



HAL
open science

Réponse hydrologique d'un bassin semi-aride aux événements pluviométriques et aménagements de versant (bassin du Merguellil, Tunisie centrale)

Andrew Ogilvie, Patrick Le Goulven, Christian Leduc, Roger Calvez, Mark Mulligan

► To cite this version:

Andrew Ogilvie, Patrick Le Goulven, Christian Leduc, Roger Calvez, Mark Mulligan. Réponse hydrologique d'un bassin semi-aride aux événements pluviométriques et aménagements de versant (bassin du Merguellil, Tunisie centrale). *Hydrological Sciences Journal*, 2016, 61 (2), pp.441 - 453. 10.1080/02626667.2014.934249 . hal-04521348

HAL Id: hal-04521348

<https://hal.science/hal-04521348>

Submitted on 26 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

This article was downloaded by: [IRD Documentation]

On: 17 June 2014, At: 01:26

Publisher: Taylor & Francis

Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



Hydrological Sciences Journal

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.tandfonline.com/loi/thsj20>

Réponse hydrologique d'un bassin semi-aride aux événements pluviométriques et aménagements de versant (bassin du Merguellil, Tunisie centrale) / Hydrological response of a semi-arid catchment to rainfall events and water & soil conservation works (Merguellil catchment, Central Tunisia)

Andrew Ogilvie^{ab}, Patrick Le Goulven^a, Christian Leduc^a, Roger Calvez^a & Mark Mulligan^b

^a Institut de Recherche pour le Développement, UMR G-eau, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5, France

^b Department of Geography, King's College London, Strand, Londres, WC2R 2LS, Royaume Uni

Accepted author version posted online: 12 Jun 2014.

To cite this article: Andrew Ogilvie, Patrick Le Goulven, Christian Leduc, Roger Calvez & Mark Mulligan (2014): Réponse hydrologique d'un bassin semi-aride aux événements pluviométriques et aménagements de versant (bassin du Merguellil, Tunisie centrale) / Hydrological response of a semi-arid catchment to rainfall events and water & soil conservation works (Merguellil catchment, Central Tunisia), *Hydrological Sciences Journal*, DOI: [10.1080/02626667.2014.934249](https://doi.org/10.1080/02626667.2014.934249)

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2014.934249>

Disclaimer: This is a version of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to authors and researchers we are providing this version of the accepted manuscript (AM). Copyediting, typesetting, and review of the resulting proof will be undertaken on this manuscript before final publication of the Version of Record (VoR). During production and pre-press, errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal relate to this version also.

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Taylor & Francis makes every effort to ensure the accuracy of all the information (the "Content") contained in the publications on our platform. However, Taylor & Francis, our agents, and our licensors make no representations or warranties whatsoever as to the accuracy, completeness, or suitability for any purpose of the Content. Any opinions and views expressed in this publication are the opinions and views of the authors, and are not the views of or endorsed by Taylor & Francis. The accuracy of the Content should not be relied upon and should be independently verified with primary sources of information. Taylor and Francis shall not be liable for any losses, actions, claims, proceedings, demands, costs, expenses, damages, and other liabilities whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with, in relation to or arising out of the use of the Content.

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. Terms & Conditions of access and use can be found at <http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions>

Publisher: Taylor & Francis & IAHS Press

Journal: *Hydrological Sciences Journal*

DOI: 10.1080/02626667.2014.934249

Réponse hydrologique d'un bassin semi-aride aux événements pluviométriques et aménagements de versant (bassin du Merguellil, Tunisie centrale)

Hydrological response of a semi-arid catchment to rainfall events and water & soil conservation works (Merguellil catchment, Central Tunisia)

Andrew Ogilvie^{1,2}, Patrick Le Goulven¹, Christian Leduc¹, Roger Calvez¹ et Mark Mulligan².

¹ *Institut de Recherche pour le Développement, UMR G-eau, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5, France.*
Andrew.ogilvie@ird.fr; Patrick.legoulven@ird.fr; Christian.leduc@ird.fr; Roger.calvez@ird.fr;
Mark.mulligan@kcl.ac.uk;

² *Department of Geography, King's College London, Strand, Londres, WC2R 2LS, Royaume Uni*

Résumé L'influence cumulée des aménagements de versants sur les écoulements en zones semi-arides demeure peu étudiée et comprise à l'échelle de grands bassins versants. En Tunisie centrale, nous étudions les variations de la réponse hydrologique du bassin du Merguellil à l'échelle annuelle et pour 114 événements entre 1989 et 2010. Sur cette période, les aménagements de conservation des eaux et des sols ont progressivement drainé de 5% à 30% des surfaces du bassin. L'analyse statistique révèle la forte variabilité des pluies et des débits annuels, mais ne distingue aucune tendance déficitaire. L'approche événementielle démontre que les variations des écoulements annuels sont liées aux apports générés par un nombre très limité (5 à 6 par an en moyenne) d'épisodes pluvieux supérieurs à 15 mm. Le nombre très variable de ces événements ainsi que les écarts importants observés sur leur coefficient de ruissellement (K_R) respectif sont déterminants sur les apports annuels. Pour les événements de plus de 60 mm, les différences d'intensités pluviométriques, de couvert végétal et d'humidité du sol réduisent le ruissellement jusqu'à 80%. Toutefois, les K_R d'averses de moins de 40 mm, sur des sols au couvert végétal et d'humidité semblables, ont également diminué de 45% après l'extension des aménagements de CES à la fin des années 1990.

Mots clés : conservation des eaux et des sols, coefficient de ruissellement, variabilité pluviométrique, influence anthropique, bassin semi-aride, approche événementielle

Abstract The cumulative influence of water and soil conservation works (WSCW) on runoff in large semi-arid catchments remains poorly understood. In the Merguellil basin, in Central Tunisia, where WSCW now drain over 30% of the surface area, changes in the hydrological response were studied annually and over 114 rainfall events during the 1989-2010 period. At the annual scale, statistical analyses highlighted strong rainfall and runoff variability but did not indicate a downward trend. Annual variations in downstream flows were closely linked to the runoff generated by a small number of rainfall events over 15 mm (5 to 6 per year). Changes in the number of these events but also large variations in their runoff coefficient (K_R) had a determining influence over annual runoff. Differences in rainfall intensity, land cover and antecedent soil moisture reduced runoff from rainfall events over 60 mm by up to 80%. Nevertheless, the runoff coefficients of rainfall events below 40 mm, occurring in similar land cover and soil moisture conditions, also decreased by 45% following the increase in WSCW in the late 1990s.

Key words: water and soil conservation works, runoff coefficients, rainfall variability, human influence, semi-arid basin, event scale

INTRODUCTION

Les aménagements de conservation des eaux et des sols (CES) connaissent depuis plusieurs décennies une forte expansion, favorisée par le soutien de projets gouvernementaux et internationaux en zones semi-arides, notamment au Brésil (Burte 2008), au Mexique (Avalos 2004), en Inde (Bouma *et al.* 2011), et en Afrique du Nord et subsaharienne (Talineau *et al.* 1994, Sawunyama *et al.* 2006, Nyssen *et al.* 2010). La construction de banquettes doit freiner et retenir l'érosion des versants tandis que celle de retenues collinaires doit stocker les sédiments et réduire l'envasement d'ouvrages stratégiques en aval. En parallèle, ces aménagements permettent de mobiliser des ressources en eau pour les usagers à l'amont, et peuvent parfois favoriser la recharge de nappes. Ils viennent en complément des techniques traditionnelles de gestion et conservation des eaux et des sols connues dès l'antiquité (Roose 1991).

A l'échelle locale, de nombreuses études réalisées à partir de mesures hydrologiques et d'analyses géochimiques ont permis d'évaluer le bilan hydrique et l'influence des retenues collinaires et des banquettes, notamment en Tunisie (Gay 2004, Grunberger *et al.* 2004, Al Ali *et al.* 2008), Inde (Li et Gowing 2005), Ethiopie (Nyssen *et al.* 2010) et Palestine (Al-Seekh et Mohammad 2009). Ces ouvrages ont dans leur environnement immédiat des conséquences sur la redistribution des ressources hydriques, réduisant jusque 80% les écoulements sur des bassins de quelques dizaines d'hectares (Al-Seekh et Mohammad 2009, Nyssen *et al.* 2010). Dans des bassins versants de plus de 100 km² leur influence cumulée demeure cependant peu étudiée et comprise (Kongo et Jewitt 2006, Lacombe *et al.* 2008). La complexité de l'analyse réside dans la difficulté à différencier l'effet de ces ouvrages des autres processus simultanés, interférents, eux mêmes variables dans le temps et l'espace (pluie, occupation du sol, etc.) (Cudennec *et al.* 2004, 2007) et qui influencent aussi la réponse hydrologique d'un bassin versant. Parmi ces facteurs on distingue notamment la pluviométrie, l'humidité initiale du sol, l'occupation du sol, les états de sols et du couvert végétal et les aménagements (prélèvements, barrages, etc.) (Lacombe *et al.* 2008). L'étude de leur influence repose principalement sur des approches de modélisation du bassin entier (Cudennec *et al.* 2004, Kingumbi *et al.* 2007, Lacombe *et al.* 2008) ou l'étude des variations des coefficients de ruissellement (He *et al.* 2003, Lacombe 2007, Gao *et al.* 2011), et s'apparente notamment à l'étude de l'influence à cette échelle de changements d'occupation du sols (Peña-Arancibia *et al.* 2012). Sur la partie centrale du bassin du fleuve Jaune, des études montrent une réduction des écoulements variant de 6% (Gao *et al.* 2011) à près de 50% (He *et al.* 2003) suite aux aménagements de CES. De la même manière, dans le bassin du Merguellil, en Tunisie Centrale, des études basées sur différentes méthodes ont évalué l'influence cumulée des aménagements de CES entre 1% et 50% sur les même périodes (Dridi 2000, Kingumbi 2006, Lacombe 2007). Ces résultats témoignent de la complexité à représenter et évaluer l'influence des ouvrages de CES à cette échelle.

Cette étude sur le bassin du Merguellil vise d'abord au travers d'une analyse statistique à identifier la présence de tendances dans les chroniques de débits et de pluies sur plus de 45 ans. Les facteurs climatiques permettant d'expliquer les variations des écoulements sont étudiés aux échelles annuelle puis événementielle, afin de mieux tenir compte du régime pluviométrique en zone semi-aride. L'approche événementielle se concentre sur 114 épisodes pluvieux sur la période 1989-2010, concomitante à l'aménagement des CES. L'analyse multicritères des coefficients de ruissellement des événements traités permet d'étudier l'influence du cumul et de l'intensité pluviométrique et des états de sol (couverture du sol et humidité antérieure) dans l'objectif de distinguer leurs effets sur la fonction de production d'un bassin versant. L'influence des CES est recherchée dans les éventuelles anomalies de la réponse hydrologique du bassin versant.

MATERIELS ET METHODES

Site d'étude et aménagements

Le site d'étude est le bassin amont du Merguellil en Tunisie Centrale, d'une superficie de 1183 km² et délimité à l'aval par le barrage El Haouareb construit en 1989 (Fig. 1). L'altitude varie entre 200 m et 1200 m, pour une altitude moyenne de 500 m. Situé en zone semi-aride, les précipitations annuelles sont faibles (265 mm dans la plaine et 515 mm à l'amont) (Leduc *et al.* 2007) et caractérisées par des événements intenses, surtout au printemps et à l'automne, qui entraînent la crue des oueds. Les écoulements intermittents de l'Oued Merguellil approvisionnent le barrage El Haouareb qui, lui-même, alimente la nappe de la plaine de Kairouan à l'aval fortement exploitée pour l'agriculture irriguée et l'alimentation en eau potable. La température moyenne est de 19,2 °C (10,7 °C en janvier et 28,6 °C en août) (Zribi *et al.* 2011) et l'évapotranspiration potentielle atteint 1600 mm/an.

Les ouvrages de CES ont été réalisés dès les années 1960, dans le cadre d'un grand programme d'aménagements de CES le long de la Dorsale tunisienne (chaîne montagneuse NE-SW) prévoyant la construction de plus de 850 retenues collinaires et l'aménagement de 1M d'ha par des banquettes anti-érosives (Nasri 2007). Dans le bassin du Merguellil, ces structures contrôlent actuellement plus de 30% de la superficie du bassin versant. On dénombre 50 retenues qui drainent 20% de la superficie du bassin, pour une capacité cumulée de 5,8 hm³, dont 30 construites après 1989 lorsque le développement des CES a connu une rapide expansion (Lacombe *et al.* 2008). Les banquettes, d'une capacité linéaire moyenne de 85 mm par mètre linéaire couvrent 23% du bassin (Dridi 2000). Ces aménagements avaient été recensés à partir d'images satellites SPOT 2,5 m et 10 m de 2003 et des données de la Direction Générale des Ressources en Eau (Ben Mansour 2000, Lacombe 2007). Des visites de terrain ont permis la mise à jour de ces inventaires, et la prise en compte de l'envasement actuel de retenues. Ces ouvrages perdent chaque année une part de leur capacité par envasement ; en moyenne 4,6% par an pour les réservoirs (Ben Mammou et Louati 2007) et 3% par an pour les banquettes (Baccari *et al.* 2008), mais ces valeurs varient fortement dans le temps et l'espace en fonction du nombre et de l'importance des épisodes pluvieux subis.

La céréaliculture et l'arboriculture dominent les usages agricoles dans le bassin (Dridi 2000) : 50% du bassin est cultivé en céréales pérennes (blé), oliviers et amandiers. Le reste des superficies est composé de terres de parcours (30%), forêt (19% surtout à l'amont) et 1% de bâtis (Lacombe *et al.* 2008). Les terres irriguées sont estimées à 3500 ha, et exploitent quasi exclusivement les ressources souterraines de plusieurs nappes en accès libre (Le Goulven *et al.* 2009). On recense 4 entités hydrogéologiques principales interconnectées, couvrant environ 600 km² et contenues dans des formations géologiques qui vont du Trias au Quaternaire (Kingumbi 2006). Le suivi piézométrique depuis plus de 40 ans a permis de mettre en évidence une baisse piézométrique de 0,25 m à 1 m par an sur la période 1978-1989 dans la nappe oligocène de Bou Hafna, conséquence des nombreux prélèvements (Kingumbi 2006). Les relations eaux de surface-eaux souterraines dans le bassin amont sont peu connues mais des échanges dans les deux directions ont été observés : recharge des nappes par les crues et soutien des nappes aux débits de base. L'écoulement de base est estimé à environ 1/8 des écoulements annuels au barrage (Leduc *et al.* 2007).

INSERT FIGURE 1 AROUND HERE

Données et analyses

Ce site bénéficie d'un vaste réseau de mesures hydrologiques et climatiques depuis plus de 45 ans, géré et entretenu par la Direction Générale des Ressources en Eau et les Commissariats Régionaux au Développement Agricole (Ministère de l'Agriculture tunisien).

Donnés pluviométriques

Le réseau de suivi pluviométrique est composé de plus de 80 pluviomètres dont 13 pluviographes à augets basculeurs situés à l'intérieur et aux abords du bassin. Les chroniques sont lacunaires et certaines stations ne sont plus en activité, mais elles remontent jusque 1888 pour la plus ancienne (Makhtar). Pour notre étude pluviométrique, nous avons exploité les données journalières sur la période 1902-2010 durant laquelle entre 3 et 80 stations disposent de données.

Ces données ont été nettoyées des erreurs systématiques, notamment de calibrages, codages et retranscription, puis contrôlées par la méthode des doubles masses (double cumul) (Brunet-Moret 1971). Cette méthode se base sur le principe de pseudo-proportionnalité entre les données de 2 pluviomètres voisins pour vérifier leur homogénéité (Kingumbi 2006). Nous procédons ensuite à l'interpolation spatiale des précipitations sur la surface du bassin, par la méthode de pondération inverse à la distance. Cette méthode robuste et répandue possède l'avantage sur le krigeage que les facteurs de pondération sont invariants au cours du temps, ce qui réduit le temps de calcul lors de l'estimation de précipitations journalières sur 50 années. Le module SPATIAL du logiciel HydrAccess a été utilisé ici. Malgré le caractère anisotrope du milieu, la répartition homogène des postes pluviométriques intègre implicitement l'influence du gradient altitudinal sur les précipitations (Feki *et al.* 2012) pour la période 1960-2010. Sur la première partie du 20^e siècle, le faible nombre de stations pluviométriques en activité et leur distribution hétérogène pourrait introduire un biais dans l'interpolation. L'étude des chroniques avant 1960 a donc été réalisée sur les 18 stations en activité et non sur la pluie interpolée sur le bassin entier. Ceci permet également de mettre en avant les différences et extrêmes locaux qui sont lissées par l'interpolation.

Les chroniques de données ont été étudiées à partir du calcul de statistiques (moyennes, écart type, données centrées réduites) puis soumises à des tests de détection de rupture dont les tests de Pettitt et Buishand (Pettitt 1979, Lubes-Niel *et al.* 1998) et la segmentation de Hubert (Hubert *et al.* 1989). Les tests non paramétriques de Mann-Kendall et de la pente de Sen (Yue *et al.* 2002) sont utilisés en complément pour déceler et quantifier la pente d'une éventuelle tendance linéaire sur les données climatiques. Ces tests statistiques ne sont pas utilisés pour détecter les erreurs de mesures car ils amalgament erreurs systématiques et variations interannuelles de la pluie. La méthode du vecteur régional pourrait être appliquée ici pour réduire les problèmes d'homogénéisation des données. Les tests de tendance sont réalisés sur le cumul de pluie annuel, sur le nombre de jours de pluie (> 2mm), et sur le nombre d'événements intenses > 20 mm/jour et > 30 mm/jour. Les logiciels Khronostat (IRD 1998) et Makesens (Salmi *et al.* 2002) ont été exploités pour effectuer ces tests.

Donnés hydrologiques

Pour des raisons logistiques, notamment la largeur du cours d'eau et les apports souterrains, aucune station hydrométrique ne mesure les débits à l'exutoire du bassin amont, qui correspond à l'entrée du barrage El Haouareb. Les stations les plus proches en activité sont celles de Haffouz qui collecte les écoulements sur 675 km² et qui peut être combinée avec les données de la station de Zebbes (sous-bassin de l'Oued Zebbes, 180 km²). Cependant ces deux stations ne permettent pas de prendre en compte les apports des oueds Ben Zitoune et Hammam, petits bassins versants de 90 km² situés à l'aval captant les écoulements sur le Mont Trozza. De plus, ces stations souffrent de problèmes de fiabilité et représentativité, à cause de l'absence de seuils stables et des faibles écoulements qui passent à côté des stations de mesure.

Les écoulements à l'exutoire ont donc été calculés par un bilan hydrique au barrage El Haouareb à partir des cotes journalières, des mesures de pluie, d'évaporation et des estimations sur les éventuels prélèvements, vidanges et lâchers. Les cotes sont converties en surface et volume à l'aide de courbes d'étalonnage qui ont été revues suite aux nivellements successifs de 1989, 1994, 1997 et 2006. L'infiltration journalière varie entre 5 mm et 12 mm, en fonction de la cote du barrage mais également du colmatage progressif du fond de la retenue (Alazard *et al.* 2011). Malgré des améliorations successives dans l'estimation des flux du bilan du barrage (Kingumbi 2006, Alazard *et al.* 2011), l'estimation des apports par clôture du bilan introduit plusieurs sources d'erreur, notamment sur la courbe d'étalonnage et les incertitudes sur les autres flux (évaporation et échanges souterrains). Les apports ont été calculés depuis la mise en eau du barrage en 1989 jusqu'à 2010. En l'absence de mesures au site d'El Haouareb avant 1989, les chroniques de la station d'Haffouz sur la période 1966 à 2010 (Bouzaiane et Laforgue 1986) ont été comparées pour étudier l'évolution des apports sur le plus long terme. Les données de Haffouz sont en partie corrélées avec les données d'El Haouareb ($R^2 = 0,6$). En complément, les quelques années d'observations sur la période 1974-1982 à Sidi Boujdaria, 4,5km à l'amont du barrage, ont été comparées avec les valeurs estimées par Nazoumou (2002) à la même station sur 1989-1998. L'année hydrologique qui s'étend de septembre à août a été utilisée pour l'étude annuelle. Les données hydrométriques ont été soumises aux mêmes tests statistiques que les données de pluie.

Coefficients de ruissellement (K_R)

A partir des données d'écoulement à l'exutoire et des pluies interpolées sur le bassin, nous avons calculé la lame d'eau ruisselée (mm) et la hauteur d'eau précipitée (mm) sur ce bassin de 1183 km². Les coefficients de ruissellement sont calculés par le rapport entre la lame d'eau ruisselée et la hauteur d'eau précipitée et exprimés ici en pourcentage. Après une analyse des corrélations entre apports et pluies aux pas de temps annuel et mensuel, l'étude s'est centrée sur 114 épisodes pluvieux de plus de 15 mm recensés sur la période 1989-2010. Les événements de faible importance ont été écartés car, d'une part, les erreurs sur la courbe d'étalonnage, l'évaporation et l'infiltration sont proportionnellement plus fortes sur ces petits apports et d'autre part, les événements plus importants sont déterminants pour le cumul annuel des écoulements. Le seuil de 15 mm a été choisi après analyse de tous les événements sur la période 1989-2010 et correspond en moyenne à la pluviométrie minimale pour observer un écoulement notable (supérieur à 100 000 m³). La bonne corrélation ($R^2 = 0,95$) obtenue entre les apports générés par les épisodes pluvieux de plus de 15 mm et les apports annuels (Fig. 2) indique que ces événements contribuent de façon déterminante aux écoulements annuels et justifie que l'étude se concentre sur ces 114 événements. Les pluies et débits pour les épisodes pluvieux de plus de 15 mm ont été cumulés sur les jours successifs où l'écoulement était supérieur aux débits de base, qui rejoignent ici rapidement des valeurs de l'ordre de 1 m³/s. Ceci permet de tenir compte du délai à cette échelle entre une pluie à l'amont et l'apport au barrage, et des difficultés à différencier par jour de pluie l'apport pour des événements qui s'étendent sur 2 et 3 jours consécutifs.

INSERT FIGURE 2 AROUND HERE

Ces 114 événements ont été analysés et regroupés en plusieurs classes sur la base de quatre critères, sélectionnés pour leur impact (de 1^{er} ou de 2^e ordre) sur la réponse hydrologique d'un bassin versant semi-aride. Ces paramètres sont le cumul pluviométrique, l'intensité en 24 h, la couverture du sol et le niveau de saturation hydrique. D'autres variables influent sur la genèse des écoulements, notamment l'étendue spatiale des pluies (superficie et localisation) et l'intensité horaire, mais peu de stations pluviométriques sur le bassin

disposent de pluviographes pour la mesure des intensités. La couverture du sol a été évaluée ici sur la base de valeurs d'indice de végétation par différence normalisé (NDVI) (Rouse *et al.* 1973) afin de différencier entre les événements de mai à octobre aux sols peu couverts et les événements de novembre à avril qui surviennent lorsque le couvert végétal est plus important. Les moyennes mensuelles de NDVI pour le bassin sur la période 1989-2006 ont été calculées à partir des données bimensuelles pour des pixels de 8 km (Tucker *et al.* 2005) fournies par le Global Inventory Modeling and Mapping Studies. Une indication du degré de saturation hydrique est fournie par la différence entre le cumul de pluie sur les 20 jours précédant l'événement et l'évapotranspiration potentielle sur la même période. Des mesures journalières d'évaporation sur un bac Colorado situé au barrage El Haouareb ont été utilisées pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle. L'étude a ensuite porté sur l'influence de ces paramètres sur les variations des K_R au travers de statistiques descriptives (moyenne, écart type, médiane, etc), tests de corrélations et régressions pas à pas pour différentes classes d'événements. Les corrélations sont évaluées à l'aide du coefficient de Spearman (r_s), qui permet de détecter tout type de relation monotone (linéaire, puissance, exponentielle, etc.). La régression pas à pas est une méthode itérative permettant d'identifier les variables explicatives pour modéliser les variations de K_R . Les disparités interannuelles des apports au barrage ont ensuite été interprétées sur la base du nombre d'événements et de ces paramètres. Enfin, l'influence des ouvrages de CES a été recherchée parmi les anomalies de K_R pour des classes d'événements comparables.

RESULTATS ET DISCUSSION

Evolution des écoulements annuels

Sur la période 1989-2010, les apports annuels au barrage El Haouareb se caractérisent par une alternance d'années excédentaires et déficitaires (Fig. 3) par rapport à la moyenne des apports annuels de $16,5 \text{ hm}^3$. L'écart type de $9,4 \text{ hm}^3/\text{an}$ et le coefficient de variation de 0,6 illustrent cette forte variabilité interannuelle. Cinq années déficitaires dont 4 consécutives sont recensées entre 1996-1997 et 2001-2002, mais les tests statistiques de Pettitt, Buishand, Hubert, Mann-Kendall et Sen ne détectent aucune rupture ou tendance dans l'évolution des écoulements annuels. Sur la période 1989-1998, la moyenne interannuelle calculée ici est 10% inférieure aux résultats précédents (Kingumbi 2006, Lacombe 2007) due à une différence de méthode, notamment l'estimation des prélèvements et de l'infiltration. Les années déficitaires entre 1998 et 2002 ont également réduit de 15% supplémentaires la moyenne interannuelle sur 1989-2010 par rapport aux calculs précédents sur 1989-1998.

Sur la période 1966-2010, les chroniques de la station de Haffouz confirment la forte variabilité interannuelle, avec une moyenne de $21,5 \text{ hm}^3$ et un écart type de $22,5 \text{ hm}^3$. L'ampleur de cet écart type peut en partie s'expliquer par les problèmes significatifs de fiabilité à cette station hydrométrique et des changements d'instrumentation. Sur la période 1989-2010 la moyenne interannuelle atteint $19,5 \text{ hm}^3$, et est supérieure ou inférieure à la moyenne des apports sur la période antérieure à 1989 selon que l'on prenne en compte l'année exceptionnelle 1969-1970 et les années fortement déficitaires de 1966 à 1969. Ainsi sur 1969-1989 la moyenne atteint $26,4 \text{ hm}^3$ tandis que sur 1966-1989 sans prendre en compte l'année 1969-1970 la moyenne est de $18,8 \text{ hm}^3$. Ces résultats démontrent la difficulté à comparer les tendances entre deux périodes dans des conditions d'extrême variabilité interannuelle. Les tests statistiques appliqués ne démontrent toutefois aucune tendance sur les écoulements annuels sur le long terme. Des études précédentes (Dridi 2000, Kingumbi 2006) avaient identifié une baisse de 40% sur le module annuel 1989-1998 au barrage El Haouareb par rapport aux chroniques antérieures ($32 \text{ hm}^3/\text{an}$ pour 1974-1982) mesurées à Sidi Boujdaria, 4,5km à l'amont (Bouzaiane et Laforgue 1986). L'absence de mesures aux deux stations sur

les mêmes périodes ainsi que la forte infiltration entre ces deux points de mesure complique cependant toute comparaison. L'évaluation par Nazoumou (2002) des écoulements à Sidi Boujdaria sur 1989-1998 (35 hm³/an) à partir d'estimation d'infiltration tendrait même à montrer une augmentation des écoulements annuels de 8% après 1989.

INSERT FIGURE 3 AROUND HERE

Influence climatique sur les apports annuels

Evolution des précipitations annuelles

L'analyse pluviométrique a révélé une forte variabilité naturelle (Fig. 4), avec une moyenne de pluie annuelle sur le bassin amont de 329 mm pour la période de 1960-2010, et un écart type important de 131 mm, soit un coefficient de variation proche de 0,4. La pluviométrie de 1969-1970 fut exceptionnelle et atteignit 1000 mm, suite à de violents orages en septembre et octobre 1969 (Camus 1985). Une succession d'années déficitaires est recensée entre 1976-1977 et 1988-1989, notamment liée à la réduction des événements de plus de 30 mm (Kingumbi *et al.* 2005). Cependant les tests statistiques de Pettitt, Buishand, Hubert, Mann Kendall et Sen indiquent avec 99% de confiance qu'aucune tendance déficitaire sur la pluviométrie moyenne n'est observée. Les données récentes indiquent une période excédentaire sur 5 années consécutives de 2002-2003 à 2006-2007 et confortent les résultats antérieurs qui concluaient sur une absence de baisse des précipitations sur le bassin et à l'échelle de la Tunisie (Sakiss *et al.* 1994, Zahar 1997, Benzarti et Habaieb 2001, Kingumbi *et al.* 2005, Lacombe 2007, Slimani *et al.* 2007, Proaño 2012). L'analyse par les mêmes tests statistiques de l'évolution du nombre d'épisodes pluvieux de plus de 20 mm et 30 mm par jour sur les pluies interpolées dans le bassin a aussi révélé l'absence de tendance statistiquement significative, en accord avec les études précédentes (Kingumbi *et al.* 2005, Proaño 2012).

Sur une période plus longue (1902-2010) la moyenne interannuelle atteint 367 mm et l'écart type 140 mm, confirmant que la période étudiée (1960-2010) est représentative du régime pluviométrique observée sur le long terme. La moyenne est supérieure de 10% à celle sur 1960-2010 mais ceci résulte du biais introduit par le faible nombre de stations en activité au début du 20^e siècle et leur surreprésentation dans les parties hautes et plus pluvieuses du bassin. L'étude des tendances sur les 18 stations aux chroniques les plus longues indique en effet pour 16 stations aucune rupture sur la moyenne pluviométrique. Toutefois, on note que deux stations (Ben Nessim et Garrat) situées au sud du bassin indiquent une baisse du cumul de pluie de 25% sur 1915-2010 et 1929-2010 respectivement. Aucune tendance ne fut observée sur les nombres de jours de pluie et d'événements > 20 mm/jour et > 30 mm/jour.

INSERT FIGURE 4 AROUND HERE

Relation entre précipitations annuelles et écoulements annuels

La comparaison de l'évolution des écoulements à l'exutoire du bassin amont du Merguellil et des valeurs de précipitations annuelles interpolées sur le bassin a révélé une faible relation entre ces deux variables (Fig. 5). La légère corrélation obtenue ($R^2 = 0,66$) indique une tendance à l'augmentation des écoulements les années excédentaires, mais l'écoulement n'est pas directement lié au volume annuel de pluie. Une corrélation faible entre ces deux variables à cette échelle de temps et d'espace n'est pas surprenante dans une zone semi-aride où les écoulements sont événementiels et est cohérente avec les résultats antérieurs, qui concluent que les variations du cumul pluviométrique ne peuvent à elles seules expliquer la diminution des ressources hydriques (Kingumbi 2006, Leduc *et al.* 2007). A l'échelle mensuelle, la

corrélation bien que supérieure, témoigne également des fortes disparités observées sur les apports à El Haouareb pour un volume de pluie mensuel semblable (Fig. 5).

INSERT FIGURE 5 AROUND HERE

Influence des événements

La corrélation entre la pluviométrie et les apports au barrage au pas de temps annuel mais également mensuel ne permettant pas d'expliquer les variations interannuelles des écoulements, l'analyse s'est focalisée sur les événements pluvieux de plus de 15 mm. Ceux-ci contribuent à plus de deux tiers en moyenne des débits annuels (Fig. 2) et la bonne corrélation ($R^2 = 0,95$) entre les apports générés par les épisodes pluvieux de plus de 15 mm et les apports annuels indiquent que ces événements sont déterminants sur le module annuel.

L'étude des 114 événements a révélé une forte hétérogénéité de leur cumul pluviométrique et de leur nombre qui oscille entre 1 (2007 et 2009) et 10 (1989) par an. Sur la période 1989-2010, on dénombre en moyenne seulement 5,4 épisodes par an de plus de 15 mm. Sur les années excédentaires, un seul événement extrême peut même générer un apport dépassant 10 hm^3 , soit plus de 50% des apports moyens interannuels (Fig. 6). Ce caractère événementiel est cohérent avec les observations précédentes en zone semi-aride (Cudennec *et al.* 2005) et confirme la nécessité de raisonner sur les événements.

INSERT FIGURE 6 AROUND HERE

A l'inverse du cumul pluviométrique annuel, le nombre d'événements est un facteur déterminant du module annuel à El Haouareb, puisqu'une année d'apport excédentaire comportera en moyenne 7,1 événements de plus de 15 mm contre seulement 3,6 pour les années déficitaires. La quantité de ces événements annuels permet d'expliquer de nombreuses variations observées et notamment la baisse des apports durant les années 1997-2002 (Fig. 7). Néanmoins, la corrélation n'est pas satisfaisante sur certaines années, notamment 1994-1995 et 2006-2007. La prise en compte de la lame précipitée par les événements de plus de 15 mm ou par les événements plus violents (plus de 40 mm, 60 mm et 80 mm) n'a pas permis d'améliorer la corrélation. Il est nécessaire de prendre en compte les variations des coefficients de ruissellement de ces 5,4 événements annuels pour expliquer les variations des apports annuels.

INSERT FIGURE 7 AROUND HERE

Influence des K_R sur les apports annuels

Les coefficients de ruissellement peuvent varier d'un facteur de 2 voire 3, selon qu'un événement au cumul semblable se produise sur un sol nu ou sur un sol couvert et peu saturé (Table 1). La lame de pluie, l'intensité, la couverture du sol et le cumul de pluie antérieur lors de l'épisode pluvieux ont tous un effet significatif sur la réponse hydrologique d'un bassin et leurs influences peuvent se combiner au point qu'un épisode comparable puisse générer un apport extrêmement variable en fonction des circonstances dans lesquels il se produit.

Les variations des apports sur toute la période 1989-2010 peuvent ainsi s'expliquer par le nombre d'événements annuels et les conditions de chaque événement. Des années avec uniquement 2-3 événements ont typiquement généré un apport insuffisant, à moins qu'un ou plusieurs événements ne coïncident avec des conditions favorisant un fort ruissellement. Ainsi en 1994-1995, les 3 épisodes de plus de 15 mm sont intervenus sur des sols apparemment peu couverts et après d'autres averses, permettant à ces 3 événements relativement faibles

d'apporter plus de 16 hm³. De même en février 2005 un événement de 100 mm amena 11 hm³ tandis qu'en décembre 2003 un événement de 85 mm n'amena que 3,8 hm³ à cause d'une plus faible intensité journalière et des sols moins saturés. Sur la période fortement déficitaire de 1996-2002, en plus d'un nombre restreint d'événement, les épisodes importants ont eu lieu sur des sols couverts, peu humides et donc avec des K_R naturellement bas, tandis que les événements de fin d'été potentiellement ruisselants ont été relativement faibles entraînant peu d'écoulement.

INSERT TABLE 1 AROUND HERE

Variabilité des coefficients de ruissellement

Paramètres influant le K_R des événements

Les K_R calculés pour 114 événements ont été regroupés en plusieurs catégories sur la base des quatre paramètres sélectionnés pour étudier leur influence sur la réponse hydrologique du bassin versant (Table 1).

Les K_R moyens augmentent de 4,6% à 7,15% lorsque le cumul de pluie croît de moins de 40 mm à plus de 80 mm par épisode. La réponse hydrologique du bassin varie de façon semblable selon que l'intensité journalière est supérieure ou inférieure à 30 mm. Les K_R sont également 50% plus forts pour des événements d'été que d'hiver lorsque les sols agricoles sont nus, n'ont pas encore été labourés ou semés et donc favorisent le ruissellement. Les sols d'hiver ont eux une meilleure couverture végétale qui ralentit et réduit le ruissellement. L'intensité horaire des événements d'été est souvent aussi plus forte, ce qui contribue à augmenter le ruissellement (Chargui *et al.* 2013). Finalement les K_R moyens augmentent également de 3,6% à 6,4% selon le degré de saturation du système hydrologique, confirmant que la capacité à ruisseler est plus importante lorsque la pluie antérieure est élevée.

La régression pas à pas effectuée avec les quatre paramètres sur les variations des K_R indique que la couverture du sol, le niveau de saturation hydrique, et l'intensité pluviométrique journalière sont des variables explicatives du modèle, mais pas le volume total de l'événement. Leur corrélation avec K_R demeure toutefois faible (Table 2). Les tendances observées sur les valeurs de K_R en fonction de ces 4 critères sont cohérentes avec la réponse hydrologique attendue, mais l'on observe effectivement des écarts types importants et de grandes variations entre les K_R minimum et maximum au sein de ces classes (Table 1). Ces écarts, présents dans d'autres bassins semi-arides (Martinez-Mena *et al.* 1998), indiquent que la combinaison de ces paramètres importants, ne sont pas les seuls à influencer fortement le K_R pour un événement donné.

INSERT TABLE 2 AROUND HERE

Interaction des facteurs sur les K_R

Sur 6 épisodes pluvieux au cumul supérieur à 80 mm, les K_R s'échelonnent entre 2,9% et 12,5%. Les plus forts K_R sont observés pour les événements aux plus fortes intensités en 24 h, qui varient de 30 mm/jour à 87 mm/jour selon les épisodes. La régression pas à pas effectuée sur cette classe d'événement a confirmé la pluie journalière comme étant la variable explicative dominante du modèle K_R et le coefficient de Spearman de cette relation linéaire atteint 0,66 (Fig. 8). La visualisation des isohyètes journalières (Fig. 9) témoigne de l'importance de la présence et de l'étendue spatiale des fortes intensités pluviométriques sur les K_R élevés. Tous ces épisodes de plus de 80 mm étant des phénomènes d'hiver sur des sols couverts, l'état de couverture des sols n'a pas a priori eu d'influence sur la baisse des K_R . Les K_R les plus faibles correspondent à trois événements qui ont eu lieu alors que les sols étaient

peu humides, et le faible degré de saturation du système hydrologique aurait contribué à réduire le coefficient de ruissellement pour ces événements, comme en témoigne la corrélation entre ces deux variables (Table 2).

INSERT FIGURE 8 AND FIGURE 9 AROUND HERE

Pour les épisodes entre 60 mm et 80 mm, les K_R varient également fortement (Fig. 10) et ni les tests de corrélations ni la régression pas à pas ne permettent d'identifier une variable prépondérante. Le plus fort coefficient de ruissellement correspond à un événement qui, contrairement aux 4 autres, s'est produit sur des sols de fin d'été aux couverts végétaux faibles qui favorisent le ruissellement. L'intensité journalière de cet épisode étant cependant plus faible impliquerait que l'état des sols aurait ici un impact plus déterminant sur le ruissellement que l'intensité des précipitations à l'échelle du bassin. On observe par ailleurs que les K_R de quatre événements d'hiver diminuent lorsque l'intensité et/ou le cumul antérieur de pluies diminue.

INSERT FIGURE 10 AROUND HERE

Sur les épisodes au cumul pluviométrique inférieur à 60 mm, l'interprétation des fortes variations dans la réponse hydrologique du bassin devient plus complexe. Certaines tendances subsistent, comme les K_R plus élevés en été qu'en hiver, ou la réduction des K_R lorsque les sols sont peu humides, comme le montre la faible corrélation entre ces paramètres et les variations de K_R (Table 2). Néanmoins l'influence de chaque facteur est plus difficile à distinguer et pour certains événements apparemment semblables selon ces 4 critères, les K_R peuvent varier à un mois d'intervalle d'un facteur supérieur à 10. Avec une faible lame de pluie, l'influence et l'interaction de nombreux facteurs augmentent, compliquant l'analyse de l'origine des variations des K_R à ces échelles de temps et d'espace. La couverture du sol et l'humidité des sols ont une influence relativement plus importante sur la lame ruisselée, et la contribution d'autres processus comme les écoulements de base peut augmenter en proportion. Les incertitudes sur les apports et pluies seront également proportionnellement plus importantes. La structure spatiale des variables climatiques (Baccour *et al.* 2012), notamment la localisation et l'étendue spatiale des plus fortes intensités pluviométriques doivent être prises en compte dans l'analyse de la réponse hydrologique du bassin, compte tenu du caractère isolé des épisodes pluvieux (Fig. 9 et Fig. 10). Lorsque ces derniers sont centrés sur l'aval du bassin, les K_R sont plus élevés à cause de la plus forte proportion du ruissellement atteignant le barrage.

Influence des aménagements de CES sur les K_R

A l'échelle annuelle (Fig. 11), l'évolution interannuelle des K_R présente une baisse à la fin des années 1990 qui aurait pu correspondre à une influence forte des ouvrages de CES suite à leur construction. Sur les épisodes pluvieux de plus de 15 mm l'évolution des K_R (Fig. 11) témoigne d'une forte variabilité mais ne met pas en évidence une baisse généralisée contredisant cette hypothèse. En effet, des K_R élevés subsistent sur cette période, et ceci est cohérent avec l'hypothèse que les ouvrages de CES auraient un impact modéré, dit de second ordre (Lacombe *et al.* 2008). La baisse des K_R annuels s'expliquant ici par la baisse observée sur cette période du nombre d'événements > 15 mm aux K_R élevés. L'influence des ouvrages de CES a donc été recherchée sur des petites variations de K_R pour des événements comparables.

Pour les événements inférieurs à 40 mm, la moyenne des K_R a baissé de 40% après 1996, en accord avec les résultats obtenus par Lacombe (2007). Les K_R moyens sont demeurés faibles, autour de 3,6%, sur la période 2003-2010 (Fig. 12). Pour affiner ce résultat et prendre en compte certains paramètres qui peuvent en plus des ouvrages de CES influencer le K_R , nous avons comparé l'évolution des K_R pour différentes sous-classes d'événements. Les K_R ont diminué après 1996 de plus de 50% pour des épisodes sur des sols au couvert végétal faible et pour ceux sur des sols couverts, peu humides. Sur des sols couverts et humides, les K_R ont baissé de 10% entre les périodes étudiées. Sur les épisodes pluvieux de plus de 40 mm, les K_R moyens ont baissé de 20% après 2003. Néanmoins, le nombre limité d'épisodes dans cette catégorie (31 sur 21 ans) ne permet pas de disposer d'un nombre significatif d'événements dans des conditions comparables (sur sols nus, couverts, saturés, etc.), et d'estimer dans quelles proportions l'influence de ces ouvrages, qui se confond avec l'influence des sols, réduit de façon supplémentaire le ruissellement.

La baisse des K_R observée sur des événements inférieurs à 40 mm confirme qu'il y a une modification de la réponse hydrologique du bassin versant sur la période qui suit les aménagements de CES. Cette diminution étant constatée lorsque le cumul pluviométrique, le couvert végétal et le degré de saturation hydrique des événements étaient similaires tend à démontrer que des variations sur ces facteurs ne peuvent avoir causé cette réduction. Inversement, l'absence de baisse des K_R observée pour des épisodes où les sols sont couverts et saturés semble conforter l'hypothèse d'une influence des aménagements de CES. En effet lorsque le cumul de pluie antérieur est important, les ouvrages de CES seraient en partie remplis et leur influence sur le ruissellement serait logiquement moindre. La continuité des faibles K_R observés après 2003 tendraient cependant à réfuter l'hypothèse d'une réduction au cours du temps de l'influence des aménagements de CES due à la dégradation (brèches et envasement) des ces ouvrages (Lacombe 2007).

INSERT FIGURE 11 AROUND HERE

INSERT FIGURE 12 AROUND HERE

Comme les événements de moins de 40 mm contribuent à 60% en moyenne des apports annuels sur la période 1989-1996, la baisse de 40% observée après 1996 sur leur K_R moyen entrainerait une diminution des écoulements annuels due aux ouvrages de CES de l'ordre de 25%. Ceci correspondrait à un ruissellement capté autour de 4 hm^3/an , ce qui est cohérent avec la capacité totale des retenues collinaires estimée à près de 6 hm^3 . Lacombe (2007) avait identifié une baisse des écoulements de 28-32% sur le bassin suite à l'augmentation des superficies contrôlées par les aménagements de CES de 5% à 26%. Considérant les éventuels autres facteurs (pluies, occupation du sol, etc.) stationnaires entre les périodes, il attribua cette réduction à la seule influence des aménagements de CES. Dridi (2000) en s'appuyant sur des statistiques de pluie, de coefficients de ruissellement et de la capacité moyenne des banquettes (85 mm) et des retenues avait estimé que leur impact cumulé réduisait les débits annuels de 30%. Kingumbi (2006) en simulant l'absence de CES sur ce bassin, à l'aide d'un modèle couplé surface-souterrain distribué à base conceptuelle développé sur MODCOU, avait évalué la réduction des débits à uniquement 1%. Il émettait l'hypothèse que la baisse globale des écoulements serait due à une réduction des écoulements de base suite au rabattement du niveau des nappes environnantes. Son travail s'était heurté aux incertitudes résiduelles sur l'infiltration et l'évaporation ainsi qu'à la difficulté à extrapoler le fonctionnement des CES étudiés à d'autres CES implantés dans des sous-bassins aux profils pédologiques, géologiques et géomorphologiques variés. Un autre modèle

développé sous SWAT (Abouabdillah 2010) n'avait pas permis d'affiner l'estimation de l'influence des aménagements de CES.

CONCLUSION

L'analyse des fortes variations pluviométriques et hydrométriques dans ce bassin semi-aride par différents tests statistiques n'indique pas de rupture au cours des 45 dernières années. Cette étude a montré que les écoulements annuels ne sont pas corrélés avec le cumul pluviométrique mais sont liés aux apports générés par un nombre très limité d'épisodes pluvieux de plus de 15 mm (5,4 par an en moyenne). Le nombre très variable de ces épisodes mais également les circonstances dans lesquelles ils se produisent sont déterminants sur les apports annuels, illustrant l'importance d'une approche événementielle en région semi-aride. Les influences du cumul et de l'intensité pluviométrique, de l'état du couvert végétal du sol ainsi que du niveau de saturation du système hydrologique sont clairement démontrées sur les variations des coefficients de ruissellement de 114 événements étudiés. Les années d'apports déficitaires entre 1996-2002 sur le bassin du Merguellil ne sont pas liées à l'aménagement concomitant des ouvrages de CES comme pourrait indiquer la baisse constatée sur les K_R annuels. Ce déficit s'explique avant tout par un nombre réduit d'épisodes de plus de 15 mm par an et des circonstances défavorables, notamment sur des sols d'hiver, couverts, peu saturés et peu ruisselants.

Cependant, l'analyse détaillée des 114 événements révèle une baisse de plus de 40% sur les K_R pour des événements comparables suite à l'aménagement des ouvrages de CES. Ces ouvrages contrôlant près de 30% des superficies du bassin auraient donc également contribué à réduire les apports annuels d'environ 25% depuis 1996. Les difficultés à interpréter les variations des K_R sur les épisodes pluvieux les plus faibles témoignent de la difficulté résiduelle à représenter à cette échelle spatiale le fonctionnement hydrologique d'un bassin semi-aride hétérogène. Une discrétisation dans un modèle distribué ou semi distribué demeure nécessaire pour prendre en compte les disparités spatiales et temporelles des intensités pluviométriques et des états de sols qui influent fortement sur les fonctions de production.

Remerciements

Les auteurs remercient le Commissariat Régional au Développement Agricole de Kairouan, Tunisie et la Direction Générale des Ressources en Eau de Tunis. Ces travaux ont été partiellement financés par les projets FP7 WASSERMed, ANR AMETHYST et SICMED Dyshyme.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abouabdillah, A., 2010. *Hydrological modeling in a data-poor Mediterranean catchment (Merguellil, Tunisia). Assessing scenarios of land management and climate change*. Thesis (PhD). University of Tuscia, Italy.
- Alazard, M., Leduc, C., Virrion, R., Guidon, S., Ben Salem, A., and Travi, Y., 2011. Estimating groundwater fluxes by hydrodynamic and geochemical approaches in a heterogeneous Mediterranean system (central Tunisia). *IAHS Publication*, 345, 253–258.
- Al Ali, Y., Touma, J., Zante, P., Nasri, S., and Albergel, J., 2008. Water and sediment balances of a contour bench terracing system in a semi-arid cultivated zone (El Gouazine, central Tunisia). *Hydrological Sciences Journal*, 53 (4), 883–892.

- Al-Seekh, S.H. and Mohammad, A.G., 2009. The effect of water harvesting techniques on runoff, sedimentation, and soil properties. *Environmental management*, 44 (1), 37–45.
- Avalos, J.E., 2004. Modélisation hydrologique globale conceptuelle appliquée aux petits bassins versants en zone semi-aride du nord-Mexique. *Revue des sciences de l'eau*, 2, 195–212.
- Baccari, N., Boussema, M.R., Lamachere, J., and Nasri, S., 2008. Efficiency of contour benches, filling-in and silting-up of a hillside reservoir in a semi-arid climate in Tunisia. *Comptes Rendus Geosciences*, 340 (1), 38–48.
- Baccour, H., Slimani, M., and Cudennec, C., 2012. Structures spatiales de l'évapotranspiration de référence et des variables climatiques corrélées en Tunisie. *Hydrological Sciences Journal*, 57 (4), 818-829.
- Ben Mammou, A. and Louati, M., 2007. Évolution temporelle de l'envasement des retenues de barrages de Tunisie. *Revue des sciences de l'eau*, 20 (2), 201–210.
- Ben Mansour, H., 2000. *Apport de la télédétection pour l'étude de la dynamique des aménagements de conservation des eaux et du sol (banquettes) et impact sur les apports du Merguellil (Tunisie Centrale)*. Thesis (DAA). Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes.
- Benzarti, Z. and Habaieb, H., 2001. Étude de la persistance de la sécheresse en Tunisie par utilisation des chaînes de Markov (1909-1996). *Sécheresse*, 12(4), 215-220.
- Bouma, J.A., Biggs, T.W., and Bouwer, L.M., 2011. The downstream externalities of harvesting rainwater in semi-arid watersheds: An Indian case study. *Agricultural Water Management*, 98 (7), 1162–1170.
- Bouzaiane, S. and Laforgue, A., 1986. *Monographie hydrologique des oueds Zeroud et Merguellil*. Tunis : Direction Générale des Ressources en Eau, Orstom.
- Brunet-Moret, Y., 1971. Etude de l'homogénéité de séries chronologiques de précipitations annuelles par la méthode des doubles masses. *Cahiers Orstom, Série Hydrologie*, VIII (4), 3-31.
- Burte, J., 2008. *Les petits aquifères alluviaux dans les zones cristallines semi-arides: fonctionnement et stratégies de gestion de l'eau*. Thesis (PhD). Université de Montpellier 2, France and Universidade Federal do Ceara, Brazil.
- Camus, H., 1985. *Etude phytométrique des bassins versants des oueds Zeroud et Merguellil*. Tunis : Direction des Ressources en Eau, Orstom.
- Chargui, S., Slimani, M., and Cudennec, C., 2013. Statistical distribution of rainy events characteristics and instantaneous hyetographs generation (Merguellil watershed in central Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences*, 6 (5), 1581-1590.
- Cudennec, C., Sarraza, M., and Nasri, S., 2004. Modelisation robuste de l'impact agrégé de retenues collinaires sur l'hydrologie de surface. *Revue des sciences de l'eau*, 17 (2), 181–194.
- Cudennec, C., Slimani, M., and Le Goulven, P., 2005. Accounting for sparsely observed rainfall space-time variability in a rainfall-runoff model of a semiarid Tunisian basin. *Hydrological Sciences Journal*, 50 (4), 617–630.
- Cudennec C., Leduc C., Koutsoyiannis D., 2007. Dryland hydrology in Mediterranean regions—a review. *Hydrological Sciences Journal*, 52, 6, 1077-1087, doi: 10.1623/hysj.52.6.1077
- Dridi, B., 2000. *Impact des aménagements sur la disponibilité des eaux de surface dans le bassin versant du Merguellil*. Thesis (PhD). Université Louis Pasteur (Strasbourg 1).
- Feki, H., Slimani, M., and Cudennec, C., 2012. Incorporating elevation in rainfall interpolation in Tunisia using geostatistical methods. *Hydrological Sciences Journal*, 57 (7), 1–21.

- Gao, P., Mu, X.-M., Wang, F., and Li, R., 2011. Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15 (1), 1–10.
- Gay, D., 2004. *Fonctionnement et bilan de retenues artificielles en Tunisie: approche hydrochimique et isotopique*. Thesis (PhD), University Paris XI, France.
- Grunberger, O., Montoroi, J., and Nasri, S., 2004. Quantification of water exchange between a hill reservoir and groundwater using hydrological and isotopic modelling (El Gouazine, Tunisia). *Comptes Rendus Geosciences*, 336 (16), 1453–1462.
- He, X., LI, Z., Hao, M., Tang, K., and Zheng, F., 2003. Down-scale analysis for water scarcity in response to soil–water conservation on Loess Plateau of China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 94 (3), 355–361.
- IRD, 1998. Khronostat, version 1.01. Montpellier : IRD
- Kingumbi, A., 2006. *Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation. Cas du Merguellil en Tunisie Centrale*. Thesis (PhD). Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis.
- Kingumbi, A., Bargaoui, Z., and Hubert, P., 2005. Investigation of the rainfall variability in central Tunisia. *Hydrological Sciences Journal*, 50 (3), 493–508.
- Kingumbi, A., Bargaoui, Z., Ledoux, E., Besbes, M., and Hubert, P., 2007. Modélisation hydrologique stochastique d'un bassin affecté par des changements d'occupation: cas du Merguellil en Tunisie centrale. *Hydrological Sciences Journal*, 52 (6), 1232–1252.
- Kongo, V. and Jewitt, G., 2006. Preliminary investigation of catchment hydrology in response to agricultural water use innovations: A case study of the Potshini catchment – South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31 (15-16), 976–987.
- Lacombe, G., 2007. *Evolution et usages de la ressource en eau dans un bassin versant aménagé semi-aride. Le cas du Merguellil en Tunisie centrale*. Thesis (PhD). Université Montpellier II.
- Lacombe, G., Cappelaere, B., and Leduc, C., 2008. Hydrological impact of water and soil conservation works in the Merguellil catchment of central Tunisia. *Journal of Hydrology*, 359 (3-4), 210–224.
- Leduc, C., Ben Ammar, S., Favreau, G., Beji, R., Virrion, R., Lacombe, G., Tarhouni, J., Aouadi, C., Zenati Chelli, B., Jebnoun, N., Oi, M., Michelot, J.L., and Zouari, K., 2007. Impacts of hydrological changes in the Mediterranean zone: environmental modifications and rural development in the Merguellil catchment, central Tunisia. *Hydrological Sciences Journal*, 52 (6), 1162–1178.
- Le Goulven, P., Leduc, C., Bachtta, M.S., and Poussin, J.-C., 2009. Sharing scarce resources in Mediterranean river basin: Wadi Merguellil in Central Tunisia. In: F. Molle and F. Wester, eds. *River Basin Trajectories: Societies, Environments and Development*. CAB International, 147–170.
- Li, Q. and Gowing, J., 2005. A Daily Water Balance Modelling Approach for Simulating Performance of Tank-Based Irrigation Systems. *Water Resources Management*, 19 (3), 211–231.
- Lubes-Niel, H., Masson, J.E., Paturel, J.M., and 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*, 3, 383–408.
- Martinez-Mena, M., Albaladejo, J., and Castillo, V.M., 1998. Factors influencing surface runoff generation in a Mediterranean semi-arid environment: Chicamo watershed, SE Spain. *Hydrological processes*, 12, 741–754.

- Nasri, S., 2007. Caractéristiques et impacts hydrologiques de banquettes en cascade sur un versant semi-aride en Tunisie centrale. *Hydrological Sciences Journal*, 52 (6), 1134–1145.
- Nazoumou, Y., 2002. *Impact des barrages sur la recharge des nappes en zone aride: étude par modélisation numérique sur le cas de Kairouan (Tunisie centrale)*. Thesis (PhD). University of Tunis El Manar.
- Nyssen, J., Clymans, W., Descheemaeker, K., Poesen, J., Vandecasteele, I., Vanmaercke, M., Zenebe, A., Van Camp, M., Haile, M., Haregeweyn, N., Moeyersons, J., Martens, K., Gebreyohannes, T., Deckers, J., and Walraevens, K., 2010. Impact of soil and water conservation measures on catchment hydrological response—a case in north Ethiopia. *Hydrological Processes*, 24, 1880–1895.
- Peña-Arancibia, J.L., van Dijk, A.I.J.M., Guerschman, J.P., Mulligan, M., (Sampurno) Bruijnzeel, L.A., and McVicar, T.R., 2012. Detecting changes in streamflow after partial woodland clearing in two large catchments in the seasonal tropics. *Journal of Hydrology*, 416–417, 60–71.
- Proaño, D., 2012. *Bilan offres-demandes sur le bassin versant du Merguellil à l'aide de la plateforme WEAP*. Thesis (MSc). Université de Montpellier 2, France.
- Roose, E., 1991. Conservation des sols en zones méditerranéennes. Synthèse et proposition d'une nouvelle stratégie de lutte antérosive: la GCES. *Cah. ORSTOM Pédol*, 26 (2), 145–181.
- Sakiss, N., Ennabli, N., Slimani, M. and Baccour, H., 1994. *La pluviométrie en Tunisie a-t-elle changé depuis 2000 ans?* Tunis : Institut National de la Météorologie & Institut National Agronomique de Tunisie
- Salmi, T., Määttä, A., Anttila, P., Ruoho-Airola, T., and Amnell, T., 2002. *Trends of Annual Values of Atmospheric Pollutants by the Mann-Kendall Test and Sen's Slope Estimates: The Excel Template Application MAKESENS*. Helsinki: Finnish Meteorological Institute.
- Sawunyama, T., Senzanje, A., and Mhizha, A., 2006. Estimation of small reservoir storage capacities in Limpopo River Basin using geographical information systems (GIS) and remotely sensed surface areas: Case of Mzingwane catchment. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31 (15–16), 935–943.
- Slimani, M., Cudennec, C., and Feki, H., 2007. Structure du gradient pluviométrique de la transition Méditerranée – Sahara en Tunisie : déterminants géographiques et saisonnalité. *Hydrological Sciences Journal*, 52 (6), 1088–1102.
- Talineau, J.C., Selmi, S., and Alaya, K., 1994. Lacs collinaires en Tunisie semi-aride. *Sécheresse*, 5 (4), 251–256.
- Tucker, C., Pinzon, J., Brown, M., Slayback, D., Pak, E., Mahoney, R., Vermote, E., and El Saleous, N., 2005. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 26 (20), 4485–4498.
- Zahar, Y., 1997. *Éléments d'hydrologie pour l'aménagement: modélisation spatiale et temporelle des précipitations extrêmes et érosives en Tunisie centrale*. Thesis (PhD). Université des lettres, des arts et sciences humaines, Tunis I
- Zribi, M., Chahbi, A., Shabou, M., Lili-Chabaane, Z., Duchemin, B., Baghdadi, N., Amri, R., and Chehbouni, A., 2011. Soil surface moisture estimation over a semi-arid region using ENVISAT ASAR radar data for soil evaporation evaluation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15 (1), 345–358.

Table 1 Variations des K_R (%) pour différentes catégories d'épisodes pluvieux

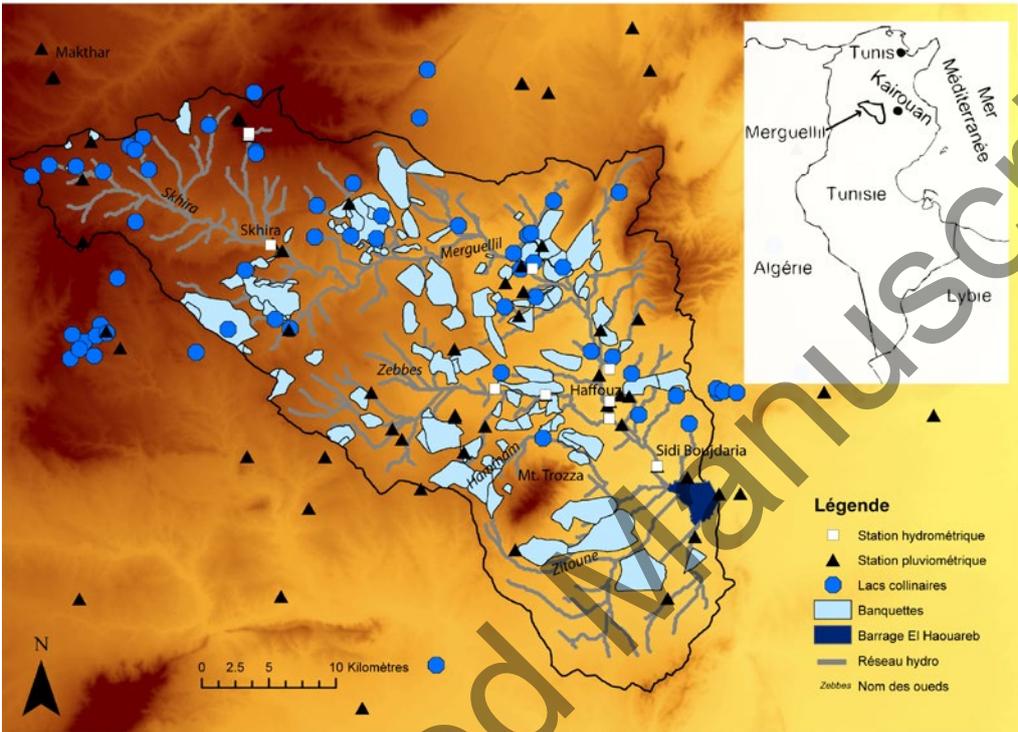
Type d'événement	K_R	K_R	K_R	K_R	Nombre d'événements	Ecart type
	moyen	médian	min	max		
Cumul de pluie						
15-40 mm	4,60	3,24	0,22	26,35	83	4,5
40-80 mm	5,65	5,71	0,18	10,9	25	2,9
>80 mm	7,15	6,63	2,85	12,49	6	3,93
Intensité des pluies						
< 30 mm/j	4,53	3,38	0,18	20,45	98	3,77
> 30 mm/j	7,62	5,92	2,09	26,34	16	5,43
Couverture du sol						
Elevée (NDVI >0,2)	4,13	3,24	0,18	17,54	71	3,25
Faible (NDVI <0,2)	6,34	4,69	0,65	26,34	43	5,15
Saturation hydrique						
Très faible	3,66	3,76	0,7	8	13	2,17
Faible	4,23	3,2	0,18	17,54	59	3,3
Forte	6,4	5,05	0,47	26,34	42	5,29

Table 2 Coefficients de corrélations de Spearman entre les valeurs de K_R et quatre paramètres étudiés pour des événements au cumul de pluie entre 15 mm et 100 mm.

		Intensité des pluies	Cumul de pluie	Couverture du sol	Saturation hydrique
K_R	tous événements	0,153	0,180	-0,318	0,249
	cumul > 80 mm	0,657	-0,086	0,091	0,886
	cumul 60-80 mm	-0,048	-0,048	-0,638	0,357
	cumul 40-60 mm	-0,042	0,034	0,028	-0,081
	cumul 15-40 mm	-0,036	-0,043	-0,444	0,251

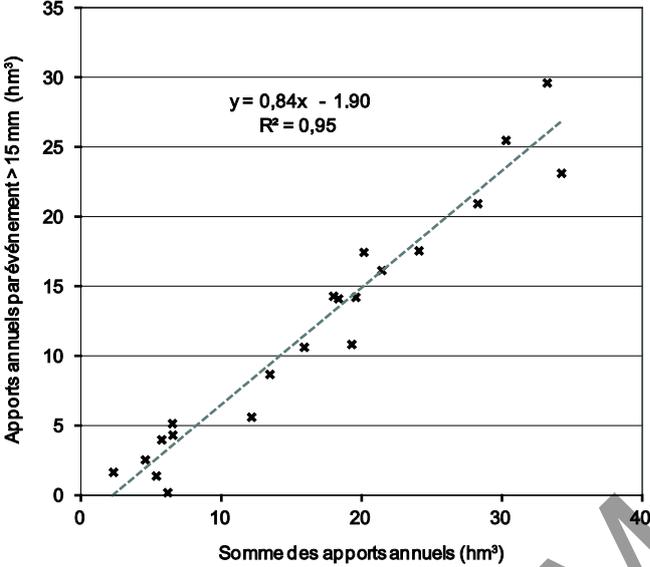
Accepted Manuscript

Fig. 1 Bassin amont du Merguellil et localisation des stations de mesure et aménagements de CES



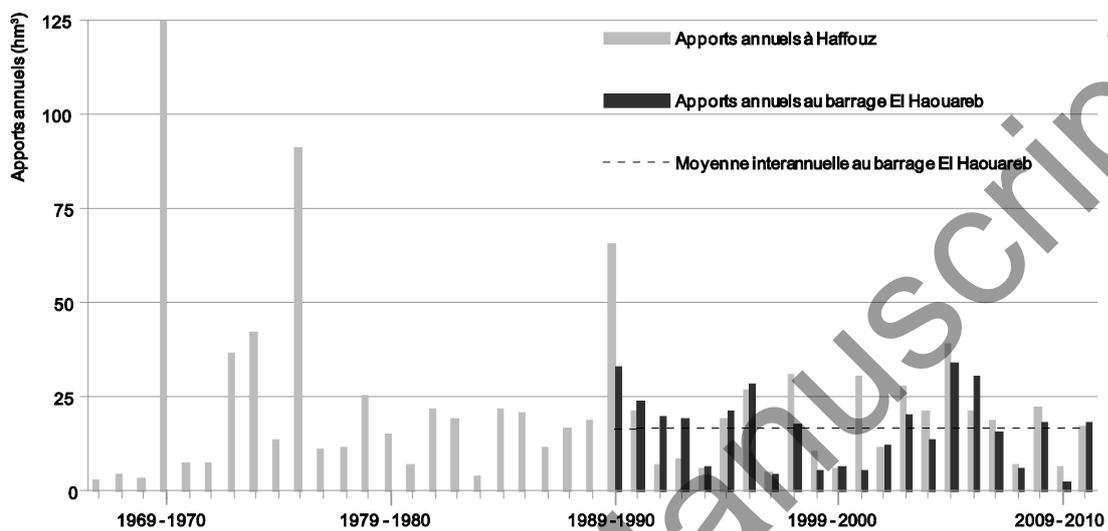
Accepted Manuscript

Fig. 2 Relation entre les apports annuels au barrage El Haouareb et les apports par les événements de plus de 15 mm sur la période 1989-2010



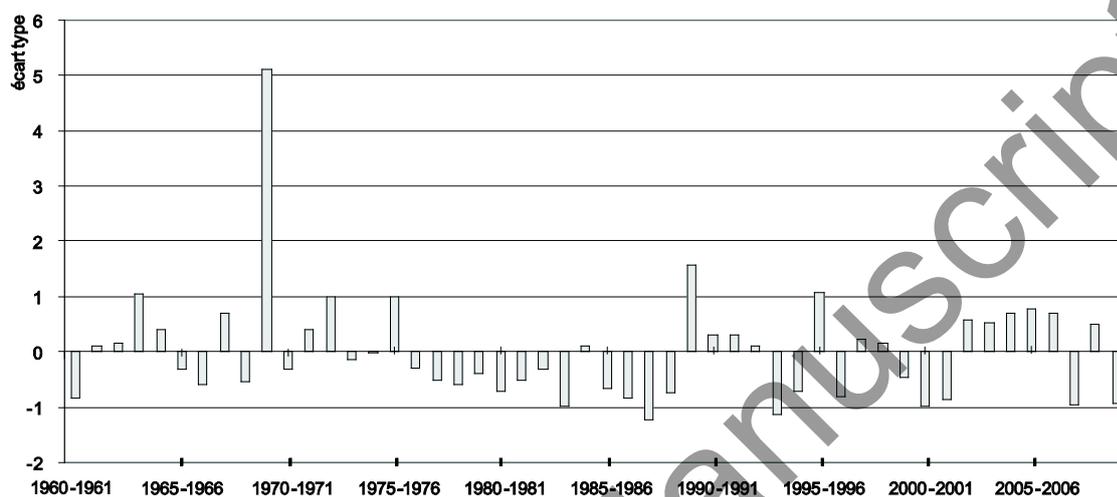
Accepted Manuscript

Fig. 3 Apports annuels au barrage El Haouareb (1989-2010) et à la station d'Haffouz (1966-2010)



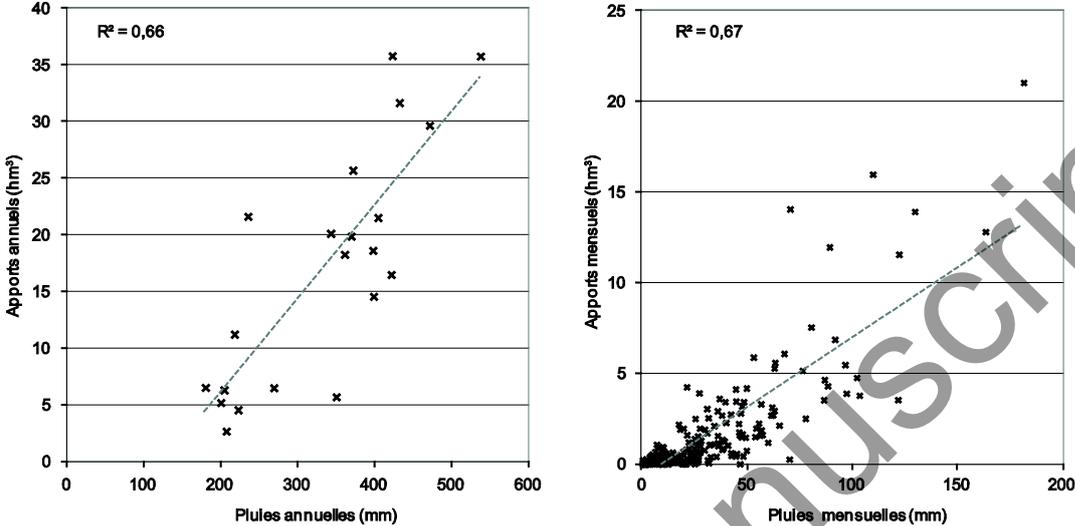
Accepted Manuscript

Fig. 4 Valeurs centrées réduites des pluies annuelles sur le bassin amont du Merguellil sur 1960-2010 (nombre d'écarts types par rapport à la moyenne pluviométrique interannuelle sur la période 1960-2010)



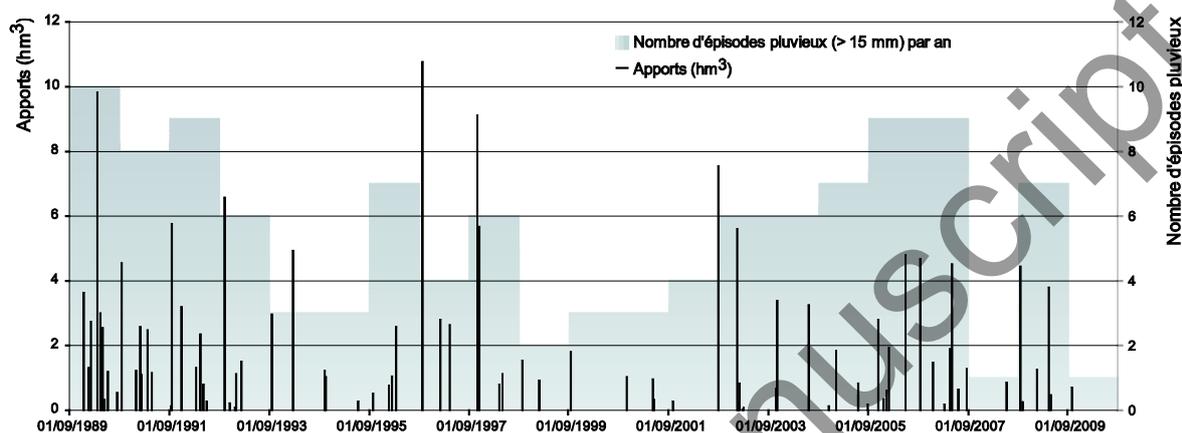
Accepted Manuscript

Fig. 5 Relations entre les pluies et les apports au barrage El Haouareb pour la période 1989-2010 aux pas de temps annuel et mensuel



Accepted Manuscript

Fig. 6 Nombre d'épisodes pluvieux de plus de 15 mm sur la période 1989-2010 et leur apport au barrage El Haouareb.



Accepted Manuscript

Fig. 7 Valeurs centrées réduites des apports annuels au barrage El Haouareb et du nombre d'épisodes pluvieux de plus de 15 mm par an (1989-2010) (nombre d'écart types par rapport à la moyenne interannuelle sur la période 1989-2010)

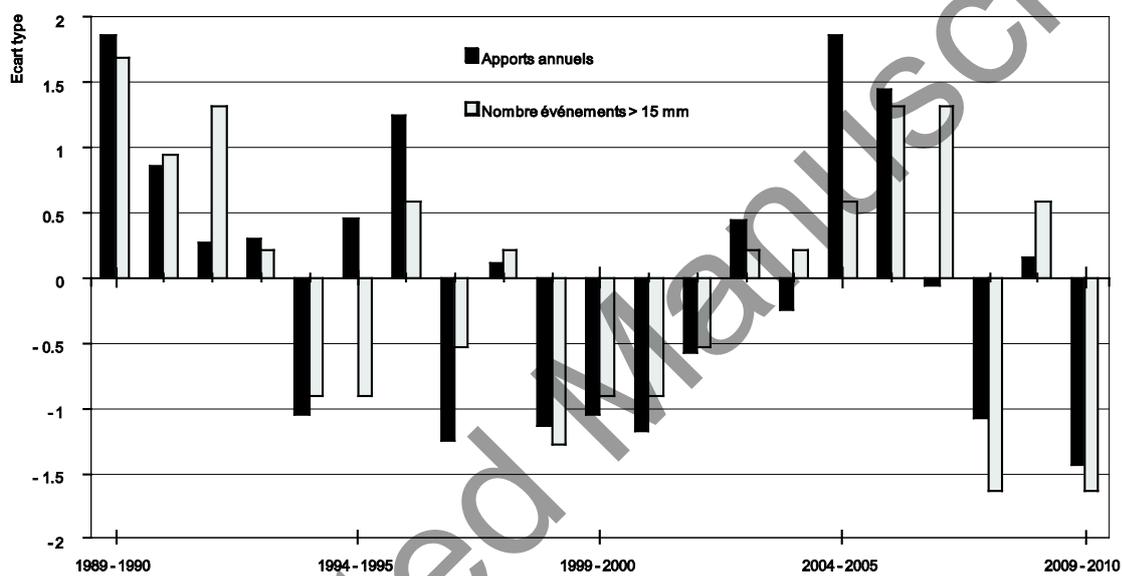


Fig. 8 Relations entre les intensités journalières des pluies et les valeurs de K_R pour des événements au cumul de pluies entre 15 mm et 100 mm

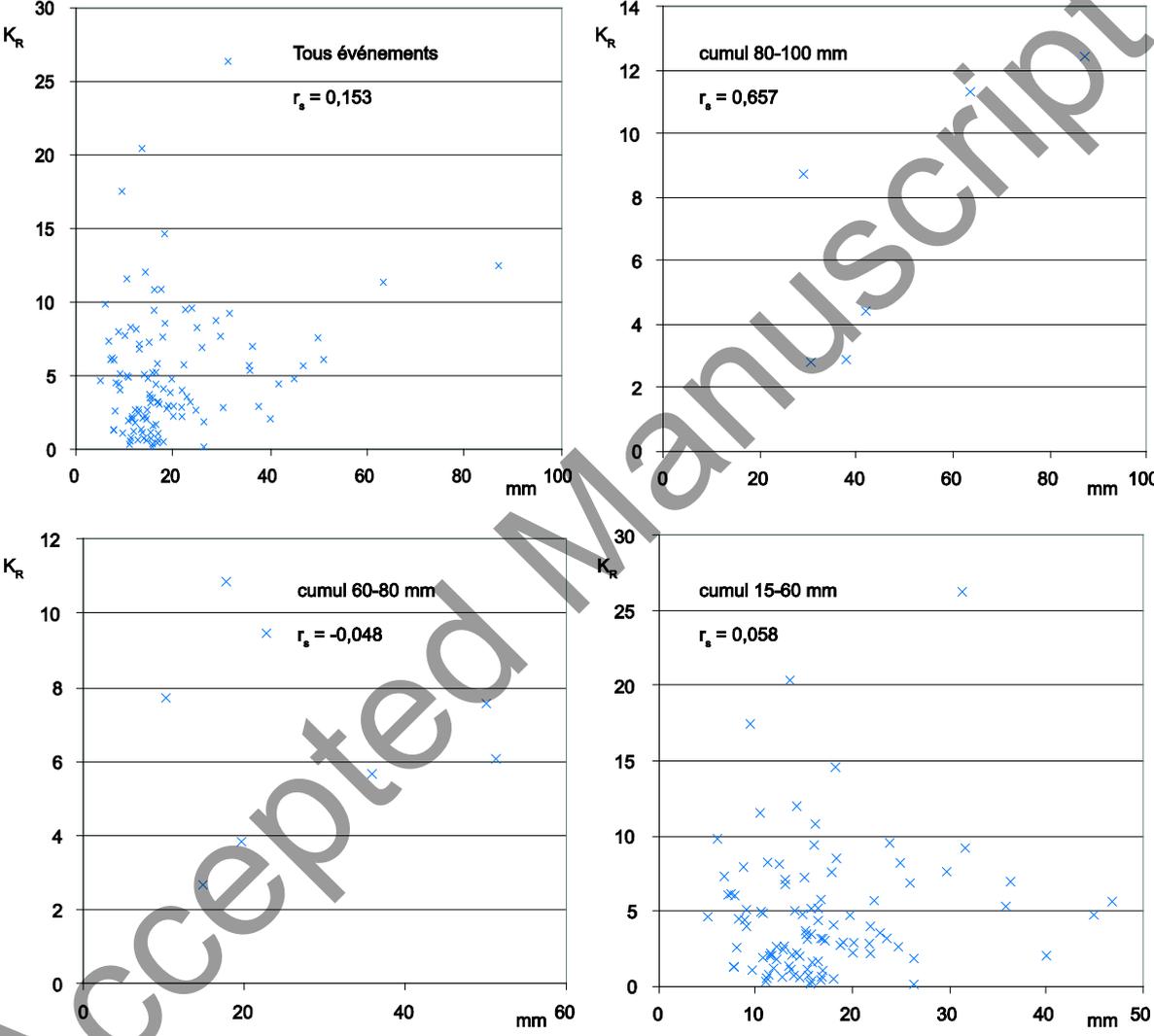


Fig. 9 Carte des isohyètes de précipitations journalières pour quatre épisodes de plus de 80 mm par ordre croissant de K_R

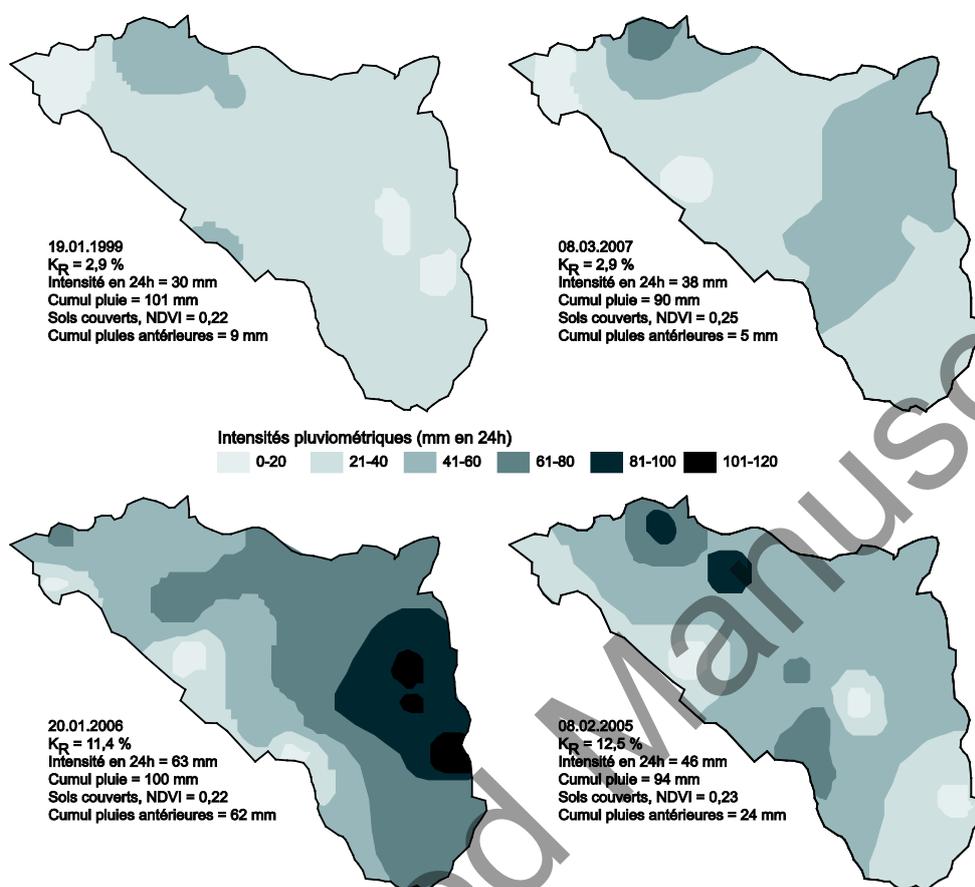


Fig. 10 Carte des isohyètes de précipitations journalières pour quatre épisodes entre 60-80 mm par ordre croissant de K_R

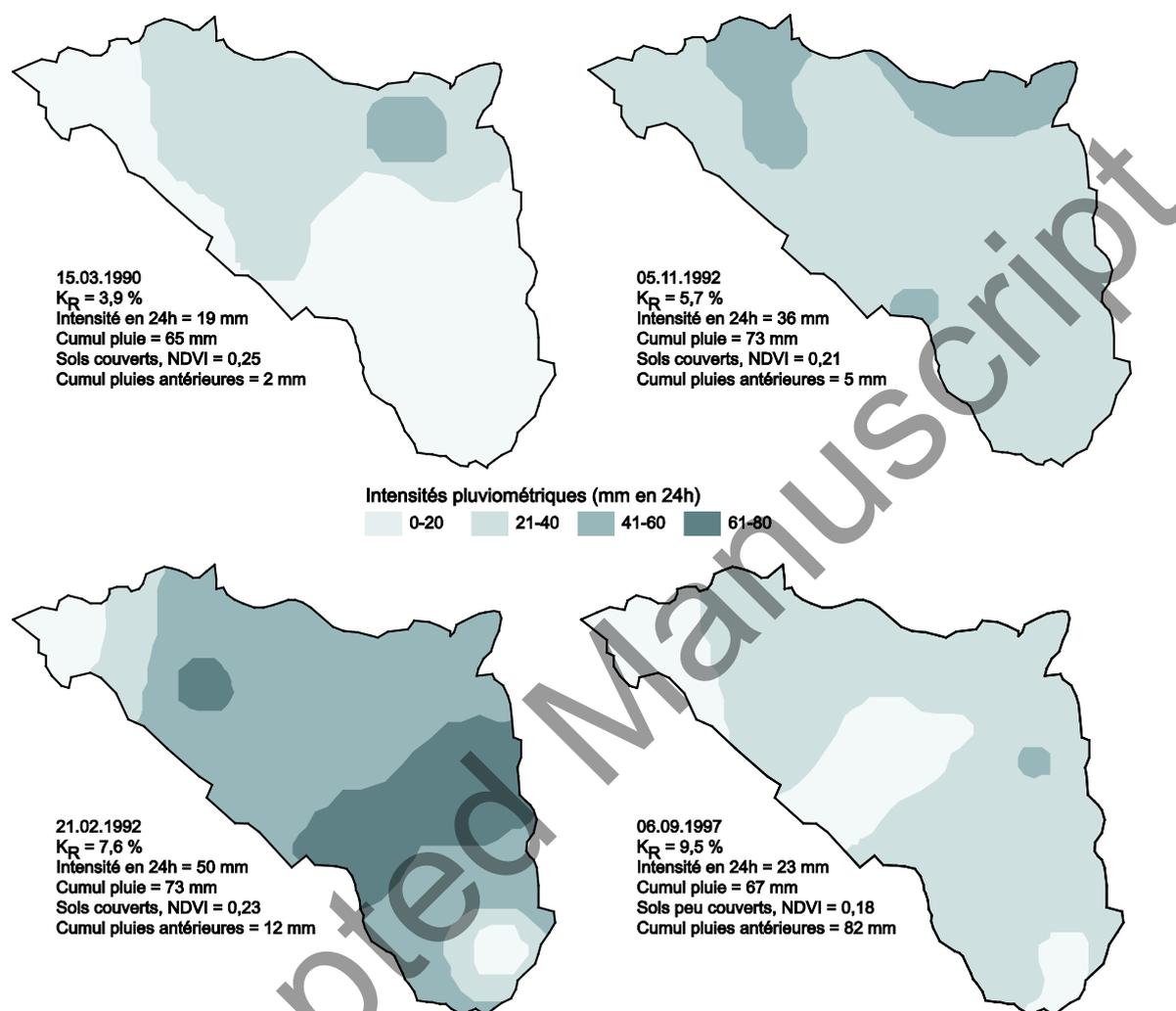


Fig. 11 Evolution des K_R annuels et des K_R des événements de plus de 15 mm sur la période 1989-2010

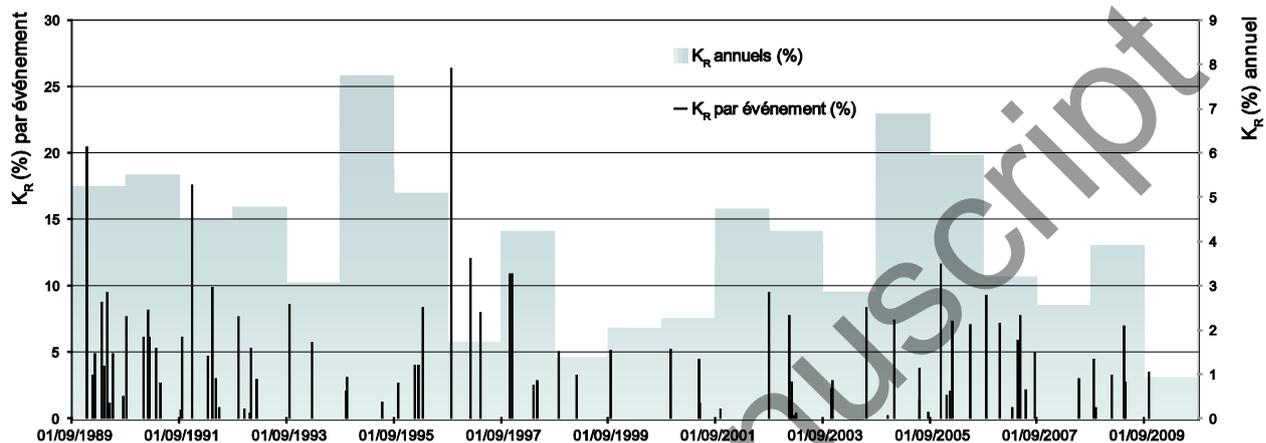
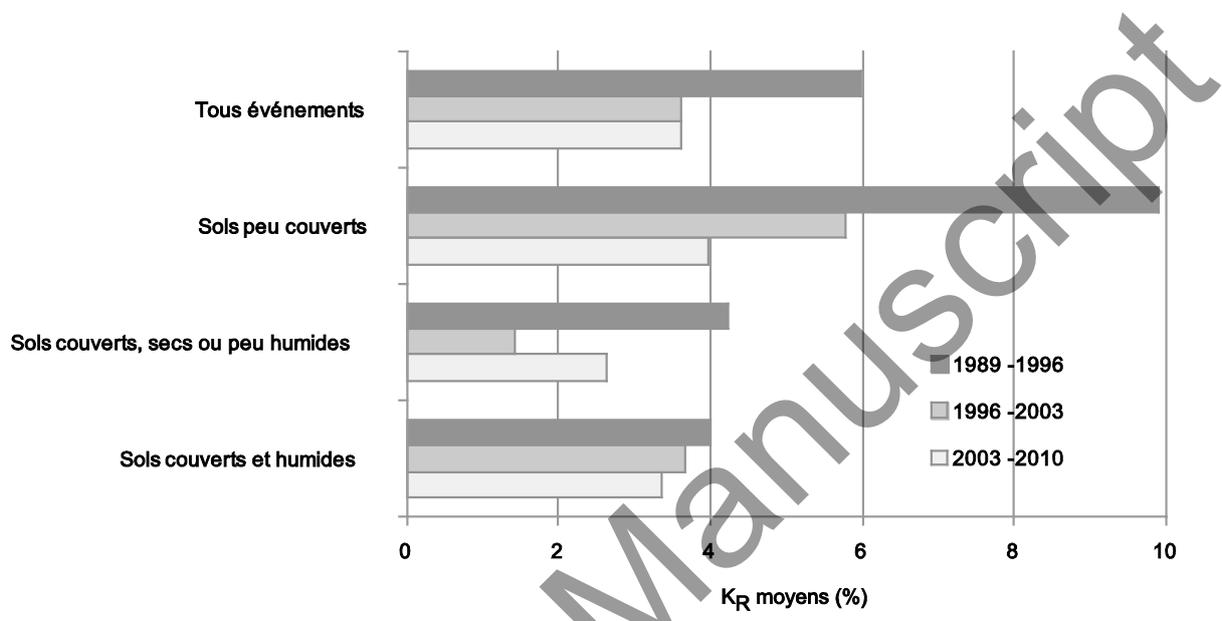


Fig. 12 Evolution des K_R moyens pour des événements pluvieux de 15-40 mm



Accepted Manuscript