

Apports des modèles numériques de terrain à la modélisation hydrologique

RESUMÉ

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de l'étude des problèmes d'érosion en Tunisie réalisée à partir d'un bassin versant expérimental de l'oued Ez-Zioud (Djebel Semmama-Tunisie centrale). Vu les limites d'application offertes par le logiciel DEMIURGE, nous avons été amenés à extraire le bassin versant en question, et à déduire ses caractéristiques géomorphologiques et hydrométriques, à partir du modèle numérique de terrain du bassin versant qui le contient, en l'occurrence celui de l'oued El-Hissiane. Nous avons pu obtenir, par superposition des cartes de pentes et des indices de Beven, les zones hydrologiquement homogènes du bassin versant de l'oued Ez-Zioud.

ABSTRACT

First, we tried to calculate the Digital Elevation Model (DEM) of the Hissiane watershed using the DEMIURGE program. It was thus proved possible to establish a digital topographic map on a wide scale. We extracted the watershed of the Ez-Zioud wadi and deducted its geomorphological and hydrometrical characteristics from the digital ground model of the watershed that contained it, namely the wadi El Hissiane watershed. Using DEM and after registration of the slope map and saturation map, some "identical zones" were obtained.

INTRODUCTION

L'étude hydrologique d'un bassin versant ne disposant que de très peu d'informations physiques repose essentiellement sur des procédés cartographiques. L'utilisation de ces derniers peut être considérée comme un indicateur permettant, par le croisement des facteurs explicatifs de l'écoulement de surface (pentes et sens d'écoulement), de définir un ensemble de zones hydrologiques homogènes au niveau des caractéristiques hydrologiques (pentes moyennes, altitudes, rugosité, etc.). Il s'agit principalement de mieux tenir compte des propriétés physiques des bassins versants et des phénomènes de non-linéarité. A cette fin, il faudra utiliser un concept géomorphologique amélioré des bassins versants.

Toutes les disciplines rattachées aux sciences de la terre connaissent de profonds bouleversements depuis que l'on dispose de puissants moyens de calcul appliqués aux données localisées. La détermination des caractéristiques géomorphométriques et physiques du bassin versant de l'oued Ez-Zioud (Djebel Semmama - Tunisie centrale), à partir du modèle numérique de terrain obtenu par DEMIURGE, nous aidera non seulement à quantifier certains paramètres physiques par unités susceptibles d'être homogènes et à expliquer le phénomène d'érosion

M. Bergaoui, enseignant chercheur à l'Institut de recherche et de l'enseignement supérieur agricoles, IRESA, et H. Camus, Directeur de recherche, ORSTOM, Tunis,

hydrique déterminé par le ruissellement de surface, mais à extraire entre autres les cartes spécifiques :

- des pentes (relief),
- du réseau hydrographique et de ses dérivés,
- des indices de Beven.

La conjugaison des différentes classes de paramètres obtenues à partir de ces cartes nous permettra d'en établir une qui, superposée à celles de la pédologie et de la végétation, aidera à délimiter des zones hydrologiquement homogènes.

Le but de ce travail est de fournir quelques éléments permettant une première approximation de la fragmentation du bassin versant de l'oued Ez-Zioud en zones hydrologiques pouvant être considérées comme similaires. Les résultats de cette étude contribueront à la constitution d'une banque de données utilisable pour une modélisation hydrologique à discrétisation spatiale (pluie - débit - transports solides) dudit bassin. Ce travail servira également de test d'évaluation des potentialités de DEMIURGE qui est un ensemble de logiciels didactiques à l'usage des chercheurs. En outre, il est réalisé dans le cadre de la validation des modèles numériques de terrain (MNT) calculés par DEMIURGE en faisant l'assemblage de plusieurs parties de la même carte.

Les MNT de type DEMIURGE

DEMIURGE (Digital Model In URGEncy) est un logiciel, à plusieurs modules, de production et de traitement des MNT. C'est un logiciel de traitement d'image consacré à un type de données : le relief. Sa vocation n'est pas la cartographie automatique ni le système d'information géographique, mais plutôt un complément de la panoplie d'outils informatiques actuellement disponibles sur le marché. Ce logiciel étant publié aux éditions LOGROSTOM de l'ORSTOM (Departere.,1992), nous ne nous attacherons pas à en faire une présentation détaillée, mais nous essaierons de mettre l'accent sur les particularités des principales potentialités offertes par les logiciels qui le constituent et ce, par le biais de l'organigramme (figure 1).

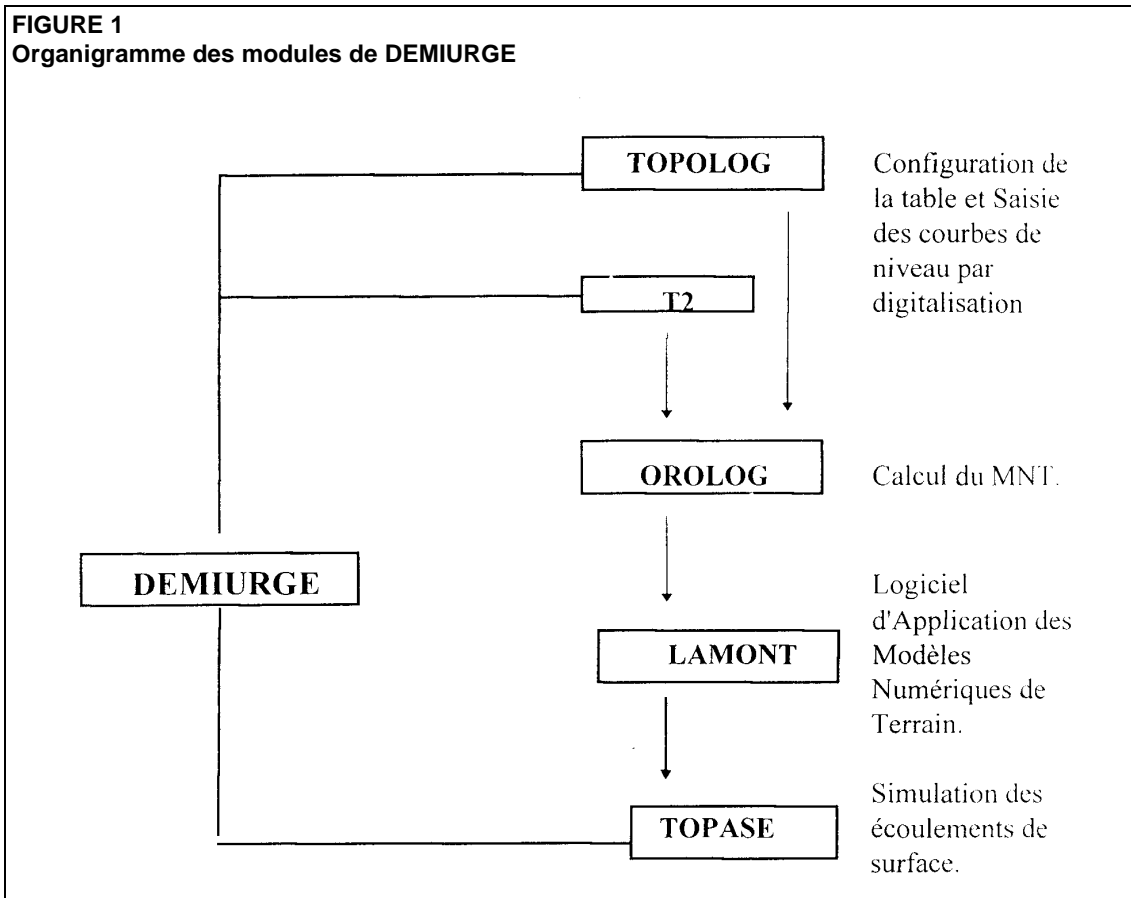
Plusieurs travaux ont été réalisés sur les MNT de type DEMIURGE (HYPERBAV 1990; Derouiche, 1994; Onibon, 1995).

La méthode d'interpolation utilisée est inspirée de Yoeli (1986). Elle consiste à calculer la valeur moyenne pondérée de l'altitude interpolée à l'aide de fonctions splines cubiques le long de quatre axes.

PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE L'OUED EZ-ZILOUD

Le bassin versant de l'oued Ez-Zioud (figure 2) se trouve dans le Djebel Semmama en Tunisie centrale. D'une superficie de 7,74 Km², l'oued Ez-Zioud représente l'affluent rive gauche de l'oued El Hissiane. Plusieurs travaux (Camus *et al.*, 1987; Barbery *et al.*, 1982) résument les caractéristiques physiques, pédologiques, et autres de ce bassin.

Ce bassin versant expérimental fait l'objet d'une synthèse de données observées de 1974 à 1994 et du développement d'un modèle distribué de type pluie-débit-transports solides (tableau 1).

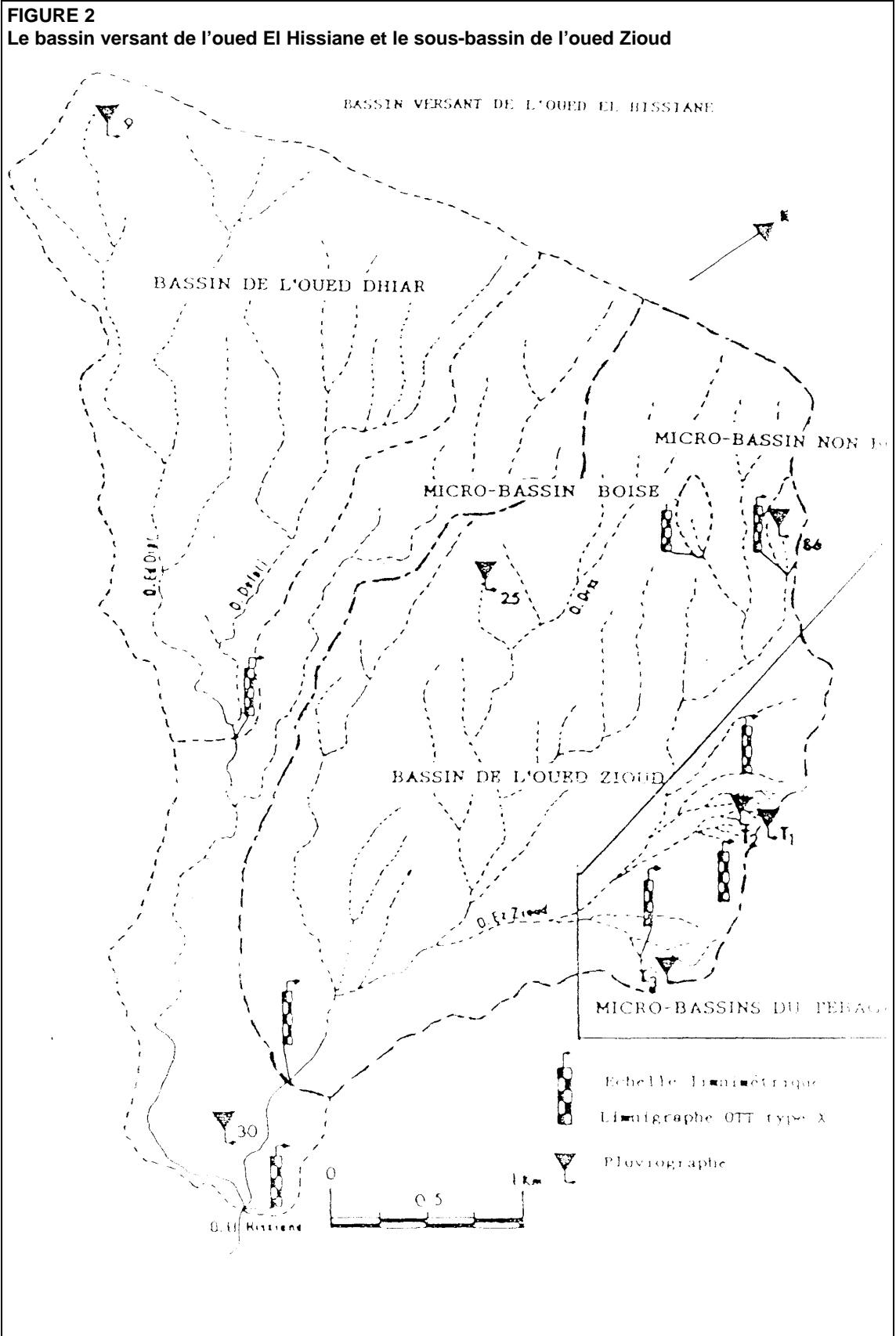


TABEAU 1
Caractéristiques physiques du bassin versant de l'oued Ez-Zioud

Paramètres	Unités	Valeurs
Superficie	Km ²	7,74
Périmètre	Km	12,3
Indice de compacité	Km	1,23
Longueur du rectangle équivalent	Km	4,32
Largeur de rectangle équivalent	Km	1,79
Altitude maximale	m	1250
Altitude minimale	m	772,5
Altitude moyenne	m	1011,2
Altitude circonscrite par 5% du bassin	m	1205
Altitude circonscrite par 95% du bassin	m	800
Dénivelée	m	225
Indice de pente globale	m/Km	59
Dénivelée spécifique	m	21,2
Indice de pente de roche	m	0,025

NUMERISATION ET CALCUL DU MNT

Les bassins versants, bien que de petite taille, présentent de grandes hétérogénéités spatiales au niveau des pentes, de la géologie, de l'occupation du sol et du transfert de l'eau sur le bassin. Pour tenir compte de cette hétérogénéité de manière simple, une description rigoureuse de



la géomorphologie du bassin versant peut être envisagée. Plusieurs modèles de simulation de ruissellement couplés à la description géomorphologique du bassin versant ont été développés et adaptés, tel le modèle WASHS mis au point par Singh (1989).

Les interpolations (en général le calcul ne se fait pas en extrapolation) engendrées par le calcul des modèles numériques de terrain conduisent souvent à des limites de bassin versant différentes de la réalité (problème de géocode ouvert) (Derouiche, 1994), ce qui est à la base de modèles peu plausibles. C'est donc pour remédier à ces erreurs et pour effectuer la numérisation que nous sommes partis d'un fond topographique au 1/10 000 du bassin versant de l'oued El Hissiane au coeur duquel se trouve le bassin versant de l'oued Ez-Zioud. Cette stratégie nous permettra de cerner les contours réels du bassin versant de l'oued Ez-Zioud qui seront par la suite extraits de l'ensemble pour le reste des opérations.

Au cours de l'assemblage et du calcul des MNT, plusieurs problèmes dont la liste est exhaustive ont été rencontrés. Certes, il serait intéressant de détailler les solutions qui ont été apportées à ces problèmes d'autant plus que l'assemblage n'a pratiquement jamais été réalisé. Mais ce sont des problèmes purement cartographiques et informatiques.

Après la réussite de l'assemblage avec DEMIURGE, un résultat très intéressant pour l'objectif de notre travail, et la résolution des problèmes posés par les calculs des MNT (Onibon, 1995), nous avons, en un premier temps, calculé les MNT des quatre feuilles prises séparément, et par la suite celui de la feuille assemblée, c'est-à-dire du bassin versant de l'oued El Hissiane.

ETUDE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED EZ-ZILOUD À PARTIR DU MNT CALCULÉ

Avant de se lancer dans cette étude, il a fallu d'abord extraire le bassin versant de l'oued Ez-Zioud de celui de l'oued El Hissiane. Pour ce faire, nous avons commencé par diviser le bassin d'El Hissiane en sous-bassins et mis en évidence l'ossature principale de Zioud qui occupe, à son extrémité Sud-Est, une partie d'El Hissiane ne lui appartenant pas. Pour essayer de comprendre cette anomalie, nous avons cherché à calculer les surfaces drainées au niveau du bassin versant d'El Hissiane. La carte des surfaces drainées a fait apparaître un lien étroit entre les thalwegs principaux des deux bassins. En outre, si on analyse la partie Sud-Ouest de cette carte, on trouve une autre anomalie sur le réseau d'écoulement de l'oued El Dhiar qui forme, avec l'oued Ez-Zioud, l'oued El Hissiane. Cela est dû au fait que les courbes de niveau qui matérialisent le thalweg principal de cet oued ne se forment pas sur la carte numérisée, si bien qu'au cours du calcul des MNT elles ont pris des directions non seulement éloignées de la réalité, mais aussi peu logiques. C'est l'une des erreurs qu'on a voulu éviter avec Zioud en partant d'Hissiane.

Pour cerner les vrais contours de Zioud nous avons procédé à des corrections interactives sur des mailles carrées de 12,5 m de côté (pas du MNT), et ce contrairement à la logique de l'écoulement suivant les courbes de niveau. Après la réussite de l'extraction, nous avons commencé l'étude géomorphométrique de Zioud. La carte des altitudes obtenue (figure 3) présente Zioud comme une plate-forme dont les altitudes divisées en six classes (tableau 2) varient sans ressaut ni cassure de 775 m à 1 200 m. Nous avons poursuivi l'étude géomorphométrique en calculant les pentes (figure 4) qui ont été regroupées en cinq classes avec une forte représentativité des classes 0 - 5% et 5 - 15% (tableau 3).

FIGURE 3
Carte des altitudes du bassin versant de l'oued Ez-Zioud

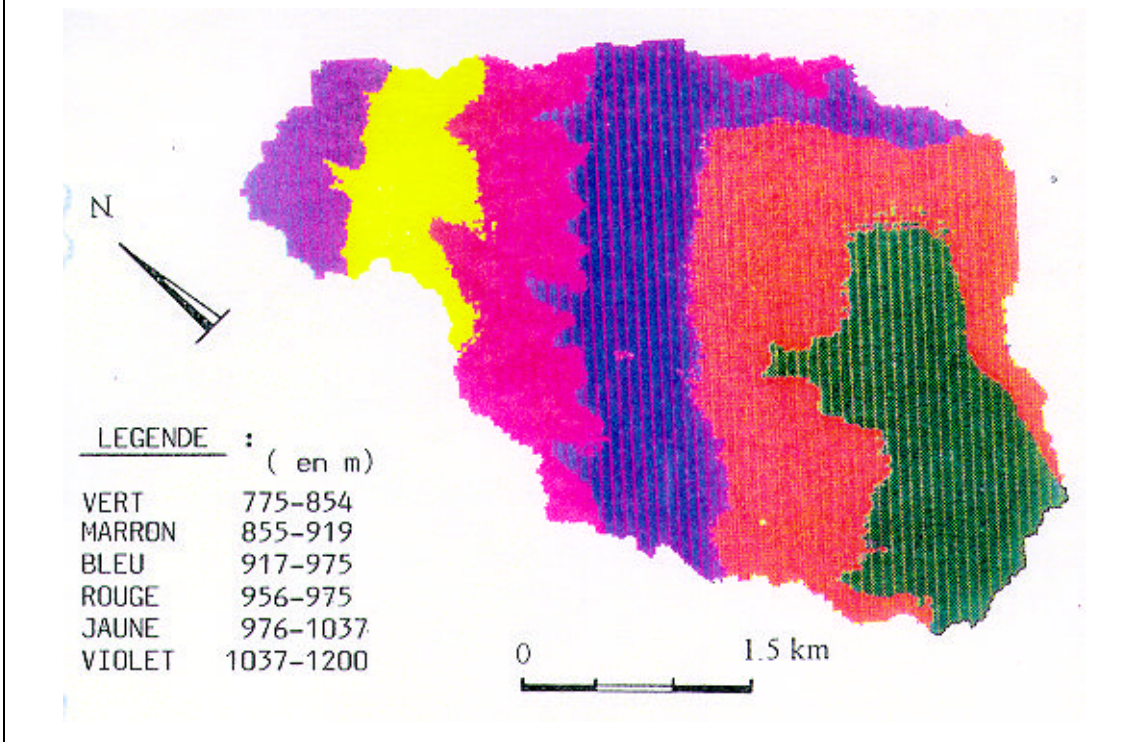


FIGURE 4
Carte des pentes

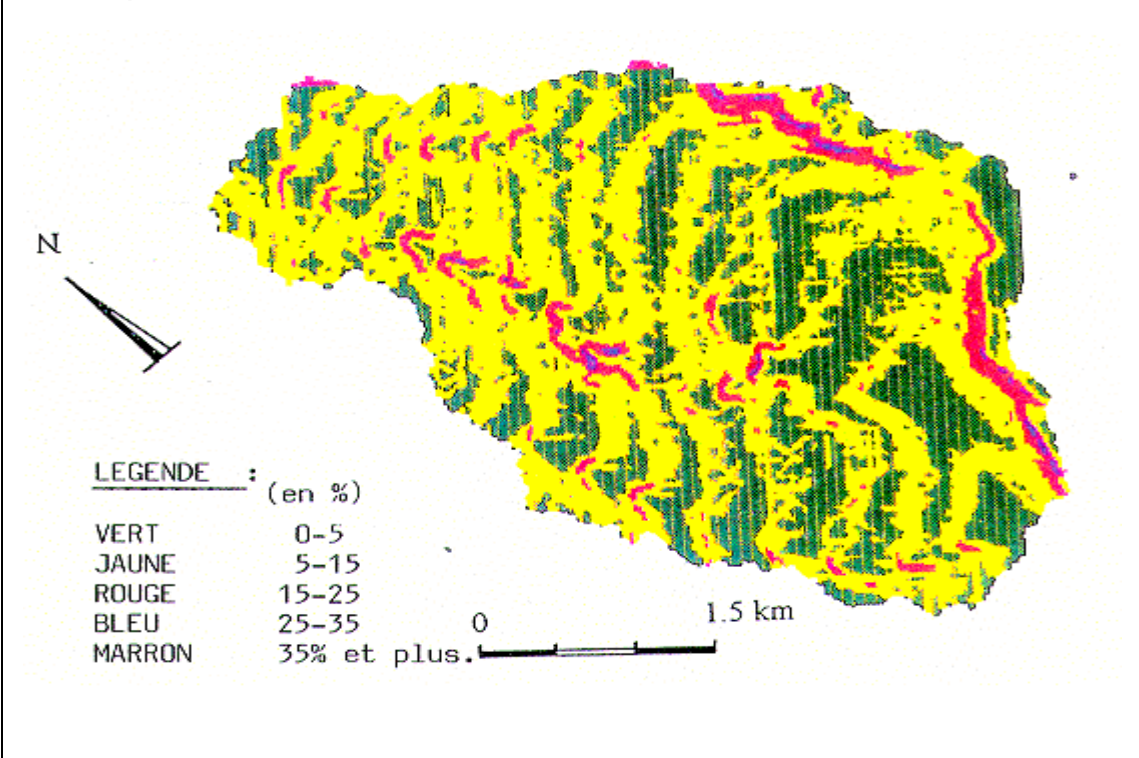


TABLEAU 2
Classes d'altitudes

Couleurs	Classes en m	Superficies en km ²	Superficies en %
Vert	775 - 854	2,914	18,8
Marron	855 - 919	4,588	29,6
Bleu	917 - 975	3,720	24
Rouge	956 - 975	2,246	14,5
Jaune	976 - 1037	1,193	7,7
Violet	1037 - 1200	0,837	5,4

TABLEAU 3
Classes de pentes

Couleurs	Classes en %	Superficies en km ²	Superficies en %
Vert	0 - 5	4,061	26,2
Jaune	5 - 15	9,703	62,6
Rouge	15 - 25	1,442	9,3
Bleu	25 - 35	0,279	1,8
Marron	35% et plus	0,155	0,1

L'étude du lien entre ces deux paramètres permet de dire que, dans leur variation, les pentes suivent les altitudes.

Nous avons poursuivi l'étude géomorphométrique avec pour objectif la recherche du thalweg principal en partant du réseau d'écoulement. Cependant, les deux branches issues de la bifurcation évoluent symétriquement vers l'amont ce qui ne permet pas de déterminer avec certitude laquelle fait partie du thalweg principal. Nous avons alors eu recours à TOPASE, un logiciel de simulation des écoulements de surface mais qu'on a essayé d'utiliser à d'autres fins (Onibon, 1995). Ainsi, avec un seuillage assez poussé, nous avons étalé comme des nervures sur une feuille le réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Ez-Zioud et pu ainsi affirmer qu'il s'agissait de la branche faisant partie du thalweg principal. Par la suite, une étude de la corrélation entre le réseau hydrographique et la pente a révélé que la pente est une fonction linéaire décroissante des surfaces drainées.

L'étude a aussi concerné les indices de Beven qui permettent d'estimer les risques de saturation en fonction de la morphologie du site. L'indice de Beven I_b est un indice de saturation potentielle en eau des sols (Beven *et al.*, 1979). Il est lié à la surface saturée contributive. On admet que cette saturation est proportionnelle à la surface drainée (S_d) et inversement proportionnelle à la pente locale ($T_{An} b$)

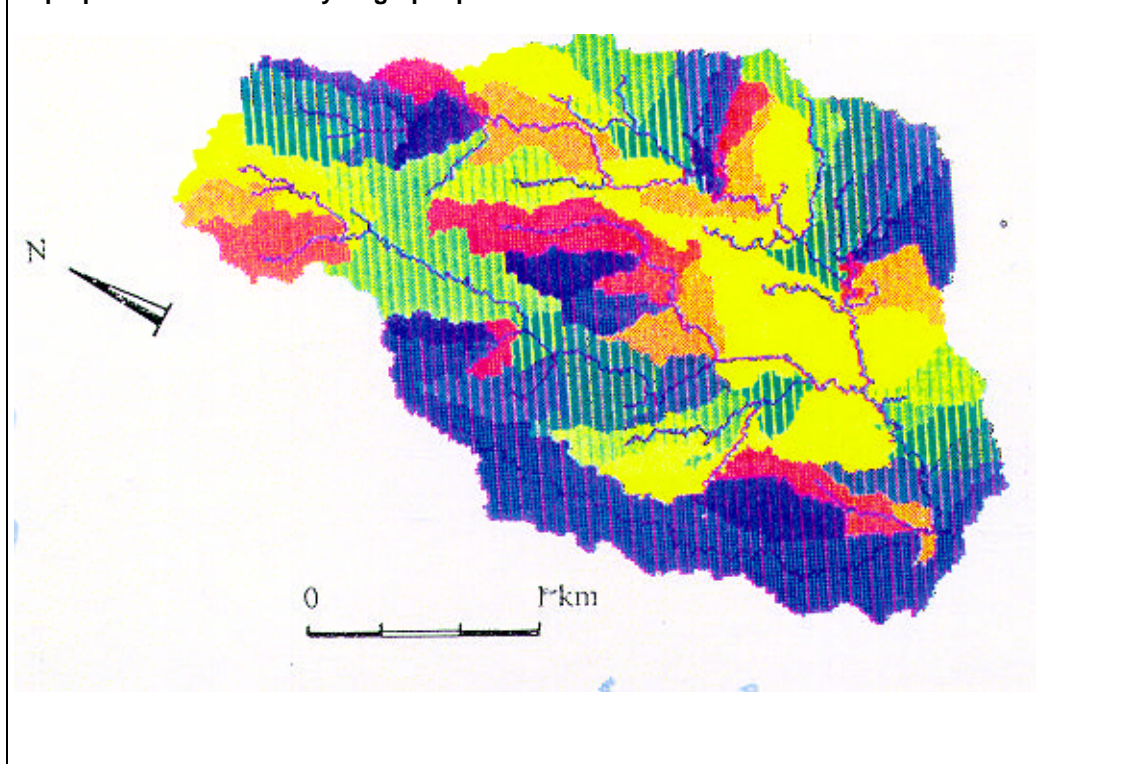
$$I_b = \text{Log} (S_d / T_{An} b)$$

Pour éviter les erreurs introduites dans les résultats par les dépressions présentes sur le MNT, le fichier des altitudes a été lissé avec l'utilitaire de LAMONT LAM LISS. Mais avant d'arriver à ce stade, nous avons dû réduire la taille du MNT car l'opération non seulement nécessite une importante place en mémoire, mais elle n'est applicable qu'aux MNT de taille inférieure ou égale à 300 profils de 200 points chacun. Le tableau 4 résume la répartition des cinq classes d'indices de Beven. La détermination de cet indice nous aidera par la suite à quantifier en partie le ruissellement au niveau du bassin versant de l'oued Ez-Zioud. Les valeurs les plus fortes seront plus propices à l'écoulement de surface (zone contributive) que les valeurs faibles. Un abaissement de cet indice stimule l'extension des zones saturées au cours d'une averse. Grâce à la carte de l'indice de Beven, nous voyons que la saturation du sol est inversement proportionnelle à

TABLEAU 4
Classe des indices de Beven

Couleurs	Classes en m	Superficies en km ²	Superficies en %
Bleu	-1541 à -682	0,977	6,3
Vert	-683 à 1097	7,393	47,7
Rouge	1098 à 2982	5,580	36,7
Jaune	2983 à 4650	1,023	6,6
Violet	4651 à 7764	0,403	2,6

FIGURE 5
Superposition du réseau hydrographique aux micro-bassins versants



la pente. Ceci est tout à fait normal car plus la pente est forte, plus le ruissellement sera important et moins il y aura d'eau stockée en surface. Ce paramètre pourra être pris en compte lors de la réalisation de certains travaux tels que la construction de barrages ou de lacs collinaires au niveau du bassin versant. Une étude approfondie des caractéristiques pédologiques du sol s'avère aussi nécessaire pour déterminer de façon plus convaincante l'indice de saturation du sol.

ZONES HOMOGENES

Les études précédemment réalisées vont nous permettre de dégager des zones hydrologiques homogènes à partir de la superposition des différentes cartes. Nous avons d'abord superposé les micro-bassins versants au réseau hydrographique. Mais au niveau de quelques micro-bassins (figure 5) il y a une anomalie due à la présence de deux exutoires. C'est l'une des limites de DEMIURGE. Nous avons alors décidé de superposer les cartes des différents paramètres étudiés. Partant de la remarque que dans leur variation les pentes suivent les altitudes et qu'il en est de

même pour les indices de Beven et le réseau hydrographique, nous avons trouvé judicieux de ne superposer que les cartes de pentes et des indices de Beven. Ceci nous a conduit à 13 types d'unités homogènes (figure 6) auxquelles il faudrait superposer les cartes du couvert végétal et du sol. En superposant seulement les quatre classes du couvert végétal à ces 13 zones, on aura environ 52 types de zones, qui seraient non seulement difficiles à gérer mais auraient des surfaces assimilables à un maillage.

Nous commencerons par la modélisation bien que l'objet de notre étude soit plutôt de trouver les éléments nécessaires à une modélisation : c'est-à-dire une bonne discrétisation spatiale permettant de définir des zones homogènes et d'avoir une idée plus claire de la fonction de production d'une unité homogène et de la fonction de transfert d'une maille à l'autre. Toutefois, nous avons un peu réfléchi sur le problème de la modélisation, en particulier de la modélisation à discrétisation spatiale. Ainsi Zioud a été divisé en des mailles de 200 m de côté qui, superposées aux cartes de pentes, des courbes de niveau et du réseau hydrographique, nous a aidés à déterminer les sens d'écoulement par maille (figure 7). Ceci servira au modélisateur lors de la détermination de la fonction de transfert. Pour les mailles hétérogènes, nous suggérons qu'elles soient divisées en mailles homogènes. Plusieurs auteurs ont essayé de montrer l'importance de la discrétisation spatiale dans le problème de la modélisation distribuée (figure 7).

Kirkby (1976) a montré l'importance de la topologie du réseau hydrographique sur l'écoulement de surface. La description géomorphologique, où le bassin versant est représenté par un ensemble de cascades et de réservoirs, aidera le modélisateur dans sa fonction de transfert.

D'après Laglaine *et al.* (1993), deux modèles ont été proposés ayant comme élément commun la prise en compte de la description géomorphologique du bassin versant. Ce sont les modèles WASHS[®] Watershed Simulation Model - utilisant l'hydrogramme unitaire géomorphologique (GUH) et le modèle de cascades géomorphologique non linéaire GNC. Les deux sont adaptés à la modélisation de crues extrêmes sur de petit bassins versants et la description géomorphologique du bassin versant permet de déterminer l'apport relatif des différentes unités homogènes.

CONCLUSION

L'hydrologue travaille un peu à la manière du biologiste qui chaque fois qu'il souhaite affiner ses recherches augmente le grossissement de son microscope ". Cette phrase de J-F Nouvelot tirée de son ouvrage "Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versant ruraux en Afrique tropicale et équatoriale" doit être notre leitmotiv, conscients comme nous le sommes de l'impact que peut avoir l'erreur d'un millimètre sur les résultats d'un MNT obtenu par numérisation d'une carte topographique à grande échelle. Pour ce faire, la réussite du calcul des modèles numériques de terrain à partir d'une carte topographique à grande échelle établie par la méthode d'assemblage des feuilles doit être considérée comme le premier acquis de nos travaux. Cette expérience est capitale car, à notre connaissance, elle n'aurait jamais été réalisée. Il est vrai que des utilitaires d'assemblage de feuilles existent dans la chaîne DEMIURGE, mais la démarche à suivre pour faire l'assemblage a été abordée dans ce travail.

FIGURE 6
Zones homogènes en fonction de la pente et de l'indice de Beven.

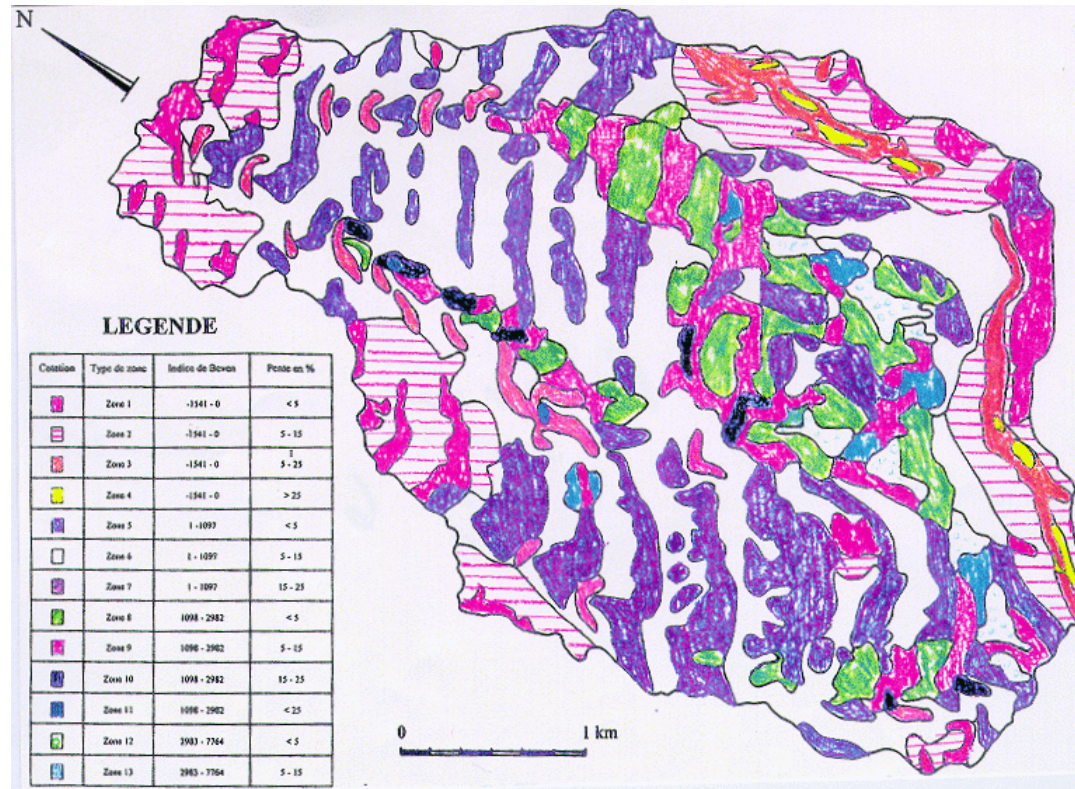
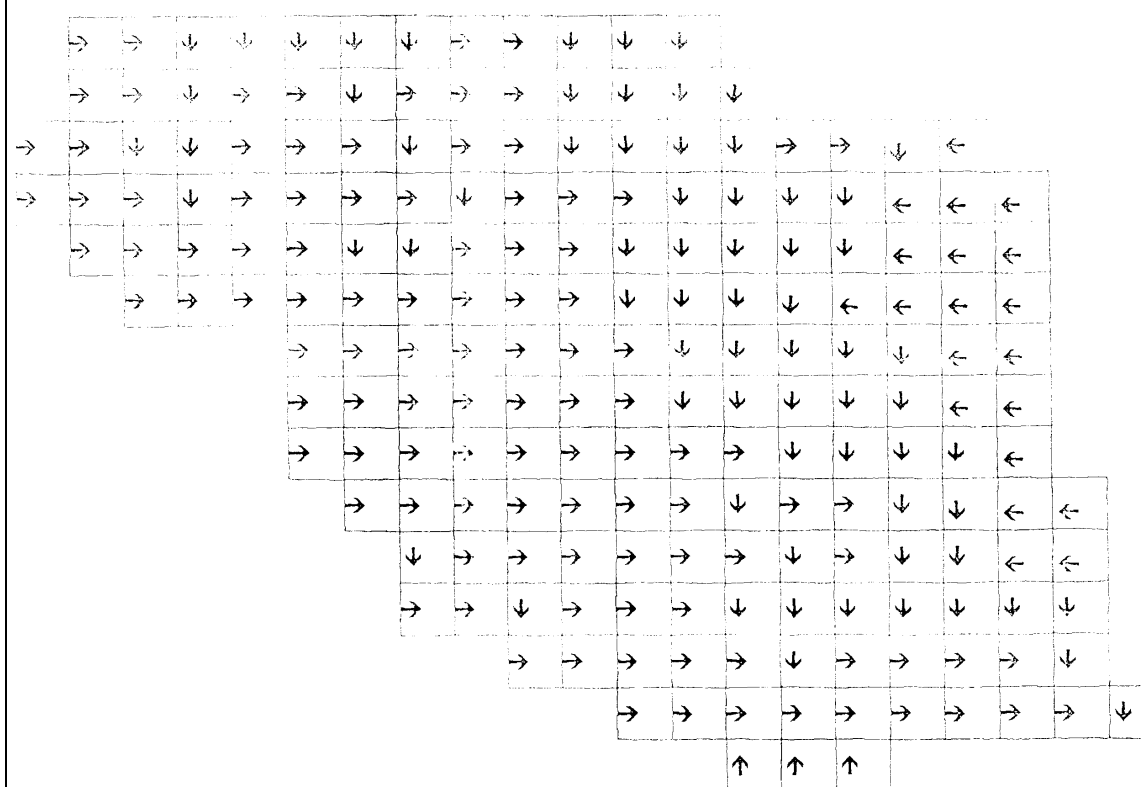


FIGURE 7
Discrétisation spatiale du bassin versant de l'oued Ez-Zioud



L'idée de partir du bassin versant de l'oued Hissiane pour extraire celui de l'oued Ez-Zioud nous a permis de cerner les véritables contours de ce dernier.

L'évaluation, à partir des chaînes DEMIURGE, des paramètres morphométriques et hydrométriques intervenant dans le comportement hydrologique du bassin versant de l'oued Ez-Zioud nous a permis d'obtenir les cartes de pentes, d'altitudes, du réseau hydrographique, et des indices de Beven. L'étude qualitative de ces paramètres nous permet de dire non seulement qu'ils ont un rôle très complexe, mais aussi que leurs actions sont interconnectées et que l'organisation des mécanismes d'écoulement se fait selon un schéma intimement lié à la morphologie.

Pour atteindre le véritable objectif visé, la carte des zones " dites homogènes " doit être superposée à celle des sols et du couvert végétal. Les difficultés rencontrées lors des superpositions et l'intervalle des différentes classes de paramètres nous montrent qu'il serait absurde d'affirmer de manière tranchée qu'une zone est homogène. C'est pourquoi des expressions comme : zones " dites " ou " sensiblement " homogènes s'avèrent plus adéquates.

Si nous ne sommes pas parvenus à déterminer avec précision ces zones " dites " homogènes, il convient de souligner que le complément logique à apporter à ce travail pour une bonne interprétation, voire compréhension, du comportement hydrologique du bassin reste l'application de modèles mathématiques aux observations et expérimentations hydrologiques.

La signification physique des paramètres et leur lien avec des caractéristiques du bassin versant est le souci principal de la modélisation hydrologique.

Enfin, il faut souligner que, malgré tous ses mérites et sa remarquable contribution à l'étude des modèles numériques de terrain, DEMIURGE a des limites d'application. L'exemple le plus frappant dans ce travail est l'extraction des sous-bassins à partir du réseau hydrographique. Bien qu'elle constitue un outil très puissant d'analyse, l'informatique ne peut suffire à elle seule à résoudre tous les problèmes d'aménagement. Il faudrait des démarches complémentaires s'appuyant sur la réalité de terrain.

BIBLIOGRAPHIE

- Barbery, J. et Delhoume, J.P.** 1982. *Etude en milieu méditerranéen*. ORSTOM Tunis.
- Camus, H., Dumas, R. et Ben Younes, M.** 1987. *Analyse de l'écoulement sur le bassin versant de l'oued El Hissiane*. ORSTOM Tunis.
- Camus, H., Dumas, R. et Ben Younes, M.** *Recherche en milieu méditerranéen semi-aride (Djebel Semmama)*. Rapport des campagnes 1974 - 75, 1975 - 76 et 1976 - 77. ORSTOM Tunis.
- Chevalier, P., Claude, J., Pouyard, B. et Bernard, A.** *Hydrologie de la mare d'Oursi (Burkina-Faso) 1976-1981. Pluies et crues au Sahel*.
- Departere, C.** 1993. *Chaîne de production et de traitement des modèles numériques de terrain : DEMIURGE 2,0*. Edition ORSTOM.
- Departere, C.** 1993. *Chaîne de production et de traitement des modèles numériques de terrain : DEMIURGE 2,3. Module de numérisation T2 version 1,2*. Edition ORSTOM.
- Departere, C.** 1993. *Chaîne de production et de traitement des modèles numériques de terrain : DEMIURGE. Module de simulation : TOPASE version 1,0*. Edition ORSTOM.
- Departere, C.** 1983. *Note introductive aux sessions de formation à l'utilisation de la chaîne de production et de traitement DEMIURGE*. CNRE/ORSTOM Antananarivo mars 1983.
- Derouiche, A.** 1994.
- HYPERBAV** (Equipe de l'ORSTOM). *Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un bassin versant en savane humide*. Collection Etudes et Thèses de l'ORSTOM, Paris.
- Kirkby, M.J.** 1976. Test of the random network model and its application to basin hydrology. *Earth Surface Process* 1 : 197 - 252.
- Laglaine, V., Berod, D. et Musy, A.** 1993. *Deterministic extreme flood modelling of a mountainous catchment with use of a geomorphologic description of the channel network*.
- Nouvelot, J-F** 1989. Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique tropical et équatoriale. ORSTOM Montpellier.
- Onibon, H.** 1995. *Caractérisation des zones homogènes du bassin versant de l'oued Ez-Zioud à des fins de modélisation hydrologique (ESIER/ORSTOM 1995)*. Mem-fin d'étude.
- Singh, V.P.** 1989. *A quasi conceptual linear with potential. Application to ungauged basins*. Military hydrology. Report 17, US Army Corps of Engineers.
- Yoeli, P.** 1986. Computer executed production of a regular grid of height points from digital contours. *The American Cartographer* 13(3) : 219-229.