

## **Typologie de bassins versants en préalable à la modélisation hydrologique d'une région sahélienne**

**S. MASSUEL, L. SEGUIS, H. NIEL, B. CAPPELAERE,  
F. DELCLAUX & C. PEUGEOT**

*UMR Hydrosociences, Maison des Sciences de l'Eau, Institut de Recherche pour le Développement (IRD), BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France*  
[sylvain.massuel@msem.univ-montp2.fr](mailto:sylvain.massuel@msem.univ-montp2.fr)

**Résumé** Au Sahel, plus précisément au sud-ouest du Niger, l'écoulement superficiel, essentiellement endoréique, alimente des mares isolées. Evaluer la ressource régionale en eau de surface, implique une connaissance des écoulements à l'échelle de l'événement pluvieux et du bassin d'alimentation de chaque mare. Une modélisation exhaustive des écoulements sur l'ensemble des bassins versants serait envisageable, mais très lourde. L'autre approche abordée ici consiste à établir une typologie des bassins versants vis-à-vis de l'écoulement. Par une analyse bibliographique des modélisations des écoulements sur notre zone d'étude (degré carré de Niamey, expérimentation HAPEX Sahel), on recense les critères les plus pertinents quant au ruissellement (profil de pente, états de surface, etc.). Par une procédure objective de classification (approche statistique), les bassins versants sont répartis en classes de structure physiographique. Du point de vue hydrologique, la classification est validée par une modélisation pluie-débit sur des bassins versants types de chaque classe.

**Mots clés** bassin versant; classification; MNT; Niger; ruissellement; Sahel

**Key words** drainage basin; classification; MNT; Niger; runoff; Sahel

### **INTRODUCTION**

Cette étude s'inscrit dans un objectif d'évaluation de la ressource régionale en eau de surface rechargeant la nappe au sein du bassin versant de la vallée de Dantiandou (1500 km<sup>2</sup>; Fig. 1). Au sud-ouest du Niger, à l'est de Niamey, le paysage est constitué de vastes plateaux entaillés de vallées fossiles (*Kori*) découpées en multiples bassins versants endoréiques. La nature orageuse, fortement localisée des précipitations et la petite taille des bassins versants nécessitent un travail à l'échelle de l'unité élémentaire. Les bassins élémentaires hydrologiquement actifs, transfèrent le ruissellement jusqu'à des mares temporaires. Le contexte géomorphologique engendre des similitudes quant aux facteurs conditionnant la production du ruissellement et son transfert sur les bassins. Une réponse hydrologique comparable vis-à-vis des sollicitations pluviométriques peut donc être envisagée. L'objectif de ce travail est d'établir, au moyen d'un outil statistique, une classification en première approximation représentative des aptitudes au ruissellement des bassins et de la valider par une modélisation pluie-débit sur quelques bassins de chaque classe.

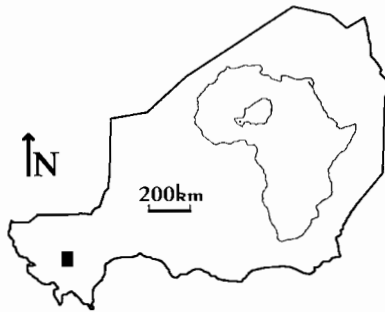


Fig. 1 Situation géographique de la zone d'étude.

## IDENTIFICATION DES BASSINS VERSANTS

L'inventaire des mares au cours d'une simple mission aérienne ou sur image satellitale ne permet pas d'établir une liste exhaustive des bassins produisant un écoulement concentré, notamment à cause du caractère sporadique des écoulements et de la dynamique de vidange rapide des mares. Nous avons donc recherché en sus des mares reconnues, des marqueurs d'un écoulement concentré dans les points bas du paysage (cône de déjection, zone localisée de forte végétation, etc.). Nous avons défini de manière stricte la signification du bassin versant élémentaire actif dans le cadre particulier de cette étude. Il représente la surface, parcourue par un drain, en amont d'un exutoire identifié, délimitée par une méthode automatique (SIG GRASS) s'appuyant sur une carte des directions de drainage issue d'un MNT (Cappelaere *et al.*, 2002) au pas de 40 mètres. L'analyse des photos aériennes de 1992 complétée par une campagne de terrain récente, a permis de géoréférencer 195 exutoires. Après suppression des zones de plateau non contributives au ruissellement, 77% des 195 bassins obtenus ont une surface inférieure à 5 km<sup>2</sup>. La distribution spatiale semble satisfaisante et représentative d'une situation hydrologique observable sur le terrain.

## TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNÉES

### Description

La constitution des descripteurs quantitatifs des bassins élémentaires s'appuie sur la carte des états de surface établie par D'Herbès & Valentin (1997). Dans cette carte, les états de surface sont définis principalement en fonction de la nature des croûtes superficielles, des taux de couverture végétale ou de leur nature. Les cartes de conductivité hydraulique à saturation ( $K_s$  [L T<sup>-1</sup>]) et de rugosité hydraulique ( $n$  [L<sup>-1/3</sup> T]) s'obtiennent par reclassification de la carte d'états de surface en associant à chaque classe les valeurs de  $K_s$  et de  $n$  données respectivement par Casenave et Valentin (1992) et Desconnets *et al.* (1996). Les descripteurs morphologiques ont été déduits à partir du MNT au pas de 40 m. D'autres traitements ont permis d'extraire notamment, les courbes clinométriques (distribution cumulé des pentes) et hypsométriques, les profils de pente ou de  $K_s$  moyens sur des surfaces à égales distances de l'exutoire. On

obtient alors plusieurs ensembles de descripteurs relatifs aux 195 bassins regroupant globalement 62 variables.

## Analyse

L'objectif est de sélectionner d'abord, parmi chaque ensemble de descripteurs, les variables les plus discriminantes par le biais d'une ACP centrée réduite. Il est nécessaire de considérer les 12 premiers axes de l'ACP réalisée sur l'ensemble des 62 variables pour expliquer 85% de la variance totale. Néanmoins, l'analyse des cercles de corrélation montre sept ensembles de variables très corrélées entre elles, ce qui nous a conduit à retenir une seule variable représentative de chacun de ces ensembles. Finalement, une deuxième ACP a été réalisée sur ces sept dernières variables (variables de  $D_m$  à  $C_u$  du Tableau 1) tout en sachant qu'une partie de l'information négligée n'est pas sans signification. La description des trois premiers axes montre une expression respective de 29%, 28% et 15% (soit un cumul de 72%) de l'inertie totale (Fig. 2). L'axe F1 est corrélé positivement avec  $S_a$  et négativement avec  $C_u$  et  $C_s$ . L'axe F2 est corrélé positivement avec  $D_m$  et négativement avec  $D_a$  et *pent*. Enfin, l'axe F3 est corrélé positivement avec  $C_u$  et négativement avec  $C_s$ . Pour l'analyse des individus nous avons choisi de retenir les six premiers axes expliquant 85% de la variance totale. Les individus caractérisés par conséquent par leurs coordonnées sur ces axes ont été soumis à une méthode de classification ascendante hiérarchique (CAH) afin de constituer des groupes homogènes. Neuf groupes d'effectifs inégaux ont été identifiés et numérotés par ordre de potentialité d'écoulement *a priori* décroissante (Tableau 2). Mis en œuvre sur les neuf groupes, un test de permutation (e.g. Lubès-Niel *et al.*, 2001) conduit à l'existence de différences hautement significatives vis-à-vis des six composantes sélectionnées. Cette même conclusion a été retenue par application du test sur tous les groupes pris deux à deux.

Les groupes 3, 4, 5, 7 sont des bassins bordant les plateaux qui occupent le haut de la toposéquence sans jamais atteindre les bas fonds du Kori. Les bassins du groupe 3

**Tableau 1** Liste des variables retenues pour l'analyse en composantes principales et la classification en fonction des profils de pentes.

Variable	Description
$D_m$	distance maximale à l'exutoire
$D_a$	indice représentatif d'une compacité $D_a = \frac{D_m}{Aire} [L^{-1}]$
<i>pent</i>	pente moyenne
<i>alt</i>	altitude moyenne
$S_a$	pourcentage de surface occupée par la savane
$C_s$	pourcentage de surface occupée par la cuirasse latéritique
$C_u$	pourcentage de surface cultivée
$p_{0-10}$	pente moyenne calculée sur une surface à moins de 10% de $D_m$
$p_{10-25}$	pente moyenne calculée sur une surface de 10 à 25% de $D_m$
$p_{25-50}$	pente moyenne calculée sur une surface de 25 à 50% de $D_m$
$p_{50-75}$	pente moyenne calculée sur une surface de 50 à 75% de $D_m$
$p_{75-100}$	pente moyenne calculée sur une surface supérieure à 75% de $D_m$

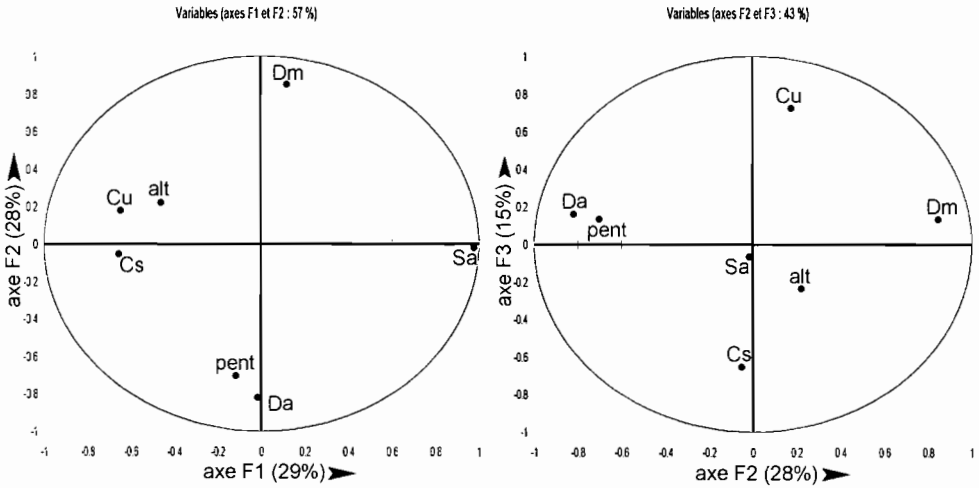


Fig. 2 Cercle des corrélations des axes F1, F2 et F2, F3 de l'ACP sur les sept variables physiomorphologiques des 195 bassins versants.

ont des surfaces cuirassées en proportion importante, tandis que ceux du groupe 4 ont des pentes fortes et une proportion de savane élevée. Les bassins du groupe 7 ont des pentes globalement plus faibles et des altitudes plus élevées, ceux du groupe 5 sont fortement mis en culture. Les groupes 1, 2, et 8 sont des bassins d'altitude intermédiaire dont l'exutoire peut se situer en fond de vallée. Le groupe 1 caractérise les bassins très réduits de pente forte à l'instar du groupe 2 qui se distingue par une forte proportion de surface cuirassée au détriment des surfaces cultivées. Les bassins des groupes 6 et 8 sont analogues à ceux du groupe 7, mais à basse altitude et avec de fortes mises en culture pour le groupe 6. Enfin, les vastes bassins souvent très plats se rassemblent au sein du groupe 9.

Nous avons remarqué qu'une CAH sur les profils de pente (cinq dernières variables du Tableau 1) scinde clairement les bassins en ensembles homogènes. L'impact de la pente sur le ruissellement semble important dans notre zone, nous avons donc affiné la typologie en introduisant cette différenciation initialement négligée lors de la sélection

**Tableau 2** Intervalles des valeurs occupées par les variables physiomorphologiques pour les neuf groupes issus de la CAH.

	$D_m$ (m)	$D_a$ (m <sup>-1</sup> )	Pent (%)	alt (m)	$S_u$ (%)	$C_u$ (%)	$C_s$ (%)	Effectif
Groupe 1	1000–2200	0.4–0.6	1.5–2.5	220–250	40–70	20–40	0–20	10
Groupe 2	1000–4000	0.1–0.3	1–2	220–240	25–45	10–30	30–60	9
Groupe 3	1000–4500	0.05–0.25	1.5–2.5	240–255	25–50	20–40	20–35	32
Groupe 4	900–3500	0.1–0.25	2–3.5	230–245	50–70	15–40	0–10	25
Groupe 5	1200–3500	0.1–0.3	1.1–2.2	240–255	25–60	30–55	0–15	25
Groupe 6	1500–3500	0.15–0.35	1.3–2.2	210–230	40–70	25–50	0–20	19
Groupe 7	1000–3500	0.1–0.15	1–2.5	240–260	50–75	15–35	0–10	23
Groupe 8	1000–5000	0.05–0.3	1.1–1.8	220–240	55–75	10–30	0–20	30
Groupe 9	6500–12000	0.03–0.1	0.8–1.5	230–250	50–75	10–40	0–10	22

des sept variables pour l'ACP. Parmi les neuf groupes déjà formés sont distingués les bassins ayant une pente forte augmentant en fonction de la distance à l'exutoire (catégorie P1), une pente moyenne régulière (catégorie P2), et une pente très faible proche de l'exutoire et augmentant en s'en éloignant (catégorie P3), suivant ainsi une aptitude au ruissellement *a priori* décroissante. Ce croisement produit un total de 24 classes non vides.

## MODELISATION ET CONCLUSION

### Modélisation

Afin de valider la pertinence de la classification vis à vis de l'écoulement, nous avons choisi de modéliser, au sein des neuf groupes initiaux, un bassin parmi les deux catégories de pentes extrêmes représentées (Tableau 3).

Intégré au SIG GRASS, le modèle hydrologique r.water.fea (Vieux & Gaur, 1994) simule les écoulements à partir des données spatialement distribuées qui ont permis la discrimination des bassins. Il est appliqué dans un contexte similaire à celui du bassin versant de Wankama (inclus dans la zone d'étude) qui a servi de référence au calage et à la validation (Cappelaere *et al.*, 2003, Peugeot *et al.*, 2003). La pluie provient d'une chronique de hyétogrammes enregistrés à Wankama, comprenant 212 événements de 1992 à 2000. Les résultats des simulations sur les 18 bassins (Tableau 3) montrent globalement une diminution des coefficients de ruissellement moyens inter-annuels

**Tableau 3** Liste des bassins modélisés et des résultats des simulations.

Groupes issus de l'ACP	Catégorie de pente	Coefficient de ruissellement	Seuil d'apparition du ruissellement (en mm)	$D_m$ (m)	$D_a$ ( $m^{-1}$ )	Pent (%)	alt (m)	$S_a$ (%)	$C_u$ (%)	$C_s$ (%)
Groupe 1	P1	10%	12	1970	0.48	1.88	248	40	35	20
	P2	5%	20	2060	0.59	2.19	220	50	40	10
Groupe 2	P1	9%	20	2680	0.23	1.87	232	30	10	57
	P3	9%	20	3889	0.11	2.00	239	25	20	50
Groupe 3	P1	11%	13	2230	0.25	2.03	244	25	36	35
	P3	11%	14	1750	0.25	2.00	255	28	30	35
Groupe 4	P1	4%	20	2357	0.25	3.28	227	50	37	7
	P3	2%	40	1358	0.20	2.30	245	60	30	2
Groupe 5	P1	4%	28	1528	0.25	2.10	250	46	42	1
	P3	3%	28	2300	0.16	1.10	255	40	40	8
Groupe 6	P1	5%	25	3356	0.17	2.14	223	67	27	3
	P2	2%	28	1778	0.33	1.32	220	43	40	17
Groupe 7	P1	4%	28	1398	0.14	2.47	252	61	28	5
	P3	1%	42	3280	0.12	0.70	243	64	33	3
Groupe 8	P1	2%	28	3246	0.23	1.51	220	60	20	18
	P3	5%	20	1255	0.31	1.23	224	67	13	19
Groupe 9	P2	1%	41	7940	0.07	1.36	245	74	13	6
	P3	1%	41	9272	0.04	1.42	230	67	28	3

conforme aux estimations qualitatives de l'aptitude au ruissellement faites, *a priori*, lors de la classification. La modélisation hydrologique fait apparaître parmi les groupes, trois ensembles nettement différenciés ayant une aptitude au ruissellement forte (groupes 1, 2, 3), intermédiaire (groupes 4, 5, 6, 7, 8) et faible (groupe 9). L'analyse des seuils de ruissellement et des bilans évènementiels confirme les mêmes ensembles. Une simplification de la classification par des regroupements parmi les 24 classes pourrait être envisagée moyennant des tests plus conséquents en simulant plus de bassins. Globalement, la modélisation confirme le degré de différenciation, même au niveau des catégories de pente, et ne fait pas apparaître de redondance parmi les groupes. La classification peut ainsi s'avérer un outil essentiel à l'étude des ressources en eau de la région.

## CONCLUSION

L'analyse statistique des variables physiomorphologiques des bassins versants élémentaires permet d'établir de manière objective des ensembles homogènes significatifs. Ces ensembles sont représentatifs d'un comportement hydrologique spécifique vis à vis du ruissellement. Nous avons organisé notre démarche de classification en fonction des informations fournies par l'analyse statistique en association avec la signification hydrologique des variables.

En outre, la modélisation est globalement conforme aux résultats de la typologie et montre des classes très distantes dans lesquelles un rapprochement peut, *a posteriori*, être recherché. Des tests de sensibilité permettraient également de connaître l'importance relative des variables vis à vis du ruissellement. Néanmoins, un échantillon restreint de bassins types à été simulé (un bassin par classe de pente, soit 18 bassins sur 195) et une classification appliquée aux résultats des simulations de tous les bassins serait un meilleur indicateur de la validité de la classification pour les travaux à venir.

## REFERENCES

- Cappelaere, B., Vicux, B. E., Peugeot, C., Maia, A. & Seguis, L. (2003) Hydrologic process simulation of a semiarid, endoreic catchment in Sahelian West Niger, Africa: II. Model Calibration and Uncertainty Characterization. *J. Hydrol.* (soumis).
- Cappelaere, B., Elizondo, D. & Faure, Ch. (2002) Odyssée-versus hand-differentiation of a terrain-modeling application. In: *Automatic Differentiation: From Simulation to Optimization* (ed. by G. Corliss, C. Faure, A. Griewank, L. Hascoet & U. Naumann), 75–82, chapitre 7 de l'ouvrage collectif. Springer-Verlag, New York, USA.
- Casenave, A. & Valentin, C. (1992) Runoff capability classification system based on surface features criteria in semiarid areas of West Africa. *J. Hydrol.* **130**(1–4), 231–249.
- Desconnets, J. C., Vieux, B. E., Cappelaere, B. & Delclaux, F. (1996) A GIS for hydrological modelling in the semiarid, HAPEX-Sahel experiment area of Niger, Africa. *Trans. in GIS* **1**, 82–94.
- D'Herbès, J. M. & Valentin, C. (1997) Land surface conditions of the Niamey region; ecological and hydrological implications. *J. Hydrol.* **188–189**(1–4), 18–42.
- Lubès-Niel, H., Séguis, L. & Sabatier, R. (2001) Etude de stationnarité des caractéristiques des évènements pluvieux de la station de Niamey sur la période 1956–1998. *C. R. Acad. Sci., Paris* **333**, 645–650.
- Peugeot, C., Cappelaere, B., Vieux, B. E., Seguis, L. & Maia, A. (2003) Hydrologic process simulation of a semiarid, endoreic catchment in Sahelian West Niger, Africa: I. Model-aided data analysis and scening. *J. Hydrol.* (soumis).

IAHS Publication no. 278  
ISSN 0144-7815



# Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions

*Edited by*

*Eric Servat, Wajdi Najem, Christian Leduc  
& Ahmed Shakeel*





# Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions

Edited by

**ERIC SERVAT**

*IRD, UMR HydroSciences Montpellier (CNRS, UM2, IRD, UMI), Maison des Sciences de l'Eau, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France*

**WAJDI NAJEM**

*ESIB, Faculté d'Ingénierie de l'Université Saint-Joseph, BP 1514, Beyrouth, Liban*

**CHRISTIAN LEDUC**

*IRD, UMR HydroSciences Montpellier (CNRS, UM2, IRD, UMI), Maison des Sciences de l'Eau, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France*

**AHMED SHAKEEL**

*Indo-French Centre for Groundwater Research, National Geophysical Research Institute, Uppal Road, Hyderabad 500 007, India*

Papers selected for the international conference on:

**Hydrology of the Mediterranean and Semi-Arid Regions**

held in Montpellier, France, from 1 to 4 April 2003.

This conference was jointly convened by:

UNESCO (United Nations Educational and Cultural Organization)

IAHS (International Association of Hydrological Sciences)

WMO (World Meteorological Organization)

FRIEND AMHY (Flow Regimes from International Experimental and Network Data, Alpine and Mediterranean Region)

IFR ILEE (Institut Fédératif de Recherche, Institut Languedocien de Recherche sur l'Eau et l'Environnement)



**Published by the International Association of  
Hydrological Sciences 2003**

IAHS Press, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford,  
Oxfordshire OX10 8BB, UK

**IAHS Publication no. 278**

**ISBN 1-901502-12-0**

British Library Cataloguing-in-Publication Data.  
A catalogue record for this book is available from the British Library.

© IAHS Press 2003

This publication may be reproduced as hard copy, in whole or in part, for educational or nonprofit uses, without special permission from the copyright holder, provided acknowledgement of the source is made. As a courtesy the authors should be informed of any use made of their work. No use of this publication may be made for electronic publishing, resale or other commercial purposes without the prior written permission of IAHS Press.

The papers included in this volume have been peer reviewed and some were extensively revised before publication.

**IAHS is indebted to the employers of the Editors for the invaluable support and services provided that enabled them to carry out their task effectively and efficiently.**

The designations employed and the presentation of material throughout the publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of IAHS concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

The use of trade, firm, or corporate names in the publication is for the information and convenience of the reader. Such use does not constitute an official endorsement or approval by IAHS of any product or service to the exclusion of others that may be suitable.

The papers were checked, formatted and assembled by Cate Gardner and Penny Farnell at IAHS Press, Wallingford, UK.

Publications in the series of Proceedings and Reports are available *only* from:  
**IAHS Press, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford,  
Oxfordshire OX10 8BB, UK**

tel.: +44 1491 692442; fax: +44 1491 692448; e-mail: [jilly@iahs.demon.co.uk](mailto:jilly@iahs.demon.co.uk)