

Apport d'une caractérisation du réseau hydrographique sur la forme des crues à l'échelle d'un petit bassin-versant en zone semi-aride

Taoufik Hermassi¹
Jean-Marie Lamachère²
Slah Nasri¹
Hamadi Habaieb³

¹ Institut national de recherche en génie rural,
eaux et forêt
BP 10
2080 Ariana
Tunisie

<taoufikhermassi@yahoo.com>
<nasri.slah@iresa.agrinet.tn>

² Institut de recherche pour le développement
Rabat
15, rue Abou-Derr
BP 8967
10000 Rabat-Agdal
Maroc

<jean-marie.lamachere@ird.fr>

³ Institut national agronomique de Tunisie
43, avenue Charles-Nicolas
1082 Tunis-Mahrajène
Tunisie
<hbaieb.hamadi@inat.agrinet.tn>

Résumé

Cet article a pour but d'apprécier l'impact d'une prise en compte du réseau hydrographique dans la définition des crues reconstituées par un modèle hydrologique à base physique en zone semi-aride. Pour ce faire, sur le petit bassin-versant cultivé de Fidh-Ali, localisé au centre de la Tunisie, nous avons mis en œuvre un modèle utilisant l'équation de Green et Ampt comme fonction de production, bien adaptée aux conditions de ruissellement et d'infiltration en zone semi-aride, et l'équation de l'onde cinématique comme fonction de transfert. Le modèle utilisé permet le découpage du bassin-versant en panneaux trapézoïdaux hydrologiquement homogènes. Afin d'améliorer la reconstitution des crues, nous avons individualisé les chemins de l'eau en panneaux rectangulaires ayant les principales caractéristiques topographiques du lit de l'oued Fidh-Ali et de ses principaux affluents. Le calage et la validation du modèle hydrologique ont été réalisés pour des conditions d'états de surface des sols favorables au ruissellement, avant les labours d'automne. Un modèle de bilan hydrique a permis de déterminer l'humidité initiale des sols avant chaque averse. La prise en compte du réseau hydrographique, par une représentation simplifiée dans un modèle à base physique semi-distribué tel que le modèle « abc », permet finalement, sur la base d'un calage du débit maximum de crue, d'améliorer le critère de Nash de 0,8 à 0,95 et de 30 % l'estimation du volume ruisselé. Le gain est donc significatif, malgré les autres sources d'imprécision liées à la connaissance de la répartition spatiale des pluies et à l'estimation du débit maximal observé, connu avec une précision de 5 % sur le bassin-versant de Fidh-Ali.

Mots clés : modélisation hydrologique, réseau hydrographique, zone semi-aride.

Abstract

Contribution of hydrographic network characterization on flow forms at the small catchment area scale in a semiarid zone

The purpose of this article is to assess the impact of the hydrographic network on simulated flows using a distributed physical hydrological model in a semi-arid zone. For this work, we implemented a hydrological model on the small-cultivated catchment area of Fidh-Ali located in the central part of Tunisia. We used the Green and Ampt equation as a production function as it is well adapted to runoff and infiltration conditions in a semi-arid zone and the kinematic wave equation as a transfer function. The model makes it possible to separate the catchment area into homogeneous hydrological trapezoidal panels. In order to improve flow simulation,

we individualized the watercourses in rectangular panels with the principal topographic characteristics of the Fidh-Ali wadi streambed and its principal effluents. The calibration and validation of the hydrological model were carried out for soil surface conditions favourable to runoff before autumn ploughing. A water balance model makes it possible to determine the initial soil moisture before each period of rainfall. Taking the hydrographic network into consideration through a simplified representation in a physical semi distributed model such as the "abc" model based on calibration of maximum discharge improves the Nash criterion from 0.8 to 0.95 and the estimation of runoff volume by 30%. The profit is thus significant, in spite of the other sources of inaccuracy relative to the limited knowledge of rainfall space distribution and the estimation of the observed maximum discharge, known with 5% accuracy for the Fidh-Ali catchment area.

Key words: hydrographic network, hydrological modeling, semi-arid zone.

L'objectif de cet article est d'analyser l'impact d'une prise en compte du réseau hydrographique dans la définition des crues simulées par un modèle hydrologique à base physique pour un petit bassin-versant d'une région semi-aride. La reconstitution des crues à l'exutoire de petits bassins-versants est, en effet, utile au dimensionnement des ouvrages collinaires, en particulier pour la protection de ces ouvrages contre les fortes crues [1]. Cette reconstitution nécessite l'utilisation de la modélisation hydrologique et la connaissance des caractéristiques hydrodynamiques des sols, lesquelles sont déterminées par la nature des sols et leurs états de surface, qui varient en fonction de l'occupation des sols, des travaux agricoles et de la croissance de la végétation [2, 3]. Le réseau hydrographique étant par ailleurs l'une des caractéristiques les plus visibles et les plus importantes du bassin-versant, une meilleure connaissance des caractéristiques hydrauliques du cours d'eau devrait donc permettre de mieux simuler les écoulements en améliorant la définition des hydrogrammes reconstitués par la modélisation [4]. D'après Sharma et Murthy [5], les versants contrôlent en zone aride la fonction de production et la genèse du ruissellement, alors que le réseau hydrographique contrôle la fonction de transfert. Plusieurs modèles hydrologiques distribués, tels que CELMOD [6], TOPMODEL [7] et KINEROS [8] appartenant à des écoles hydrologiques diverses, ont été développés pour simuler les mécanismes complexes du cheminement de l'eau sur un bassin-versant lors des crues. Les modèles spatialisés à base physique présentent un avantage majeur sur les autres modèles, en raison du caractère universel des équations utilisées et du fait que les paramètres physiques sont moins dépendants de la structure du modèle et de la calibration. Sur le bassin-versant de Fidh-Ali, en zone semi-aride tunisienne, les processus de ruissellement sont de type Hortonien [9],

c'est-à-dire que le ruissellement dépend de l'intensité des pluies et de la capacité d'infiltration des sols, ceux-ci n'étant jamais saturés par remontée du niveau des nappes. Dans ces conditions, il n'est pas possible d'utiliser des modèles tels que TOPMODEL, plus adapté aux zones tempérées, mais il est possible d'utiliser des modèles ayant comme fonction de production l'équation de Green et Ampt (1911) [10] ou ses dérivés. Dans ce qui suit, pour reconstituer les crues du bassin-versant de Fidh-Ali, nous utiliserons donc le modèle « abc » [11], très similaire au modèle KINEROS. C'est un modèle à base physique semi-distribué, ayant comme fonction de production l'équation de Green et Ampt et comme fonction de transfert l'équation de l'onde cinématique. Dans ce modèle, la représentation du milieu s'effectue par un découpage du bassin-versant en panneaux trapézoïdaux hydrologiquement homogènes, puis en individualisant dans ce découpage le réseau hydrographique par des panneaux rectangulaires ayant les principales caractéristiques topographiques du lit de l'oued Fidh-Ali et de ses principaux affluents.

Pour simplifier le calage et la validation du modèle, nous utiliserons des crues du début de la saison des pluies (septembre à octobre), après deux mois de saison sèche et chaude, avant que les travaux culturaux aient modifié le comportement des parcelles cultivées et que le couvert végétal, par son développement, ait modifié le comportement des sols. Pour caractériser le comportement des sols à l'infiltration, nous utiliserons les résultats obtenus sous simulations de pluies à l'échelle du mètre carré [12, 13].

Cet article commence par une description du bassin-versant de Fidh-Ali et la présentation des données utilisées : simulations de pluies à l'échelle du mètre carré et crues à l'échelle du bassin-versant. Il se poursuit par la présentation du modèle « abc » et de la méthode utilisée pour son

application aux échelles du mètre carré et du bassin-versant. Il se termine par l'exposé et la discussion des résultats obtenus dans la caractérisation hydrodynamique des sols pour une situation favorable au ruissellement et dans la définition de l'hydrogramme de crue par la prise en compte du réseau hydrographique.

Site étudié et mesures

Bassin-versant de Fidh-Ali

Le bassin-versant de Fidh-Ali est situé à environ 15 km au nord de la délégation de Haffouz dans le gouvernorat de Kairouan, au centre de la Tunisie (*figure 1*). Sa superficie est de 212 hectares.

Le cours d'eau principal, bien encaissé dans un substratum marneux, vient alimenter l'oued Merguellil sur sa rive droite, environ 20 km en amont du barrage d'El Haouareb. Une retenue collinaire, dont la capacité initiale était de 134 700 m³ en 1991, a été créée à l'exutoire de ce bassin. Un dispositif d'enregistrement automatique des hauteurs du plan d'eau et des chutes de pluies a été installé, sur la digue de cette retenue, en janvier 1993. Des relevés bathymétriques et topographiques ont été effectués périodiquement, tous les deux à trois ans, pour actualiser les barèmes d'étalonnage de cette retenue.

La lithologie du bassin-versant est composée essentiellement de formations marnogypseuses avec des bancs calcaires lumachelles. Les sols sont calcimagnésiques brun calcaires, vertiques sur marnes gypseuses ou modaux sur calcaires marneux (*figure 2*).

Le bassin-versant est occupé pour 48 % de terres agricoles cultivées et pour 52 % de parcours dégradés (*figure 3*). Le bassin-versant, comme tous ceux de la zone semi-aride, est caractérisé par des rotations culturales alternant cultures céréalières et jachères ; d'une année à l'autre,

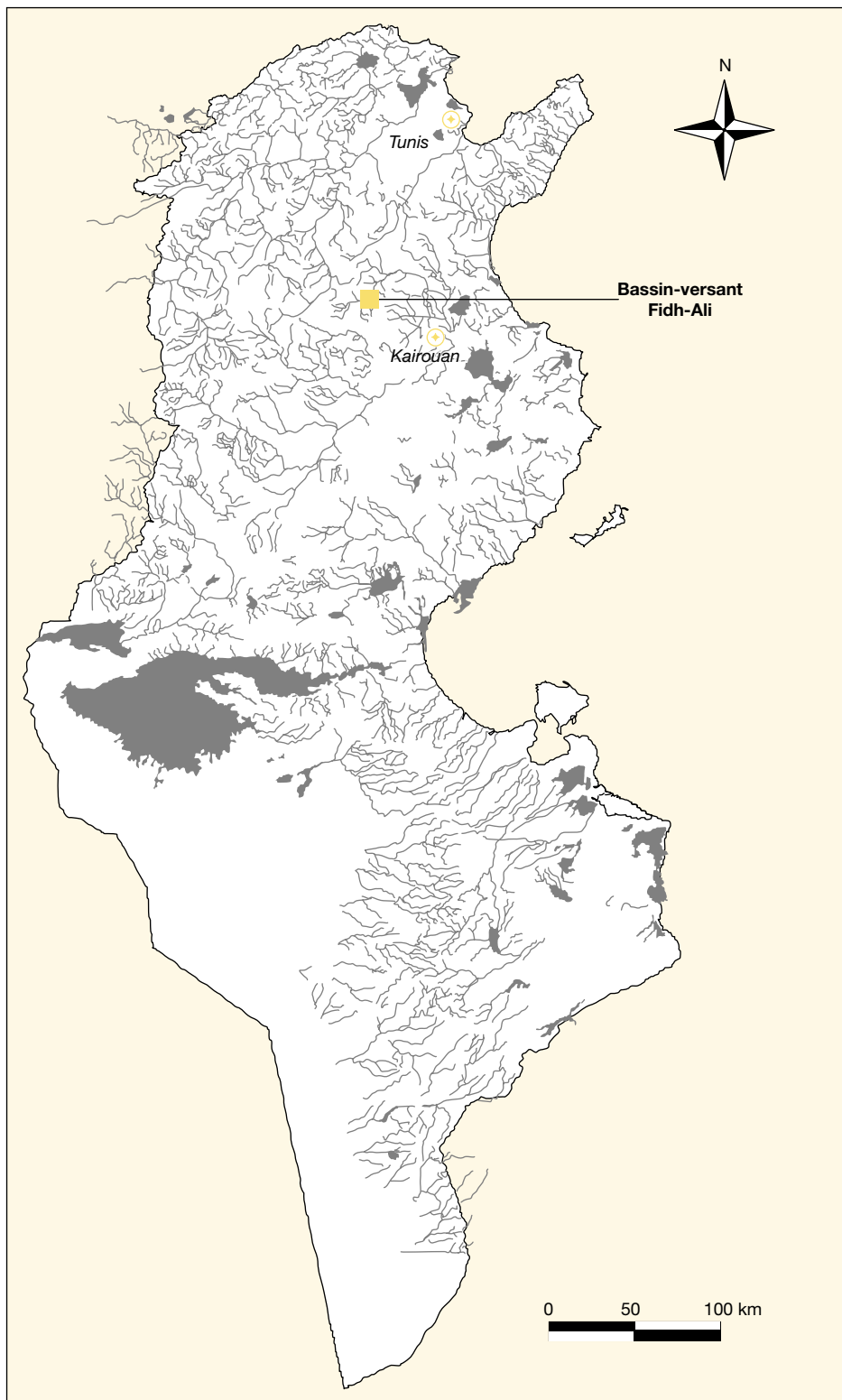


Figure 1. Localisation du bassin-versant de Fidh-Ali.

environ 30 % de la superficie du bassin est cultivée. Le travail du sol consiste en un labour à la charrue à disques et, éventuellement, en un passage croisé d'un cultivateur avant les semis.

Réseau hydrographique du bassin-versant de Fidh-Ali

Pour la caractérisation du réseau hydrographique du bassin-versant de Fidh-Ali,

nous avons réalisé des nivellements topographiques au tachéomètre laser, en découpant les principaux cours d'eau en tronçons homogènes nivelés par plusieurs profils en travers (210 profils en travers) et

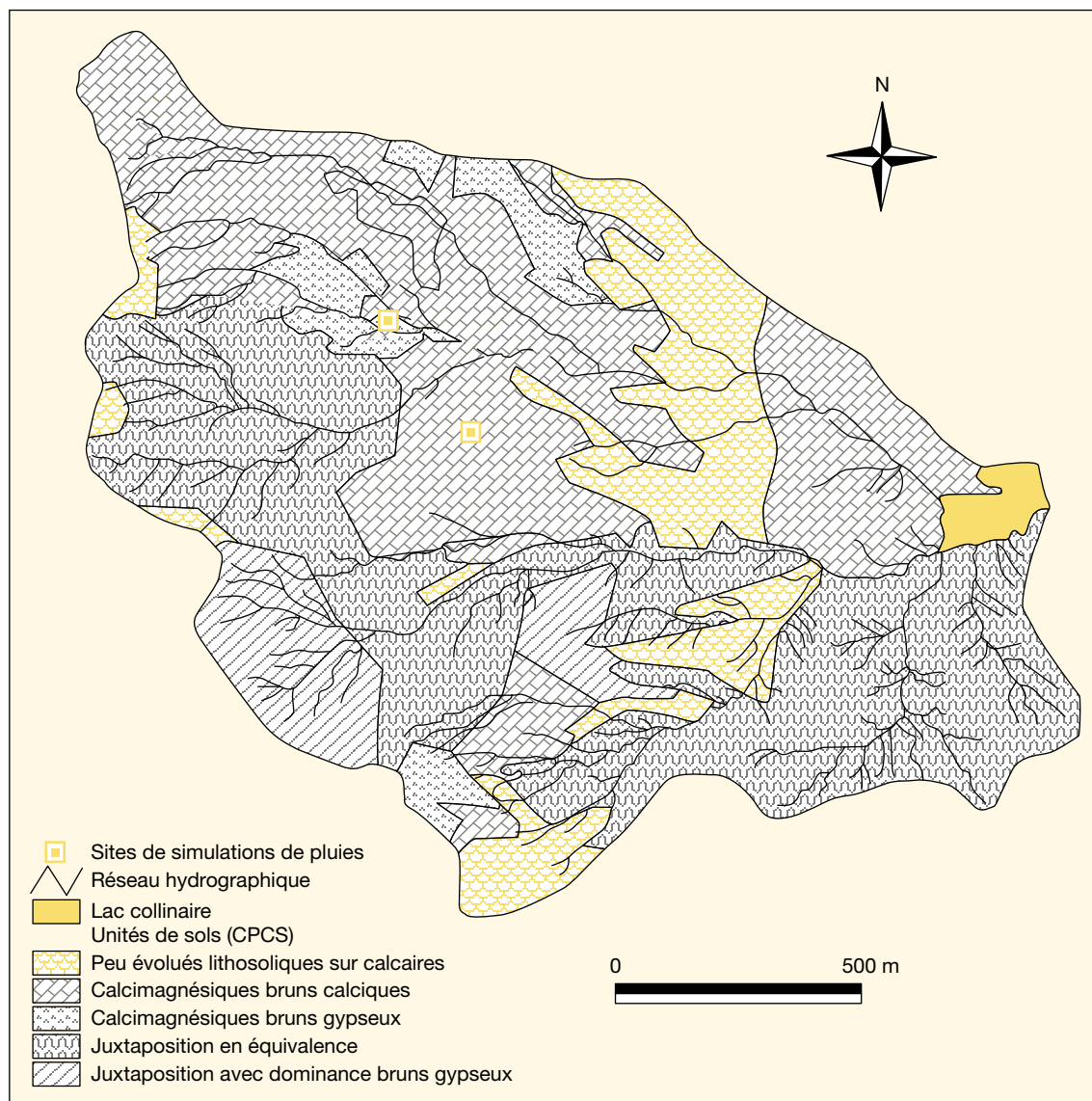


Figure 2. Carte des types de sols du bassin-versant de Fidh-Ali [12].

un profil en long pour chacun des quatre principaux tronçons. Afin de restituer au mieux la géométrie réelle des tronçons, le nivellement a été réalisé avec un minimum de cinq points sur chaque profil en travers (axe, limites basses et hautes des talus) et autant de points que nécessaire sur chaque profil en long, afin de caractériser les variations des pentes longitudinales, les ressauts, les chutes et les changements de direction. À partir de ce nivellement, on peut déterminer les caractéristiques suivantes : largeur du lit mineur de l'oued, largeur du lit majeur, profondeurs des lits, pentes des berges, pentes longitudinales du lit. Ces caractéristiques ont été déterminées à partir d'une présentation des données sous la forme de tracés en plan, de profils en long et de profils en travers réalisés par des logiciels spécia-

lisés comme le logiciel COVADIS 2000 [14].

Pour la mise en œuvre du modèle « abc », nous utiliserons pour chaque tronçon la pente moyenne du tronçon et la largeur moyenne du lit majeur correspondant aux plus hautes eaux.

Observations hydrologiques à l'échelle du bassin-versant et choix des crues

Les observations pluviométriques et hydro-métriques ont commencé, en janvier 1993, sur le lac de Fidh-Ali [15], et elles ont été arrêtées en novembre 2004, en raison de son envasement. Un pluviographe a été installé à l'exutoire du bassin, sur la digue du barrage (figure 3). Jusqu'en septembre 2001, un autre pluviographe était

installé à la limite nord du bassin. La pluviométrie moyenne annuelle au barrage de Fidh-Ali est de l'ordre de 327 mm sur la période 1993-2004.

Sur la période 1993-2004, nous disposons d'environ 30 crues dont seulement 11 dépassent un volume ruisselé de 10 000 m³, soit 5 mm de lame ruisselée. La figure 4 présente les relations entre les lames ruisselées sur le bassin-versant de Fidh-Ali et les hauteurs des pluies correspondant aux averses ayant engendré ces crues.

La figure 4 montre que les plus fortes crues peuvent être alignées sur une droite de ruissellement maximal dont l'équation est la suivante : $L_r = 0,62 (P-1)$, où L_r est la lame ruisselée et P la hauteur pluviométrique de l'averse. Cette droite de ruissellement maximal correspond à des aver-

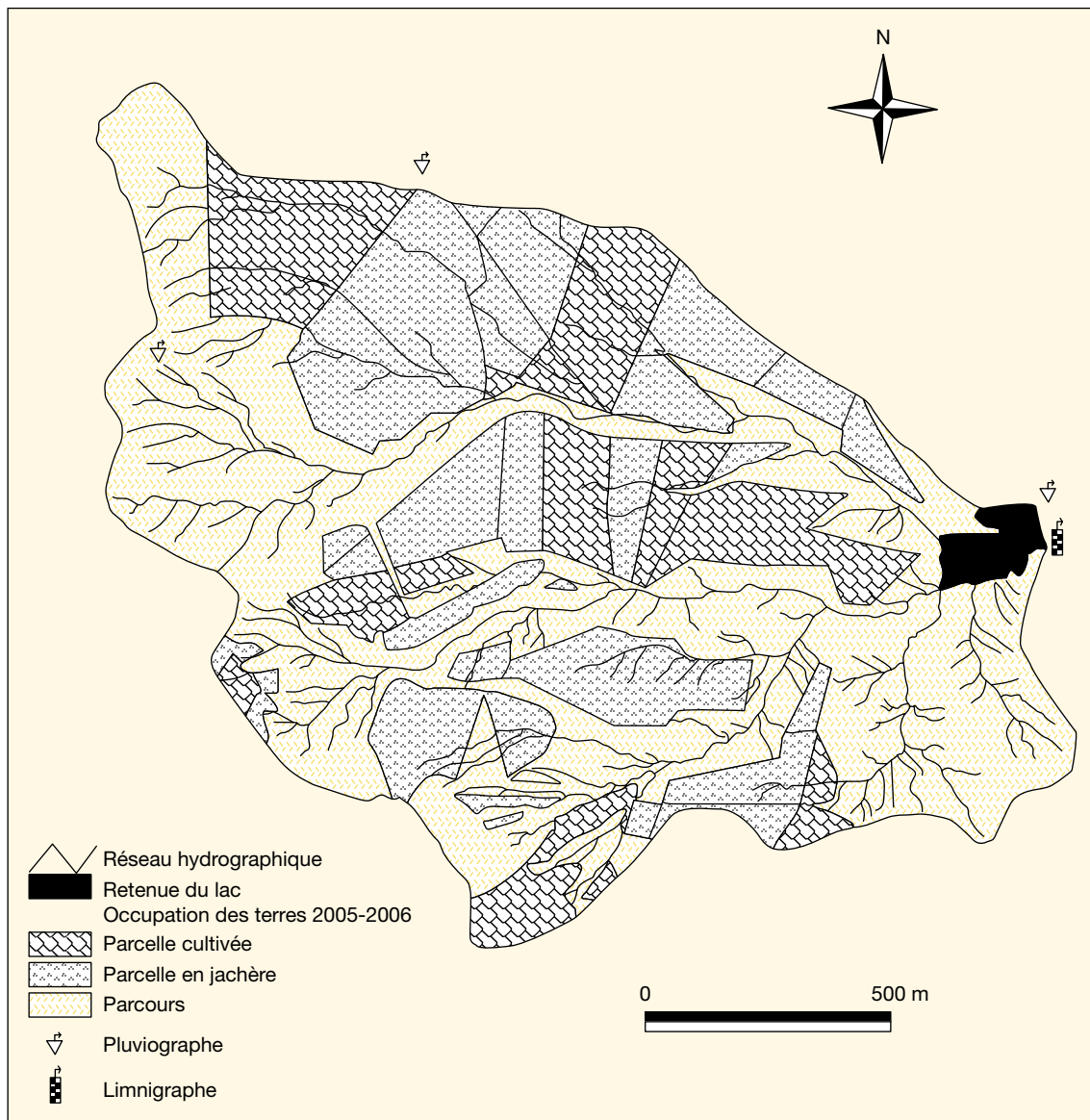


Figure 3. Occupation des terres du bassin-versant de Fidh-Ali au cours de l'année 2005-2006.

ses automnales à forte intensité tombant sur des sols encroûtés et bien humectés par des averses antérieures.

Pour le calage et la validation des paramètres du modèle « abc », nous avons choisi les averses du 6 octobre 1998 et du 29 septembre 2001, survenant au début de l'automne. Elles sont de forte intensité – respectivement 62 et 102 mm/h en 15 min – et de courte durée – 15 min pour la première et 20 min pour la seconde. Au début de l'automne, les sols de la zone semi-aride tunisienne ont, en effet, un faible couvert végétal et une faible rugosité, créant des conditions d'état de surface des sols favorables au ruissellement. L'indice d'antériorité des pluies de Kohler et Linsley [16], pour ces deux averses, est égal à 6 mm pour la première averse, à 0,8 mm

pour la seconde. Le sol est donc nettement plus sec pour l'averse du 29 septembre 2001, en revanche, l'intensité de pluie est nettement plus forte. Ces averses n'ont pas généré de déversement au barrage de Fidh-Ali, la précision dans l'estimation des volumes et des débits ne dépend donc que de la précision dans l'estimation des volumes stockés, laquelle peut être estimée de l'ordre de 5 %, alors que la précision dans l'estimation des débits déversés est de l'ordre de 20 %.

Observations hydro-pédologiques à l'échelle du mètre carré

La simulation de pluie permet d'analyser finement les processus de ruissellement et d'infiltration sous des conditions contrôlées d'intensité des pluies, d'état de surface et

d'humectation des sols [2, 17]. Des observations hydro-pédologiques ont été effectuées sur le bassin-versant de Fidh-Ali, à l'échelle du mètre carré, sous la forme de simulations de pluies. Une première campagne de simulations a été réalisée [12] entre le 25 mars et le 10 avril 1999 sur les deux principaux types de sols du bassin-versant : les sols bruns gypseux et les sols bruns calcaires, qui correspondent aux deux sites localisés sur la figure 2 (site A pour les sols bruns gypseux, site B pour les sols bruns calcaires). Sur chaque site, trois placettes de 1 m² ont été sélectionnées sur les parcelles cultivées couvertes par du blé, avec un taux de recouvrement végétal de 30 à 40 % ; une placette a été sélectionnée sur les jachères des sols bruns gypseux avec un taux de

Modèle hydrologique « abc » et sa paramétrisation

Modèle hydrologique « abc »

Le modèle hydrologique « abc » est un modèle physique semi-distribué développé en 1996 par Ana Maia, Bernard Cappelaere et Christophe Peugeot [11]. Ce modèle est dérivé du modèle r.water.fea [18]. Il utilise, au niveau de chaque panneau, l'équation de Green et Ampt comme fonction de production et l'équation de l'onde cinématique comme fonction de transfert pour modéliser le ruissellement et reconstituer l'hydrogramme de crue à l'exutoire de la surface drainée. Dans sa version initiale, le modèle « abc » représente le bassin-versant par un découpage de la surface drainée en panneaux trapézoïdaux uniformes. L'intensité de pluie, au pas de temps de la minute, constitue une des principales variables d'entrée du modèle.

Les paramètres de la fonction de production sont ceux de l'équation de Green et Ampt :

$$i(t) = K_s + K_s (h - h_f)(\theta_s - \theta_i)/l(t)$$

Où $i(t)$ est la vitesse d'infiltration à l'instant t , K_s la conductivité hydraulique à saturation, θ_i l'humidité initiale du sol au-dessous du front d'humectation, θ_s l'humidité à saturation, h_0 la charge de pression en surface, h_f la charge de pression au front d'humectation, et $l(t)$ la lame infiltrée à l'instant t depuis le début de l'averse.

Les paramètres de la fonction de transfert du modèle « abc » sont pour chaque unité morphologique du bassin-versant (chaque panneau) : la pente (p), la rugosité hydraulique moyenne (n), la longueur (L) et la surface (S).

L'équation de l'onde cinématique est résolue à partir d'une formulation simple de la condition initiale et de la condition à la limite supérieure. En condition initiale, la hauteur d'eau est supposée uniforme au début de chaque pas de temps. Elle est calculée par la moyenne spatiale du profil de hauteur d'eau sur la portion de versant considérée. La condition à la limite supérieure est une condition de flux nul. On suppose que l'unité de versant u est alimentée en eau par l'unité $u-1$, située en amont. Le volume d'eau reçu par l'unité u (panneau) pendant le pas de temps Δt est réparti instantanément au début du pas de temps sous la forme d'une lame d'eau uniforme qui s'ajoute à celle de la condition initiale.

Détermination de l'humidité initiale des sols (i)

Pour déterminer l'humidité initiale des sols (θ_i) avant les crues ou avant les averses

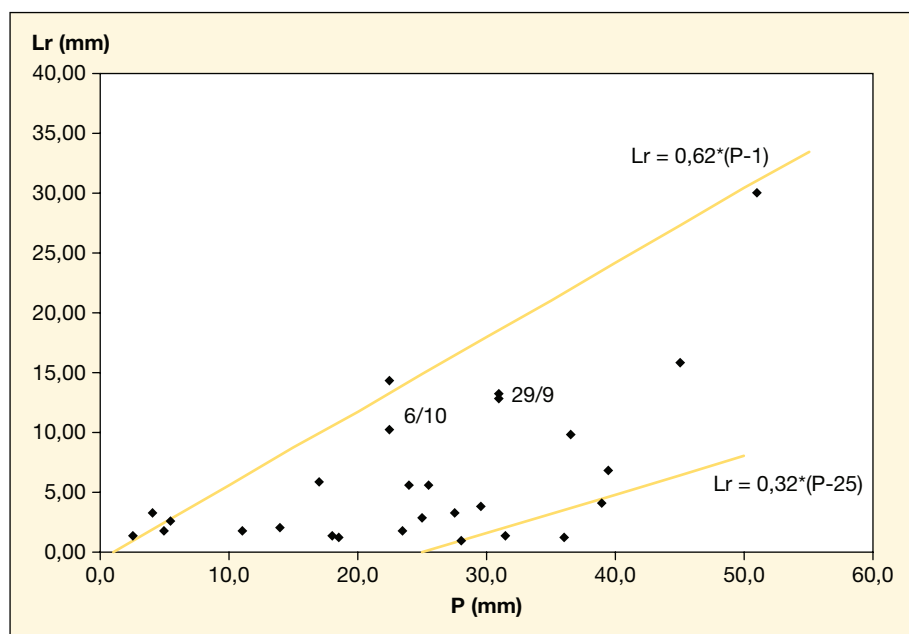


Figure 4. Variation de la lame ruisselée (L_r) en fonction de la pluie (P). 6 octobre et 29 septembre indiquent les dates des crues.

recouvrement végétal herbacé de 35 %. Ces taux de recouvrement végétal correspondent aux taux maximaux de l'année 1998-1999 qui peut être considérée comme une année à pluviométrie légèrement déficitaire (300 mm) par rapport à la moyenne (327 mm), avec des pluies localisées au début de l'automne et vers la mi-janvier. Les pluies hivernales étant peu favorables au développement de la végétation herbacée, la répartition des pluies au cours de l'année 1998-1999 a été plutôt défavorable au développement des cultures et peu favorable au développement de la végétation naturelle.

Pour la première campagne, les protocoles pluviométriques expérimentaux des simulations de pluies ont été standardisés conformément au descriptif du tableau 1.

Une seconde campagne de simulations de pluies a été réalisée en avril 1999 exclusi-

vement sur les sols bruns gypseux, sur cultures et jachères [13], avec un protocole pluviométrique comprenant une première intensité de 30 à 32 mm/h pendant une heure et une seconde intensité de 40 à 42 mm/h pendant quatre heures. Ce protocole spécifique a été appliqué pour tester le comportement des sols bruns gypseux à des averses exceptionnellement longues.

Pour chaque placette, quel que soit le protocole, un étalonnage des intensités de pluie est réalisé, permettant de connaître, avec une excellente précision, les intensités de pluie simulées. Les ruissellements sont observés par l'enregistrement des hauteurs d'eau dans une cuve de section 100 cm² avec une précision de 1 cm qui correspond à une lame ruisselée égale au dixième de millimètre. La figure 5 présente les résultats obtenus sur la placette FDA1, sur sols bruns gypseux cultivés.

Tableau 1. Protocole pluviométrique des simulations de pluies sur le bassin-versant de Fidh-Ali.

Type d'averse	Durée entre averses en heures	Durée de l'intensité en minutes	Intensité de pluie en mm/h	Période de retour de l'intensité de pluie en années
P1		20	30 à 32	6
		15	40 à 42	7
		15	60 à 62	12
		10	85 à 90	16
		10	120 à 150	18
P2	24	20	30 à 32	6
		15	40 à 42	7
		15	60 à 62	12
P3	0,5	10	85 à 90	18

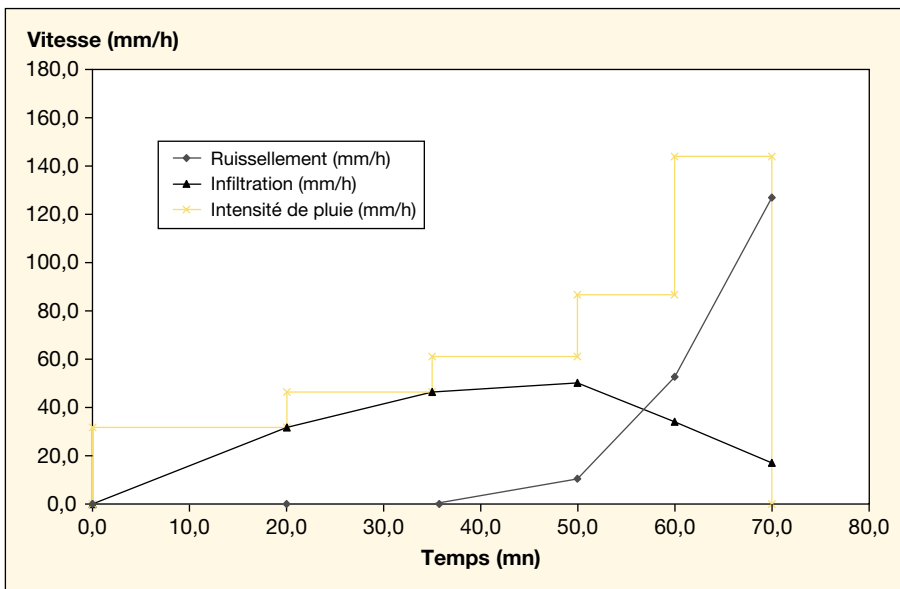


Figure 5. Variations du débit ruisselé et de la vitesse d'infiltration sur sols bruns gypseux cultivés du bassin-versant de Fidh-Ali au cours des simulations de pluies effectuées du 25 au 26 mars 1999.

expérimentales des simulations de pluies, il nous est apparu indispensable d'utiliser un modèle de bilan hydrique superficiel permettant de calculer l'humidité initiale à partir des chutes de pluies, de l'évapotranspiration potentielle et d'une connaissance sommaire du fonctionnement hydrique des sols, en particulier du déstockage des horizons superficiels en relation avec leurs capacités de drainage et avec le développement du couvert végétal [19].

Le modèle développé est un modèle à réservoir relativement simple, fondé sur le calcul à l'échelle journalière de l'évolution du stock d'eau d'une couche de sol en fonction de la pluviométrie, de la demande climatique et de la capacité de rétention en eau du sol.

Le modèle fonctionne sur la récurrence journalière de la relation de l'équation suivante :

$$RH_i = RH_{i-1} + (P_i - R_i) - ETR_i - D_i + \Delta zh_i$$

Avec :

- RH_i : réserve hydrique du sol du jour i (fin du jour i) ;
- RH_{i-1} : réserve hydrique du sol le jour $i-1$;
- P_i : précipitations du jour i ;
- ETR_i : évapotranspiration de la culture pendant le jour i ;
- D_i : drainage du sol pendant le jour i ;
- R_i : ruissellement ou irrigation pendant le jour i ;
- Δzh_i : réserve hydrique supplémentaire du sol correspondant à la croissance racinaire de la culture pendant la période Δj .

Dans ce modèle, le sol est considéré comme un seul réservoir caractérisé par un minimum et un maximum de sa capacité de stockage qui correspondent, pour le minimum, à l'eau résiduelle et, pour le maximum, à la saturation du sol. Le stock hydrique d'un sol au jour j est fonction des apports (lame d'eau infiltrée) et du stock hydrique au jour $j-1$, auquel on soustrait les pertes par évapotranspiration et drai-

nage, cette perte journalière étant affectée à tout le réservoir sol.

À l'échelle du mètre carré

Pour déterminer la conductivité hydraulique à saturation K_s et la poussée capillaire $(h_0 - h_f)$ à partir du produit $K_s (h_0 - h_f) (\theta_s - \theta_i)$ de l'équation de Green et Ampt, nous avons utilisé les résultats des simulations de pluies. En effet, cette méthode apparaît actuellement comme la méthode la plus robuste. Elle possède l'avantage, avec une mesure réalisée sur 1 m^2 , d'être plus intégratrice que toutes les autres méthodes de mesures, ce qui limite les problèmes de changement d'échelle au moment de la paramétrisation des modèles [20]. Pour déterminer les paramètres de l'équation de Green et Ampt, nous avons reporté sur un graphique (figure 6) la vitesse d'infiltration $[i(t)]$ en fonction de l'inverse de la lame infiltrée $[1/l(t)]$. La conductivité hydraulique à saturation (K_s) correspond alors à l'ordonnée à l'origine de la droite d'ajustement reliant $[i(t)]$ et $[1/l(t)]$. On peut également considérer que dans les conditions expérimentales de la simulation de pluies, h_0 est petit devant h_f . L'humidité initiale θ_i étant déterminée avant chaque averse par les mesures d'humidité ou par calcul à l'aide du modèle de bilan hydrique, et l'humidité à saturation θ_s étant déterminée au laboratoire, il est possible de calculer la poussée capillaire effective expérimentale h_f à partir du produit $K_s (h_0 - h_f) (\theta_s - \theta_i)$.

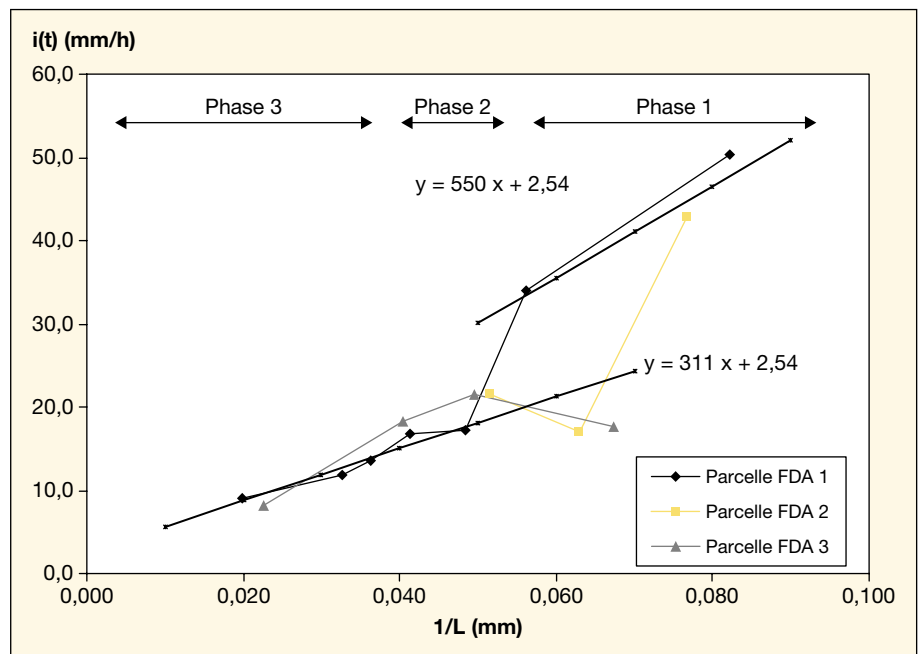


Figure 6. Ajustement des paramètres de l'équation de Green et Ampt sur les sols bruns gypseux cultivés du bassin-versant de Fidh-Ali.

À l'échelle du bassin-versant

À l'échelle du bassin-versant, le modèle « abc » ne simule que des écoulements superficiels. Il ne permet pas de simuler une restitution d'eaux souterraines au réseau hydrographique par affleurement de nappes phréatiques. Il ne simule, en effet, les échanges entre la surface et les nappes phréatiques que dans le sens de la réalimentation des nappes par infiltration et percolation, ce qui correspond bien à l'hydrologie des milieux semi-arides.

La mise en œuvre du modèle « abc » nécessite le découpage du bassin-versant en panneaux trapézoïdaux hydrologiquement homogènes, dont le fonctionnement hydrologique est déterminé par leurs caractéristiques topographiques (pente, surface, longueur), par le type de sol, d'occupation du sol et d'état de surface du sol avant chaque averse qui déterminent les paramètres de la fonction de production (rétention superficielle, conductivité hydraulique à saturation, poussée capillaire effective, humidité à saturation, humidité initiale avant l'averse) et un des paramètres de la fonction de transfert : la rugosité hydraulique.

Dans une première étape, nous avons réalisé un découpage du bassin en tenant compte de l'organisation générale du réseau hydrographique. Nous avons ensuite utilisé la topographie, paramètre de la fonction de transfert, pour subdiviser les panneaux afin d'homogénéiser leurs pentes, puis la carte pédologique afin de caractériser chaque panneau par un seul type de sol. Le cas échéant, les panneaux ont ensuite été subdivisés une dernière fois afin de tenir compte de l'occupation des sols (cultures, jachères ou pâturage).

Dans une seconde étape, pour mieux tenir compte du réseau hydrographique, nous avons représenté les principaux cours d'eau par des panneaux rectangulaires dont les caractéristiques ont été extraites des nivellements topographiques : pente du lit, largeur et longueur des panneaux. Les largeurs des panneaux ont été prises égales à celles du lit majeur.

Après avoir découpé le bassin-versant en unités hydrologiques homogènes, la mise en œuvre du modèle nécessite, pour chaque type d'unité hydrologique et pour chaque averse, l'affectation d'un jeu de paramètres adéquat permettant de reconstituer avec une précision satisfaisante la crue générée par l'averse qui lui est associée. Le calage du modèle s'effectue sur un lot d'événements pluvieux et de crues, la validation du modèle s'effectue sur un autre lot d'événements. Or, l'état de surface du sol et son recouvrement végétal, variables au fil des saisons et du travail du sol, déterminent au moins trois paramè-

tres de la fonction de production (la rétention superficielle, la conductivité hydraulique et la poussée capillaire effective) et un paramètre de la fonction de transfert (la rugosité).

Pour analyser l'impact de la prise en compte du réseau hydrographique dans la définition des crues, nous avons simplifié la définition des paramètres d'entrée du modèle en situant les crues à modéliser au cours des mois de septembre et octobre, en fin de saison sèche et au début de la nouvelle saison des pluies, avant les labours, à une période au cours de laquelle la végétation herbacée ne s'est pas encore développée et pour laquelle les rugosités topographique et hydraulique des sols sont minimales. Dans ces conditions, la rétention superficielle des sols peut être considérée comme nulle, la conductivité hydraulique à saturation et la poussée capillaire effective peuvent être déterminées à partir d'une caractérisation hydrodynamique des principaux types de sols du bassin-versant sous simulations de pluies. L'humidité initiale a été calculée par utilisation d'un modèle de bilan hydrique superficiel des sols. L'humidité à saturation peut être déterminée à partir de la littérature internationale sur les propriétés hydriques des sols en fonction de leurs textures ou par échantillonnage des sols et des mesures au laboratoire. La rugosité hydraulique est déterminée à partir de la littérature spécialisée [21], en tenant compte de l'état de surface du sol et de sa couverture végétale.

À l'échelle du bassin, les tests de sensibilité du modèle « abc » aux variations de la rugosité [11] ayant montré qu'une diminution de 30 % de la rugosité hydraulique des sols provoque une augmentation de 20 % du volume ruisselé et de 50 % du débit maximal, nous éviterons d'utiliser ce paramètre pour le calage du modèle, et nous nous contenterons des valeurs fournies par la littérature spécialisée pour des sols nus à faible couverture végétale. Pour les sols nus non cultivés, la valeur moyenne du coefficient de Manning est de l'ordre de 0,02, alors qu'elle est de 0,03 pour les sols nus après récolte.

Pour la détermination du volume ruisselé, les tests de sensibilité du modèle « abc » à l'échelle du champ [11] ayant montré que la conductivité hydraulique à saturation est un paramètre deux fois plus sensible que la poussée capillaire effective, nous utiliserons la conductivité hydraulique à saturation comme paramètre de calage. Les critères utilisés pour le calage sont le critère de Nash, le débit maximal, la forme de la crue (coefficient de pointe, temps de base et temps de montée) et le débit moyen ruisselé, le volume écoulé sur le temps de base.

Le critère de Nash appliqué aux débits ruisselés [22] est de la forme :

$$CNash = 1 - \frac{\sum(Q_o - Q_c)^2}{\sum(Q_o - Q_m)^2}$$

Où Q_o est le débit observé, Q_c le débit calculé et Q_m le débit moyen observé.

Le coefficient de pointe est de la forme : $CP = Q_{max}/Q_{moy}$, Q_{max} étant le débit maximum et Q_{moy} le débit moyen.

Caractérisation hydrodynamique des sols

En référence à la carte pédologique de la figure 2, les sols du bassin-versant de Fidh-Ali apparaissent finalement composés de trois principaux types de sols :

- des sols calcimagnésiques brun gypseux, à texture limoneuse à limonoargileuse, localisés au sud du bassin-versant et couvrant environ 45 % de la superficie du bassin-versant ;
- des sols calcimagnésiques brun calcaires, aux textures limonoargilosableuse en surface et argilosableuse en profondeur, localisés au nord du bassin-versant et couvrant 45 % de la superficie du bassin-versant ;

- des lithosols sur calcaires localisés essentiellement en amont du bassin et formés de bad-lands non cultivées ;

Les lithosols peuvent être assimilés à des sols bruns calcaires, mais avec des conditions de ruissellement plus importantes à cause de la dégradation du couvert végétal. Nous avons donc considéré, pour les crues sélectionnées et en l'absence d'informations disponibles sur le fonctionnement hydrique des lithosols, que ces sols ont les mêmes caractéristiques hydrodynamiques que les sols bruns calcaires nus très encroûtés.

Détermination de l'humidité initiale avant chaque averse

Les caractéristiques hydriques des sols du bassin-versant de Fidh-Ali, consignées au tableau 2, ont été utilisées comme paramètres d'entrée du modèle de bilan hydrique. L'humidité au point de flétrissement et l'humidité à la capacité au champ ont été déterminées au laboratoire à partir d'échantillons prélevés sur le terrain [12]. Les valeurs des humidités résiduelles et des humidités à saturation sont extraites de la littérature internationale sur les propriétés hydriques des sols en fonction de leurs textures. En ce qui concerne la vitesse de percolation, pour une humidité supérieure à la capacité au champ, nous avons pris en considération les observations d'humidités des sols effectuées en 2003 [19], sur le

Tableau II. Caractéristiques hydriques des sols du bassin-versant de Fidh-Ali.

	Sol brun gypseux		Sol brun calcaire	
Profondeur (cm)	0-70	0-30	30-70	
Humidité résiduelle (%)	5	7	11	
Humidité au point de flétrissement (%)	20	15	24	
Humidité à la capacité au champ (%)	32	26	34	
Humidité à saturation (%)	46	40	43	
Vitesse de percolation (mm/j)	0,6	1,3	1,3	

bassin-versant de Kamech, sur un sol argilolimoneux à la granulométrie identique à celle des sols bruns gypseux et sur un sol argilosableux à la granulométrie identique aux sols bruns calcaires du bassin-versant de Fidh-Ali.

Pour mettre en œuvre le modèle du bilan hydrique, nous sommes partis des données relevées sur les sols du bassin-versant de Fidh-Ali, sur la période allant du 25 mars au 10 avril 1999. En ce qui concerne l'humidité du sol brun gypseux, la valeur d'humidité du sol observée à la date des simulations de pluies est égale à 30 %, et la calibration du modèle de bilan hydrique nous a donné une valeur assez proche de la valeur observée : 28 %. Ce résultat semble assez satisfaisant, car il correspond à une sous-estimation de 5 % de l'humidité initiale par le modèle du bilan hydrique.

À la date des simulations de pluies, le modèle de bilan hydrique fournit une valeur de l'humidité initiale des sols bruns calcaires égale à 23 %. À la date du 6 octobre 1998, l'humidité initiale fournie par le modèle de bilan hydrique est égale à 22 % pour les sols bruns gypseux, 20 % pour les sols bruns calcaires. À la date du 29 septembre 2001, l'humidité initiale fournie par le modèle de bilan hydrique est égale à 14 % pour les sols bruns gypseux, 16 % pour les sols bruns calcaires.

Détermination des paramètres hydrodynamiques

Pour déterminer la conductivité hydraulique à saturation (K_s) et la poussée capillaire effective (h_f) du modèle de Green et Ampt, nous disposons d'une campagne de simulations de pluies réalisées sur le bassin-versant de Fidh-Ali entre le 26 mars et le 6 avril 1999 sur un ensemble de neuf placettes : six sur sol brun gypseux, dont quatre sur sol cultivé (placettes FDA1, FDA2, FDA3, D2) et deux sur jachères (FDA4, D1) ; trois parcelles sur sol brun calcaire cultivé (FDA5, FDA6, FDA7). Les figures 6 et 7 présentent, respectivement, les résultats d'ajustements linéaires de la décroissance de la vitesse

d'infiltration en fonction de l'inverse de la lame infiltrée pour les sols bruns gypseux. L'examen de la figure 7 montre que le fonctionnement à l'infiltration du sol brun gypseux en jachère comporte deux phases opposées avec une phase intermédiaire, mais que ce fonctionnement peut être schématisé par un ajustement réunissant les parties inférieure et supérieure de la relation $i(t) = f(1/L(t))$ dont les paramètres d'ajustement sont : $K_s = 4$ à 6 mm/h et $K_s(h_0 - h_f)(\theta_s - \theta_i) = 646$ à 650 mm²/h, soit avec $\theta_s = 0,46$ et $\theta_i = 0,28$, $h_f = 625$ à 633 mm.

Il apparaît finalement exister, d'après la figure 6, pour les sols bruns gypseux cultivés, une seule valeur de la conductivité hydraulique à saturation ($K_s = 2,54$ mm/h), mais deux courbes de décroissance des vitesses d'infiltration au cours de la simulation : la première correspond à un sol fraîchement labouré (parcelles FDA 1 et FDA 2) pour un cumul des pluies inférieur à 50 mm et la seconde au même sol après 50 mm de pluies ou à un sol anciennement labouré (parcelle FDA 3). Pour les besoins de notre modélisation, il suffit de prendre en considération la seconde courbe de

décroissance de la vitesse d'infiltration en fonction de l'inverse du cumul de la lame infiltrée, car les crues que nous nous proposons de modéliser se situent au début de l'automne, avant les labours, les labours précédents ayant subi un cumul pluviométrique nettement supérieur à 50 mm (235 mm pour la crue du 6 octobre 1998 et 135 mm pour celle du 29 septembre 2001). Les paramètres caractéristiques de la seconde décroissance sont les suivants : $K_s = 2,54$ mm/h et $h_f = 583$ mm avec $\theta_s = 0,46$ et $\theta_i = 0,28$.

Pour les sols bruns calcaires cultivés (figure 8), il existe également deux courbes de décroissance des vitesses d'infiltration après un labour récent, la seconde, après un cumul des pluies de 70 mm, ayant pour principales caractéristiques : $K_s = 1$ mm/h et $h_f = 2000$ mm avec $\theta_s = 0,43$ et $\theta_i = 0,23$.

Application au bassin-versant de Fidh-Ali

Selon Madsen (2000) [23], il est possible d'associer à une période donnée un jeu de paramètres décrivant le fonctionnement des sols d'un bassin en fonction de leurs couverts végétaux et de leurs états de surface. En ce qui concerne le bassin-versant de Fidh-Ali, avec la crue du 6 octobre 1998 pour le calage et celle du 29 septembre 2001 pour la validation, nous avons sélectionné la période précédant les labours d'automne qui correspond à une faible couverture végétale et à une faible

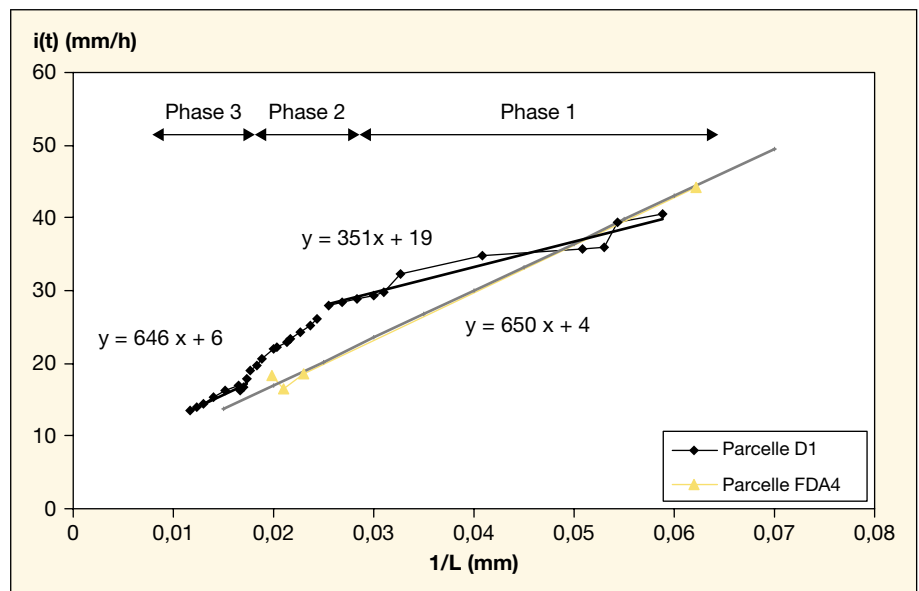


Figure 7. Ajustement des paramètres de l'équation de Green et Ampt sur les sols bruns gypseux en jachère du bassin-versant de Fidh-Ali.

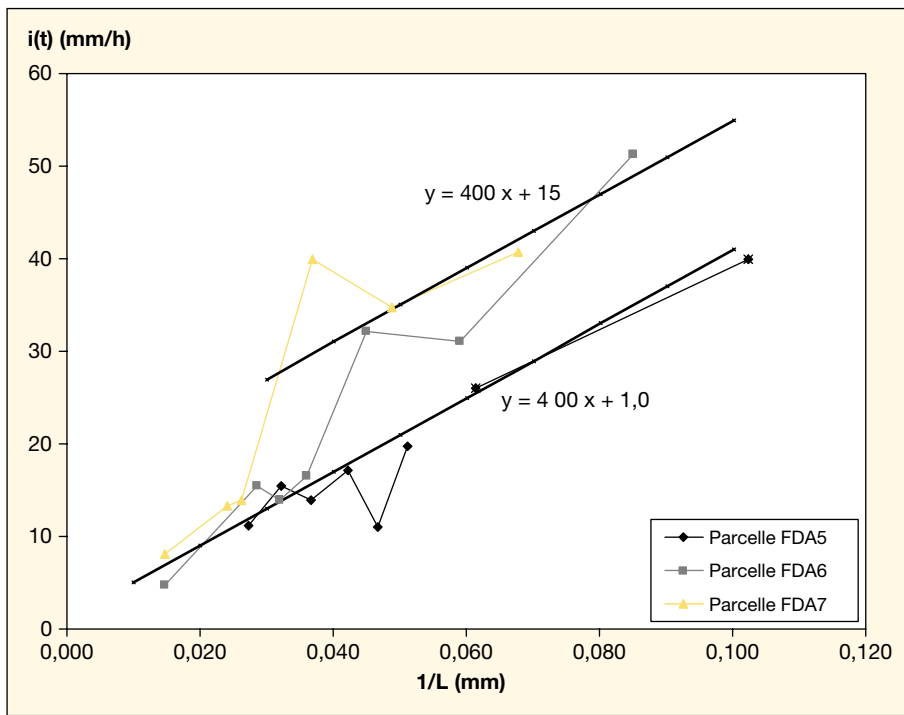


Figure 8. Ajustement des paramètres de l'équation de Green et Ampt sur les sols bruns calcaires cultivés du bassin-versant de Fidh-Ali.

rugosité sur les parcelles cultivées. À cette période de l'année, huit à neuf crues suffisamment fortes peuvent être utilisées pour le calage ou la validation du modèle, et quatre correspondent à de fortes crues dont le débit maximal est supérieur à $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Les crues du 6 octobre 1998 et du 29 septembre 2001 sont choisies parmi ces quatre crues. Afin de mieux évaluer l'impact d'une prise en compte du réseau hydrographique sur la forme des crues, le calage a été effectué essentiellement sur la valeur du débit maximum et sur la forme de la crue.

Découpage du bassin-versant

La figure 9 représente les découpages du bassin-versant de Fidh-Ali :

- sans représentation du réseau hydrographique ;
- en individualisant le réseau hydrographique en panneaux distincts.

Bien qu'il réduise et simplifie la représentation du bassin-versant, le découpage en panneaux trapézoïdaux permet de rendre compte, à l'échelle d'un petit bassin-versant, de ses principales caractéristiques physiographiques, tant l'hydrographie et la topographie que la nature des sols, leur occupation et leur couverture végétale. En individualisant le réseau hydrographique, nous avons volontairement limité sa représentation à celle du réseau principal, mais rien ne s'oppose à la ramification du réseau hydrographique

plus en amont si la prise en compte du réseau se révèle concluante.

Calage

Pour le calage des paramètres du modèle « abc », nous avons choisi la crue du 6 octobre 1998 qui se situe au début de l'automne, avant les labours, avec un cou-

vert végétal à son minimum de recouvrement. Dans ces conditions d'états de surface des sols, on peut considérer que la rétention superficielle est nulle à l'échelle du bassin-versant ou à l'échelle des unités hydrologiques, et que la rugosité hydraulique est égale à 0,02 pour les sols nus non cultivés, à 0,03 pour les sols nus cultivés [21]. Pour déterminer les valeurs de la conductivité hydraulique à saturation et de la poussée capillaire, nous avons utilisé les résultats des expériences de simulation de pluies sur les deux types de sols du bassin-versant de Fidh-Ali, les sols bruns gypseux et les sols bruns calcaires, dans les conditions les plus favorables au ruissellement.

L'humidité initiale des sols, avant la crue du 6 octobre 1998, a été déterminée à partir du modèle de bilan hydrique appliqué aux sols du bassin de Fidh-Ali (cf. paragraphe relatif à la détermination de l'humidité initiale). L'humidité à saturation a été déterminée à partir des caractéristiques granulométriques des sols bruns calcaires, à partir de prélèvements d'échantillons pour les sols bruns gypseux.

Le calage du modèle a été effectué sur la valeur du débit maximal en faisant varier les valeurs de la conductivité hydraulique à saturation, mais sans modifier les valeurs des autres paramètres. Pour la crue du 6 octobre 1998, le meilleur calage a été obtenu pour des valeurs de K_s de $5,8 \text{ mm/h}$ pour les sols bruns gypseux et de $2,5 \text{ mm/h}$ pour les sols bruns calcaires, valeurs très proches de celles obtenues par les simulations de pluies.

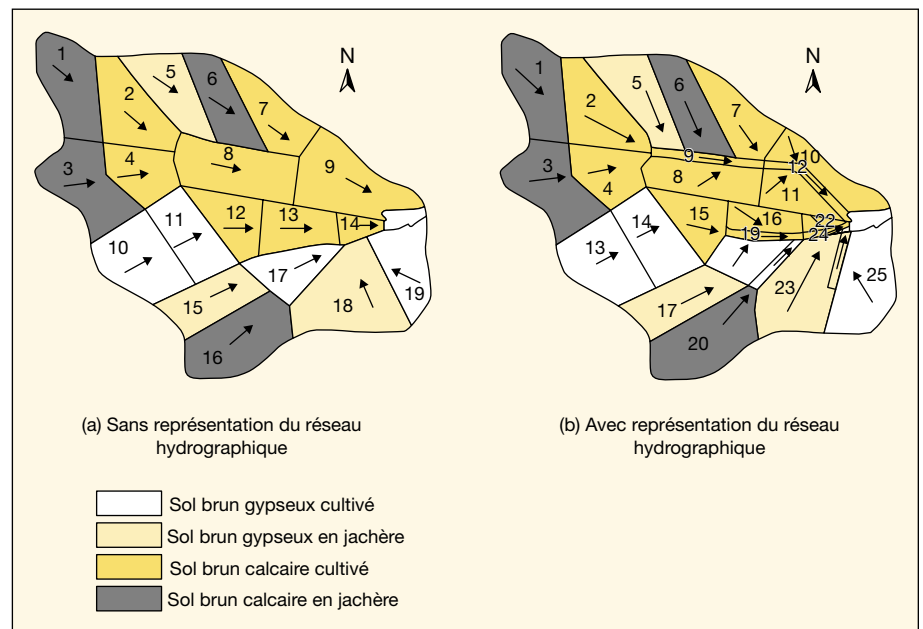


Figure 9. Schéma du découpage du bassin-versant de Fidh-Ali.

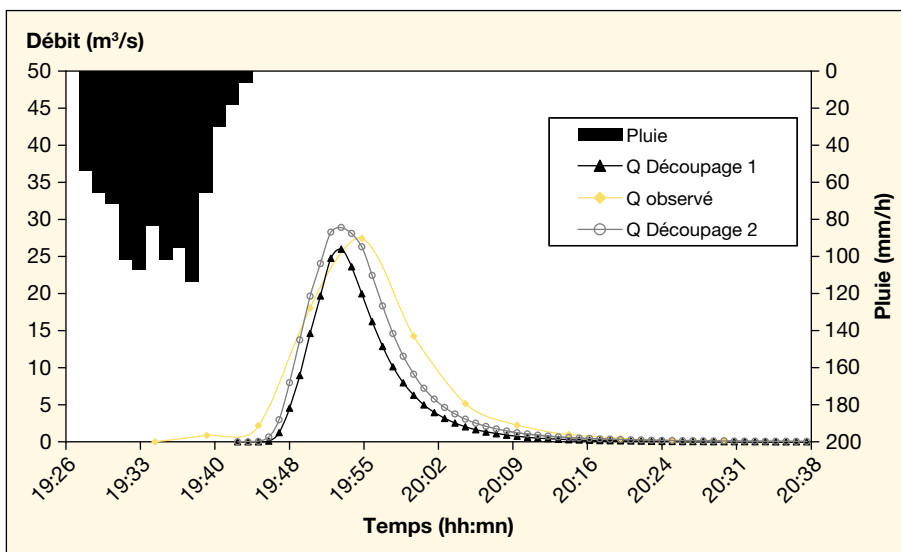


Figure 10. Calage de la crue du 6 octobre 1998.

La figure 10 présente le résultat de la reconstitution de la crue du 6 octobre 1998 pour un découpage en panneaux trapézoïdaux sans représentation du réseau hydrographique. Pour le calage avec représentation du réseau hydrographique en panneaux rectangulaires, nous avons conservé les mêmes valeurs des paramètres en considérant que les panneaux du réseau hydrographique avaient les mêmes comportements hydrologiques (les mêmes paramètres) que les panneaux dont ils sont issus.

Ce graphique montre que le modèle « abc » simule correctement l'hydrogramme de la crue du 6 octobre 1998, mais pour le découpage sans représentation du réseau hydrographique, à un bon calage du modèle sur la valeur du débit maximum (94 % du débit maximum observé), correspond une sous-estimation très nette du volume ruisselé (66 % du volume observé).

Le tableau 3 récapitule les principales caractéristiques de la crue observée, de la crue simulée sans représentation du réseau hydrographique (découpage 1) et de la crue simulée avec représentation du réseau hydrographique (découpage 2) pour la phase de calage. Il permet de comparer les résultats obtenus par une meilleure prise en compte du réseau hydrographique (découpage 2).

L'examen du tableau 3 permet de constater que la représentation du réseau hydrographique, même simplifiée, améliore le critère de Nash et l'estimation du volume ruisselé en augmentant légèrement la valeur du débit maximum. Sans modifier les temps de base et de montée, la prise en compte du réseau hydrographique améliore la forme de la crue par une meilleure

estimation du rapport entre le débit maximum et le débit moyen. Cette amélioration résulte d'un accroissement du volume ruisselé de 31 % sans accroissement important du débit maximum (9 %).

Validation

La validation du modèle « abc » a été effectuée sur la crue du 29 septembre 2001 survenue dans les mêmes conditions d'état de surface que la crue du 6 octobre 1998, ce qui justifie l'utilisation des mêmes paramètres hydrodynamiques. Le tableau 4 récapitule

les principales caractéristiques de la crue observée, de la crue simulée sans représentation du réseau hydrographique (découpage 1) et de la crue simulée avec représentation du réseau hydrographique (découpage 2) pour la phase de validation.

D'après le tableau 4, on remarque que les paramètres utilisés pour le calage simulent bien la crue de validation, mais avec une sous-estimation de 26 % du débit maximum et de 19 % du volume ruisselé. Pour le deuxième découpage, la représentation du réseau hydrographique améliore le débit maximum de 13 % et le volume ruisselé de 30 %. On constate aussi que, malgré l'amélioration du débit maximum, le coefficient de pointe reste sous-estimé avec une dégradation de son estimation. En revanche, le critère de Nash s'améliore de 12 %. Ce test de validation confirme donc les résultats obtenus lors du calage en ce qui concerne la prise en compte du réseau hydrographique dans la modélisation hydrologique du petit bassin-versant de Fidh-Ali sur substratum argilo-calcaire en région semi-aride. La prise en compte du réseau hydrographique contribue donc à un accroissement important du volume ruisselé (30 %), sans modifier significativement la durée du ruissellement ou le temps de montée de la crue. Cet accroissement du volume ruisselé s'explique assez bien par un transfert plus rapide des écoulements vers l'aval du bassin, sans perte par infiltration sur les versants, lorsque les eaux superficielles transitent dans un réseau hydrographique bien marqué, très encaissé, où les sols sont peu filtrants.

Tableau III. Caractéristiques des crues et critères de Nash pour la phase de calage.

	Crue observée	Crue découpage 1	Crue découpage 2
Temps de base (min)	21	19	19
Temps de concentration (min)	12	9	9
Débit maximum (m ³ /s)	27,4	26 (94 %)	28,3 (103 %)
Volume écoulé (m ³)	19 250	12 750 (66 %)	16 750 (87 %)
Coefficient de pointe	1,88	2,32	1,92
Critère de Nash		0,79	0,95

N.B. : les valeurs entre parenthèses correspondent aux rapports, exprimés en pourcentages, entre les valeurs calculées et les valeurs observées.

Tableau IV. Caractéristiques des crues et critères de Nash pour la phase de validation.

	Crue observée	Crue découpage 1	Crue découpage 2
Temps de base (mn)	23	23	23
Temps de concentration (mn)	10	10	10
Débit maximum (m ³ /s)	33,5	24,7 (74 %)	28 (83 %)
Volume écoulé (m ³)	25 620	20 740 (81 %)	24 480 (95 %)
Coefficient de pointe	1,81	1,65	1,58
Critère de Nash		0,84	0,94

Conclusion

En zone semi-aride, les processus de ruissellement étant de type hortonien, il est possible de modéliser l'infiltration à partir de l'équation de Green et Ampt où la vitesse d'infiltration dépend de paramètres physiques. Le modèle hydrologique « abc » utilise cette équation comme fonction de production, et il est simple à utiliser. Il nous a permis de reconstituer correctement les crues du petit bassin-versant de Fidh-Ali dans des conditions favorables au ruissellement, au début de l'automne, avant les labours, à partir d'une connaissance sommaire du fonctionnement hydrique des sols et de leurs états de surface. Cette connaissance résulte d'expériences de simulations de pluies sur les deux principaux types de sols du bassin-versant de Fidh-Ali et d'une caractérisation au laboratoire des humidités à saturation, à la capacité au champ et au point de flétrissement. Pour déterminer l'humidité initiale du sol avant chaque averse, nous avons utilisé un modèle journalier de bilan hydrique des sols sur la tranche racinaire et calé ce modèle sur quelques mesures d'humidité au cours d'une saison des pluies.

Le découpage du bassin-versant de Fidh-Ali en panneaux trapézoïdaux hydrologiquement homogènes, tenant compte de la direction des écoulements, de la pente, des types de sols et de leurs occupations, a permis, en calant les résultats sur le débit maximum de la crue du 6 octobre 1998, d'obtenir un critère de Nash de l'ordre de 0,8 et un volume écoulé égal à 65 % du volume observé. La prise en compte du réseau hydrographique principal, représenté par des panneaux rectangulaires, dont les pentes et les largeurs ont été déterminées par des nivellements topographiques, a permis de porter le critère de Nash à la valeur de 0,95 et d'améliorer l'estimation du volume ruisselé de 30 %. La validation du modèle effectuée sur la crue du 29 septembre 2001 a confirmé cette amélioration.

Pour prendre en compte le réseau hydrographique dans le fonctionnement hydrologique d'un bassin-versant, le modèle hydrologique « abc » offre cependant des possibilités limitées. Il semble indispensable, pour aller plus loin, d'envisager l'utilisation de modèles permettant une meilleure représentation du réseau hydrographique et des singularités de ce réseau (chutes, drains, fossés, buses, seuils, etc.). Pour améliorer la connaissance du fonctionnement hydrique des sols, un suivi de

l'humidité des sols au cours d'une saison des pluies (ou des expériences d'infiltrométrie) s'avère nécessaire. Pour améliorer l'estimation des paramètres d'infiltration sous-pluies naturelles, il est également nécessaire d'étendre les expériences de simulations de pluies à tous les principaux types de sols et d'états de surface du bassin-versant étudié ou de rechercher les résultats d'expériences de ce type réalisées sur des sols et des états de surface aux caractéristiques similaires. Malgré le petit nombre d'informations disponibles sur le fonctionnement hydrique des sols du bassin-versant de Fidh-Ali, les résultats obtenus lors du calage d'un modèle à base physique semblent satisfaisants pour des conditions d'états de surface favorables au ruissellement. Ces mêmes données permettraient, par ailleurs, le calage de ce type de modèle pour des conditions plus favorables à l'infiltration, après les labours d'automne, afin d'évaluer l'impact de ces labours sur la formation des crues. ■

Références

1. Albergel J, Nasri S, Boufaroua M, Droubi A, Merzouk A. Petits barrages et lacs collinaires, aménagements originaux de conservation des eaux et de protection des infrastructures aval. Exemples des petits barrages en Afrique du Nord et au Proche-Orient. *Sécheresse* 2004 ; 15 : 1-9.
2. Casenave A, Valentin C. *Les états de surface de la zone sahélienne - influence sur l'infiltration*. Coll. « Didactiques ». Paris : Orstom éditions, 1989.
3. Andrieux P, Voltz M, Louchart X. *Temporal evolution of soil infiltration under natural rainfall on tilled and untilled Mediterranean vineyards*. COST symposium "Soil erosion patterns: evolution, spatiotemporal dynamics and connectivity". Münchbreg, Allemagne, 10-12th October 2002.
4. Moussa R. On morphometric properties of basins, scale effects and hydrologic response. *Hydrol Process* 2003 ; 17 : 33-58.
5. Sharma K, Murthy J. Hydrologic routing of flow in arid ephemeral channels. *J Hydraulic Eng Am Soc Civ Eng* 1992 ; 121 : 466-71.
6. Diskin MH, Simpson ES. A quasi-linear spatially distributed model for the surface runoff systems. *Water Res Bull* 1978 ; 14 : 903-18.
7. Beven KJ, Kirkby MJ. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol Sci Bull* 1974 ; 24 : 43-69.
8. Woolhiser D, Smith R, Goodrich D. *Akinematic runoff and erosion manual: documentation and user manual*. ARS 77. Washington (DC) : US Department of Agriculture, 1990.
9. Albergel J, Moussa R, Chahinian N. Les processus hortonien et leur importance dans la genèse et le développement des crues en zone semi-arides. *Houille Blanche* 2003 ; 6 : 65-73.
10. Green W, Ampt G. Studies on soil physics part I: the flow of air and water through soils. *J Agric Sci* 1911 ; 4 : 1-24.
11. Mansour R. *Anthropisation d'un petit bassin-versant sahélien : influence sur l'infiltration et le ruissellement*. Thèse de doctorat de l'université de Montpellier-II sciences et techniques du Languedoc, 2000.
12. Collinet J, Zante P, Attia R, Dridi B, Agrebaoui S. *Analyse expérimentale de l'érosion aréolaire sur le bassin-versant du lac collinaire de Fidh-Ali*. Tunis : IRD ; Ministère de l'Agriculture, 2002.
13. Reyes Gomez VM. *Dissolution interne d'un sol gypseux, cas des têtes de ravine d'un bassin-versant en milieu méditerranéen, petit barrage collinaire de Fidh-Ali (Tunisie)*. Mémoire de stage de DEA, université de Montpellier-II, sciences et techniques du Languedoc - IRD Unité hydrophysique des sols et programme HYDROMED, atelier de Tunisie 1999.
14. COVADIS 2000. *Logiciel de topographie et de conception VRD*. Brest : GEOMEDIA S.A., 2000.
15. Direction générale de l'Amélioration et de la Conservation des Terres agricoles (DG-ACTA) ; IRD Tunis. *Annuaire hydrologique des lacs collinaires. Réseau pilote de surveillance hydrologique*. Tunis : ministère de l'Agriculture de Tunisie, 1994-2004.
16. Kohler MA, Linsley RK. Predicting the runoff storm rainfall; Weather Bureau. US department of commerce. *Res Paper* 1951 ; 34 : 9.
17. Albergel J. *Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Étude des paramètres hydrologiques et leur évolution*. Thèse de doctorat, université de Paris-VI, 1987.
18. Baxter EV, Nalneesh G. Finite-element Modeling Of Storm Water Runoff Using GRASS GIS. *Microcomputers Civ Eng* 1994 ; 9 : 263-70.
19. Mekki I. *Analyse et modélisation de la variabilité des flux hydriques à l'échelle d'un bassin-versant cultivé alimentant un lac collinaire du domaine semi-aride méditerranéen*. Thèse de doctorat, université Montpellier-II, science de l'eau dans l'environnement continental, 2003.
20. Madier S, Ali B, Auzet NV. *Spatialiser l'infiltration dans les modèles distribués de transfert : une typologie fonctionnelle en contexte viticole*. Congrès du Groupe français des pesticides, 2006.
21. Carlier M. *Hydraulique générale et appliquée*. Collection du centre de recherches et d'essais de Chatou. Paris : Eyrolles, 1972.
22. Nash JE, Sutcliffe JC. River flow forecasting through conceptual models. Part I: a discussion of principle. *J Hydrol* 1970 ; 10 : 282-90.
23. Madsen H. Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *J Hydrol* 2000 ; 235 : 276-88.