

# APPLICATION D'UN MODELE GEOMORPHOLOGIQUE POUR LA SIMULATION D'UNE CRUE EXCEPTIONNELLE ARRIVANT DANS UN PETIT BARRAGE.

Nasri S.\*, Albergel J.\*\*\*, Duchesne J.\*\*\*

\* *Chargé de Recherche, INRGREF, B.P. 10 Ariana 2080*

\*\* *Directeur de Recherche, Mission IRD, B.P. 434, 1004 Tunis*

\*\*\* *Professeur, INH Angers, France*

## RESUME :

Au début de la décennie 90 le ministère de l'agriculture tunisien s'est lancé dans un ambitieux programme de construction de petits barrages dans la partie septentrionale du pays. Aujourd'hui plus de 500 retenues artificielles ont vu le jour. Elles résultent d'un barrage en terre compactée et muni d'un déversoir latéral. Ces ouvrages hydrauliques rustiques ont pour talon d'Achille le passage d'eau au dessus de la digue. Dans ce cas, l'ouvrage rapidement fragilisé peut partir au cours de l'eau.

Dans le cadre du programme de recherche européen «HYDROMED» une étude sur la simulation de crue exceptionnelle et de ses effets dans le barrage a été menée. Sur deux lacs où des observations de niveau de l'eau et de pluviométrie sont réalisées depuis 1994 nous avons reconstitué les crues entrant dans le lac. La chronique pluie - débit ainsi obtenue a servi au calage d'un modèle simple basé sur la décomposition de la pluie brute en pluie d'imbibition, pluie interceptée, pluie infiltrée et pluie nette pour ce qui concerne la fonction de production et du modèle H2U basé sur les chemins hydrauliques en ce qui concerne la fonction de transfert. Par ailleurs une étude statistique des pluies journalières et de la pluviographie a été réalisée et a permis de simuler les hyétogrammes de pluies exceptionnelles (réurrence de 5,10, 20 et 50 ans).

## INTRODUCTION

En Tunisie Centrale, dans la dorsale semi-aride, depuis le Cap Bon jusqu'à la frontière algérienne, l'Etat tunisien a construit environ 300 petits barrages en terre avec des déversoirs simples de type déversoir fusible. Ces aménagements sont très sensibles aux crues violentes. Plus que le volume de la crue, c'est sa forme et la valeur de son maximum qu'il faut chercher à prédéterminer pour dimensionner les déversoirs de crues.

Pour un volume d'eau écoulé, la forme de l'hydrogramme dépend de la forme du bassin versant, des chemins hydrauliques et de leur hiérarchisation et enfin des pentes ; en un mot de la géomorphologie du bassin. Rodriguez et Iturbe (1979) ont présenté une modélisation physique du transfert hydraulique dans un bassin versant. Dans le même esprit, et en alliant la théorie des fractales et de la physique statistique, le modèle H2U, pour «Hydrogramme Unitaire Universel», (Cudennec et Duchesne; 1997) a été développé, validé et appliqué en différents lieux depuis 1994. Il s'agit d'une conceptualisation des processus de transformation de la pluie en débit dont l'originalité et la force résident dans le déterminisme de la fonction de transfert.

Ce modèle a pour originalité de reposer entièrement sur une description déterministe de l'organisation spatiale du réseau hydrographique. Il se prête donc très bien aux études d'impact d'aménagements tels que les retenues collinaires, les aménagements de versants ou de bas-fonds qui vont modifier les chemins de l'eau.

La fonction de transfert ne nécessite pas de calage, puisque ses paramètres d'entrée sont directement issus des caractéristiques morphologiques du réseau.

Dans cette communication, les auteurs présentent une application de ce modèle sur deux petits bassins versants semi-arides du réseau de surveillance des lacs collinaires de Tunisie (Nasri et al; 1997). Ces deux retenues ont des impluviums allant d'un milieu semi-forestier plus ou moins anthropisé à un milieu totalement consacré à l'activité agricole. La superficie de leur bassin versant est de 316 ha pour Dékekira et 1763 ha pour El Gouazine. Ils sont représentatifs de la zone semi-aride à 350 mm de précipitation interannuelle.

Le modèle est ensuite appliqué pour ces deux bassins sur des hyétogrammes définis suite à une étude statistique des pluviométries journalières et de la relation intensité-durée-fréquence.

Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme HYDROMED (Albergel et Rejeb, 1997). Les données hydro pluviométriques proviennent de la banque de données DCES / IRD (1996 à 2000)

## DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET METHODES

### Données géographiques

Les deux bassins étudiés se trouvent en Tunisie Centrale sur le piémont du Jbel Serj à une dizaine de km de la ville d'Ousseltia. Leurs exutoires matérialisés par des petits barrages en terre ont pour coordonnées géographiques :

El Gouazine	35°54' 30" Nord	9°42'13" Est
Dékekira	35°53' 04" Nord	9°40'53" Est

Les bassins versants sont deux petites vallées creusées dans les alluvions anciennes encroûtées du Pléistocène. Le bassin versant de El Gouazine, plus grand, est dominé en rive gauche par des barres calcaires de l'Eocène. Les sols sont peu épais et encroûtés sur les parties hautes, ce sont des lithosols et des sols calcimagnésiques à fortes charges caillouteuses. Dans les parties aval, les sols alluviaux profonds argilo-limoneux alternent avec des sols calci-magnésiques à amas calcaires. A Dékekira et sur une petite surface de rive gauche à El Gouazine, on trouve des sols peu évolués, régosoliques sur marnes gypseuses à l'origine d'efflorescences salines.

Le climat est du type méditerranéen semi-aride. Il se caractérise par des pluies annuelles très irrégulières et très variables dans le temps et dans l'espace, une saison humide qui s'étend de septembre à mai et une saison estivale chaude et sèche. Les pluies sont souvent sous forme d'orages violents et de courte durée. Les intensités horaires maximales dépassent facilement les 50 mm/heure voire même 100 mm/heure pour des pluies de durée inférieure à la demi-heure.

Le régime pluviométrique irrégulier se répercute évidemment sur le régime hydrologique. L'écoulement de surface des cours d'eau est très irrégulier, les étiages sont très bas, les crues sont soudaines et violentes et les volumes d'eau importants. Les oueds charrient pendant les crues des volumes de terre importants arrachés essentiellement aux berges mais aussi à la surface des versants. L'érosion régressive est importante, surtout dans cette zone de tectonique récente ; les transports de fond d'oued sont conséquents (Benzarti, Z. ; 1995).

### Installation expérimentale d'un lac collinaire et acquisition des données

Les lacs collinaires de Dekkira et El Gouazine sont équipés chacun d'une échelle limnimétrique, d'un pluviomètre journalier, d'un bac à évaporation et de deux centrales d'acquisition automatique de données ; la première est reliée à un capteur pluviométrique à augets basculeurs (0,5mm de pluie) et la seconde à une sonde immergée mesurant le niveau de l'eau au cm près et sa température. L'évacuateur de crues est aménagé pour disposer d'un seuil déversant permettant l'estimation des débits. Les données caractérisant le bassin versant, la retenue et la station de mesures hydrologiques sont consignés dans une banque de données géo - référencées. Celle-ci est remise à jour après chaque modification de l'appareillage, nouvelle mesure de la bathymétrie ou changement constaté de l'occupation des terres.

La bathymétrie de chaque lac est effectuée au moins une fois par année hydrologique. Elle est rapportée au nivellement fin du site et permet d'apprécier le taux d'envasement de la retenue et d'établir les courbes « Hauteur / Volume et Hauteur / surface ».

Ce dispositif expérimental permet de reconstituer une chronique de pluie débit à l'exutoire de chaque bassin par la méthode du bilan hydrologique (Albergel et Rejeb, 1997). Nous avons obtenu la reconstitution de 24 crues à Dékikéra observées entre le 04/11/1993 et le 30/08/1997 et de 14 crues à El Gouazine pendant la même période.

La figure 1 montre l'exemple de la reconstitution de la crue du 13/09/1995 à Dekikéra. Cette crue a pour volume 15 838 m<sup>3</sup> et pour débit de pointe 10,33 m<sup>3</sup>/s.

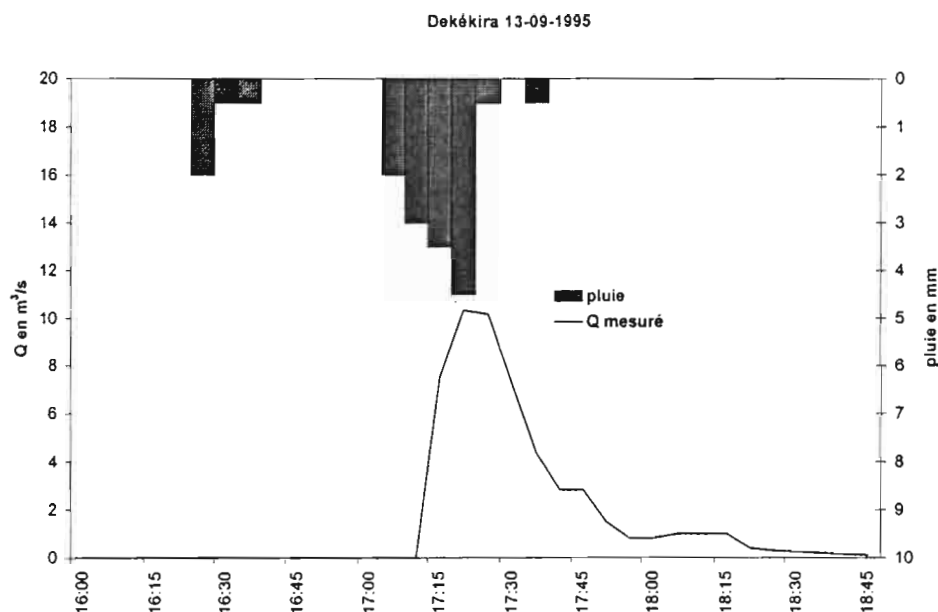


Fig. 1 : Reconstitution de la crue du 13/09/1995 à Dékekira

### Choix des crues utilisées pour la modélisation

Pour la modélisation nous avons pris toutes les crues consécutives à une averse supérieure à 10 mm de lame ruisselée supérieure ou égale à 0,5mm et de temps de base inférieure à 12 h pour s'affranchir des crues résultant de hyétogrammes complexes. Vingt sept crues ont été sélectionnées à Dékekira et quatorze crues à El Gouazine. Les tableaux 1 et 2 montrent les caractéristiques des crues les plus fortes observées sur ces bassins.

TABLEAU 1 : caractéristiques de quelques crues enregistrées à Dékekira.

Bassin versant de Dékekira							
Date de la crue	Pluie totale en mm	Temps de réponse en mn	Volume ruisselé en m <sup>3</sup>	Débit max. en m <sup>3</sup> /s	Coefficient de ruissellement en %	Temps de montée en mn	Temps de base en mn
03/10/94	30	15	35 273	14,25	37,2	25	35
13/09/95	18,5	16	15 838	10,41	27,2	15	65
20/09/95	20	21	31 155	13,9	49,3	25	85
13/01/96	24,5	15	6 320	1,53	8,12	70	185

TABLEAU 2: caractéristiques de quelques crues enregistrées à El Gouazine.

Bassin versant d'El Gouazine							
Date de la crue	Pluie totale en mm	Temps de réponse en mn	Volume ruisselé en m <sup>3</sup>	Débit max. en m <sup>3</sup> /s	Coefficient de ruissellement en %	Temps de montée en mn	Temps de base en mn
03/10/94	32,5	21	122 250	28,83	21	70	280
13/09/95	12	35	28 000	10,08	13	25	115
20/09/95	26,5	39	136 440	35	28,5	95	190
13/01/96	24	48	15 521	2,27	3,6	80	300

## La statistique pluviométrique et intensités - durées - fréquences

L'étude statistique des pluies journalières a été réalisée sur les données de la station de Oussletia observées de 1967 à 1994. Une loi de Pearson III tronquée a été ajustée sur l'ensemble des observations. Les récurrences théoriques sont calculées à partir du nombre moyen de pluie supérieures au seuil de troncature par an. Le tableau 3 donne les valeurs de cette statistique :

TABLEAU 3: pluie journalière pour une récurrence de 5,10,20 et 50 ans (CES-IRD, 1998).

Période de				
fréquence				
Pluie journalière				

La détermination des intensités durées fréquences a été réalisée à partir des postes pluviographiques de Dékekira, El Gouazine, Fidh Ali observées depuis 1994 et considérés comme une seule station de 15 années. Cette approximation méthodologique est acceptable vu que les pluviographes se trouvent dans une même région climatique à des altitudes comparables et avec la même exposition par rapport aux vents dominants. Les hyétogrammes observés sont classés et découpés, puis une loi statistique est calée sur chaque tranche horaire de calcul des intensités. Le tableau 4 résume les résultats de cette statistique (CES-IRD, 1998).

TABLEAU 4 : Intensités (mm/h)- durées (mn) - Fréquences des pluies dans la région

Fréquence	Durée en mn	5	10	15	30	45	60	90	120	180
0.2	5 ans	49	37	31	24	23	22	18	15	13
0.1	10 ans	78	60	52	43	36	34	29	21	19
0.05	20 ans	198	157	137	92	66	52	43	33	26
0.02	50 ans	300	170	120	65	48	35	27	20	15

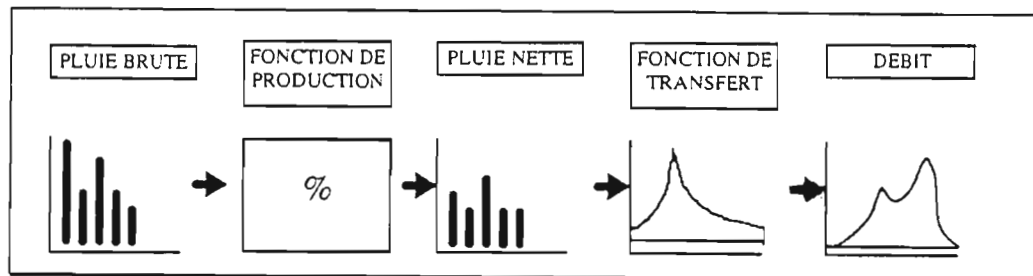


Fig. 2 : Articulation d'un modèle pluie-débit (d'après Cudennec ;1997)

### Principe du modèle utilisé

Comme beaucoup de modèles pluie-débit, H<sub>2</sub>U s'articule autour de deux fonctions (Figure 2 )

-**la fonction de production** permet de quantifier la part de la pluie précipitée (*pluie brute*) entrant réellement dans le réseau hydrographique après passage par le versant. Cette fonction nous donne donc en sortie une *pluie nette*. Elle doit rendre compte de deux phénomènes principaux : les pertes (par infiltration, interception ou évaporation) et la temporisation des écoulements (ruissellement de surface, écoulement hypodermique et écoulement de base).

-**la fonction de transfert** modélise le trajet de l'eau dans le réseau hydrographique. On entend par réseau hydrographique tout chemin préférentiel d'écoulement de l'eau. Lors du tracé de ce réseau pour la numérisation, nous l'avons donc prolongé à tous les talwegs déduits d'une inflexion, même minime, des courbes de niveau de la carte ETM au 1/50000.

La théorie du modèle porte sur la **fonction de transfert** dite H<sub>2</sub>U Hydrogramme Unitaire Universel ". Sa démonstration et sa justification sont détaillées par Duchesne et Cudennec (soumis) ; par Duchesne et Cudennec (1998) pour l'étape de description mathématique du réseau hydrographique ; et par Duchesne et Cudennec (1998) pour l'étape de déduction de l'hydrogramme unitaire.

La théorie aboutit à un certain stade à la description du bassin versant par la fonction de densité des différents points du bassin versant en fonction de leur chemin hydraulique. Cette fonction de densité s'exprime par l'équation suivante :

$$\rho(L) = \frac{dN_L}{N.dL} = \left( \frac{n}{2.\bar{L}} \right)^{\frac{n}{2}} \cdot \frac{1}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \cdot L^{\frac{n}{2}-1} \cdot e^{-\frac{n.L}{2.\bar{L}}} \quad (1)$$

$L$  : est le chemin hydraulique,  $n$  : est l'ordre du bassin versant,  $\bar{L}$  : est le chemin hydraulique moyen du réseau hydrographique,  $\Gamma$  : symbolise la fonction gamma.

Cette fonction de densité est homogène à l'inverse d'une longueur et son intégrale selon  $L$  est égale à l'unité. Si l'on exprime la densité des points du bassin versant non plus en fonction du chemin hydraulique  $L$  mais en fonction du temps de parcours  $t$  de l'eau jusqu'à l'exutoire par le biais d'une vitesse moyenne d'écoulement  $V$ , on traduit la densité de bassins versants élémentaires contributifs de l'écoulement à l'exutoire en fonction du temps écoulé depuis l'averse.  $\rho(t) = \rho(L, \bar{V})$ . (02)

La densité ainsi exprimée en fonction du temps, c'est-à-dire la fonction de densité de probabilité des temps de parcours, est l'Hydrogramme Unitaire Universel  $u(t)$ .

$$u(t) = \rho(t) = \frac{n}{2.\bar{t}.\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \cdot \left( \frac{n.t}{2.\bar{t}} \right)^{\frac{n}{2}-1} \cdot e^{-\frac{n.t}{2.\bar{t}}} \quad (3)$$

Pour appliquer H2U à une averse complexe, il faut, comme pour tout hydrogramme unitaire, calculer le produit de convolution suivant:

$$Q(t) = S \cdot \int i_{nette}(\tau) u(t - \tau) dt \quad (4)$$

$S$  est la superficie du bassin versant,  $u(t)$  est l'Hydrogramme Unitaire Universel H2U;  $i_{nette}$  est la pluie nette.

Dans la pratique la discrétisation de cette intégrale revient à effectuer les étapes suivantes:

- 1- Calcul de la pluie nette pour tout intervalle de temps à partir de la mesure, de la pluie brute et par application de la fonction de production.
- 2- Calcul de l'hydrogramme affine de l'hydrogramme unitaire pour chaque tranche de pluie nette ainsi obtenue, qui peut être considérée comme impulsionnelle si le pas de temps est suffisamment petit.
- 3- Construction de l'hydrogramme complexe selon le principe d'additivité.

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

### Système d'information géographique pour l'extraction des données géomorphologiques de chaque bassin versant

Les données géomorphologiques des bassins sont extraites suivant le protocole mis au point par Cudennec (1999) sur le logiciel d'information géographique ERDAS IMAGINE de ESRI et la fonction de densité des longueurs des chemins hydrauliques et calculée à partir d'une grille de points quadra séparés par une distance de 10m. Cette fonction de densité est modélisée par l'ajustement d'une loi  $\Gamma$ . La figure 3 montre ce travail sur le bassin versant El Gouazine. La carte montre les chemins de l'eau extraits à partir de l'interprétation de la carte d'état major et numérisation par ERDAS. Le graphique sur cette même figure superpose la fonction de densité des chemins hydrauliques et sa modélisation par l'ajustement d'une loi gamma.

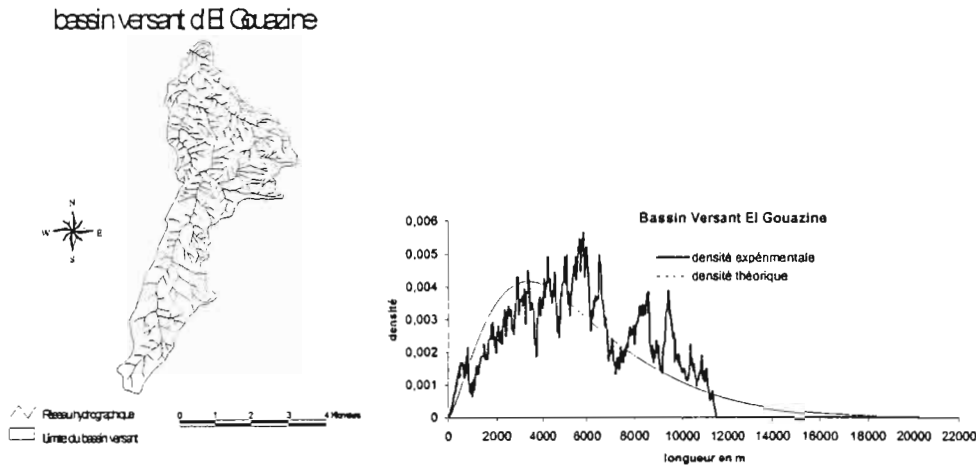


Fig. 3 : extraction de la fonction de répartition de densité des chemins hydrauliques.

### Fonction de production

Le hyétogramme des pluies mesurées est divisé en pas de temps de cinq minutes et est appelé hyétogramme de la pluie brute. Cette pluie est divisée en quatre parties par déconvolution :

1. La pluie d'imbibition correspond à la quantité de pluie qui est nécessaire à l'apparition d'un écoulement. Elle s'exprime en mm et est calculée par itération par tranche de 0.5 mm pour que l'hydrogramme H2U simulé commence de manière simultanée avec l'hydrogramme observé.
2. La pluie à retrancher à la pluie brute sur un critère d'intensité. Elle correspond à un seuil d'intensité en mm/h qu'il est nécessaire de dépasser pour observer un ruissellement. Ce seuil est constant pour tout le hyétogramme et varie peu d'un événement à l'autre. On l'appelle pluie interceptée par le bassin.
3. La pluie à retrancher à la pluie brute sur un critère de quantité. Un coefficient de ruissellement moyen est calculé après avoir retranché les deux pluies précédentes. On l'appelle pluie infiltrée.
4. La pluie nette est le hyétogramme résultant lorsque l'on a retranché les trois premières composantes de la pluie brute. La somme des pluies infiltrée et nette représente la pluie efficace.

Le seuil d'intensité et le coefficient de ruissellement sont optimisés en minimisant les écarts entre volume de crue calculé et volume de crue observé. La fonction de production est calibrée à partir de trois paramètres :  $P_i$  ou hauteur initiale de pluie à supprimer de la pluie brute,  $S$  ou seuil d'intensité et  $K$  coefficient de ruissellement. Les deux derniers coefficients sont optimisés sur le volume des crues observées. La figure 4 montre la déconvolution de la pluie du 20/09/1995 à Dékikéra.

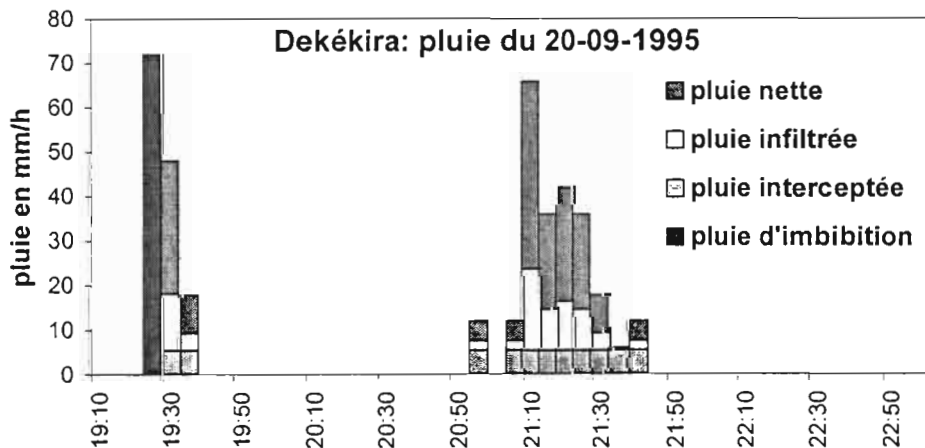


Fig. 4 : déconvolution de la pluie du 20/09/1995 à Dékikéra

Le tableau 4 donne les résultats statistiques de la déconvolution de la pluie brute.

Bassin versant de Dékekira : 24 événements				
	Pluie d'imbibition en mm	Pluie interceptée		K coefficient de ruissellement
		Seuil mm/h	Hauteur mm	
Moyenne	7,10	3,92	3,85	43,17
Médiane	7,50	3,78	2,42	47,00
Ecart type	4,00	2,98	4,71	17,84
Bassin versant de El Gouazine : 14 événements				
Moyenne	7,22	3,56	2,67	26,94
Médiane	8,00	3,96	1,85	19,50
Ecart type	4,16	1,81	1,97	19,69

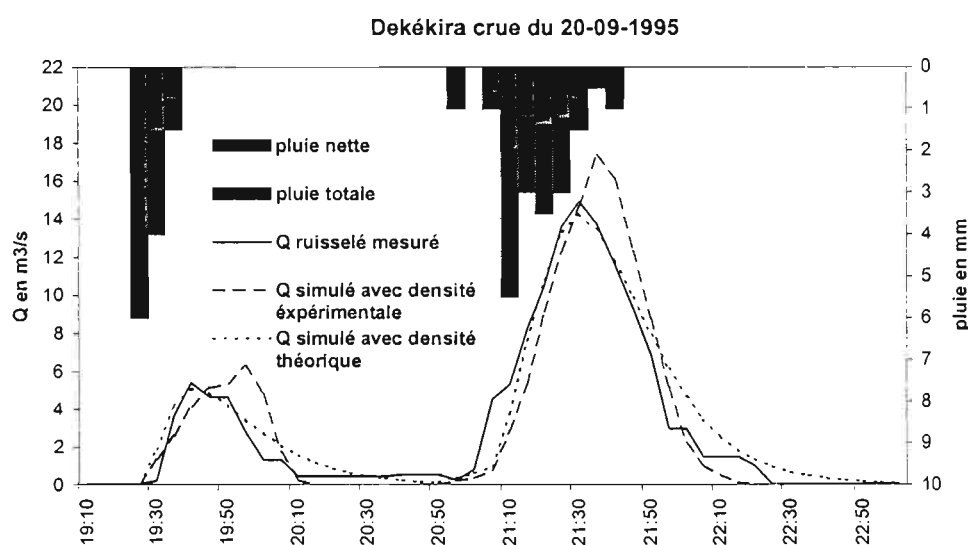
### Fonction de transfert

L'équation 3 de la fonction de transfert montre qu'il n'y a que deux paramètres :  $n$ , qui est l'ordre du bassin versant, facilement accessible à partir de la carte, et  $\bar{t}$ , qui est le temps de parcours de l'eau dans la longueur moyenne du bassin versant pour arriver à l'exutoire (caractéristique géomorphologique du bassin). Pratiquement, ce dernier paramètre est calculé par itération en prenant comme valeur de départ le temps de réponse du bassin (temps séparant le pic d'intensité du hyétogramme à la pointe de la crue) et en prenant comme critère d'optimisation le minimum de différence de débit de pointe. Le tableau 5 donne les valeurs statistiques pour le paramètre : temps de parcours de l'eau dans le chemin hydraulique moyen ( $\bar{t}$ ).

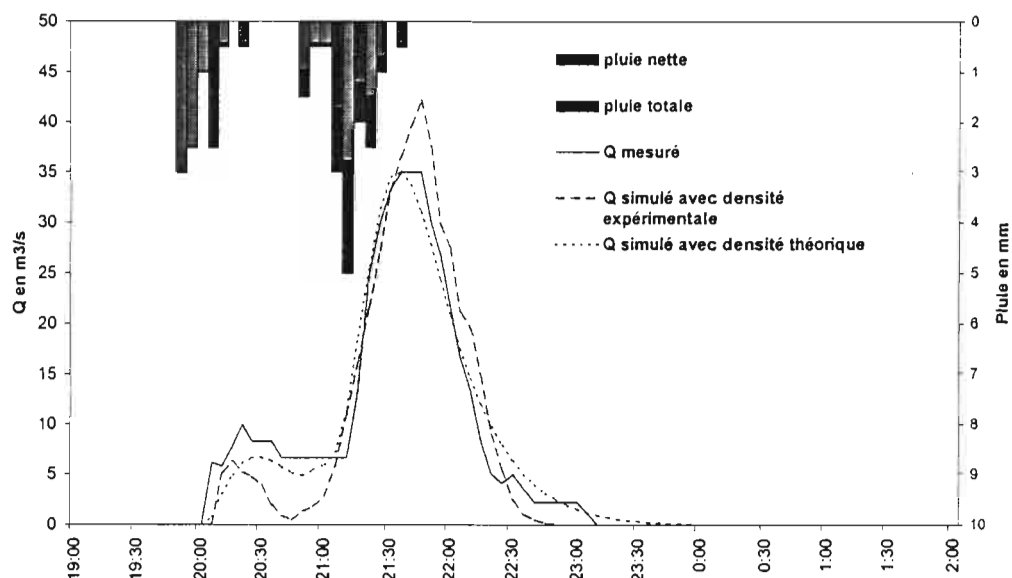
TABLEAU 5 : valeurs statistiques pour le paramètre  $\bar{t}$  (minutes)

	Bassin versant de Dékekira 24 événements, $\bar{L} = 1848\text{m}$ et $n=4$	Bassin versant de El Gouazine 14 événements, $\bar{L} = 5551\text{m}$ et $n=5$
Moyenne	21	33
Médiane	17	33
Ecart type	11	18

Les figures 5 et 6 montrent le résultats de la modélisation à Dékekira et El Gouazine pour l'événement du 20/9/95 en utilisant la fonction de densité des longueurs de réseaux expérimentale ou modélisée par une loi  $\Gamma$ .



El Gouazine crue du 20-09-1995



### Simulation des crues exceptionnelles

On a construit des hyétogrammes types pour des averses de récurrence donnée en faisant l'hypothèse que l'averse correspondante a la hauteur de la pluie journalière et le pic d'intensité maximale en cinq minutes de même récurrence. On lui donne la forme des averses de type orageux lors d'un déplacement frontal d'une dépression. Le hyétogramme comprend une ondée préliminaire de faible intensité et est de courte durée. Cette ondée est suivie par le pic d'intensité maximale puis par une longue traîne avec des intensités décroissantes. (figure 7 et tableau 6)

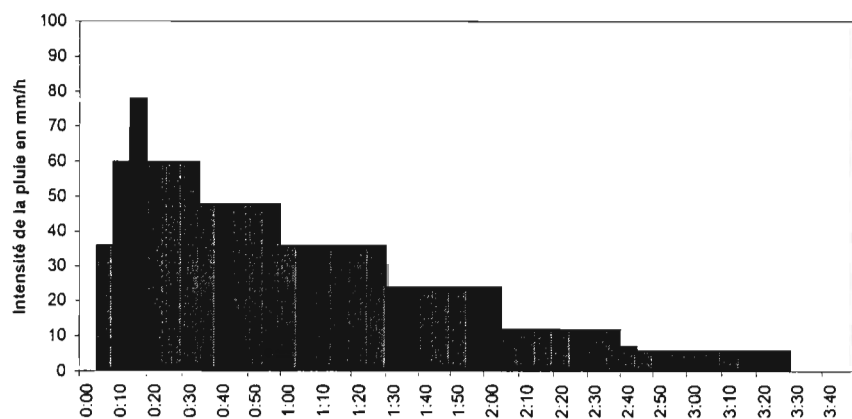


Fig. 7 : Exemple de l'hyetogramme décennal

TABEAU 6 : Pluie cumulée en mm

Durée en mn	5	10	15	30	45	60	90	120	180	240
5 ans	2,0	5,5	9,0	20,1	29,6	38,1	51,6	62,1	74,6	78,0
10 ans	3,0	8,0	14,5	29,5	41,5	52,5	69,5	81,5	91,1	93,6
20 ans	8,5	25,0	61,0	79,0	89,0	101,0	106,5	109,6		
50 ans	8,0	33,0	81,0	105,0	116,0	127,0	130,5	131,3		



On réalise la simulation des crues en prenant les valeurs moyennes des paramètres de calage (trois pour la production et un pour le transfert). Les figures 8 et 9 montrent les simulations pour les crues d'occurrence 2,5,10,20 et 50. Le tableau 7 récapitule les valeurs caractérisant les crues exceptionnelles.

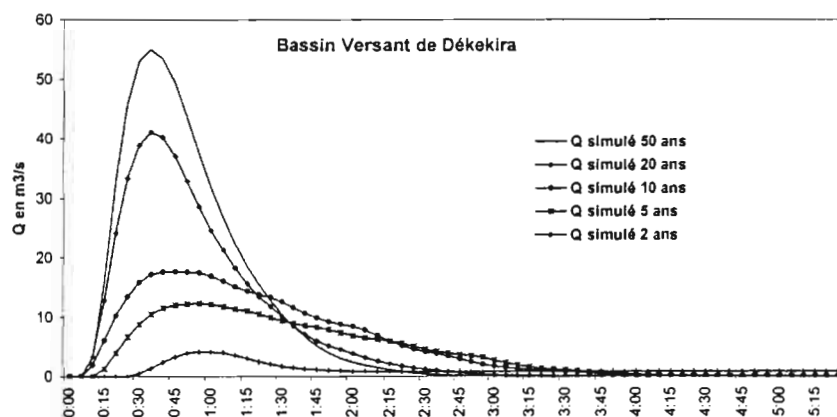


Fig. 8 : Prédétermination des crues exceptionnelles à Dékekéra

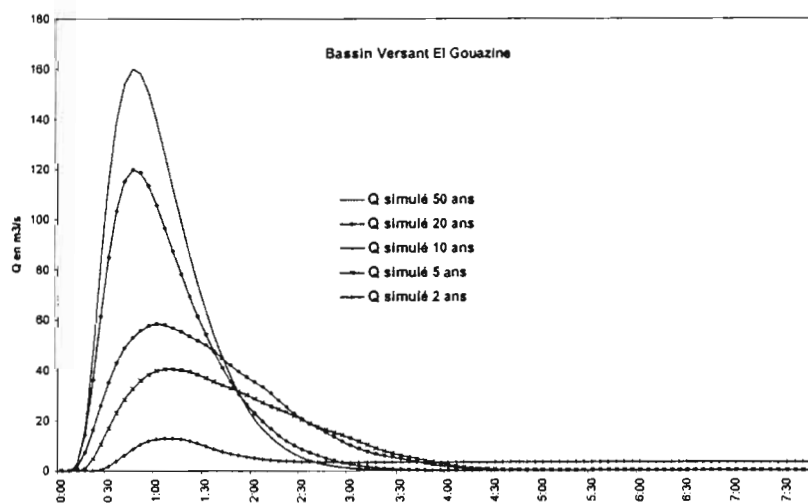


Fig. 9 : prédétermination des crues exceptionnelles à El Gouazine

TABEAU 7 : Crues exceptionnelles sur les bassins étudiés

Bassin versant Dékekira

	Volume m <sup>3</sup>	Débit de pointe m <sup>3</sup> /s	Q max déversé	Q max déversoir	Tm en mn	Tb en mn
Crue rec 0,2	81 250	12,32	0	90	50	205
Crue rec 0,1	106 580	17,68	0	90	40	170
Crue rec 0,05	137 500	41,03	0	90	30	110
Crue rec. 0,02	169 299	54,98	0	90	30	100

Bassin versant El Gouazine

Crue rec 0,2	295 234	40,56	20,45	90	55	220
Crue rec 0,1	385 251	58,59	44,92	90	50	190
Crue rec 0,05	493 698	119,86	105,53	90	40	155
Crue rec. 0,02	606 175	160,11	158,35	90	35	125

En considérant que les paramètres de calage obtenus crue par crue ont une distribution normale, il est possible de calculer un intervalle de confiance pour l'estimation des paramètres de la crue exceptionnelle

estimée. Le tableau 8 donne les intervalles de confiance à 90 % pour l'estimation des caractéristiques des crues décennales pour les deux bassins étudiés.

TABLEAU 8 : Intervalles de confiance (90%) de l'estimation de la crue décennale

Bassin versant	Qmax en m <sup>3</sup> /s	Volume 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	Temps de montée min	Temps de base min
Dékékira	[14.1; 23]	[87.3;123.6]	[55;30]	[240;200]
El Gouazine	[32.5; 51]	[97.3;191.2]	[85;35]	[330;240]

## CONCLUSIONS

Ce modèle simple à mettre en œuvre a permis de prédéterminer des crues exceptionnelles pouvant survenir dans un petit bassin versant de lac collinaire. La prédétermination des crues se fait après l'analyse statistique d'événements pluvieux et la connaissance de la morphologie du bassin versant.

La fonction de production par déconvolution du hyétogramme de la pluie brute peut paraître simpliste. Elle est adaptée à un calage crue par crue du modèle dans un objectif de simulation avec des valeurs moyennes. L'hypothèse de base de cette application, courante en hydrologie opérationnelle, est que la crue d'une occurrence donnée est produite par l'averse de même occurrence toutes les autres conditions de ruissellement étant moyennes.

La fonction de transfert, plus élaborée, repose sur le temps de parcours des chemins hydrauliques. Elle permet une bonne simulation de la forme de la crue et de sa pointe, paramètres de première importance pour le dimensionnement des évacuateurs de crues pour des petits barrages en terre compactée. Dans l'application du modèle, nous avons trouvé peu de différence entre les simulations utilisant la fonction de répartition expérimentale des densités des chemins hydrauliques ou sa représentation par une loi gamma à deux paramètres qui sont la longueur moyenne du réseau hydrographique et l'ordre du cours d'eau à l'exutoire considéré suivant la classification de Strahler. Ces deux valeurs sont faciles à déterminer à partir de la carte d'état major du bassin versant.

Une majorité des bassins avec des lacs collinaires font l'objet de travaux de conservation des eaux et des sols pour tenter de limiter l'envasement des barrages. L'aménagement le plus courant consiste en l'édification de banquettes en terre isohypses sur les versants. Un tel aménagement peut être représenté dans ce modèle par une augmentation de la pluie d'imbibition du bassin et par un allongement de la longueur moyenne des chemins hydrauliques. Des essais concluants ont été réalisés sur les deux bassins présentés aménagés en partie depuis 1997. Les recherches en cours tentent de représenter l'impact des aménagements en banquettes anti érosives par la modification qu'il faut apporter aux paramètres de ce modèle.

## BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL J. & REJEB N. (1997) : Les lacs collinaires en Tunisie : Enjeux, contraintes et perspectives. CR. Acad. Agric. Fr., 1997, pp. 77-88. Séance du 19 Mars 1997. Note présentée par J. ALBERGEL. Discussion pp. 101-104.
- BAILLY C., CORBIERRE V., DUCHESNE J. and LABAQUERE H., 1996. Real-time decision aid-for storm water treatment. Hydroinformatics'96, Proceedings of the second international conference on hydroinformatics, Zurich, Suisse, 9-13 sept. 1996, 245-250.
- BENZARTI Z., 1995. La maîtrise des eaux de surface : l'expérience des lacs collinaires en Tunisie. D.G.R.E. Tunis.
- CHOW V.T., 1964. Handbook of applied hydrology - a compendium of water-resources technology. McGRAW-HILL, New York, Etats Unis, 1418 p.
- CUDENNEC C., DUCHESNE J. 1997. Le modèle H2U, état de l'art : une modélisation déterministe de la transformation de la pluie en débit. Rapport interne, Laboratoire de physique des surfaces naturelles et de génie rural ENSA de Rennes, 35p.
- DCES / IRD (1996 à 2000) Annales Hydrologiques des lacs collinaires de Tunisie.
- DUCHESNE J. et CUDENNEC C., 1998. H2U une fonction de transfert pluie-débit déterministe et polyvalente; vers des applications multiples. Congrès de la société hydrotechnique de France «L'école française de l'eau au service du développement mondial », Chambéry, 15-17 septembre 1998.
- DUCHESNE J. et CUDENNEC C., soumis, Prédiction d'une loi universelle de morphologie des paysages par combinaison de l'invariance d'échelle et de la physique statistique.

- DUCHESNE J., CUDENNEC C. and CORBIERRE V., 1997. Relevance of the H2U model to predict the discharge of a catchment. *Watermatex 97, Proceedings of the fourth international symposium on system analysis and computing in water quality management*, Québec, Canada, 17-20 juin 1997, 265-272.
- DUCHESNE J., CUDENNEC C. and CORBIERRE V., 1997. Relevance of the H2U model to predict the discharge of a catchment. *Water Science and Technology*.
- GRESILLON J.M. et NEYRET-GIGOT J.M., 1993. Storhy: un modèle de prévision fondé sur la séparation entre écoulement de versants et propagation dans le réseau hydrographique. *Hydrol. Continent.*, vol. 8, n01, 35-50.
- LLAMAS J., 1993. *Hydrologie générale - Principes et applications*. GAETAN MORIN EDITEUR, Boucherville, Québec, Canada, 527 p.
- Ministère de l'agriculture Tunisie, 1993. *Stratégie Nationale de la Conservation des Eaux et du Sol 1990-2000*. Copie revue et modifiée.
- NASRI S., ALBERGEL J., SMAOUI M., HABAÏEB H. (1997) : Hydrologie des lacs collinaires en Tunisie. *Les Journées Scientifiques de l'INGREF : Collecte, stockage et valorisation des eaux de ruissellement en agriculture pluviale*. IRESA, SERST, UE, CIHEAM, ORSTOM, GTZ. Monastir, 25-27 Mars 1997.
- RODRIGUEZ-ITURBE I., VALDES J.B., 1979. The geomorphologic structure of hydrologic response. *Water Resources Research*, 15(6), 1409-1420.