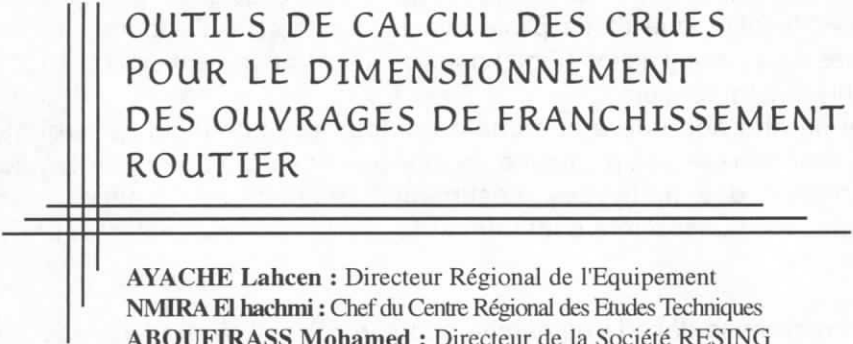




## OUTILS DE CALCUL DES CRUES POUR LE DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES DE FRANCHISSEMENT ROUTIER

**AYACHE Lahcen** : Directeur Régional de l'Équipement

**NMIRA El hachmi** : Chef du Centre Régional des Études Techniques

**ABOUFIRASS Mohamed** : Directeur de la Société RESING

**TAYAA M'hamed** : Professeur, IAV Hassan II

**NAÏMI Mustapha** : Enseignant, Chercheur IAV Hassan II

Le dimensionnement des ouvrages de franchissement routier est une étape importante dans la conception des routes dans nos régions.

En effet, la grande irrégularité des précipitations et le comportement hydrologique extrêmement variable d'un bassin versant à l'autre font qu'il est difficile d'évaluer les paramètres nécessaires à ce dimensionnement.

Cette difficulté est de surcroît accentuée par le manque de données hydrologiques, en particulier pour les bassins non jaugés. Ceci rend par exemple, la détermination des débits de pointes, paramètres prépondérants pour le dimensionnement des ouvrages, très délicate.

Dans ce cadre, la DRTP de Marrakech a réalisé avec la collaboration de la société RESING une étude pilote ayant pour objectif d'élaborer des outils adaptés à sa zone d'action (Fig 1) pour le dimensionnement des ouvrages de franchissement routiers.

La démarche adoptée a cherché à contourner les difficultés habituellement rencontrées (en particulier le manque des données hydrologiques) en utilisant des méthodes d'estimation indirectes se basant sur les paramètres, susceptible d'influencer le ruissellement, facilement accessibles.

L'idée maîtresse dans la démarche adoptée consiste à identifier des zones homogènes en terme de ruissellement. En suite, pour chaque zone homogène tenter de produire des relations qui permettent de calculer les débits au droit de point d'intersection d'une route avec un cours d'eau en se basant sur les observations hydrologiques effectuées sur les bassins jaugés.

Cette démarche, quoique simple dans son principe, a rencontré dans la pratique (voir ci après) des difficultés en raison de (1) l'insuffisance des données et la mauvaise répartition des points de mesure sur la zone de l'étude et (2) la grande différence d'échelle spatiale entre les bassins généralement jaugés et les bassins qui sont généralement considérés lors de dimensionnement d'ouvrages de franchissement.

En terme de ruissellement, les paramètres considérés pour la définition des zones homogènes sont (Fig. 2) :

- \* La topographie (pente) ;
- \* La pédologie (texture, profondeurs des sols) ;
- \* Lithologie de surface ;
- \* Occupation des sols.

La superpositions spatiale de ces paramètres dont l'objectif était d'aboutir à une carte des zones homogènes a été effectuée automatiquement suivant le schéma présenté en Tableau 1 par une technique inspirée des systèmes d'informations géographiques (SIG). Le logiciel utilisé à cet effet est ATLAS GIS. Les zones homogènes identifiées sont au nombre de 6, caractérisées par des niveaux de ruissellement graduellement décroissants.

Une carte des zones homogènes a été élaborée (Fig. 3) accompagné d'une note explicative sur le comportement de ces zones en terme de ruissellement (Tab. 2).

## ANALYSE DES PRÉCIPITATIONS

L'analyse des précipitations a été effectuée sur les données de 72 stations réparties sur l'ensemble de la zone de l'étude. Les caractéristiques par zones géographiques sont comme suit :

| zone géographique | P moy. | P min. | P max. | coef. de variation |
|-------------------|--------|--------|--------|--------------------|
| zone de Marrakech | 241    | 171    | 367    | 33%                |
| zone côtière      | 341    | 264    | 4678   | 28%                |
| Haut Atlas Est    | 462    | 232    | 810    | 31%                |
| Nfis Amont        | 390    | 218    | 642    | 37%                |

L'examen des précipitations annuelles sur la base d'une moyenne mobile sur 10 ans a montré que l'évolution des précipitations est soumise à des fluctuations irrégulières autour d'une moyenne inter-annuelle avec une périodicité peu significative. On note cependant que depuis le début des années 70 et jusqu'à 1990 la moyenne mobile est inférieure à la moyenne interannuelle. Ce qui laisse entendre une diminution plus ou moins régulière des précipitations pendant cette période.

Une analyse fréquentielle sur 21 stations basée sur les relevés des précipitations maximales enregistrées au cours de l'année pour les durées de 24h, 48 h, 72h, 96h et 120h a permis d'élaborer les probabilités théoriques (ainsi que leurs paramètres) et les barèmes (probabilité récurrence) correspondants.

**Tableau 1: Description des zones homogènes dans la zone d'action de la DRTP-Tensift**

| Zone homogène | Localisation géographique                                                                                | Description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ZH1           | Zone côtière entre Safi et Agadir et une partie de la plaine des Abda Doukkala sur une largeur de 50 Kms | Cette zone est occupée par les terrains récents et quaternaires composés principalement de dunes vives et consolidées, sables et alluvions et détritiques et calcaires lacustres. Les sols développés sur ces matériaux sont des sols à complexes de rendzines, peu évolués sableux. La végétation est dominée par les forêts et parcours à steppes. Seule une partie des terrains est cultivée par des céréales. La forêt est surtout développée au sud d'Essaouira et elle est prédominée par l'arganier. C'est une zone où l'infiltration des eaux de pluies est très importante du fait que le matériau est très perméable et la pente est très faible.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| ZH2           | Plateau des Mouissates, Jbel Hadid Kourati, Ouamsiten.                                                   | Les terrains composant cette zone sont principalement de nature calcaire et marneux calcaires fissurés par endroits notamment dans le plateau des Mouissates. Sur ces terrains, les pentes sont faibles à fortes et les sols sont calcaires peu profonds à moyennement profonds (complexe de rendzines et bruns calcaires). Les lithosols sont surtout répandus dans la zone des plateaux à Mouissates. Dans cette zone, on trouve très peu de terrains cultivés, c'est surtout les terrains de parcours et de forêt qui dominent. C'est une zone caractérisée par une infiltration assez élevée et qui est due à la structure fissurée des calcaires jurassiques et crétacés. Le ruissellement est faible sur les terrains en pente.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| ZH3           | Haouz, plaine de Mejjat, Bahira, Tessaout, rive gauche entre Chichaoua et l'embouchure de Tensift        | Cette zone homogène est faite de terrains qui sont caractérisés par une formation géologique quaternaire et tertiaire. Les matériaux sont soit des alluvions ou dépôts d'oueds, soit des argiles et limons de terrasses. Les sols sont dans leur majorité calcimagnésiques et isohumiques caractérisés par des profondeurs moyennes et profondes et des textures limoneuses et limono-argileuses à argileuses. Ce sont des endroits où les conditions d'installation des cultures sont favorables en bœuf et en irrigué. Mise à part le périmètre irrigué du Haouz ou les cultures peuvent être diversifiées, le reste de cette zone est occupé principalement par des cultures céréalières et légumineuses en plus bien sur des oliviers. Ces terrains se trouvant sur des pentes très faibles et faibles (moins de 5 %) ne permettent pas l'évacuation rapide des eaux de pluie. Par conséquent les eaux peuvent stagner longtemps avant le dessèchement total du sol. La perméabilité des sols est moyenne et l'eau peut uniquement ruisseler quand le sol est saturé. Cette zone correspond aussi dans certains endroits à des bassins endoréiques. |

|     |                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ZH4 | Piémonts, zone de dir et hautes terrasses de Oued Tensift et NFis, glacis et cônes de déjection de Tessaoutte amont | Cette zone est caractérisée par des formations géologiques quaternaires composées en grande partie par des alluvions, colluvions et des dépôts encroûtés. Les pentes y sont faibles et moyennes. Cette zone constitue la transition entre les plaines et les montagnes. Le raccordement est généralement assuré par une série de glacis et de cônes de déjection. Les sols par leur position topographique sont très peu développés. Ce sont des sols peu évolués d'érosion peu à moyennement profonds, localement caillouteux, limoneux, limono-argileux et argilo-sableux. L'utilisation des sols reste très extensive. En effet ce sont les parcours et forêt peu dégradés qui dominent. Ces terrains sont qualifiés de moyennement perméable à cause de la pente et du couvert végétal très peu dense. Cette zone est surtout marquée par l'existence d'une série d'oueds affluents de oued Tensift et qui drainent le Haut Atlas. |
| ZH5 | Extrémité occidentale du Haut Atlas, pays des Haha et une partie du bassin d'Essaouira                              | Cette zone comprend les terrains triasiques et permo-triasiques du Haut Atlas et une partie des terrains crétacés aux environs du bassin d'Essaouira. Ces terrains argileux et argilo-sableux et calcaires ont donné naissance à un complexe de sols peu évolués, rendzines et bruns calcaires. Ces sols sont généralement peu à moyennement profonds, moyennement caillouteux en montagnes. Ils sont généralement situés sur des pentes très fortes dans l'Atlas où ils sont bien drainés. Dans le bassin d'Essaouira, une hydrographie en chevelu dense assure le drainage de ces terrains. Ces terrains sont occupés par des parcours et des forêts, avec des cultures céréalières et de l'arboriculture dans certains endroits. L'infiltration dans ces terrains est minimale. En effet la pente forte, le couvert végétal très dégradé font que le ruissellement l'emporte sur l'infiltration.                                    |
| ZH6 | Haut Atlas central, Massif des Jbilet et des Rehamna                                                                | Les terrains de cette dernière zone sont anciens (précambriens et paléozoïques). Ils sont de nature schisteuse, calcaires, marneux et conglomératiques. Les sols sont moins développés sur ces terrains, en effet, seuls les lithosols dominent dans ces montagnes. Le couvert végétal est principalement forestier (composé de brousses, chêne vert et genévrier) dans le Haut Atlas et fait de parcours à steppes et arbustes dans les deux massifs de Jbilet et Rehamna. Cette zone regroupe les terrains en pente forte à très forte, rocailleux avec très peu de sols, favorisant ainsi les phénomènes de ruissellement et par conséquent une érosion très accentuée.                                                                                                                                                                                                                                                             |

L'ajustement de différentes lois aux séries de pluies maximales de différentes durées a montré que la loi log normale ou log Gumbel sont celles qui représentent le mieux les séries observées (sauf pour le cas de la station de Safi).

L'établissement des relations intensité-durée-fréquence a montré que les intensités maximales de 24 heures varient entre 1.1 mm/h (Abadla et Chichaoua) et 2.4 mm/h (Ademaghene) pour une période de récurrence de

2 ans et entre 2.7 mm/h (chichaoua) et 10 mm/h (Aït adel, Ademaghene, et Tahanaoute) pour une période de récurrence de 100 ans. Il faut noter que, d'une manière générale, pour les différentes durées et périodes de récurrence, les intensités maximales sont plus élevées dans la zone du Haut Atlas Est que dans d'autres zones.

Les données d'intensité ont été ajustées selon une courbe puissance du type

$$I = at^{-b}$$

où  $a$  et  $b$  sont des constantes,  $I$  est l'intensité maximale (mm/h) et  $t$  la durée en heure. Les résultats obtenus pour les différentes stations sont consignés dans le Tableau 2. Graphiquement ce tableau est traduit par une famille de courbe pour chaque station. Un exemple d'une telle représentation est consigné dans la Figure 4.

Figure 4q. Ajustement de la loi Pearson 3 aux débits de crues (Station - Imin El Hammam)

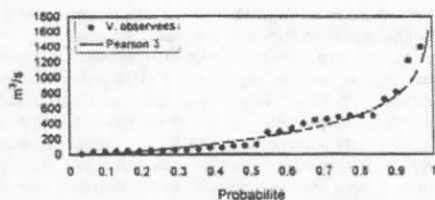


Figure 4r. Ajustement de la loi Pearson 3 aux débits de crues (Station - Igrounzer)

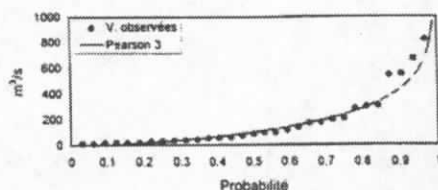


Tableau 3 : Débits de crue - maximum et minimum ainsi que l'année correspondante pour les différentes stations hydrométriques.

| BASSIN      | STATION          | MAX    | ANNEE | MIN   | ANNEE |
|-------------|------------------|--------|-------|-------|-------|
| TENSIFT     | TAHANNAOUTE      | 680.0  | 94/95 | 8.7   | 69/70 |
|             | SIDI RAHAL       | 685.0  | 81/82 | 5.5   | 82/83 |
|             | AGHBALOU         | 1030.0 | 94/95 | 8.1   | 80/81 |
|             | TAFERJATE        | 680.0  | 81/82 | 14.7  | 82/83 |
|             | ABADLA           | 1023.0 | 87/88 | 3.7   | 82/83 |
|             | TALMESTE         | 1270.0 | 88/87 | 45.9  | 82/83 |
|             | LALLA TAKERKOUST | 1000.0 | 67/68 | 34.0  | 75/76 |
|             | IGUIR N'KOURIS   | 1120.0 | 88/89 | 13.7  | 92/93 |
|             | IMIN EL HAMMAM   | 1400.0 | 67/68 | 9.0   | 92/93 |
|             | ILOUDJANE        | 287.0  | 89/90 | 1.2   | 82/83 |
| OUM ER RBIA | BISSI BISSA      | 1140.0 | 89/90 | 6.5   | 92/93 |
|             | ADDEMAGHENE      | 259.4  | 91/92 | 5.9   | 81/82 |
|             | AIT SIGMINE      | 1420.0 | 91/92 | 26.2  | 92/93 |
|             | OULED SIDI DRISS | 1124.0 | 91/92 | 108.0 | 82/83 |
| KSOB        | IGROUNZAR (KSOB) | 822.7  | 95/96 | 11.4  | 82/83 |
|             | ADAMNA           | 1600.0 | 95/96 | 19.4  | 92/93 |

## ANALYSE DES CRUES

Les données analysées sont de deux types :

- les débits mensuels (11 stations)
- les débits maximums instantanés : (10 stations dans le bassin du Tensift, 2 stations dans le bassins du Ksob et 4 stations dans le bassins de l'Oum Rbia).

La longueur des séries des débits maximums varie entre 11 et 41 années. Pour les stations dont les séries sont courtes (Igrounzar : 20 ans, Ouled Sidi Driss : 11 ans et Ademaghene : 16 ans) nous avons procédé à des corrélations pour ramener les longueurs à des valeurs acceptables. Les équations utilisées sont :

$$\begin{aligned}
 \text{Igrounzar} &= 0.53 \times \text{Adamna} + 6.7 & (R=0.87) \\
 \text{Ouled Sidi Driss} &= 0.7 \times \text{Ait Segmine} + 130 & (R=0.85) \\
 \text{Ademaghene} &= 0.18 \times \text{Ait Segmine} + 3.76 & (R=0.86)
 \end{aligned}$$

Débits moyens mensuels : L'analyse des débits mensuels montre que ces derniers varient entre 0.42 m<sup>3</sup>/s à Sidi Hsain et environ 8 m<sup>3</sup>/s à Talmeste, avec un coefficient de variation qui varie de 125% (Aghbalou) à 161% (Tahanaoute).

A l'Echelle interannuelle le débit moyen mensuel varie entre 0.01 m<sup>3</sup>/s durant le mois d'Août et environ 17 m<sup>3</sup>/s durant le mois d'Avril à Talmeste. Le débit moyen mensuel est atteint pendant la période qui couvre les mois de Janvier, Février et Mars pour les stations de Sidi Hsain et Sidi Bouothmane, et Mars, Avril et Mai pour les autres stations. Cependant, il faut signaler l'existence d'un deuxième maximum relativement élevé, au mois de Novembre pour les stations situées sur Oued Nfis et Oued Tensift.

**Débits maximum instantanés :** Le régime des crues est caractérisé par une irrégularité interannuelle très forte. En effet, les crues varient entre 1.2 m<sup>3</sup>/s (Ilodjane) et 1400 m<sup>3</sup>/s (Imin El Hamam) pour le bassin du Tensift, 5.9 m<sup>3</sup>/s (Ademaghene) et 1420 m<sup>3</sup>/s (Ait Sigmime) pour le Bassin de l'Oum Rbia et entre 11.4 m<sup>3</sup>/s (Igrounzar) et 1600 m<sup>3</sup>/s (Adamna) pour le bassin de l'Oued Ksob.

L'analyse fréquentielle effectuée sur les débits de 16 stations a permis de retenir la loi Pearson III pour 9 stations (Imin El Hammam, Aghbalou, Taferiale, Lalla Takerkoust, Ighir Nkouris, Talmeste, Ademaghene, Adamna, et Igrounzar), la loi Log Normale pour 5 stations (Sidi Rahal, Iloudjane, Bissibissa, Ait Sigmime et Ouled Sidi Driss), la loi Gumbel pour la station Abadla et la loi Log Gumbel pour la station Tahanaoute. La Figure 4 donne une illustration du niveau d'ajustement obtenu. Le Tableau 3 donne les débits de crues calculés pour différentes périodes de retour.

## ESTIMATION DES DÉBITS DE CRUES

La détermination du débit de pointe au niveau des ouvrages de franchissement des routes est confronté au manque de données. Pour faire face à cette difficulté, nous considérons ici plusieurs approches :

- méthodes empiriques ;
- méthode basée sur l'hydrogramme de crue ;
- régressions multiples.

### 1 - MÉTHODES EMPIRIQUES

Il existe plusieurs formules empiriques de calcul qui ne peuvent être appliquées d'une façon systématique pour le calcul des débits de crues. D'une façon générale ces formules permettent l'estimation des débits de pointe de



crues en fonction des caractéristiques du bassin versant. On distingue des formules cinématiques et des formules non cinématiques selon qu'elles utilisent ou non le temps de concentration.

### **Formules cinématiques :**

Il s'agit principalement de la méthode rationnelle et de la méthode de l'hydrogramme unitaire.

**Méthode rationnelle :** La méthode rationnelle ou bien la méthode du Mulvany et al. (1989) est largement utilisée dans l'étude des systèmes de drainage pour les surfaces urbanisées et pour les petits bassins. Elle suppose que le débit de pointe est engendré par une pluie de durée égale au temps de concentration et peut s'exprimer par la formule suivante :

$$Q_m = 0.278 K I A$$

Où :  $Q_m$  est le débit maximal ( $m^3/s$ ),  $K$  est le coefficient de ruissellement,  $I$  est l'intensité de fréquence donnée et d'une durée égale au temps de concentration du bassin ( $mm/heures$ ) et  $A$  est la surface du bassin ( $km^2$ )

**Temps de concentration :** Plusieurs méthodes permettent le calcul du temps de concentration ( $T_c$ ) en fonction des caractéristiques topographiques du bassin versant (surface, longueur, gradient topographique, dénivelée..). Parmi ces méthodes on peut citer les formules suivantes :

#### **• Formule de Kirpich (1940) : $T_c (mn) = 0.0195 L^{0.77} S^{-0.382}$**

Où :  $S$  est la pente du bassin ( $H/L$ ) et  $L$  est la longueur du bassin à partir du point le plus éloigné jusqu'à l'exutoire ( $m$ ) et  $H$  est la différence d'altitude du bassin ( $m$ )

#### **• Formule de Giandotti : $T_c = ((4 A^{0.5} + 1.5 L) / (0.8 h^{0.5} - H_o)) 60$**

Où :  $h$  est l'altitude moyenne du bassin versant ( $m$ ), et  $H_o$  est l'altitude à l'exutoire ( $m$ ) et  $A$  est la surface du bassin ( $km^2$ )

Cette formule a été largement utilisée au Maroc (Yacoubi et al., 1996) :

• **Formule de Turrazza** :  $T_c \text{ (heures)} = 0.0529 * (A * L / S)^{1/3}$

Où : L est la longueur du cours d'eau principal (km), et S est la pente du cours d'eau principale (m/km) et A est la surface du bassin (km<sup>2</sup>)

**Coefficient de ruissellement** : K est choisi en fonction des données physiques du bassin versant, comme le relief ou topographie, la nature du sol, la nature et le taux de recouvrement de la végétation, etc. Le Tableau 4 donne quelques exemples de la valeur de K en fonction de la texture de la surface du sol pour différentes classes de pente.:

**Tableau 4 : Valeurs du coefficient de ruissellement en fonction du type de sol et de la pente du terrain**

| Type de surface         | Pente   | K           |
|-------------------------|---------|-------------|
| Sols à texture sableuse | < 2 %   | 0.05 - 0.10 |
|                         | 2 - 7 % | 0.10 - 0.15 |
|                         | > 7%    | 0.15 - 0.20 |
| Sols à texture lourde   | < 2 %   | 0.13 - 0.15 |
|                         | 2 - 7 % | 0.18 - 0.22 |
|                         | > 7%    | 0.25 - 0.35 |

La méthode rationnelle est fréquemment utilisée pour des bassins dont la surface ne dépasse pas 13 km<sup>2</sup>. Elle suppose que le taux de ruissellement est égal à la pluie excédentaire, la période de retour du débit maximum est égale à celle de la pluie maximale de durée égale au temps de concentration et le coefficient de ruissellement (K) est constant sur tout le bassin et pendant toute la durée de l'averse.

**Méthode de l'hydrogramme unitaire** : Elaborée par Sherman dès 1932 aux USA, la méthode de l'hydrogramme unitaire a été largement utilisée pour l'estimation des crues à partir des données de pluie. Elle a été ensuite étendue aux bassins non jaugés par le biais de la méthode de l'hydrogramme unitaire synthétique (méthode de Snyder, notamment) et de la technique de l'hydrogramme adimensionnel.

Il faut noter que l'utilisation de la méthode de l'hydrogramme unitaire exigent un certain nombre de conditions simplificatrices relatives à l'uniformité des précipitations dans le temps et l'espace et à l'homogénéité du bassin produisant le ruissellement.

### **Formules non cinématiques**

Il existe plusieurs formules empiriques qui expriment le débit de crue en fonction des caractéristiques physiques du bassin versant. La plupart de ces formules s'apparentent à la formule de Myer qui est de la forme :

$$Q = C(A)^n$$

Où :  $Q$  ( $m^3/s$ ) est le débit,  $A$  la superficie en  $km^2$ ,  $C$  est une constante déterminée en fonction des caractéristiques du bassin versant, en particulier de sa pente moyenne, et  $n$  un exposant dépendant de la pente moyenne du bassin et de la fréquence des crues.

Fuller a suggéré une valeur  $n = 0.8$ , Myer a proposé que celle-ci soit égale à 0.5, alors que Fanning a utilisé une valeur de  $n = 5/6$ . Cette différence dans les valeurs de  $n$  est suffisante pour dire que cette formule reste uniquement applicable là où elle a été mise au point.

Signalons que Hazan et Lazarevic ont mis au point des formules similaires pour différentes régions du Maroc. Les résultats de ces formules sont résumés dans le Tableau 5.

**Tableau 5 : Formules de détermination de débit de pointe en fonction de la superficie du bassin versant pour quelques régions du Maroc**

| <b>Zone géographique</b> | <b>Débit (<math>m^3/s</math>)</b> | <b>Pluie (cm)</b> |
|--------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Rif central              | $Q_{1000}=15.55 (A)^{0.776}$      | 100 - 130         |
| Rif occidental           | $Q_{1000}=9.78 (A)^{0.793}$       | 80 - 100          |
| Rif oriental             | $Q_{1000}=7.58 (A)^{0.808}$       | 60 - 80           |
| Haut Atlas saharien      | $Q_{1000}=9.38 (A)^{0.742}$       | 20 - 40           |
| Moyen Atlas              | $Q_{1000}=14.94 (A)^{0.636}$      | 70 - 90           |
| Moyen Atlas              | $Q_{1000}=13.51 (A)^{0.613}$      | 50 - 70           |
| Moyen Atlas (Karst)      | $Q_{1000}=13.47 (A)^{0.0587}$     | 40 - 70           |

Les formules qui relient le débit à la surface du bassin ne précisent jamais la fréquence d'apparition du débit de crue. Fuller semble avoir été le premier à exprimer le débit de crue en fonction de la période de retour (T) selon la formule suivante :

$$Q(T) = q ( 1 + 0.8 \log(T) )$$

Où Q(T) est le débit de crue de temps de retour T, q est la moyenne des débits maximums annuels, calculée à partir des données disponibles.

Cette formule a été ensuite modifiée comme suit :

$$Q_p = Q(T) ( 1 + 2.66 (A)^{-0.3} )$$

Q<sub>p</sub> est le débit de pointe exprimé (m<sup>3</sup>/s) et A est l'aire du bassin versant (km<sup>2</sup>)

Une version modifiée de cette formule a été adaptée au Maroc (Sghir, 1996) :

$$Q_p = q ( 1 + a \log(T) ) ( 1 + (2.66 (A)^{-0.3}) )$$

Où q est la moyenne des débits maximums annuels, calculée à partir des données disponibles (m<sup>3</sup>/s), a est une constante variant entre 0.8 et 1.2 pour les oueds de la zone rifaine et entre 3.0 et 3.5 pour les oueds la région sahariennes

La formule de Fuller ne permet, à vrai dire, d'aboutir qu'à des ordres de grandeur. Le coefficient multiplicateur du paramètre log(T) dépend beaucoup plus des caractéristiques hydrologiques du bassin versant.

## 2 - HYDROGRAMMES DES CRUES

L'analyse des hydrogrammes disponibles aux stations de jaugeage montre une grande diversité de forme et de temps de base liée à la structure des épisodes pluvieuses.

Le Tableau 6 récapitule certaines caractéristiques de quelques crues observées dans la zone de Tensift.

Ce tableau montre que le temps de réponse de ces crues varie entre 2 heures dans le cas de la station d'Adamna (crues du 5 Mai 1993 et du 11 et 1 Novembre 1995) et 63 heures pour la crue du 5 au 10 Décembre, 1991

Tahanaoute. Le temps de base des hydrogrammes de ces crues oscille entre 4 heures (crue du 11 au 12 Novembre 1995 à Adamna) et 5 jours; cas de la crue du 5 au 10 Décembre 1991 à Tahanaoute. Le débit de crue quant à lui varie entre 20 et 1600 m<sup>3</sup>/s (crues du 5 Mai 1993 et du 11 au 12 Novembre 1995).

### 3 - RÉGRESSIONS MULTIPLES

La méthode des régressions multiples a été utilisée pour obtenir des relations statistiques entre le débit de crue à différentes fréquences (Q<sub>2</sub>, Q<sub>5</sub>, Q<sub>10</sub>, Q<sub>20</sub>, Q<sub>50</sub> et Q<sub>100</sub>) et certains paramètres physiques et hydrologiques pertinents.

Les variables explicatives considérées dans cette analyse sont les suivants :

**A** : Superficie en km<sup>2</sup>, obtenue par détermination automatique après numérisation de la limite des bassins versants.

**P** : Précipitations mesurées (mm)

**LCP** : Longueur du cours d'eau principal (km), mesuré automatiquement après avoir numériser les limites et le réseau des bassins numérisés

**PMCP** : Pente moyenne du cours d'eau principal (%), calculée sur les cartes topographiques le long du cours d'eau principal.

**AM** : Altitude maximale (m), déterminée directement sur la carte topographique

**AM** : Altitude minimale (m), déterminée directement sur la carte topographique

**TC** : temps de concentration (heures) calculé par la méthode de Kirpich décrite auparavant.

**DMM** : Moyenne annuelle des débits maximum instantanés (m<sup>3</sup>/s)

**DM** : Débit moyen annuel (m<sup>3</sup>/s)

**I<sub>2</sub>, I<sub>5</sub>, I<sub>10</sub>, I<sub>20</sub>, I<sub>50</sub>, I<sub>100</sub>** : les intensités de pluie (mm/heures) pour des périodes de retour respectivement de 2, 5, 10, 20, 50, et 100 ans

Quant aux variables dépendantes ou variables à expliquer, nous avons considéré les débits de crue Q<sub>2</sub>, Q<sub>5</sub>, Q<sub>10</sub>, Q<sub>20</sub>, Q<sub>50</sub>, Q<sub>100</sub> pour les périodes de retour respectivement de 2, 5, 10, 20, 50, et 100 ans.

Un résumé des données statistiques disponibles est consigné dans le

Tableau 7. La matrice de corrélation est consignée dans le Tableau 8.

D'après cette matrice, on peut facilement constater que le débit moyen (DM) enregistré à l'exutoire d'un bassin versant donné est significativement corrélé à la surface de celui ci ( $r = + 0.85$ ,  $p < 0.0005$ ), à la longueur du cours principal (LCP) ( $r = + 0.835$  ;  $p < 0.0005$ ), au temps de concentration ( $T_c$ ) ( $r=0.898$ ,  $p<0.0005$ ) et au débit moyen maximum ( $r = 0.733$ ,  $p < 0.005$ ). Les meilleures corrélations ont été observées respectivement pour la variable superficie (A) et la variable LCP ( $r=0.94$ ), d'une part, et la superficie et le temps de concentration, ( $r=0.898$ ), d'autre part. Les coefficients de corrélation négatifs ont été relevés pour la variable pente moyenne du cours principal (PMCP) et le temps de concentration ( $T_c$ ), d'une part ; et entre la longueur du cours principal et le coefficient de ruissellement (CR), d'autre part.

**Tableau 6 : Caractéristiques de certaines crues au niveau de la zone de Tensift**

| Station        | Date de la crue       | Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s) | Temps de réponse (heures) | Temps de base (heures) |
|----------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------|------------------------|
| Adamna         | 11 - 12 Novembre 1995 | 642.50                              | 2                         | 14.5                   |
|                | 21 - 26 Janvier 1996  | 1602                                | 22                        | 112                    |
|                | 21 - 22 Décembre 1996 | 538                                 | 14.5                      | 91.5                   |
|                | 5 Mai 1993            | 20                                  | 2                         | 23.5                   |
| Imin El Hammam | 14 - 18 Décembre 1995 | 501                                 | 26                        | 91                     |
|                | 22 - 26 Janvier 1996  | 381                                 | 19                        | 105                    |
| Sidi Rahal     | 27 - 29 Décembre 1995 | 50.6                                | 8.5                       | 36                     |
|                | 9 - 10 Juin 1996      | 293                                 | 4.5                       | 30.5                   |
| Ighir Nkouris  | 22 - 24 Janvier 1996  | 155                                 | 15                        | 53                     |
| Tahanaoute     | 24 - 26 Mars 1996     | 68.2                                | 25                        | 39                     |
|                | 5 - 10 Décembre 1991  | 38.75                               | 63                        | 120                    |
| Abadla         | 15 - 16 Juin 1996     | 75                                  | 4                         | 34                     |
|                | 11 - 13 Octobre 1995  | 174.2                               | 10                        | 47                     |
|                | 28 - 30 Janvier 1996  | 76.2                                | 10                        | 38                     |
| Talmeste       | 14 Février 1983       | 45.87                               | 7                         | 20                     |
|                | 16 Février 1983       | 31.92                               | 5                         | 19                     |
|                | 2 - 4 Novembre 1987   | 800.7                               | 31                        | 60                     |
|                | 11 - 13 Février 1987  | 400.8                               | 34.5                      | 59                     |

L'application de la méthode des régressions multiples a permis d'établir des relations entre le débit à différentes périodes de retour et les différentes caractéristiques physiques des bassins versants. Pour cette fin nous avons utilisé le logiciel statistique SAS/STAT (1996), basé sur la technique de sélection de variables dite "Forward". Pour chacune des variables indépendantes la méthode calcule le F statistique qui reflète la contribution de la variable dans le modèle quand elle est introduite. Les probabilités p de ces F statistiques sont comparées à la valeur spécifiée dans le modèle. Quand le niveau de signification est plus grand que cette valeur, la sélection s'arrête. Autrement elle rajoute la variable qui a la plus grande valeur du F statistique au modèle.

Après quoi la sélection "Forward" calcule le F statistique pour les autres variables non encore introduites dans le modèle et le processus d'évaluation est répété. Aussi les variables sont rajoutées l'une après l'autre jusqu'à ce que les variables restantes ne produisent de F statistique significatif. Signalons qu'une fois la variable est introduite dans le modèle, elle reste. La méthode a été appliquée aux variables normales (telles qu'elles) puis aux variables transformées par l'application du logarithme décimal.

Un premier résultat important est que la variable DMM apparaît dans toutes les relations trouvées (Tab 9). Cependant, comme DMM est difficile à obtenir, on a cherché à l'éliminer. Dans ce cas, une grande partie de la variabilité a été expliquée par la superficie du bassin (A) et la longueur du cours d'eau principal (LCP) (Tab 10).

Les équations de régression obtenues sur les variables transformées par l'application de la fonction logarithme permettent de tirer les mêmes conclusions, avec cependant, une légère amélioration des valeurs du coefficient de détermination.

## CONCLUSION

Les résultats rapportés dans la présente note portent sur la première partie de l'étude que réalise la DRTP du Tensift en collaboration avec la société RESING pour l'élaboration d'outils de calcul des crues en vue de dimensionner les ouvrages de franchissement routiers.

Cette partie a concerné essentiellement l'analyse des données pour les bassins jaugés. Plusieurs méthodes ont été développées pour le calcul des

débits de crues (méthodes empiriques, méthode basée sur les hydrogrammes des crues et régressions multiples).

Dans la deuxième partie de l'étude, en cours de réalisation et dont les résultats seront communiqués ultérieurement, on s'intéressera essentiellement aux bassins non jaugés avec des approches basées notamment sur l'analyse des relations pluie-débit.

**Tableau 7 : Caractéristiques statistiques des données**

**Tableau 7 : Caractéristiques statistiques des données**

| Variable | N  | Moyenne | Maximum | Minimum | Ecart Type |
|----------|----|---------|---------|---------|------------|
| Q2       | 13 | 32.2    | 77      | 9       | 16.9       |
| Q5       | 13 | 332.8   | 592     | 62      | 177.2      |
| Q10      | 13 | 492.6   | 800     | 116     | 239.0      |
| Q20      | 13 | 670.3   | 1092    | 181     | 298.3      |
| Q50      | 13 | 942.2   | 1499    | 245     | 372.6      |
| Q100     | 13 | 1189    | 1829    | 295     | 443.6      |
| DM       | 13 | 4.3     | 7.9     | 1.6     | 1.8        |
| A        | 13 | 1744.0  | 8471    | 338     | 2330.1     |
| P        | 13 | 359.3   | 644     | 171     | 141.6      |
| LCP      | 13 | 77.5    | 232     | 37      | 50.1       |
| PMCP     | 13 | 3.5     | 6.9     | 1.4     | 1.7        |
| AM       | 13 | 2468.3  | 3600    | 550     | 929.2      |
| Am       | 13 | 736.4   | 1200    | 50      | 362.4      |
| Tc       | 13 | 9.4     | 24.8    | 2.8     | 7.1        |
| DMM      | 13 | 213.3   | 391.0   | 44.0    | 110.8      |
| CR       | 13 | 0.4     | 0.8     | 0.1     | 0.2        |
| I2       | 13 | 4.6     | 9.1     | 1.1     | 2.3        |
| I5       | 13 | 7.2     | 17.9    | 1.7     | 4.4        |
| I10      | 13 | 9.4     | 25.3    | 2.1     | 6.3        |
| I20      | 13 | 11.8    | 33.8    | 2.5     | 8.8        |
| I50      | 13 | 15.6    | 47.0    | 3.0     | 12.9       |
| I100     | 13 | 19.1    | 58.4    | 3.5     | 17.0       |



Tableau 8 : Matrice de corrélation entre les différentes variables

| Variables utilisées | Equations de régressions             | R <sup>2</sup> | Prob.p |
|---------------------|--------------------------------------|----------------|--------|
| DM                  | $Q2 = -35.0 + 41.62DM$               | 0.691          | 0.0004 |
| DM ; A              | $Q2 = -2.22 + 29.31DM + 0.011A$      | 0.713          | 0.0019 |
| DM                  | $Q5 = 17.06 + 74.0DM$                | 0.587          | 0.0023 |
| DM                  | $Q10 = 111.46 + 89.34DM$             | 0.469          | 0.0097 |
| DM                  | $Q20 = 260.73 + 95.98DM$             | 0.348          | 0.0336 |
| DM                  | $Q50 = 583.70 + 84.0DM$              | 0.171          | 0.1600 |
| DM ; I50            | $Q50 = 303.54 + 120.29DM + 8.02I50$  | 0.215          | 0.2966 |
| LCP                 | $Q100 = 1026.25 + 2.10LCP$           | 0.056          | 0.4350 |
| LCP ; I100          | $Q100 = 771.14 + 3.44LCP + 7.87I100$ | 0.123          | 0.5177 |

Tableau 9 : Résultats de régressions multiples (b) variables normales sans la variable DMM

|      | DM               | A                | P                | LCP              | PMCP             | AM               | Am               | Tc               | DMM              | CR             |
|------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|
| DM   | 1.0000<br>0.0000 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                |
| A    | 0.8554<br>0.0002 | 1.000<br>0.000   |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                |
| P    | -0.451<br>0.1213 | -0.484<br>0.0935 | 1.000<br>0.000   |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                |
| LCP  | 0.8355<br>0.0004 | 0.9406<br>0.0001 | -0.448<br>0.1244 | 1.000<br>0.000   |                  |                  |                  |                  |                  |                |
| PMCP | -0.464<br>0.1102 | -0.296<br>0.3258 | 0.3514<br>0.2390 | -0.450<br>0.1225 | 1.000<br>0.000   |                  |                  |                  |                  |                |
| AM   | -0.318<br>0.2892 | -0.084<br>0.7630 | 0.5474<br>0.0528 | -0.006<br>0.9835 | 0.4865<br>0.0895 | 1.000<br>0.000   |                  |                  |                  |                |
| Am   | -0.154<br>0.6151 | -0.095<br>0.7554 | 0.406<br>0.1678  | -0.008<br>0.9835 | 0.1436<br>0.6397 | 0.6073<br>0.0277 | 1.000<br>0.000   |                  |                  |                |
| Tc   | 0.898<br>0.0001  | 0.9346<br>0.0001 | -0.573<br>0.0407 | 0.9257<br>0.0001 | -0.504<br>0.0790 | -0.305<br>0.3096 | -0.108<br>0.7245 | 1.000<br>0.000   |                  |                |
| DMM  | 0.7334<br>0.0043 | 0.6379<br>0.0190 | -0.271<br>0.3702 | 0.6676<br>0.0126 | -0.343<br>0.2509 | -0.164<br>0.5911 | -0.099<br>0.7452 | 0.6963<br>0.0082 | 1.000<br>0.000   |                |
| CR   | -0.302<br>0.3147 | -0.516<br>0.0705 | -0.178<br>0.5598 | -0.467<br>0.1070 | 0.2503<br>0.4093 | -0.147<br>0.6311 | 0.1128<br>0.7136 | -0.404<br>0.1705 | -0.285<br>0.3448 | 1.000<br>0.000 |

Tableau 10 : Transformation des équations sous forme multiplicative et élimination de la variable DMM

| Equations transformées                                      | R <sup>2</sup> |
|-------------------------------------------------------------|----------------|
| Q2 = 16.5576(DM) <sup>1.382</sup>                           | 0.582          |
| Q5 = 47.3151(DM) <sup>1.261</sup>                           | 0.612          |
| Q10 = 104.7128(DM) <sup>1.004</sup>                         | 0.477          |
| Q10 = 117.2195(DM) <sup>1.1099</sup> (CR) <sup>0.235</sup>  | 0.504          |
| Q20 = 211.3489(DM) <sup>0.761</sup>                         | 0.367          |
| Q50 = 444.6312(DM) <sup>0.477</sup>                         | 0.168          |
| Q50 = 1096.4781(DM) <sup>0.410</sup> (Am) <sup>-0.126</sup> | 0.210          |
| Q100 = 2951.2092(Am) <sup>-0.156</sup>                      | 0.076          |