

Calage d'un modèle conceptuel pluie-débit journalier à partir de bilans annuels

ANTOINE HREICHE, CLAUDE BOCQUILLON, WAJDI NAJEM

CREEN, Université Saint Joseph, BP 11-0514 Riad-el-Solh, Beyrouth, Liban
antoine.hreiche@fi.usj.edu.lb

ERIC SERVAT & ALAIN DEZETTER

IRD, UMR HydroSciences, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France

Résumé Le modèle conceptuel pluie-débit à quatre paramètres, MEDOR, spécifique au climat méditerranéen comporte: une production ne dépendant que de la pluie et de l'état hydrique et privilégiant ce dernier par rapport aux variables climatiques, et un transfert modélisé par deux réservoirs en parallèle. Sa structure et son calage sont détaillés sur le bassin libanais du Nahr-Beyrouth. Il a été testé sur huit bassins méditerranéens. Le calage des paramètres pose des questions d'équifinalité. L'analyse exhaustive de l'espace critère montre l'existence de relations d'équifinalité entre paramètres de production d'une part, et de transfert d'autre part. Un critère de bilan à échéance variable, permet de montrer que la relation d'équifinalité de production ne dépend que des cumuls annuels de pluie et de débit et de la structure stochastique de la pluie. Une méthodologie de détermination des paramètres de production du modèle journalier est développée à partir de la seule connaissance des bilans annuels.

Mots clefs calage; equifinalite; Méditerranée; modèle conceptuel pluie-débit

Key words calibration; equifinality; Mediterranean; conceptual rainfall-runoff model

INTRODUCTION

Les approches conceptuelles globales de la relation pluie-débit à l'échelle des bassins versants ont été largement appliquées pour estimer les débits des cours d'eau à leurs exutoires. Ces modèles ne nécessitent pas de données spatiales, peu disponibles sur les bassins versants méditerranéens. Ils conduisent à des résultats acceptables, à condition que leurs paramètres aient été calibrés sur le bassin concerné. L'intercomparaison de modèles conceptuels (WMO, 1975) a mis en évidence que le choix d'un modèle dépend non seulement des caractéristiques du bassin, mais aussi de ses conditions climatiques. L'activation des mécanismes hydrologiques, que prétend représenter la modélisation, dépend de l'état hydrique du milieu, en liaison directe avec le climat. Les conditions climatiques méditerranéennes sont caractérisés par une alternance de deux saisons: une humide et une sèche durant laquelle les écoulements superficiels peuvent être très faibles et les stress hydriques importants. Cette spécificité a conduit à la mise au point du modèle MEDOR, adapté à ces conditions climatiques particulières.

LE MODELE MEDOR

Le modèle MEDOR a été mis au point sur des bassins méditerranéens libanais et français de surface moyenne (200-300 km²). Son extension est prévue sur

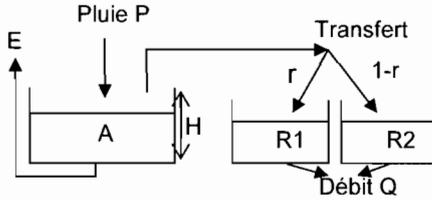


Fig. 1 Schéma conceptuel du modèle MEDOR.

l'ensemble des bassins méditerranéens. Ce modèle comporte deux éléments fonctionnels (Fig. 1):

La fonction de production Le modèle comporte un réservoir de production dont les flux d'entrée et de sortie sont commandés par son taux de remplissage: $\tau = A(t)/H$ (H étant le niveau maximum du réservoir). Le flux entrant est constitué d'une fraction de la pluie: $P(t) \times (1 - \tau^2)$. Le flux sortant E représente l'ensemble des pertes de la transformation pluie-débit d'origines diverses: évapotranspiration, flux vers les nappes, échanges avec des bassins voisins. La plupart des modèles de transfert pluie-débit exprime ces pertes au moyen d'une ETR formulée à partir d'une ETP et d'une variable d'état du bassin. Les tests de diverses formulations de E à partir de l'ETP (ETP Penman journalière datée, non datée, k.ETP, et enfin une simple constante) et de τ donnent des écarts d'adéquation non significatifs. Ce qui montre qu'en région méditerranéenne, l'état hydrique du sol est le facteur prépondérant par rapport aux variables climatiques autres que la pluie. La formulation la plus simple a été retenue: $E = EVL \times \tau$, (EVL constante optimisée correspondant au flux lorsque ce réservoir est plein).

La fonction de transfert Le transfert de l'eau se fait par divers cheminements dépendant de nombreuses caractéristiques du bassin: réseau superficiel, nature des nappes, etc. Il est modélisé par des réservoirs conceptuels adaptés qui constituent une série de filtres numériques. L'analyse corrélatoire croisée (ACC) permet la mise en évidence de pics qui définissent le nombre et les caractéristiques de ces réservoirs.

MISE EN ŒUVRE ET CALAGE DU MODELE

La mise en œuvre du modèle est détaillée sur le bassin versant du Nahr-Beyrouth, bassin libanais de 216 km². Les chroniques utilisées sont constituées par des cumuls journaliers de pluie moyenne estimée à partir de quatre postes pluviométriques, et des débits moyens journaliers concomitants à l'exutoire. L'ACC montre que deux réservoirs de transfert linéaires sont nécessaires: R_1 et R_2 de temps caractéristiques 1 et T jours. La pluie nette: $P(t) \cdot \tau^2$, est répartie entre les deux réservoirs suivant r et $1 - r$. Le modèle MEDOR appliqué au Nahr-Beyrouth, est donc un modèle à quatre paramètres: H , EVL , r , T . La détermination des paramètres optimaux nécessite le choix d'un critère d'évaluation. Le critère de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970):

$$N = 1 - \frac{\sum (q_{mes} - q_{sim})^2}{\sum (q_{moyen} - q_{mes})^2}$$

(q_{mes} : débit moyen mesuré, q_{sim} : débit moyen simulé et q_{moyen} : moyenne de q_{mes}) a été retenu. Les réservoirs conceptuels passent en fin de période sèche par un même état caractéristique de l'étiage du bassin versant. Donc, en débutant les années lors de l'étiage, les conditions initiales sont identiques et les années peuvent être considérées comme indépendantes. Cette hypothèse a été vérifiée en montrant que les résultats sont inchangés avec des chroniques constituées à partir d'un classement aléatoire des années disponibles. Ceci permet d'accoler des années non successives, ce qui est particulièrement intéressant pour les nombreux bassins méditerranéens ayant eu de longues interruptions dans les séries de mesures. De cette façon une série de 12 années a pu être constituée sur le Nahr-Beyrouth. Elle a été découpée en séries de 4 ans et de 8 ans, pour effectuer les calages de paramètres et leurs validations.

Dans une première phase de ce travail, la recherche d'un jeu de paramètres optimal a conduit à des résultats divergents suivant la méthode utilisée et les jeux de paramètres de départ. La recherche des paramètres susceptibles de conduire à une représentation correcte de l'ensemble des données se heurte au problème d'équifinalité. A architecture donnée, plusieurs jeux de paramètres peuvent être considérés comme "équivalents" en termes de comparaison de valeurs simulées par le modèle aux valeurs mesurées, ce qui définit l'équifinalité d'après Beven (1993). Ces problèmes d'équifinalité ont été sous estimés pendant longtemps, car ils sont de peu d'intérêt au plan opérationnel. Sorooshian & Gupta (1983) identifient trois causes d'équifinalité: la structure du modèle, l'inadéquation de la modélisation à décrire la réalité, les données et leurs erreurs. Dans ces conditions, une recherche directe d'un optimum a été abandonnée au profit d'une représentation exhaustive de la fonction critère dans un espace à cinq dimensions. 1 476 800 simulations ont été faites, couvrant tout l'espace "raisonnable" des paramètres. Ce nombre de simulations n'a pu être exécuté qu'en utilisant le High Performance Computing and Networking (Hreiche *et al*, 2002).

ANALYSE DE LA STRUCTURE DE LA SURFACE CRITÈRE

Les valeurs du critère en fonction des paramètres peuvent être représentées par une surface dans un espace à cinq dimensions. L'espace de production (H , EVL , N) ne dépend pas de celui de transfert (r , T , N) et peut donc être étudié préalablement. L'examen des valeurs montre que les extrema à H donné sont les mêmes que ceux à EVL donné; ceci signifie que la surface critère possède une ligne de crête, discontinuité entre deux versants de la surface (Fig. 2). La zone d'adéquation des valeurs du critère se déplace le long de la ligne de crête suivant la série des données utilisées (Fig. 3). Les valeurs de N le long de cette ligne sont suffisamment proches pour permettre de les considérer comme équivalentes. Sa projection sur le plan (H , EVL) représente une relation d'équifinalité entre les paramètres de production, ou REP. Cette dernière peut être définie avec un couple (r , T) non optimal; l'inverse est erroné. Un couple (H , EVL) non optimal engendre une pluie nette que la fonction de transfert ne peut corriger, car le bilan étant erroné et le transfert conservatif. Il est donc indispensable de déterminer les paramètres de production préalablement et indépendamment de ceux de transfert.

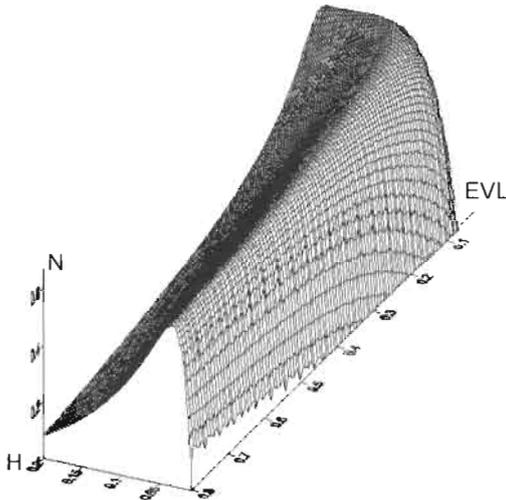


Fig. 2 Représentation de la surface critère N en fonction de (H, EVL) .

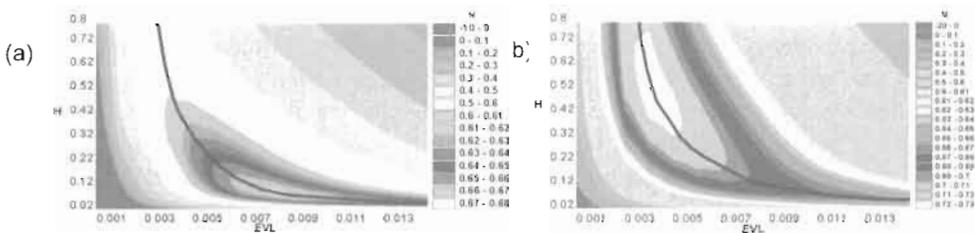


Fig. 3 Relation d'équifinalité de production (REP) et représentation des collines isocritères pour deux séries différentes: (a) 4 ans, (b) 8 ans.

COMPORTEMENT DE LA REP AVEC DES BILANS A ECHEANCE VARIABLE

Cumuls de débit à échéance variable

Les débits utilisés dans le critère de Nash sont les débits moyens journaliers. Ce critère est un indicateur des écarts entre cumuls journaliers mesurés et cumuls journaliers simulés. Si les cumuls journaliers sont correctement modélisés, ceux à 2 jours, 8 jours et 1 mois le seront aussi. À partir des débits moyens au pas journalier, il est simple de définir un débit moyen aggloméré sur une durée quelconque de n jours: $q_{agгло} = \sum q_{journalier} / n$. Ces séries "agglomérées" permettent de définir un critère de Nash

aggloméré: $N_{agгло} = 1 - \frac{\sum (q_{obsagгло} - q_{calagгло})^2}{\sum (q_{moven} - q_{obsagгло})^2}$.

Au pas de 1 jour, cette expression correspond au critère de Nash habituel; au pas annuel, le $N_{agгло}$ exprime les écarts d'écoulement annuel. L'évolution de la REP a été analysée avec un critère aggloméré utilisant des cumuls sur les durées de 2, 4, 16, 30, 365 jours et représentée sur la Fig. 4. Cette REP évolue peu, de façon non significative jusqu'au pas annuel. À l'inverse la relation d'équifinalité de transfert RET est modifiée, privilégiant le transfert rapide. À l'échelle annuelle, le transfert se fait en un seul pas, avec $r = 1$ et T indéterminé.

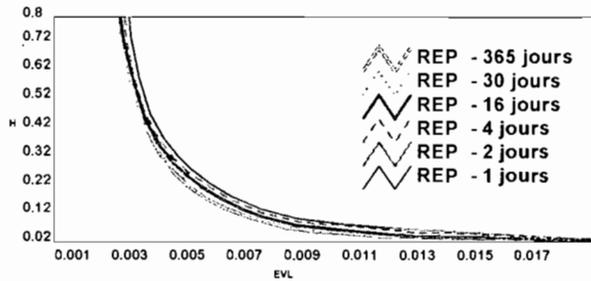


Fig. 4 Evolution de la REP avec agglomération du critère à échéance variable (2, 4, 16, 30, 365 jours).

L'agglomération des données de débit diminue la quantité d'information utilisée pour caler la REP. À l'échelle annuelle, l'information débit est divisée par 365. Cette information reste cependant suffisante pour déterminer correctement la REP. L'agglomération ne portant que sur le débit, la REP est déterminée avec des pluies journalières et des débits annuels. La question se pose alors de savoir quelle est l'information pluie qui est pertinente.

Pertinence de l'information pluviométrique journalière

Une chronique numérique de pluie constitue une réalisation particulière d'un processus stochastique défini localement. Lorsque les débits journaliers sont absents de l'information, les valeurs numériques individuelles de pluie ne peuvent pas constituer une information pertinente. Cette dernière ne peut se trouver que dans sa structure stochastique et ses cumuls annuels. La vérification de cette hypothèse a été faite par :

- Ajustement d'un modèle de pluie locale journalière sur la base d'un modèle de renouvellement alterné élaboré antérieurement (Najem, 1988).
- Génération d'une série longue de pluie à partir du modèle stochastique et tri d'années ayant les totaux annuels les plus proches de ceux de la série historique.
- Calage du modèle en utilisant la série synthétique ayant des cumuls identiques à ceux des séries mesurées.

Les REP obtenues en utilisant les données réelles de pluie et les données synthétiques sont confondues, ce qui vérifie l'hypothèse. Un changement du modèle stochastique de pluie modifie la REP, ce qui démontre que les résultats du calage sont fonction de la structure fine de la pluie. Ainsi les paramètres obtenus par le calage ne peuvent pas être liés exclusivement aux caractéristiques physiques du bassin, mais aussi au climat du bassin.

DÉTERMINATION DE LA RELATION D'ÉQUIFINALITÉ DE PRODUCTION À PARTIR DES SEULS BILANS ANNUELS

Les résultats précédents montrent qu'en un lieu donné caractérisé par un modèle stochastique de pluie défini, un modèle MEDOR de paramètres H , EVL génère une relation entre les pluies annuelles et les débits annuels. Les valeurs acceptables de (H ,

EVL) sont celles qui génèrent une relation de bilan simulé sur laquelle se placent les bilans mesurés (Fig. 5). Les bilans mesurés et simulés peuvent tout deux être ajustés par des équations à deux paramètres $Q = aP^2/(P + b)$. Les couples acceptables (H , EVL) sont ceux qui génèrent des couples (a , b) identiques à ceux obtenus à partir des bilans annuels mesurés. Il existe donc une relation biunivoque entre les couples (a , b) \Leftrightarrow (H , EVL) exprimée au moyen de tables $[(a, b) \Leftrightarrow (H, EVL)]$. La tabulation de ces fonctions régionales permet de déterminer les paramètres (H , EVL) à partir de la connaissance de a et b . Les bilans annuels mesurés, définissent une zone d'adéquation des paramètres (a , b) du modèle $Q = aP^2/(P + b)$ avec une fonction critère $C = 1 - (Q_{sim} - Q_{mes})^2/Q_{mes}^2$. Les tables (a, b) \Leftrightarrow (H, EVL) permettent d'obtenir l'image de la zone d'adéquation de l'espace (a, b) dans l'espace (H, EVL) (Fig. 6). L'application de cette méthode montre qu'il existe une ligne de crête dans la zone d'adéquation de l'espace (a, b). Cette ligne de crête produit comme image dans le plan (H, EVL) la relation d'équifinalité de production.

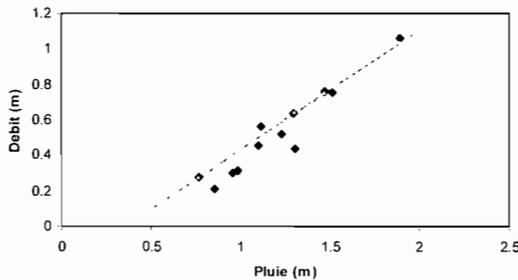


Fig. 5 Ajustement d'une relation de bilans simulés aux bilans mesurés.

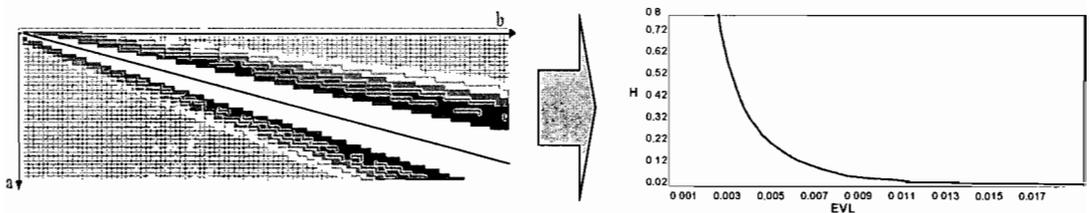


Fig. 6 Transformation de la REP du plan (a, b) obtenue par ajustement de cumulés annuels, en REP des paramètres (H, EVL) du modèle journalier.

CONCLUSIONS

L'analyse du fonctionnement et des conditions du calage du modèle MEDOR a permis de dégager des conclusions importantes. En climat méditerranéen, l'indépendance des années hydrologiques permet d'accoler entre elles des années non chronologiquement successives, et de valoriser ainsi l'information disponible dans les pays ayant subi des interruptions dans les mesures (cas du Liban en particulier). En raison des stress hydriques importants, les pertes à l'écoulement sont essentiellement liées à l'état hydrique du bassin et peu aux conditions climatiques. Une formulation ne considérant pas comme pertinente une référence climatique a été validée. Ce résultat est

particulièrement intéressant, car ces données climatiques font très souvent défaut sur beaucoup de bassins. Lors du calage, des jeux de paramètres différents, peuvent être équivalents en termes d'adéquation au critère. L'analyse des projections et des coupes de l'espace critère, explorée par un balayage exhaustif de l'espace a montré l'indépendance de la production vis-à-vis du transfert et l'existence de lignes de crête. Leurs projections expriment des relations d'équifinalité entre paramètres de production d'une part, et paramètres de transfert d'autre part. La relation d'équifinalité de production est invariante lors de l'agglomération des données de pluie et de débit dans la définition du critère. Cette propriété permet de déterminer les paramètres de la production à partir de la connaissance de la structure stochastique de la pluie et des cumuls annuels de pluie et de débit. Il est ainsi possible de déterminer les paramètres de production d'un modèle journalier lorsque les données disponibles ne sont constituées que des données de cumuls annuels de pluie et de débit qui sont en général largement disponibles sur tout le bassin méditerranéen.

REFERENCES

- Beven, K. J. (1993) Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Adv. Wat. Resour.* **16**, 41–51.
- Hreiche, A., Mezher, D., Boequillon, C., Dezetter, A., Servat, E. & Najem, W. (2002) Parallel processing for a better understanding of equifinality in hydrological models. *Proc. IEMSS 2002* vol. 1. Lugano, Switzerland.
- Najem, W. (1988) A continuous point process model for daily rainfall. *Stoch. Hydrol. Hydraul.* **2**, 189–200.
- Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. *J. Hydrol.* **273**, 282–290.
- Sorooshian, S. & Gupta, V. K. (1983) Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: the question of parameter observability and uniqueness. *Wat. Resour. Res.* **191**, 260–268.
- World Meteorological Organization (1975) Intercomparison of conceptual models used in operational hydrologic forecasting, Report 7, WMO, Geneva, Switzerland.

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