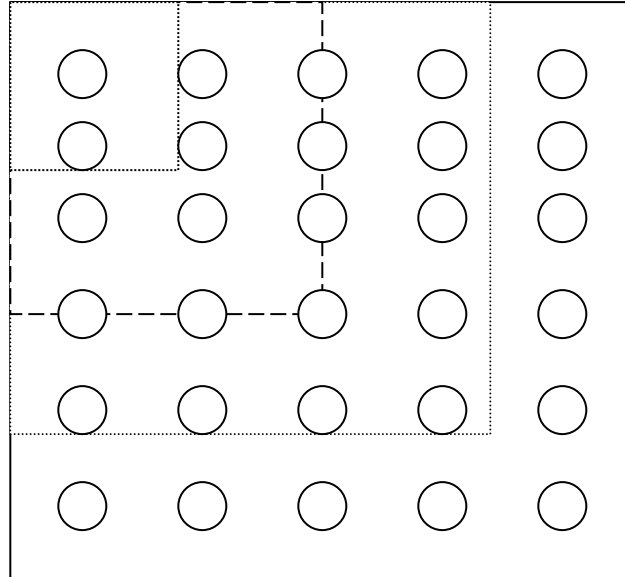


Figure 18 : notion d'hétérogénéité/homogénéité en fonction de l'échelle à laquelle on se place.

### Développement d'une modélisation hydrologique

Rappelons l'idée première des modèles GR : partir du modèle le plus élémentaire possible (un unique paramètre lié à un unique réservoir) et n'en compliquer cette architecture ***que pour faire face aux difficultés à reproduire les débits réels et non pour satisfaire des conceptions a priori sur le cycle hydrologique*** (bien qu'il soit difficile de ne pas en avoir ...). Cette démarche a débouché sur un modèle simple à deux paramètres GR2J<sup>12</sup> qui a servi de base à de nombreuses versions GR qui ont suivi.

D'autres modèles (modèles physiques) ne sont pas issus de la même philosophie mais ils cherchent tout de même à représenter la réalité le plus simplement possible<sup>13</sup>.

***Est-il nécessaire que nous complexifions (le terme est-il adéquat ?) les modèles utilisés pour se rapprocher d'une plus grande réalité que l'on pourrait qualifier de physique ou peut-on se suffire d'un aspect très conceptuel de celle-ci (on peut évoluer au niveau des concepts ...).***

Deux options semblent envisageables, parfois complémentaires :

- On réanalyse tous les résultats déjà obtenus en tenant compte des autres informations qu'il est possible dorénavant d'obtenir et en les complétant par des analyses de sensibilité proposées plus haut, pour « tirer » le maximum d'informations.
- On utilise un modèle de la bibliographie mais en l'adaptant à notre contexte, comme on a pu déjà le faire. On se sert des résultats d'autres modèles pour construire un modèle hybride en prenant de chacun ce qui semble donner de bons résultats. L'agencement n'est certainement pas simple, et même peut-être pas toujours possible, mais il faut essayer :
  - le concept de l'ETP, commun à tous les modèles utilisés, n'est pas bien pris en compte dans le contexte tropical et africain. L'ETP n'est que très rarement satisfaite et l'évapotranspiration réelle se trouve finalement limitée par l'eau disponible dans le

<sup>12</sup> Claude Michel (1983). Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? La Houille Blanche, 1, 39-44.

<sup>13</sup> Bruno Ambroise (1999). La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant – Processus, Facteurs, modèles, Editions \*H\*G\*A\*, 2<sup>nde</sup> édition, Bucarest, 200 p.

sol. Des essais sur un modèle journalier de GR ont montré que des formulations de l'ETR ne se basant pas sur le concept de l'ETP pouvaient améliorer les résultats obtenus ;

- les premières versions de GR contenaient un paramètre sol que nous avons assimilé à une donnée issue des traitements de la FAO sur le sol. L'expérience montre que les résultats obtenus n'ont pas été pour autant dégradé ;
- le modèle de Yates évoqué plus haut intègre également une donnée spatiale mais qualitative : une classification de la végétation que l'on pourrait qualifier de simpliste. En dépit de cela, les résultats sont satisfaisants.

Cette seconde option converge vers une redéfinition d'un modèle en prenant en compte d'autres informations telle des données environnementales et/ou sociologiques<sup>14</sup>. La prise en compte de données environnementales semble plus aisée bien que nécessitant des recherches particulières (référence à la figure 18). Mais il ne faut pas oublier que l'homme et le contexte économique et social ont une part de plus en plus prépondérante sur le façonnement de l'environnement, des paysages :

- en Afrique, les relations homme-environnement sont très différentes d'un groupe ethnique à un autre, en particulier en Afrique et cela conditionne les réponses, les adaptations de l'environnement aux activités anthropiques. Les groupes nomades viennent s'installer dans des régions, exploitent l'environnement et dès qu'il ne leur suffit plus, ils vont ailleurs : ils ont une utilisation à court ou moyen terme de l'environnement. On peut penser qu'a priori ce comportement est nuisible. D'autres groupes sont autochtones depuis bien longtemps et comptent bien y rester encore plus longtemps. Ils ont des relations avec l'environnement plus préservatrices, donc a priori, plus bénéfiques pour l'environnement ;
- la répartition dans l'espace des essences d'arbres, leur implantation, ... sont autant d'indicateurs qui permettent de « mesurer » la qualité des relations homme-environnement et climat-environnement, et la gestion qu'ont les hommes de leur espace, de leur environnement.

### Mise au point de scenarii climatiques

Depuis quelques décennies, scientifiques et politiques s'inquiètent de l'évolution du climat futur. L'IPCC (International Panel on Climate Change) a ainsi été créée pour analyser les causes des changements climatiques que l'ensemble de la planète connaît depuis plusieurs décennies et leurs possibles impacts à l'avenir. En se basant sur les modèles climatiques qui visent à améliorer les connaissances du système climatique mais également à fournir aux décideurs et aux scientifiques des informations pour anticiper l'évolution du climat, l'IPCC annonce que leurs résultats, dont la confiance dans la capacité à ceux-ci à prévoir le climat futur a augmenté, conduisent aux prévisions suivantes :

- le réchauffement climatique devrait accroître les phénomènes extrêmes (sécheresses / fortes précipitations-inondations) ;
- l'étendue de la couverture neigeuse, des glaciers et de la banquise de l'hémisphère nord devrait continuer de diminuer ;
- entre 1990 et 2100, la température moyenne de surface devrait encore augmenter de 1.4 à 5.8 °C, le niveau moyen des océans de 9 et 88 cm.

Ces gammes de variations dépendent des modèles climatiques utilisés mais aussi des projections d'émissions de gaz à effet de serre qui sont les agents de forçage de l'évolution du climat, révélant ainsi que, malgré les évolutions récentes dans le domaine des connaissances du système climatique, les modèles présentent certaines limites :

- à l'heure actuelle, les modèles climatiques ont quelques difficultés à reproduire certains processus comme l'évaporation continentale, le cycle du méthane ou encore la physique

---

<sup>14</sup> Jean-Yves MARCHAL (1983). Yatenga Nord Haute Volta – La dynamique d'un espace rural soudano-sahélien, Travaux et Documents de l'ORSTOM, Paris, 908 p.

des nuages. De plus, la description de ces processus est souvent basée sur des données à une échelle inférieure, qui ne peuvent être valides pour de larges mailles. En effet, un modèle climatique génère une valeur moyenne par maille. La diversité des caractéristiques climatiques et des traits géographiques à l'intérieur de chaque maille est donc inévitablement simplifiée. L'utilisateur ne possède donc aucune information quant à la variabilité spatiale à l'intérieur d'une même maille ;

- à ces incertitudes, s'ajoutent celles liées à l'évolution réelle de l'atmosphère, dans un contexte où le comportement des populations, des économies et des gouvernements (et donc indirectement des émissions de GES) est difficile à prévoir.

Et même, notre expérience montre que les modèles climatiques produisent souvent des résultats qui sont contradictoires, voire aberrants (pluie toute l'année au Sahel !). Ainsi, les prévisions locales sont très difficiles à établir. On reconnaîtra cependant leur relative fiabilité pour quelques indicateurs à grande échelle (répartition des zones climatiques, rythme des saisons, courants atmosphériques et océaniques, oscillations pluriannuelles d'El Niño, ...).

La mise au point de scénarii climatiques est une priorité pour l'ensemble des pays mais peut-être plus particulièrement pour les pays en développement qui connaissent déjà bien souvent des conditions climatiques difficiles.

Les échelles de prévision de ces modèles climatiques sont encore trop importantes par rapport à celle à laquelle travaillent les hydrologues. Il faut donc désagréger l'information fournie pour l'amener à leur échelle de travail. Les résultats jusqu'alors analysés ont montré les grosses faiblesses qu'ont ces sorties des modèles climatiques. En attendant une amélioration de ces simulations, il faut imaginer des techniques qui puissent tout au moins utiliser les tendances « lourdes » d'évolution du climat qui se dégagent de ces simulations et les appliquer aux données actuellement disponibles<sup>15</sup>.

Dans la ligne droite de la partie qui précède, les données environnementales et sociologiques évoluent également dans le temps et beaucoup plus vite que l'on ne pourrait le penser. Toute projection sur l'avenir ne devra pas oublier l'évolution de l'environnement.

### **Propositions personnelles de bases d'un nouveau projet de recherche pour l'équipe VAHYNE**

Dans un contexte « PUB », la quantité et la qualité d'informations disponibles en Afrique de l'Ouest et Centrale, et la résolution spatiale et temporelle des modèles pluviométriques (GCM) que la communauté climatique est en mesure de fournir, confortent très largement notre approche hydrologique : modélisation à de grands pas d'espace (résolution spatiale de 30') et pas de temps (pas de temps mensuel).

Les modèles hydrologiques utilisés ne nécessitent que peu d'information : pluie, ETP et capacité de rétention en eau du « sol ». En dépit de cela, globalement, ils ont prouvé leur robustesse sur le continent africain, comme ailleurs. Nos derniers travaux montrent cependant qu'il faut aller au-delà : il faut retravailler la fonction de production en donnant plus d'importance à une information « sol » en la rendant, par exemple, évolutive dans le temps et l'espace. Cette information ne peut plus être qu'un simple paramètre de calage des modèles. Cette donnée « sol » doit être reliée aux changements des états de surface par les activités anthropiques et les changements climatiques. Cela va dans le sens de nombreuses études qui ont conclu qu'un des facteurs conditionnels prépondérants dans la genèse et la dynamique du ruissellement et de l'infiltration était « sans aucun doute » l'état du sol en surface<sup>16</sup>.

A l'avenir, le projet de recherche de l'équipe HydroSciences Montpellier pourrait s'orienter dans 5 directions :

---

<sup>15</sup> Sandra ARDOIN (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne, Thèse Sciences de l'eau dans l'environnement continental, USTL, Montpellier, 440 p.

<sup>16</sup> Alain CASENAVE & Christian VALENTIN (1989). Les états de surface de la zone sahélienne – Influence sur l'infiltration, Editions de l'ORSTOM, Paris, 229 p.

- continuer à décrire et analyser les données climatiques en perfectionnant et/ou en mettant à jour les supports méthodologiques sur lesquels nous nous appuyons, en termes d'analyse de données, de spatialisation et de modélisation et en termes de précision des résultats obtenus ;
- analyser la modélisation et la compléter par une quantification des incertitudes qui l'accompagne - réanalyser les différents résultats obtenus en fonction des nouvelles données/informations disponibles (satellites) ;
- réfléchir au type de « régionalisation » que l'on peut mener dans un contexte « PUB » (peu ou pas de données, données facilement accessibles) ;
- identifier et caractériser les facteurs environnementaux, climatiques et socio-économiques dont l'évolution pourrait avoir un impact sur les états de surface ; intégrer ces facteurs à une modélisation hydrologique en privilégiant une vision « PUB » ;
- sur la base des scénarii climatiques qui se précisent quelque peu, se projeter à des horizons lointains pour travailler sur la redistribution des composantes du bilan hydrologique.

Les orientations de ce qui devrait être les bases d'un prochain programme sont bien dans la continuité des programmes précédents, VAHYNE et de ICCARE. Ses résultats devraient permettre de mieux prendre en compte les données climatiques, environnementales, socio-économiques, ... dans leur dimension spatiale et temporelle.

Pour remplir ces objectifs, il faut développer un environnement de gestion des données. Ce travail a été entrepris depuis de nombreuses années au sein de l'équipe. Un outil existe, SIEREM, qui nécessite dorénavant des développements d'applications propices à manipuler les données disponibles, à les analyser et à les introduire dans les modèles, qu'elles soient ponctuelles ou spatialisées.

### **Implication personnelle**

C'est toujours dans le cadre de modélisation conceptuelle globale à grande échelle de temps et d'espace que je souhaite m'impliquer. En effet, ce sont à ces échelles de temps et d'espace qu'il est raisonnable de planifier des actions en matière de ressources en eau à l'échelle d'un grand bassin versant ou d'une région..

Les éléments de recherche présentés plus haut me semblent tous prépondérants mais je souhaiterai, personnellement, me positionner sur les thématiques suivantes, dans une optique PUB : modélisation en bassins non-jaugés (ou peu jaugés) et régionalisation, chacune de ces thématiques étant accompagnées de travaux sur les incertitudes. Et, dans l'optique de valoriser les travaux entrepris, je terminerai par mon souhait de la mise en place d'une plateforme informatique.

### **Amélioration des résultats de la modélisation hydrologique**

La problématique scientifique est centrée sur une possible amélioration des sorties des modèles conceptuels utilisés par notre équipe depuis de nombreuses années (thématique caractéristique des projets « PUB ») en utilisant une information distribuée dans le temps ou dans l'espace qui peut être accessible par des données terrain et/ou par des mesures satellitaires.

Je souhaite que tous nos travaux se fassent sur un très grand nombre de bassins afin de pouvoir couvrir le plus de cas possibles et de ne pas limiter nos résultats à un espace restreint comme cela est bien souvent le cas dans la littérature scientifique.

### *Information temporelle*

Ce point concerne l'intégration de la répartition de la pluie au sein du pas de temps de travail, ce qui n'a jusque là jamais été pris en compte. Cette information de répartition du signal pluie au sein du pas de temps apparaît très utile puisque Antoine Hreiche a montré au cours de ces travaux de thèse que la connaissance d'un modèle stochastique de la répartition des pluies sur le pas de temps d'intégration est primordial pour déterminer certains paramètres de la fonction de production d'un modèle qu'il a mis au

point et dont la philosophie est proche de celle de GR. Si cela s'avérait également vrai pour le modèle GR, nous aurions des éléments utiles pour une calibration du modèle sur des bassins non jaugés.

Le travail que je propose se fera en plusieurs étapes :

- dans un premier temps, pour les bassins où l'on peut disposer d'une information journalière et mensuelle, il s'agira de comparer les résultats obtenus par agrégation des sorties journalières avec les sorties mensuelles en testant différentes versions de GR au pas de temps mensuel et journalier ;
- dans un deuxième temps, pour les bassins où l'on ne peut pas disposer de l'information journalière, on essaiera de « modéliser » cette information en s'inspirant de travaux tels ceux menés par Tapsoba<sup>17</sup> qui a fait une description précise des régimes pluviométriques ouest-africain basée sur le modèle de la loi des fuites. Il sera alors possible de répéter l'exercice du point précédent. Cette modélisation est intéressante à plus d'un titre car elle doit pouvoir permettre d'assortir les résultats obtenus des incertitudes liées à la « modélisation » de cette information ;
- dans un troisième temps, on essaiera d'intégrer dans le pas de temps mensuel la répartition du signal de pluie. Cela nécessitera des recherches sur les schémas numériques de résolution des équations différentielles à la base des modèles.

Comme on peut le voir, chaque étape se complexifie au fur et à mesure de l'avancement du travail. A chacune des étapes, il sera intéressant de faire un point et de s'interroger sur l'intérêt de passer à l'étape suivante.

Cet axe de recherche m'intéresse particulièrement mais certains aspects peuvent dépasser mes compétences. Cela nécessitera donc au préalable un travail préparatoire de recherche de contacts scientifiques en calcul numérique et en statistique, qui pourraient être intéressés par la question et/ou un investissement personnel important.

### Information spatiale

Ce point concerne pour partie un projet de recherche validé en réponse à l'appel d'offre ECCO-PNRH 2005. L'objectif est d'appréhender la variabilité spatiale de la pluie, donnée d'entrée prépondérante des modèles utilisés et de caractériser la distribution de l'occupation du sol afin de la prendre en compte dans la modélisation.

- dans un premier temps, il s'agira de comparer les sorties de modèles en version globale ou semi-distribuée telle que nous l'avons définie dans le cadre du programme VAHYNE : le bassin est découpé en mailles régulières auxquelles sont attribuées des valeurs des données d'entrée (Pluie et ETP dans le cas des modèles GR et WBM) mais le calage des modèles se faisant sur une donnée de débit mesurée à l'exutoire du bassin, les paramètres calés sont propres au bassin en entier et, donc, ont les mêmes valeurs en chacune des mailles qui constituent le bassin. Des premiers tests sur quelques bassins montrent des résultats contradictoires : parfois, en termes de valeur de NASH, les résultats des modèles globaux sont supérieurs aux résultats des modèles semi-distribués, parfois, ils ne le sont pas. Il sera nécessaire de comprendre le pourquoi de ces résultats ;
- dans un deuxième temps, on s'intéressera à la donnée pluie : des comparaisons seront effectuées entre des estimations de pluie fournies par les satellites METEOSAT et les données utilisées classiquement par interpolation de données de stations au sol sur les périodes communes d'observation. Ensuite, ces jeux de données seront introduits en entrée des modèles pluie-débit (version globale et/ou semi-distribuée en fonction des résultats obtenus au point précédent) et les résultats d'estimation des écoulements seront

---

<sup>17</sup> Dominique TAPSOBA (1997). Caractérisation événementielle des régimes pluviométriques ouest-africain et de leur récent changements, thèse Paris VI, 169 p.

comparés aux données observées et validées. On comparera également l'influence de la répartition spatiale de ces pluies sur le fonctionnement des modèles.

- dans un troisième temps, on s'intéressera à l'occupation du sol. L'assimilation d'une donnée « sol » issue d'une carte des sols produite par la FAO dans les modèles GR et WBM aboutit à de bons résultats en modélisation des écoulements à un pas de temps mensuel en Afrique de l'Ouest. Elle traduit une sorte de capacité de rétention en eau du sol, caractéristique qui a un impact sur la capacité au sol à ruisseler. Celle-ci peut dépendre la couverture végétale, de la surface du sol, des organisations pédologiques superficielles ... Or celle-ci peut être variable dans le temps (comme dans l'espace ...), traduisant une modification des états de surface et induisant une modification de la relation Pluie-Débit. Cela est dû conjointement à l'impact de la sécheresse de 1970 entraînant un glissement vers le sud des limites bio-climatiques, et à l'impact des activités humaines, principalement agro-pastorales, ayant pour conséquence une réduction importante de la biomasse et une imperméabilisation des surfaces en zone sahélienne. En s'appuyant sur des traitements d'images satellitales appuyés par les travaux d'observations de l'ORSTOM-IRD sur de nombreux bassins versants représentatifs de paysages types et par HydroSciences Montpellier dans le cadre de différents projets de recherche au Cameroun, au Burkina Faso, au Mali et au Bénin, il sera possible de mettre en évidence ces variabilités dans l'espace et dans le temps.
  - il sera intéressant d'essayer de prendre en compte cette variation spatiale dans la modélisation (référence à la figure 18). Jusqu'à maintenant, les meilleurs résultats de modélisation en termes de valeur de Nash sont obtenus en retenant la capacité maximale de rétention en eau du sol observée au sein de la maille.
  - la prise en compte de cette variabilité temporelle m'apparaît comme essentielle dans le cadre de travaux de simulations d'écoulement sur le long terme comme l'application de scénarii climatiques du futur

En fonction des résultats obtenus nous pourrions être amenés à reconsidérer le type de spatialisation que nous avons choisi au début du programme VAHYNE : spatialisation en mailles régulières définies par des coordonnées latitude-longitude. Soit on montrera que la spatialisation n'apporte pas grand-chose (qui peut aussi être fonction de l'investissement en temps et en données disponibles) par rapport à un simple traitement global du bassin, soit qu'elle est nécessaire et implique même un redécoupage des bassins non plus en mailles régulières mais en mailles irrégulières se calquant sur les états de surface, sur des caractéristiques des paysages.

### Remarques

Ces travaux sur l'information spatiale et l'information temporelle sont bien évidemment très fortement imbriqués et ne se feront donc pas séparément.

Ces travaux n'ont pour but que de faciliter l'utilisation de scénarii climatiques couplés à des scénarii d'évolution du paysage qu'il est également nécessaire de définir si on veut juger de l'évolution des ressources en eau.

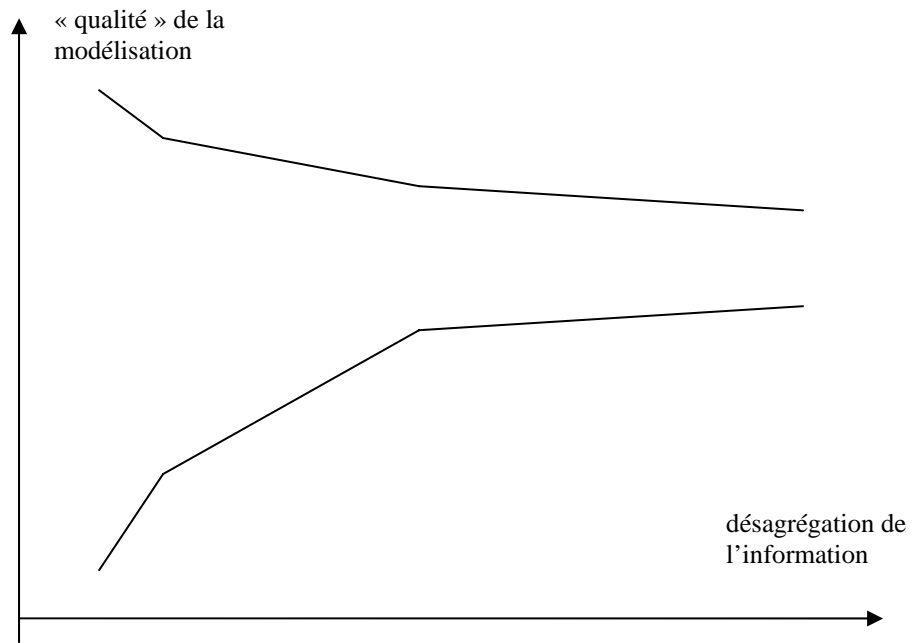


Figure 19 : évolution de la qualité des résultats de modélisation en fonction de la désagrégation de l'information spatiale et/ou temporelle.

En fonction de tests déjà effectués, j'ai le sentiment que l'amélioration des sorties de la modélisation en fonction de la désagrégation de l'information temporelle et spatiale se comporte comme la figure 19 : pour certains bassins, pour certains modèles, les résultats sont améliorés alors que parfois ils ne le sont pas. Si cela s'avérait exact, il faudrait s'interroger sur le pourquoi ? Une explication serait probablement à chercher dans le type de modèle utilisé, dans sa structure .... Au-delà d'une certaine précision des données, le modèle ne peut pas les assimiler et ne peut pas « donner plus » que ce qu'il a déjà produit comme résultats.

### Régionalisation

Parmi les modèles que l'UMR HydroSciences Montpellier a depuis longtemps utilisés, on peut citer les différentes versions de GR à pas de temps mensuel, le modèle VUB, le modèle WBM et le modèle de Yates. D'autres existent et mériteraient d'être appliqués à la zone d'étude sur laquelle nous travaillons. Ces modèles sont simples d'utilisation et les concepts sur lesquels ils s'appuient le sont aussi. Seuls changent la prise en compte des données d'entrée, l'agencement des réservoirs, les équations de vidange des réservoirs, la prise en compte ou non d'un éventuel apport souterrain, ...

Comme il n'existe pas de modèle conceptuel global unique, il m'apparaît comme vain de ne vouloir utiliser qu'un même modèle sur l'Afrique de l'Ouest. L'idée serait de tester un ensemble de modèles sur les données existantes et d'analyser les différents résultats obtenus et, en particulier, quel est le modèle qui se cale le mieux et pourquoi ? Cela est-il lié aux données disponibles ou à des facteurs explicatifs évidents ? ... L'objectif serait de proposer ainsi une cartographie des « meilleurs » modèles en fonctions de critères qu'il faut définir. C'est une vision particulière de la « régionalisation ».

Parmi les critères de choix, on peut citer ceux liés au calcul d'une fonction coût ou d'une fonction objectif. Mais ils ne me semblent pas suffisants. Le critère primordial pourrait être la quantification des incertitudes qui accompagnent les résultats de la modélisation. C'est avant tout sur cet aspect là qu'il faut se faire un choix de tel ou tel modèle. J'y reviendrai dans la partie suivante.

Avant de terminer cette partie sur la régionalisation (définie ici comme essayer d'établir des lois à une échelle régionale permettant de déterminer les valeurs des paramètres pour des bassins non jaugés en

exploitant les informations sur des sites jaugeés voisins sur lesquels on peut caler le modèle), je souhaiterais faire les remarques suivantes :

- avant de débiter le travail mené dans la cadre du projet ECCO-PNRH 2003, des essais à partir d'une version journalistique de GR avaient révélé que même en supprimant aléatoirement 70% des données disponibles d'une chronique de débit, on pouvait caler le modèle de la même façon que si l'on disposait de toutes les données disponibles, et ce pour un bassin en régime tropical pur. Ce résultat montre donc que si l'information est très rare, il peut être quand même être possible de caler correctement un modèle hydrologique ; il suffit qu'il y ait l'information nécessaire et suffisante ... ;
- je souhaiterais d'ailleurs pousser plus loin les travaux que nous avons menés dans le cadre du programme ECCO-PNRH 2003, explorer une voie différente où l'on exploite à la fois une information régionale et une information ponctuelle sur les débits. La classification des régimes d'écoulement de Rodier qui a servi de base pour nos travaux reste d'actualité même si le contexte climatique a évolué depuis son établissement. Mais, depuis quelques décennies, les activités humaines jouent un rôle de plus en plus important dans les mécanismes de transformation de pluie en débit. Si il est envisageable de mettre à jour la classification à partir de données purement climatiques, il apparaît encore difficile d'incorporer une information liée aux activités humaines dont son impact dépend aussi de l'environnement. La modélisation peut alors être utile en permettant de regrouper des bassins dont l'évolution de la relation Pluie - Débit (modélisant correctement le comportement hydrologique des bassins versants ?) est semblable.
- les essais de régionalisation s'appuyant sur la modélisation n'ont jusque là pas abouti. Pour autant, cela ne signifie pas que cette voie de recherche est une impasse. Si l'aspect de régionalisation sur un concept de « voisinage géographique » semble devoir être abandonné, c'est que les données utilisées jusque là (se limitant bien souvent aux seules données climatiques) n'expliquent pas à elles seules les écoulements ; c'est que d'autres caractéristiques inhérentes aux bassins de réception des précipitations expliquent bien plus fortement les écoulements. A l'heure des images satellites et des systèmes d'information géographique, une quantité d'information est dorénavant disponible au sein de laquelle il faut chercher, informations liées à la physiographie des bassins, informations liées au paysage ... Il ne me semblerait pas inintéressant de refaire « tourner » des ACP ou tout autre outil d'analyses statistiques exploratoires en combinant toutes ces nouvelles données avec des comportements en modélisation de bassins ;

### Incertitudes et erreurs en modélisation

Trop peu d'attention en modélisation hydrologique se porte sur l'analyse des incertitudes ou des erreurs<sup>18</sup> : sur les données que l'on a dans les modèles, aussi bien les données d'entrée mais aussi les données de sortie ; sur la structure du modèle et sur la détermination des paramètres eux-mêmes. Dans ces conditions, quelle fiabilité donner à une sortie de modèle ? C'est l'une des difficultés majeures à laquelle se heurte la modélisation hydrologique.

En complément de ce qui a été proposé auparavant, il faut mesurer l'influence des incertitudes - erreurs que l'on peut avoir sur les écoulements ; elles sont multiples : erreur de lecture du limnigraphe ou de l'échelle limnimétrique, erreur de transcription sur le papier, erreur de lecture de la courbe de tarage, erreur liée au détarage de la station, ..., recopie « accidentelle ou intentionnelle » de valeurs précédemment observées, « interpolation » des lecteurs en cas d'absence, ...

Les comparaisons des différents résultats d'analyse sur :

- l'influence des erreurs - incertitudes des données d'entrée des modèles sur la détermination des paramètres et sur les sorties en résultant,
- l'influence des erreurs - incertitudes des paramètres sur les sorties en résultant,

---

<sup>18</sup> Isabella ZIN (2002). Incertitudes et Ambiguïté dans la Modélisation Hydrologique, thèse INPG, 200 p.

- l'influence des erreurs - incertitudes des sorties sur les valeurs des paramètres,
- l'influence des fonctions critères choisies de façon subjective pour déterminer les jeux optimaux de paramètre,

faites inter - modèles doivent permettre d'appréhender les erreurs - incertitudes que l'on pourrait lier à la structure du modèle même.

Pour ce, l'outil « région de confiance » avec lequel nous avons déjà travaillé et des approches globales pour l'évaluation des incertitudes de modélisation (Méthode GLUE<sup>19</sup>, du « recuit simulé »<sup>20</sup>, ...) devraient nous permettre de mieux quantifier les incertitudes qui affectent la modélisation.

Globalement, il n'est pas toujours clair de savoir quand et où doit-on utiliser tel ou tel modèle et telles ou telles données. Cela n'est pas clair pour les scientifiques et encore moins pour les utilisateurs de ces modèles. L'objectif est donc de produire un système - expert qui permette de guider dans leur choix des utilisateurs, qu'ils soient chercheurs ou autres, en fournissant par exemple des cartes « d'applicabilité » des modèles, des données d'entrée et des incertitudes de ces modèles.

### Mise en place d'une plate-forme informatique

De nombreux outils informatiques ont été mis au point au sein de l'équipe qui permettent différents traitements. Certains ont été poussés à un niveau tel de développement qu'ils ont été distribués à des partenaires comme EMILE et KHRONOSTAT. Le premier est une plate-forme de modélisation hydrologique à pas de temps journalier qui comprend une version de GR, le modèle CREC et le modèle MODGLO. Le second est une plate-forme de traitement statistique de séries chronologiques. Sinon, pour nos besoins propres de recherche, des logiciels ont été écrits mais ne sont pas suffisamment conviviaux pour être distribués.

Autour de la base de données SIEREM déjà évoquée plus haut, il serait profitable à tous, équipe HSM et partenaires, de mettre en place un outil informatique qui permettrait de réaliser l'ensemble des traitements pour lesquels nous avons acquis un certain savoir-faire. SIEREM peut fournir des données ponctuelles et/ou spatialisées, passées ou futures.

A partir des données ponctuelles, l'ensemble des traitements faits dans le programme ICCARE a été programmé : contrôle de données, constitutions de séries chronologiques de variables telles que la pluviométrie annuelle, saisonnière, mensuelle, décadaire et journalière, idem pour les débits, dates de début et de fin de saison des pluies, nombre de jours de pluie, ... Ces séries peuvent être analysées par le logiciel Khronostat ou servir de données d'entrée pour la construction de grilles interpolées.

A partir des données spatialisées, une plate-forme de modélisation à pas de temps mensuel écrite pour le programme VAHYNE peut être utilisée pour faire des calages-validations ou des simulations d'écoulement. LA partie utilisation des résultats est à peaufiner mais le travail fait pour EMILE pourrait servir de base à la réflexion.

L'objectif est de permettre d'avoir un outil qui permette une analyse et un suivi de la variabilité climatique par des traitements de séries chronologiques qui porte pour le moment que sur de « l'univariable » mais qui pourrait être étendu au « multivariable ». La partie modélisation de cette plate-forme offrirait la possibilité à l'utilisateur de choisir (voire d'orienter son choix) un modèle hydrologique qu'il pourrait utiliser à des buts de calage ou de simulation.

## Conclusion

L'Hydrologie reste comme la science qui tente de répondre à la question<sup>21</sup> « que devient l'eau de pluie ? ». On observe cependant une évolution de la recherche en Hydrologie. L'AISH a lancé la

<sup>19</sup> Keith BEVEN (1989). Changing ideas in Hydrology : the case of physically-based models. J. of Hyd., 105, 157-172

<sup>20</sup> Eric GAUME, J.P. VILLENEUVE, M. DESBORDES (1998). Uncertainty assessment and analysis of the calibrated parameter values of a urban storm water quality model. J. of Hyd., 210, 38-50

<sup>21</sup> H.L. PENMAN (1961). Weather, plant and soil factors in hydrology, Weather, 16, 207-219

décennie PUB qui n'est en fait qu'une nouvelle structuration de la recherche en Hydrologie. Peut-être que les chercheurs s'éparpillaient un peu trop auparavant pour les instances dirigeantes de l'AISH ? Dorénavant, on propose un cadre de recherche qui rassemble toutes les énergies de recherche : tendre vers une réduction des incertitudes en modélisation et tendre vers une modélisation qui ne nécessite plus de données de calage.

Il était probablement temps puisque les modèles hydrologiques ont pris de plus en plus d'importance et sont acceptés dans les processus de gestion des ressources naturelles, de construction d'ouvrages de stockage ou de franchissement, d'aménagements à l'échelle de la région. On peut anticiper que dans un futur très proche (cela est d'ailleurs déjà en cours !), on couplera ces modèles avec des modèles atmosphériques, écologiques, économiques, sociaux, juridiques, de santé (suivi des épidémies), ... et des traitements d'images satellites, des systèmes d'information géographiques, des modèles numériques de terrain, ...

Toute cette animation autour de la recherche est à relier à une demande sociétale de plus en plus forte qui désire une gestion intégrée de l'environnement et un certain bien-être. La partie « hydrologie » de ce système informatisé de gestion n'en est qu'un de ses compartiments.

Une chose est certaine, l'Hydrologie doit s'ouvrir à d'autres scientifiques qui ont des thématiques apparemment éloignées de nous mais dont l'objet est le même, l'étude de l'environnement. Cela passera nécessairement par une étape de globalisation de l'Hydrologie, non seulement au sens de l'échelle de travail mais aussi, et surtout, au sens de la description des processus.

De nouvelles disciplines se créent comme l'Ecohydrologie (sans savoir clairement ce que ce terme inclut) ou comme l'Ecologie du Paysage (« landscape ecology »). Pour ma part, je souhaite que l'on se rapproche de ces derniers. « Initialement conçue pour rapprocher la Géographie et l'Ecologie par l'étude des liens entre configuration de l'espace et processus écologiques, l'Ecologie du Paysage contribue aussi au rapprochement entre les sciences de la nature et de la société, en traitant des paysages comme des territoires anthropisés. A ce titre, l'Ecologie du Paysage s'est faite une place dans les sciences agronomiques, en abordant le problème des implications écologiques de la dynamique des paysages agricoles<sup>22</sup> ». Des recherches se développent sur les relations entre les activités humaines, sur le rôle de l'homme, et la dynamique des paysages et ses conséquences sur la biodiversité et les flux. C'est sur ce dernier point que nous pouvons nous apporter mutuellement une expertise.

Ces chercheurs assimilent bien souvent l'écologie du paysage à une « Méta-Ecologie », ce qui renforce encore plus le caractère spatial et global dans le sens de l'échelle de travail. Par analogie, l'Hydrologie telle que nous la pratiquons au sein de l'équipe est une « Méta-Hydrologie ». Une Méta-Hydrologie tournée vers le développement en coopération.

Je souhaite qu'à l'avenir nos travaux soient mieux valorisés qu'ils ne le sont maintenant. Les affectations et les missions effectuées en Afrique nous ont permis de mieux connaître nos partenaires qui face à de nombreux sujets de société ne réagissent pas comme les gens du Nord pourraient le faire. On veut toujours transposer au Sud ce que l'on fait au Nord et bien souvent, on aboutit à une impasse. La plateforme informatique de modélisation ainsi que le système-expert que je souhaite mettre en forme et en place doivent rendre plus accessible nos résultats de recherche, non seulement à la communauté scientifique de ces pays, mais aussi et surtout aux responsables du développement, cadres administratifs, hommes politiques, bailleurs de fonds.

Je compte également continuer à m'investir dans la consolidation du partenariat Nord-Sud en développant de plus en plus des activités Sud-Sud qui doivent être le moteur de l'émergence d'une participation plus riche des nos partenaires du Sud à la recherche internationale. Friend AOC répond à cette philosophie.

---

<sup>22</sup> Emmanuel TORQUEBIAU (2005). Annonce d'une journée scientifique « CIRAD – INRA » sur l'Ecologie du Paysage, Montpellier.

# **Annexes**



# Annexe 1 – Liste des publications et communications

---

## Articles parus dans des Revues scientifiques indexées à comité de lecture (RS-i)

94-1, Paturel JE, Chocat B. Analysis of the Rain Phenomenon at a Fine Spatial Scale. *Water Science and Technology*, 1994, 29(1-2): 31-37

95-1, Paturel JE, Servat E, Vassiliadis A. Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data - case of the GR2M model. *Journal of Hydrology*, 1995, 168(1-4): 111-126

96-1, Aka A, Lubes H, Masson JM, Servat E, Paturel JE, Kouame B. Analysis of the temporal trends of runoffs in Ivory Coast - Statistical approach and phenomena characterization. *Hydrological Sciences Journal*, 1996, 41(6): 959-970

97-1, Servat E, Paturel JE, Lubes H, Kouame B, Ouedraogo M, Masson JM. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea - Part one: detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *Journal of Hydrology*, 1997, 191: 1-15

97-2, Paturel JE, Servat E, Kouame B, Lubes H, Ouedraogo M, Masson JM. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea - Part two: an integrated regional approach. *Journal of Hydrology*, 1997, 191: 16-36

97-3, Servat E, Paturel JE, Lubes H, Kouame B, Masson JM. Variabilité des régimes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Compte-Rendus de l'Académie des Sciences - Géosciences de surface*, 1997, 324: 835-838

97-4, Servat E, Paturel JE, Lubes H, Kouame B, Travaglio M, Marieu B. De la diminution des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Compte-Rendus de l'Académie des Sciences - Géosciences de surface*, 1997, 325: 679-682

97-5, Paturel JE, Servat E, Lubes-Niel H, Delattre MO. Variabilité climatique et analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Compte-Rendus de l'Académie des Sciences - Géosciences de surface*, 1997, 325: 779-782

98-1, Gautier F, Lubes-Niel H, Sabatier R, Masson JM, Paturel JE, Servat E. Etude de la variabilité du régime pluviométrique de l'Afrique de l'Ouest non sahélienne entre 1950 et 1989 par une analyse multivariée des résultats de tests statistiques d'homogénéité de séries chronologiques. *Hydrological Sciences Journal*, 1998, 43(6): 921-936

98-2, Paturel JE, Servat E, Lubes-Niel H, Delattre MO. 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*, 1998, 43(6): 937-946

98-3, Khodja H, Lubes-Niel H, Sabatier R, Masson JM, Servat E, Paturel JE. Analyse spatio-temporelle de données pluviométriques en Afrique de l'Ouest. Recherche d'une rupture en moyenne. Une alternative intéressante : Les tests de permutations. *Revue de Statistiques Appliquées*, 1998, XLVI(1): 95-110

98-4, Brou Yao T, Servat E, Paturel JE. Contribution à l'analyse des inter-relations entre activités humaines et variabilité climatique : cas du Sud forestier ivoirien. *Compte-Rendus de l'Académie des Sciences - Géosciences de surface*, 1998, 327: 833-838

03-1, Paturel JE, Ouedraogo M, Servat E, Mahé G, Dezetter A. The concept of hydropluviometric normal in West and central Africa in a context of climatic variability. *Hydrological Sciences Journal*, 2003, 48(1): 125-137

03-2, Lubes-Niel H, Paturel JE, Servat E. Study of parameter stability of a lumped hydrologic model in a context of climatic variability. *Journal of Hydrology*, 2003, 278: 213-230

03-3, Paturel JE, Ouedraogo M, Servat E., Mahé G, Conway D, Dezetter A. Influence of the spatialization of data on the modelling of monthly river regimes in West Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 2003, 48(6): 881-890

05-1, Mahé G, Paturel JE, Servat E, Conway D, Dezetter A. The impact of land use change on soil water holding capacity and river modelling in the Nakambe river, Burkina Faso. Journal of Hydrology, 2005, 300(1-4): 33-43

05-2, Diello P, Mahé G, Paturel JE, Dezetter A, Delclaux F, Servat E, Ouattara F. Relations indices de végétation – pluie au Burkina Faso : cas du bassin versant du Nakambé. Accepté à Hydrological Sciences Journal

05-3, Lienou G, Mahé G, Olivry JC, Naah E, Sigha-Nkamdjou L, Sighomnou D, Servat E, Ndam-Ngoupayou J, Ekodeck GE, Paturel JE. Régime des flux de matières solides en suspension au Cameroun : revue et synthèse à l'échelle des principaux écosystèmes ; diversité climatique et actions anthropiques. Accepté à Hydrological Sciences Journal

05-4, Paturel JE, Girard S, Mahé G, L'Aour A, Ardoin S, Dezetter A, Servat E. Flow simulation in West Africa: implementation of a space-monthly hydrological modelling procedure. Soumis à Journal of Hydrology

05-5, Mahé G, Girard S, Paturel JE, New A, L'Aour-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. A soumettre

05-6, Paturel JE, Barrau C, Mahé G, Dezetter A, Servat E. Impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale. A soumettre

05-7, Paturel JE, Boubacar I, L'Aour-Cres A, Mahé G, Niel H, Dezetter A, Servat E. Manifestation des changements pluviométriques en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale. A soumettre

05-8, Liéno G, Mahé G, Paturel JE, Servat E, Niel H, Olivry JC, Sighomnou D, Ekodeck GE, Dezetter A. Changements des régimes hydrologiques des rivières du sud-Cameroun : un impact du changement climatique en zone équatoriale ? A soumettre

### **Articles parus dans des Revues scientifiques non-indexées à comité de lecture (RS-ni)**

93-1, Paturel JE, Chocat B. Contribution à l'analyse du risque en Hydrologie Urbaine. Hydrologie Continentale, 1993, 8(1): 51-61

95-1, Paturel JE, Servat E, Kouame B, Boyer JF, Lubes H, Masson JM. Manifestations de la sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. Sécheresse, 1995, 6(1): 95-102.

98-1, Paturel JE, Servat E, Lubes-Niel H, Kouame B, Masson J M, Travaglio M, Marieu B. Variabilité des régimes pluviométriques et hydrologiques en cette fin de siècle en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne. Sud Sciences et Technologies, 1998, 2: 44-52

98-2, Lubes-Niel H, Masson JM, Paturel JE, Servat E. Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. Revue des Sciences de l'Eau, 1998, 11(3): 383-408

99-1, Servat E, Paturel JE, Lubes-Niel H, Kouamé B, Masson JM, Travaglio M, Marieu B. De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. Revue des Sciences de l'Eau, 1999, 12(2): 363-388

00-1, Paturel JE, Mahé G, Servat E. Bilan de cinq années d'activité du projet FRIEND AOC (octobre 1994 - décembre 1999). Sud Sciences et Technologies Sciences de l'Eau, EIERS, Ouagadougou, 2000, 5: 55-59

02-1, Paturel JE, Koukponou P, L'Aour, A, Ouattara F, Mahé G, Cres FN. Variabilité du climat du Burkina Faso au cours de la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle. Sud Sciences et Technologies, groupe des Ecoles EIERS - ETSHER, Ouagadougou, 2002, 8: 41-49

02-2, Sangare S, Mahé G, Paturel JE, Bangoura Y. Bilan hydrologique du fleuve Niger en Guinée de 1950 à 2000. Sud Sciences et Technologies, groupe des Ecoles EIERS - ETSHER, Ouagadougou, 2002, 9: 4-16

02-3, Girard S, Paturel JE, Mahé G, Ouattara F, L'Aour A. Spatialisation des pluies au Burkina Faso : impact de la méthode et de la source des données. Sud Sciences et Technologies, groupe des Ecoles EIER - ETSHER, Ouagadougou, 2002, 9: 17-24

03-1, Diello P, Paturel JE, Mahé G. Approche d'identification d'un réseau climatique pour le suivi des modifications du climat au Burkina Faso. Sud Sciences et Technologies Sciences de l'Eau, groupe des Ecoles EIER - ETSHER, Ouagadougou, 2003, 10, 18-25

03-2, Hamatan M, Mahé G, Servat E, Paturel JE, Amani A. Synthèse et évaluation des prévisions saisonnières en Afrique de l'Ouest. Accepté à Sécheresse

### **Articles parus dans des revues diverses (RS-d)**

96-1, Servat E, Paturel JE, Lubes H. La sécheresse gagne l'Afrique Tropicale. La Recherche, 1996, 290: 24-25

97-1, Servat E, Niel-Lubes H, Paturel JE. Mise en évidence d'une variabilité pluviométrique dans les régions humides d'Afrique Tropicale. MEDIAS, 1997, 9 : 33-34

### **Ouvrages – auteur de chapitre (O-ac)**

97-1, Servat E, Paturel JE, Lubès-Niel H, Kouamé B, Fritsch JM Régimes tropicaux et tendances climatiques. FRIEND 3<sup>rd</sup> report : 1994-1997, 1997, CEMAGREF Ed., Antony, France

97-2, Paturel JE, Lubès-Niel H, Servat E, Fritsch JM. Longues séries pluviométriques en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. FRIEND 3<sup>rd</sup> report : 1994-1997, 1997, CEMAGREF Ed., Antony, France

### **Ouvrages – éditeur scientifique (O-es)**

96-1, Fritsch JM, Paturel JE, Servat E. Douzièmes Journées Hydrologiques de l'ORSTOM. Actes des XIIèmes Journées Hydrologiques: "Réseaux hydrométriques, réseaux télématiques, réseaux scientifiques: nouveaux visages de l'Hydrologie Régionale en Afrique. Montpellier, 10 et 11 octobre 1996. Jean-Marie Fritsch, Jean-Emmanuel Paturel et Eric Servat éditeurs scientifiques. Actes disponibles sous la forme d'un CD-ROM, 1998

### **Communications – congrès internationaux (C-ci)**

93-1, Paturel JE, Chocat B. An Alternating Use of Rain Gaging Data. 'Sixth International Conference on Urban Storm Drainage', Niagara Falls, Ontario, Canada, 12-17 Septembre 1993

93-2, Paturel JE, Chocat B. Analysis of the Rain Phenomenon at a Fine Spatial Scale. 'Sixth International Conference on Urban Storm Drainage', Niagara Falls, Ontario, Canada, 12-17 Septembre 1993

94-1, Boyer JF, Servat E, Paturel JE, Kouame B. HEP-BASE : Example of the use of a database management system under Windows for the management of hydroclimatological data. 'First International Conference on HYDROINFORMATICS', Delft, The Netherlands, 19-23 Septembre 1994

94-2, Boyer JF, Servat E, Paturel JE, Kouame B. Exemple d'utilisation d'un SGBD sous Windows pour la gestion de données hydroclimatologiques - HEP-BASE : base de données conçue avec Paradox Windows. 'Deuxième Colloque Africain de Recherche en Informatique', Ouagadougou, Burkina Faso, 12-18 Octobre 1994

95-1, Boyer JF, Servat E, Paturel JE, Kouame B. Managing Hydrologic and Climatic Data under Windows Environment - HEP-BASE : a Database designed with Paradox 4.5 for Windows. 'WMO International Conference on Meteorological and Hydrological Technology and its Management - METEOHYTEC 21', Genève, 22-26 Mai 1995

95-2, Lubes H, Paturel JE, Servat E, Masson JM, Kouame B. Analysis of annual rainfall series in Ivory Coast in order to detect climatic variations. 'Sixth International Meeting on Statistical Climatology', Galway, Ireland, 19-23 Juin 1995

- 96-1, Paturel JE, Servat E, Lubes H, Kouame B, Travaglio M, Ouedraogo M. Characterization of the different features of a rainfall variability in Ivory Coast. 'EGS-XXI General Assembly', La Haye, 6-10 Mai 1996
- 96-2, Aka A, Lubes H, Servat E, Paturel JE, Masson JM. Variability of runoff of some rivers in the non sahelian western Africa. 'EGS-XXI General Assembly', La Haye, 6-10 Mai 1996
- 96-3, Servat E, Paturel JE, Lubes H, Kouame B, Travaglio M, Marieu B. Rainfall variability at a regional scale : the case of the non sahelian western and central Africa. 'EGS-XXI General Assembly', La Haye, 6-10 Mai 1996
- 97-1, Servat E, Paturel JE, Lubes H, Marieu B, Kouame B, Travaglio M. Nouvelles conditions hydrologiques en Afrique de l'Ouest et Centrale. '5ème assemblée scientifique de l'AISH', Rabat, Maroc, 23 Avril-3 Mai 1997
- 97-2, Cappelaere B, Paturel JE, Servat E, Guyot JL, Kiesslich B. Prévision des crues de grands fleuves tropicaux : exemples de l'amazone (Brésil) et du Chari (Tchad). '5ème assemblée scientifique de l'AISH', Rabat, Maroc, 23 Avril-3 Mai 1997
- 97-3, Servat E, Kouamé B, Dezetter A, Paturel JE. Modélisation Pluie-Débit et prévision des apports à l'exutoire des bassins versants - Essai de prédétermination des paramètres de modèles - Cas de la Côte d'Ivoire. '5ème assemblée scientifique de l'AISH', Rabat, Maroc, 23 Avril-3 Mai 1997
- 97-4, Servat E, Paturel JE, Kouame B, Lubes H, Masson JM, Travaglio M, Marieu B. Modification des régimes d'écoulement en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne et conséquences sur les ressources en eau. '3rd International Conference on FRIEND', Postojna, Slovenia, 1-4 Octobre 1997
- 97-5, Paturel JE, Servat E, Lubes H, Delattre MO. Etude des séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. '3rd International Conference on FRIEND', Postojna, Slovenia, 1-4 Octobre 1997
- 98-1, Servat E, Paturel JE, Lubes-Niel H. Variabilité des ressources en eau en Afrique Tropicale. 'Conférence Ouest-Africaine sur la gestion intégrée des ressources en eau', Ouagadougou, Burkina Faso, 3-5 Mars 1998
- 98-2, Bigot S, Moron V, Melice JL, Servat E, Paturel JE. Fluctuations pluviométriques et analyse fréquentielle de la pluviosité en Afrique Centrale. 'Abidjan'98', Abidjan, Côte d'Ivoire, 16-19 Novembre 1998
- 98-3, Hubert P, Servat E, Paturel JE, Kouamé B, Bendjoudi H, Carbonnel JP, Lubès-Niel H. La procédure de segmentation, dix ans après. 'Abidjan'98', Abidjan, Côte d'Ivoire, 16-19 Novembre 1998
- 98-4, Ouedraogo M, Lubès-Niel H, Masson JM, Servat E, Paturel JE. Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation Pluie-Débit autour des années 1970 en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. 'Abidjan'98', Abidjan, Côte d'Ivoire, 16-19 Novembre 1998
- 98-5, Servat E, Paturel JE, Kouamé B, Travaglio M, Ouedraogo M, Boyer JF, Lubès-Niel H, Fritsch JM, Masson JM, Marieu B. Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. 'Abidjan'98', Abidjan, Côte d'Ivoire, 16-19 Novembre 1998
- 98-6, Brou Yao T, Servat E, Paturel JE. Activités humaines et variabilité climatique : cas du Sud forestier ivoirien. 'Abidjan'98', Abidjan, Côte d'Ivoire, 16-19 Novembre 1998
- 99-1, Aka A, Servat E, Paturel JE, Dezetter A, Lubes-Niel H, Fritsch JM, Masson JM. Influences combinées de la sécheresse et de la pression anthropique sur un système d'eau aménagé en Afrique de l'ouest. Cas du bassin du Bandama (Côte d'Ivoire). 'XXI General Assembly of IUGG', IAHS Symposium S1. Birmingham, UK. July 19-29, 1999
- 99-2, Ouedraogo M, Servat E, Paturel JE, Kouamé B, Travaglio M, Lubes-Niel H, Masson JM. Incidences éventuelles sur la relation pluie-débit d'un contexte régional de diminution des ressources en eau en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne. 'XXI General Assembly of IUGG', IAHS Symposium S1. Birmingham, UK. July 19-29, 1999

- 00-1, Ouedraogo M, Paturel JE, Servat E. Possible impacts on the rainfall-runoff relationships of a regional decrease context of water resources in western and central Africa. 'EGS XXV General Assembly'. Nice, France. April 2000
- 01-1, Ouedraogo M, Paturel JE, Mahé G, Servat E, Dezetter A, Conway D. Influence de la nature et de l'origine des données sur la modélisation hydrologique de grands bassins versants en Afrique de l'Ouest. '6<sup>th</sup> Scientific Assembly of the IAHS', IAHS Symposium S5. Maastricht, the Netherlands. July 18-27, 2001
- 02-1, Mahé G, Dray A, Paturel JE, L'Aour A, Kone F, Manga M, Cres FN, Djoukam J, Maïga AH, Ouedraogo M, Conway D, Servat E. Climatic and anthropic impacts on the hydrological regime of the Nakambe river, Burkina-Faso. FRIEND quadriennial meeting, Cape Town, South Africa, March 2002
- 02-2, Ouedraogo M, Paturel JE, Servat E, Mahé G. 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. FRIEND quadriennial meeting, Cape Town, South Africa, March 2002
- 02-3, Mariko A, Mahé G, Royer A, Orange D, Amani A, Servat E, Nonguierma A, Dezetter A, Nguetora M, Paturel JE. Analyse multispectrale des données de basse résolution NOAA/AVHRR appliquée à l'identification des milieux inondés en zone soudano-sahélienne. FRIEND quadriennial meeting, Cape Town, South Africa, March 2002
- 02-4, Mahe G, Paturel JE, Conway D, Servat E, Ouedraogo M.. 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
- 02-5, Girard S, Paturel JE, Mahé G, Ouattara F. 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
- 02-6, Diello P, Paturel JE, Ouattara F, Mahé G. identification d'un réseau climatique optimal pour le suivi des modifications du climat au Burkina Faso. ENVIROWATER 2002, Ouagadougou, Burkina Faso, 5-8 Novembre 2002
- 03-1, Mahé G, Leduc C, Amani A, Paturel JE, Girard S, Servat E. Recent runoff increase in Sahelo-Sudanian areas and impact on water resources. Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides - Montpellier 2003, France, 1-4 avril 2003
- 03-2, Ardoin S, Servat E, Lubès-Niel H, Paturel JE, Mahé G, Boyer JF. Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest et centrale. Caractérisation de la situation de la décennie 90, par rapport aux précédentes, en zones sahéliennes et sub-sahariennes. Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides - Montpellier 2003, France, 1-4 avril 2003
- 03-3, Dezetter A, Delclaux F, Leconte, Servat E, Mahé G, Paturel JE. Prise en compte de la dynamique de la végétation à l'aide de données NOAA-AVHRR dans la modélisation pluie-débit au pas de temps mensuel en Afrique de l'Ouest. Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides - Montpellier 2003, France, 1-4 avril 2003
- 03-4, Ardoin S, Servat E, Mahé G, Dezetter A, Paturel JE, Boyer JF, Dieulin C. Analyse de la variabilité des ressources en eau en Afrique de l'Ouest sahélienne par modélisation hydrologique à grands pas de temps et d'espace. Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides - Montpellier 2003, France, 1-4 avril 2003
- 03-5, Paturel JE, Ouedraogo M, Mahé G, Servat E, Dezetter A. Utilisation de modèles hydrologiques pour évaluer les ressources en eau de surface et leur évolution spatio-temporelle - application à l'Afrique de l'ouest. Water Resources Systems - Water Availability and Global Change, Sapporo, Japon, Juillet 2003. IAHS Publ. no. 280, 2003. p. 117-123.
- 05-1, Lienou G, Mahé G, Servat E, Lubès-Niel H, Olivry JC, Sighomnou D, Ekodeck GE, Paturel JE, Dezetter A. Changement des régimes hydrologiques des rivières du sud-Cameroun : un impact du changement climatique en zone équatoriale ? Accepté à VIIème Assemblée Scientifique de l'AISH, 3-9 Avril 2005, Foz do Iguacu, Brésil.
- 05-2, Ardoin-Bardin S, Dezetter A, Servat E, Mahé G, Paturel JE, Dieulin C, Casenave L. Evaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau d'Afrique de l'Ouest et Centrale. Accepté à VIIème Assemblée Scientifique de l'AISH, 3-9 Avril 2005, Foz do Iguacu, Brésil.

05-3, Laroche C, Mounirou LA, Mar AL, Paturel JE. Necessary hydrometric information for a good estimation of hydrological functioning of watersheds in western Africa. Accepté à VIIème Assemblée Scientifique de l'AISH, 3-9 Avril 2005, Foz do Iguaçu, Brésil.

### **Communications – congrès nationaux (C-cn)**

93-1, Paturel JE. le programme ECOULEES. 'Journées ERREAU', Abidjan, Côte d'Ivoire, 15 Juin 1993

95-1, Kouame B, Paturel JE, Servat E, Boyer JF, Lubes H, Masson JM. Etude de la diminution de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest non sahélienne - Cas de la Côte d'Ivoire, du Ghana, du Togo et du Bénin. 'Journées de l'Eau de l'Association des Sciences de l'Eau de Côte d'Ivoire', Abidjan, 21-22 Mars 1995

95-2, Paturel JE, Servat E, Kouame B, Boyer JF, Lubes H, Masson JM. Procédures d'identification de ruptures dans des séries chronologiques de données de pluie - Modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non sahélienne. 'Conférence à la mémoire de JEAN RODIER', UNESCO, Paris, 3-4 Mai 1995

95-3, Aka A, Lubes H, Masson JM, Kouame B, Paturel JE, Servat E. Analyse statistique de l'évolution des écoulements en Côte d'Ivoire. 'Conférence à la mémoire de JEAN RODIER', UNESCO, Paris, 3-4 Mai 1995

95-4, Servat E, Boyer JF, Paturel JE, Berkhoff C, Kouame B. Différentes approches de développement informatique au sein de FRIEND AOC : des outils pour la recherche et l'Hydrologie opérationnelle, et des supports de formation. 'Conférence à la mémoire de JEAN RODIER', UNESCO, Paris, 3-4 Mai 1995

96-1, Brou Yao T, Servat E, Paturel JE. Evolution du couvert forestier ivoirien sur la période 1950-1990 en relation avec la variabilité du climat et les activités anthropiques. 'Colloque sur la dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux de l'ORSTOM/CNRS', Bondy, France, 20-21 Mars 1996

96-2, Khodja H, Lubes H, Sabatier R, Servat E, Paturel JE. Etude spatio-temporelle de données pluviométriques. 'XIIème Journées Hydrologiques de l'ORSTOM', Montpellier, 10-11 Octobre 1996

96-3, Paturel JE, Lubes H, Servat E, Delattre MO. Séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale. 'XIIème Journées Hydrologiques de l'ORSTOM', Montpellier, 10-11 Octobre 1996

03-1, Paturel JE. Modélisation Hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. PUB-France, CNES, Paris, 17-19 Novembre 2003.

04-1, Paturel JE., Cecchi P. (**Conférenciers invités**) Quelle eau pour demain ? Centre Culturel Français, Ouagadougou, 8 décembre 2004

### **Réunions de travail (W)**

95-1, Paturel JE, Servat E, Kouame B, Boyer JF, Lubes H, Masson JM. Variabilité pluviométrique en Afrique humide le long du Golfe de Guinée - Approche régionale intégrée. 'Journées FRIEND-AOC', Cotonou, Bénin, 13-14 Décembre 1995

95-2, Aka A, Lubes H, Masson JM, Paturel JE, Servat E. Variabilité des écoulements en Afrique de l'Ouest non-sahélienne. 'Journées FRIEND-AOC', Cotonou, Bénin, 13-14 Décembre 1995

95-3, Brou Yao T, Servat E, Paturel JE, Koli Bi Z. Interactions entre pluviométrie et activités agro-économiques en milieu forestier ivoirien. 'Journées FRIEND-AOC', Cotonou, Bénin, 13-14 Décembre 1995

02-1, Girard S, Paturel JE., Mahe G., Ouattara F., L'Aour A. 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

02-2, Mahe G., Dray A, Paturel JE, L'Aour A, Kone F, Manga M, Cres FN, Djoukam J, Maïga A Ouedraogo M, Conway D, Servat E. Impact climatique et anthropique sur le régime hydrologique du Nakambé au Burkina Faso. Journée Scientifique EIER-ETSHER, Ouagadougou, Burkina Faso, 30 mai 2002

03-1, Paturel JE, FRIEND AOC. Atelier de restitution des résultats du groupe VAHYNE, Ouagadougou – Burkina Faso, 10 juin 2003.

03-2, Paturel JE. Normales pluviométriques et hydrologiques – Afrique de l'Ouest – contexte de changement climatique. Atelier de restitution des résultats du groupe VAHYNE, Ouagadougou – Burkina Faso, 10 juin 2003.

03-3, Paturel JE. Changements climatiques au XX<sup>ème</sup> siècle – cas de l'Afrique de l'Ouest et Centrale. Atelier de restitution des résultats du groupe VAHYNE, Ouagadougou – Burkina Faso, 10 juin 2003.

04-1, Diello P, Servat E, Mahé G, Paturel JE. Interrelations Homme-Climat-Environnement dans le Sahel Burkinabé : impacts sur les ressources en eau, les états de surface et la modélisation hydrologique. Journée Scientifique EIER-ETSHER, Ouagadougou, Burkina Faso, 8 décembre 2004

04-2, Yacouba H, Karambiri H, Boubacar I, Mahé G, Paturel JE, Gautier M, Diello P, Guilliod M, Bassolé J. Impact du changement climatique sur l'hydrodynamisme et l'érosion des sols dans le bassin supérieur du Nakambé .Journée Scientifique EIER-ETSHER, Ouagadougou, Burkina Faso, 8 décembre 2004

04-3, Paturel JE, Boubacar I, L'Aour A, Mahé G. Manifestation des changements pluviométriques au cours du XX<sup>ème</sup> siècle en Afrique de l'Ouest et Centrale. Journée Scientifique EIER-ETSHER, Ouagadougou, Burkina Faso, 8 décembre 2004

04-4, Paturel JE, Boubacar I, L'Aour A. Développement de grilles pluviométriques mensuelles en Afrique de l'Ouest et Centrale. Journée Scientifique EIER-ETSHER, Ouagadougou, Burkina Faso, 8 décembre 2004

04-5, Laroche C, Mounirou LA, Mar AL, Dufresne M, Paturel JE. Impact des changements climatiques avérés en Afrique de l'Ouest et Centrale sur l'utilisation d'un outil de modélisation hydrologique. Journée Scientifique EIER-ETSHER, Ouagadougou, Burkina Faso, 8 décembre 2004

04-6, Mounirou LA; Laroche C; Mar AL; Paturel JE. Application d'un modèle hydrologique au pas de temps mensuel dans un contexte sahélien : Recherche de l'information hydrométrique minimale pour une estimation raisonnable de ses paramètres. Journée Scientifique EIER-ETSHER, Ouagadougou, Burkina Faso, 8 décembre 2004

### **Posters – congrès internationaux (P-ci)**

02-1, Paturel JE, Ouattara F, Mahé G, Lubes-Niel H, L'Aour A, Servat E. Evolution du climat au Burkina-Faso au cours de la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle. FRIEND quadriennial meeting, Cape Town, South Africa, March 2002

02-2, Blanchet F, Denon K, Diarra D, Mahé G, Paturel JE. Possibility of improvement of rice growing under controlled submersion in Mali (Office Riz Segou) using « real time » hydrological data. FRIEND quadriennial meeting, Cape Town, South Africa, March 2002

02-3, Diello P, Paturel JE, Mahé G. Approche d'identification d'un réseau climatique pour le suivi des modifications du climat au Burkina Faso. FRIEND quadriennial meeting, Cape Town, South Africa, March 2002

05-1, Sighomnou D, Sigha-Nkamdjou L, Lienou G, Dezetter A, Mahé G, Servat E, Paturel JE, Olivry JC, Tchoua F, Ekodeck GE. Changement des régimes hydrologiques des rivières du sud-Cameroun : un impact du changement climatique en zone équatoriale ? Accepté à VII<sup>ème</sup> Assemblée Scientifique de l'AISH, 3-9 Avril 2005, Foz do Iguacu, Brésil.

### **Posters – congrès nationaux (P-cn)**

95-1, Lubes H, Aka A, Masson JM, Servat E, Paturel JE, Kouame B. Essais de mise en évidence d'une variation climatique par applications de tests statistiques à des séries chronologiques de débit - Application aux grands fleuves de Cote d'Ivoire. 'Journées BERNIER - Methodes statistiques et bayésiennes en Hydrologie', UNESCO, Paris, 11-13 Septembre 1995

## Emissions radio-diffusées et Interviews (I)

1 interview a été faite à l'occasion de la réunion de travail « restitution des travaux du programme ERREAU » (juin 1993) et a fait l'objet d'un article dans la presse ivoirienne

Les premiers résultats du programme ICCARE ont donné lieu, entre 1996 et 1998, à des émissions de radio (BBC, RFI) et à des articles ou des dépêches dans de nombreux journaux ou revues (Le Figaro Magazine, Le Monde, La Croix, AFP, Marchés Tropicaux, Trans Rural Initiatives, Afrique Express, Jeune Afrique Economie Afrique Agriculture, Daily Telegraph, Johannesburg Star et Futures World News).

1 interview a été faite à l'occasion de la conférence au CCF à Ouagadougou (décembre 2004) « Quelle eau pour demain ? » et a fait l'objet d'un article dans la presse burkinabé

1 interview téléphonique par une journaliste du Monde dans le cadre de recherche qu'elle faisait sur la « sécheresse » en Afrique (décembre 2004)

## Rapports – expertise (R-e)

95-1, Paturel JE. Elaboration d'un modèle de prévision de crues à N'Djamena - Prévision sur le système Char-Logone à hauteur de N'Djamena.

95-2, Paturel JE, Travaglio M. Etude statistique de données climatiques - Parc de la Comoé, Parc de la Maraoué et site de Lamto (Côte d'Ivoire)

01-1, Paturel JE. Commentaires sur le rapport du GIRE sur l'évaluation des ressources en eau superficielles et souterraines du Burkina Faso

04-1, Paturel JE. rapport d'expertise sur la pluviométrie du nord-est de l'Algérie

## Autres (A)

Elaboration d'une fiche d'actualité scientifique de l'ORSTOM en 1998 qui a permis de faire diffuser à une plus large échelle les résultats obtenus dans le cadre du programme ICCARE : tout ou partie de ceux-ci ont été repris dans « La Recherche », « Le Monde », et « Medias »



Annexe 2 – Quelques articles  
ou ouvrages de référence  
utilisés dans mes recherches

---

## Ayant trait à la description de la variabilité climatique ou des ressources en eau

- Abdoudramane D. (1995). Contribution à l'étude hydrologique du bassin versant du Goroubi a Diongoré. Mémoire fin d'études, Agrhymet, Niamey, Niger, 109 p
- Amani A., Nguetora M. (2002). Evidence d'une modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Niamey. In: Van Lannen, H., Demuth, S. (Eds.), *FRIEND 2002 Regional Hydrology: Bridging the Gap Between Research and Practice*, Proceedings of Friend Conference, Cape Town, South Africa, 2002, *IAHS Publ.* No. 274, pp. 449–456.
- Bricquet J.P., Bamba F., Mahé G., Touré M., Olivry, J.C. (1997). Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique. *Rev. Sci. Eau*, 3, 321-337.
- Bigot S., Moron V., Melice J.L., Servat E., Paturel J.E. (1998). Fluctuations pluviométriques et analyse fréquentielle de la pluviosité en Afrique centrale. Conférence Internationale ABIDJAN'98 - Water resources variability in Africa during the 20th century . 16-19 Novembre 1998, Abidjan, Côte d'Ivoire. *IAHS Publ.* n° 252
- Demarée G. (1990). An indication of climatic change as seen from the rainfall data of a Mauritanian station. *Theor. Appl. Climatol.*, 42, 139-147.
- Hubert P., Carbonnel J.P., Chaouche A. (1989). Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.* 110, 349-367.
- Janicot S. (1992). Spatiotemporal variability of West African Rainfall. Part I : Regionalization and typings. *Journal of Climate*, 5, 5, 489-497.
- Janicot S., Fontaine B., (1997). Evolution saisonnière des corrélations entre précipitations en Afrique guinéenne et températures de surface de la mer ((1945-(1994). *C. R. Acad. Sci. Paris*, t.324, série II a.
- Lebel T., Amani A. (1998). Rainfall Estimation in the Sahel: What is the ground truth? *Journal of applied Meteorology*, 38 : 555-568
- Leduc C., Bromley J., Schroeter P. (2000). Water-table fluctuation and recharge in semi-arid climate: some results of the HAPEXSahel hydrodynamic survey (Niger). *J. Hydrol.* 188/189, 123–138.
- L'hote 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.
- L'Hote Y., Mahé G., Somé B, Triboulet J.-P. (2002). Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to (2000; the drought continues. *Hydrol. Sci. J.* 47(5) 563–572.
- L'Hote 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. *Hydrol. Sci. J.* 48(3), 493-495.
- 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* (Proc. Vienne Symposium, August (1991). *IAHS Publ.* n° 201.
- Mahé G., Olivry J.C. (1995). Variations des précipitations et des écoulement en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, 1(6), 109-117.
- Mahé G., Olivry J.C. (1999). Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa. *C. R. Acad. Sci*, t. 328, série IIa, , 621-626.
- Mahé G., L'Hote Y., Olivry J.C., Wotling G. (2001). Trends and discontinuities in regional rainfall of West and Central Africa : (1951-(1989. *Hydrological Sciences*, 46 (2), 211-226.
- Moron V. (1994). Guinean and Sahelian rainfall anomaly indices at annual and monthly scales (1933-1990). *Int. J. Climatol.*, 14, 325-341.
- New M., Hulme M., Jones P. (1999) Representing XXth Century Space-Time Climate Variability – Part I: Development of a (1961-(1990 Mean Monthly Terrestrial Climatology, *J. of Climate*, vol. 12, n°3, 829-856.
- New M., Hulme M., Jones P. (2000). Representing XXth Century Space-Time Climate Variability – Part II: Development of (1901-(1996 Monthly Grids of Terrestrial Surface Climate, *J. of Climate*, vol. 13, n°13, 2217-2238.
- Nicholson S. (1994) Recent rainfall fluctuations in Africa and their relationship to past conditions over the continent, *The Holocene* 4, 2, 121-131.

- Nicholson S.E. (1985). Subsaharan rainfall 1981-84. *J. Clim. Appl. Met.*, 24, 1388-1391.
- Olivry J.C., Bricquet J.P., Mahé G. (1993). Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide. In: *Hydrology of Warm Humid Regions* (Proc. Yokohama Symposium, July (1993). *IAHS Publ.* n° 216.
- Olivry J.C., Bricquet J.P., Bamba F., Diarra M. (1994). Le régime hydrologique du Niger supérieur et le déficit des deux dernières décennies. In: *Quelques données préliminaires sur l'environnement et la qualité des apports du Niger au Sénégal*, ed. ORSTOM - CNRST, Niger.
- Ozer P., Erpicum M., Demarée G., Vandiepenbeeck M. (2003). The Sahelian drought may have ended during the 1990s. Discussion of "Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues". *Hydrol. Sci. J.* 48(3), 489-492
- 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. In: *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and the Water Resources*. Proceedings of Vancouver Symposium, August, *IAHS Publ.* No. 168, pp. 447-461.
- Sircoulon J. (1976). Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses (1913 et 1940). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIII, n°2.
- Sircoulon J. (1987). Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'Ouest depuis le début du 20ème siècle. In: *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources* (Proc. Vancouver Symposium, August (1987). *IAHS Publ.* n° 168.
- Sircoulon J. (1990). Impact possible des changements climatiques à venir sur les ressources en eau des régions arides et semi-arides. *WMO / TD*, n°380.
- Sutcliffe J.V., Knott D.G. (1987). Historical variations in African water resources. In: *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources* (Proc. Vancouver Symposium, August (1987). *IAHS Publ.* n° 168.
- Taweye A., (1995). Contribution à l'étude hydrologique du bassin versant de la Sirba à Garbé-Kourou. Mémoire de fin d'études, Agrhymet, Niamey, Niger, 98 p.
- Todorov A.V. (1985). Sahel, the changing rainfall and the "normals" used for its assessment, *J. Clim. Appl. Met.*, 24, 97-107.
- Wahba G. (1990). Spline Models for observational data. *Society and Industrial and Applied Mathematics*, 169pp.

### **Ayant trait à la définition d'outils méthodologiques**

- Arnell N.W., Reynards N.S. (1996). The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain. *J. Hydrol.* 183, 397-424.
- Bates B.C., (1990). Use of parameter transformations in nonlinear, discrete flood event models. *J. Hydrol.*, 117: 55-79.
- Delhomme, J.P. (1976). Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Thèse de Docteur Ingénieur, Paris 6, Ecole des Mines de Paris, 130p.
- Draper N., Smith H., (1981). Applied regression analysis, 2<sup>nd</sup> edition, Wiley-Interscience.
- Gleick P.H. (1986). Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes. *Journal of Hydrology*, 88 : 97-116
- Guilbot A. (1971). Processus d'optimisation en quatre étapes appliqué à la recherche des paramètres des modèles déterministes. Laboratoire d'Hydrologie et de Modélisation. Université Montpellier, note LHM 16/71
- Hubert P., Carbonnel J.P. (1987). Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.*, 95, 165-183.
- Pettitt A.N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist.* 28(2), 126-135.
- Smith M. (1992). Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. Report. Land and Water Development Division, FAO, Rome.

Thom A. S., Oliver H. R. (1977). On Penman's equation for estimating regional evapotranspiration. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* (193), 345-357.

Thornthwaite C. W., Mather J. R. (1955). The water balance. *Publ. Climatol. Lab. Climatol. Drexel Inst. Technol.* 8 (1), 1-104.

Troutman B.M. (1985). Errors and parameter estimation in Precipitation-Runoff modeling - 1. Theory, *Water Resour. Res.*, 21 (8), 1(195-1213).

### **Ayant trait à la modélisation**

Barrau C. (2003). Impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale - Utilisation du modèle de Yates, rapport de D.E.A, ENSEIHT, Toulouse, France.

Conway D. (1997). A water balance model of the Upper Blue Nile, Ethiopia. *Hydrol. Sci. J.* 42, 265–286.

Conway D., Jones, P. D. (1999). Assessing the impact of future climatic change on the water resources and the hydrology of the Rio de la Plata basin, Argentina. Climatic Research Unit, University of East Anglia.

Girard S. (2002). Simulation des écoulements en Afrique de l'Ouest – mise en œuvre d'une procédure de modélisation mensuelle spatialisée. Note IRD, Ouagadougou.

Kabouya M., (1990). Modélisation pluie-débit au pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale, Thèse doctorat, Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique, Université Paris-Sud, Orsay.

Karambiri H., (2003). Crues et érosion hydrique au Sahel : Etude et modélisation des flux d'eau et de matières sur un petit bassin versant pastoral au nord du Burkina Faso. Thèse Doctorat, Université Paris VI, 341 p + annexes.

Makhlouf Z. (1994). Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de doctorat, Université Paris - Sud.

Makhlouf Z., Michel C., (1994). A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *J. Hydrol.* 162 ((1994), 299-318.

Mouelhi S. (2003). Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel, annuel et pluriannuel, Thèse ENGREF, Paris.

Nash J.E., Sutcliffe J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of pinciple, *Journal of hydrology*, 10 : 282-290

Perrin C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 276 p.

Sorooshian S., Gupta V.K. (1995). Model calibration. In : Computers models of watershed hydrology, Chapter 2, V.P. Singh (Ed.), Water Ressources Publications, 23-68.

Vandewiele G.L., Xu C.Y., Win N.L. (1993). Methodology for constructing monthly water balance on basin scale, 2<sup>nd</sup> edition, Laboratory of Hydrology, Vrije Universiteit Brussel.

Yates D.N. (1997). Approaches to continental scale runoff for integrated assessment models. *J. of Hyd.*, (201, 289-310.

### **Ayant trait à la prise en compte d'une information environnementale**

Casenave A., Valentin C. (1988). Les états de surface de la zone sahélienne. CEE/Orstom Paris, Coll. Didactiques, 202 p.

Dunne K.A., Willmott, C.J. (1996). Global distribution of plant-extractable water capacity of soil. *Int. J. Climatology* 16, 841-889.

FAO-UNESCO (1974-1981). Digitized soil map of the world

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 Sci. Technol.*, EIER/ETSHER 5, 4–14.

Holdridge L.R. (1947). Determination of world plant formations from simple climatic data, *Science*, 105, 367-368.

Holdridge L.R. (1967). Life Zone Ecology, Tropical Science Center, San José.

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. *Hydrol. Process.* 17(8), 1495–1507.

Kavvas M.L., Oki T., Pomeroy J.W. (Eds.), Soil–Vegetation–Atmosphere Transfer Schemes and Large-Scale Hydrological

Leemans R. (1990). Global data sets collected and compiled by the Biophere Project, Working Paper, IIASA-Laxenburg, Austria.

Leemans R., Cramer, W. (1991). The IIASA database for mean monthly values of temperature, precipitation and cloudiness of a global terrestrial grid, Research report RR-91-18, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria.

Mitchell J.F.B. (1983). The seasonal response of a general circulation model to change in CO<sub>2</sub> and sea temperatures, *Quart. J.R. Met. Soc.*, 109, 113-152.

Poppel J.W., Lekkerkerker C.L. (1991). Le suivi de la dégradation de l'environnement par des observations hydrométriques et piézométriques. *Bulletin de liaison du CIEH*, Ouagadougou No. 83.

Yacouba H., Da D.E.C, Yonkeu S., Zombré P., Soulé M. (2002). Caractérisation du ruissellement et de l'érosion hydrique dans le bassin supérieur du Nakambé (Burkina Faso). Proceedings *Envirowater 2002*, 318-325.

Yacouba H., Da Dapola E., Yonkeu S., Zombre P., Soule M., Bagayoko F. (2002). Etude du Processus de Dégradation du Bassin Supérieur du Nakambe (Burkina-Faso) écoulement de Surface et Pertes de Terres liées à l'eau. Deuxième J. Sci. EIER/ETSHER, Ouagadougou, Burkina-Faso, mai (2002, 28–31.

Yonkeu S., Da Dapola E.C., Yacouba H., Bouraima Z., Mamane C., Soulé M., Bagayoko F. (2002). Dynamique de formations végétales dans le bassin supérieur du Nakambé. Deuxièmes Journées Scientifiques du groupe des Ecoles EIER-ETSHER, Ouagadougou, 30 mai (2002, p. 90-96.

## Ouvrages généraux

Ambroise B. (1999). La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant - Processus, Facteurs, Modèles. 2nd édition, Ed. \*H\*G\*A\*, Bucarest, 200 p.

CERESTA (1986) Aide mémoire pratique des techniques statistiques, Revue de Statistiques Appliquées, vol XXXIV, n° spécial.

CIEH 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 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.

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.

Moniod F., Pouyaud B., Sechet P. (1977). Le bassin du fleuve Volta. Coll. Monographies Hydrologiques, ORSTOM, Paris.

Nicholson S.E., Kim J., Hoopingarner J. (1988). Atlas of African rainfall and its interannual variability. Department of Meteorology, Florida State University, Tallahassee, Florida, USA.

Rodier J. (19645). Régimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'ouest du Congo. ORSTOM, Paris.

Roose E. (1977). Erosion et Ruissellement en Afrique de l'Ouest, Vingt Années de Mesures en Petites Parcelles Expérimentales. ORSTOM, Travaux et Documents No. 78, Paris.

Shuttleworth W. J. (1994). Evaporation. In: *Handbook of Hydrology* (ed. by R.D. Maidment), Chapter IV, McGraw-Hill, New York, USA.

# Annexe 3 – Liste des Thèses encadrées

| <b>Etudiant</b> | <b>Université de rattachement</b>                  | <b>Année</b> | <b>Titre des travaux</b>   | <b>Nature / temps encadrement</b>                                   |
|-----------------|--|--------------|--|---|
| A.A. AKA        | Université des Sciences et Techniques du Languedoc | 1994-1998    | Variabilité des écoulements et conséquences sur les activités anthropiques. Cas du bassin versant du Bandama (Côte d'Ivoire)   | <b>Thèse</b> - co-encadrement (33%)                                 |
| T.Y. BROU       | Université de Cocody – Côte d'Ivoire               | 1994-1997    | Analyse et dynamique des précipitations en milieu forestier ivoirien   | <b>Thèse 3<sup>ème</sup> cycle</b> - co-encadrement (50%)           |
| M. OUEDRAOGO    | Université des Sciences et Techniques du Languedoc | 1997-2001    | Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau – Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale | <b>Thèse</b> - co-encadrement (75%)                                 |
| S. ARDOIN       | Université des Sciences et Techniques du Languedoc | 2001-2004    | Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne  | <b>Thèse</b> - co-encadrement (25%)                                 |
| D. SIGHOMNOU    | Université de Yaoundé - Cameroun                   | 2002-2004    | Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau  | <b>Thèse d'Etat</b> - co-encadrement (33%)                          |
| G. LIENOU       | Université de Yaoundé - Cameroun                   | 2002-2005    | Variabilité du climat : implication sur les ressources en eau du Cameroun  | <b>Thèse 3<sup>ème</sup> cycle</b> - co-encadrement (25%)           |
| P. DIELO        | Université des Sciences et Techniques du Languedoc | 2003-...     | Impacts climatiques et anthropiques sur les régimes hydrologiques dans le Sahel burkinabè  | <b>Thèse</b> - co-encadrement (50%)                                 |
| M.A. KOUASSI    | Université de Cocody – Côte d'Ivoire               | 2005-...     | Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique et des actions anthropiques sur les ressources en eau en Côte d'Ivoire   | <b>Thèse</b> - co-encadrement (50%)                                 |
| T.Y. BROU       | Université des Sciences et Techniques de Lille     | 2003-...     | Climat, activités anthropiques et écosystèmes naturels en Côte d'Ivoire : étude des relations entre variabilité climatique, mutations socio-économiques et dynamique des paysages                  | <b>Habilitation à Diriger des Recherches</b> - co-encadrement (33%) |

Annexe 4 – Quelques  
publications personnelles de  
référence



Addendum :

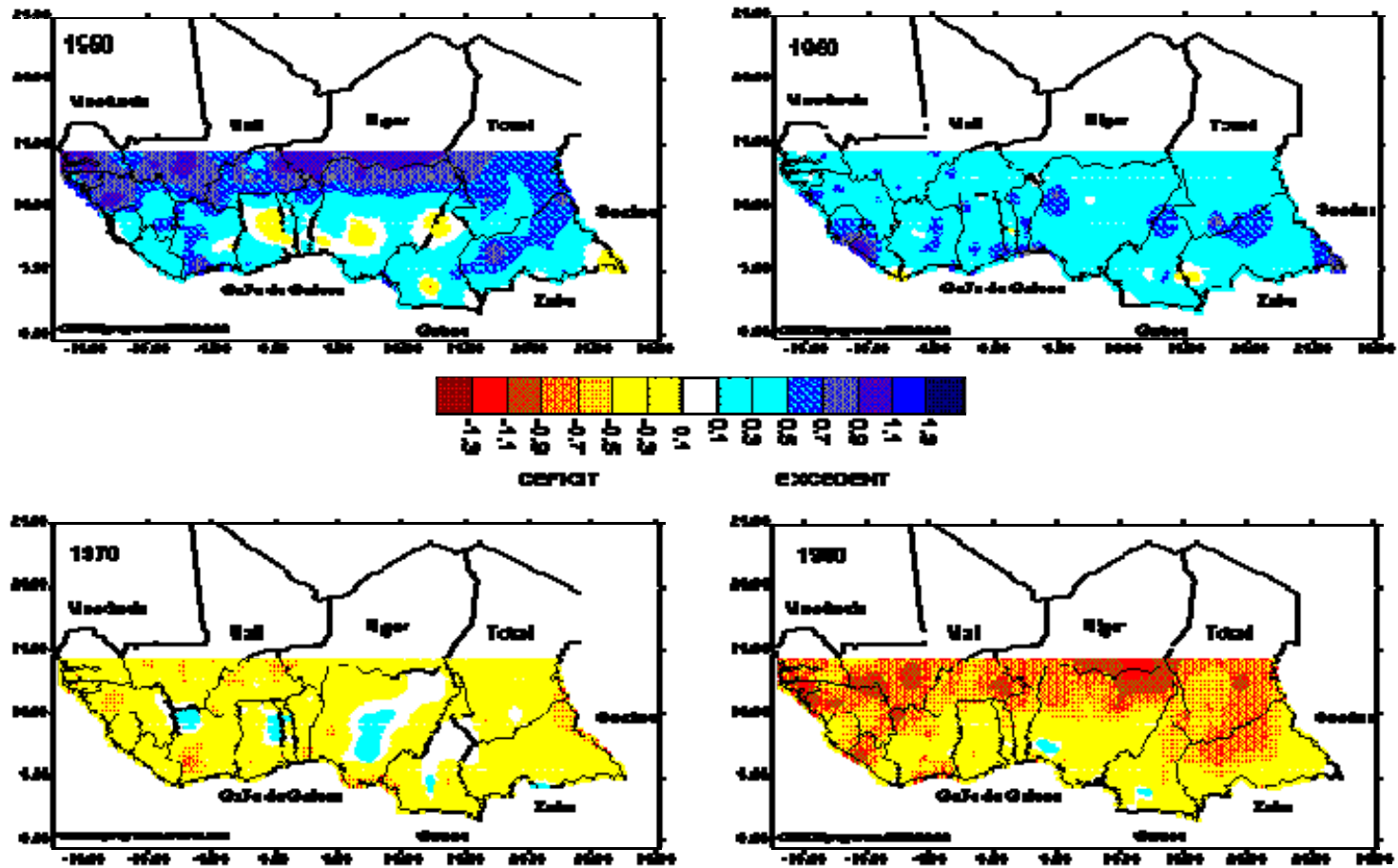


Figure 2 : Plot of precipitations indices for the decades from 1950s to 1980s





ELSEVIER

Journal of Hydrology 191 (1997) 16–36

Journal  
of  
**Hydrology**

## Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea Part II: an integrated regional approach

J.E. Paturel<sup>a,\*</sup>, E. Servat<sup>a</sup>, B. Kouamé<sup>a</sup>, H. Lubès<sup>b</sup>, M. Ouedraogo<sup>a</sup>,  
J.M. Masson<sup>c</sup>

<sup>a</sup>ORSTOM, Programme FRIEND AOC, 06 BP 1203, Cidex 1, Abidjan, Ivory Coast

<sup>b</sup>ORSTOM, Programme FRIEND AOC, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex 1, France

<sup>c</sup>Laboratoire Géofluides–Bassins–Eau, URA-CNRS 1765, Université Montpellier II, Place Eugène Bataillon,  
34095 Montpellier Cedex, France

Received 3 January 1996; revised 29 February 1996; accepted 9 March 1996

---

### Abstract

The analysis presented here deals with the annual precipitation levels and the number of rainy days a year as observed in several countries located along the Gulf of Guinea (Côte d'Ivoire, Ghana, Togo, Bénin, Nigeria) during the decades from the 1950s to the 1980s. The study is based on a set of methods used both for the interpolation and the cartographic representation of the results as well as on statistical methods for the detection of breaks in the time series. It is possible through them to underscore a climatic variability at the regional level at the end of the 1960s and at the beginning of the 1970s, with, however, an important variability in space of the intensity of the phenomenon. The conclusions drawn previously from the study conducted on Côte d'Ivoire do not constitute a unique case. Generally speaking, it can be asserted that the whole region of humid west Africa was affected by a climatic accident that is comparable and in line with what was observed further to the north, in the Sahelian region.

---

### 1. Introduction

The detailed study conducted on Côte d'Ivoire by Servat et al. (1996) demonstrated the existence of a climatic change characterized by a clear decrease in rainfall at the end of the 1960s and beginning of the 1970s. However, a regional integrated approach seems necessary to better assess the importance of the phenomenon, not only from a global viewpoint, to assess a situation that supposedly prevails in the region as a whole, but also from a more

---

\* Corresponding author.

relative viewpoint, to assess a possible spatial variability of the intensity of this phenomenon. In such a case, the consequences on water resources could be very different from one country to another.

This regional approach can indeed be implemented by using available annual rainfall data in all the studied countries (Côte d'Ivoire, Ghana, Togo, Bénin, Nigeria), whereas it cannot be easily envisaged for the number of rainy days, which is a variable that is often difficult to obtain. In the present case, our approach in that field will be limited to a comparison between Côte d'Ivoire, Togo and Benin. As in the case of the study on Côte d'Ivoire, the analysis of the phenomena is based both on procedures for the detection of a break in a time series and on the study of spatialized variations of (1) the isovalue lines of precipitation and number of rainy days, and (2) the indices for deficits and surpluses.

## 2. Data and methods

### 2.1. Data

The data used are those collected at the measurement stations of the national networks in the zone studied. After a selection based on the quality and the length of the series of records available, a set of raingauge stations that offers a sufficiently regular coverage of the region studied was obtained.

Some of the series are shorter than others. These shorter series were investigated with the statistical break detection methods, but were not taken in account for the maps, which were drawn only from the stations that covered the four decades from the 1950s to the 1980s.

### 2.2. Statistical methods for the detection of breaks in time series

The methods for the detection of breaks in the time series used here are the same as those used for the study on Côte d'Ivoire: the Pettitt test (Pettitt, 1979), the Bayesian Lee and Heghinian method (Lee and Heghinian, 1977), the U Buishand Statistic (Buishand, 1982, 1984) and the Hubert segmentation method (Hubert et al., 1989). They allow the detection of a shift in the mean of the variable treated in the series (Lubès et al., 1994). These methods, except for the Pettitt approach, assume that there is no change in the variance of the series studied. Furthermore, it should be recalled that they are not adapted to the search for several breaks within one series.

The results of the break detection methods are given in tables in several different forms. A single year number means that all the methods used indicate this year as the date of the break. Two year numbers mean that the different break detection methods indicate two different dates of break in the series. Moreover, as priority was given to the results of the Pettitt test, it was decided to talk of a discrepancy or 'anomaly' when some of the methods, but not the Pettitt test, had detected a break in the series.

### 3. Study of rainfall

#### 3.1. Isohyets

The study of Fig. 1 allows an overall analysis of the rainfall distribution along the Gulf of Guinea. The plotting of the isohyets is irregular from Côte d'Ivoire to Benin. Further east, in Nigeria, the curves of isohyets show a gradient that is practically north–south, except for the Central Plateau region to the north-east of Abuja. The areas with the highest rainfall are located in the western and southern parts of Côte d'Ivoire, as well as in the south of Nigeria, where, in some places, annual precipitation is higher than 3000 mm. As in Côte d'Ivoire, the isohyets for the group constituted by Côte d'Ivoire, Ghana, Togo and Benin have an orientation that is more south-south-west. For the last three countries, annual precipitation is, however, significantly lower than that of Côte d'Ivoire. One of the explanations generally provided is based on the orientation of the coast, which is more parallel to the monsoon flow and is thus less favourable to rain (Aubréville, 1949; Eldin, 1971). It should be noted, however, that there is an increase in rainfall from the south-east of Ghana to the north of Benin, along a mountainous axis starting with the Togo Mounts followed by the Atakora massif. The rainfall patterns of the northern regions in the five countries are similar; the distance from the Atlantic Ocean probably constitutes a strong factor of homogeneity for precipitation regimes.

Fig. 1 shows a clear general trend towards a shift of the isohyets to the south-south-west from the 1950s to the 1980s, even though the 1960s was the most humid decade everywhere. This development in Nigeria manifests itself by the almost total disappearance of the characteristic pattern of the Central Plateau during the 1980s. On the other hand, the areas located further south, towards Lagos and Port Harcourt, do not seem to have been affected by any change in rainfall regime. In this regard, they are comparable with the Tabou sector in the westernmost part of Côte d'Ivoire, those very wet areas having an undeniable behavioural homogeneity. We will pay more attention to the changes in the 1200 mm and 1800 mm isohyets during this period of 40 years.

During the 1950s, the less than 1200 mm precipitation area covered a small part of the Ivorian territory in the east and the centre of the country, the northern parts of Ghana, Togo and Benin, and a significant part of Nigeria. Note should also be taken of the wide strip going from Accra to Parakou, passing across the Togolese oriental plain, and located to the east of the previously mentioned mountain area. During the 1960s, the most rainy of the four decades studied, the region with less than 1200 mm precipitation was so seriously reduced as to be practically non-existent in Côte d'Ivoire, and the Accra–Parakou strip was then reduced to a simple Accra–Lomé coastal zone. This situation was considerably modified during the 1970s, when the less than 1200 mm precipitation area covered the north-eastern part of Côte d'Ivoire, a significant part of Ghana, and the northern parts of Togo and Benin. The Accra–Parakou strip also extended largely over the west of Nigeria (Niger plain and Yoruba plateau). This trend was even more pronounced during the 1980s, as indicated by the sharp decrease in precipitation level in the north of the Atakora massif in Togo and in Benin, as well as the considerable extension to and throughout the whole Central Plateau region in Nigeria of the area having less than 1200 mm of rain.

For these five countries, the sector with precipitation levels ranging from 1200 to

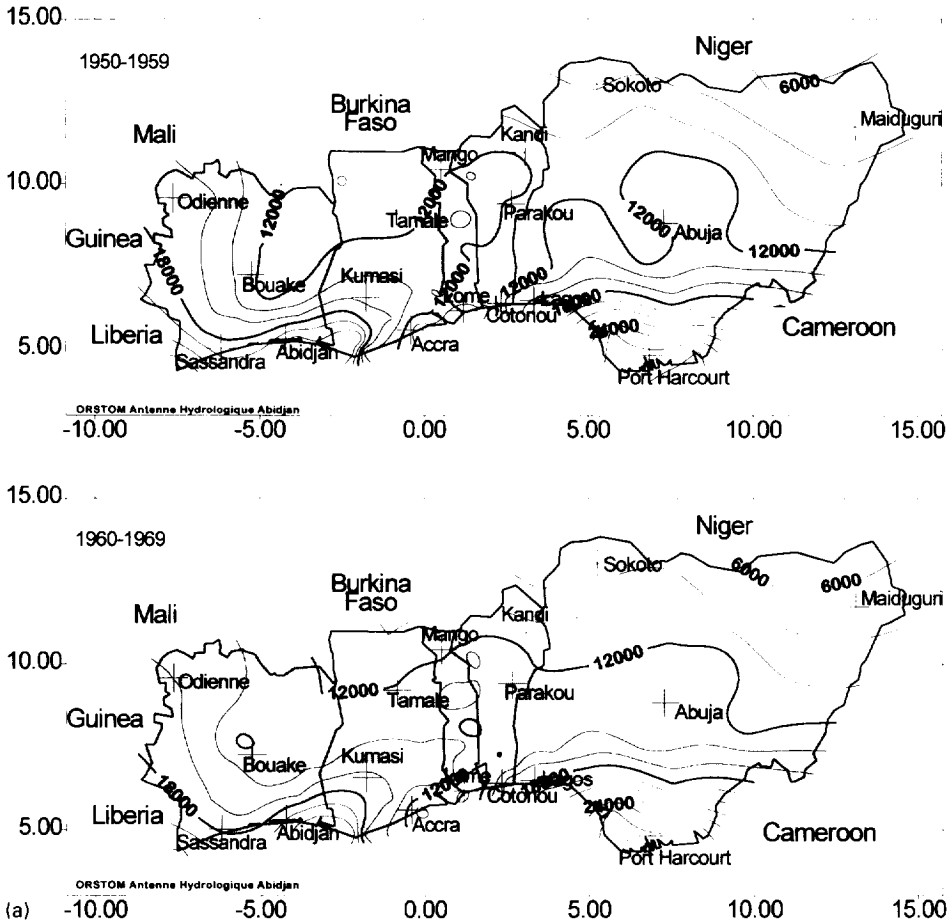


Fig. 1. Plot of the isohyets for the decades from the 1950s to the 1980s (isohyets are in 1/10 mm).

1800 mm was also affected by profound changes between 1950 and 1990. During the 1950s, this very widely spread area in Côte d’Ivoire, where it covered more than half of the country, extended to the areas of relief of Ghana, Togo and Benin. In Nigeria, this zone had an extension towards the north which corresponded to the Central Plateau. During the 1960s, characterized by more abundant and homogeneous precipitation levels, this zone experienced its greatest extension, and in particular covered the whole south of Benin. As early as in the 1970s, the trend was reversed and the situation was once again comparable with that prevailing during the 1950s in the west (Côte d’Ivoire, Ghana and Togo) and an even less favourable one in the east. This intermediate rainfall area almost totally disappeared from Benin and from the Nigerian Yoruba plateau. That phenomenon increased further during the 1980s. The withdrawal towards the south and the south-west of the 1800 mm line was confirmed and was strengthened in the west of the Gulf of Guinea. Further eastwards, the whole of Benin at that time had a rainfall level of less than

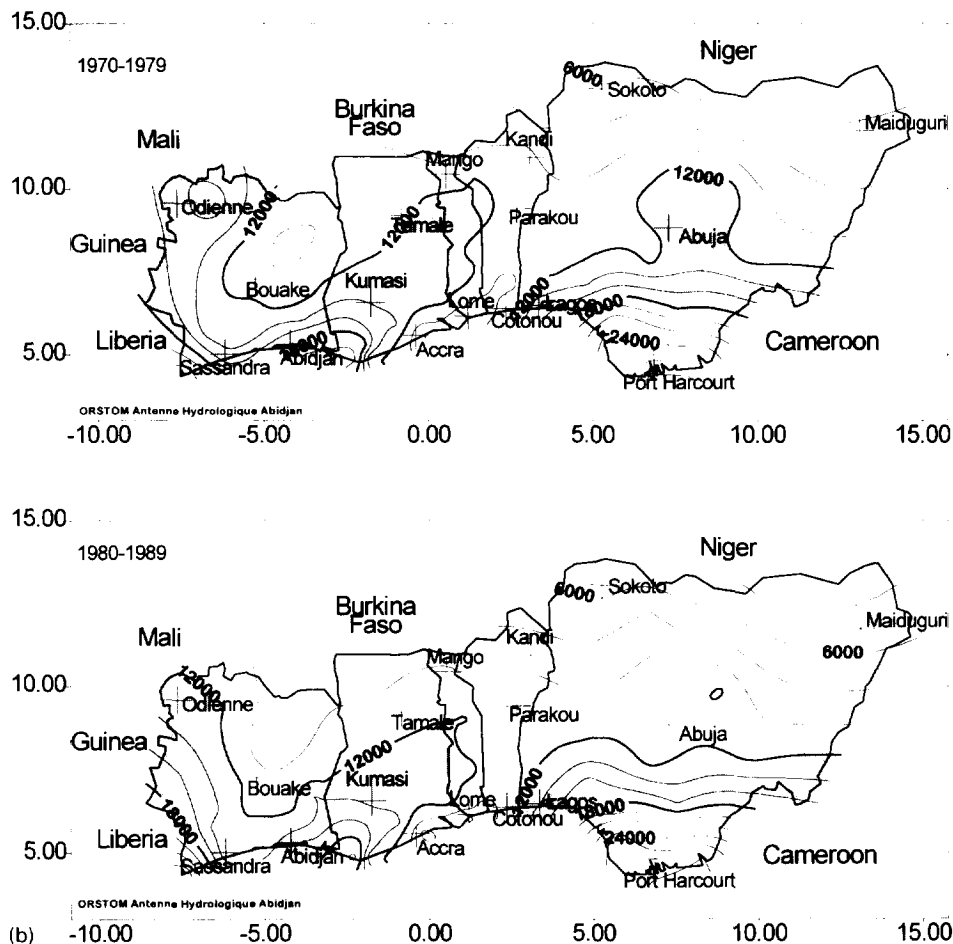


Fig. 1. Continued.

1200 mm, whereas in Nigeria the area located between the 1200 and 1800 mm lines was decreasing sharply. It is now located well to the south of both Abuja and the Central Plateau. The changes were important, and apart from the southernmost part of Nigeria, none of the regions bordering the Gulf of Guinea were spared by this significant decrease in precipitation.

### 3.2. Precipitation indices

As in Part I of the study (Servat et al., 1996), the precipitation index defined and used by Nicholson et al. (1988) has been used to estimate the variations in annual precipitation during the four decades studied previously. The method is also the same as in Part I, and makes it possible to establish a map of the 'intensity' of the rainfall deficits or surpluses.

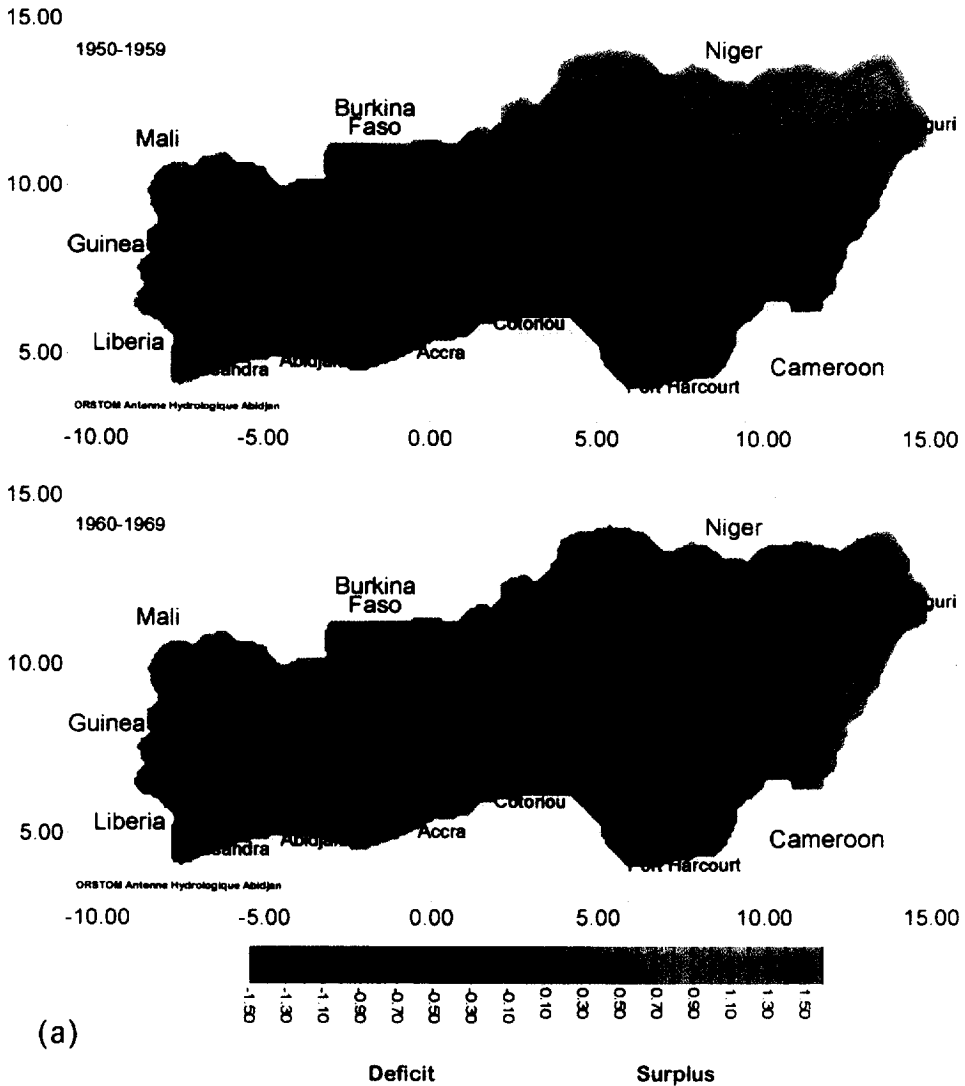


Fig. 2. Plot of the precipitation indices for the decades from the 1950s to the 1980s.

Fig. 2 confirms, from a regional viewpoint, the opposition between the period extending from 1950 to 1969, which has a tendency to the surplus side, and the 1970s and 1980s, which are clearly deficit years, on the basis of a mean established for the period 1950–1989. Nevertheless, the 1950s do have a few deficit zones, particularly in the Tamale region in Ghana and south of Abuja in Nigeria. Everywhere else, this period corresponds to a surplus trend that can be very pronounced in some sectors and particularly in the north of Nigeria. During the 1960s a few locations showed a slight deficit; nevertheless, the decade may be considered as a surplus one, even if few regions showed a strong surplus. This confirms the relative homogeneity of precipitation in the area as a whole during that

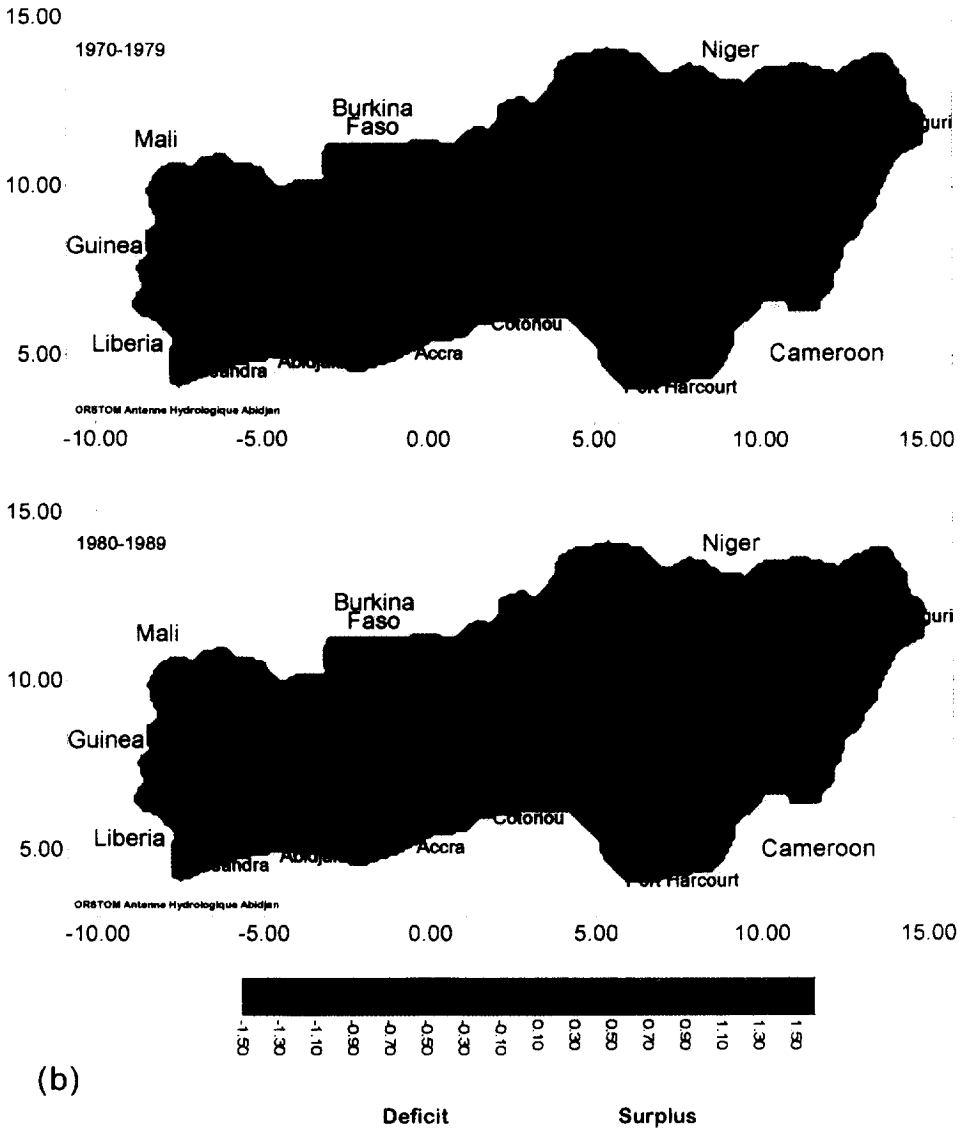


Fig. 2. Continued.

period, a phenomenon that was already proved by the expansion of the area with an 'intermediate' level of precipitation, ranging between 1200 and 1800 mm (Fig. 1). The two areas that clearly had a surplus are the coastal strip around Cotonou and Lagos, and the Niger plain in the north-west of Nigeria. As for the 1970s, it is generally a deficit decade. Three areas showed a slight surplus: (1) the Niger basin in Côte d'Ivoire; (2) the zone constituted by Lake Volta in Ghana and the Togo Mountains in Togo; (3) the region located on both sides of the Abuja–Maiduguri axis, which includes the Central Plateau and the

Table 1

Annual rainfall at some Ghana gauge stations; results of the use of procedures to detect breaks in long and short series

| Station number | Station     | Data availability | Long series Date    | Short series Date |
|----------------|-------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| 21             | ACCRA       | 1888–1988         | <u>1938 (+)</u>     | <u>1965–1975</u>  |
| 22             | AXIM        | 1921–1982         | No break            | No break          |
| 23             | DUNKWA      | 1943–1986         | No break            | <u>1963–1969</u>  |
| 24             | KETE KRACHI | 1898–1983         | An 1947             | No break          |
| 25             | KUMASI      | 1921–1984         | <u>An 1968–1979</u> | <u>1968</u>       |
| 26             | TAKORADI    | 1950–1983         | No break            | No break          |
| 27             | TARKWA      | 1950–1982         | No break            | No break          |
| 28             | WENCHI      | 1922–1989         | No break            | No break          |

Underlining indicates that results vary according to the length of the series. (+), Sharp increase of the mean value of the studied variable. An, discrepancy between the results, or ‘anomaly’, according to the methods.

Tchad basin in the north in Nigeria. During the 1980s, there was a clear increase in the rain deficit. All the northern regions of the countries along the Gulf of Guinea were particularly affected, as well as some coastal regions, especially around Cotonou and Lagos, and even more so in Côte d’Ivoire.

Table 2

Annual rainfall at some Togo gauge stations; results of the use of procedures to detect breaks in long and short series

| Station number | Station    | Data availability | Long series Date     | Short series Date |
|----------------|------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| 29             | LOME AERO  | 1950–1990         | No break             | An 1971           |
| 30             | AFAGNAN    | 1950–1987         | No break             | 1974              |
| 31             | AKLAKOU    | 1938–1988         | <u>An 1968–1975</u>  | 1968              |
| 32             | ANEHO      | 1925–1989         | <u>1946–1949 (+)</u> | No break          |
| 33             | ASSAHOUN   | 1939–1989         | An 1968              | An 1968           |
| 34             | ATAKPAME   | 1927–1989         | No break             | No break          |
| 35             | BARKOISSI  | 1950–1988         | No break             | No break          |
| 36             | BLITTA     | 1938–1988         | <u>An 1970</u>       | <u>1970–1972</u>  |
| 37             | DAPAONG    | 1934–1989         | <u>An 1941</u>       | <u>An 1982</u>    |
| 38             | GLEKOVE    | 1937–1986         | <u>1963</u>          | <u>An 1963</u>    |
| 39             | KANTE      | 1937–1989         | No break             | <u>An 1968</u>    |
| 40             | KPESSI     | 1937–1989         | No break             | No break          |
| 41             | KARA       | 1937–1989         | No break             | No break          |
| 42             | LOME VILLE | 1924–1989         | No break             | <u>An 1968</u>    |
| 43             | MANGO      | 1925–1989         | No break             | <u>An 1955</u>    |
| 44             | TOVE       | 1938–1989         | <u>1975</u>          | <u>1968</u>       |
| 45             | NOTSE      | 1931–1989         | No break             | No break          |
| 46             | KPAGOUDA   | 1934–1989         | 1975                 | <u>1964–1975</u>  |
| 47             | KPALIME    | 1926–1989         | No break             | <u>An 1969</u>    |
| 48             | SOKODE     | 1929–1989         | <u>An 1976</u>       | <u>1970</u>       |
| 49             | TABLIGBO   | 1937–1989         | An 1968              | An 1968           |
| 50             | TSEVIE     | 1934–1992         | No break             | No break          |

Underlining indicates that results vary according to the length of the series. (+), Sharp increase of the mean value of the studied variable. An, Discrepancy between the results, or ‘anomaly’, according to the methods.

Globally, for the five countries studied, there is a clear rainfall deficit trend since the 1970s, in both the forest and savannah zones. However, this trend expresses itself differently according to the regions considered. The coastal regions seem to have been affected in the early 1970s, with intensification of the phenomenon during the 1980s, particularly on the Ivorian coast. During the 1980s, there was a sharp turn towards an extreme deficit situation in the northern regions. Apart from the special case of the Ivorian coast, we can talk of a north–south deficit gradient to describe this climatic variability.

### 3.3. Detection of breaks in time series

For the same reasons as described in Part I (Servat et al., 1996), the methods for the detection of breaks in time series were used with both the complete series and the series limited to the decades from the 1950s to the 1980s for all the rain gauge stations selected.

The length of the time series available allowing the use of tests for the detection of

Table 3

Annual rainfall at some Bénin gauge stations; results of the use of procedures to detect breaks in long and short series

| Station number | Station       | Data availability | Long series<br>Date | Short series<br>Date |
|----------------|---------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| 53             | COTONOU AERO  | 1953–1990         | No break            | 1969                 |
| 54             | ABOMEY        | 1922–1987         | No break            | <u>An 1970</u>       |
| 55             | ADJOHOUN      | 1922–1989         | No break            | <u>An 1970</u>       |
| 56             | ALLADA        | 1927–1985         | 1968                | 1968                 |
| 57             | APLAHOUE      | 1924–1989         | No break            | No break             |
| 58             | BANTE         | 1950–1989         | No break            | 1970                 |
| 59             | BEMBEREKE     | 1922–1989         | 1969                | 1969                 |
| 60             | BOHICON       | 1950–1990         | No break            | No break             |
| 61             | BOPA          | 1923–1984         | No break            | 1970                 |
| 62             | COTONOU VILLE | 1927–1984         | <u>An 1969</u>      | <u>1969</u>          |
| 63             | DASSA ZOUME   | 1950–1989         | No break            | No break             |
| 64             | GRAND POPO    | 1922–1987         | 1951 (+)            | <u>An 1975</u>       |
| 65             | INA           | 1950–1989         | No break            | 1969                 |
| 66             | KANDI         | 1922–1990         | <u>An 1981</u>      | <u>1972–1979</u>     |
| 67             | KETOU         | 1951–1989         | No break            | No break             |
| 68             | MALANVILLE    | 1950–1988         | No break            | 1957–1969            |
| 69             | NATITINGOU    | 1922–1990         | 1969                | 1969                 |
| 70             | NIAOULI       | 1950–1988         | No break            | An 1968              |
| 71             | NIKKI         | 1922–1988         | <u>1935–1940</u>    | <u>An 1968</u>       |
| 72             | OUIDAH        | 1927–1989         | No break            | <u>An 1969</u>       |
| 73             | PARAKOU       | 1922–1990         | No break            | No break             |
| 74             | POBE          | 1926–1989         | No break            | No break             |
| 75             | PORTO NOVO    | 1926–1989         | <u>An 1970</u>      | <u>1970</u>          |
| 76             | SAKETE        | 1923–1989         | No break            | <u>1970</u>          |
| 77             | SEME          | 1950–1987         | No break            | 1968–1970            |
| 78             | TANGUIETA     | 1937–1989         | 1975–1976           | 1975–1976            |
| 79             | ZAGNANADO     | 1922–1989         | No break            | <u>1968</u>          |

Underlining indicates that results vary according to the length of the series. (+), Sharp increase of the mean value of the studied variable. An, Discrepancy between the results, or 'anomaly', according to the methods.

Table 4

Annual rainfall at some Nigeria gauge stations; results of the use of procedures to detect breaks in long and short series

| Station number | Station    | Data availability | Long series<br>Date | Short series<br>Date |
|----------------|------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| 81             | LAGOS      | 1892–1992         | <u>1943</u>         | <u>1970</u>          |
| 82             | BENIN CITY | 1906–1989         | <u>1948 (+)</u>     | <u>An 1980</u>       |
| 83             | BIDA       | 1928–1992         | <u>An 1939</u>      | No break             |
| 84             | CALABAR    | 1902–1992         | <u>1943</u>         | <u>1962</u>          |
| 85             | ENUGU      | 1916–1992         | No break            | No break             |
| 86             | GUSAU      | 1942–1992         | 1969                | <u>1963–1969</u>     |
| 87             | IBADAN     | 1901–1989         | No break            | No break             |
| 88             | ILORIN     | 1906–1992         | No break            | <u>1969</u>          |
| 89             | JOS        | 1922–1992         | 1976–1978           | 1976–1978            |
| 90             | KADUNA     | 1913–1992         | <u>An 1930</u>      | <u>An 1957</u>       |
| 91             | KANO       | 1905–1992         | <u>1962–1970</u>    | <u>1962–1970</u>     |
| 92             | LOKOJA     | 1906–1990         | <u>An 1934</u>      | No break             |
| 93             | MAIDUGURI  | 1909–1992         | 1970–1980           | 1970–1980            |
| 94             | MINNA      | 1916–1992         | <u>1931–1934</u>    | <u>An 1979</u>       |
| 95             | NGURU      | 1942–1992         | <u>1967–1979</u>    | <u>1965–1967</u>     |
| 96             | ONDO       | 1906–1988         | No break            | No break             |
| 97             | SOKOTO     | 1907–1992         | 1965                | 1965                 |
| 98             | WARRI      | 1907–1990         | No break            | No break             |
| 99             | YOLA       | 1906–1992         | No break            | No break             |
| 100            | ZARIA      | 1943–1992         | 1966                | 1966                 |

Underlining indicates that results vary according to the length of the series. (+), Sharp increase of the mean value of the studied variable. An, Discrepancy between the results, or 'anomaly', according to the methods.

breaks in time series varies considerably from one country to another, and even within a country. The oldest series are those recorded in Accra, Ghana (where recordings began in 1888) and in Lagos, Nigeria (1892). The study of Tables 1–4 allows the comparison of the results of Ghana and Nigeria for the long and the short series. The precipitation stations used here for the detection of breaks were numbered following the numbering system used previously for Côte d'Ivoire. The results are presented in Fig. 3. They should be compared with Table 1 of Part I (Servat et al., 1996). They reveal a certain heterogeneity.

A break in the time series was detected for only three stations in Ghana, thus confirming what can be observed in Fig. 2, that is, a slight decrease in rainfall since the beginning of the 1970s. No breaks were detected in Togo for the short series on seven stations, whereas nine others revealed anomalies and only six effectively showed a break that took place around the year 1970. These results are not systematically confirmed when we look in more detail at the long series, because, for almost half of the stations studied, no breaks were detected. Here, as in Ghana, the decrease in rainfall consequently remained limited. In Benin, for the short series, no breaks were detected for six stations, and for all the others a break was detected around 1970. These results are not always confirmed by the study of the long series, thus indicating that in some locations in Benin the decrease in precipitation recorded for a little more than two decades would be due to a simple variability in time of the phenomenon. In Nigeria, the short series of the northern and the Central Plateau

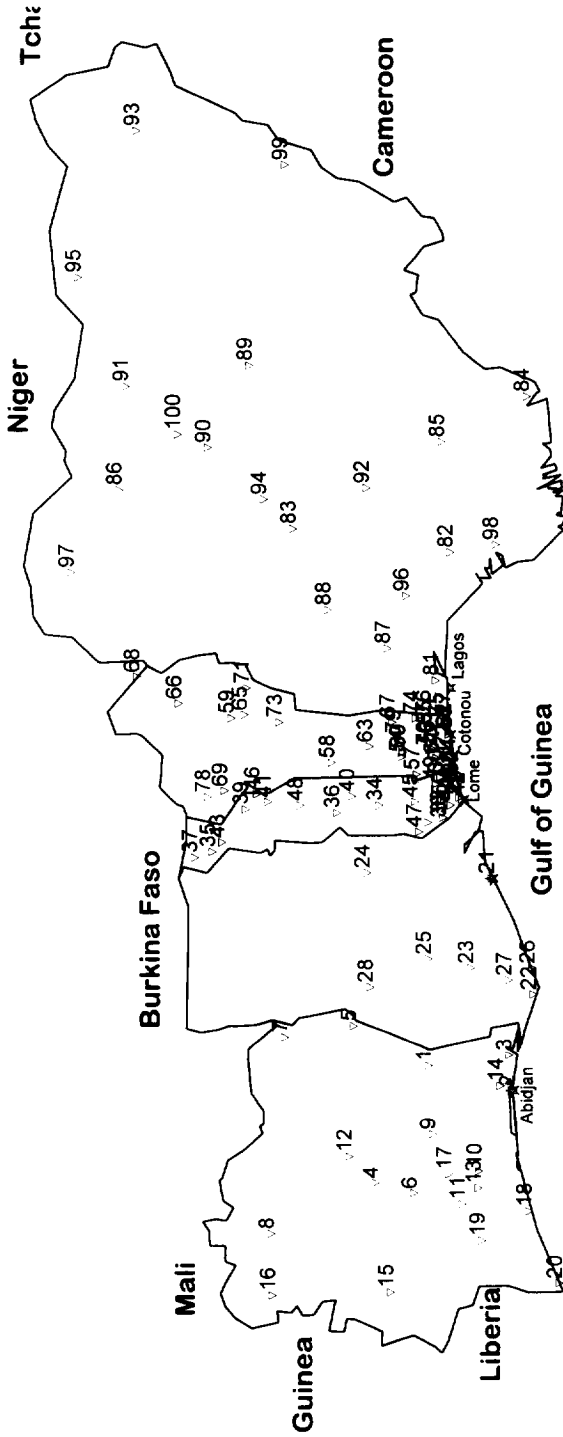


Fig. 3. Location of the stations used for the detection of breaks in the series.

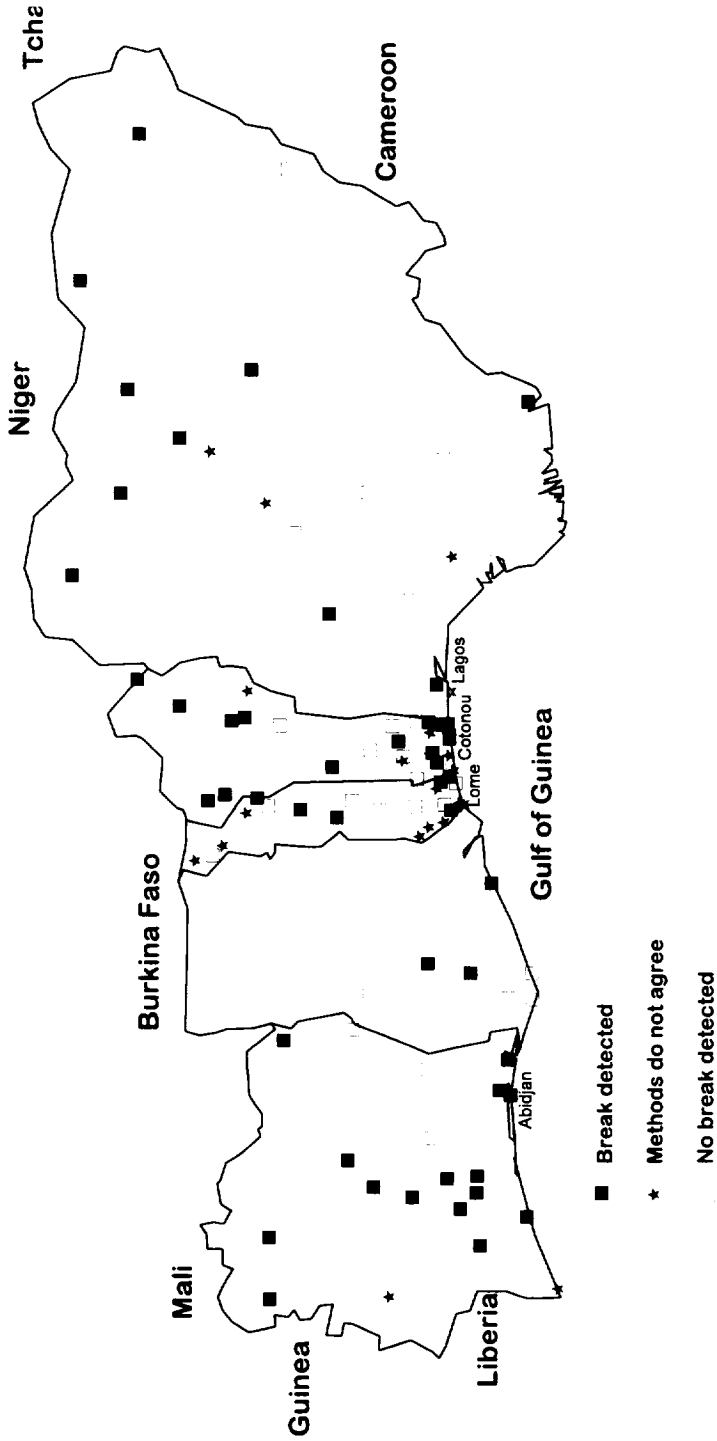


Fig. 4. Results of the detection of breaks for the short series.

Table 5

Annual rainfall at some Ghana gauge stations; results of the use of procedures to detect breaks in short series and rainfall deficit assessment linked to climatic variability

| Station number | Station     | Date of the break | Deficit (% of mean) |
|----------------|-------------|-------------------|---------------------|
| 21             | ACCRA       | 1965–1975         | 28                  |
| 22             | AXIM        | No break          |                     |
| 23             | DUNKWA      | 1963–1969         | 15                  |
| 24             | KETE KRACHI | No break          |                     |
| 25             | KUMASI      | 1968              | 15                  |
| 26             | TAKORADI    | No break          |                     |
| 27             | TARKWA      | No break          |                     |
| 28             | WENCHI      | No break          |                     |

stations all indicate a break that was sometimes observed as early as in the 1960s. Only a few of the southern stations showed the same result. In that case, the analysis of the long series confirms the phenomenon.

All the results for the short series were plotted on the map presented in Fig. 4. It confirms the representations of Fig. 2, that is: (1) there is a generalized trend towards a decrease in rainfall since the end of the 1960s and the beginning of the 1970s; (2) the actual breaks are more systematically observed in the western (Côte d'Ivoire) and eastern (Nigeria) parts of the zone studied; (3) a mitigated but still obvious manifestation of the

Table 6

Annual rainfall at some Togo gauge stations; results of the use of procedures to detect breaks in short series and rainfall deficit assessment linked to climatic variability

| Station number | Station    | Date of the break | Deficit (% of mean) |
|----------------|------------|-------------------|---------------------|
| 29             | LOME AERO  | An 1971           | 17                  |
| 30             | AFAGNAN    | 1974              | 29                  |
| 31             | AKLAKOU    | 1968              | 19                  |
| 32             | ANEHO      | No break          |                     |
| 33             | ASSAHOUN   | An 1968           | 13                  |
| 34             | ATAKPAME   | No break          |                     |
| 35             | BARKOISSI  | No break          |                     |
| 36             | BLITTA     | 1970–1972         | 19                  |
| 37             | DAPAONG    | An 1982           | 15                  |
| 38             | GLEKOVE    | An 1963           | 12                  |
| 39             | KANTE      | An 1968           | 12                  |
| 40             | KPESSI     | No break          |                     |
| 41             | KARA       | No break          |                     |
| 42             | LOME VILLE | An 1968           | 7                   |
| 43             | MANGO      | An 1955           | 14                  |
| 44             | TOVE       | 1968              | 16                  |
| 45             | NOTSE      | No break          |                     |
| 46             | KPAGOUDA   | 1964–1975         | 25                  |
| 47             | KPALIME    | An 1969           | 11                  |
| 48             | SOKODE     | 1970              | 18                  |
| 49             | TABLIGBO   | An 1968           | 12                  |
| 50             | TSEVIE     | No break          |                     |

Table 7

Annual rainfall at some Bénin gauge stations; results of the use of procedures to detect breaks in short series and rainfall deficit assessment linked to climatic variability

| Station number | Station       | Date of the break | Deficit (% of mean) |
|----------------|---------------|-------------------|---------------------|
| 53             | COTONOU AERO  | 1969              | 19                  |
| 54             | ABOMEY        | An 1970           | 15                  |
| 55             | ADJOHOUN      | An 1970           | 14                  |
| 56             | ALLADA        | 1968              | 26                  |
| 57             | APLAHOUE      | No break          |                     |
| 58             | BANTE         | 1970              | 16                  |
| 59             | BEMBEREKE     | 1969              | 21                  |
| 60             | BOHICON       | No break          |                     |
| 61             | BOPA          | 1970              | 19                  |
| 62             | COTONOU VILLE | 1969              | 23                  |
| 63             | DASSA ZOUME   | No break          |                     |
| 64             | GRAND POPO    | An 1975           | 19                  |
| 65             | INA           | 1969              | 18                  |
| 66             | KANDI         | 1972–1979         | 17                  |
| 67             | KETOU         | No break          |                     |
| 68             | MALANVILLE    | 1957–1969         | 22                  |
| 69             | NATITINGOU    | 1969              | 21                  |
| 70             | NIAOULI       | An 1968           | 13                  |
| 71             | NIKKI         | An 1968           | 13                  |
| 72             | OUIDAH        | An 1969           | 22                  |
| 73             | PARAKOU       | No break          |                     |
| 74             | POBE          | No break          |                     |
| 75             | PORTO NOVO    | 1970              | 24                  |
| 76             | SAKETE        | 1970              | 23                  |
| 77             | SEME          | 1968–1970         | 18                  |
| 78             | TANGUIETA     | 1975–1976         | 20                  |
| 79             | ZAGNANADO     | 1968              | 13                  |

phenomenon occurred in Ghana, Togo and, to a greater extent, in Benin; (4) the northern and coastal regions are generally more affected than the central ones for the countries studied.

For each of the countries, Tables 5–8 present the average rainfall deficits since the break occurrences (if any). They are calculated on the basis of the mean calculated before the identified break. These deficits are to be compared with those calculated for Côte d'Ivoire (Servat et al., 1996). This quantitative study of the phenomenon confirms what was demonstrated above, as the highest break values (+25%) are generally observed on the Atlantic coast or in the extreme north of the zone studied. Furthermore, the average deficits observed are higher in Côte d'Ivoire (21%) and in Nigeria (19.3%), and they are lower in Benin (18.9%) and especially in Togo (16.1%). The number of stations that can be used in Ghana does not permit the calculation of a mean that would be sufficiently representative. Those deficit values confirm the observation made previously, that is to say, a more significant decrease in rainfall in both the western and eastern parts of the Gulf of Guinea.

Table 8

Annual rainfall at some Nigeria gauge stations; results of the use of procedures to detect breaks in short series and rainfall deficit assessment linked to climatic variability

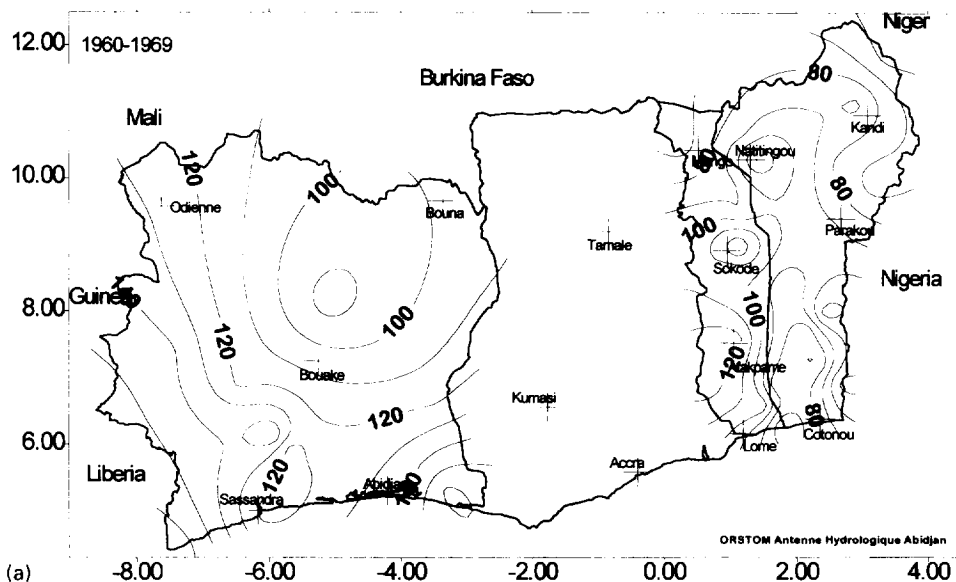
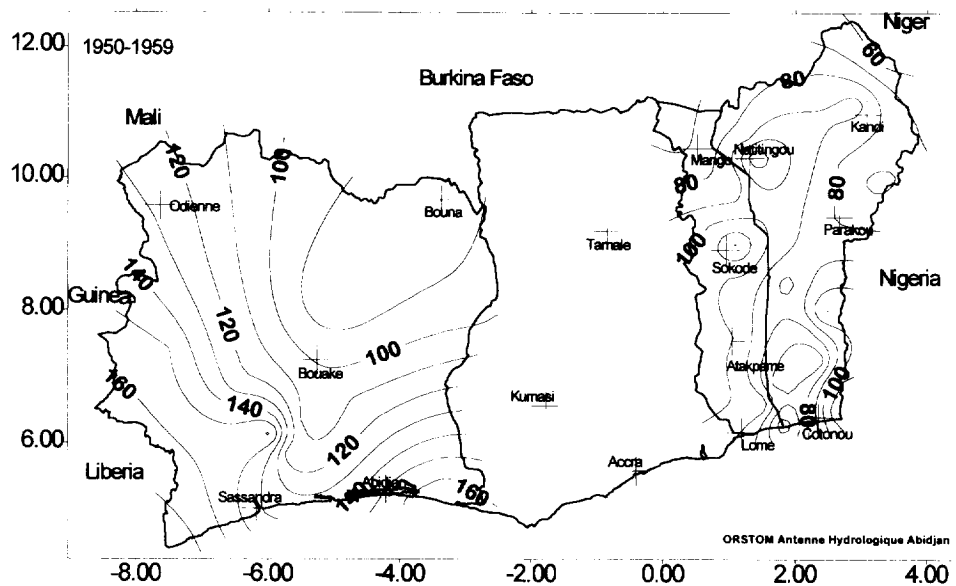
| Station number | Station    | Date of the break | Deficit (% of mean) |
|----------------|------------|-------------------|---------------------|
| 81             | LAGOS      | 1970              | 19                  |
| 82             | BENIN-CITY | An 1980           | 18                  |
| 83             | BIDA       | No break          |                     |
| 84             | CALABAR    | 1962              | 10                  |
| 85             | ENUGU      | No break          |                     |
| 86             | GUSAU      | 1963–1969         | 18                  |
| 87             | IBADAN     | No break          |                     |
| 88             | ILORIN     | 1969              | 17                  |
| 89             | JOS        | 1976–1978         | 12                  |
| 90             | KADUNA     | An 1957           | 11                  |
| 91             | KANO       | 1962–1970         | 26                  |
| 92             | LOKOJA     | No break          |                     |
| 93             | MAIDUGURI  | 1970–1980         | 36                  |
| 94             | MINNA      | An 1979           | 14                  |
| 95             | NGURU      | 1965–1967         | 31                  |
| 96             | ONDO       | No break          |                     |
| 97             | SOKOTO     | 1965              | 25                  |
| 98             | WARRI      | No break          |                     |
| 99             | YOLA       | No break          |                     |
| 100            | ZARIA      | 1966              | 15                  |

#### 4. Study of the number of rainy days a year

Benin and Togo were the only countries studied from the viewpoint of the variable ‘number of rainy days a year’ (but only until 1980 for the latter), given the availability of daily data. The results are to be compared with those for Côte d’Ivoire so as to be able to judge, even cursorily, the regional extension of the decrease of this variable. Maps for the indices of the number of rainy days were not drawn, as it was impossible to calculate them in a homogeneous manner for the whole area (there are no daily data for Togo during the 1980s).

##### 4.1. Isovalue lines

For each of the decades from the 1950s to the 1980s (except for Togo), the lines of isovalues of the number of rainy days a year were calculated and plotted (Fig. 5). The conclusions vary according to the regions studied. For Benin, as was observed in Côte d’Ivoire, there was a notable change in the spatial distribution of this variable. The downward trend is obvious from the beginning of the 1970s, particularly in the north and south-east of the country, where it is sometimes higher than 20%. In Togo, for the period 1950–1979, no notable change seems to appear. The plots of the lines of isovalues are not subject to any modification in time. These observations are in keeping with what was observed for annual precipitations, for which the changes that occurred are much more clearcut in Côte d’Ivoire and in Benin than in Togo.



(a) Fig. 5. Plot of the isovalue lines of the number of rainy days a year for the decades from the 1950s to the 1980s (isovalue lines are in days).

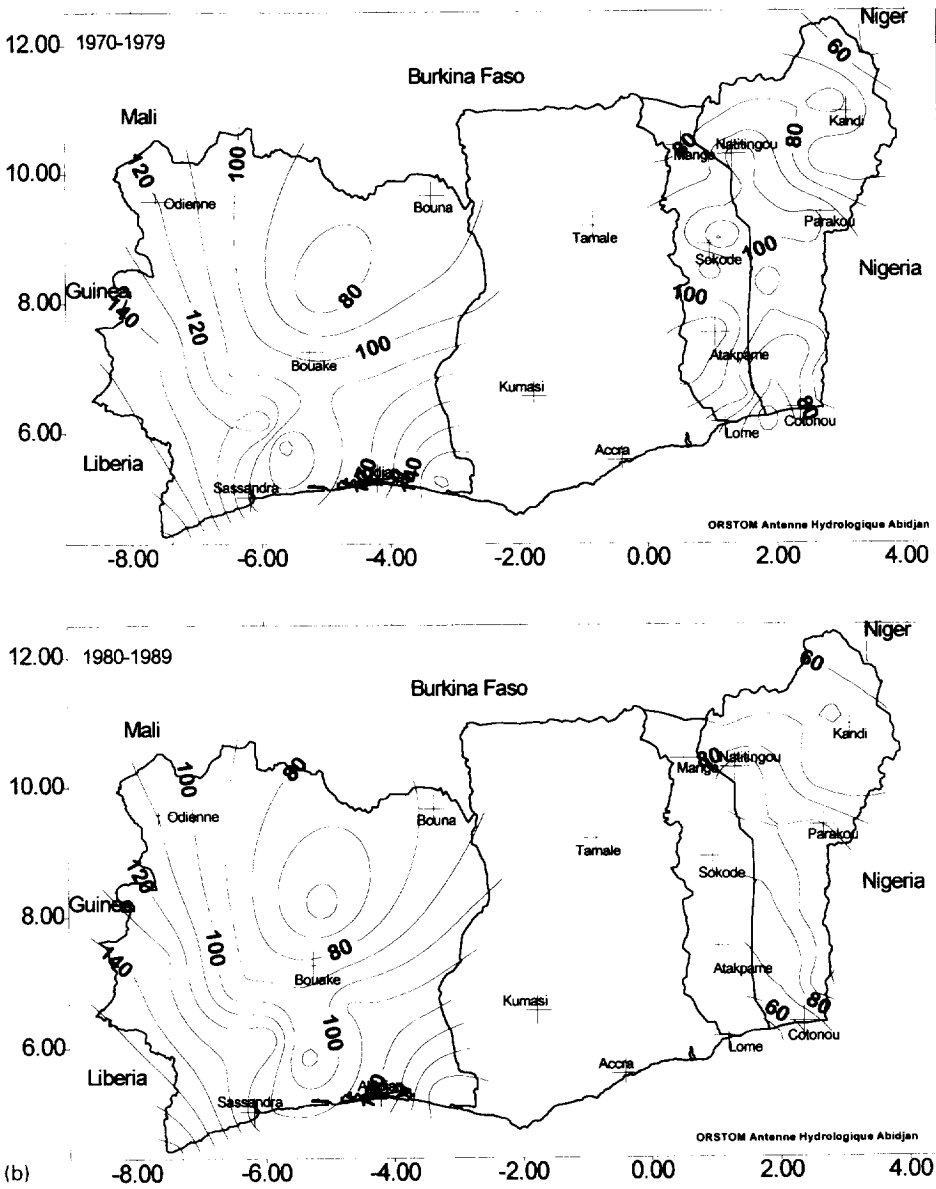


Fig. 5. Continued.

#### 4.2. Detection of breaks in time series

Table 9 and Table 10 show the results for Togo and Benin, respectively. In the first case, the results for the time series from 1950 to 1979 confirm what precedes. No remarkable phenomenon was recorded for Togo. Some breaks were identified, but they show either an

Table 9

Number of rainy days a year at some Togo gauge stations; results of the use of procedures to detect breaks in long and short series

| Station number | Station      | Data availability | Long series Date     | Short series Date |
|----------------|--------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| 29             | LOME AERO    | 1950–1980         | No break             | No break          |
| 34             | ATAKPAME     | 1929–1980         | 1954 (+)             | 1954–1958 (+)     |
| 35             | BARKOISSI    | 1950–1979         | No break             | No break          |
| 42             | LOME VILLE   | 1934–1980         | 1960–1975            | 1960–1963         |
| 43             | MANGO        | 1934–1980         | <u>1944–1950 (+)</u> | No break          |
| 44             | MISSION TOVE | 1950–1978         | No break             | 1971–1974         |
| 48             | SOKODE       | 1950–1980         | No break             | No break          |
| 50             | TSEVIE       | 1934–1980         | No break             | No break          |
| 51             | ANIE MONO    | 1951–1977         | No break             | 1968              |
| 52             | SOTOUBA      | 1950–1978         | No break             | 1963              |

Underlining indicates that results vary according to the length of the series. (+), Sharp increase of the mean value of the studied variable. An, Discrepancy between the results, or ‘anomaly’, according to the methods.

increase or a decrease of the variable. As for the long series, there are too few data to allow conclusions to be drawn. For Benin, the various tests that were done indicate the existence of a break in the time series between 1950 and 1989. Apart from two stations, there was a sudden decrease in the number of rainy days. Once again, the long series are not numerous enough to produce any convincing information.

## 5. Discussion and conclusion

Generally speaking, the study of the isohyet plotting for the whole region reveals

Table 10

Number of rainy days a year at some Bénin gauge stations; results of the use of procedures to detect breaks in long and short series

| Station number | Station    | Data availability | Long series Date | Short series Date |
|----------------|------------|-------------------|------------------|-------------------|
| 55             | ADJOHOUN   | 1950–1989         | No break         | No break          |
| 56             | ALLADA     | 1950–1985         | No break         | 1972              |
| 57             | APLAHOUE   | 1950–1989         | No break         | No break          |
| 59             | BEMBEREKE  | 1950–1989         | No break         | 1969              |
| 60             | BOHICON    | 1950–1990         | No break         | An 1975           |
| 64             | GRAND POPO | 1950–1987         | No break         | 1975              |
| 66             | KANDI      | 1922–1990         | <u>1942 (+)</u>  | <u>1975</u>       |
| 69             | NATITINGOU | 1950–1990         | No break         | 1971              |
| 70             | NIAOULI    | 1950–1988         | No break         | 1963–1980         |
| 74             | POBE       | 1950–1989         | No break         | An 1968           |
| 75             | PORTO NOVO | 1950–1989         | No break         | 1963              |
| 76             | SAKETE     | 1923–1989         | 1968             | 1968              |
| 77             | SEME       | 1950–1987         | No break         | An 1980           |
| 79             | ZAGNANADO  | 1950–1989         | No break         | 1963              |
| 80             | SAVE       | 1950–1990         | No break         | 1968              |

Underlining indicates that results vary according to the length of the series. (+), Sharp increase of the mean value of the studied variable. An, Discrepancy between the results, or ‘anomaly’, according to the methods.

important discrepancies from Côte d'Ivoire to Benin, and a fairly regular north–south orientation in Nigeria. For the latter, the Central Plateau is the only exception in the regular pattern of the isohyets. It should also be noted that, throughout the region, the relief has an undeniable rain-inducing effect, even if it is sometimes relatively low. This is especially the case for the continuation of the Guinean ridge in the west and northwest of Côte d'Ivoire, the Togo Mounts, the Atakora massif and the Central Plateau. The plotting of the isohyets also shows local and relative minima on the coasts with an orientation that is parallel to the monsoon flow (Aubréville, 1949; Eldin, 1971). This phenomenon is confirmed not only in Côte d'Ivoire but also in Ghana, Togo and Benin. Finally, it is worth noting that the northernmost regions have yearly rainfall of the same order of magnitude. The distance from the ocean and the fact that the rains are subjected to the regular fluctuations of the Intertropical Convergence Front may explain this regularity in the low relief areas.

The region observed in this study belongs to the so-called humid Africa, as opposed to the Sahelian region further north. There appears to be, however, since the beginning of the 1970s, a clear extension in the former of the zone with a level of annual precipitation below 1200 mm, with an even sharper trend during the 1980s. This is a generalized phenomenon and, nowadays, this zone covers approximately two-thirds of the whole area of Côte d'Ivoire and Nigeria alike. Many wooded savannah regions thus saw their climatic regime modified by these changes, which led to a shift from a 'guinean' to a 'sudanese' regime. It should also be noted that the intensity of the phenomenon is such that, in some regions with a marked relief, the rain-inducing effect was not sufficient to offset the loss of precipitation. This is especially the case for the Atakora massif and the Central Plateau in Nigeria.

The intermediate rainfall zone (between 1200 and 1800 mm) witnessed its maximum extension during the 1960s for the countries located along the Gulf of Guinea. Since then, that sector has been in constant regression, especially in the countries where this variability is most felt, namely Côte d'Ivoire, Nigeria and, to a lesser extent, Benin.

As for the high annual rainfall area, it has practically disappeared from the Atlantic coast, except for the southernmost part of Nigeria. This high level of precipitation can no longer be systematically associated with the presence of the tropical forest.

However, these different trends, which clearly appear in Fig. 1, show varying intensities. Generally, the 1950s and 1960s were surplus decades throughout the region even if some locations showed a deficit. The climatic variability then appeared as early as in the 1970s, when the coasts were affected (Ghana, Togo and more particularly Benin). The regions of the hinterland were not systematically hit. The 1980s brought a clear intensification of the phenomenon on the Ivorian coast and in all the northern regions. In this specific case, what was observed is in line with what was taking place at the same time in the Sahel. Even though an intensity gradient then exists from the north to the south, it is interesting to note that the regions located west (Côte d'Ivoire) and east (Nigeria) of the Gulf of Guinea are more severely affected than the central ones.

The heterogeneity of the climatic variability and the progressive character of the phenomenon lead to different results for the identification of the dates of breaks in the time series. Although the trend towards a decrease in precipitation is confirmed everywhere, it is through the local detection of shifts in the series of annual precipitation that it is possible

to assess the scope of the phenomenon. This is the case in Côte d'Ivoire and in Nigeria, where significant values are reached (in the region of 20%, locally higher than 25 or 30%), in Benin to a lesser extent, and not much or not at all in Ghana and in Togo.

It is difficult to draw specific conclusions from the study of the number of rainy days a year. What can be said is that the marked decrease in the amount of annual precipitation goes together with an equally marked diminution in the number of rainy days. A continuing regional study on rainfall distribution might make it possible to clarify the relationship between those two variables and to better understand the relative variations of one compared with the other.

These different observations thus clearly demonstrate the existence of a climatic accident in non-Sahelian west Africa in the so-called 'humid' regions along the Gulf of Guinea. This is expressed by a sometimes very significant decrease in annual precipitation. This phenomenon, which developed considerably during the 1980s, is in line with and comparable with what was observed in the Sahelian zone. Of course, this climatic variability has important consequences on the availability of water resources in those regions. Agriculture, the supply of dams and hydroelectric production, to mention only a few domains, are strongly penalized by this decrease in resources. If a real shortage is not to be feared in those regions where the quantities of precipitation remain high in absolute terms, the effects of that variability can still prove to be disastrous, as they modify the elements of a balance that is already often threatened by other factors (anthropic pressure and deforestation, for example).

## Acknowledgements

The authors would like to thank: the Agence Nationale pour l'Aviation Civile et al. Météorologie (ANAM), which manages the Ivorian precipitation network, for having made available the data used within the framework of this study; Dr M. Hulme and Dr G. Mahé for providing data; the Hydraulics Directorate in Benin for having provided the data in its possession.

## References

- Aubréville, A., 1949. *Climats, Forêts et Désertification de l'Afrique Tropicale*. Soc. Ed. Maritimes et col., Paris.
- Buishand, T.A., 1982. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *J. Hydrol.*, 50: 11–27.
- Buishand, T.A., 1984. Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *J. Hydrol.*, 73: 51–69.
- Eldin, M., 1971. Le climat. In: Avenard, J.M. et al. (Editors), *Le Milieu Naturel de la Côte d'Ivoire*. Mém. 50, ORSTOM, Paris, 391 pp.
- Hubert, P., Carbonnel, J.P. and Chauuche, A., 1989. Segmentation des séries hydrométriques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.*, 110: 349–367.
- Lee, A.F.S. and Heghinian, S.M., 1977. A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables—a Bayesian approach. *Technometrics*, 19(4): 503–506.

- Lubès, H., Masson, J.M., Servat, E., Paturel, J.E., Kouamé, B. and Boyer, J.F., 1994. Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques—étude bibliographique. ORSTOM, Montpellier, 21 pp.
- Nicholson, S.E., Kim, J. and Hoopingarner, J., 1988. Atlas of African Rainfall and its Interannual Variability. Department of Meteorology, Florida State University, Tallahassee.
- Pettitt, A.N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Stat.*, 28(2): 126–135.
- Servat, E., Paturel, J.E., Lubès, H., Kouamé, B., Ouedraogo, M. and Masson, J.M., 1997. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part I: detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *J. Hydrol.*, 191: 1–18.

# Variabilité climatique et analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne

## *Climatic variability and long rainfall series analysis in non-Sahelian Western and Central Africa*

Jean Emmanuel PATUREL<sup>1</sup>, Éric SERVAT<sup>1\*</sup>, Hélène LUBÈS-NIEL<sup>2</sup> et Marie-Odile DELATTRE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ORSTOM, programme FRIEND AOC, 06 BP 1203, Cidex 1, Abidjan 06, Côte d'Ivoire ;

<sup>2</sup> ORSTOM, programme FRIEND AOC, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1, France

### RÉSUMÉ

Les séries pluviométriques annuelles enregistrées sur de longues durées pour un ensemble de postes couvrant l'Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne ont permis d'étudier l'évolution spatio-temporelle de la pluviométrie dans cette région. Les résultats soulignent l'existence d'une alternance de périodes sèches et humides depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle. La sécheresse actuelle n'a cependant connu d'équivalent, ni en durée, ni en intensité, sur l'ensemble de la période étudiée.

**Mots clés :** Afrique de l'Ouest et centrale, Afrique non sahélienne, Test de Pettitt, Variabilité climatique, Séries longues, Ruptures

### ABSTRACT

*Annual rainfall time series registered over a long duration for a set of stations all over non-Sahelian Western and Central Africa have allowed the study of spatial and temporal rainfall evolution in this region. The results underline the existence of alternating dry and wet periods since the beginning of the 20th century. However, the current drought has no equivalent neither regarding duration nor intensity, all over the studied period.*

**Keywords:** West and Central Africa, Non-Sahelian Africa, Pettitt's test, Climatic variability, Long time series, Breaks

## Introduction

Des études récentes menées par l'ORSTOM dans le cadre du programme ICCARE (Servat et al., 1996 ; Paturel et al., 1997) ont montré l'existence, en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne, de déficits pluviométriques annuels pouvant atteindre 20 à 25 %.

En se basant sur l'étude des longues séries observées, il est possible de situer cette période de pluviométrie déficitaire dans une perspective historique et de mieux évaluer, ainsi, l'importance réelle de cette évolution climatique récente. Si la plupart de ces séries de référence ne remontent qu'au début du siècle, voire aux années 1920, l'antériorité de cette information permet néanmoins d'apprécier

l'alternance des périodes sèches et humides et donc de mieux caractériser le déficit actuel, y compris dans un contexte régional.

La région étudiée, dite « humide » au sens large, est comprise entre 14°N et 2°N de latitude et 16°W et 23°E de longitude.

## Données et méthodes

### Données

Une centaine de postes pluviométriques a été retenue. Ils présentent des séries chronologiques de hauteurs précipitées annuelles de plus de 60 ans et permettent une cou-

---

Note présentée par Georges Pédro

Note remise le 16 avril 1997, acceptée après révision le 28 juillet 1997

\* E-mail : servat@adiopo.orstom.ci

verture régulière de la région étudiée. Les séries les plus longues proviennent des pays anglophones et remontent parfois, mais rarement, à la fin du siècle dernier.

**Méthodes**

Un ensemble de représentations graphiques et cartographiques a été utilisé pour visualiser l’alternance des périodes sèches et humides dans un contexte régional. En outre, le test de Pettitt (1979) a été utilisé sur l’ensemble des postes pluviométriques retenus, en vue d’identifier une rupture dans les séries chronologiques étudiées. Ce test, non paramétrique et dérivé du test de Mann-Whitney, repose sur une variable  $U_{t,N}$  définie comme :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij}$$

où  $D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j)$  avec  $\text{sgn}(Z) = 1$  si  $Z > 0$ ,  $0$  si  $Z = 0$  et  $-1$  si  $Z < 0$

Il teste l’hypothèse nulle (absence de rupture dans la série  $(x_i)$  de taille  $N$ ), à l’aide de la statistique  $K_N$  définie par le maximum en valeur absolue de  $U_{t,N}$  pour  $t$  variant de 1 à  $N-1$ .

Si  $k$  désigne la valeur de  $K_N$  prise sur la série étudiée, sous l’hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur  $k$  est donnée approximativement par :

$$\text{Prob}(K_N > k) \approx 2 \exp(-6 k^2 / (N^3 + N^2))$$

Pour un risque  $\alpha$  de première espèce donné, si la probabilité de dépassement estimée est inférieure à  $\alpha$ , l’hypothèse nulle est rejetée. La série comporte alors une rupture localisée au moment  $t$  où est observé  $K_N$ .

**Résultats**

**Représentations graphiques et analyse cartographique**

La période qui va de 1925 ( $\pm 5$  ans) à 1990 a été retenue comme période de référence, car commune à tous les postes étudiés et présentant une forte densité d’informations. Sur l’ensemble de cette période et pour chacun des postes étudiés, un indice pluviométrique annuel a été calculé, défini comme une variable centrée réduite (Lamb, 1982) :

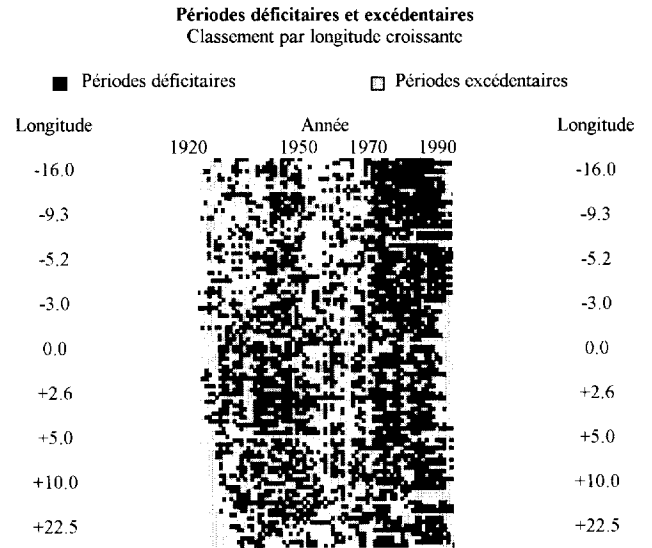
$$(X_i - \bar{X})/S$$

avec  $X_i$  : pluviométrie de l’année  $i$  ;  $\bar{X}$  : pluviométrie moyenne interannuelle sur la période de référence  $S$  : écart type de la pluviométrie interannuelle sur la période de référence.

Cet indice traduit ainsi un excédent ou un déficit pluviométrique pour l’année considérée par rapport à la période de référence choisie.

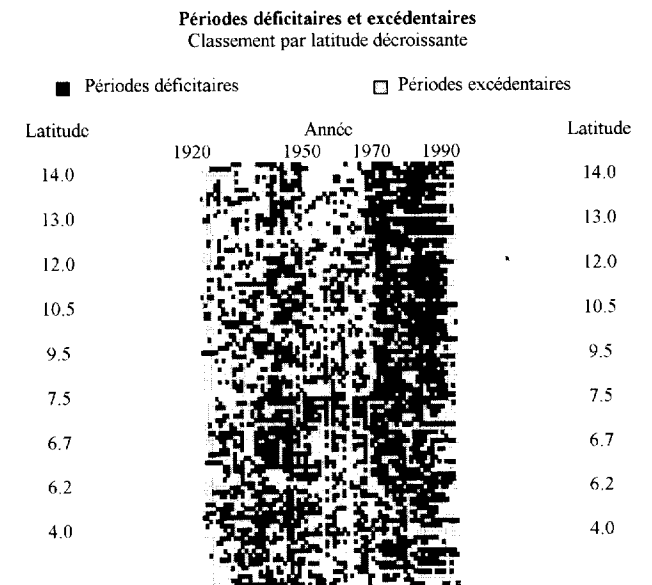
Les résultats ont été reportés sur la figure 1, en rangeant les postes pluviométriques par longitude croissante. On peut en déduire les conclusions suivantes :

- la période 1936–1950 est déficitaire : ce caractère est plus marqué entre 0° et 4°E (soit au Togo et au Bénin) et il s’estompe de part et d’autre, en particulier à l’ouest ;
- la période 1951–1968 est excédentaire : ce caractère est légèrement plus marqué à l’ouest de la zone étudiée (soit à l’ouest de la Côte d’Ivoire) ;
- la période de 1969 à aujourd’hui est très nettement déficitaire : ce caractère s’observe sur l’ensemble de la zone, mais plus encore à l’ouest.



**Figure 1. Visualisation des périodes déficitaires et excédentaires en fonction de la longitude du poste de mesure.**

*Display of periods in deficit and in excess according to the longitude of the rain gauging stations.*



**Figure 2. Visualisation des périodes déficitaires et excédentaires en fonction de la latitude du poste de mesure.**

*Display of periods in deficit and in excess according to the latitude of the rain gauging stations.*

Les résultats ont ensuite été reportés sur la figure 2 en rangeant les stations par latitude croissante. On y observe la même succession de périodes déficitaires et excédentaires :

- la période 1936-1950 est déficitaire, et principalement le long du Golfe de Guinée ;
- la période 1951-1968 est nettement excédentaire ;
- la période de 1969 à aujourd'hui est déficitaire, caractère très marqué au-delà de 8°N.

La figure 3 présente une cartographie régionale de la moyenne par décennie des indices pluviométriques. On observe alors :

- des zones ponctuellement déficitaires durant les décennies 1930 et 1940 : les valeurs des indices sont, cependant, faibles en valeur absolue ;
- des zones excédentaires durant les décennies 1950 et 1960 : d'abord observé dans le nord, ce caractère se généralise à l'ensemble de la région au cours des années 1960 ;

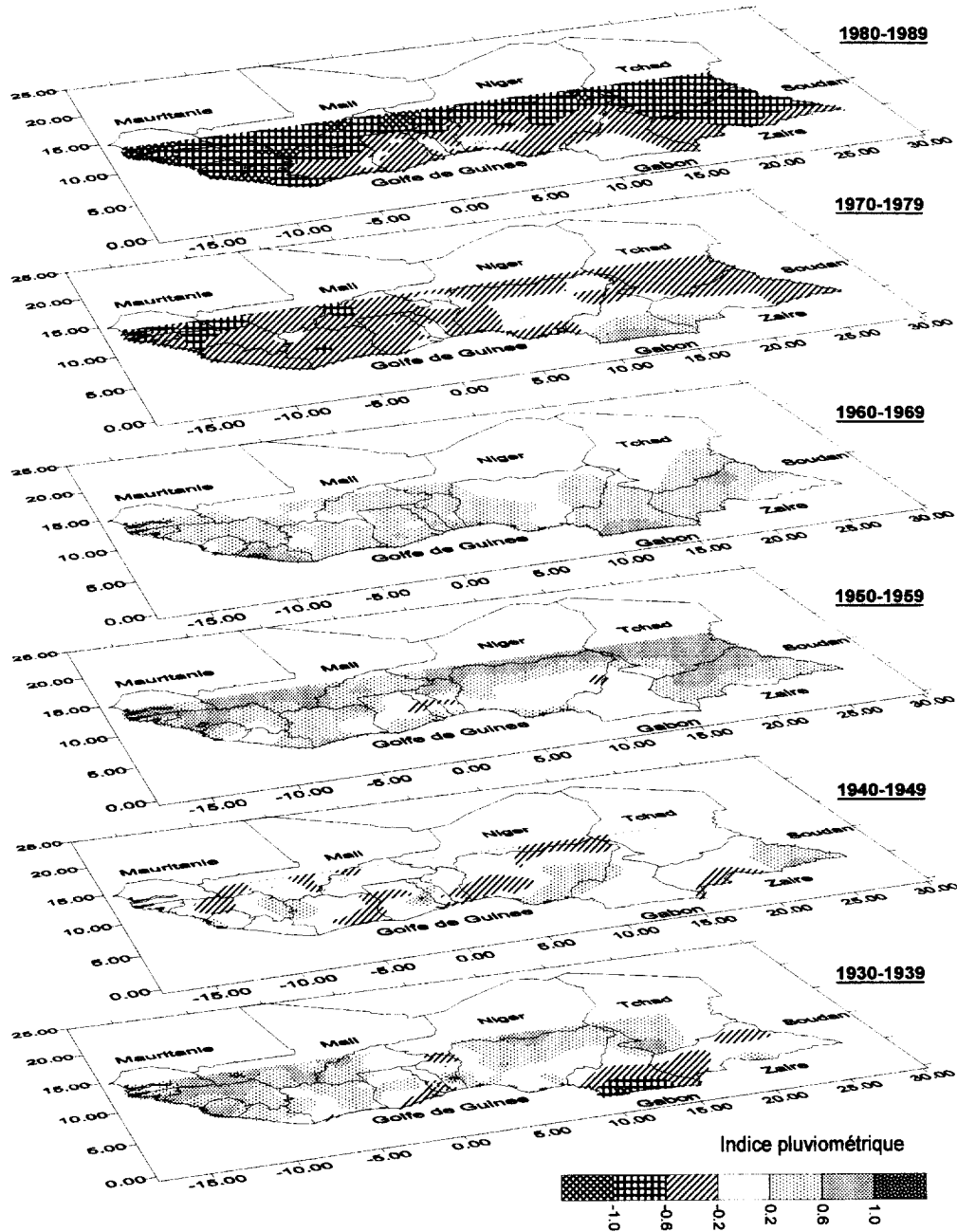


Figure 3. Évolution des indices pluviométriques de la décennie 1930 à la décennie 1980.

Evolution of rainfall index from decade 1930 to decade 1980.

**Tableau. Probabilité associée au test de Pettitt. Rupture entre 1960 et 1979.**

Probability linked with Pettitt's test. Break between 1960 and 1979.

| Probabilité associée | Classe   | Dénombrement |
|----------------------|--|--------------|
| < 1 %                | Rupture très significative                                   | 32           |
| Entre 1 et 5 %       | Rupture significative  | 10           |
| Entre 5 et 20 %      | Rupture peu significative                                    | 11           |
| > 20 %               | Série homogène   | 32           |
| < 5 %                | Excédent pluviométrique                                      | 6            |
| < 1 %                | Rupture très significative en dehors de la période 1960-1979 | 5            |

– des zones déficitaires durant les décennies 1970 et 1980 : ce caractère s'accroît au cours de la décennie 1980 et apparaît très marqué au-delà de 10°N et de 5°W ; les valeurs des indices  $\gamma$  sont élevées en valeur absolue.

L'examen des données antérieures à la période de référence, disponibles pour quelques postes uniquement, révèle un épisode déficitaire entre 1910 et 1922 et un autre, excédentaire, entre 1922 et 1936. Les différentes représentations utilisées soulignent donc l'existence d'une alternance de périodes sèches et humides depuis le début du siècle, sans pour autant que l'on puisse parler de cycle, compte tenu de sa forte irrégularité.

### Analyse statistique

Le test de Pettitt a été appliqué à chacune des séries chronologiques étudiées. Les résultats montrent qu'une rupture (c'est-à-dire, ici, une diminution de la pluviométrie annuelle)  $\gamma$  est détectée majoritairement entre 1960 et 1979. Le tableau présente la probabilité associée à la statistique du test calculé pour chacun des postes. Les niveaux de signification les plus élevés se situent à l'ouest de 5°W de longitude et au nord de 8 à 10°N de latitude. Dans cinq cas, la rupture a été signalée autour des années 1940. Les six postes pour lesquels le test révèle une augmentation de la pluviométrie annuelle sont isolés les uns des autres et leurs résultats ne traduisent donc en rien un comportement régional.

La détection presque systématique d'une rupture durant la période 1960–1979 par le test de Pettitt renforce l'idée

selon laquelle la période déficitaire actuelle est la plus intense connue par la région depuis le début du siècle. Le test ne pouvant, en effet, signaler qu'une rupture, celle-ci correspond à l'évolution jugée la plus significative.

### Conclusion

Au cours de ce siècle, l'Afrique de l'Ouest et centrale a connu une succession de périodes de déficits et d'excédents pluviométriques, sans que l'on ne puisse toutefois parler de cycle. La fluctuation la plus brutale et la plus significative (au sens statistique du terme) a été observée autour des années 1970, à partir desquelles on note généralement une diminution importante de la pluviométrie annuelle. Si dans les parties les plus orientales de la région étudiée, cette fluctuation semble s'inscrire dans la « norme » des fluctuations des séries chronologiques, l'étude des séries longues montre qu'à l'ouest et au nord, elle revêt un caractère d'exception, tant par son intensité que par sa durée.

Les activités humaines ont pu localement contribuer à accroître ce phénomène de sécheresse. On peut citer l'exemple de la déforestation, qui a pris une ampleur considérable dans de nombreuses régions du Golfe de Guinée durant ces dernières décennies et qui s'accompagne d'une profonde modification de la nature de l'occupation des sols.

### RÉFÉRENCES

- Lamb P.J. 1982. Persistence of Sub-Saharan drought, *Nature*, 299, septembre, 46-47  
 Paturel J.E., Servat E., Kouamé B., Lubès H., Ouedraogo M. et Masson J.M. 1997. Climatic variability in humid Africa along the

Gulf of Guinea. Part two: an integrated regional approach, *J. Hydrol.* (à paraître)

Pettitt A.N. 1979. A non-parametric approach to the change-point problem, *Applied Stat.*, 28, 2, 126-135

Servat E., Paturel J.E. et Lubès H. 1996. La sécheresse gagne l'Afrique tropicale, *La Recherche*, 290, septembre, 24-25

## The influence of distributed input data on the hydrological modelling of monthly river flow regimes in West Africa

**J. E. PATUREL, M. OUEDRAOGO, G. MAHE**

*Institut de Recherche pour le Développement, 01 BP 182, Ouagadougou 01, Burkina Faso*  
[jean-emmanuel.paturel@hydro.ird.bf](mailto:jean-emmanuel.paturel@hydro.ird.bf)

**E. SERVAT, A. DEZETTER & S. ARDOIN**

*Institut de Recherche pour le Développement, Hydrologie-Vahyne, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France*

**Abstract** An extensive data collection exercise was undertaken for an area mainly covering Burkina Faso, Côte d'Ivoire and Mali. This exercise led to the development of three gridded monthly rainfall surfaces and three monthly potential evapotranspiration (PET) surfaces. Two semi-distributed hydrological models were used for the analysis. Both models utilize soil data which can be defined as being close to a Soil Water Holding Capacity (SWHC). For this, two gridded data sets were used. When applied to different catchments covering geographically close hydrographical areas, but sometimes with distinct characteristics, the models produced results that varied according to the input data sets, catchment characteristics and model structure. These preliminary results highlight the important influence of the nature and origin of input data for hydrological modelling in Africa.

**Key words** hydrological modelling; regional modelling; hydroclimatological data; soil water holding capacity; rainfall; runoff; potential evapotranspiration; West Africa

### **Influence de la spatialisation des données sur la modélisation hydrologique de régimes mensuels d'écoulement en Afrique de l'Ouest**

**Résumé** Un important travail de collecte de données a été entrepris sur une aire qui couvre principalement le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire et le Mali. Cette opération a abouti à l'élaboration de trois grilles de pluie mensuelle et de trois grilles d'évapotranspiration potentielle (ETP) mensuelle, toutes spatialisées. Deux modèles hydrologiques semi-distribués ont été utilisés. Ils font tous deux appel à une donnée "sol" que l'on peut définir comme étant proche d'une capacité de rétention en eau du sol. Pour cette dernière, deux grilles de valeurs ont été utilisées. Appliqués à différents bassins versants, couvrant des espaces hydrographiques proches mais parfois bien distincts, les modèles ont donné des résultats qui varient en fonction des grilles de données utilisées, des bassins versants et des modèles eux-mêmes. Ces premiers résultats posent le problème de l'influence de la nature et de l'origine des données d'entrée sur la modélisation hydrologique en Afrique.

**Mots clefs** modélisation hydrologique; modélisation régionale; données hydroclimatologiques; capacité de rétention en eau du sol; précipitations; débits; évapotranspiration potentielle; Afrique de l'Ouest

## **INTRODUCTION**

The "conceptual lumped models" are sometimes criticized for their simplified representation of the realistic functioning of a catchment and for their use of parameters without physical meaning and without taking the heterogeneity of a catchment into account (Ambrose, 1999). However, in West and Central Africa,

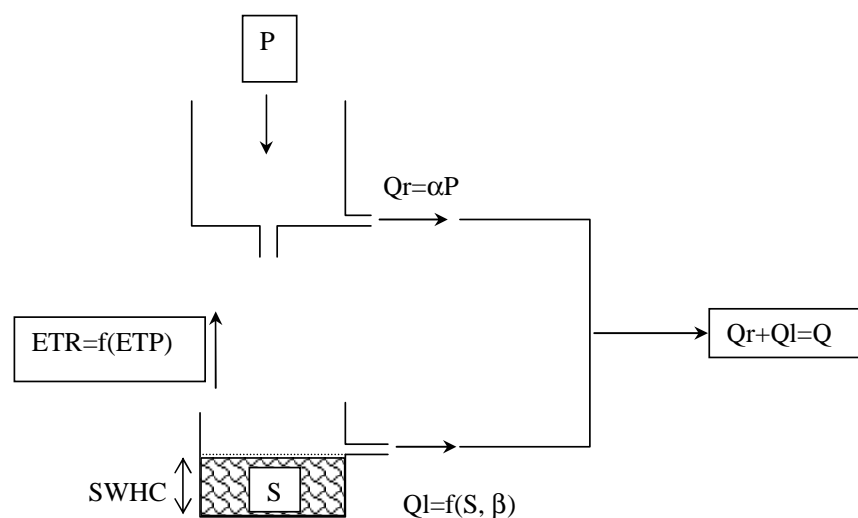
models which require relatively few parameters and easily accessible data sets, have in some cases, produced good results. Therefore, and because of the development of processing tools and of Geographical Information Systems (GIS), a semi-distributed conceptual model has been developed in order to improve understanding of the internal functioning of catchments. Indeed, dividing a catchment into more or less homogeneous spatial units (grid cells) takes into account the environment, as well as the spatial distribution of atmospheric factors affecting runoff.

The work presented here is based on a combination of hydrological and meteorological models based on spatial units of  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . This dimension is due to the nature of the available information at a monthly time step, and the important objective of finding a hydrological modelling system which can be used to estimate possible changes occurring at the regional scale due to climatic variability (Servat *et al.*, 1998; L'Hôte *et al.*, 2002, 2003; Ozer *et al.*, 2003; Paturel *et al.*, 2003).

Data acquisition is not an easy task in Africa where the available information is often sparse or even inadequate, and it is a major task to collect and compile sufficient data to allow the calculation of gridded rainfall series. The aim of this work is to estimate the influence of different gridded data sets on the performance of two rainfall-runoff models evaluated by their capacity to reproduce the observed hydrographs of a number of rivers in West Africa.

## MODELS

Two conceptual and monthly time step models were used for this study: the Water Balance Model (WBM), which is a modified version of the balance model defined by Thornthwaite (e.g. Conway *et al.*, 1999), and the "reservoirs" model GR2M of CEMAGREF (Paturel *et al.*, 1995). Each of the models has two parameters. They are not detailed here, but their generic representation is given in Fig. 1. They function in a similar way, although the equations describing them are different:



**Fig. 1** Generic scheme of functioning of GR2M and WBM models (R, Rain; ET P/R: Potential/Real EvapoTranspiration; SWHC: Soil Water Holding Capacity; Ql/r: delayed/direct flow).

- one part of the monthly rainfall contributes to the direct flow (parameter  $\alpha$ );
- the level of a reservoir, which represents the water supply, changes according to the rainfall and to the potential evapotranspiration, a gradual emptying of this water supply produces the delayed flow response (parameter  $\beta$ ).

These models require rainfall and potential evapotranspiration data as input, and produce runoff data as output, and a variable related to the type of the soil and to the vegetation of the catchment which is similar to a representation of a Soil Water Holding Capacity (SWHC). This value defines the highest storage producing delayed flow. All data, except runoff, are spatially distributed.

By using a distribution of the catchment in regular grid cells ( $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ), the variations of: (a) the water storage in the soil, (b) the actual evapotranspiration and (c) the runoff, are simulated according to the rainfall, the potential evapotranspiration and the SWHC in the considered grid cell. The total flow at the catchment outlet is obtained by summation of the different grid cell contributions, calculated for each time step, distinct from each other. For a monthly time step, it has not been necessary to integrate a process of transfer between the grid cells.

## DATA

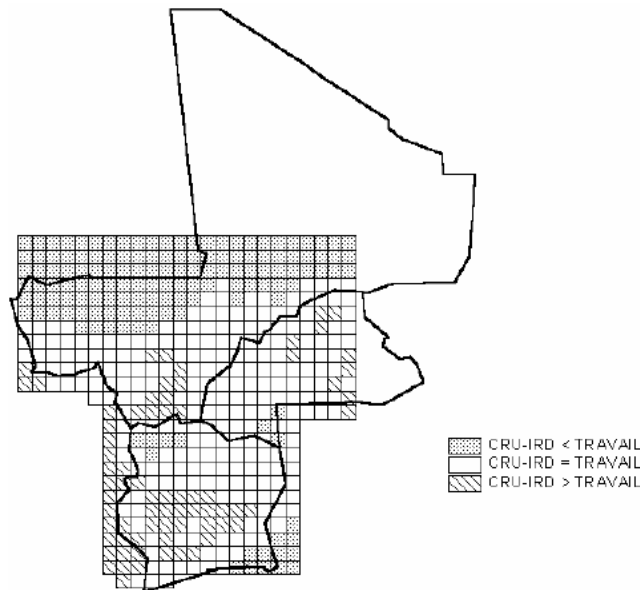
### Rainfall data

From the databank of the UNESCO AOC FRIEND project, data of 140 raingauges covering the studied area (Burkina Faso, Côte d'Ivoire and Mali) could be used to establish time series of monthly data grid over the 1950–1997 period. The corresponding grid was named TRAVAIL. The Climatic Research Unit (CRU) of the University of East Anglia (Norwich, United Kingdom) provided a grid named CRU obtained from monthly rainfall data from approximately 100 raingauges of the study site for the period 1950–1995 at the same spatial resolution (New *et al.*, 2000). A third grid (CRU-IRD grid) was obtained by extending the CRU set of grid data from approximately 200 additional stations from the databank of the IRD (Institut de Recherche pour le Développement, France).

These three grids were inter-compared by applying the Student test of equality of the average samples with a threshold of error of 5%. These comparisons were made for the average annual total of the monthly rainfall over the period 1950–1995. As an example, Fig. 2 shows the results of the comparison between the CRU-IRD and TRAVAIL grids, revealing at places, noticeable differences (the discrepancies are considered to be significant for 298 grid cells over a total of 648). The discrepancies between the CRU grid and other grids are of the same order. Some of the differences are large, depending on the station and on the method of interpolation.

### Potential evapotranspiration data (PET)

The assessment method of the potential evapotranspiration described by Penman is surely the most satisfactory one among the methods experienced in the literature. Based on an objective estimation of the energy balance of the evaporating area, this



**Fig. 2** Comparison of the mean annual rainfall of the CRU-IRD and TRAVAIL rain grids over the period 1950–1995 by application of the Student test at the threshold of 5%.

method incorporates the physical processes by estimating the water exchange between an evaporating surface and the atmosphere. Penman's equation therefore integrates a great number of variables influencing PET (air temperature, insolation, albedo, wind speed, humidity, solar radiation). But it is not easy to use because a great number of measurements must be available and several parameters must be correctly calibrated.

In the scope of this study, three PET grids over the period 1950–1995 were generated using data from New *et al.* (2000). They were compiled by using three empirical formulations to estimate PET inspired from the physical processes described by Penman:

- The method described by Thom & Oliver (1977) (TO) is based on the formulation described by Penman. The modifications made in the classical equation aimed at improving the PET determination by consideration of a seasonal effect in the evaluation of some coefficients (Shuttleworth, 1994).
- The method of Penman-Monteith (Smith, 1992) (PM) which is similar to the one described by Penman. This formulation may be more appropriate to the temperate climatic areas.
- The Open Water surface PET (Shuttleworth, 1994) (OW).

The seasonal cycle of the PET (Fig. 3) is well reproduced by the three types of formulation. The PM PET values are lowest and the TO PET highest, except for August and September.

### Soil data

The first grid of SWHC used in the models is taken from the FAO's *Digitized Soil Map of the World* (FAO-UNESCO, 1974–1981). The FAO defines the soil units to which SWHC classes are associated. The SWHC classes mainly depend on the granulometric characteristics and on the depth of the soil layer penetrated by roots. The

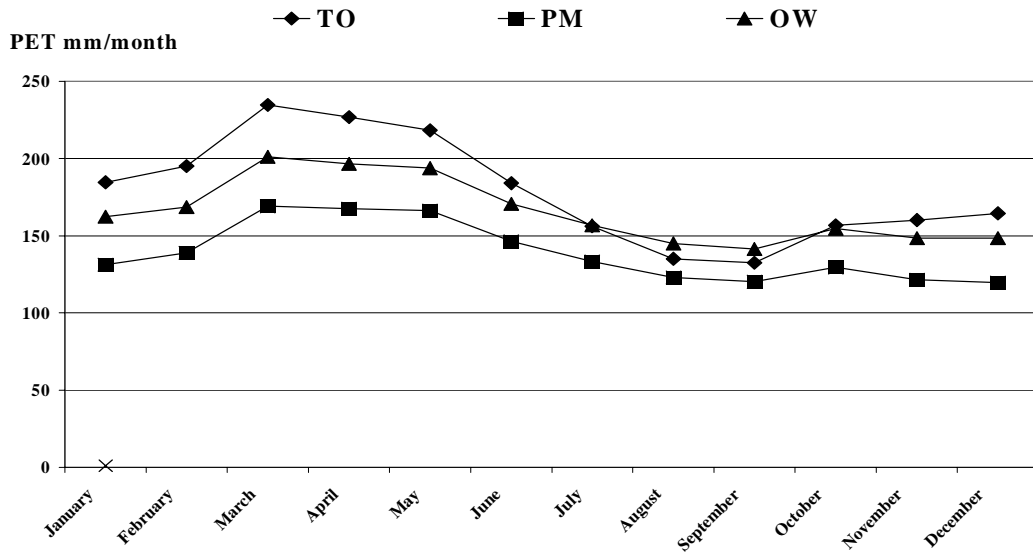


Fig. 3 Comparison of monthly averages of the Thom and Oliver (TO), Penman-Monteith (PM) and Open Water (OW) PET over the period 1950–1995.

method developed by the FAO to estimate SWHC is based on the standardized soil rooting depth values and on suction limits.

Another SWHC grid was obtained from the same soil units map established by the FAO according to another methodology described by Dunne & Willmott (1996) taking into account the type of the vegetation cover to define the plant rooting depth.

The comparison of these grids, illustrated in Fig. 4, clearly show that the values of the FAO grid are globally higher than those of the Dunne & Willmott (1996) grid (in 465 grid cells over a total of 565).

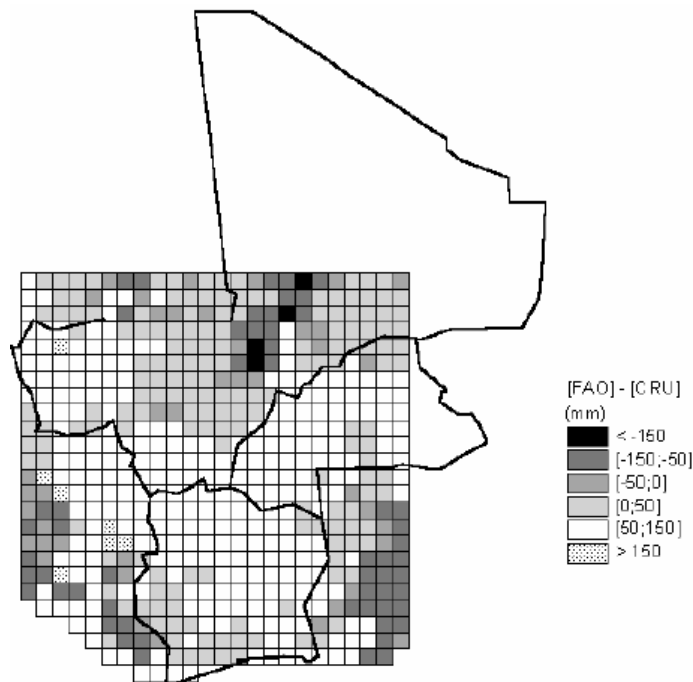


Fig. 4 Differences in the water field capacity between the FAO and the CRU soil grids.

**Table 1** Presentation of the selected stations.

| Catchment   | River     | Observing period | Area (km <sup>2</sup> ) |
|-------------|-----------|------------------|-------------------------|
| Samandeni   | Mouhoun   | 1956–1994        | 4 575                   |
| Boromo      | Mouhoun   | 1956–1993        | 58 000                  |
| Bada        | Bandama   | 1962–1996        | 24 075                  |
| Semien      | Sassandra | 1954–1996        | 29 300                  |
| Iradouougou | Niger     | 1962–1996        | 1 990                   |
| Douna       | Niger     | 1950–1996        | 101 600                 |
| Koulikoro   | Niger     | 1950–1996        | 120 000                 |

### Studied catchments

Seven gauging stations corresponding to sub-catchments of the Bandama and of the Sassandra (Côte d'Ivoire), of the Niger (Mali and Côte d'Ivoire) and of the Mouhoun (Burkina Faso) were selected (Table 1). The areas of these catchments range from 2000 km<sup>2</sup> up to 120 000 km<sup>2</sup>. They were selected according to the quantity and quality of available information.

### METHODOLOGY

The available time series were divided into two parts of approximately equal length, for calibration and for validation. The samples for calibration start in the moment of establishing a station (1955–1962) and end in the period 1975–1978. The validation periods extend after these dates.

The performances of the calibration and validation of the modelling are measured by the Nash Sutcliffe criterion (equivalent to coefficient  $r^2$  of linear regression) allowing the comparison of the observed and calculated hydrograms:

$$NASH = 100 \left[ 1 - \frac{\sum_i (Q_o^i - Q_c^i)^2}{\sum_i (Q_o^i - Q_m)^2} \right]$$

with  $Q_o^i$  and  $Q_c^i$  indicating the observed and calculated flows, respectively, and  $Q_m$  the observed mean flow over the whole period of observation without any missing data. It should be noted that the closer to 100 the criterion value, the better the model performance.

The calibration of the model's parameters for each "set" of possible grids ( $3 \times 3 \times 2 = 18$  possibilities for each catchment) was then performed. A set of optimal parameters was therefore obtained, according to the Nash Sutcliffe criteria, for each set of data grids. This set of optimal parameters was then validated for the set of data grid corresponding to its calibration, but also for the other 23 other grid combinations.

### RESULTS

The study of the results show noticeable differences between catchments. Tables 2 and 3 bring together some results obtained for a given catchment: the best grid-model combinations and the corresponding values of Nash Sutcliffe coefficient.

**Table 2** Synthesis of the best grid–model combinations and corresponding values of the Nash Sutcliffe coefficient in calibration.

| Catchment | Model | Rainfall grid | PET Grid | Soil data grid | Nash Sutcliffe value |
|-----------|-------|---------------|----------|----------------|----------------------|
| Samandeni | GR2M  | TRAVAIL       | TO       | FAO            | 84                   |
|           | WBM   | CRU-IRD       | OW       | FAO            | 68                   |
| Boromo    | GR2M  | CRU-IRD       | TO       | FAO            | 78                   |
|           | WBM   | CRU-IRD       | OW       | FAO            | 3                    |
| Bada      | GR2M  | TRAVAIL       | TO       | FAO            | 81                   |
|           | WBM   | TRAVAIL       | OW       | FAO            | 69                   |
| Semien    | GR2M  | CRU           | TO       | FAO            | 89                   |
|           | WBM   | CRU           | TO       | FAO            | 46                   |
| Iradougou | GR2M  | CRU-IRD       | TO       | FAO            | 81                   |
|           | WBM   | CRU           | OW       | FAO            | 85                   |
| Douna     | GR2M  | CRU-IRD       | TO       | FAO            | 70                   |
|           | WBM   | TRAVAIL       | OW       | FAO            | 3                    |
| Koulikoro | GR2M  | CRU-IRD       | TO       | FAO            | 84                   |
|           | WBM   | CRU           | OW       | FAO            | 88                   |

**Table 3** Synthesis of the best grid–model combinations and corresponding values of the Nash Sutcliffe coefficient in validation.

| Catchment | Model | Rainfall grid | PET Grid | Soil data grid | Nash Sutcliffe value |
|-----------|-------|---------------|----------|----------------|----------------------|
| Samandeni | GR2M  | TRAVAIL       | TO       | FAO            | 41                   |
|           | WBM   | CRU           | OW       | FAO            | 28                   |
| Boromo    | GR2M  | TRAVAIL       | OW       | CRU            | 68                   |
|           | WBM   | CRU           | TO       | FAO            | 40                   |
| Bada      | GR2M  | TRAVAIL       | TO       | FAO            | 62                   |
|           | WBM   | TRAVAIL       | OW       | FAO            | 18                   |
| Semien    | GR2M  | TRAVAIL       | TO       | FAO            | 90                   |
|           | WBM   | CRU           | PM       | CRU            | 44                   |
| Iradougou | GR2M  | TRAVAIL       | TO       | FAO            | 82                   |
|           | WBM   | TRAVAIL       | OW       | FAO            | 78                   |
| Douna     | GR2M  | CRU-IRD       | OW       | FAO            | -13                  |
|           | WBM   | CRU           | TO       | FAO            | 40                   |
| Koulikoro | GR2M  | CRU-IRD       | TO       | FAO            | 65                   |
|           | WBM   | CRU-IRD       | OW       | FAO            | 66                   |

As for calibration and for the studied catchments, the following conclusions are observed:

- The GR2M model generally seems to fit better than the WBM model: the maximum Nash Sutcliffe coefficient ranges from 70 to 89 for GR2M, while it ranges from 3 to 88 for WBM.
- The CRU-IRD rain grid generally gives better results with the GR2M model. In the case of the WBM model, it is the CRU rain grid which gives better results.
- The TO PET grid is the one which leads to better results for the GR2M model, while in the case of the WBM model the OW PET grid appears most often as the best one. On the other hand, the PM PET grid does not prove to be satisfactory.
- The FAO soil grid gives, in all cases, the best results.

The following conclusions regarding validation can be drawn:

- With the exception of the Douna catchment, GR2M model gives better results than the WBM model: the maximum Nash Sutcliffe coefficients range from 41 to 90 for

GR2M (value of Douna excluded) while they range from 18 to 78 for WBM.

- The TRAVAIL rain grid gives better results for the GR2M model. For the WBM model, it is the CRU rain grid which gives better results.
- The TO PET grid gives the best results for the GR2M model, while for the WBM model, the OW PET grid is more satisfactory. As a general rule, the PM PET grid does not lead to acceptable results.
- The FAO soil grid gives the best results.

When comparing the different results in calibration and in validation, it can be noticed that:

- The values of the Nash Sutcliffe coefficient for validation are lower than the values for calibrations, except for four cases (Semien and Iradougou–GR2M Model and Boromo and Douna–WBM Model).
- In four cases (Samandeni, Bada and Koulikoro–GR2M and Bada–WBM) out of 14 possible cases, the same grids are the best for both calibration and validation. In all other cases, the best grids are different.
- The WBM model seems to better adapt to the data related to the catchment of the River Niger than to the catchments of the rivers Volta, Bandama and Sassandra.

## COMMENTS

For the selected catchments, models and modelling time step, this work highlights rather surprising results, difficult to explain *a posteriori*.

The CRU–IRD rain grid (9 situations—all models put together) does not give results better than the CRU rain grid (8 situations—all models put together) even though it should be closer to local rainfall conditions since it integrates a more dense raingauge network.

The PET concept, where the limiting factor, especially during the dry seasons, is first of all the available water in the soil, is probably not adequately described in each of these models. It would certainly be good to reconsider its formulation for river modelling at a monthly time step (Ardoin *et al.*, 2001). The GR2M model seems to be more robust than the WBM model. Its algorithm is relatively simpler and it produces better results for both calibration and validation than the WBM model: the Nash Sutcliffe coefficient values are generally higher for GR2M than for WBM and, in particular, their range of variation is more limited. Only the Niger catchment in Douna seems to raise some problems of applicability considering this algorithm.

The values of the parameters obtained for each catchment are significantly different, and it would probably be difficult to regionalize them. Bearing in mind the selected catchments, the available data and the results obtained, it appears advantageous to use the GR2M model with the TRAVAIL rain grid, or even the CRU IRD rain grid, in order to build and use a processing chain of calibration and of validation. Further, the TO PET grid for the potential evapotranspiration and the FAO grid for the soil data, can be recommended.

## CONCLUSION

From the available rainfall data bank (about 300 stations covering the whole study area), it was possible to build distributed rainfall time series. The raingauge selection

and the interpolation methods used to generate this information were not the same in each case and led to grids which are statistically different from each other. According to the modelling results, the criterion of quantity of information does not seem to be the only one for choosing the best grid. In fact, the grids built using the largest quantity of information do not necessarily give the best results from the viewpoint of rainfall-runoff modelling.

The PET grids are obtained from the same climatic variables and from the same method of interpolation, but by applying three different formulae to estimate the potential evapotranspiration. The PET grids prove to give more or less different results from one to the others, even though the seasonal cycle of the PET is well reproduced.

The FAO soil grid based on hydrological concepts and not on agronomic ones, contrary to the Dunne & Willmott (1996) soil grid, clearly gives the best results for all the selected models and catchments. The GR2M model seems to be more robust than the WBM; for six catchments out of seven, it produces better results.

Other investigations on many other sub-catchments of the Niger showed that, depending on the rain data set used, it is possible to get identical values of Nash Sutcliffe criterion, but different values of annual correlation coefficient with discharges. These correlations could be improved from 10% to 40% by substituting the CRU rain grid by the CRU-IRD grid. The choice of the "optimum" grids is not the same for different optimization criteria; the correlation coefficient, or the Nash Sutcliffe criterion.

It should be noted that the climatic variability undergone by West Africa was not specifically taken into consideration. But, this phenomenon might have an influence on the parameters of the models' calibration. However, within the framework of this work, the scope was to examine the influence of the data and their spatial distribution on the results of hydrological modelling of large basins.

Actually, in the present case, it clearly appears that the choice which could be made regarding the input data will have consequences on the quality of the rainfall-runoff relationship modelling. The sensitivity, to the nature and the quality of the data of both studied algorithms here, is therefore emphasized.

The inadequacy of a reference to a calculated PET is clearly shown in these regions where the limiting factor, especially during the dry seasons, is first of all the availability of water in the soil. Evapotranspiration, an essential element of the water balance in West Africa, should therefore be explicitly considered within the framework of hydrological modelling.

A comparison of the two rainfall-runoff models confirms the robustness of the GR2M, already found in other studies. A simple model, initially built for temperate regions it shows a good capacity for adaptation in different climatic contexts.

Obviously, within the framework of water resources modelling at a regional scale, besides the choice of a rainfall-runoff relationship algorithm, the selection of the databases also has an influence on the quality of the results. The criteria for selection should not only be linked to the density of the information because other factors, such as homogeneity of the sources and adequacy of the concepts leading to the calculation of some variables, also affect the results.

Future work will examine a wider study area, as well as the use of other hydrological models working at different time steps. This will help to improve the criteria for choosing input data for hydrological modelling at a large or regional scale in the tropical area.

## REFERENCES

- Ambroise, B. (1999) La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant—Processus, Facteurs, Modèles. 2nd édition, Bucharest, 200 p.
- 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. Acad. Sci. Paris* t. 333, série II a, no. 10: 611–616.
- Conway, D. (1997) A water balance model of the Upper Blue Nile, Ethiopia. *Hydrol. Sci. J.* **42**, 265–286.
- Conway, D. & Jones, P. D. (1999) Assessing the impact of future climatic change on the water resources and the hydrology of the Rio de la Plata basin, Argentina. Climatic Research Unit, University of East Anglia, UK.
- Dunne, K. A. & Willmott, C. J. (1996) Global distribution of plant-extractable water capacity of soil. *Int. J. Climatol.* **16**, 841–859.
- FAO-UNESCO (1974–1981) *Digitized soil map of the world*. FAO-UNESCO.
- L'Hôte, Y., Mahé, G., Somé, B. & Triboulet J.-P. (2002) Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *Hydrol. Sci. J.* **47**(5) 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. *Hydrol. Sci. J.* **48**(3), 493–495.
- New, M. G., Hulme M. & Jones P. D. (2000) Representing 20th century space-time climate variability. II: Development of 1901–1996 monthly terrestrial climate fields. *J. Climate* **13**, 2217–2238.
- Ozer, P., Erpicum, M., Demarée, G. & Vandiepenbeeck, M. (2003) The Sahelian drought may have ended during the 1990s. Discussion of “Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues”. *Hydrol. Sci. J.* **48**(3), 489–492.
- Paturel, J. E., Servat, E. & Vassiliadis, A. (1995) Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data—case of the GR2M model. *J. Hydrol.* **168**(1–4), 111–126.
- Paturel, J. E., Ouedraogo, M., Servat E., Mahé, G., Dezetter, A. & Boyer, J.-F. (2003) The concept of rainfall and streamflow normals in West and Central Africa in a context of climatic variability. *Hydrol. Sci. J.* **48**(1), 125–138.
- Servat, E., Paturel, J. E., Kouamé, B., Travaglio, M., Ouedraogo, M., Boyer, J. F., Lubès-Niel, H., Fritsch, J. M., Masson, J. M. & Mariou, B. (1998) Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'ouest et centrale. In: *Water Resources Variability in Africa During the XXth Century* (Proc. Abidjan Symp., 1998), 323–338. IAHS Publ. no. 252.
- Shuttleworth, W. J. (1994) Evaporation. In: *Handbook of Hydrology* (ed. by R. D. Maidment), Chapter IV. McGraw-Hill, New York, USA.
- Smith, M. (1992) Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. Report. Land and Water Development Division, FAO, Rome, Italy.
- Thom, A. S. & Oliver, H. R. (1977) On Penman's equation for estimating regional evapotranspiration. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **103**, 345–357.

Received 5 February 2002; accepted 18 August 2003

## The concept of rainfall and streamflow normals in West and Central Africa in a context of climatic variability

**JEAN-EMMANUEL PATUREL, MAHAMAN OUEDRAOGO**

*UMR HydroSciences, Institut de Recherche pour le Développement (IRD), 01 BP 182, Ouagadougou 01, Burkina Faso*

[jean-emmanuel.paturel@hydro.ird.bf](mailto:jean-emmanuel.paturel@hydro.ird.bf)

**ERIC SERVAT**

*UMR HydroSciences, IRD – Maison des Sciences de l'Eau (MSE), BP 5045, F-34032 Montpellier Cedex, France*

**GIL MAHE**

*UMR HydroSciences, IRD, 01 BP 182, Ouagadougou 01, Burkina Faso*

**ALAIN DEZETTER, JEAN-FRANÇOIS BOYER**

*UMR HydroSciences, IRD – MSE, BP 5045, F-34032 Montpellier Cedex, France*

**Abstract** This contribution to the debate on the revision of rainfall and streamflow normals concerns three countries of West Africa: Burkina Faso, Ivory Coast and Mali. The rainfall deficit (15–20% on average in the study area) and the river flow deficit (about 30–50% and sometimes more) observed over the past 30 years in West and Central Africa raise the problem of the reference period that must be considered in estimates of hydrological characteristics. The hypothesis of the concept of “normal” supporting these estimates is a stability of the climate. However, the effect of taking or not taking into account the data of recent years on the estimates of these characteristics can lead to very different results. This would have serious consequences for the development and management of water resources systems, as seen in two examples of dams.

**Key words** rainfall normal; streamflow normal; climatic variability; drought; West and Central Africa

### **Le concept de normales pluviométriques et hydrométriques en Afrique de l'Ouest et Centrale dans un contexte de variabilité climatique**

**Résumé** Cette étude concerne trois pays d'Afrique de l'Ouest: le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire et le Mali. Il s'agit d'une contribution au débat sur la révision des normes hydrologiques tant en matière de précipitations que de débits. Les déficits pluviométriques (de l'ordre de 15 à 20% en moyenne dans la région étudiée) et sur les débits (de 30 à 50% et parfois plus) observés durant ces 30 dernières années en Afrique de l'Ouest et Centrale soulèvent la question de la période de référence qu'il convient de retenir pour la définition des caractéristiques hydrologiques. Par définition, le concept de normes hydrologiques fait référence à une stabilité du climat. A l'opposé, le fait de prendre en compte, ou non, les données des années récentes pour estimer les caractéristiques hydrologiques peut conduire à des résultats très différents et à de sérieuses conséquences sur la conception et le fonctionnement des ouvrages équipant les bassins versants. Le cas de deux barrages est évoqué ici.

**Mots clefs** normales pluviométriques; normales hydrométriques; variabilité climatique; sécheresse; Afrique de l'Ouest et Centrale

## INTRODUCTION

Problems related to climatic changes are among the most important of the present century. Moreover, the assessment and control of water resources are of paramount importance in general, and in developing countries in particular. There is therefore a particular and legitimate interest of scientists to study climatic variability and its impact on water resources.

Studies of rainfall fluctuations in West and Central Africa show a tendency to aridification from 1970 onwards. Initially observed and studied in the Sahelian regions, this drought also appeared in wetter regions, near the Gulf of Guinea (Sircoulon, 1976; Nicholson, 1985; Hubert & Carbonnel, 1987; Nicholson *et al.*, 1988; Hubert *et al.*, 1989; Demarée, 1990; Mahé & Citeau, 1993; Mahé & Olivry, 1995; Paturel *et al.*, 1997, 1998; Servat *et al.*, 1997a,b; Mahé *et al.*, 2001b; L'Hôte *et al.*, 2002). The rainfall deficit, observed over several consecutive years, has reduced flows of the region (Sircoulon, 1987; Sutcliffe & Knot, 1987; Olivry *et al.*, 1993; Mahé & Olivry, 1991, 1999; Aka *et al.*, 1996; Servat *et al.*, 1997c; Fanta *et al.*, 2001).

These rainfall and streamflow deficits, observed over a long period of 30 years, raise the problem of the period of reference that must be considered to estimate the hydrological characteristics used by those working in the field of development projects. Indeed, what value can be given, for instance, to rainfall normals calculated over the period 1961–1980, or even over the period 1951–1980, when it is known that, in the Sahelian and the Sudanian zones, annual rainfall amounts have not exceeded the long-term annual mean since 1969?

Many authors insist on an urgent need for revising the rainfall and streamflow normals. For example, Todorov (1985) shows that, if 16 years of measurements (1968–1983) are integrated in the chronological series of Sahelian rain gauge records, all the “new” rainfall averages, except one, are lower than those already established by the World Meteorological Organization. Bricquet *et al.* (1996) showed that, of the annual maximum flows of the River Niger at Koulikoro for the period 1971–1992, discharges are 24% lower than those for the whole period of observation (1922–1992).

These few results should have led to operational recommendations and to adjustments of methods in use. However, most of the publications used in planning and water resources management in West and Central Africa still employ information based on the periods 1941–1970 or 1951–1980, and rarely on the period 1961–1990. One can easily understand the problems brought about by this inadequacy between the observed situation and the normals used. Moreover, there are several projects in West and Central Africa which have required heavy investments, yet the expectations have not materialized as the nominal design values were different from the ones which occurred in reality. This justifies the concern about drought events and the selection of hydrological normals to be used.

## DROUGHTS RECORDED OVER THE 20TH CENTURY IN WEST AND CENTRAL AFRICA

Droughts become a matter of consideration when they have a regional dimension, when they last long, and when they affect the population, the environment and the

socio-economic systems in which people live. From available data, historical research, witness reports and sayings (Sircoulon, 1976, 1987; Paturel *et al.*, 1998), there was a significant drought resulting in severe starvation between 1913 and 1916 in West and Central Africa. According to the same sources, there was a drought in the middle of the century (1940–1944), also with dramatic consequences although it was less severe than the 1913–1916 drought and probably more localized (Nigeria). Since the beginning of the 1970s, the media have constantly reported on the successive droughts in West Africa and, to a lesser extent, in Central Africa. Several intervals with contrasting climates were thus identified over the 20th century.

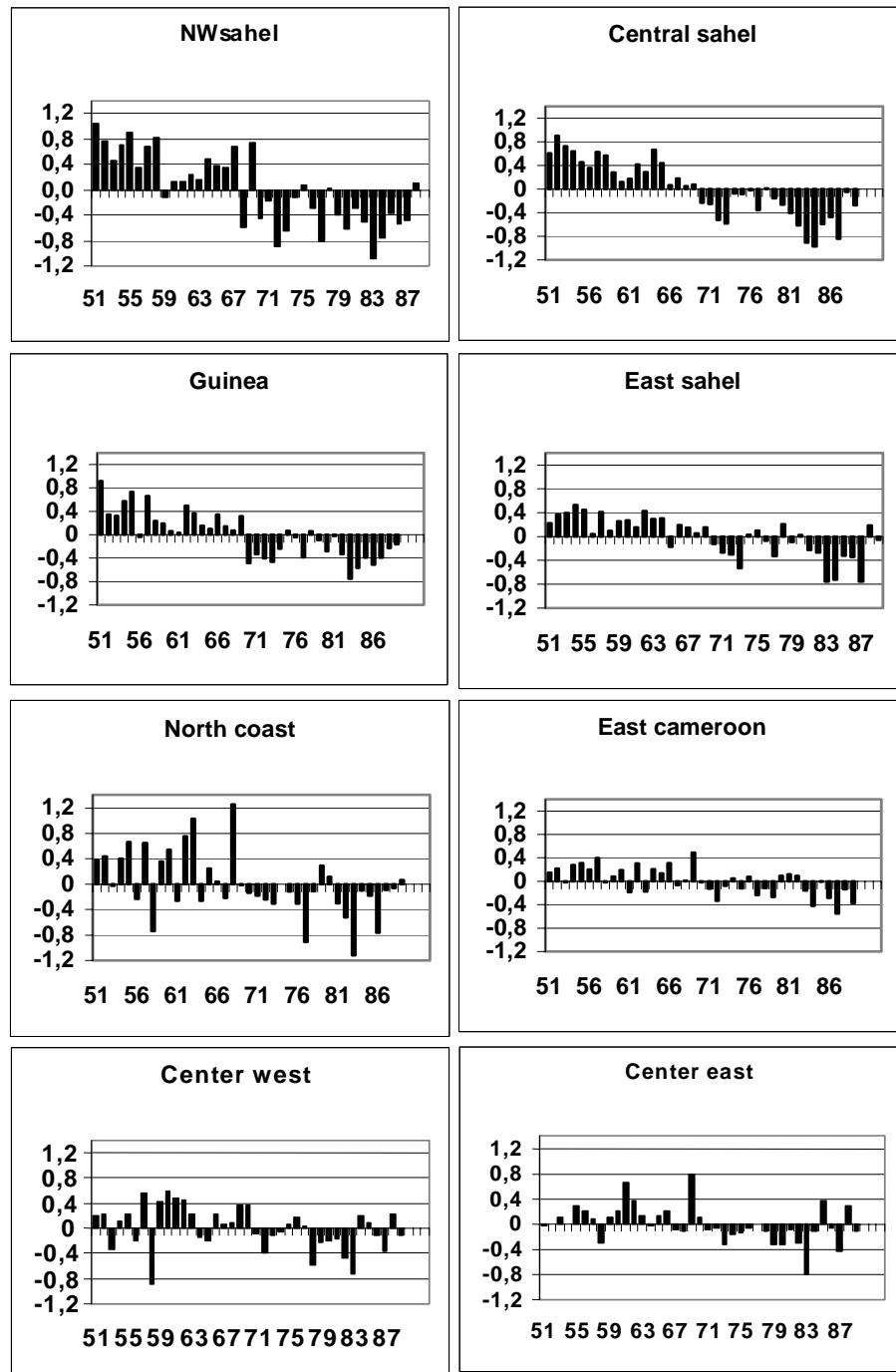
### **VARIATIONS IN RAINFALL AND RUNOFF OVER THE SECOND HALF OF THE 20TH CENTURY**

The relative inconsistencies of pluviometric and hydrometric information at the beginning of the 20th century do not always allow an objective comparison between the different climatic events that occurred during the whole of the century. During the second half of the 20th century, on the other hand, there was a marked expansion of measurement networks, particularly of the hydrometric network, which was at an embryonic stage up to 1950 with only a few big streams being measured regularly.

Most studies in West and Central Africa usually compare the rainfall levels during the 1950s and 1960s to those of the 1970s and 1980s: the former corresponding to a wet or excess period as far as rainfall and flow are concerned, whereas the latter correspond to a dry or deficit period. The drought that occurred since 1970 differs from the earlier ones in its duration, intensity and regional extent (Sircoulon, 1990). As for the 1990s, only a few regional studies of water availability have been carried out to the authors' knowledge. Nevertheless, many people seem to agree that also during this decade a water deficit was observed.

Mahé *et al.* (2001b) analysed annual rainfall over 1951–1989 in West and Central Africa (Fig. 1). They identified eight climatic sectors, which could be regrouped in six large geographical areas, and calculated annual pluviometric indexes (standard deviation values): Sahel (“NWsahel”, “Central sahel” and “East sahel”), the Guinean mountains (“Guinea”), the Guinea Gulf (“North coast”), the Cameroon mountains (“East cameroon”), the western equatorial region (“Center west”) and the eastern equatorial region (“Center east”). The results obtained are confirmed by those of Servat *et al.* (1998). They focused on the existence of a deficit period since 1970, affecting the whole of West Africa. Central Africa seems to have been less affected by this phenomenon and the said climatic fluctuation does not seem to depart from the normal range of natural variability. Generally speaking, in West and Central Africa, after 1970, the mean annual rainfall was about 15–20% below the values for the reference period of 1950–1989.

This highest rainfall deficit observed for 30 years has had serious impacts on the river flows in West and Central Africa (Fig. 2): the mean discharge deficits are commonly greater than 30% and sometimes exceed 50% (Fig. 3).

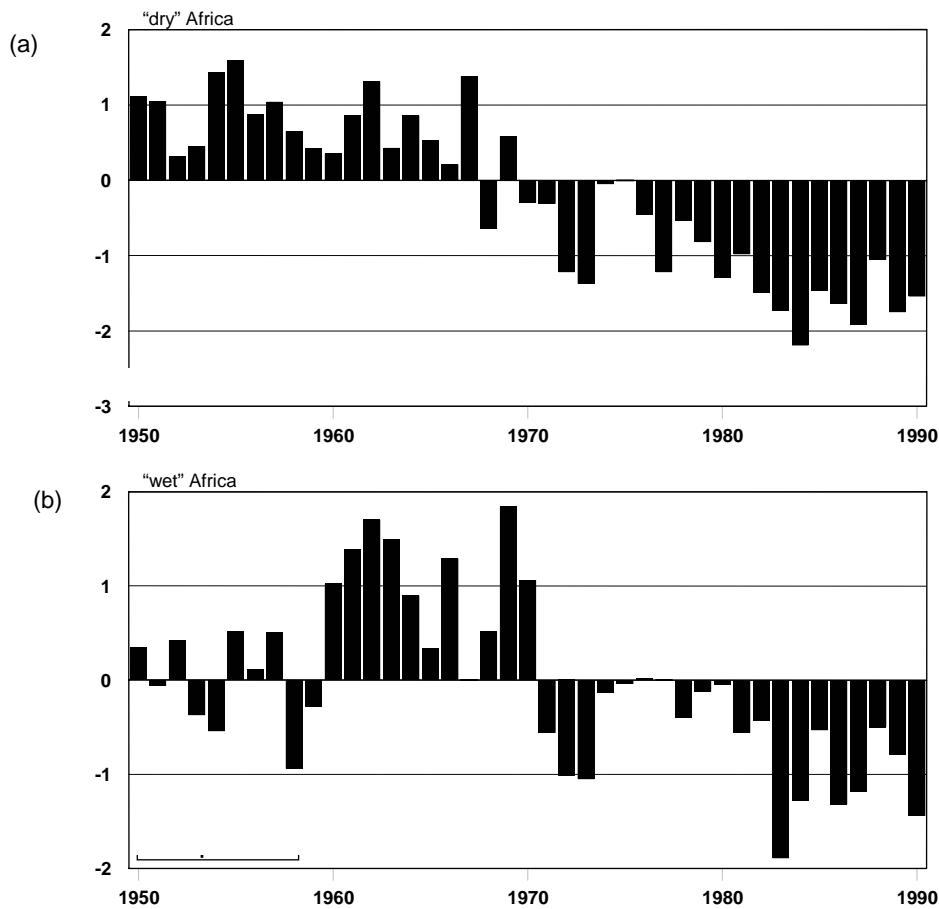


**Fig. 1** Variations in standardized annual rainfall indexes in West and Central Africa (from Mahé *et al.*, 2001b).

## VARIATIONS IN RAINFALL AND STREAMFLOW NORMALS

### Methodology

The aim is to quantify the incidence of drought years in West and Central Africa. The availability of data limits the study to the period 1951–1997.



**Fig. 2** Variations in flows since 1950: (a) in “dry” Africa (Chari, Niger and Senegal) and (b) in “wet” Africa (Oubangui and Sangha) (from Bricquet *et al.*, 1997).

Two options are considered:

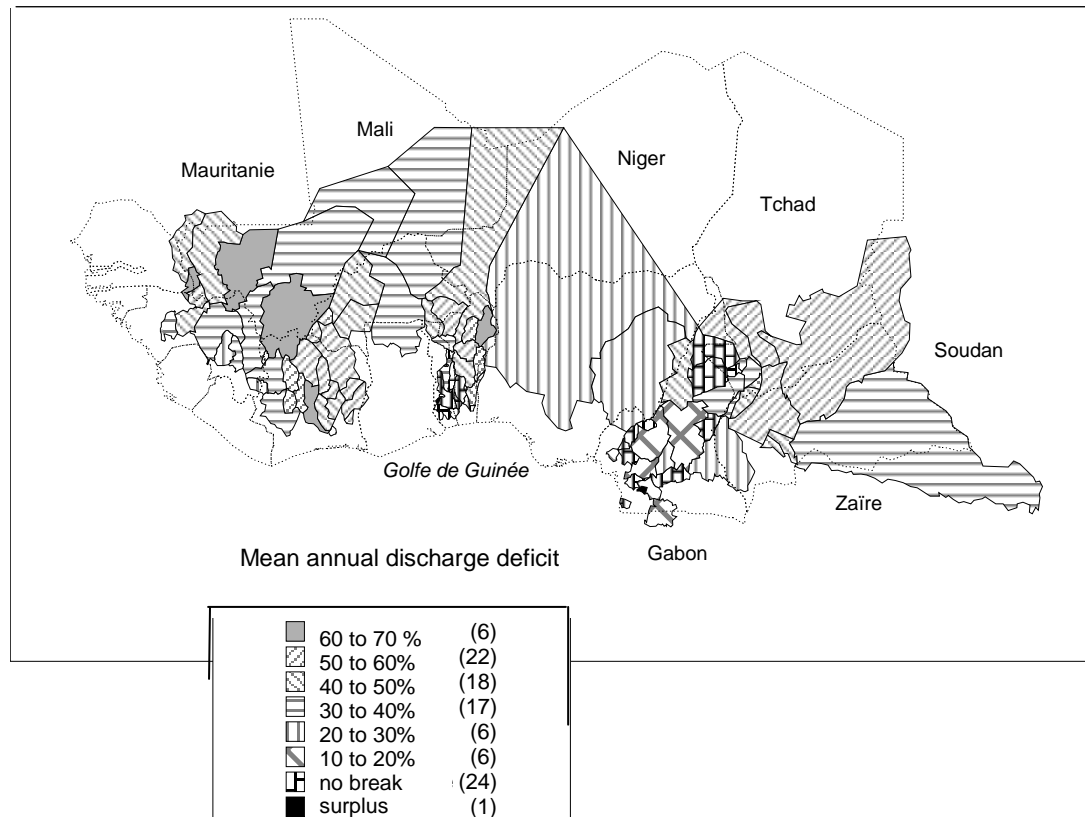
- (a) to base the new normal on the most recent data, i.e. to take into consideration only the “dry” period 1971–1997; and
- (b) to integrate the most recent data with the earlier data, i.e. to take the whole period 1951–1997 into consideration.

The period 1951–1980, still too frequently used to define and calculate normals, is used as the reference and comparison point. The results are shown for Ivory Coast, Burkina Faso and Mali.

### Rainfall normals

Traditionally, and by agreement, the World Meteorological Organization defines normals based on periods of 30 years.

**Normals based on most recent data** Figure 4 shows maps of 30-year averages of annual rainfall for the periods 1951–1980, 1961–1990, and 1971–1997 for Burkina Faso, Mali and Ivory Coast. The form of the isohyets is maintained from one period to



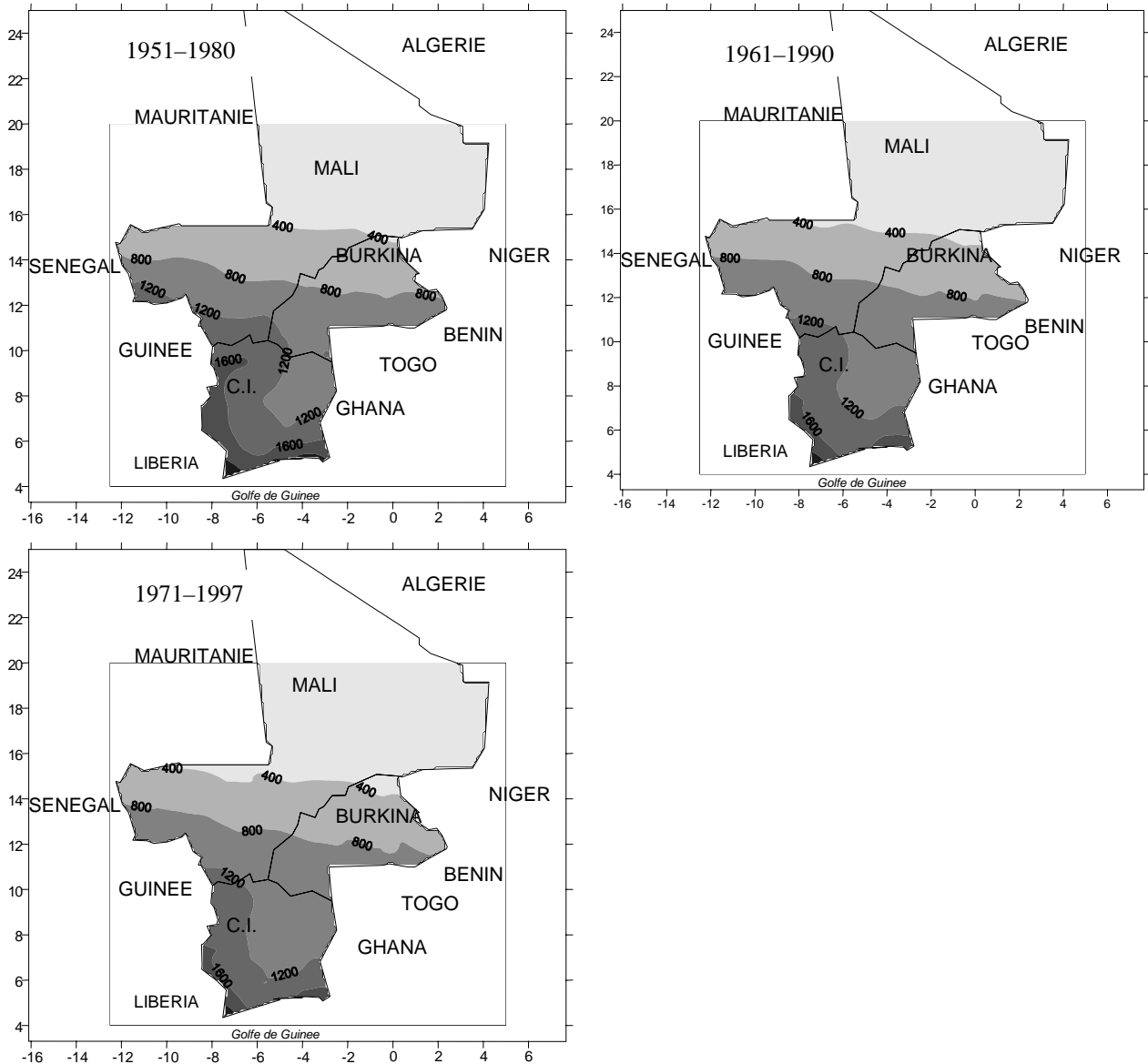
**Fig. 3** Mean annual discharge deficit in various catchments since the observed discontinuity around 1970 (from Servat *et al.*, 1997b).

another but a general shift of the isohyets towards the south–southwest is observed, clearly showing a rainfall deficit over the periods 1961–1990 and 1971–1997, compared with the period 1951–1980.

For the period 1961–1990 (Fig. 4), there was a southward shift in the 400 mm isohyet of about 50 km, and a similar shift in the 800 mm isohyet of about 100 km. The 1200 mm isohyet disappears completely from Burkina Faso, and covers only a small part of the south of Mali and considerably recedes towards the southern part of Ivory Coast. The zone of annual rainfall exceeding 1600 mm is located in the extreme southwestern part of Ivory Coast during 1961–1990.

The recession is even more marked for the period 1971–1997 (Fig. 4(c)). It also confirms that the 1990s was a dry decade. The difference between the mean annual isohyets of the periods 1951–1980 and 1971–1997 is presented in Fig. 5. Throughout the study area, the mean annual rainfall for 1971–1997 is lower than that for 1951–1980. The deficits mostly vary between 10 and 20% but are greater in some areas. These shifts of the normal have serious consequences for development and management of water resources systems.

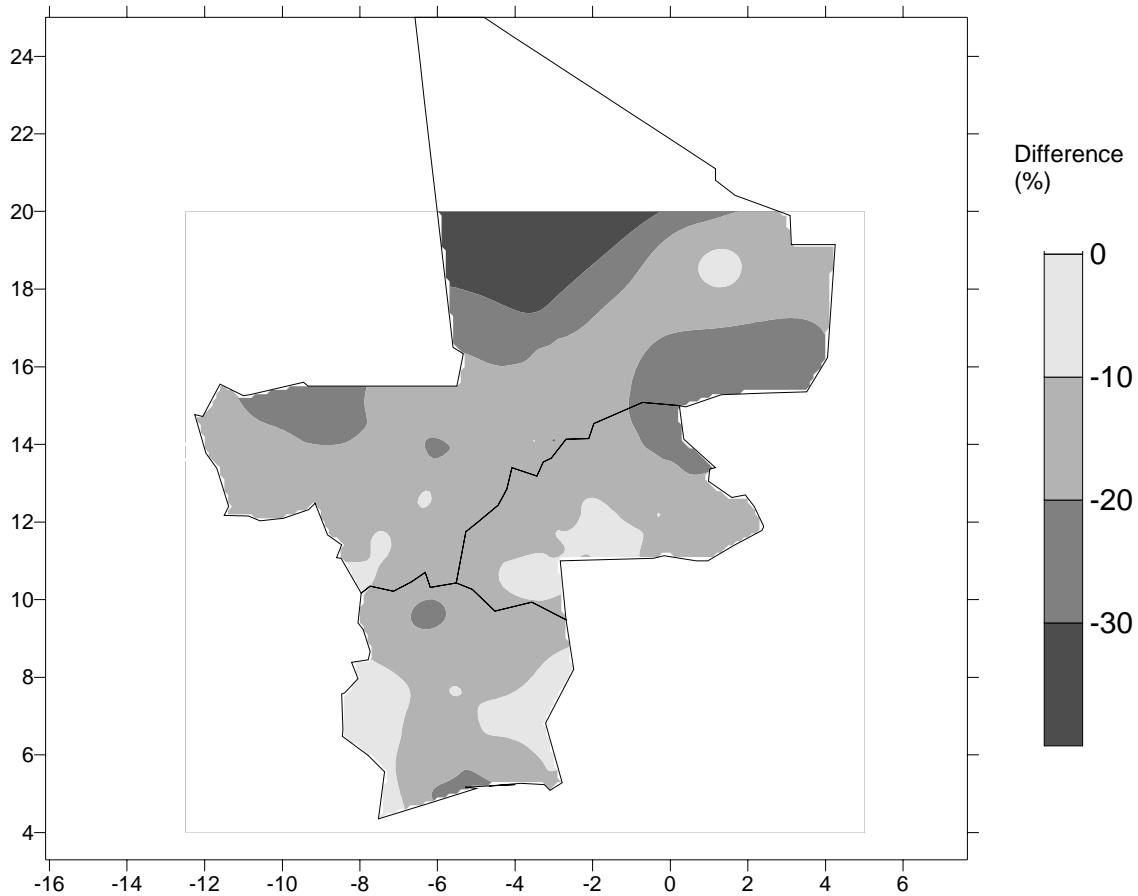
**Normals based on the integration of most recent data** Because of the exceptional character of the drought that occurred since the beginning of the 1970s, it is necessary to be careful in defining the normal. Rather than use averages over a moving window of 30 year duration, it is recommended to base calculations on all the



**Fig. 4** Rainfall normals (400, 800, 1200 and 1600 mm) for the years 1951–1980, 1961–1990 and 1971–1997 for Burkina Faso, Mali and Ivory Coast (CI).

data. To consider the quality and density of the information (as described above), a calculation of rainfall normals over the period 1951–1997 could be undertaken.

Figure 6 presents the difference between the mean annual isohyets for the periods 1951–1980 (reference) and 1951–1997. The normal for 1951–1997 is almost systematically lower than that for the years 1951–1980 by 0–10%. The gaps are then logically weaker than when the two distinct periods 1951–1980 and 1970–1997 are considered. This illustrates that it is important to recognize the changing pattern of water availability over the recent decades.



**Fig. 5** Difference between rainfall normals for 1971–1997 and 1951–1980.

### River flow normals

Previous studies (Aka *et al.*, 1996; Bricquet *et al.*, 1996, 1997; Servat *et al.*, 1997c, 1998; Mahé & Olivry, 1999) have shown that anomalies in river flows are greater than those observed for rainfall. The nonlinearity of the rainfall–runoff relationship explains these major differences. In West and Central Africa, the economy strongly depends on the management of water resources (agricultural development projects, hydro-electricity production, infrastructures protection, water supply, etc.). The impact of the recent climatic variability on the rivers and the definition of the corresponding normal is therefore very important.

In the countries of the zone studied here, the frequency of flows greater than the average is most commonly used to evaluate the hydrological variables necessary when dimensioning infrastructures. The results presented here are the variations in flows for specific return periods. These results are obtained from adjustments of mean annual flows and high flow characteristics of the series for the rivers Kouroukele at Iradougou (a Niger tributary in Ivory Coast, 1990 km<sup>2</sup>), Bandama at Bada (Ivory Coast, 24 050 km<sup>2</sup>), Sassandra at Semien (Ivory Coast, 29 300 km<sup>2</sup>), Mouhoun at Dapola (Burkina Faso, 70 000 km<sup>2</sup>) and Bani at Douna (a Niger tributary in Mali, 101 650 km<sup>2</sup>). The adjustments were made through the use of a normal law or its derivatives.

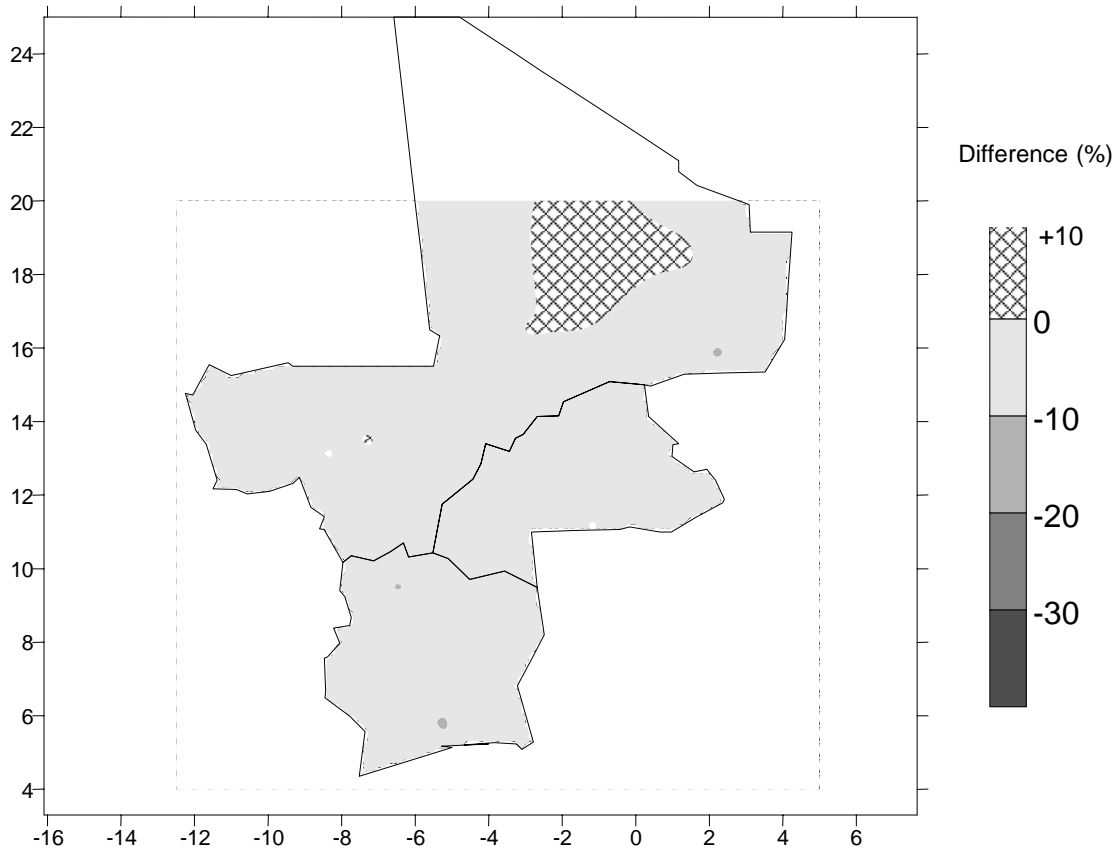


Fig. 6 Difference between rainfall normals for 1951–1997 and 1951–1980.

Problems with data quality precluded similar analysis of the low flow data. Moreover, for many rivers of these regions, the flows used to be perennial, but are now ephemeral. Data are available at Douna from 1951 onwards, at Semien from 1954, at Dapola from 1955, and at Iradougou and Bada from 1962. These differences of “start” dates do not fundamentally affect the results obtained.

**Mean annual flows** The mean annual flows are widely used to characterize the availability of water resources. Table 1 regroups the values of mean annual flows obtained in the five basins for different frequencies associated with the wet return period.

*Definition of normal based on the most recent data* The estimates of mean annual flows for the period 1971–1997 are systematically lower than those for the period 1951–1980, which are often used to define river flow normals. The most significant differences are observed at Douna: the difference between estimates is more than 55% for all the return periods. As an illustration of the magnitude of the shifts, the “new” annual flow for the 100-year return period is lower than the 10-year return period value for 1951–1980.

*Definition of normal based on the integration of the most recent data* The estimates of mean annual flows for the period 1951–1997 are lower than those for the

**Table 1** Values of mean annual flows ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) associated with wet return periods and the difference compared to 1951–1980.

| Basin                   | Return period |               |                |           |               |                |           |               |                |            |               |                |
|-------------------------|---------------|---------------|----------------|-----------|---------------|----------------|-----------|---------------|----------------|------------|---------------|----------------|
|                         | 10 years:     |               |                | 20 years: |               |                | 50 years: |               |                | 100 years: |               |                |
|                         | 1951–1980     | 1951–1997     | 1971–1997      | 1951–1980 | 1951–1997     | 1971–1997      | 1951–1980 | 1951–1997     | 1971–1997      | 1951–1980  | 1951–1997     | 1971–1997      |
| Bandama at Bada         | 183           | 155<br>(–15%) | 108<br>(–41%)  | 201       | 173<br>(–14%) | 121<br>(–40%)  | 221       | 194<br>(–12%) | 134<br>(–39%)  | 235        | 208<br>(–11%) | 143<br>(–39%)  |
| Mouhoun at Dapola       | 161           | 152<br>(–6%)  | 113<br>(–30%)  | 176       | 167<br>(–5%)  | 125<br>(–29%)  | 192       | 185<br>(–4%)  | 138<br>(–28%)  | 202        | 196<br>(–3%)  | 146<br>(–28%)  |
| Bani at Douna           | 842           | 765<br>(–9%)  | 333<br>(–60%)  | 929       | 859<br>(–8%)  | 374<br>(–60%)  | 1027      | 966<br>(–6%)  | 422<br>(–59%)  | 1092       | 1036<br>(–5%) | 456<br>(–58%)  |
| Kouroukele at Iradougou | 27.2          | 25.1<br>(–8%) | 19.8<br>(–27%) | 29.4      | 28.1<br>(–4%) | 21.5<br>(–27%) | 31.9      | 31.7<br>(–1%) | 23.4<br>(–27%) | 33.6       | 34.1<br>(+1%) | 24.7<br>(–26%) |
| Sassandra at Semien     | 328           | 301<br>(–8%)  | 234<br>(–29%)  | 358       | 331<br>(–8%)  | 249<br>(–30%)  | 394       | 366<br>(–7%)  | 267<br>(–32%)  | 419        | 390<br>(–7%)  | 279<br>(–33%)  |

**Table 2** Estimated values of 1-day maxima ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) associated with wet return periods and the difference compared to 1951–1980.

| Basin                   | Return period |               |                |           |               |                |           |                |                |            |                |                |
|-------------------------|---------------|---------------|----------------|-----------|---------------|----------------|-----------|----------------|----------------|------------|----------------|----------------|
|                         | 10 years:     |               |                | 20 years: |               |                | 50 years: |                |                | 100 years: |                |                |
|                         | 1951–1980     | 1951–1997     | 1971–1997      | 1951–1980 | 1951–1997     | 1971–1997      | 1951–1980 | 1951–1997      | 1971–1997      | 1951–1980  | 1951–1997      | 1971–1997      |
| Bandama at Bada         | 991           | 878<br>(–11%) | 804<br>(–19%)  | 1108      | 986<br>(–11%) | 909<br>(–18%)  | 1239      | 1107<br>(–11%) | 1028<br>(–17%) | 1327       | 1188<br>(–10%) | 1107<br>(–17%) |
| Mouhoun at Dapola       | 756           | 710<br>(–6%)  | 667<br>(–12%)  | 837       | 787<br>(–6%)  | 736<br>(–12%)  | 927       | 875<br>(–6%)   | 813<br>(–12%)  | 988        | 933<br>(–6%)   | 835<br>(–15%)  |
| Bani at Douna           | 3405          | 3139<br>(–8%) | 1821<br>(–47%) | 3716      | 3507<br>(–6%) | 2026<br>(–45%) | 4066      | 3920<br>(–4%)  | 2256<br>(–45%) | 4299       | 4196<br>(–2%)  | 2410<br>(–44%) |
| Kouroukele at Iradougou | 135           | 122<br>(–10%) | 104<br>(–23%)  | 145       | 132<br>(–9%)  | 111<br>(–23%)  | 157       | 143<br>(–9%)   | 120<br>(–24%)  | 164        | 150<br>(–9%)   | 125<br>(–24%)  |
| Sassandra at Semien     | 1639          | 1536<br>(–6%) | 1328<br>(–19%) | 1763      | 1688<br>(–4%) | 1431<br>(–19%) | 1902      | 1866<br>(–2%)  | 1546<br>(–19%) | 1994       | 1990<br>(0%)   | 1623<br>(–19%) |

**Table 3** Estimated values of 30-day annual maxima ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) associated with wet return periods and the difference compared to 1951–1980.

| Basin                   | Return period |                |                |           |                |                |           |                |                |            |                |                |
|-------------------------|---------------|----------------|----------------|-----------|----------------|----------------|-----------|----------------|----------------|------------|----------------|----------------|
|                         | 10 years:     |                |                | 20 years: |                |                | 50 years: |                |                | 100 years: |                |                |
|                         | 1951–1980     | 1951–1997      | 1971–1997      | 1951–1980 | 1951–1997      | 1971–1997      | 1951–1980 | 1951–1997      | 1971–1997      | 1951–1980  | 1951–1997      | 1971–1997      |
| Bandama at Bada         | 944           | 744<br>(–21%)  | 644<br>(–32%)  | 1056      | 838<br>(–21%)  | 729<br>(–31%)  | 1181      | 944<br>(–20%)  | 825<br>(–30%)  | 1265       | 1014<br>(–20%) | 889<br>(–30%)  |
| Mouhoun at Dapola       | 723           | 620<br>(–14%)  | 575<br>(–20%)  | 802       | 693<br>(–14%)  | 641<br>(–20%)  | 891       | 776<br>(–13%)  | 716<br>(–20%)  | 950        | 831<br>(–13%)  | 766<br>(–19%)  |
| Bani at Douna           | 3387          | 3026<br>(–11%) | 1700<br>(–50%) | 3698      | 3390<br>(–8%)  | 1899<br>(–49%) | 4048      | 3799<br>(–6%)  | 2122<br>(–48%) | 4242       | 4072<br>(–4%)  | 2272<br>(–46%) |
| Kouroukele at Iradougou | 124           | 102<br>(–18%)  | 88<br>(–29%)   | 133       | 110<br>(–17%)  | 94<br>(–29%)   | 143       | 119<br>(–17%)  | 102<br>(–29%)  | 150        | 126<br>(–16%)  | 107<br>(–29%)  |
| Sassandra at Semien     | 1408          | 1081<br>(–23%) | 960<br>(–32%)  | 1510      | 1164<br>(–23%) | 1030<br>(–32%) | 1626      | 1257<br>(–23%) | 1108<br>(–32%) | 1702       | 1319<br>(–23%) | 1160<br>(–32%) |

period 1951–1980, although they are greater than those for the period 1971–1997. The effects of drought years are partially compensated for by the high values observed in the wet decades, the 1950s and 1960s. The clearest differences are noted at Bada.

**Characteristics of high flows** The study of high flows consisted of analysing series of annual maximum 1- and 30-day mean flows. The results are summarized in Tables 2 and 3.

The estimates of the 1-day maxima for the period 1971–1997 are always lower than those for the other periods. Nevertheless, the variations in the estimates of the 1-day maxima from one period to another do not reach the relative amplitude of those recorded for the annual mean flows. High flows have been probably less affected by climate change than mean flows or low flows.

The 30-day maxima for the period 1971–1997 are always lower than those over other periods. The variations in the estimates of the 30-day maxima from one period to another are greater than those recorded for the 1-day maxima.

The variations in the 30-day maxima estimates are more closely related to those observed in the annual means. They are even of the same magnitude for the Kouroukele and the Sassandra rivers.

In absolute values, deviations are still visible: at Douna, the decadal flow for the period 1951–1980 corresponds to a return period of 20 years for 1951–1997, but does not even reach the 100-year level for 1971–1997.

## LIMITATIONS OF RAINFALL AND STREAMFLOW NORMALS

From the results obtained, particularly on the streamflow normals, it may be easily seen that managers or decision makers may design projects (e.g. hydraulic structures), which are technically and economically different, depending on the normals used.

For example, the big Bagre Dam in Burkina Faso, constructed in 1992, was designed using the pre-1980 data. Its spillway was dimensioned for a peak flow estimated at  $1520 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . In 1994, a flood occurred that reached a peak flow estimated at  $2050 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . This was unexpected and paradoxical because of the climatic context of drought. Analysis of the data for part of the upstream basin showed a considerable increase in the runoff coefficients since 1970. Mahé *et al.* (2001a) showed that, although the rainfall decreased, the flows were more marked. If this information and the most recent data were taken into consideration, one would probably estimate peak flow values that are considerably higher than those used in the design. In contrast, the Kossou Dam in Ivory Coast, designed based on a “wetter” normal and constructed during a “wet” period and inaugurated at the beginning of the drought during the 1970s, has never filled to its nominal capacity.

These examples emphasize the complexity of the phenomenon of persisting drought. Drought leads to modifications of habits, behaviours, and agricultural practices. In addition to the nonlinearity of the rainfall–runoff transformation, this set of factors emphasizes the need for hydrosystems to be stable. Taking into account the “new” normal is certainly necessary, in the light of the results presented here, but the evolution of the land use and land cover must be also considered.

In the process of design of dams (or of any other hydraulic works) in Africa, it must be taken into consideration that, during design life of structures, there may be major fluctuations in discharge due to changes in the flow regimes of the rivers concerned. The design must therefore be robust, taking into account the effects of strong variability, i.e. several years of drought or of water surplus (Hubert *et al.*, 1989).

The problem of revision of rainfall and streamflow normals is therefore of considerable practical importance and one to which it is difficult to propose a unique and definitive solution.

**Acknowledgements** The authors wish to acknowledge both reviewers for their relevant comments which were helpful in the writing of the final version of this paper.

## REFERENCES

- Aka, A., Lubès, H., Masson, J. M., Servat, E., Paturol, J. E. & Kouamé, B. (1996) Analysis of the temporal variability of runoff in Ivory Coast: statistical approach and phenomena characterization. *Hydrol. Sci. J.* **41**(6), 959–970.
- Bricquet, J. P., Bamba, F., Mahé, G., Touré, M. & Olivry, J. C. (1997) Evolution récente des ressources en eau de l’Afrique atlantique. *Rev. Sci. Eau* **3**, 321–337.
- 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). In: *L’Hydrologie tropicale. géoscience et outil pour le développement* (Proc. Paris Symp., May 1995) (ed. by P. Chevallier & B. Pouyau), 157–166. IAHS Publ. no. 238.
- Demarée, G. (1990) An indication of climatic change as seen from the rainfall data of a Mauritanian station. *Theor. Appl. Climatol.* **42**, 139–147.
- Fanta, B., Zaake, B. T. & Servat, E. (2001) A study of variability of annual river flow of the southern African region. *Hydrol. Sci. J.* **46**(4), 513–524.
- Hubert, P. & Carbonnel, J. P. (1987) Approche statistique de l’aridification de l’Afrique de l’Ouest. *J. Hydrol.* **95**, 165–183.
- Hubert, P., Carbonnel, J. P. & Chauouche, A. (1989) Segmentation des séries hydrométriques: application à des séries de précipitations et de débits de l’Afrique de l’Ouest. *J. Hydrol.* **110**, 349–367.
- L’Hôte, Y., Mahé, G., Bonaventure, S. & Triboulet, J. P. (2002) Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *Hydrol. Sci. J.* **47**(4), 563–574.
- 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 Clim. Satell.* **44**, 34–54.
- 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* (Proc. Vienna Symp., August 1991) (ed. by F. H. M. van de Ven, D. Gutknecht, D. P. Loucks & K. A. Salewicz), 163–171. IAHS Publ. no. 201.
- Mahé, G. & Olivry, J. C. (1995) Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l’Ouest et Centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse* **6**(1), 109–117.
- Mahé, G. & Olivry, J. C. (1999) Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa. *C. R. Acad. Sci., Paris sér. Ila* **328**, 621–626.
- Mahé, G., Dray, A., Paturol, J. E., Cres, A., Koné, F., Manga, M., Cres, F. N., Djoukam, J., Maïga, A., Ouedraogo, M., Conway, D. & Servat, E. (2001a) 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* (Proc. Cape Town Symp., March 2002) (ed. by H. A. J. van Lanen & S. Demuth), 69–75. IAHS Publ. no. 274.
- Mahé, G., L’Hôte, Y., Olivry, J. C. & Wotling, G. (2001b) Trends and discontinuities in regional rainfall of West and Central Africa: 1951–1989. *Hydrol. Sci. J.* **46**(2), 211–226.
- Nicholson, S. E. (1985) Subsaharan rainfall 1981–84. *J. Clim. Appl. Met.* **24**, 1388–1391.
- Nicholson, S. E., Kim, J. & Hoopingarner, J. (1988) Atlas of African rainfall and its interannual variability. Department of Meteorology, Florida State University, Tallahassee, Florida, USA.
- Olivry, J. C., Bricquet, J. P. & Mahé, G. (1993) Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l’Afrique humide. In: *Hydrology of Warm Humid Regions* (Proc. Yokohama Symp., July 1993) (ed. by J. S. Gladwell), 67–78. IAHS Publ. no. 216.
- Paturol, J. E., Servat, E., Lubès, H., Kouamé, B., Ouedraogo, M. & Masson, J. M. (1997) Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea, Part two: an integrated regional approach. *J. Hydrol.* **191**, 16–36.
- Paturol, J. E., Servat, E., Lubès, H. & Delattre, M. O. (1998) Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l’ouest et centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrol. Sci. J.* **43**(6), 937–946.
- Servat, E., Paturol, J. E., Lubès, H., Kouamé, B., Ouedraogo, M. & Masson, J. M. (1997a) Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea, Part one: detailed analysis of the phenomenon in Côte d’Ivoire. *J. Hydrol.* **191**, 1–15.
- Servat, E., Paturol, J. E., Lubès, H., Kouamé, B. & Masson, J. M. (1997b) Variabilité des régimes pluviométriques en Afrique de l’Ouest et Centrale non sahélienne. *C. R. Acad. Sci. Paris sér. Ila* **324**, 835–838.
- Servat, E., Paturol, J. E., Lubès, H., Kouamé, B., Travaglio, M. & Marieu, B. (1997c) De la diminution des écoulements en Afrique de l’Ouest et Centrale. *C. R. Acad. Sci. Paris sér. Ila* **325**, 679–682.
- Servat, E., Paturol, J. E., Kouamé, B., Travaglio, M., Ouedraogo, M., Boyer, J. F., Lubès-Niel, H., Fritsch, J. M., Masson, J. M. & Marieu, B. (1998) Identification, caractérisation et conséquences d’une variabilité hydrologique en Afrique de l’ouest et centrale. In: *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century* (Proc. Abidjan Symp., November 1998) (ed. by E. Servat, D. Hughes, J.-M. Fritsch & M. Hulme), 323–337. IAHS Publ. no. 252.

- Sircoulon, J. (1976) Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses "1913" et "1940". *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.* **XIII**(2), 75–174.
- Sircoulon, J. (1987) Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'Ouest depuis le début du 20ème siècle. In: *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources* (Proc. Vancouver Symp., August 1987) (ed. by S. I. Solomon, M. Beran & W. Hogg), 13–25. IAHS Publ. no. 168.
- Sircoulon, J. (1990) Impact possible des changements climatiques à venir sur les ressources en eau des régions arides et semi-arides. WMO / TD no. 380, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- Sutcliffe, J. V. & Knott, D. G. (1987) Historical variations in African water resources. In: *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources* (Proc. Vancouver Symp., August 1987) (ed. by S. I. Solomon, M. Beran & W. Hogg), 463–475. IAHS Publ. no. 168.
- Todorov, A. V. (1985) Sahel, the changing rainfall and the 'normals' used for its assessment. *J. Clim. Appl. Met.* **24**, 97–107.

**Received 13 February 2002; accepted 31 October 2002**





Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



Journal of Hydrology 278 (2003) 213–230

Journal  
of  
**Hydrology**

[www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol)

## Study of parameter stability of a lumped hydrologic model in a context of climatic variability

Hélène Niel<sup>a,\*</sup>, Jean-Emmanuel Paturel<sup>b</sup>, Eric Servat<sup>a</sup>

<sup>a</sup>IRD–UMR HSM, BP 64501, 34394 Montpellier Cedex 5, France

<sup>b</sup>IRD–UMR HSM, 01 BP 182, Ouagadougou 01, Burkina Faso

Received 6 June 2002; accepted 14 April 2003

### Abstract

Central and West Africa were affected by an often marked reduction in rainfall and runoff around the year 1970. Has the behaviour of the catchments in these regions been changed as a result? Seventeen basins are used in this study, and are characterised by stationary or non-stationary annual rainfall or runoff time-series. An approach based on lumped hydrological modelling with a monthly time step (GR2M water balance model) and automatic parameter calibration is used to try to answer the question. Parameter stability of the models calibrated before and after the occurrence of possible rainfall or runoff deficit is analysed using estimations of confidence region. Minimisation of the least squares objective function provides a local optimum around which confidence regions are estimated in a non-linear context. The volumes of indifference represented by the confidence regions are analysed by their cross-sections on the planes defined by the three parameters of the model taken in pairs. For each basin, the cross-sections relative to different periods of calibration are interpreted in terms of possible parameter stability. This study shows that there is no link between parameter stability and the stationary behaviour of rainfall or runoff series of some catchments.

© 2003 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

*Keywords:* Hydrologic model; Parameter stability; Confidence region; Climatic variability

### 1. Introduction

The ICCARE program (Identification and consequences of climatic variability in non-Sahelian West Africa) that is being carried out within the framework of the FRIEND-AOC project (UNESCO's PHI) has resulted in the identification of a climatic fluctuation in Central and West Africa that appeared

at the beginning of the 1970s (Paturel et al., 1995; Aka et al., 1996; Paturel et al., 1997; Servat et al., 1997; Paturel et al., 1998; Servat et al., 1999). The results generally show a marked reduction in rainfall and runoff in Central and West Africa. The question that thus arises concerns the repercussions of average rainfall and runoff changes on the hydrologic behaviour of catchments. What is the effect on the stability of basin behaviour in this type of climatic variability? To answer this question, drawing on available hydrologic information concerning the basins of this region of Africa, we first used

\* Corresponding author. Fax: +33-4-67-14-47-74.

*E-mail addresses:* [helene.lubes-niel@msem.univ-montp2.fr](mailto:helene.lubes-niel@msem.univ-montp2.fr) (H. Niel), [jean-emmanuel.paturel@hydro.ird.bf](mailto:jean-emmanuel.paturel@hydro.ird.bf) (J.-E. Paturel), [eric.servat@msem.univ-montp2.fr](mailto:eric.servat@msem.univ-montp2.fr) (E. Servat).

a conceptual rainfall–runoff model to characterise the main features of the hydrological behaviour of a catchment, and then a statistical method to assess the stability of this behaviour through the analysis of the stability of the parameters of the chosen model. We had no preconceived idea of what our results would be. This paper also discusses the relevance of the approach used.

## 2. Model and basin hydrological characteristics

### 2.1. Model used

A lumped water balance model with monthly inputs was chosen for this study: the GR2M (Makhlouf and Michel, 1994). This model simulates monthly discharge using estimations of average rainfall in a basin. It provides a simplified representation of the rainfall–discharge process and is characterised by a small number of parameters which do not correspond to specific physical attributes. Some of the parameters do, however, contribute to an equation that allows representation of a particular process (i.e. evapotranspiration, slow runoff, etc.). Adjustment of the model’s parameters is made using a numerical process based on minimisation of criteria, in this case, the method of least squares. It was the availability of data that guided the choice of which model to use. It was consequently not possible to use algorithms that would have allowed more precise physical modelling of the mechanisms in play, even if a physical model would have been more suitable for analysing the variability of the rainfall–runoff relationship.

The GR2M model (Fig. 1) was developed at CEMAGREF (Kabouya, 1990). It has been used with good results in the savannah, forest and transition regions of Côte d’Ivoire as part of the ERREAU program (Servat, 1993). This model can be used for basins of from several hundred km<sup>2</sup> to a few thousand km<sup>2</sup>, and its main advantage lies in its simplicity. The following description of the model is from Makhlouf and Michel (1994):

- a ground reservoir denoted  $H$  controls the production function and is characterised by its maximum capacity  $A$ ,

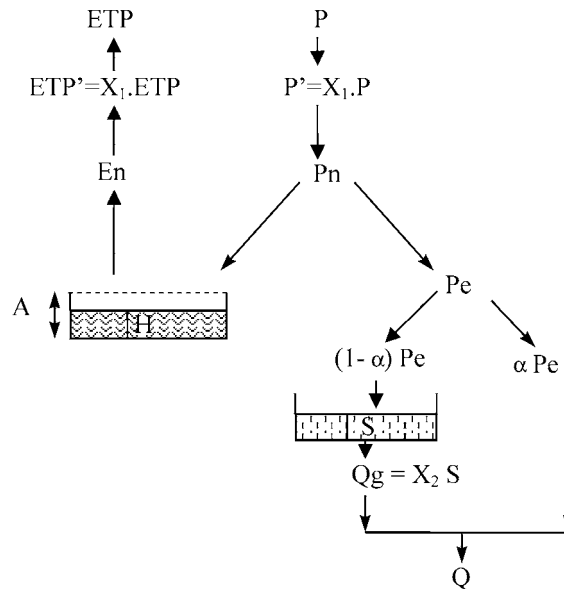


Fig. 1. GR2M model.

- a gravity drainage reservoir  $S$  controls the transfer function.

The monthly rain ( $P$ ) and evapotranspiration ( $ETP$ ) are ‘adjusted’ in the same proportion by multiplying their values by a parameter  $X_1$  so that  $P' = X_1 P$  and  $ETP' = X_1 ETP$ . A quantity  $U$  which takes the form

$$U = \frac{P'ETP'}{(\sqrt{P'} + \sqrt{ETP'})^2}$$

is subtracted from  $P'$  and  $ETP'$  to define  $P_n = P' - U$  and  $E_n = ETP' - U$ . These last two quantities condition the dynamics of the reservoir  $H$ . If  $H_0$  is the level of the ground reservoir at the beginning of the time step,  $H$  receives a part of  $P_n$  and attains the level

$$H_1 = \frac{H_0 + AV}{1 + \frac{H_0 V}{A}} \quad \text{with } V = \tanh\left(\frac{P_n}{A}\right).$$

Under the effect of  $E_n$ , level  $H_1$  of the reservoir  $H$  becomes

$$H_2 = \frac{H_1(1 - W)}{1 + W\left(1 - \frac{H_1}{A}\right)} \quad \text{with } W = \tanh\left(\frac{E_n}{A}\right).$$

$P_e$  being the complement of  $P_n$  defined by the equation  $P_e = P_n - (H_1 - H_0)$ , a part of  $P_e$ ,  $\alpha P_e$  flows directly (partition parameter  $\alpha$ ) while the rest flows into the gravity drainage reservoir  $S$  which attains the level  $S_1$ . The discharge from this reservoir is defined through a parameter  $X_2$  so that  $Q_g = X_2 S_1$ . Total flow then, is  $Q = Q_g + \alpha P_e$ .

Makhlouf and Michel (1994) used this version of the model with good results for 91 French basins, using the value of 200 mm for  $A$  (capacity of the ground reservoir) and that of 0.2 for the partition parameter  $\alpha$ ,  $X_1$  and  $X_2$  being the only optimised parameters. Nonetheless, Makhlouf and Michel (1994) pointed out that, in climatic and physiographical conditions different from France,  $A$  and  $\alpha$  should not be fixed to the above constants, and that it would be better to optimise them as well. To be clearer we must specify that  $X_1$  was added to the first version of the model by the authors to reduce the too large variance of  $A$  when this capacity was optimised for each of the 91 French catchments. The capacity  $A$  was set to 200 mm and the parameter  $X_1$  was used to adjust both  $P$  and ETP fluxes rather than to optimise a proper soil moisture capacity relative to each catchment. The authors specified that their purposes were pragmatic and not physically based. In the African context, with an optimisation of  $A$ , we decided to keep parameter  $X_1$  but to limit it within the range  $[0, 1]$  so that it could be used as a kind of areal reduction factor. It could be interesting to test the relevance of using two distinct parameters to ‘adjust’  $P$  and ETP, but it was not the purpose of the study presented here.

## 2.2. Hydrological characteristics

### 2.2.1. Basins

Table 1 lists some characteristics of the basins chosen for this study. The choice initially concerned 21 basins with surface areas of less than 6000 km<sup>2</sup>, for which the data was judged to be sufficient and of good quality. Only 17 basins were finally used with the methodology adopted; the four others did not lend themselves to satisfactory modelling for a parameter stability study. Note the presence of some small basins located in the hilly regions of Togo. The basins are distributed as a function of the different degrees of reduction in rainfall and runoff:

- in Central Africa, few changes were observed in Cameroon, but a significant decrease was observed in Chad,
- in West Africa, few changes were observed in Benin and Togo, but a notable decrease was observed in Burkina Faso and in some regions of Côte d’Ivoire.

Even if they represent different hydrological conditions in the study area, these basins were not sufficient to cover the entire region neither do they lend themselves to regional interpretation.

### 2.2.2. Data

The available rainfall and discharge data covers periods of between 30 and 40 years for the majority of basins studied. Data does not start before the 1950s and generally stops sometime in the early 1990s. Data from national networks had to be used for this study both for discharge and rainfall because the basins are not used for experimental purposes and consequently do not have the necessary equipment.

The average rainfall of each basin was calculated from data from measuring stations located in the basin and within a 100 km radius using a kriging process. In this part of Africa, the density of rainfall stations is very low, and the number of stations used to estimate average rainfall is consequently too small. Table 1 gives the number of measuring stations involved in the average rainfall estimate for each basin. Inputs to the model are characterised by a significant uncertainty, but an attempt was made to compensate for this. The chosen model allows inputs to be ‘adjusted’ by a multiplicative parameter  $X_1$  which partly acts as a correction factor. Moreover Andréassian et al. (2001) argue that even if the efficiency of the hydrological model improves with a better description of watershed rainfall input, the GR3J model—which belongs to the same family of models as the GR2M model—in particular has ‘the capacity to adapt to problems of rainfall input estimates’. These authors comment on modelling with a Nash and Sutcliffe criterion reaching 81% for a 10,700 km<sup>2</sup> watershed with input from a single rain gauge, saying that “such good results are evidence of the fitting properties of rainfall–runoff models”. In our case, where calibrations of the same model with the same rain gauges are compared over

Table 1  
Catchment characteristics

| No. of outlet   | Main basin | Country       | Area (km <sup>2</sup> ) | Period of observations | Number of rainfall stations |
|---|------------|---------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------|
| 1. Mbesse, small basin with forest  | Agneby     | Côte d'Ivoire | 975                     | 1959–1993 (35 years)   | 6                           |
| 2. Yendere, between forest and savannah, fairly flat relief                     | Comoe      | Burkina Faso  | 5930                    | 1956–1986 (31 years)   | 3                           |
| 3. Lanhousta, shrub savannah  | Couffo     | Benin         | 1680                    | 1951–1988 (38 years)   | 12                          |
| 4. Ouli Bangala, wooded savannah  | Lake Chad  | Chad          | 4360                    | 1951–1989 (39 years)   | 2                           |
| 5. Tchoa, flat sedimentary region, degraded river network                       | Lake Chad  | Chad          | 5870                    | 1954–1989 (36 years)   | 6                           |
| 6. Gati, shrub savannah and crops   | Lake Togo  | Togo          | 2650                    | 1962–1990 (29 years)   | 10                          |
| 7. Kpedji, shrub savannah and crops   | Lake Togo  | Togo          | 1810                    | 1954–1990 (37 years)   | 11                          |
| 8. Ebeva, small basin with light forest (Atakora)                               | Mono       | Togo          | 370                     | 1957–1990 (34 years)   | 6                           |
| 9. Koloware, small basin in mountainous region; light forest and shrub savannah | Mono       | Togo          | 109                     | 1957–1990 (34 years)   | 3                           |
| 10. Dotaikope, light forest and shrub savannah                                  | Mono       | Togo          | 5590                    | 1960–1990 (31 years)   | 8                           |
| 11. Paratao, small basin with light forest and shrub savannah                   | Mono       | Togo          | 97                      | 1957–1990 (34 years)   | 4                           |
| 12. Sirka, light forest and shrub savannah                                      | Mono       | Togo          | 4035                    | 1957–1990 (34 years)   | 7                           |
| 13. Iradougou, savannah; fairly flat relief                                     | Niger      | Côte d'Ivoire | 1990                    | 1962–1992 (31 years)   | 1                           |
| 14. Pt de Magba, forest   | Sanaga     | Cameroon      | 4020                    | 1952–1980 (29 years)   | 3                           |
| 15. Bafingdala, mountainous basin; between forest and savannah                  | Sassandra  | Côte d'Ivoire | 5930                    | 1962–1990 (29 years)   | 2                           |
| 16. Lama Kara, small basin with shrub savannah and crops                        | Volta      | Togo          | 1560                    | 1954–1989 (36 years)   | 5                           |
| 17. Samandeni, savannah; fairly flat relief                                     | Volta      | Burkina Faso  | 4575                    | 1956–1992 (37 years)   | 3                           |

different periods, the above arguments can be put forward to justify the modelling approach.

For potential evapotranspiration, estimates were calculated using the Turc formula (Réménieras, 1980), taking into account observed and available meteorological data. For this variable the uncertainty refers to the same problem as rainfall, and the same type of correction is made by the model, although the spatial variability for the basins studied is lower for monthly evapotranspiration than for monthly rainfall.

The ratio between runoff water depth and rainfall calculated for each basin over the whole observation period has a median value of 16% due to a high rate of evapotranspiration. This is the reason why modelling African basins is particular, and it would be more satisfactory to simulate evapotranspiration accurately, i.e. 84% of the water balance, rather than discharge. But the information required for this kind of modelling is not available from data supplied by national measuring networks. Most often, models which work well in temperate regions calibrated with

discharge values, are applied to basins in different climatic and geographical regions, and are able to provide very good results (Vandewiele and Ni-Lar-Win, 1998).

### 2.2.3. Stationarity analyses

For the 17 basins observed, time-series stationarity analyses were performed for rain, discharge and runoff coefficient series defined annually. The time-series of runoff coefficients, i.e. annual runoff water depth over annual rainfall is interesting because the variability of this ratio gives an overview of the behaviour of the annual water balance over time.

The Pettitt test (Pettitt, 1979) shows the possible abrupt shifts in one and/or the other of the series (Table 2) in accordance with the results of the ICCARE program mentioned above. Though a general coherence can be observed between identified break dates both for the rainfall and runoff series and for the runoff coefficients, in some cases there are significant differences. However, we may recall that the Pettitt test detects the main break in a series, and if secondary breaks exist, they are not specified. The different estimations of the break dates were noted so that the observation period for each basin could be

divided into two or three sub-periods. The basins for which no break was detected, regardless of the time-series analysed (rainfall, discharge or runoff coefficient) are located in the southern half of Togo and in the eastern part of the central region. Still, it should be pointed out that earlier studies have confirmed a decrease, though slight, in the country's rainfall (Paturel et al., 1997), but it is likely that the Pettitt test is not powerful enough to detect it (Lubès-Niel et al., 1998). Nevertheless in comparison with the other basins it is reasonable to assume that the annual time-series of these basins are not affected by a really significant abrupt change.

Insofar as all the basins studied are almost completely natural and have undergone few, if any changes in terms of land use, it would seem reasonable to suppose that models of basins for which the rainfall and discharge time-series are stationary would exhibit stable parameters over different calibration periods. Still, a word of caution about this hypothesis is in order: the stationarity test concerns series of annual averages whereas the GR2M model uses monthly data. Stationarity retained for annual variables does not necessarily imply stationarity for monthly time-series.

Table 2  
Break in annual rainfall, runoff and runoff coefficient series (Pettitt test, level of significance 10%)

| Basin             | Rainfall   |             | Runoff     |             | Runoff coefficient | Decision       |
|-------------------|------------|-------------|------------|-------------|--------------------|----------------|
|                   | Break date | Deficit (%) | Break date | Deficit (%) | Break date         | Break retained |
| 1. Mbesse         | 1976       | –26         | 1976       | –60         | 1976               | 1976           |
| 2. Yendere        | 1970       | –13         | 1970       | –57         | 1971               | 1970           |
| 3. Lanhounta      | 1963       | –21         |            |             |                    | 1963           |
| 4. Ouli Bangala   | 1982       | –24         | 1970       | –32         | 1971               | 1970 and 1982  |
| 5. Tchoa          | 1970       | –13         | 1970       | –37         | 1971               | 1970           |
| 6. Gati           |            |             |            |             |                    |                |
| 7. Kpedji         |            |             |            |             |                    |                |
| 8. Ebeva          |            |             |            |             |                    |                |
| 9. Koloware       |            |             | 1981       | –66         | 1970               | 1970 and 1981  |
| 10. Dotaikope     | 1980       | –15         | 1970       | –42         | 1970               | 1970 and 1980  |
| 11. Paratao       | 1980       | –16         | 1970       | –41         | 1971               | 1970 and 1980  |
| 12. Sirka         |            |             |            |             |                    |                |
| 13. Iradougou     | 1982       | –18         | 1971       | –45         | 1971               | 1971 and 1982  |
| 14. Pont de Magba | 1969       | –25         |            |             | 1973               | 1971           |
| 15. Bafingdala    | 1969       | –15         | 1969       | –28         |                    | 1969           |
| 16. Lama Kara     | 1980       | –16         |            |             |                    | 1980           |
| 17. Samandeni     | 1970       | –16         | 1970       | –56         | 1971               | 1970           |

The present study analyses variations in GR2M model parameters between various periods for each basin in order to determine the stability of these parameters; it attempts to interpret this stability from a hydrological point of view. The Togo basins, qualified for the sake of simplicity as ‘stationary series basins’, will be the reference basins with respect to the adopted approach.

### 3. Methodology

The methodology used involves two essential steps for each basin. The first is calibration and validation of the GR2M model for each period considered. The second concerns the stability of optimised parameters.

#### 3.1. Model calibration and validation

##### 3.1.1. Preliminary conditions

Each basin is characterised by one or two break years deduced from the annual series stationarity study. These years separate the observation periods. With reference to [Paturel et al. \(1997\)](#), who identified a decrease in rainfall in Togo around the year 1970, two modelling periods have been defined for the ‘stationary series basins’, one before 1970 and one after. The two years on either side of each break year have been excluded from all calibration. This leads us to consider a period of 5 years as a transition phase between two stationary conditions, given that the break tests (like the Pettitt test) find break points in simulated series with a margin of error of the order of 2–3 years ([Lubès-Niel et al., 1998](#)). For the periods before and after each transition phase, calibration is for 75% of the period assumed to be stationary; validation is reserved for the last 25%. [Fig. 2](#) sums up the various phases that have been defined for each basin.

The conditions that were in effect for calibration are specified below. The parameters to optimise do not all have the same significance.  $X_1$  and  $\alpha$  are non-dimensional constants with values between 0 and 1. The order of magnitude of  $X_2$  is around 1.  $A$  is a capacity, thus a dimensional quantity, expressed in the same units as precipitation. [Bates \(1990\)](#) recommends using parameter transformation, which improves the speed of optimisation convergence and even, in some

configurations, leads to better estimations in the (inferential) statistical sense of the term. Thus, in order that all parameters be expressed in the same order of magnitude, ([Vandewiele et al., 1993](#)), the parameter  $A$  was replaced by  $1000A'$ , where  $A'$  is the new parameter to optimise between 0 and 1.5.

The four parameters of the model were optimised automatically using the Newton method with least squares minimisation ([Dennis and Schnabel, 1996](#)). This is a local optimisation method whose drawback, like all methods of this type, is convergence to a local optimum ([Perrin, 2000](#)). It is therefore advisable to try to minimise this risk by initialising the algorithm from different starting points. Thus for each calibration, the domain of variation for each parameter was discretised. The optimisation algorithm was implemented, using for initial values each node of this grid corresponding to a quadruplet  $(A', X_1, X_2, \alpha)$ . The procedure converged in almost every case towards the same minimum, except for some sets of quadruplets which had, as an initial value for a limited parameter,  $X_1$  or  $\alpha$ , a theoretical limit (1 for example). Then the objective function value after optimisation was greater than that obtained from the other initial points. After the calibrations were done, it turned out that for 16 basins, parameter  $\alpha$  was equal to 0. Only the Koloware basin with a surface area of 109 km<sup>2</sup>, thus smaller than the others, presented a partition parameter of 0.33 in the first calibration period. So on a monthly scale, generally no rapid runoff is represented by the model. The same thing can be observed in similar types of monthly models of other humid African catchments (main basin: Sassandra) with areas in the same order of magnitude ([Ardoin, 2002](#), pers. comm.), meaning that part of the rain from any given month cannot be found in the river during the course of the same month. Is this the real behaviour of these basins or do the models used fail to correctly take into account the monthly direct runoff in these humid regions of Africa? In the end we decided to simplify the structure of the GR2M model by not using a variable that represents this runoff but rather using only one component for runoff, that being the flow from a storage reservoir provided that good fitting could be achieved. These results led us to set the parameter  $\alpha$  to 0 (even for the Koloware basin) and then to make another optimisation run in a parameter space with a lower dimension.

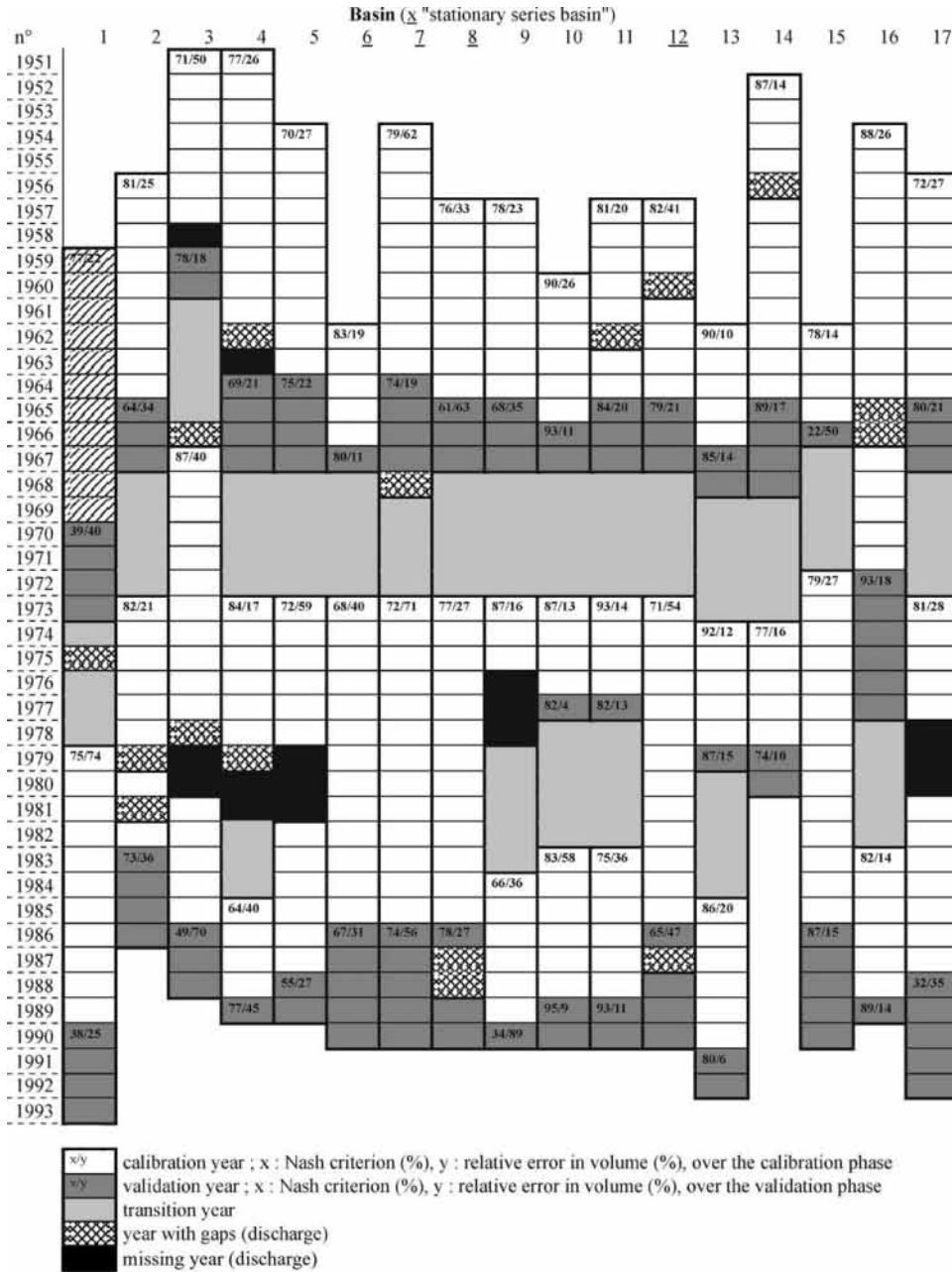


Fig. 2. Calibration, validation and transition phases per basin.

3.1.2. Modelling results

3.1.2.1. Quality criteria. Nash non-dimensional efficiency criterion values are shown in Fig. 2 to allow comparisons of model performance between different

periods and different basins. The efficiency criterion (Nash and Sutcliffe, 1970) is written by

$$1 - \frac{\sum(Q_{obs_i} - Q_{cal_i})^2}{\sum(Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

with  $Q_{obs_i}$  and  $Q_{cal_i}$ , respectively, the monthly observed and simulated flows and  $\bar{Q}_{obs}$  the mean monthly flow. The fit between simulated and observed discharges is even better because the Nash criterion expressed as a percentage is near 100%. Nash and Sutcliffe (1970) point out that there is no objective test for the significance of their criterion because the model's degrees of freedom are not known. Still, as a practical matter, a criterion less than 60% does not give a satisfactory fit between observed and simulated hydrographs, a problem largely due to out of phase timing.

Using only the Nash criterion to judge adequate fitting of model simulations with observed data is still not always sufficient. To this overall index of model quality we have added the calculation of a relative absolute mean error denoted ErV between observed annual flow volumes and those simulated by the model throughout the calibration period ( $N_{an}$  = years) :

$$ErV = \frac{1}{N_{an}} \sum_{i=1}^{N_{an}} \frac{|V_{obs_i} - V_{cal_i}|}{V_{obs_i}}$$

This index was also calculated for the validation periods. It is complementary to the Nash criterion which can be high when the volume error is high. This index is calculated only for those years when the observed volume is non-zero. As the variability of peak

discharge can be high for some basins from one year to the next, this criterion takes into account the agreement between observation and simulation for small hydrographs, whereas the Nash criterion gives low weight to these discharges which can be badly simulated. Considering the unknown measurement precision of runoff, we have deemed as acceptable relative error in volume somewhere in the range of 30%. Referring to Ouedraogo (2001), we observe for the basin of Bafingdala for the period 1972–1985 that the GR2M model applied in a spatially distributed version provides in calibration 89% for the Nash criterion and 17% for the relative error in volume, instead of, respectively, 79 and 27% for our lumped version. If we compare the hydrographs observed and simulated from the two versions (Fig. 3) we can consider the lumped simulation as acceptable both for the high discharges and for the low flows. The same goes for the other series with respect to a relative error in volume of around 30%. We were able to observe that only a few events increase the volume criterion, and that most of simulated hydrographs are of good quality. It should be noted that in general in hydrological modelling, only the Nash criterion is used to assess the fit between simulated and observed graphs, and even if the limit of 30% for the relative error in volume remains questionable, here it is a supplementary and objective guarantee of a model's reliability.

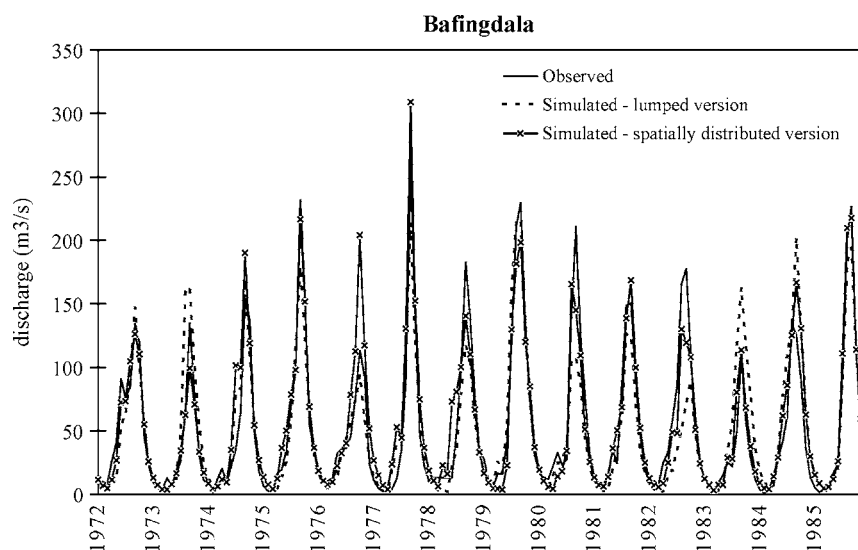


Fig. 3. Comparison of two kinds of simulations with the GR2M model for the basin of Bafingdala.

Table 3  
GR2M parameters optimised

| Basin           | 1st calibration period, $X_1/X_2/A$ (mm) | 2nd calibration period, $X_1/X_2/A$ (mm) | 3rd calibration period, $X_1/X_2/A$ (mm) |
|-----------------|--|--|--|
| 1. Mbesse       | 1959–1969, 0.44/0.72/136                 | 1979–1989, 0.40/0.82/104                 |  |
| 2. Yendere      | 1956–1964, 1/0.65/564                    | 1973–1982, 0.94/0.69/669                 |  |
| 3. Lanhouata    | 1951–1957, 0.51/0.86/189                 | 1966–1985, 0.56/0.88/228                 |  |
| 4. Ouli Bangala | 1951–1962, 0.82/0.67/252                 | 1973–1979, 0.55/0.67/145                 | 1985–1988, 0.44/0.42/0                   |
| 5. Tchoa        | 1954–1963, 0.56/0.44/552                 | 1973–1987, 0.66/0.40/804                 |  |
| 6. Gati         | 1962–1966, 0.44/0.74/165                 | 1973–1985, 0.39/0.80/154                 |  |
| 7. Kpedji       | 1954–1963, 0.68/0.70/278                 | 1973–1985, 0.59/0.81/278                 |  |
| 8. Ebeva        | 1957–1964, 0.75/0.70/266                 | 1973–1985, 0.65/0.74/332                 |  |
| 9. Koloware     | 1957–1964, 0.90/0.73/306                 | 1973–1975, 0.75/0.64/729                 | 1984–1989, 0.58/0.84/352                 |
| 10. Dotaikope   | 1960–1965, 0.75/0.85/354                 | 1973–1976, 0.76/0.73/470                 | 1983–1988, 0.75/0.82/434                 |
| 11. Paratao     | 1957–1964, 0.65/0.71/103                 | 1973–1976, 0.92/0.77/974                 | 1983–1988, 1/0.87/1083                   |
| 12. Sirka       | 1957–1964, 0.62/0.73/450                 | 1973–1985, 0.55/0.70/319                 |  |
| 13. Iradougou   | 1962–1966, 0.69/0.63/369                 | 1974–1978, 0.53/0.60/269                 | 1985–1990, 0.66/0.61/431                 |
| 14. Pt de Magba | 1952–1964, 1/0.55/457                    | 1974–1978, 1/0.44/43                     |  |
| 15. Bafingdala  | 1962–1965, 0.58/0.47/371                 | 1972–1985, 0.47/0.52/125                 |  |
| 16. Lama Kara   | 1954–1971, 1/0.94/393                    | 1983–1988, 1/0.90/506                    |  |
| 17. Samandeni   | 1956–1964, 1/0.59/1022                   | 1973–1987, 0.46/0.66/272                 |  |

*3.1.2.2. Actual results.* The optimised values obtained are shown in Table 3. A number of remarks should be made concerning the results. Some of the values resulting from optimisation should attract attention even if the parameters do not represent a specific physical attribute. For example, during the period 1985–1988, Ouli Bangala shows an optimised value of  $A$  equal to 0. Given the principles of the model, this means that the best fit of the simulated hydrograph with observed data can only be made by cancelling the water stock of the ground reservoir, meaning the actual evapotranspiration; all the water available should be used for runoff. In fact, coming back to the data, it appears that the flood in 1985, the largest in the four-year calibration sample, composed of one flood per year, orients the optimisation process towards the results obtained. The weight of this flood would not have had the same significance in a sample such as the first period of 1951–1963, which was more representative of the annual floods observed in this basin. The bias introduced in the calibration of 1985–1988 is prejudicial to the analysis of parameter stability. Thus for this basin, only the first two periods were retained. Like the other lumped conceptual models, the GR2M model is able to satisfactorily simulate events whose main characteristics are represented in the calibration sample. Otherwise, it is difficult for the model to produce a good fit for

a particular event which has a low relative weight in the calibration sample. These models behave like statistical models as their performances are dependent on the representativeness of the calibration samples.

A good calibration should translate into a high Nash criterion value and a low relative error in volume. In a good model these two conditions should be observed not only in calibration but also during validation when the model is applied with data not used in calibration. Considering these different conditions, only the following basins are modelled correctly in terms of the two selected criteria: Ouli Bangala (no. 4) until 1979, Dotaikope (no. 10) until 1977, Paratao (no. 11) until 1977, Iradougou (no. 13), Pont de Magba (no. 14) and Lama Kara (no. 16). Given the small number of basins selected, we introduced a tolerance factor for the volume criterion so that the following basins could also be considered: Yendere (no. 2), Gati (no. 6), Koloware (no. 9) until 1975 and Paratao (no. 11) for the entire observation period. Finally, the Togo basins, including Kpedji (no. 7), Ebeva (no. 8) and Sirka (no. 12), for which the Nash criteria were satisfactory, were used by virtue of their interest as ‘stationary series basins’, despite the high values of the volume criterion due to bad simulations of hydrographs showing low discharge values, and even if the rigour of the processes can be considered as weakened by this decision. Examples of

observed and simulated runoff are presented in Fig. 4 with the values of the corresponding determination coefficients  $R^2$ , each period of simulation being composed by a calibration period and its corresponding validation period.  $R$  is the correlation coefficient between observed and simulated runoff. We can especially remark the quite acceptable quality of the simulation for the Kpedji basin which does not satisfy the volume conditions expressed by the ErV index.

### 3.2. Analysis of parameter stability

#### 3.2.1. Principle and first general results about the GR2M model

The proposed stability analysis is based above all on analysis of the sensitivity of optimised parameters. According to Sorooshian and Gupta (1995), this consists of estimating the ‘region of indifference’ for the calibrated parameters, in other words, “the region around the best parameter estimates in which the objective function value varies from the best function value by only a small indifference value  $\varepsilon$ ”. In this zone the values generated for the different parameters are not the optimum values but they do not significantly damage the fit between simulated and observed hydrographs. Determining this zone of agreement is not unique. Thus Sorooshian and Gupta (1995) use quadratic approximations of the objective function in the neighbourhood of the optimum. The second derivatives are evaluated numerically and the defined zone of agreement describes a hyperellipse in the parameter space. This approach supposes that the degree of non-linearity of the model is negligible. Other approaches rely on variable transformations to satisfy as best they can the application conditions of linear models (Bates, 1990). The procedure that we have selected here identifies the aforementioned zone of agreement to the confidence region of non-linear model parameters (Draper and Smith, 1981; Troutman, 1985). The contour of this region is calculated for a given probability level equal to  $(1 - \alpha_r)$  such that the confidence region, thus defined, contains the optimum and unknown set of parameters  $\theta$  of the model with a probability approximately (not exactly the same as in a linear model) equal to  $(1 - \alpha_r)$ . The value of the contour of this confidence region,  $F_c(\theta)$ , depends on the minimum value of the least squares objective function  $F_{c_{opt}}$ , and of the Fisher variable  $F$  to  $p$  and

$n - p$  degrees of freedom for a non-exceedance probability of  $(1 - \alpha_r)$  with  $p$  the number of parameters to optimise and  $n - p$  the number of calibration observations minus the number of parameters to optimise:

$$F_c(\theta) = F_{c_{opt}} \left[ 1 + \left[ \frac{p}{n - p} F(p, n - p, 1 - \alpha_r) \right] \right] \quad (1)$$

In the framework of a similar methodology even if in a different scientific field, Laloë (1995) reminds us that in the case of non-linear models, confidence regions associated with one or several parameters are generally not symmetrical around the optimum estimates. This asymmetry can be explained by a distribution of the parameter estimates that is neither normal nor symmetrical even if the distribution errors turn out to be normal.

For each calibration three contours have been defined by the cross-sections on the planes ‘ $A - X_1$ ’ ( $X_2$  remaining at its optimum value), ‘ $A - X_2$ ’ ( $X_1$  remaining at its optimum value), and ‘ $X_1 - X_2$ ’ ( $A$  remaining at its optimum value) of the ‘volume of indifference  $A - X_1 - X_2$ ’ estimated around the optimum by using expression (1) with a confidence level of 95 and 99%. Figs. 5a–c, 6a–c, 7a–c and 8a–c represent the contours obtained, respectively, in the planes ‘ $A - X_1$ ’, ‘ $A - X_2$ ’, and ‘ $X_1 - X_2$ ’ for the different calibration periods. For the first two planes, the figures must be interpreted in terms of ‘ $A' - X_1$ ’ and ‘ $A' - X_2$ ’, the abscissa caption recalling that  $A = 1000A'$ . The indices 1, 2 or 3 of the contours characterise, respectively, the first, second and possibly the third period of calibration. The geometry of the contours gives information about the relative sensitivities of parameters and their interactions. When the shapes are ellipsoidal, Sorooshian and Arfi (1982) propose ‘concentricity and interaction’ measures to allow objective comparison of the influence of various objective function formulations on the relative behaviour of parameters. The qualitative interpretation of contours relative to parameters taken in pairs leads to the following conclusions in this study. Figs. 5a–8a reveal an interaction between parameters  $A'$  and  $X_1$  since neither of the two axes of the pseudo-ellipsoidal curves is parallel to any of the axes of the co-ordinates in the space of the parameters considered. Moreover, the orientation of the curves defines a direction whose angle is less than  $45^\circ$  from

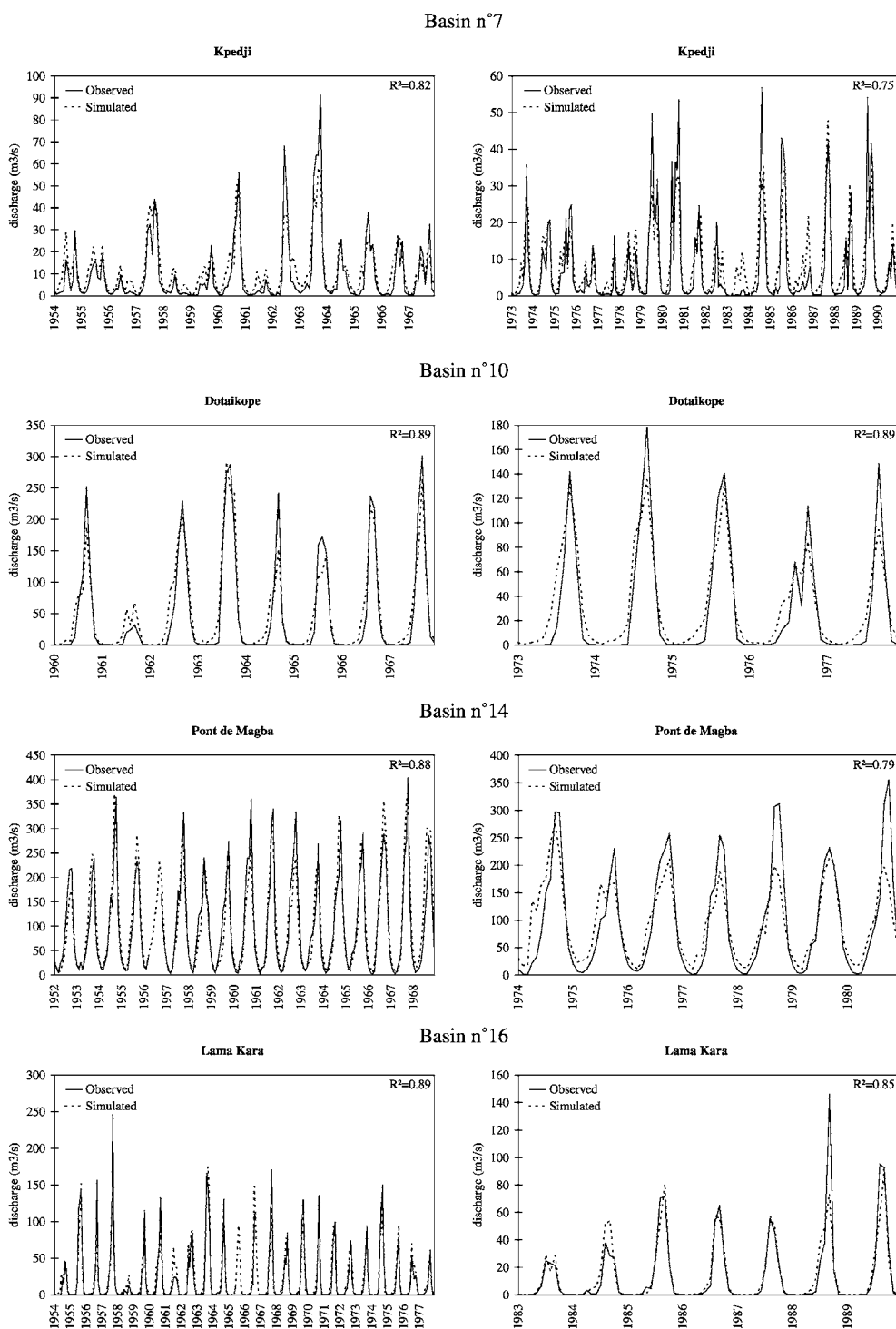


Fig. 4. Examples of observed and simulated monthly runoff hydrographs.

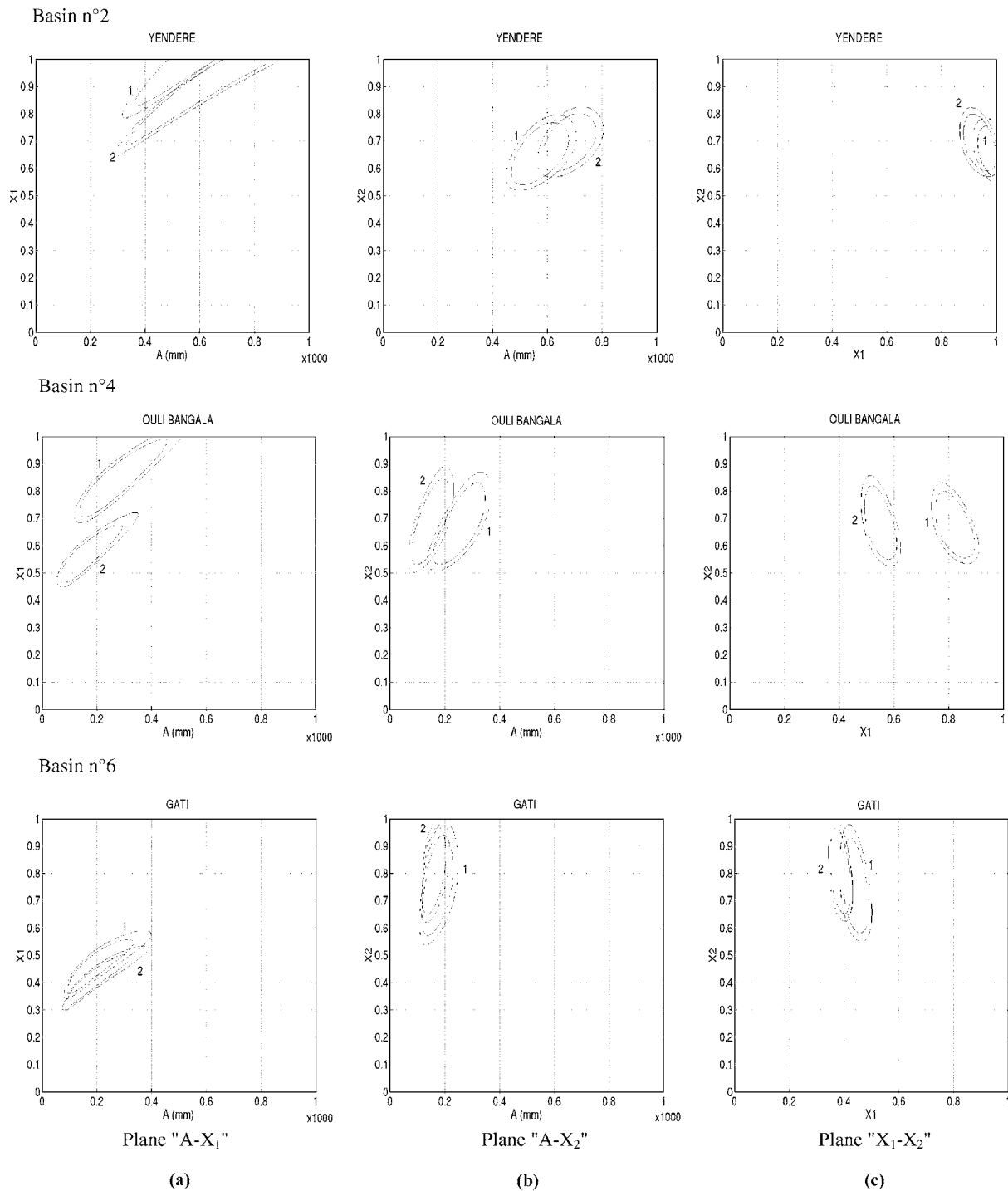
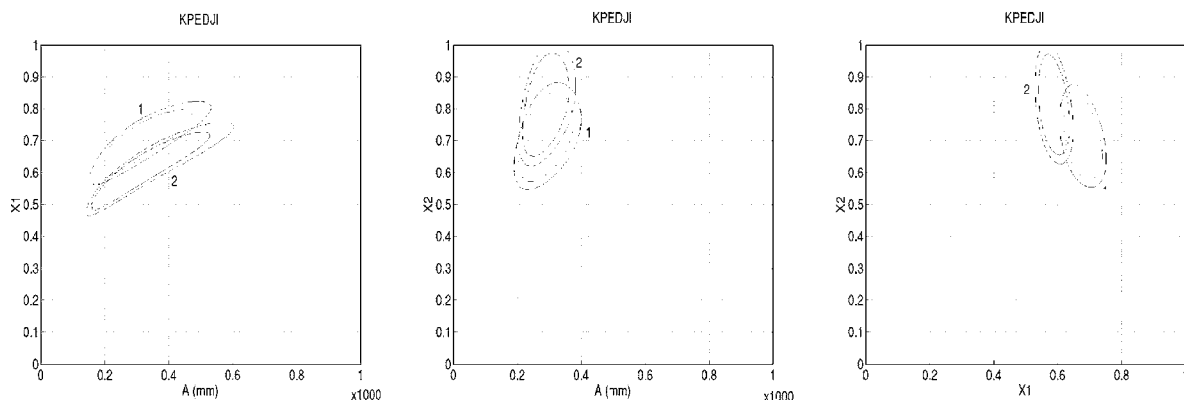
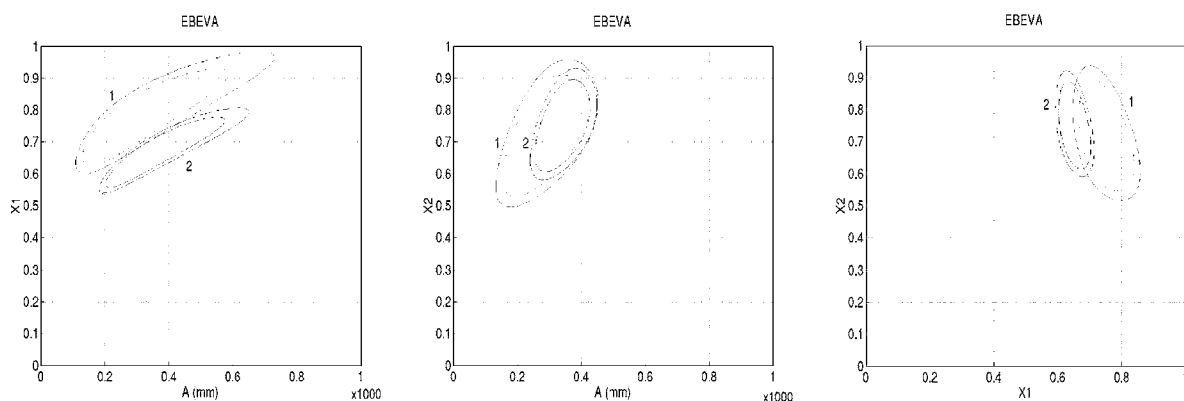


Fig. 5. Cross-sections of the parameter confidence volume for the basins no. 2, no. 4 and no. 6. (a) Plane 'A - X<sub>1</sub>'. (b) Plane 'A - X<sub>2</sub>'. (c) Plane 'X<sub>1</sub> - X<sub>2</sub>'.

Basin n°7



Basin n°8



Basin n°9

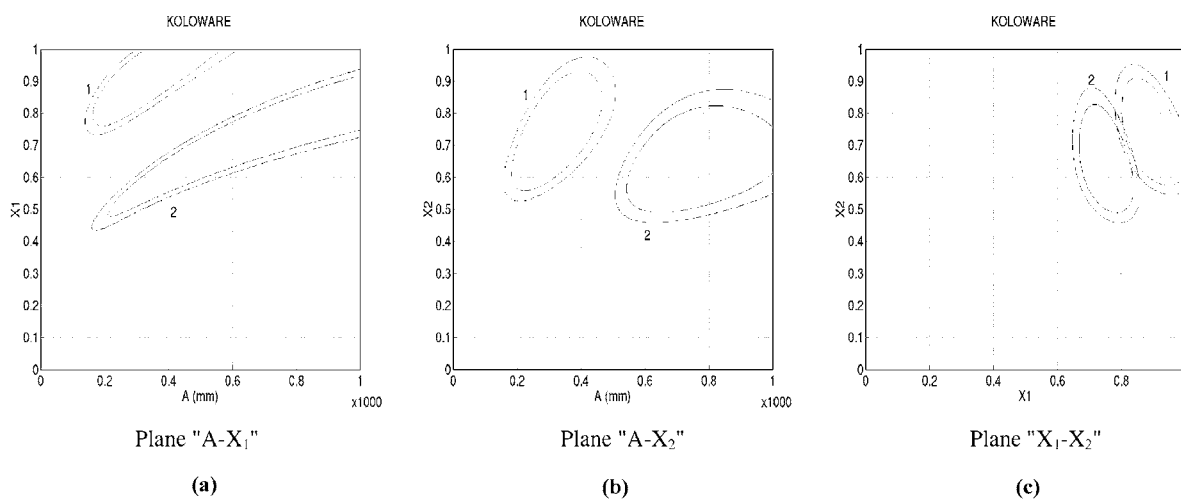


Fig. 6. Cross-sections of the parameter confidence volume for the basins no. 7, no. 8 and no. 9. (a) Plane 'A - X<sub>1</sub>'. (b) Plane 'A - X<sub>2</sub>'. (c) Plane 'X<sub>1</sub> - X<sub>2</sub>'.

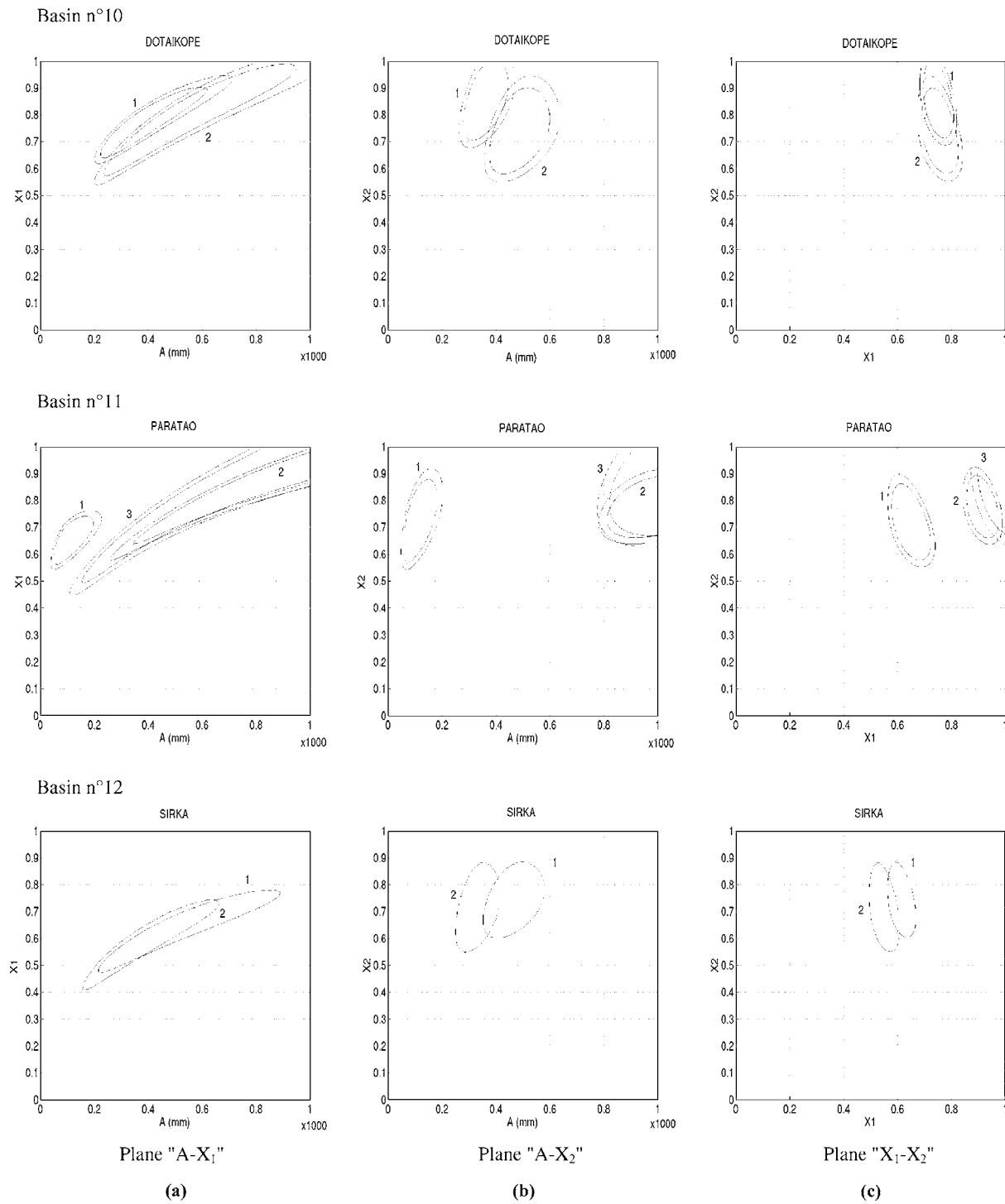


Fig. 7. Cross-sections of the parameter confidence volume for the basins no. 10, no. 11 and no. 12. (a) Plane 'A - X<sub>1</sub>'. (b) Plane 'A - X<sub>2</sub>'. (c) Plane 'X<sub>1</sub> - X<sub>2</sub>'.

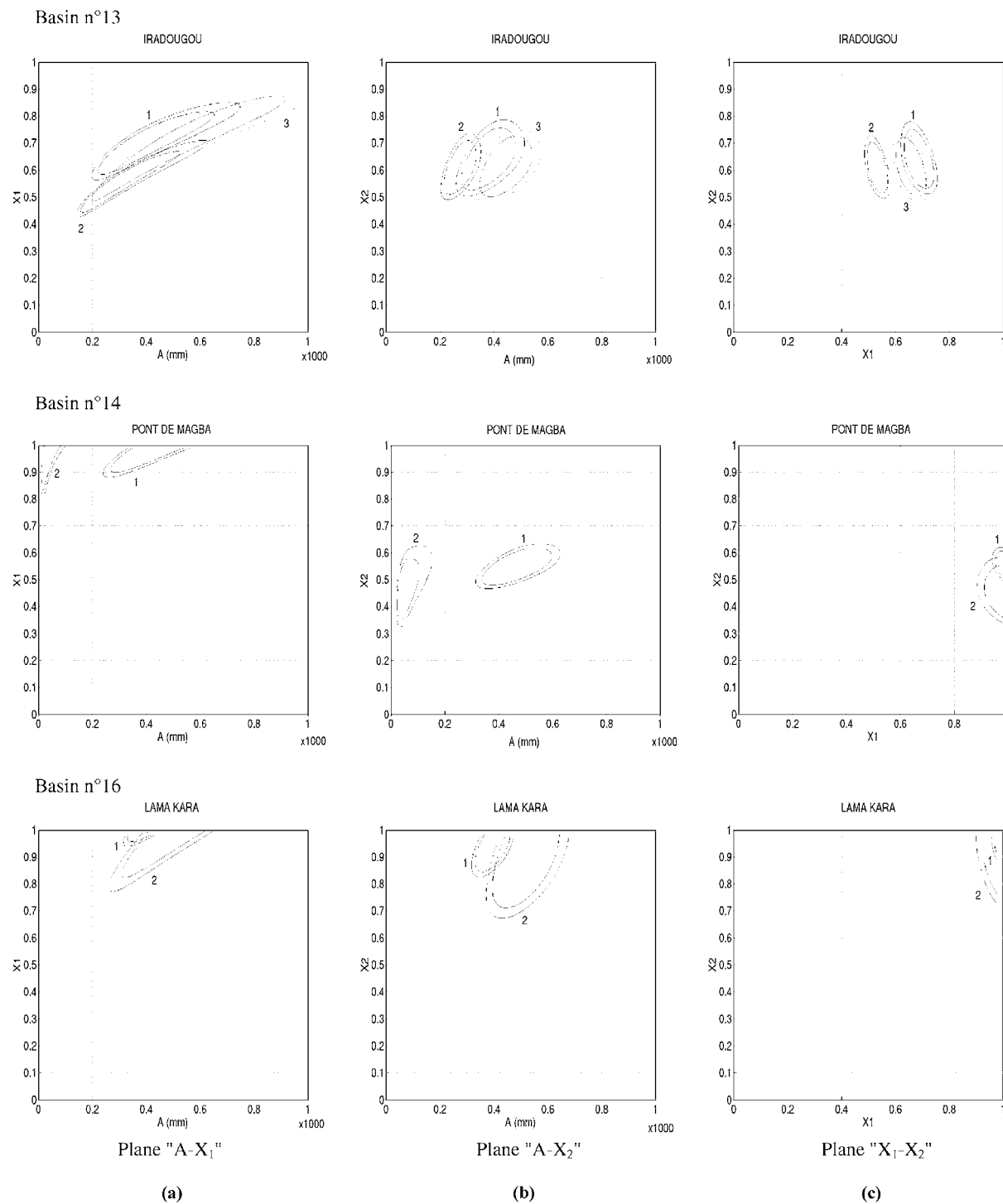


Fig. 8. Cross-sections of the parameter confidence volume for the basins no. 13, no. 14 and no. 16. (a) Plane 'A - X<sub>1</sub>'. (b) Plane 'A - X<sub>2</sub>'. (c) Plane 'X<sub>1</sub> - X<sub>2</sub>'.

the  $A'$  axis, meaning that  $X_1$  has a greater degree of sensitivity than  $A'$ . Figs. 5b–8b on the other hand, show that parameters  $A'$  and  $X_2$  interact little in general and that the orientation of their curves, more or less parallel to the  $X_2$  axis, demonstrates a greater degree of sensitivity of parameter  $A'$  compared to  $X_2$ . Finally Figs. 5c–8c show a weak interaction between  $X_1$  and  $X_2$ ,  $X_1$  being more sensitive than  $X_2$ , as Makhlof and Michel (1994) have pointed out in temperate zones.

### 3.2.2. Analysis of parameter stability per basin

The analysis of stability for each basin is first oriented towards the interpretation of the cross-sections of the confidence region on the planes defined by the parameters taken in pairs, the third parameter remaining at the optimum value. The confidence contours described in each plane relative to the two or three compared calibration periods per basin can be classified, depending on three possible situations:

- disjunction: contours are disjoint,
- overlap: the contours partly overlap or are only contiguous,

- inclusion: one of the contours is included in the other.

In our approach, the conclusion of stability or not derives from the following interpretation of the above three situations. First of all we decided to translate an inclusion configuration into a stability conclusion for the parameters between the periods concerned. To go further, we extended this conclusion concerning stability to cases in which there is overlap of defined contours and possibly a borderline overlap (contiguous configuration). Actually we accept that volumes that partly overlap refer to a same sub-region of parameter space, which is a consequence of the fact that the confidence volumes are only estimators for an approximate probability level of unknown theoretical volumes. Conversely disjoint contours preclude the hypothesis of parameter stability between the different periods. Obviously the conclusion concerning stability or not derives from this kind of interpretation considering the results of the full set of the three planes of pairs of parameters. The last column of Table 4 summaries the degree of parameter stability.

Table 4  
Interpretation of the three cross-sections of the parameter confidence volume

| Basins                       | 'Stationary series basin':<br>Yes (Y) or<br>Not (N) | Plane ' $A'-X_1$ '<br>contours                                   | Plane ' $A'-X_2$ '<br>contours                                     | Plane ' $X_1 - X_2$ '<br>contours                                | Parameter stability:<br>Yes (Y) or Not (N)   |
|------------------------------|---|--|--|--|--|
| 2-Yendere                    | N   | Contiguous   | Overlapping  | Overlapping  | Y  |
| 4-Ouli Bangala<br>until 1979 | N   | Disjoint   | Overlapping  | Disjoint   | N  |
| 6-Gati                       | Y   | Overlapping  | Inclusion  | Overlapping  | Y  |
| 7-Kpedji                     | Y   | Overlapping  | Overlapping  | Overlapping  | Y  |
| 8-Ebeva                      | Y   | Contiguous   | Inclusion  | Overlapping  | Y  |
| 9-Koloware<br>until 1975     | N   | Disjoint   | Disjoint   | Contiguous   | N  |
| 10-Dotaikope<br>until 1977   | N   | Overlapping  | Overlapping  | Overlapping  | Y  |
| 11-Paratao                   | N   | First two periods:<br>disjoint; last two<br>periods: inclusion   | First two periods:<br>disjoint; last two<br>periods: overlapping   | First two periods:<br>disjoint; last two<br>periods: overlapping | First two periods: N;<br>last two periods: Y |
| 12-Sirka                     | Y   | Inclusion  | Overlapping  | Overlapping  | Y  |
| 13-Iradougou                 | N   | First two periods:<br>contiguous; last two<br>periods: inclusion | First two periods:<br>overlapping; last two<br>periods: contiguous | First two periods:<br>disjoint; last two<br>periods: disjoint    | First two periods: N;<br>last two periods: N |
| 14-Pont de Magba             | N   | Disjoint   | Disjoint   | Overlapping  | N  |
| 16-Lama Kara                 | N   | Overlapping  | Overlapping  | Overlapping  | Y  |

When the parameter stability is rejected, the confidence volume cross-sections on the different planes give some information about the parameter(s) particularly involved in the decision. For instance, for Ouli Bangala, Koloware, Paratao (first two periods), parameters  $X_1$  and  $A$  especially are involved. For Pont de Magba only  $A$  is particularly involved. For Iradougou,  $X_1$  is concerned; however, the disjunction is not very pronounced between the last two periods, and we can reasonably conclude that the full set of parameters is quasi-stable.

These results concerning stability or not lead to the conclusion that stability is not simply linked by the presence or not of a break in the annual time-series of the basins. For instance, the ‘stationary series basins’ (Gati, Kpedji, Ebeva, Sirka) as well as others (Yendere, Dotaikope, Paratao, Lama Kara) are concluded to be stable. Another fact is that all the ‘stationary series basins’ present stable parameters. However, we must be careful about generalizing this result as only four such basins were included in this study.

#### 4. Conclusions

The work presented above was carried out on 17 basins from West and Central Africa. Because available data comes from national rainfall and hydrometric networks, the study is rooted in a conceptual hydrologic modelling context. The methodology consists of comparing for each basin, using a statistical approach, model parameters estimated by automatic calibration over different periods and more especially before and after abrupt shifts detected on data series most often around 1970. For each basin the physical characteristics (vegetation, land use, etc.) remain constant for the duration of observations, and the rainfall input is estimated from the same rain gauges for all the calibration or validation periods. The statistical procedure takes into account the possible dependencies between parameters and defines a confidence region in which the parameter values are not the optimum values but do not significantly influence the fit between simulated and observed hydrographs. Cross-sections of this confidence region based on pairs of parameters are interpreted in terms of stability or not of the GR2M

model parameters. We see from the results that non-stationarity in rainfall or runoff series does not imply non-stability of the model parameters. If we accept the hypothesis that parameter stability can be translated into hydrologic stability, we can conclude that climatic variability does not always imply variability in the hydrologic behaviour of basins. The type of model used—which belongs to the family of lumped conceptual models with parameters estimated by automatic numeric optimisation—can cast doubt on this hypothesis. The limitations of this kind of lumped modelling are well known (Perrin, 2000) but we briefly mention the main ones, i.e. non-uniqueness of the solution derived from the optimisation process, the efficiency of the optimisation procedure used, the influence of the length of calibration periods and finally the representativeness of samples. We know that in this kind of model, parameters do not represent actual characteristics of hydrological processes, which makes their physical interpretation flimsy. However, we observed that our optimisation of the  $A$  parameter, which represents the capacity of the soil reservoir, is true to the estimation derived from soil unit maps and soil water capacity classes by Ouedraogo (2001) in his application of a spatially distributed version of the same model. So it seems possible in those cases at least, to consider that the values of this parameter and their variations could be interpreted as characterising changes or not in the soil water capacity and consequently in the rainfall–runoff relationship. Further studies should be performed to confirm these changes using other models which also need parsimonious data. Finally to judge the relevance of the proposed approach, basins characterised by significant known changes, in land use for instance, could be used to estimate the influence of these changes on the parameter variations using a lumped hydrologic model. It would be interesting to study basins for which both lumped and physical models could be used in order to compare the results of the analyses about the stability of the rainfall–runoff relationship.

#### References

- Aka, A., Lubès, H., Masson, J.M., Servat, E., Paturol, J.E., Kouamé, B., 1996. Analysis of the temporal variability of runoff in Ivory

- Coast: statistical approach and phenomena characterization. *Hydrological Sciences Journal* 41 (6), 959–970.
- Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., Usart-Sanchez, I., Lavabre, J., 2001. Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models. *Journal of Hydrology* 250, 206–223.
- Ardoin, S., 2002. Personal communication UMR HSM, Maison des Sciences de l'Eau, Montpellier, France.
- Bates, B.C., 1990. Use of parameter transformations in non-linear, discrete flood event models. *Journal of Hydrology* 117, 55–79.
- Dennis, J.E., Schnabel, R.B., 1996. *Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations*, Siam, Philadelphia.
- Drapier, N., Smith, H., 1981. *Applied Regression Analysis*, second ed., Wiley, New York.
- Kabouya, M., 1990. Modélisation pluie-débit au pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. PhD Thesis. Université Paris-Sud.
- Laloë, F., 1995. Should surplus production models be fishery description tools rather than biological models? *Aquatic Living Resources* 8, 1–16.
- Lubès-Niel, H., Masson, J.M., Paturel, J.E., Servat, E., 1998. Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des Sciences de l'Eau* 11 (3).
- Makhlouf, Z., Michel, C., 1994. A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology* 162 (1994), 299–318.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I: a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10 (1970), 282–290.
- Ouedraogo, M., 2001. Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante: normes hydrologiques et modélisation régionale. PhD Thesis. Université Montpellier II.
- Paturel, J.E., Servat, E., Kouamé, B., Boyer, J.F., Lubès, H., Masson, J.M., 1995. Manifestations de la sécheresse en Afrique de l'ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. *Sécheresse* 6 (1), 95–102.
- Paturel, J.E., Servat, E., Kouamé, B., Lubès, 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., Lubès, H., Delattre, M.O., 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.
- Perrin, C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. PhD Thesis. Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Pettitt, A.N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics* 28 (2), 126–135.
- Réménieras, G., 1980. *L'hydrologie de l'ingénieur*. Eyrolles, Paris.
- Servat, E., 1993. Evaluation Régionale des Ressources en Eau. Application à la Côte d'Ivoire. Rapport de synthèse du programme ERREAU. Antenne Hydrologique ORSTOM, Abidjan, Côte d'Ivoire. Juin.
- Servat, E., Paturel, J.E., Lubès, H., Kouamé, B., Ouedraogo, M., Masson, J.M., 1997. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part one: detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *Journal of Hydrology* 191 (1997), 1–15.
- Servat, E., Paturel, J.E., Lubès-Niel, H., Kouamé, B., Masson, J.M., Travaglio, M., Marieu, B., 1999. De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue des Sciences de l'Eau* 12 (2), 363–388.
- Sorooshian, S., Arfi, F., 1982. Response surface parameter sensitivity analysis methods for postcalibration studies. *Water Resources Research* 18 (5), 1531–1538.
- Sorooshian, S., Gupta, V.K., 1995. Model calibration. In: Singh, V.P., (Ed.), *Computers Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, pp. 23–68. (Chapter 2).
- Troutman, B.M., 1985. Errors and parameter estimation in precipitation–runoff modeling. 1. Theory. *Water Resources Research* 21 (8), 1195–1213.
- Vandewiele, G.L., Ni-Lar-Win, 1998. Monthly water balance models for 55 basins in 10 countries. *Hydrological Sciences Journal* 43 (5), 687–699.
- Vandewiele, G.L., Xu, C.-Y., Ni-Lar-Win, 1993. *Methodology for constructing monthly water balance on basin scale*, second ed., Laboratory of Hydrology, Vrije Universiteit Brussel.



ELSEVIER

Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

SCIENCE @ DIRECT®

Journal of Hydrology 300 (2005) 33–43

Journal  
of  
**Hydrology**

[www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol)

## The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina-Faso

Gil Mahe<sup>a,\*</sup>, Jean-Emmanuel Paturel<sup>a</sup>, Eric Servat<sup>b</sup>, Declan Conway<sup>c</sup>, Alain Dezetter<sup>b</sup>

<sup>a</sup>IRD, 01 BP 182, Ouagadougou, Burkina Faso

<sup>b</sup>IRD, BP 64501, 34394 Montpellier Cedex, France

<sup>c</sup>UEA, NR4 7TJ Norwich, UK

Received 14 June 2002; revised 19 April 2004; accepted 28 April 2004

### Abstract

The annual hydrological regime of the Nakambe River shows substantial changes during the period 1955–1998 with a shift occurring around 1970. From 1970 to the mid-1990s, despite a reduction in rainfall and an increase in the number of dams in the basin, average runoff and maximum daily discharges increased. This paper reviews the hydrological behaviour of the Nakambe River from 1955 to 1998 and examines the potential role of land use change on soil water holding capacity (WHC) in producing the counter-intuitive change in runoff observed after 1970. We compare the results of two monthly hydrological models using different rainfall, potential evapotranspiration and WHC data sets. Model simulations with soil WHC values modified over time based upon historical maps of land use, are compared against simulations with a constant value for WHC. The extent of natural vegetation declined from 43 to 13% of the total basin area between 1965 and 1995, whilst the cultivated areas increased from 53 to 76% and the area of bare soil nearly tripled from 4 to 11%. The total reduction in WHC is estimated to range from 33 to 62% depending on the method used, either considering that the WHC values given by the FAO stand for the environmental situation in 1965 or before. There is a marked improvement in river flow simulation using the time-varying values of soil WHC. The paper ends with a discussion of the role of other factors such as surface runoff processes and groundwater trends in explaining the hydrological behaviour of the Nakambe River.

© 2004 Elsevier B.V. All rights reserved.

**Keywords:** Land use; Soil water holding capacity; Hydrological modelling; Nakambe River; Burkina-Faso

### 1. Introduction

Many studies have demonstrated that the rainfall decline across the Sahel since 1970 has had

a significant impact on runoff in the region. In most cases, river flows have declined (Bricquet et al., 1997; Mahé et al., 2000) but in a few cases flows have increased (Pouyaud, 1987), depending on the nature of drainage network and geology. Empirical process studies have also shown that the type of land use has a significant impact on runoff generation in parts of the Sahel (Roose, 1977; Fournier et al., 2000). Ouedraogo et al. (2001) obtained good simulations of river flows in West Africa using a monthly water balance model

\* Corresponding author. Address: UMR Hydrosociences, Maison des Sciences de l'eau, Université Montpellier 2, 34095 Montpellier Cedex 5, France. Tel.: +33-467149015; fax: +33-467149010.

E-mail addresses: [gil.mahe@msem.univ-montp2.fr](mailto:gil.mahe@msem.univ-montp2.fr), (G. Mahe); [eric.servat@msem.univ-montp2.fr](mailto:eric.servat@msem.univ-montp2.fr) (E. Servat); [d.conway@uea.ac.uk](mailto:d.conway@uea.ac.uk) (D. Conway).

(WBM). However, they found that north of about the 1000 mm isohyet, the model was less efficient in simulating observed flows and hypothesised that this may have been due to a greater impact of land use change on runoff generation in drier (Sahelian) areas than in more humid areas, as suggested by Casenave and Valentin (1988).

The Nakambe is an ephemeral river in a semi-arid region with annual rainfall of about 645 mm with a rather flat basin of 20,800 km<sup>2</sup>. This paper reviews the hydrological behaviour of the Nakambe River from 1955 to 1998 and examines a counter-intuitive change in runoff regime that occurred around 1970: from 1970 to the mid-1990s, despite a reduction in rainfall and an increase in the number of dams in the basin, average runoff and maximum daily discharges increased. The paper tests the hypothesis that changes in land use, through their impact on soil water holding capacity (WHC) have partially offset the expected decrease in runoff that might have occurred as a result of rainfall decline and increased reservoir storage in the basin. This is done by modelling the monthly hydrological regime of the Nakambe River basin (Fig. 1) and incorporating the impact of changing soil WHC on the flow regime. The high level of human disturbance to land surface characteristics in the basin, including the construction of dams, and intensification and expansion of agricultural practices, are considered as explanatory factors for the observed hydrological behaviour of the Nakambe River.

## 2. The data sets

The approach utilises sub-sets of data from global data sets of rainfall, potential evapotranspiration (PE) and soil WHC at 0.5° latitude and longitude resolution. Two monthly time series of rainfall from 1950 to 1995 were used: New et al. (2000), hereafter called Climatic Research Unit (CRU), and a modified version of this data set (IRD) with additional rainfall data from the Institut de Recherche pour le Développement (Mahé et al., 2001). PE time series were constructed using monthly time series of temperature ( $t_{\min}$  and  $t_{\max}$ ), vapour pressure, and sunshine hours from New et al. (2000), according to the standard Penman formula.

Three data sets were used to derive three separate estimates of WHC in the basin. All of them are based on FAO (1981) digital soil map of the world in which WHC is determined to a depth of 1 m, or to an impermeable layer which ever is shallower. WHC is determined independently of the prevailing climate and takes no account of vegetation rooting characteristics. FAO (1981) gives a range of values for WHC, which are not associated with particular vegetation types but based upon the soil depth and texture, the influence of parent material, seasonal flooding conditions, top soil texture and other minor correcting factors. A set of WHC values were computed by Ouedraogo et al. (2001) for the basin according to the average value of WHC, ranging from 92 to 159 mm with an overall average for the basin of 129 mm. These estimates are used here and referred to as *FAOavg*. An additional set of values called *FAOmax* was computed for this study, based on the maximum value of WHC derived from FAO (1981). Dunne and Willmott (1996) also generated soil WHC at 0.5° resolution, hereafter *D&W*, which values range from 44 to 106 mm with an overall average of 56 mm for the basin, considerably lower than *FAO* estimates. They used the FAO soil map of the world with two additional criteria: soil organic matter, estimated from climatic data, and plant rooting depths and ground coverages obtained from a vegetation characteristic data set.

Daily runoff data were obtained from the National Hydrological Service (DGIRH) of Burkina-Faso. Observations began in 1955 but were followed by nearly 10 years without continuous observations,

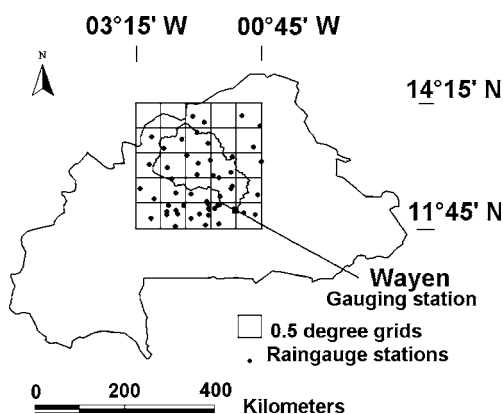


Fig. 1. Location of the Nakambe River basin at Wayen in Burkina-Faso West Africa.

Table 1  
Maximum daily flows and total annual flows at Wayen

|      | $Q_{j,max}$<br>( $m^3 s^{-1}$ ) | Volume<br>( $km^3$ ) | $Q_{j,max}$<br>( $m^3 s^{-1}$ ) | Volume<br>( $km^3$ ) | $Q_{j,max}$<br>( $m^3 s^{-1}$ ) | Volume<br>( $km^3$ ) | $Q_{j,max}$<br>( $m^3 s^{-1}$ ) | Volume<br>( $km^3$ ) |
|------|---------------------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------|
| 1965 | 159                             | 0.34                 | 1974                            | 256                  | 0.66                            | 1983                 | 153                             | 0.45                 |
| 1966 | 34                              | 0.07                 | 1975                            | 262                  | 0.39                            | 1984                 | 56                              | 0.15                 |
| 1967 | 116                             | 0.22                 | 1976                            | 34                   | 0.13                            | 1985                 | 116                             | 0.44                 |
| 1968 | 14                              | 0.07                 | 1977                            | 47                   | 0.16                            | 1986                 | 144                             | 0.41                 |
| 1969 | 35                              | 0.12                 | 1978                            | 174                  | 0.36                            | 1987                 | 30                              | 0.15                 |
| 1970 | 42                              | 0.11                 | 1979                            | 180                  | 0.30                            | 1988                 | 357                             | 1.01                 |
| 1971 | No data                         |                      | 1980                            | 130                  | 0.32                            | 1989                 | 190                             | 0.40                 |
| 1972 | 16                              | 0.05                 | 1981                            | 166                  | 0.60                            | 1990                 | 29                              | 0.10                 |
| 1973 | 150                             | 0.23                 | 1982                            | 50                   | 0.19                            | 1991                 | 147                             | 0.45                 |
|      |                                 |                      |                                 |                      |                                 | Mean                 | 130                             | 0.31                 |

which re-started in 1965, with only 1 year missing until 1998 (1971). The monthly values presented here refer to the years 1955 and then from 1965 to 1998. Annual values were reconstructed by Moniod et al. (1977) for the years 1956–1964, by using temporarily measures, data from close river basins and rainfall–runoff relationships. Except for the above period, the discharges at Wayen (Fig. 2, Table 1) are only the measured values and not a reconstruction of values taking into account the impacts of the numerous dams.

The groundwater data come from the DGIRH. For each station, there are several wells, from which we selected only one, which was indicated to be far from villages and also far from river beds, hypothesising that it would then better reflect the natural interannual climatic impact on groundwater level.

### 3. Factors affecting hydrological variability in the Nakambe River

#### 3.1. Rainfall, PE and river flows

There is only one major flood peak (Fig. 3). The base flow contributes a minor part of the runoff as the hydrograph falls rapidly after flood peaks. Mean annual runoff up to 1970 was about  $7.2 m^3 s^{-1}$  (and  $5 m^3 s^{-1}$  over the period without reconstructed flows 1965–1970). Flows began decreasing slowly from the end of the 1960s up to 1972, like most other West African rivers (Mahé and Olivry, 1999). From 1973 onwards, however, flows increase even though basin-wide rainfall decreased (Fig. 2). Runoff actually increased by 60% from  $7.2$  to  $11.6 m^3 s^{-1}$  between

1955–1970 and 1972–1998 and the mean daily maximum flows also increased from  $67$  to  $145 m^3 s^{-1}$  (Table 1). The monthly flows shown in Figs. 3 and 4 highlight large increases during July, August and September from 1973 onwards, while discharges of October and November have not changed. The flood peak now occurs mainly in August, while it mainly occurred in September before the 1970s. Hubert's test (Hubert et al., 1989), which separates statistically different populations of points in a time series, highlights decreases in May to August rainfall from the 1950s to 1988. Rainfall in September increased slightly since 1985, and more significantly in August from 1988 (Fig. 5). Over the period 1955–1998, Hubert's test shows a discontinuity in the time series in 1969/1970, which separates the earlier higher rainfall period (average 742 mm per year) and the following drier period (595 mm). Hubert's test shows no discontinuity in the PE annual time series in the centre of the basin (not shown here), and only a slight increase in the south (5%) since 1978, following an increase of minimum temperatures.

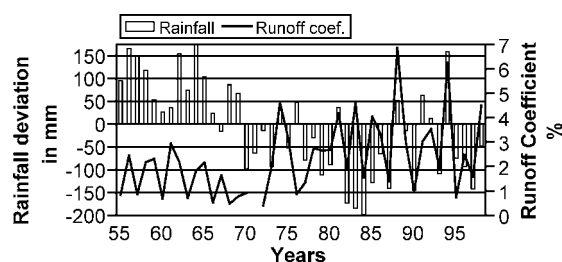


Fig. 2. Runoff coefficients, from observed measures, and rainfall indexes over the period 1955–1995 for the Nakambe River at Wayen.

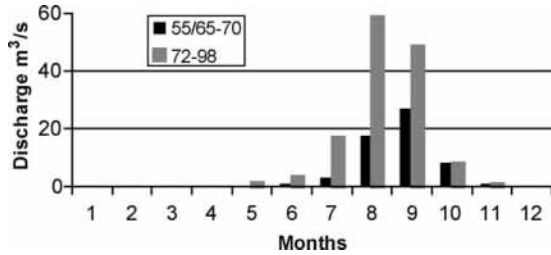


Fig. 3. Monthly discharges over the periods 1955/1965–1970 and 1972–1998.

As a result of the opposing rainfall and river flow changes the average standardised runoff coefficient is twice as high after 1973 (confirmed by Hubert’s test): increasing from 1.4 to 3.0 during a period when the rainfall exhibited a prolonged decline with slight recovery in some months towards the end of the period (Fig. 2). Poppel and Lekkerkerker (1991) found that in the less inhabited southern parts of the basin (protected forest), the runoff coefficient did not increase suggesting that the influence of human activity (land use change) on soil characteristics may have had a major impact upon runoff generation.

### 3.2. Baseflows and groundwater

Leduc et al. (2000) found that the water table has been increasing over the last 50 years around small endoreic ponds near Niamey, in the SW Niger Republic, due to an increase in the surface runoff coefficients, which they linked to an intensification of agricultural activities.

To investigate the potential role of groundwater in explaining the observed behaviour of the Nakambe flows, we compared the surface and groundwater level data for the whole Nakambe River. Although

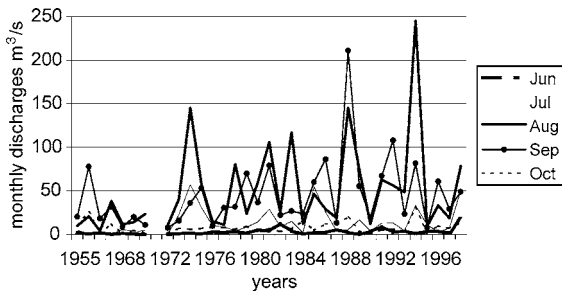


Fig. 4. Nakambe monthly discharges 1955, and 1965–1998.

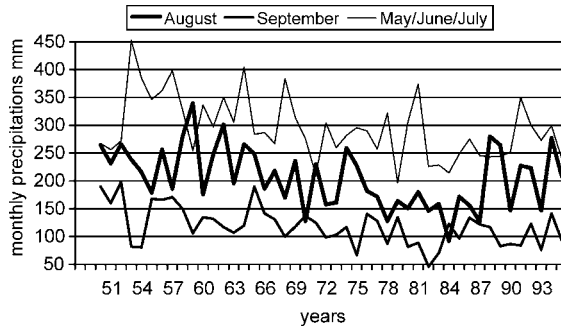


Fig. 5. Monthly precipitations over the Nakambe River basin from 1950 to 1995.

the number of wells regularly observed by the DGIRH is very small, we found eight wells on the surface of the Nakambe basin, which are located far from urban areas or villages and from the river beds, and with time series of at least monthly resolution, with some periods with weekly and even daily observations. For each year, we determine the highest level reached by the ground water at each well. We then calculate the time series of ground water level differences between 2 years, for each well, in standardised values, which we average to obtain one standard value per year for the whole basin. We assume that this index only reflects the basin-wide climatic impact on groundwater levels, and can be related to the rainfall over the basin, which should be largely responsible for the annual recharge of the basin groundwater. The variability of groundwater levels of local aquifers (Fig. 6) generally follows that of rainfall over the whole Nakambe River basin and do not show any long-term positive trend like in SW

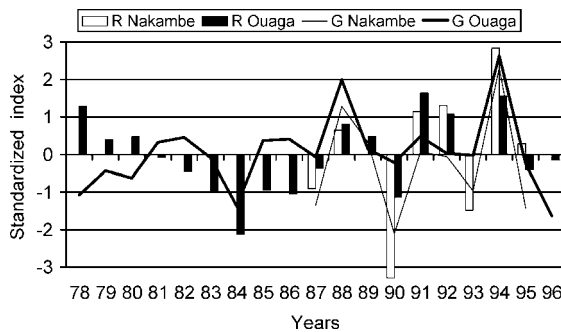


Fig. 6. Rainfall (R) and Groundwater (G) variability over the Nakambe basin compared to the Ouagadougou station, south of the basin.

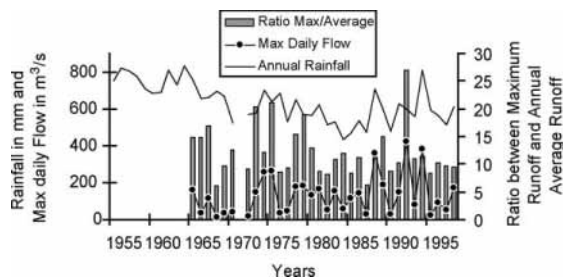


Fig. 7. Maximum daily flows, ratio between maximum daily flow and annual average runoff, and annual rainfall.

Niger. This means that the increase in runoff in the Nakambe is not due to an increase of the groundwater levels. This differs from the situation in SW Niger, where the drainage systems collect runoff within endoreic areas which fill small ponds, which in turn contribute directly to groundwater recharge.

Finally, the ratio between maximum daily runoff and annual average runoff of the Nakambe River (Fig. 7) does not show any systematic changes over the study period. This means that the increase of runoff is not due to an increase in just extreme events, which would have caused exceptional flood peaks, but that both the average and the peak flows have increased since the 1970s.

### 3.3. The impact of dams

There are 242 dams in the basin, out of 1456 in the whole of Burkina-Faso. The volume of water stored in dams within the basin was about 55 million  $m^3$  in 1965. This volume rose continuously up to 170 million  $m^3$  by 1994, which are partly emptied and re-filled every year, compared with 315 million  $m^3$  mean annual river flow. Most of the stored water can be considered as consumptive losses because of abstractions and evaporation.

The discharge time series at Wayen includes the gradual increase in storage water and therefore artificial losses. Nevertheless, measured river flows show an increase, and the flood peak now occurs approximately 1 month earlier. The net effect of dams in the basin should be to reduce the runoff through increased evaporative losses from reservoir surfaces and abstractions. This process is not included in this modelling exercise, but should be developed in a further study as a source of possible improvement.

### 3.4. Land use change in the basin

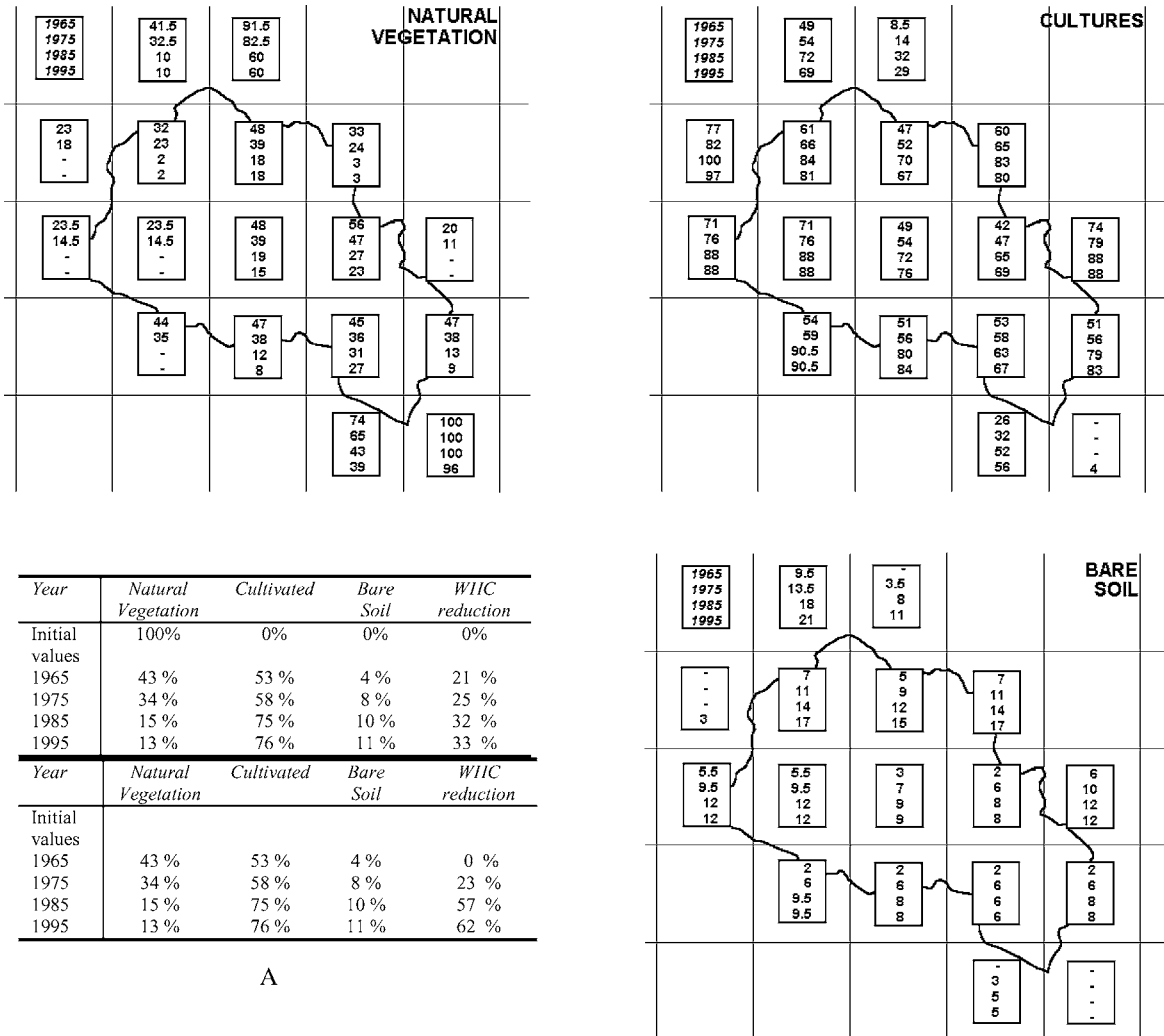
We generated a set of four different land use maps for the basin for the years 1965, 1975, 1985 and 1995 by comparing local studies with larger areal surveys. Three classes of land-cover were identified: natural vegetation (which includes fallow areas, assumed to behave like natural vegetation), cultivated areas and bare soil (Fig. 8).

The changes in ratios between the three classes are translated into modifications of the WHC in each grid cell, by referring to runoff coefficient values published by Fournier et al. (2000). They studied runoff from small surfaces in Western Burkina-Faso, in a climatic area corresponding to the South of the Nakambe basin, and observed a reduction of the infiltration proportional to the increase of the runoff coefficient. They published average values of runoff coefficients based on several rainy seasons for different land types: natural vegetation and fallow areas 13%, cultivated land 20%, and bare soil 50%. These figures are slightly lower than what is observed in North-Sahelian basins in Burkina-Faso (Yacouba et al., 2002; Karambiri et al., 2003).

## 4. Monthly river flow modelling

### 4.1. The models

We use two models to simulate monthly flows: GR2M (Ambrose, 1999) and a standard monthly WBM (Conway, 1997; Conway and Mahé, 2004). Both models use a simple soil moisture accounting procedure where rainfall excess over potential evaporation (PE) fills a soil moisture reservoir (taken as the WHC). When the soil reservoir is full any remaining excess is added to a linear storage reservoir. Both models GR2M and WBM have only two parameters, representing direct and lagged runoff, although the WBM has seasonally varying values. Runoff and storage are calculated for  $0.5^\circ$  grid cells within the catchment (Fig. 1) without any flow routing between grid cells. Runoff from all full and partial cells within the basin is then summed to produce an overall monthly flow. The flood time transfer along the whole catchment is short (a few days), which allows a monthly calculation without taking into account any transfer time.



A

Fig. 8. Soil classification and evolution in per cent of land use in each grid cell in 1965, 1975, 1985 and 1995, percentage reduction by 1995 compared to initial values (*D&W* or *FAOavg* and *FAOmax*). The table indicates the decadal change in three land use classes expressed as percentage areas within the Nakambe River basin and the resulting impact on WHC. Two cases: initial conditions prior to 1965 (A top); initial conditions = 1965 (A bottom).

#### 4.2. Impact of land use change on the water level in the model's reservoir

We consider the hypothesis that changes in land use/cover in the basin may have contributed to the observed increase in runoff. We use estimates of land use change over time coupled with some simple assumptions about their impact on the WHC of soils under a range of land use types. Reducing the soil WHC suggests that it cannot hold as much moisture,

because either the soil is eroding and therefore thinner, or the organic matter or texture is changing or degrading, or both of these assumptions.

We generated four WHC grids for 1965, 1975, 1985, 1995 as follows. The unadjusted values of the *FAOavg*, *FAOmax* and *D&W* WHC files were used to provide the initial soil WHC, which are assumed to represent the theoretical natural vegetation prior to human activities. We used two hypotheses for estimating the impact of land-use change on WHC.

In the first—low impact—(Fig. 8, A top) we consider that the soil maps given by the FAO correspond to a ‘theoretical’ state of 100% natural vegetation, which could have been observed prior to the human settlement. Thus, in 1965, due to the past human impact, the ‘initial’ WHC must be reduced prior to river modelling. The impact of the land-use change is then lower, as the starting value is already reduced by 21%. The final reduction is 33%, which means that during the 30 years of river modelling, the WHC reduction is only of 12%. In the second hypothesis—high impact—(Fig. 8, A bottom), we assume that the soil maps given by the FAO correspond to a natural/human equilibrium, and thus that the human impact is already taken into account in the WHC values given by the FAO. The starting values of WHC are thus not reduced and correspond to the land-use state in 1965. The total reduction over 30 years of river modelling is then of 62%.

From 1965 onwards, we modified these initial values according to the change in percentage area of different land use classes during each decade. Annual grids were generated between each decade using a linear interpolation of the change.

The percentage change between the initial WHC values and WHC values in 1995 are shown in Fig. 8. The decadal change in each vegetation class is given in Fig. 8. The area of natural vegetation is 3.5 times smaller in 1995 than in 1965, the area of bare soil is 3 times larger, and the cultivated area increased by more than 40%.

#### 4.3. Modelling results

We run both models for 12 sets of data: 1 PE, 2 rainfall, 3 fixed WHC and 3 time-varying WHC data sets.

$$\text{NASH Index (\%)} = 100 \left[ 1 - \frac{\sum_i (Q_o^i - Q_c^i)^2}{\sum_i (Q_o^i - Q_m)^2} \right]$$

For this study, we used the Nash index as performance criteria with  $Q_o^i$  and  $Q_c^i$  observed and simulated runoff, respectively; and  $Q_m$  the average observed runoff over the whole observation period. The Nash index increases to 100 for perfect simulation.

Table 2

Results of the river flow modelling: Nash performance criteria for calibration and validation, for fixed and time-varying WHC data

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

Table 2 gives the results of the river flow modelling. With both models, when using the time-varying WHC data set the performance criteria is markedly increased. We only present the results with the second hypothesis (high impact), which are better. For all but one combination the Nash index increases (up to 26%) (period 1965–1975) for model calibration, and higher values with WBM. For model validation (period 1976–1995), there is a strong increase with GR2M, but the results are not robust with WBM: increase with the CRU rainfall file, and decrease with the IRD rainfall file. The GR2M model produces higher values for the time-varying WHC with the IRD rainfall file, and always gives higher values in validation (+17% in average). The IRD rainfall series produces slightly better results than the IRD file (+3–4%). Results are better with the FAOavg or FAOmax WHC data than with the D&W values. Finally, as a sensitivity test both models were run with a set of optimized parameters with the initial WHC values reduced by 75% to test the impact of a global reduction in WHC compared to the spatially and temporally variant data set: this resulted in lower values of Nash index than when using the time-varying WHC.

## 5. Discussion

Since the 1960s the River Nakambe's hydrological regime has been affected by the construction of numerous dams, a change in the rainfall regime and extensive land use change within its basin. Since 1970 rainfall decreased by 20%, runoff increased by 60%, and runoff coefficients by more than 100%.

To assess the impact of land use change on soil WHC we use two monthly time step hydrological models with six WHC data sets, three with spatially and temporally varying values and three with constant values throughout the simulation, at a half-degree square scale. The time-varying WHC data were realised by using field experiments results of runoff coefficient change on different land-cover types. These land-cover types have been selected to be representative of the different kinds of land-cover found on the basin. The first assumption we made is that the results of these hydrological studies are usable for the whole Nakambe basin. For this matter, we made comparisons with results of other studies in the area, which prove to be in the same range of values. But we must note that there are not enough recent studies of rainfall–runoff relationships in the Sahelian area, in regard to the impact that climate change might have had on surface hydrology processes.

Due to the size of the basin, 20,800 km<sup>2</sup>, it is not possible to delineate accurately the contours of each type of land-cover, e.g. natural vegetation, cultivated areas and bare soils, over the whole surface of the basin. The second assumption is that we must assume that the resolution of the satellite imagery, coupled with some ground validating data, is sufficient for estimating the variability in space and time of the surface occupied by each of these land-cover types over the whole basin.

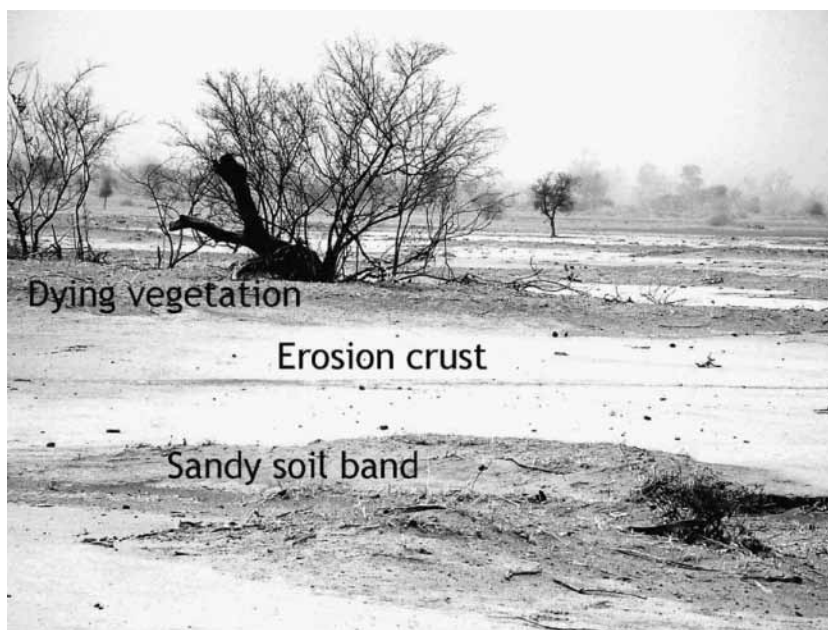
As a result of this study, the simulation of monthly river flows of the Nakambe River was improved markedly by using the time-varying WHC values. This shows that model performance is sensitive to a change in catchment characteristics over time, such as varying soil WHC due to land-cover change, and that our kind of approach mixing local and large-scale data, is useful, in a context of scarcity of data.

The best results are obtained with the higher WHC values, from the *FAOmax* data, which does not specifically take into account the vegetation types.

GR2M and WBM are conceptual models which loss functions are empirical ones. Ardoin et al. (2001) had very good results of daily river flow modelling in Northern Ivory-Coast, by using a loss function not using the PE values but rather an actual evaporation value related to the soil moisture availability. The two models we use in this study are not very sensitive to PE formula used for calculating PE, as confirmed by recent results by Paturel et al. (2003). It is not easy to imagine how runoff would increase due to an effect of PE, in a context of increasing world air temperature and therefore of PE.

Karambiri et al. (2003) studied runoff in the very degraded areas of the North of Burkina-Faso, near to the North of the Nakambe basin. In this area, the vegetation is composed by little trees, shrubs and patches of grass, developed over narrow bands of sandy soil, which thickness do not exceed some tenths of centimetres (Picture 1). Between these bands of soil appears the erosion crust. The overall porosity of these soils is very low, because the fauna and flora are only scarcely developed, and offers very few possibilities for water to penetrate through the crust. The runoff coefficient, of Hortonian type on the erosion crust, can reach nearly 100%. The WHC in the narrow sandy soil bands is very limited, the soil is very rapidly saturated. Thus, when rainfall reach the soil surface, missing bare soil, sandy bands and others, surface runoff is dominant and nearly immediate, the infiltration in the first centimetres of the soil, even on the erosion crust, exists but is very limited, even if not negligible, and finally the amount of water available for a delayed evapotranspiration is low, largely exceeded by the runoff. During the rainy season, when the vegetation grows, the runoff coefficient decreases, due to the higher evapotranspiration demand of plants, except on the crust, where no vegetation grows. Even during the rainy season, Karambiri et al. (2003) noted that, due to the very weak thickness of the soil bands, runoff of Hortonian type was rapidly observed.

Runoff coefficients on bare soils might be largely under-estimated, because the runoff coefficient's data we used come from river basins located too much southward within the basin. Scarce data from the very northern part of the basin show runoff coefficients sometimes up to 100% (Karambiri et al., 2003). This could explain why the total WHC reduction we



Picture 1. North Sahelian landscape in Burkina-Faso, Nakambe River basin. Erosion crust and sandy soil bands.

calculate is not sufficient to explain the increase of 108% of the runoff coefficient.

There are other examples of river flows increasing in the Sahelo-Sudanian area during the recent period of rainfall reduction. Amani and Nguetora (2002) showed an increase of the summer flood of the Niger river at Niamey in 1984, 1988, 1994 and 1998, above the level of the winter main flood, coming from the upper Niger river basin. This kind of modification of the hydrological regime of the Niger river at Niamey has never been observed in the past series beginning in 1928. The author associates this increase in local runoff to the degradation of land-cover. Leduc et al. (2000) give a similar conclusions for explaining the increase of the water table level in SW Niger Republic. Mahé et al. (2003) also show a runoff increase within the whole Sahelian area of Burkina-Faso and West Niger since 1970.

In areas which are less inhabited and which land-cover is consequently less degraded, the runoff increase is lowered. This is the case of the Dargol upper basin in the North of Burkina-Faso (Mahé et al., 2003).

## 6. Conclusions

Since the 1960s land use has changed in the North of Burkina-Faso: increase of agricultural areas and of the number of dams. A climate shift also occurred in West Africa since around 1970, with two major impacts in the northern, Sahelian, part of Burkina-Faso: a reduction in annual rainfall and a change of land-cover. Despite the reduction of rainfall and the increase of the number of dams, average runoff and maximum daily discharges increased. The impact of land use change on soil WHC during this period is tested through monthly river flow modelling, and show a marked improvement in flow simulation using the time-varying values of soil WHC. The natural vegetation reduces from 43 to 13% of the basin surface area between 1965 and 1995, and the cultivated areas increase from 53 to 76% at the same time, while bare soil areas are nearly tripled from 4 to 11%. Groundwater levels in the basin seem to be inferred to the rainfall interannual variability, and cannot be responsible for the runoff increase.

Further improvements in monthly river flow conceptual models, could be certainly reached by

improving the quality of the WHC data, by taking into account a temporal variability as done in our study.

A better simulation of the river flows in this Sudano-Sahelian climatic area might prove very useful. For example, the 12 years old Bagre Dam, constructed downstream of the Wayen's gauging station in Burkina-Faso, faces unpredicted high flood peaks since its opening: the design flood has been already exceeded, with disastrous consequences. Expensive works are now forecasted to design new spillways for this dam.

Finally, too few measurements have been done up to now over small Sahelian catchments with very degraded land-surfaces. We would need such knowledge to improve the efficiency of the monthly river flow modelling, and we encourage National Hydrological Services to promote measurement campaigns on such basins.

### Acknowledgements

We are very grateful to the Mr Ouattara Director of the National Meteorology and to Mrs Ouedraogo and Bougaire, former and new Directors of the National Hydrological Service of Burkina-Faso for the supply with recent data. We are also very grateful to Dr Coudrain-Ribstein for her critical review of this paper, and to the reviewers who suggested useful improvements. And thanks to Mr. Pierre Diello, for the model runs, and to Ms Anne Dray for her preliminary work on this topic.

### References

- Amani, A., Nguetora, M., 2002. Evidence d'une modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Niamey. In: Van Lannen, H., Demuth, S. (Eds.), FRIEND 2002 Regional Hydrology: Bridging the Gap Between Research and Practice, Proceedings of Friend Conference, Cape Town, South Africa, 2002, IAHS Pub. No. 274, pp. 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.
- 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. Acad. Sci. Paris, Série II* 333(10), 611–616.
- Bricquet, J.P., Bamba, F., Mahé, G., Toure, M., Olivry, J.C., 1997. Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique. *Rev. Sci. l'eau* 3, 321–337.
- Casenave, A., Valentin, C., 1988. Les états de surface de la zone sahélienne. CEE/Orstom Paris, Coll. Didactiques, 202.
- Conway, D., 1997. A water balance model of the Upper Blue Nile in Ethiopia. *Hydrol. Sci. J.* 42, 841–859.
- Conway, D., Mahé, G., 2004. Riverflow modelling in two large river basins: the Parana (subtropical) and the Niger (tropical). *Hydrol. Process. J.* (in press).
- Dunne, K.A., Willmott, C.J., 1996. Global distribution of plant-extractable water capacity of soil. *Int. J. Climatol.* 16, 841–859.
- FAO, 1981. Digital Soil Map of the World. UNESCO.
- 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 Sci. Technol., EIER/ETSHER* 5, 4–14.
- Hubert, P., Carbonnel, J.P., Chaouche, A., 1989. Segmentation des séries hydrométriques. Application à des séries de précipitations et de débits d'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.* 110, 349–367.
- 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. *Hydrol. Process.* 17(8), 1495–1507.
- Leduc, C., Bromley, J., Schroeter, P., 2000. Water-table fluctuation and recharge in semi-arid climate: some results of the HAPEX-Sahel hydrodynamic survey (Niger). *J. Hydrol.* 188/189, 123–138.
- Mahé, G., Olivry, J.C., 1999. Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa. *C.R. Acad. Sci. Paris, Serie IIa* 328, 621–626.
- 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. *C.R. Acad. Sci. Paris, Serie 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. *Hydrol. Sci. J.* 46(2), 211–226.
- 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. In: Servat, E., Najem, W., Leduc, C., Ahmed, S. (Eds.), *Hydrology of the Mediterranean and Semi-arid Regions*, IAHS Pub. 278, pp. 215–222.
- Moniod, F., Pouyaud, B., Sechet, P., 1977. Le bassin du fleuve Volta. Coll. Monographies Hydrologiques, ORSTOM, Paris.
- New, M.G., Hulme, M., Jones, P.D., 2000. Representing 20th century space–time climate variability. II. Development of 1901–1996 monthly terrestrial climate fields. *J. Climate* 13, 2217–2238.
- Ouedraogo, 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: Dolman, A.J., Hall, A.J., Kavvas, M.L., Oki, T., Pomeroy, J.W. (Eds.), *Soil–Vegetation–Atmosphere Transfer Schemes and Large-Scale Hydrological*

- Models, Proceedings of the Sixth IAHS Scientific Assembly, Maastricht, the Netherlands, Pub. AIHS No. 270, pp. 209–214.
- 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, Japan, 2003, IAHS Pub. 280, pp. 117–123.
- Poppel, J.W., Lekkerkerker, C.L., 1991. Le suivi de la dégradation de l’environnement par des observations hydro-métriques et piézométriques. Bulletin de liaison du CIEH, Ouagadougou No. 83.
- 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. In: Solomon, S.I., Beran, M., Hogg, W. (Eds.), The Influence of Climate Change and Climate Variability on the Hydrologic Regime and the Water Resources, Proceedings of Vancouver Symposium, August 1987, IAHS, Publ. No. 168, pp. 447–461.
- Roose, E., 1977. Erosion et Ruissellement en Afrique de l’Ouest, Vingt Années de Mesures en Petites Parcelles Expérimentales. ORSTOM, Travaux et Documents No. 78, Paris.
- Yacouba, H., Da Dapola, E., Yonkeu, S., Zombre, P., Soule, M., Bagayoko, F., 2002. Etude du Processus de Dégradation du Bassin Supérieur du Nakambe (Burkina-Faso) écoulement de Surface et Pertes de Terres liées à l’eau. Deuxième J. Sci. EIER/ETSHER, Ouagadougou, Burkina-Faso, mai 2002, 28–31.