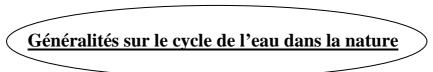
# Module N°3: Hydrologie

# **Chapitres:**

- 1) Généralités sur le cycle de l'eau dans la nature
- 2) Etude des précipitations
- 3) Les cours d'eau
- 4) Analyses des crues
- 5) Entretien et aménagement des cours d'eau
- 6) La modélisation hydrologique



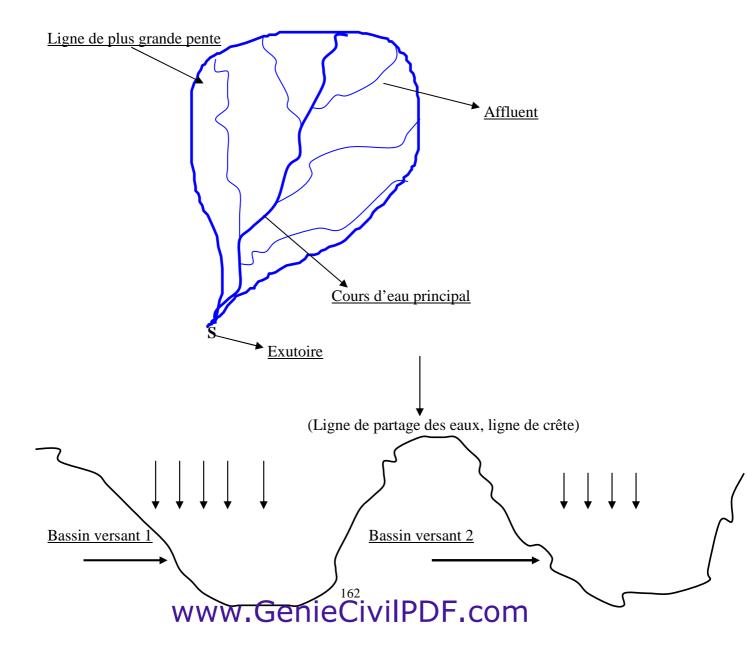
# I) Introduction:

L'eau obéit dans la nature à un cycle, l'origine est matérialisée par les précipitations. L'hydrologie est la science qui étudie ce cycle ainsi que ses paramètres fondamentaux : pluie, ruissellement, infiltration, évapotranspiration.

# II) Notion de bassin versant :

Le bassin versant relatif à une section droite S d'un cours d'eau est la surface telle que tous les écoulements - dus aux précipitations - qui prennent naissance dans celle-ci traversent la section S, c'est la surface drainée par le cours d'eau et ses affluent en amont de S.

Un bassin versant sera limité par des lignes de partage des eaux. En général, et s'il n'y a pas d'écoulement souterrain parasite, ces lignes de partage des eaux sont des crêtes rejoignant la section par deux lignes de pente. Le bassin versant hydrologique est alors confondu avec le bassin versant topographique que l'on peut déterminer aisément à partir d'une carte topographique.





Un bassin versant est souvent décomposé en sous bassins élémentaires selon les critères suivants :

- \* Répartition en fonction de l'altitude.
- \* Répartition en fonction de la surface occupée par des glaciers pour les bassins de haute montagne. (Cette répartition est bien fondée compte tenu de l'influence des glaciers sur les débits).
- \* Répartition en fonction de la nature lithologique et notamment de la perméabilité (celle-ci intervient sur la rapidité de montée des crues et sur la valeur des débits d'étiage qui sont influencés par les nappes souterraines).
- La longueur d'un bassin versant est la longueur du trajet le plus long qu'une goutte d'eau est susceptible de parcourir entre son point de chute et l'exutoire.

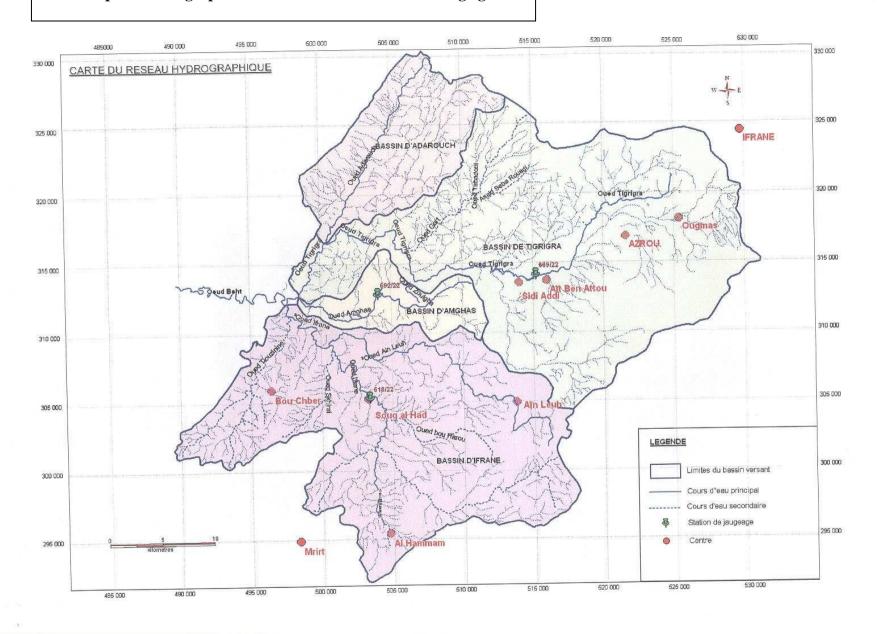
- L'indice de compacité d'un bassin versant est défini comme suit :  $I_c = (0.28 \text{ x P}) / \sqrt{A}$ 

Cet indice renseigne sur la forme du bassin versant, celui-ci sera de plus en plus rond lorsque  $I_c$  s'approche de 1.

- on peut assimiler un bassin versant de surface S et de périmètre P à un rectangle équivalent de longueur L et de largeur l, tel que :

$$P = 2(1 + L)$$
$$S = 1 \times L$$

# Exemple de cartographie de bassin versant : Plaine de Tigrigra



www.GenieCivilPDF.com

#### **Remarque:**

Avant le développement de la micro informatique et jusqu'à un passé récent, la délimitation du bassin versant se faisait de manière directe sur un fond topographique, la surface était calculée par planimètrage (à l'aide d'un planimètre). Actuellement les fonds topographiques sont scannés et la délimitation se fait sur PC grâce à des logiciels (SIG) de type Mapinfo, Arcview, ces logiciels permettent également de calculer les surfaces et périmètres de bassins versants.

# Exemple de bassins versants dans la région du Tensift

# Oued N'fis à la station Imin el Hammam:

- \* superficie du B.V = 1290 km2
- \* périmètre du B.V : 200 km
- \* Talweg principal = 82 km
- \* pluviométrie moyenne à la station : 372mm
- \* débit moyen : 5,5 m3/s
- \* indice de compacité = 1,56

# **Oued Rheraya à Tahanaout:**

- \* superficie du B.V = 225 km2
- \* périmètre du B.V = 78 km
- \* Talweg principal = 32 km
- \* pente moyenne = 7,2 %
- \* altitude moyenne = 2154 m
- \* point culminant : jbel Toubkal à 4167 m
- \* indice de compacité 1,46
- \* pluviométrie moyenne = 670 mm
- \* coefficient de ruissellement : 50%
- \* débit moyen = 1,6 m3/s
- \* temps de concentration = 4h30mn

# Oued Ourika à Aghbalou

- \* superficie du B.V = 503,5 km
- \* périmètre du B.V = 104 km
- \* Talweg principal = 45,5 km
- \* pente moyenne = 6,9 %
- \* altitude moyenne = 2550 m
- \* indice de compacité = 1,29
- \* pluviométrie moyenne = 750 mm
- \* coefficient de ruissellement = 42 %
- \* débit moyen = 4.6 m3/s
- \* temps de concentration = 5h30mn

# III) <u>le cycle de l'eau dans la nature :</u>

Le cycle de l'eau dans la nature peut être traduit par cette équation bilan :

P = E + R + I avec P = pluviométrie

E =évapotranspiration

R = ruissellement

I = infiltration.

# \* Précipitations :

Elles sont mesurées à l'aide d'un pluviomètre ou pluviographe. La pluie marquée au compte du jour j comprend la pluie tombée du jour j à 6 heures du matin au jour (j + 1) à 6 heures du matin. C'est la pluie journalière. La pluie mensuelle et la somme des pluies journalières, la pluie annuelle est la somme des pluies mensuelles.

En terme de moyenne et de même que pour les autres paramètres climatiques l'OMM (organisation mondiale de météorologie) propose une série d'au moins 30 ans dans la série chronologique pour que la moyenne ait une signification statistique.

# \* Ruissellement:

C'est l'écoulement en surface et qui est favorisé par un sol imperméable et une pente assez importante. Ce paramètre est déterminé par jaugeage au niveau des oueds. Le ruissellement alimente les retenues de barrages.

#### \* Infiltration:

C'est la partie d'eau qui rejoint le sous-sol pour alimenter les nappes d'eau souterraines. Ce paramètre n'est pas mesuré mais il est souvent déterminé par des méthodes indirectes (surtout par des modèles de simulation hydrogéologiques).

#### • Évapotranspiration :

Ce facteur est la résultante de deux paramètres.

- L'évaporation : perte d'eau dans l'atmosphère qui se produit sur un sol nu.
- **-Transpiration** : phénomène biologique qui se produit à l'intérieur des plantes; celle-ci puisent dans le sol par leurs racines l'eau nécessaire à leur développement et la rejettent par leur système foliaire dans l'atmosphère.

Les agronomes distinguent deux types d'évapotranspiration:

- \*\* L'évapotranspiration potentielle. (ETP) : c'est l'évapotranspiration qui se produirait lorsque le sol est suffisamment humide et que la surface n'impose aucune contrainte restrictive au flux de vapeur. C'est donc en fait la quantité d'eau qui serait évaporée et transpirée si les réserves en eau étaient suffisantes pour compenser les pertes maximales.
- \*\* <u>L'évapotranspiration réelle</u>: (ETR) : celle que l'on obtient réellement lorsqu'il y a des contraintes (ex : pluies insuffisantes)

Les paramètres qui régissent l'évapotranspiration sont :

# Les ABC de l'hydraulique

- La température
- Le vent
- L'hygrométrie (état d'humidité)
- Le rayonnement
- Le type de végétation
- L'état hydrique du sol

ETP et ETR peuvent être calculées par des formules empiriques ex : formule de TURC au pas annuel.

ETR = 
$$\frac{P \text{ (mm/an)}}{0.9 + \underline{P}^2}$$

$$L^2$$

Avec L = 300+25T+0.05T3

T = temp'erature moyenne annuelle

Pour les différentes composantes du cycle de l'eau, on définit :

\* coefficient de ruissellement :  $C_1 = \underline{R} \times 100$ 

P

\* coefficient d'infiltration :  $C_2 = \underline{I} \times 100$ 

P

\* coefficient d'évapotranspiration :  $C_3 = \underline{E} \times 100$ 

P

# **Exercices:**

# Ex 1:

Les bassins d'infiltration réalisés dans le bassin de N'fis pour la recharge artificielle de la nappe du Haouz ont montré que la recharge dans les alluvions est de l'ordre de 1 mètre/jour/m². Une rivière voisine de la région du N'fis creuse son lit dans des alluvions. Cette rivière à une longueur moyenne de 40 Kms et une largeur moyenne de 15 m. cette rivière connaît 4 à 5 crues par an dont la durée totale maximale est de 10 jours. Quel est le débit d'eau infiltré lors des crues.

# **Réponse :**

La surface lessivée par les eaux est  $S = 40 \times 10^3 \times 15 = 6.10^5 \text{ m}^2$ . Le volume rechargé par an est de  $10 \times 6.10^5 = 6.10^6 \text{ m}^3$ . Ceci correspond à un débit fictif continu  $Q = 6.10^6 / 365 \times 24 \times 3600$ , soit alors Q = 190 l/s

# **Ex 2:**

On se propose d'étudier un bassin versant dont la superficie est de 600 Km<sup>2</sup>. ce bassin reçoit une pluviométrie moyenne annuelle de 250 mm. D'après des études hydrogéologiques, le coefficient d'infiltration est de 10%. Des études hydrologiques ont montré que le coefficient de ruissellement est de 15%.

- 1) quel est le pourcentage de l'eau évapotranspiré sur ce bassin?
- 2) Quelle est la part d'eau infiltrée en mm et en débit (l/s) ?
- 3) Quelle est la part d'eau ruisselée en mm et en débit (l/s) ?

#### **Réponse**:

- 1) d'après l'équation bilan du cycle de l'eau, on a P = R + I + ET, R = 15%, I = 10%, donc ET = 75%, remarquons au passage que l'évapotranspiration est trop forte comparativement aux deux autres composantes. C'est une caractéristique des climats arides et semi arides.
- 2) I + 10 % donc I = 250 x 10 /100, soit I = 25 mm. Le débit infiltré est Q = 25 x  $10^{-3}$  x 600 x  $10^{6}$  m<sup>3</sup> / an, soit  $\mathbf{Q} = 475$  l/s
- 3) R = 15 % donc  $R = 250 \times 15/100$ , soit R = 37,5 mm. le débit ruisselé est  $Q = 37,5 \times 10^{-3} \times 600 \times 10^6 \text{ m}^3$  /an. Soit  $\mathbf{Q} = 713 \text{ l/s}$

#### Ex 3:

La superficie moyenne du plan d'eau dans la retenue d'un barrage est de 15 ha. Pendant un mois donné, l'évaporation totale est estimée à 80 mm. Calculer le volume d'eau de la retenue évaporé en m<sup>3</sup> durant ce mois. L'oued qui alimente la retenue avait connu pendant ce mois

une crue. Il y a une station hydrologique qui contrôle les apports au barrage ( $S=50~\rm{Km}^2$ : surface du bassin versant). Durant ce mois de 30 jours, le débit spécifique a une valeur moyenne de  $1,5~\rm{l/s/Km}^2$ .

- 1) calculer le volume en m<sup>3</sup> de cet apport de base
- 2) le volume initial au barrage (au 1<sup>er</sup> du mois) était avant la crue de 200 000 m<sup>3</sup>. une restitution (lâcher) pour les besoins agricoles s'élevant à 15 000 m<sup>3</sup> a été effectuée durant ce mois, quel sera le volume stocké dans la retenue à la fin du mois ?

#### Réponse :

- 1) volume évaporé  $V = 80.10^{-3} \text{ x } 15 \text{ x } 10000, \text{ soit } V = 12000 \text{ m}^3$
- 2) le débit correspondant aux apports est  $Q = 50 \times 1.5 \text{ l/s}$ , soit Q = 75 l/s, ce débit correspondant à 30 jours donne un volume  $V = 1.9.10^5 \text{ m}^3$ .
- 3) volume initial avant crue =  $200\ 000\ \text{m}^3$ , lâchers =  $150\ 000\ \text{m}^3$

V stocké = V initial + V apports – V sorties

 $V \operatorname{stock\acute{e}} = 200\ 000 + 1,\ 9.105 - 150000 - 12000,\ \operatorname{soit}\ V\ (\operatorname{stock\acute{e}}) = 2,\ 28.105\ \mathrm{m}^3$ 

#### **Ex 4:**

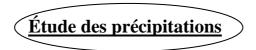
Une ville est alimentée à partir d'une nappe d'eau souterraine et d'un barrage. Le débit équipé à partir de la nappe pour l'AEP de cette ville est de 175 l/s. le besoin moyen à la production de cette ville est de 65 000 m³/jour.

Au cours d'une année très sèche, la réserve d'eau disponible au barrage alimentant cette ville n'est que de 4 738 000 m<sup>3</sup>. L'apport d'eau enregistré pendant les mois d'été est généralement nul et les pertes par évaporation sont négligeables.

Compte tenu de la réserve d'eau disponible au barrage, quelle est la durée d'autonomie de l'alimentation en eau de cette ville.

#### **Réponse**:

Le débit à partir de la nappe est de 175 l/s soit  $15120 \text{ m}^3$  /jour. Les besoins étant de  $65\,000 \text{ m}^3$  /jour, il faut combler un déficit de  $49880 \text{ m}^3$ /jour. La réserve du barrage permettra une autonomie de  $4\,738\,000$  / 49880, soit  $\mathbf{T} = \mathbf{95}$  jours.



# I) <u>Les averses :</u>

Les averses sont un ensemble de pluies associées à une même perturbation météorologique. La durée du phénomène varie entre quelques minutes et plusieurs dizaines d'heures. Aussi on distingue :

- les pluies de la saison hivernale.
- les orages qui sont des perturbations locales brusques, de faible durée et concernent une superficie limitée.

La quantité annuelle de pluie et sa répartition au cours de l'année (régime pluviométrique) constituent deux des facteurs majeurs du climat.

Au niveau d'un poste pluviométrique on mesure et on calcule la pluie journalière, mensuelle et annuelle.

La pluie mensuelle est la somme des pluies journalières, la pluie annuelle est la somme des pluies mensuelles.

La pluie moyenne interannuelle au niveau d'un poste est la moyenne de toute la série disponible, cette moyenne est d'autant plus significative si la taille de l'échantillon d'observation est grande (l'OMM : organisation mondiale de météorologie recommande un minimum de 30 ans). Exemple : la moyenne pluviométrique pour la ville de Marrakech est de 250 mm. Ifrane : 1000 mm, Layoune : 100 mm.

La répartition des lames d'eau pour l'année montre que la diminution des pluies n'est pas comme pour la température, fonction de la latitude. La zone équatoriale est la plus arrosée (2000mm en moyenne) (cali en Colombie 6000 mm, Rio de janeiro en Brésil : 1100 mm), ainsi que l'Asie du Sud est. Puis les pluies diminuent rapidement jusqu'au minimum absolu des régions subtropicales : moins de 100 mm par an et souvent moins de 10 mm : c'est la zone aride des hautes pressions.

# **Remarque:**

Il est important de signaler que les deux dernières décennies ont été marquées par des modifications importantes dans le régime climatique à l'échelle internationale. Au Maroc, il y a eu des cycles de sécheresses plus ou moins prolongés. Ceci est à même de modifier les moyennes « classiques » en fonction des périodes de référence choisies.

Année	Pluviométrie annuelle	Ecart relatif en % par rapport		
hydrologique	observée	À la moyenne normale (998,3 mm		
92/93	878,6	-12		
93/94	710,7	-29		
94/95	720,5	-28		
95/96	862,6	-14		
96/97	1865,7	+87		
97/98	1161	+16		
98/99	688,8	-31		
99/00	742,4	-26		
00/01	819,4	-18		
01/02	655,8	-34		
02/03	1005,6	+0,7		

# II) Traitement statistique des données :

# II. 1) Fréquence, intervalle de récurrence, intensité :

Soit une averse de durée t et d'intensité i (i exprimé par exemple en mm/ heure); Si au cours d'une période de N années on a enregistré n fois cette averse, on dira que la fréquence de cette averse est :  $\mathbf{F} = \mathbf{n}$ 

On dira que l'averse est de fréquence décennale si elle survient en moyenne une fois tous les 10 ans, centennale si elle survient en moyenne une fois tous les 100 ans.

On appelle période de retour T ou intervalle de récurrence  $\theta$  d'une averse, l'inverse de sa fréquence.  $\mathbf{T} = \mathbf{\theta} = \mathbf{1} = \mathbf{N}$ 

Dans les cas particuliers, de risque d'inondation de construction en contrebas la période de retour admise est de 20 ans voire 50 ans.

Pour les ouvrages de franchissement (routes, autoroutes, voies ferrées....), la période de retour admise est généralement de 100 ans.

L'intensité de pluie moyenne se définit par le rapport de la hauteur d'eau tombée pendant une durée donnée soit :

$$iM = \underline{\Delta h}$$

$$\Delta t$$
avec  $iM = intensit\acute{e}$  moyenne
$$\Delta h = hauteur de pluie$$

Plusieurs formules sont proposées dans la littérature pour l'évaluation de i

**Exemple**: formule de Montana:  $\mathbf{i} = \mathbf{at^b}$  avec t = temps; a et b sont des coefficients dépendant de la période de retour ainsi que du poste d'observation.

D'après cette formule :  $\log i = \log a + b \log (t)$  ; le report de la fonction i = f (t) sur un papier bi - logarithmique est une droite permettant de déduire les valeurs a et b.

La pluie est le facteur principal qui est à l'origine des inondations, en fait ce n'est pas la valeur de P mais plutôt de l'intensité de pluie (l'Ourika en Août 1995 : 28 mm en 30 minutes).

# II.2) Lame d'eau tombée sur une région :

Sur un bassin versant donné, on dispose d'un certain nombre de station pluviométriques. On s'intéresse au régime pluviométrique global de la région en essayant de donner une valeur moyenne de la pluviométrie de toute la région.

#### II .2.1) Méthode des isohyètes :

Sur un bassin versant on suppose une évolution linéaire de la pluviométrie entre deux stations voisines.

En premier lieu, on calcule en  $m^2$  (de préférence par planimétrage) la surface partielle  $S_1$  du bassin comprise entre deux isohyètes successives, ayant admis que la hauteur de précipitation de cette superficie élémentaire est égale à la moyenne arithmétique des valeurs données par les deux courbes qu'elle limite  $(P_1+P_2)/2 = P_{1,2}$ 

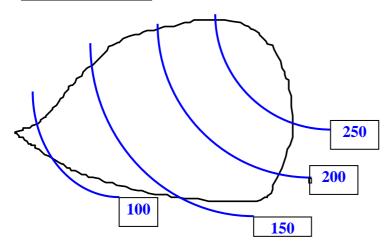
On calcule le volume tombé sur cette section élémentaire par la relation

 $\underline{(P_1+P_2)} \ x \ S_1$  ; la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin versant est

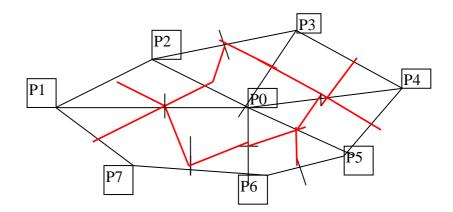
2

$$\overline{P} = \sum Pi_{i+1} \times \underline{Si}$$

# <u>Carte des isohyètes</u>:



# II.2.2) Méthode de thiessen



## Hypothèse:

La hauteur pluviométrique mesurée à une station est constante dans une certaine zone d'influence de cette station. La méthode de calcul est plus rapide que la méthode des isohyètes. Les stations pluviométriques sont reportées sur une carte. On relie les stations adjacentes par des droites au milieu des chacune des quelles est élevée une perpendiculaire. Les intersections de ces perpendiculaires déterminent des polygones, dans chaque polygone, la hauteur de précipitations choisie est celle de la station située à l'intérieur. La surface de chaque polygone élémentaire est calculée et exprimée en % de la surface totale du bassin, ce pourcentage est utilisé comme coefficient de pondération propre à chaque station donc si P est la hauteur moyenne pluviométrique, on aura  $\overline{P} = \sum_{i=1}^{i=n} \underline{Ai} \underline{Pi}$ 

Pi est la pluviométrie sur le polygone de surface Ai; A = surface totale du bassin versant.

# II.3) Reconstitution des données manquantes sur un poste pluviométrique :

#### **Principe:**

On dispose de deux stations pluviométriques voisines S1 et S2.

- \* S1 est complète et correspond à une pluviométrie P1 pour l'intervalle [t<sub>1</sub>,t<sub>2</sub>]
- \* S2 est incomplète et correspond à une pluviomètre P2 pour l'intervalle [t<sub>3</sub>,t<sub>4</sub>]

La méthode consiste à homogénéiser les données au niveau des deux stations pour compléter la station S2.

#### Méthode:

On calcule la pluviométrie  $P'_1$  correspondant à la station S1 pour la période  $[t_3,\,t_4]$ ; ceci définit un rapport de station  $P_1/P'_1$ . La pluie  $P_1$ 0 extrapolée pour la station  $P_2$ 1 dans l'intervalle

[t<sub>1</sub>, t2] sera 
$$P_e = P_2 \times \underline{P_1}$$

$$P'_1$$

# **Exemple**:

La pluviométrie pour la période 1952-1981 pour une station  $S_1$  est de 524 mm. Une station voisine  $S_2$  a une pluviométrie de 537,4 mm pour la période 1954-1981.

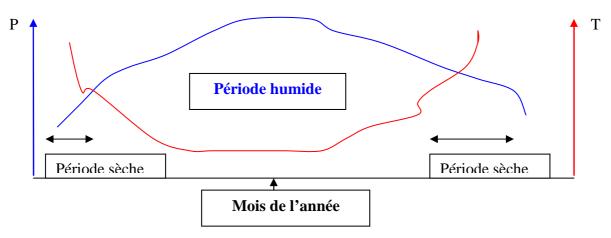
Pour la période 1954-1981, la station  $S_1$  à une pluviométrie de 534,7 mm. Ceci définit le rapport de station  $\underline{524}=0.98$ 

534,7

La pluie extrapolée pour la station S2 correspondant à la période 1952-1981 est donc  $Pe = 0.98 \times 537.4$  soit Pe = 527 mm.

#### **III) Diagramme ombrothermique :**

C'est un diagramme ou l'on reporte les pluies et les températures moyennes mensuelles en graduant l'échelle des pluies comme étant le double de celle des températures. La période séche est celle ou P < 2T



#### **Exercices**:

**Ex 1**: Au site du barrage Ait Hammou (région d'Agadir), l'oued Tamri draine un bassin versant d'un périmètre de 191 Km et d'une superficie de 1258 Km². le planimètrage sur une carte au 1/250 000 des superficies entre les courbes de niveau a permis de dégager les caractéristiques du bassin suivantes :

Altitude en m (NGM)	Superficie en Km <sup>2</sup>
160	3
200	108
400	241
600	161
800	245
1000	218
1200	191
1400	87
1600	4

- 1) calculer l'indice de compacité du bassin
- 2) calculer la longueur et la largeur du rectangle équivalent
- 3) Calculer l'altitude moyenne du bassin

Le bassin de l'oued Tamri au site du barrage est équipé de 4 postes pluviométriques. Pour les besoins de l'étude, deux autres postes pluviométriques situés dans les bassins limitrophes ont été utilisés. L'examen des pluies moyennes annuelles enregistrées de 1960-91 à 1994-95 au niveau de ces bassins a permis de dégager la courbe des isohyètes dont la pluie par tranches de superficies est donnée par le tableau ci-après :

Superficie en Km <sup>2</sup>	Pluie moyenne en mm
103	200
130	250
235	300
170	350
270	400
200	450
150	500

4) calculer la pluie moyenne interannuelle.

# **Réponses**:

1) le périmètre du bassin versant est P = 191 Km, la superficie est de S = 1258 Km<sup>2</sup>.

L'indice de compacité est  $I_c = (0.28 \text{ x P}) / \sqrt{A}$  soit  $I_c = 1.5$ 

2) la longueur L du rectangle équivalent et la largeur l sont définies par les deux relations suivantes :

$$P = 2(1 + L)$$
  
S = 1 x L soit :

$$191 = 2(1 + L)$$
 (1) et  $1258 = 1 \times L$  (2)

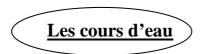
En résolvant le système d'équations (1) et (2), on obtient L = 79,75 Km et l = 15,77 Km

3) l'altitude moyenne du bassin est  $\frac{\mathbf{i} = \mathbf{n}}{\mathbf{z} = \mathbf{\Sigma} \mathbf{z}_{\mathbf{i}} \mathbf{s}_{\mathbf{i}} / \mathbf{s}}$ 

$$i = n$$
  
 $\Sigma z_i s_i = 986480$   $S = 1258 \text{ Km}^2$  d'ou  $\overline{z} = 784 \text{ m}$   
 $i = 1$ 

La pluie moyenne interannuelle est 
$$\mathbf{P} = \mathbf{\Sigma} \mathbf{P_i} \mathbf{S_i} / \mathbf{s} = 456100/1258$$
  
 $\mathbf{i} = 1$ 

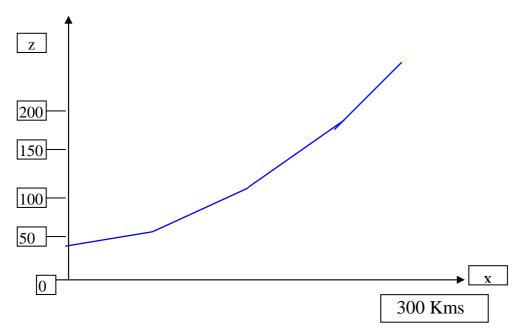
Soit P = 362 mm



# I) Généralités :

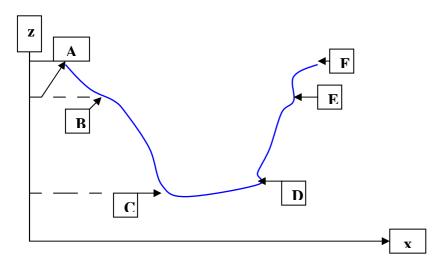
#### I.1) Profil en long:

Le profil en long d'une rivière est une courbe où l'on porte en abscisses les longueurs développées du lit de la rivière et ordonnées, l'altitude du fond ou de la côte de la surface libre de l'eau. Les pentes de ces courbes i = dz/dx en chaque point représentent les pentes de la surface libre ou du fond.

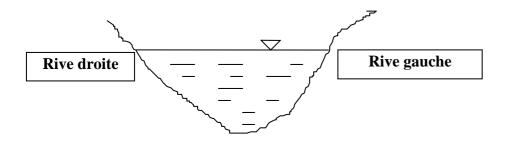


# Profil en travers:

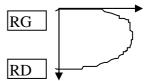
C'est une coupe au niveau d'une section de la rivière perpendiculairement à l'axe d'écoulement



# I.2) Profil de vitesses:



La vitesse n'est pas constante sur toute la section, elle est maximum un peu au dessous de la surface libre, dans l'axe du fleuve et minimum sur le fond et près des berges.

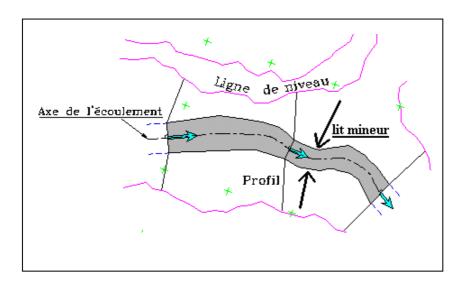


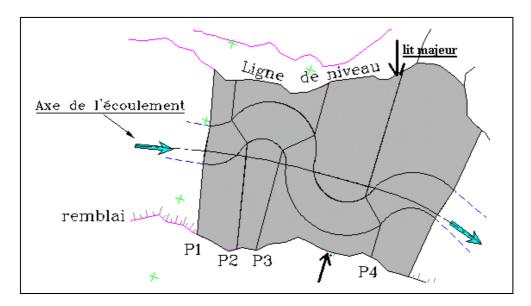
Il existe dans les cours d'eau plusieurs types d'écoulement :

- \* L'écoulement laminaire, "tranquille" en filets parallèles donnant des surfaces lisses.
- \* L'écoulement turbulent lorsque les filets s'entrecroisent et que des tourbillons apparaissent.

# I.3) Lit d'une rivière :

- on distingue le lit mineur qui est le chenal d'écoulement qui est emprunté en permanence par le courant, il est souvent délimité par des berges.
- On distingue le lit majeur qui est le chenal emprunté par les eaux en cas d'inondations.





# II) Régime des cours d'eau :

Le débit est un paramètre fondamental caractérisant un écoulement, celui-ci est variable selon les sections et selon les saisons (période d'étiage ou basses eaux et période des crues ou hautes eau).

# Présentation et analyse des données :

- \* **Débit moyenne journalier** : <u>volume (en m3) pendant 24 heures</u>. m<sup>3</sup>/s 86400
- \* **Débit spécifique** : débit ramené au km2 de bassin versant en **l/s/km2** cette grandeur permet de comparer l'importance de deux bassins.
  - \* **Débit moyen mensuel** : défini sur un mois.
  - \* **Débit moyen annuel** : défini sur 12 mois.
- \* Module ou débit moyen interannuel : moyenne des débits définis sur une longue période.
  - \* Coefficients mensuels de débits : c'est le rapport <u>débit moyen du mois</u>

    Débit moyen de l'année

Ils peuvent être définis pour une année particulière ou pour une longue période.

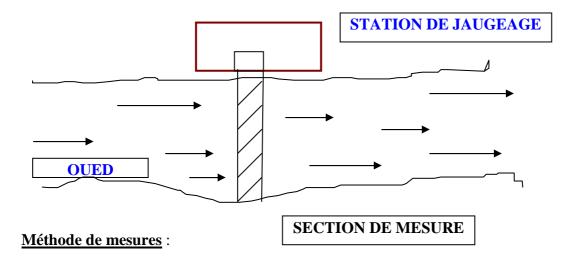
Dans un bassin versant, l'occurrence des crues est une variable essentiellement aléatoire. Le débit de crue dépend essentiellement de 3 facteurs :

- \* La surface est la forme du bassin versant
- \* La perméabilité du sol et la couverture végétale
- \* La distribution temporelle et spatiale de la pluie.

L'étude des crues est primordiale pour l'évaluation des apports aux barrages ainsi que pour le dimensionnement des ouvrages d'art tels que les ponts

# III.) <u>Hydrométrie</u>:

L'Hydrométrie est la technique de mesure des débits dans les cours d'eau; l'opération de mesure s'appelle un jaugeage, le site de mesure est appelé station de jaugeage.



- \* Jaugeage au moulinet (ou exploration du champ des vitesses); (méthode la plus utilisée)
- \* Méthode de jaugeage au flotteur.
- \* Méthode de dilution ou jaugeage chimique
- \* Méthode par calcul direct

#### Choix des méthodes :

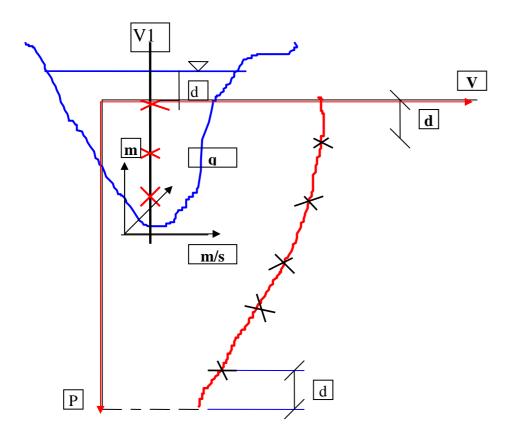
Le jaugeage au moulinet nécessite un régime régulier du cours d'eau avec des vitesses inférieures à 5m/s. Pour des vitesses supérieures à 5m/s, on peut passer au jaugeage chimique (solution ayant une certaine concentration injectée à l'amont et on mesure la concentration à l'aval). Si ces deux méthodes ne peuvent pas être appliquées, on a recours à la méthode des flotteurs. Pour les cours d'eau étroits, on utilise simplement un déversoir.

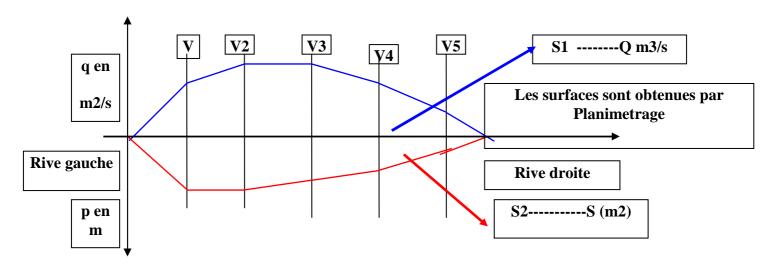
Le principe est basé sur la mesure du nombre de tours d'hélice par seconde. Ces moulinets sont étalonnés au laboratoire avant leur utilisation. Avec cette méthode, on mesure des vitesses ponctuelles en choisissant un certain nombre de verticales et les profondeurs de mesure. Les verticales seront espacées là où le débit laminaire varie très peu. Les profondeurs varieront du fond jusqu à la surface libre de l'eau.



# Dépouillement d'un jaugeage au moulinet :

\* <u>Méthode graphique</u> : Méthode des verticales





Le dépouillement d'un jaugeage au moulinet se fait manuellement et également à l'aide de logiciels (exemple **Djaug**)



# Station hydrologique Assif El Mal (province de Chichaoua)

# B) Jaugeage chimique (ou jaugeage par dilution)

Il est réalisé dans des zones d'eaux turbulentes pour avoir une grande dilution du produit chimique utilisé (v = 5 ou 6 m/s sont des vitesses fortes). On doit éviter les zones d'eaux mortes.

# Principe:

On injecte en amont un produit chimique et on récupère des échantillons en aval puis on fait un dosage chimique pour pouvoir en déduire le débit. La solution à injecter est du bichromate de potassium, la méthode d'injection est soit continue, soit globale.

#### Injection continue:

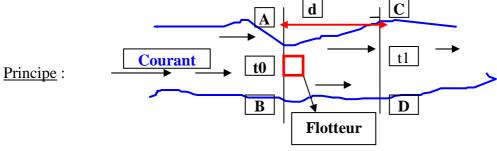
On injecte à débit constant dans le cours d'eau à jauger une solution concentrée d'un produit chimique. Cette solution se dilue dans l'eau de la rivière pour donner un mélange homogène. Soit Q1 le débit d'injection, C1 la concentration de la solution mère, Q le débit de l'oued est C2 la concentration diluée du prélèvement.

On a Q1 C1 = QC2 
$$Q = Q1 \quad \underline{C1}$$
C2

Il faudrait que 0,001g/l < C1 < 600g/l pour déceler le passage du traceur d'une manière visuelle.

#### C) Jaugeage au flotteur:

C'est une méthode qui s'applique pour des débits importants et des vitesses trop grande :



Le principe est basé sur un corps flottant qui est déplacé par le courant. On choisit des sections de passage: on arrivant en AB, on chronomètre jusqu'à CD où on arrête le chronomètre. La vitesse est alors  $v = \frac{d}{(t_1-t_0)}$ 

Le débit sera Q = V.S. En fait ce débit correspond à la surface libre. En réalité  $Q = V.S.\alpha$  Dans le cas de vitesses fortes et des profondeurs supérieures à 4 m ou à on a  $\alpha = 1$ . Dans le cas de faibles pentes et rivières moyennes  $\alpha = 0.85$ . En général Pour des pentes moyennes et des rivières moyennes  $\alpha = 0.90$  à 0.95.

# D) Méthode basée sur les formules d'écoulement

#### Formule de Manning - Strikler:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{S} \times \mathbf{K} \times \mathbf{Rh}^{2/3} \times \mathbf{I}^{1/2}$$

S = section

k = coefficient de rugosité

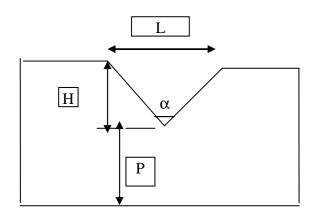
Rh = rayon hydraulique =section mouillée/périmètre mouillé

\* Le coefficient k est variable avec la hauteur d'eau et il faut le déterminer par des jaugeages précédents ou à défaut par analogie avec des bassins voisins. A titre indicatif ce coefficient est compris entre 15 et 35.

Cette méthode est souvent utilisée en reconstituant « **les traces de crue** » et notamment après le passage d'une crue violente n'ayant pas pu être jaugée.

# E) <u>Utilisation de déversoirs</u> :

**Exemple** : déversoir triangulaire en mince paroi



Q=8/15 x  $\mu$  x tg $\alpha$  x H<sup>2</sup> x  $\sqrt{2gH}$ 

Pour\_L = 2; 
$$u = 0.59$$

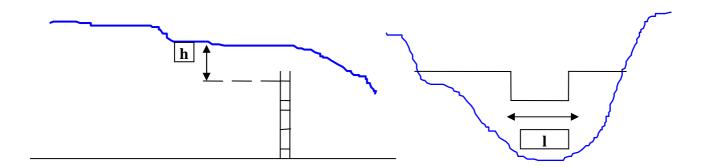
Η

Pour 
$$\underline{L} = 4$$
; u 0,62

Η

Déversoir rectangulaire en mince paroi

$$Q=0.45 \times 1 \times h \sqrt{2gH}$$



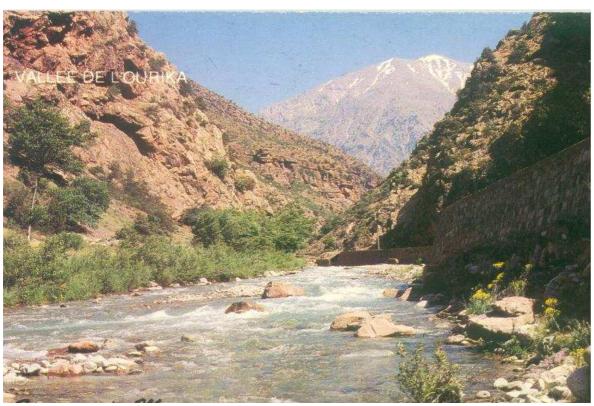
# Quelques données numériques sur les crues maximales observées au Maroc

Bassin	station	Surface BV	Q max en m <sup>3</sup> /s	Année	Débit
versant		en Km²			spécifique en
					l/s/Km <sup>2</sup>
Sebou	Azib soltane	16150	3240	1963	200
Sebou	Pont sebou	12920	3350	1963	259
Sebou	Pont m'dez	3435	1070	1965	303
Ouergha	Bab ouender	1758	2290	1970	1300
Ouergha	Ourtzagh	4404	1970	1930	447
Ouergha	M'jara	6190	7950	1950	1284
Aoudour	Tafrant	953	1970		2070
Aoulay	Rafsai	777	1512	1963	1950
Sra	Pont du sra	486	1027	1970	2110
Inaouene	Touaba	3680	1840	1970	500
Loukkos	T'fer	1305	3800	1977	2910
Loukkos	Koudiat	1750	3500	1977	2000
Hajra	Ben karrich	387	1400	1969	3620
Loukkos	M'douar	667	3500	1977	5250
Ghazzaf	Ait sigmine	330	488	1949	1480
Oum erbia	Dcher el	1440	3330	1963	432
	oued				
Ourika	Aghbalou	503	920	1967	1830
N'fis	Takerkoust	1796	1050	1967	585
Tensift	Abadla	10152	2900		286
Moulouya	Melg ouidane	48000	7200	1963	150

Moulouya	Missour	10323	2000	1963	194
Kert	Dar driouch	1353	2310	1976	1710
Issen	Pont issen	1590	1050	1970	660
M'goun	Ifre	1250	1400	1965	1120
Ouarzazat	Tifoultoute	3520	3000	1967	852
Zegzel	Berkane	130,1	650	1968	5000
Nekor	tamelaht	685	1800	1968	2630

# **Remarques:**

L'oued Ourika (région de Marrakech): un transport solide important en cas de crues



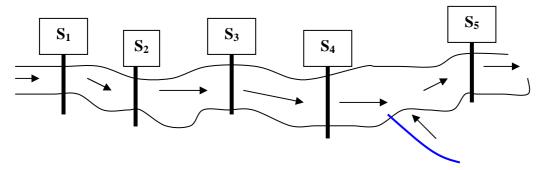
Le débit de pointe à l'oued Ourika lors de l'orage du 17/08/95 a été estimé à 1000 m<sup>3</sup>/s.

<sup>\*</sup> un bassin versant est contrôlé par un certain nombre de stations hydrologiques.

<sup>\*</sup> les oueds présentent également un débit solide correspondant au charriage de blocs et de matériaux en suspension. Ce matériel transporté est responsable de l'envasement au niveau des barrages, le colmatage des ouvrages d'assainissement (buses et dalots)......etc.

<sup>\*</sup> il est fréquent de vouloir procéder à un aménagement dans une région donnée sans disposer de station hydrologique proche pour nous renseigner sur le débit de projet. Dans de tels cas, on utilise des traitements statistiques et des corrélations entre paramètres afin d'avoir une idée sur le débit.

# IV) jaugeages différentiels :



Au niveau de plusieurs sections le long d'une rivière, on mesure les débits (Q1, Q2, Q3.....), ceci permet dévaluer les apports intermédiaires ou infiltrations entre deux sections.

#### **Exemples:**

- $Q_1 = 800 \text{ l/s}$ ,  $Q_2 = 450 \text{ l/s}$ , cela veut dire qu'entre  $S_1$  et  $S_2$  s'est produite une infiltration de 350 l/s.
- $Q_4 = 300 \text{ l/s}$ ,  $Q_5 = 900 \text{ l/s}$ , cela veut dire qu'il y a un apport intermédiaire de 600 l/s entre  $S_4$  et  $S_5$

# **Exercices**:

**Ex1** : une nappe d'eau souterraine est alimentée par l'infiltration des eaux de crues d'une grande rivière. Des jaugeages différentiels effectués ont donné les résultats suivants :

 $Q_1$  (en amont) = 1500 l/s

 $Q_2$  (en aval) = 600 l/s

Quel est le débit d'alimentation de la nappe

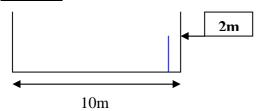
#### **Réponse:**

Entre l'amont et l'aval, il y a une perte d'eaux de surface Q = 1500 - 600 = 900 l/s, c'est ce débit qui va alimenter les eaux souterraines.

#### **Ex 2:**

Une crue violente est survenue sur une rivière sans qu'il soit possible de la jauger. Après passage définitif de cette crue, on a reconstitué les traces de crues sur un profil en travers de la rivière. La section est sensiblement rectangulaire, la largeur est de 10m, la hauteur d'eau atteinte est de 2m. La pente est localement de 1%. Évaluer le débit ayant transité en adoptant un coefficient de Strikler de 20.

# **Réponse**:



D'après la formule de Manning Strikler, 
$$Q = k \times S \times R_h \times I^{1/2}$$
  $K = 20$ ,  $S = 10 \times 2 = 20 \text{ m}^2$ ,  $I = 0$ ,  $01$ ,  $R_h = (2 \times 10) / (2 \times (10 + 2))$   $\underline{AN}$   $Q = 35$ ,  $2 \text{ m}^3$ /s

# **Ex 3**:

Un basin versant est contrôlé par une station hydrométrique. Il est prévu de construire un barrage en aval de cette station. Un historique de 30 années de jaugeages sur cette station donne une moyenne de 1,5 m $^3$ /s. quels seront les apports moyens annuels pour alimenter la retenue du barrage.

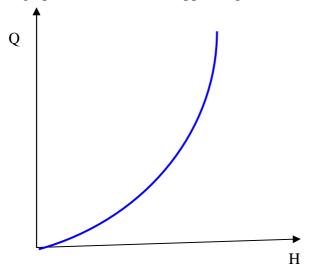
# Réponse :

$$V = 1.5 \times 3600 \times 24 \times 365$$
, soit  $V = 47.3 \text{ Mm}^3$ 

# Analyse des crues

# I) Courbe de tarage :

C'est la courbe Q = f (H) avec H = hauteur d'eau dans l'oued par rapport à un repère fixe. Les hauteurs sont relevées par lecture d'échelles limnimétriques et des appareils enregistreurs : limnigraphes. Cette courbe s'appelle également courbe d'étalonnage





Il est important de signaler qu'une évolution du lit du cours d'eau est à même de modifier la courbe de tarage.

# II) classement des données hydrologiques :

Lorsqu'on dispose d'un échantillon de taille n relatif à des mesures, on classe les valeurs par ordre croissant ou décroissant.

Fréquence = (Rang -0,5) /taille

Fréquence de non dépassement, F = 1 - (1/T) avec T =période de retour

**Exemple**: oued Aoulay à la station Rhafsai

Années	Q (max) en m <sup>3</sup> /s	Q classés	Rang	Fréquence observée
1955/56	1512	1512	1	0,023
56/57	1350	1350	2	0,068
57/58	1185	1185	3	0,11
58/59	1000	1000	4	0,16
59/60	946	946	5	0,205
60/61	848	848	6	0,25
61/62	820	820	7	0,3
62/63	673	673	8	0,34
63/64	617	617	9	0,39
64/65	561	561	10	0,43
65/66	538	538	11	0,48
66/67	520	520	12	0,52
67/68	491	491	13	0,57
68/69	480	480	14	0,61
69/70	359	359	15	0,66
70/71	312	312	16	0,705
71/72	300	300	17	0,75
72/73	263	263	18	0,78
73/74	260	260	19	0,83
74/75	250	250	20	0,87
75/76	188	188	21	0,91
76/77	137	137	22	0,96

# III) Les modèles probabilistes:

Pour étudier la répartition statistique des débits, on considère d'abord leur distribution réelle ou empirique selon les résultats des observations. Puis on cherche l'ajustement d'une loi de

probabilité simple, voisine de la fonction de répartition empirique, dans une plage de fréquence significative, par exemple 5 - 95% pour des débits moyens annuels.

Les lois de probabilité utilisées le plus couramment sont les suivantes :

- \* La loi de Gauss pour les débits annuels.
- \* La loi de Galton Gibrat (loi de Gauss des logarithmes) pour les débits mensuels
- \* La loi de Pearson III (Gamma incomplète) pour les débits journaliers.
- \* La loi de Gumbel pour les débits extrêmes.

#### Loi de Gauss ou loi normale :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{e-1/2} u^2 du \quad \text{avec } u = \frac{x-x}{6x}$$

x : variable aléatoire dont on étudie la probabilité de répartition F.

x : moyenne théorique de l'échantillon (débits)

6x : écart type de la population 
$$6 x^2 = 1 \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{i=1}^{i=n} (x_i-x)^2$$

#### Loi de Galton ou loi log-normale:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2}\pi} \int_{-\infty}^{\mu} e^{-u^{2/2}} du$$

$$A \text{vec } u = \underline{1} \text{ (y-y) et } y = \log x$$

On retrouve la loi de Gauss pour la variable y = log x.

Il faut donc dresser un tableau faisant figurer le log des débits observés.

#### Loi de Gumbel

$$F(x) = \exp[-e^{-\alpha (x-x_0)}]$$
 loi très souvent utilisée

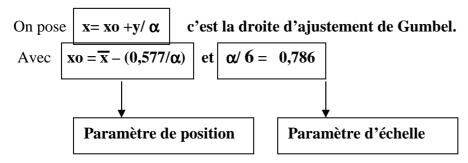
xo et α sont des paramètres d'ajustement.

xo est le paramètre de position.

 $\alpha$  est le paramètre de forme.

On pose  $y = \alpha$  (x-xo) donc  $\Phi$  (y) =  $e^{-e-y}$ 

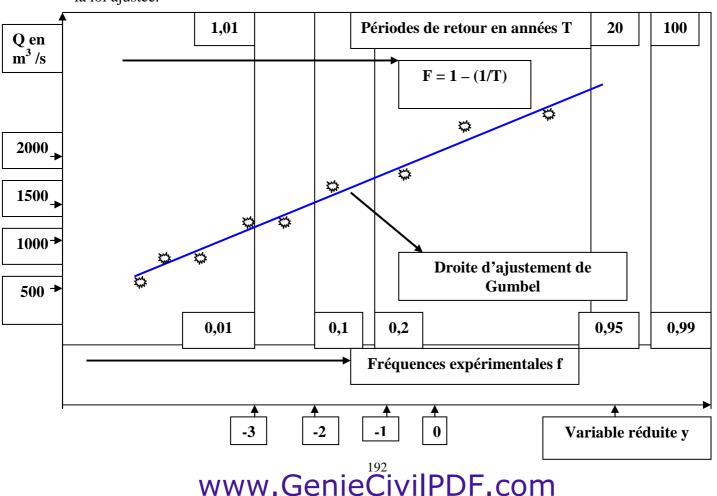
y est la variable réduite liée à la probabilité attachée au débit de crue x . La période de retour est  $1/1-\Phi(y)$ 



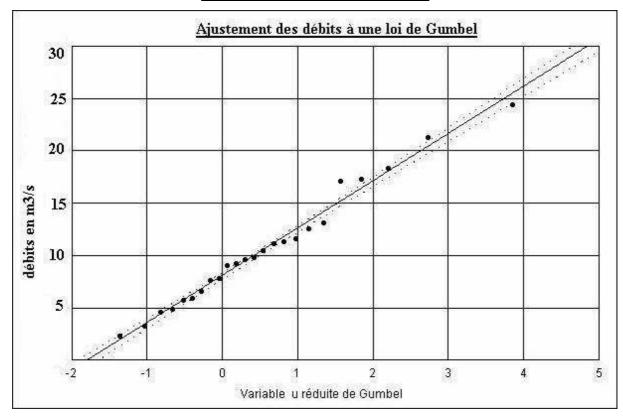
x et 6 sont respectivement la moyenne et l'écart type de l'échantillon.

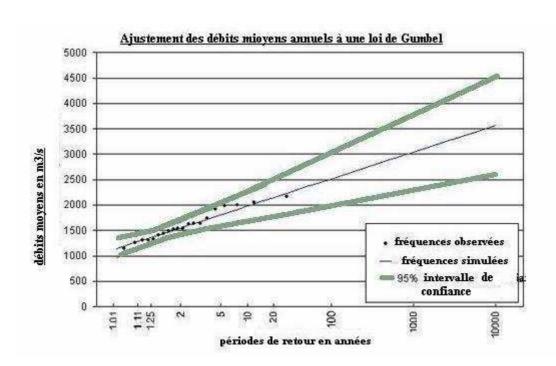
La réalisation par la méthode graphique de l'ajustement d'une loi de Gumbel sur un échantillon de n valeurs observées nécessite les opérations suivantes :

- 1) Classement des n crues annuelles observées par ordre de grandeur croissante avec attribution d'un rang 1,....m,...n à chacune d'elles.
- 2) Calcul des probabilités expérimentales  $\Phi$  (ym) = m / (n+1) de chacun de ces débits de crue.
- 3) Report des couples  $[x_m, m/(n+1) = \Phi (ym)]$  sur le graphique à probabilités construit au moyen de la formule  $\Phi (y) = e^{-e-y}$
- 4) Calcul des paramètres d'ajustement xo et α
- .5) Tracé de la droite  $x = xo + (x/\alpha)$
- 6) L'estimation des valeurs des crues maximales de fréquence donnée se déduit facilement de la loi ajustée.



# Exemple d'ajustement statistique





Pour les différentes lois, le calcul à la main est extrêmement long, le traitement sur ordinateur permet de fournir rapidement et pour différentes fréquences les débits correspondants. Les lois d'ajustement sont en général toutes valables en deçà de la fréquence décennale, au delà il y a souvent une dispersion.

Il existe en réalité de nombreuses lois de probabilités possibles mais l'expérience a montré que les phénomènes hydrologiques s'adaptent plus particulièrement aux fonctions de répartition précédemment citées.

#### **Remarque**:

- \* Le choix de la période de retour dépend entre autre du type d'ouvrage à réaliser. Pour un grand barrage par exemple, on s'intéresse à la crue de projet de probabilité 1/1000 ou 1/10.000.
- \* Dans toute étude statistique, il y a les phases suivantes :
- Contrôle et critique des données (élimination des valeurs aberrantes par exemple)
- Mise en forme des données (classer les valeurs par ordre croissant ou décroissant).
- Application de lois de distribution.
- Estimation de la valeur de la variable pour une probabilité retenue.

L'annuaire hydrologique constitue un document de base pour l'analyse statistique des données.

Ces lois permettent d'extrapoler les observations sur les débits pour obtenir les débits de crues - (crues de projets)- pour différentes périodes de retour

Ajustement à une loi de Gumbel (oued Aoulay à la station Ghafsai : voir valeurs dans pages précédentes)

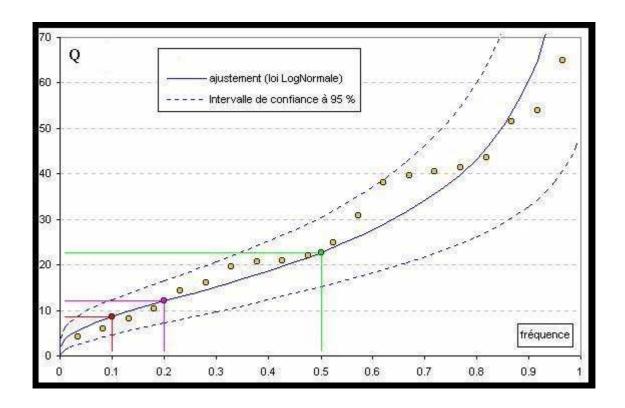
NB: le traitement des données relatives aux débits de l'oued Aoulay a été effectué par le logiciel Ajust.

# Taille de l'échantillon : 22

Moyenne: 618,6364 paramètre de position: 444,9159

Ecart- type: 386,0002 paramètre d'échelle: 300,9631

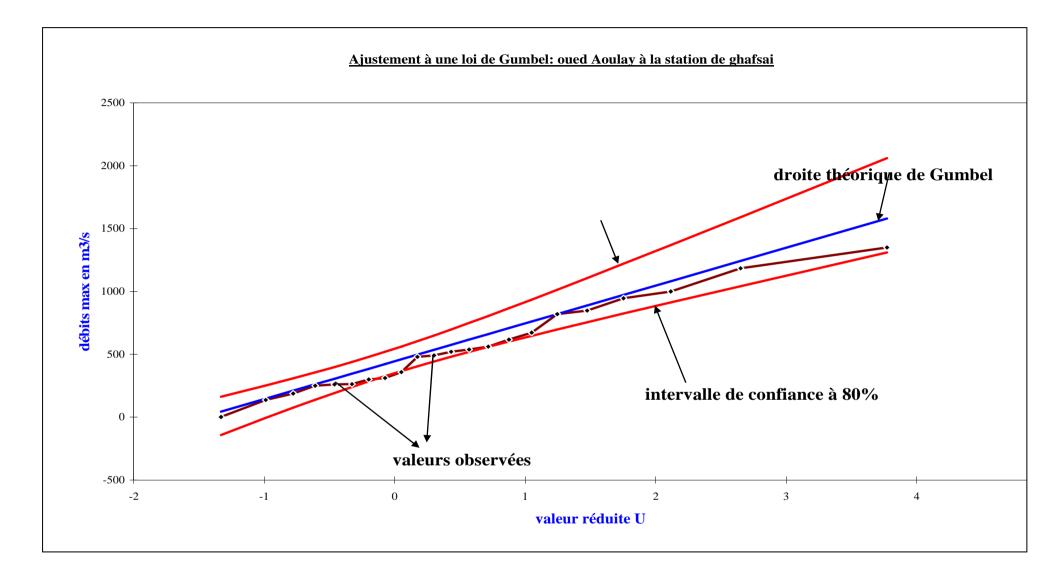
Période de retour	Fréquence de non dépassement	IC à 90% -	IC à 90% +	Valeur médiane	IC à 70% -	IC à 70% +
10	0.1	-4.63	87.11	193.90	275.18	322.09
5	0.2	142.14	213.75	301. 69	376.37	424.65
2	0.5	432.75	480.17	555.22	645.78	720.46
5	0.8	729.43	784.34	896.34	1062.58	1212.80
10	0.9	905.88	974.22	1122.19	1350.04	1558.76
100	0.99	1436.38	1556.13	1829.39	2262.80	2664. 03
1000	0.999	1948. 66	2122.53	2523.74	3163.93	3757. 81
10000	0.9999	2457.76	2686.62	3216.87	4064.78	4851. 95

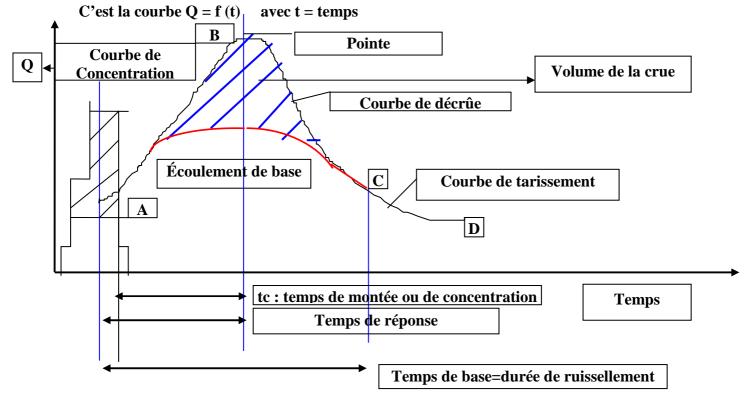


# IV)) La Genèse des crues :

On distingue en général les crues produites par des averses et celles produites par la fonte des neiges.

# IV.1) <u>Hydrogramme de crue</u> :





Le temps de concentration est un paramètre très important, plusieurs formules sont proposées pour son évaluation, parmi lesquelles on cite :

\* formule de ventura : 
$$tc = 76.3 \times \sqrt{S}$$
  $\sqrt{I}$ 

\* formule de Passini : 
$$tc = 64.8 \quad \frac{\sqrt[3]{L.S}}{\sqrt{I}}$$

tc = temps de concentration en minutes.

S = surface du bassin versant en km2

I = pente moyenne du bassin versant en%

L = longueur du cours d'eau principal en km

\* formule de Kirpich : 
$$t_c = L^{0,77} \times I^{-0,385} / 52$$

T<sub>c</sub> en minutes, L en mètres, I en m/m

\* formule de Turrazza 
$$t_c = 60 \times 0,108 \times (LxS)^{0,333} \times I^{-0,5}$$

# www.GenieCivilPDF.com

T<sub>c</sub> en minutes, L en Km, S en Km<sup>2</sup>, I en m/m

<u>NB</u>: pour les ouvrages de franchissements routiers, les formules empiriques précédemment citées sont de plus en plus utilisées. Le calcul de la capacité des ouvrages peut être fait par application des formules de **Delorme**:

$$Q_{cr} = 1.5 \times L \times H^{(4/3)}$$
 pour les dalots

$$Q_{cr} = 2.8 \times R \times H^{(3/2)} \times 0.88$$
 pour les buses

Avec L = ouverture du dalot en m, R = rayon de la buse en m, H= hauteur sous dalles pour les dalots ou le diamètre intérieur pour les buses en m.

### **Remarques:**

- On fait souvent correspondre le temps de concentration pour une période de retour donnée au débit de pointe maximum.
- Pour l'évaluation des débits de crues, les formules peuvent être classées en formules cinématiques et formules non cinématiques suivant qu'elles font appel ou non au temps de concentration.

### IV.2) <u>L'élaboration des données</u>

L'élaboration des données consiste à connaître le volume écoulé d'un oued donné au droit d'une station donnée. Pour cela on calcule :

- \* le débit instantané
- \* le débit moyen journalier
- \* le débit moyen mensuel
- \* le débit moyen annuel
- \* le débit moyen interannuel
- \* le débit spécifique.

### IV.3) Les modèles de prévision :

#### IV.3.1) Les méthodes stochastiques a court terme :

Ces méthodes consistent à rechercher sur un échantillon d'observations, les paramètres de la fonction F qui relient la grandeur a prévoir aux diverses grandeurs susceptibles de la conditionner (x1, x2....xn); y = F(x1, x2....xn).

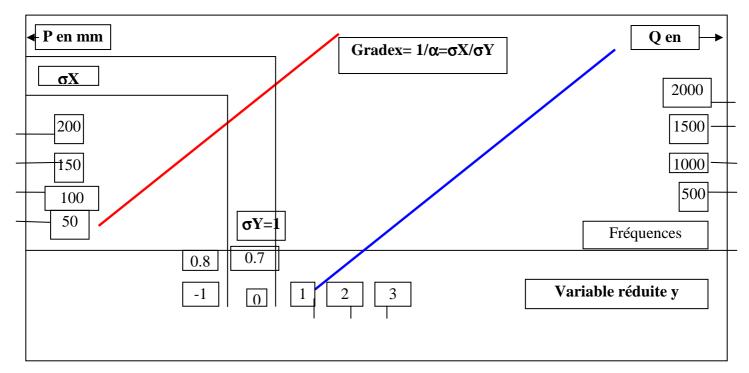
#### IV.3.2) Les méthodes déterministes à court terme :

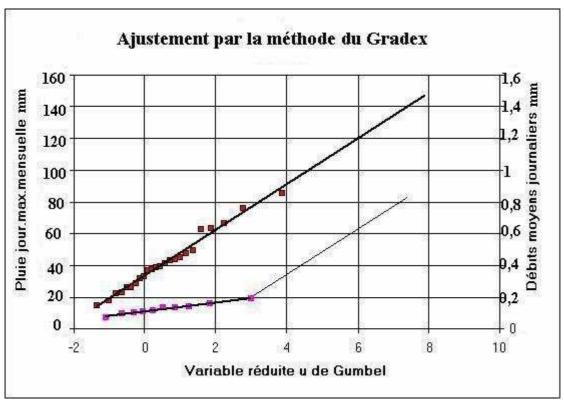
Cette méthode consiste à prévoir la crue a partir de données disponibles sur une station en amont. Deux méthodes sont utilisées :

### A) Modèle de transformation pluie – débit

Une première approche consisterait à effectuer une corrélation linéaire entre Q et P. Ceci est conditionné par la masse de données disponibles sur les stations voisines.

Une autre méthode souvent utilisée est celle dite - méthode du gradex - l'originalité de cette méthode consiste à supposer que la loi d'ajustement des volumes de crues (ou des débits moyens) sur des intervalles de temps correspondant au temps de base moyen des crues du bassin étudié, s'extrapole sur papier Gumbel selon une pente égale à celle du gradex des pluies correspondantes pour des fréquences inférieures à la fréquence décennale.

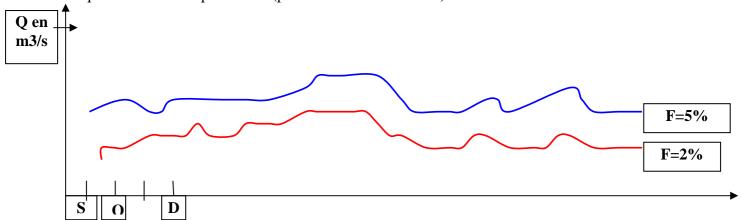




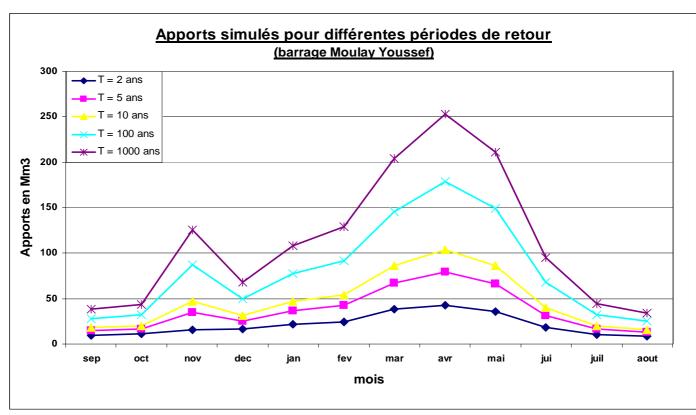
B) <u>Modèle de propagation</u>: il servira à prévoir la crue à partir des données liminimètriques sur les stations amont, sur les bassins où les temps de propagation sont suffisant pour fournir une avance efficace.

# IV.4) Analyse fréquentielle des débits :

Lorsqu'on dispose d'une série chronologique assez longue au niveau d'une station hydrologique, on peut élaborer les courbes de débit en fonction des mois et ce pour différentes fréquences au non dépassement (probabilités d'occurrence).



**Exemple**: apports au barrage Moulay Youssef



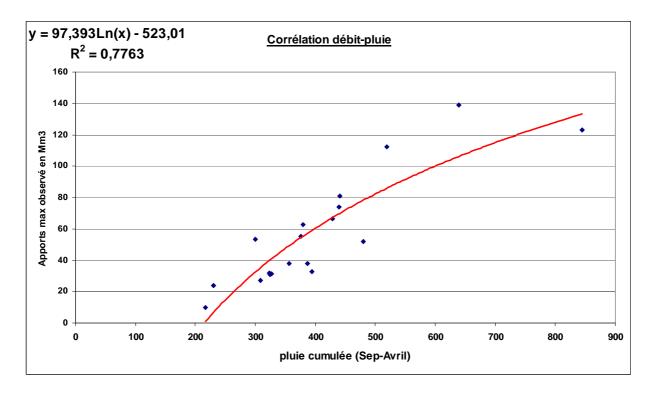
# Apports au barrage Moulay Youssef en Mm<sup>3</sup>

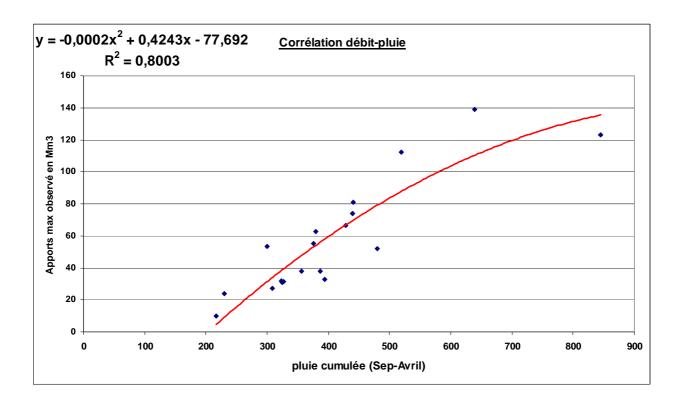
														Moy
Année	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Total	mens
39/40	13,1	20	29,1	22,9	26,1	92,4	66,7	35,9	19,7	13,7	11,3	10,7	361,6	30,1
40/41	14,8	10,9	24,9	16,5	64,6	41,3	36,8	62,6	27,8	15,9	15,6	15	346,7	28,9
41/42	15,7	17,4	47,7	15,3	29,5	85,9	138,9	71,5	53,6	26,9	18,2	14,1	534,7	44,6
42/43	14,5	22,6	62,6	31,6	22,3	15,9	35,9	44,3	96,3	30,8	18,2	15,9	410,9	34,2
43/44	14,8	17,9	10,3	15,3	11	22,2	32,4	16,8	9,2	40,1	6,3	5,2	201,5	16,8
44/45	7	4,9	6,7	7,5	8,1	8,6	6,6	6,1	7,8	5,8	4,3	4	77,4	6,5
45/46	4,2	9,8	7,8	12,7	10,1	7,3	25,5	39,2	23,1	10,1	6,6	4,9	161,3	13,4
46/47	8,9	7,5	17,1	9,8	14,4	35,3	64,1	29,7	27,2	14	8,7	6,6	243,3	20,3
47/48	7,2	7,5	11,5	15,6	23,4	25,1	26,4	38,4	54,5	18,7	11,3	9,2	248,8	20,7
48/49	7,8	10,1	8,1	13	22,9	18,6	33,9	113,1	128,2	40,9	20,5	16,5	433,6	36,1
49/50	11,7	12,1	13,1	21,4	26,6	12,5	9,5	9,5	12,4	8,1	7,5	8,4	152,8	12,7
50/51	24,4	21,3	10,6	30,4	48,7	57,1	120,9	61,2	37,7	22,4	16,2	12,4	463,3	38,6
51/52	11,7	13,6	23,5	15	13,6	11,7	10,1	10,6	11,3	6	5,5	5,2	137,8	11,5
52/53	10,1	9,2	6,4	7,5	14,1	13,8	29,3	26,9	16,2	7,5	6	5,2	152,2	12,7
53/54	17,1	14,2	8,1	10,1	8,4	26,7	74,5	97,9	82,6	35,9	20	13,6	409,1	34,1
54/55	10,9	11,3	13,1	12,7	12,7	22,2	42	38,1	34,5	24,7	12,7	13,6	248,5	20,7
55/56	8,7	11,8	10,3	24,3	18,2	63,4	124,7	102,2	100,6	55	23,7	18,5	561,4	46,8
56/57	15,7	14,7	15,9	15,3	16,8	13	14,1	23	20,3	8,9	8,4	7,8	173,9	14,5
57/58	6,1	10,7	12,9	44,9	48,7	51,6	26,6	32	27,3	14,3	9,2	7,5	291,8	24,3
58/59	7,2	7,8	11,5	42,6	17,1	11,7	25,2	17,6	19,7	11,5	8,7	6,6	187,2	15,6
59/60	6,7	7,8	7,5	11,3	69,3	29,3	38	50,2	30,4	37	15,9	11,3	314,7	26,2
60/61	8,4	10,7	10,3	22	25,8	17,8	16,5	30,5	18,8	20,7	9	7,2	197,7	16,5
61/62	9,5	9,2	12,3	13,6	14,1	7,6	99,5	142	76	28,3	16,5	11,5	440,1	36,7
62/63	28,4	7,9	90,2	29	32	31,3	52,7	67,8	136,9	60,1	17,7	9,7	563,7	47,0
63/64	8,2	8,3	9,8	42,9	16,7	13,9	33,3	193,9	58,1	17,8	9,4	8,5	420,8	35,1
64/65	13,8	5,6	9,3	17,6	18,5	7,2	5,3	5,2	4,7	14,6	7,1	13,1	122	10,2
65/66	24,5	5,3	5,2	19,3	17,3	11,4	11,1	11,7	15,1	9,9	7,9	5	143,7	12,0
66/67	11,5	22,5	6,9	9,4	6,2	7,9	59,4	38,4	41,3	10,7	7,2	7,1	228,5	19,0
67/68	17,8	30,1	116	28,5	22,1	18,8	66,3	97,4	61,8	27,3	18,1	9,3	513,5	42,8

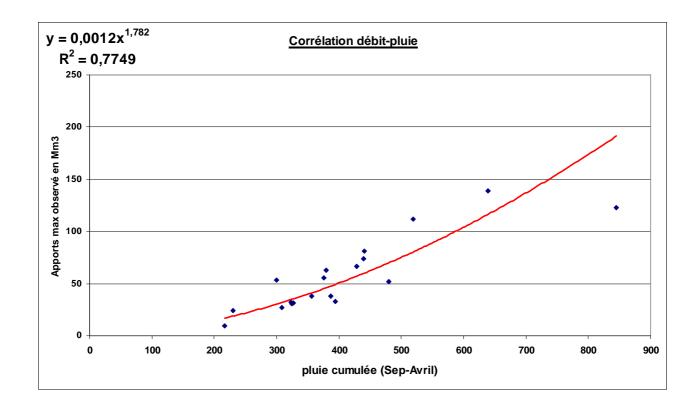
68/69	4,4	5,7	24	29,8	19,3	43,8	84,7	60,8	46,9	18,6	13,1	7,6	358,7	29,9
69/70	11,1	17	16	12,9	73,8	29,4	46,1	34	20,4	11,6	11,4	24,9	308,6	25,7
70/71	9,8	9,2	10,3	13,3	47	29,8	58,6	138,9	76,5	44,9	31,9	19,4	489,6	40,8
71/72	17,9	15,6	42,9	26,1	51	60,2	84,7	107,2	112,2	62,8	33,6	22	636,2	53,0
72/73	17,3	22,9	23,8	26,6	36,2	23	31	38,1	33,3	21,3	12,4	11	296,9	24,7
73/74	9,5	10,4	12,9	24	16,3	31	77	120,4	123,1	53,4	15,5	8,5	502	41,8
74/75	7,5	9,1	7,5	8,3	9,3	8,2	9,6	27,3	14,9	6,7	5,6	6,1	120,1	10,0
75/76	7	4,8	10,1	12,5	12,8	12,3	25,9	47,7	66,6	27,6	13,9	6,1	247,3	20,6
76/77	6,5	13,9	14,7	14,9	36	37,8	32	33,3	17	12,6	6,9	5,1	230,7	19,2
77/78	11,9	13	14,7	24,2	51,9	44	29	44,1	32,2	13,9	6,4	7,7	293	24,4
78/79	6,2	8,5	9,3	14,1	33,8	53,9	55,2	47,2	32,2	15,5	9,1	6,9	291,9	24,3
79/80	9	13,7	14,2	11,7	16	19,5	81	68,3	40	20,9	12,5	10,7	317,5	26,5
80/81	15,5	14,7	23,7	11,7	10,7	17,1	26,7	30,7	14,7	10,3	9,6	5,9	191,3	15,9
81/82	6,7	7,7	2,1	6,1	10,4	12	11,7	23,2	32	11,4	5,9	6,7	135,9	11,3
82/83	5,9	6,7	4,9	3,5	5,3	9,6	8,5	4,9	8,3	4,1	2,9	1,9	66,5	5,5
83/84	2,6	6,7	15	8,3	8,5	5,5	7,5	10,6	24	9,5	5,6	3,5	107,3	8,9
84/85	4,7	2,7	6,5	7,2	30,3	18,9	17,1	14,8	31,3	9,3	6,7	3,5	153	12,8
85/86	6,4	8,6	7,5	8,8	16,6	26,5	32,7	24	13,7	8,2	6,2	3,8	163	13,6
86/87	3,6	5,7	10,3	5,8	12	53,1	26,2	17,2	12	8,4	5,2	4,5	164	13,7
87/88	7,6	32,1	52,5	34,1	35,1	48,3	62,7	36,2	26,1	15,3	10,1	6,3	366,4	30,5
Total	531,5	591,4	941,6	881,9	1211,6	1365,4	2134,1	2442,6	2030,5	1023,9	572,2	455,7	14182,4	1181,9
Moy														
mois	10,8	12,1	19,2	18,0	24,7	27,9	43,6	49,8	41,4	20,9	11,7	9,3	289,4	24,1

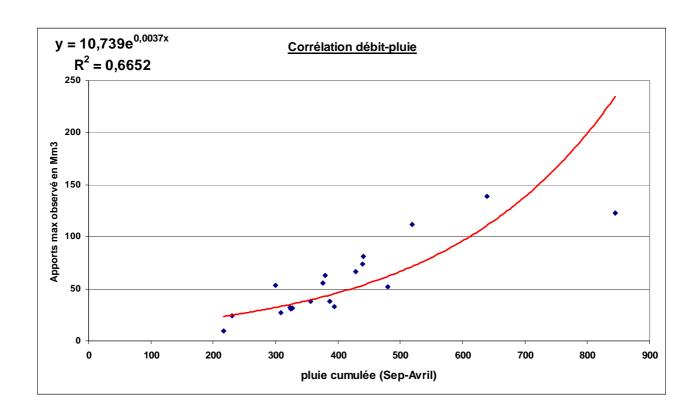
Max														Max
mens	28,4	32,1	116	44,9	73,8	92,4	138,9	193,9	136,9	62,8	33,6	24,9	636,2	annuel
Min														Min
mens	2,6	2,7	2,1	3,5	5,3	5,5	5,3	4,9	4,7	4,1	2,9	1,9	66,5	annuel

# Corrélation entre les apports observés au niveau du barrage Moulay Youssef et la pluviométrie mesurée dans le poste d'Ait Adel









**Remarque**: la meilleure corrélation est celle de nature polynomiale ( $R^2 = 0.80$ )

# V) Évaluation et estimations des débits de crues:

L'étude d'une crue concerne son débit de pointe, son volume et la forme de l'hydrogramme.

## V.1) Calcul de débit des eaux pluviales :

### A) Formule dite rationnelle:

$$Q = \underline{1} \times \text{c.i.A}$$

$$3,6$$

Q = débit max de fréquence f en m3/s

A = surface du bassin versant en km2

i = intensité moyenne de la pluie de fréquence f en mm/h pendant tc (temps de concentration)

3,6 = constante d'homogénéisation des unités

c = coefficient de ruissellement (dépend de la morphologie, la pente, la lithologie, la surface et de la nature du bassin versant).

### **B) Formule de Caquot**:

D'après Caquot ;  $\mathbf{Q} = \mathbf{K} \mathbf{I}^{\alpha} \mathbf{C}^{\mathbf{B}} \cdot \mathbf{A}^{\gamma}$ 

 $K,\alpha,B,\gamma$  sont des coefficients qui dépendent de la région considérée et de la période de retour.

I = pente moyenne du plus long parcours de l'eau.

A= surface du bassin versant en ha.

C= coefficient de ruissellement.

Q= débit en l/s

En 1965, les services de la météorologie nationale ont élaboré la formule de Caquot pour 11 villes du royaume. Pour la région de Marrakech on a :

$$Q_{10} = 0.685 \text{ I}^{0.268} \text{ x C}^{1.19} \text{ x A}^{0.797}$$
 (débit décennal)

Pour les périodes de retours supérieures à 10 ans, on majore le débit par un coefficient correctif.

Pour 
$$T=20$$
 ans,  $f=1,25$ ; pour  $T=50$  ans ;  $f=1,6$  et pour  $T=100$  ans ;  $f=2$ 

### **Remarque**:

La méthode rationnelle ainsi que la méthode de Caquot ne peuvent conduire qu'à des ordres de grandeur de débits car elles sont trop globales. Leur emploi n'est à recommander que pour des bassins ne dépassant pas 200 Km2.

# C) <u>Formules empiriques pour le calcul du débit des cours d'eau</u> :

## A) <u>Débit en fonction de S et de P</u>:

Le débit Q lors d'une crue est une fonction de la hauteur de précipitations et de la surface du bassin versant.  $Q = kS^n$ 

**Hazan et Lazarevic** ont adapté cette formule à différentes régions du Maroc en fonction de la pluviométrie.

\* Pour P = 200 à 400 mm (région du Tensift) 
$$Q = 9,38S^{-0,742}$$

\* Pour P = 400 à 500 mm 
$$Q = 13,47S^{-0,587}$$

Q = débit max en m3/ s pour une période de retour de 1000 ans et P est exprimée en mm/an.

S = surface du bassin versant.

# B) Formule de Mac Math

Cette formule s'applique pour des bassins versant dont la surface est inférieure à 100 km2

$$Q (f) = k H (f) S^{0.58} x P^{0.42}$$

Avec Q(f) = débit max de fréquence f en m3/s

S = surface du B.V en km2

P = pente moyenne du B.V

H (f) = précipitation max en 24h (mm)

K = coefficient dépendant du couvert végétal et de la topographie

Cette formule a été établie dans le sud de la Californie (USA) et concerne un climat aride.

Pour le coefficient k, les valeurs suivantes peuvent être adoptées.

k = 0.11: bassins de grandes dimensions.

k = 0.22: superficies cultivées et zones suburbaines.

k = 0.32: terrains non aménagés, non rocheux, de pente moyenne.

k = 0.42: terrains non aménagés, rocheux, à forte pente.

### C) Formule de fuller

# C.1) Formule de fuller (I):

$$Q(T) = Q1(1+a \log T)$$

Q (T) = débit moyen de crue en m3/s pour la période de retour T.

Q1 = débit de crue de fréquence annuelle (en m3/s)

a = 0.5 pour un climat tropical

a = 1 pour un climat tempère

a = 2 pour un climat aride à semi aride

## C.2) Formule de fuller (II):

$$Q(T) = (1 + a \log T) (S^{0,8} + 8/3 S^{0,5}) \times 4/3 \times N/100$$

 $Q(T) = d\acute{e}bit max en m3/s pour la période de retour T.$ 

a = coefficient (idem que fuller I)

S = surface du B.V en km2

N = coefficient sans dimension : 80 pour la plaine, 85 pour des régions accidentées, 100 en montagne

### D) Formule de Mallet-Gauthier :

$$Q(T) = 2k \log (1+AH) S \sqrt{(1+4 \log T - \log S)/L}$$

Avec Q (T) = débit en m3/s de récurrence T

H = hauteur moyenne annuelle de pluie (en mètres)

L = longueur du bassin versant

T = période de retour en années

S = surface du bassin versant en km2

Cette formule a été établie en Algérie ou A est un coefficient variant de 20 à 30 et k entre 0,5 et 6. La grande dispersion de la valeur de k confère au calcul une grande imprécision.

# E) Formule de Mallet - Drouhin:

Cette formule a été également établie en Algérie. Elle permet d'améliorer la formule de Mallet - Gauthier en resserrant les valeurs de k

Q100 = 0, 11 log (1+AH) 
$$\sqrt{(SP/bk)} \sqrt{(11-log S)}$$
 log decimal

Q100 = débit de crues centenaires en m3/s

a : idem que la formule de Mallet - Gauthier

H = hauteur moyenne annuelle en mètres

S = surface du B.V en ha

 $b = L^2/S$  avec L = longueur du bassin versant en hectomètre

k = coefficient de rugosité variant de 0,15 pour terrains nus et rocheux à 1,5 pour forêts ou sols profonds.

P = pente du bassin versant en %.

\* L'investissement dans l'infrastructure est élevé si le choix se porte sur une période de retour longue. En contrepartie, il y a un risque élevé d'avoir des coûts d'exploitation et d'entretien insupportables si le dimensionnement se fait pour des valeurs faibles du débit.

### **Remarques:**

- \* Les formules décrites peuvent être appliquées toutes en même temps et retenir la valeur 'la plus probable' ou la valeur 'paraissant la plus fiable'
- \* Les formules présentées ne donnent que des valeurs approximatives, le meilleur moyen pour avoir des valeurs représentatives consisterait à faire une modélisation qui tiendrait compte de tous les paramètres hydroclimatiques d'une région ainsi que de paramètres lithomorphologiques.
- L'étude des crues ainsi présentée ne tient pas compte du débit solide. Ce facteur est très important puisqu'il est à l'origine du colmatage des ouvrages d'assainissement.

<u>Remarque</u>: les différents traitements statistiques ainsi que l'utilisation de formules empiriques servent pour le dimensionnement d'ouvrages tels que : barrages, ponts, ouvrages d'assainissements urbains et routiers. Il est à signaler que beaucoup de logiciels ont été développés afin d'approcher au mieux les débits de projets en fonction des séries d'observations disponibles.

# Exemple de calcul de débits dans le domaine routier en absence de mesures hydromètriques

N° B.V	S (Km <sup>2</sup> )	L (Km)	pente (m/m)	pente %	$(LS)^{1/3}$	$(I)^{1/2}$	t <sub>c</sub> Passini en min	t <sub>c</sub> en h
1	0,9	1,5	0,02	2	1,10	1,4	51	0,8
2	0,32	0,35	0,01	1	0,49	1	31	0,5
3	0,6	1,2	0,04	4	0,90	2	29	0,5
4	0,15	0,12	0,01	1	0,27	1	17	0,3
5	0,27	0,66	0,02	2	0,57	1,4	26	0,4
6	0,06	0,3	0,01	1	0,27	1	17	0,3

N° B.V	S (K	$\mathbf{n}^2$ ) L	(Km)	pente (m/m)	pente %	S1/2	I1/2	tc Ventura en minutes	t <sub>c</sub> en h
1	0,	) ′	1,5	0,02	2	0,9	1,4	51,2	0,9
2	0,3	2 0	,35	0,01	1	0,6	1,0	43,2	0,7
3	0,	6	1,2	0,04	4	0,8	2,0	29,6	0,5
4	0,1	5 0	,12	0,01	1	0,4	1,0	29,6	0,5
5	0,2	7 0	,66	0,02	2	0,5	1,4	28,0	0,5
6	0,0	6 (	),3	0,01	1	0,2	1,0	18,7	0,3

					Α	B		
N° B.V	L(Km)	L(m)	pente (m/m)	$\mathbf{L}^{0,77}$	I <sup>-0,385</sup>	AXB	tc Kirpich en minutes	t <sub>c</sub> en h
1	1,5	1500	0,02	279	4,5	1258	24,2	0,4
2	0,35	350	0,01	91	5,9	536	10,3	0,2
3	1,2	1200	0,04	235	3,5	811	15,6	0,3
4	0,12	120	0,01	40	5,9	235	4,5	0,1
5	0,66	660	0,02	148	4,5	669	12,9	0,2
6	0,3	300	0,01	81	5,9	476	9,1	0,2

				Α	В			
N° B.V	S (Km <sup>2</sup> )	L (Km)	pente (m/m)	$(LS)^{0,333}$	i <sup>-0,5</sup>	A x B	t <sub>c</sub> Turrazza en minutes	t <sub>c</sub> en h
1	0,9	1,5	0,02	1,1	7,1	7,8	51	0,8
2	0,32	0,35	0,01	0,5	10,0	4,8	31	0,5
3	0,6	1,2	0,04	0,9	5,0	4,5	29	0,5
4	0,15	0,12	0,01	0,3	10,0	2,6	17	0,3
5	0,27	0,66	0,02	0,6	7,1	4,0	26	0,4
6	0,06	0,3	0,01	0,3	10,0	2,6	17	0,3

#### temps de concentration en heures Turrazza (h) 5 N° B.V passini (h) ventura (h) kirpich (h) valeur retenue 2 0,8 0,9 0,4 0,8 0,8 0,6 0,5 0,7 0,2 0,5 3 0,5 0,5 0,3 0,5 0,5 6 3 4 0,3 0,5 0,1 0,3 0,4 1 5 0,4 0,5 0,2 0,4 0,4 0,3 0,3 6 0,3 0,2 0,3

<u>Remarque</u>: A part la Kirpich, les trois autres formules donnent presque la même chose, la valeur retenue est la moyenne des trois valeurs

# Coefficients de Montana pour la station pluviométrique la plus proche

T (ans)	а	b
10	70	-0,221
100	95	-0,215

Calcul des débits de crues par la méthode rationnelle

N° B.V	S	tc (h)	(tc) b (10 ans)	I <sub>10</sub> (mm/h)	(tc) b (100 ans)	I <sub>100</sub> (mm/h)	Q <sub>10</sub> (m3/s)	Q <sub>100</sub> (m3/s)
1	0,9	0,8	1,05	73,5	1,05	99,7	4,6	6,2
2	0,32	0,6	1,12	78,4	1,12	106,0	1,7	2,4
3	0,6	0,5	1,17	81,6	1,16	110,3	3,4	4,6
4	0,15	0,4	1,22	85,7	1,22	115,7	0,9	1,2
5	0,27	0,4	1,22	85,7	1,22	115,7	1,6	2,2
6	0,06	0,3	1,30	91,3	1,30	123,1	0,4	0,5

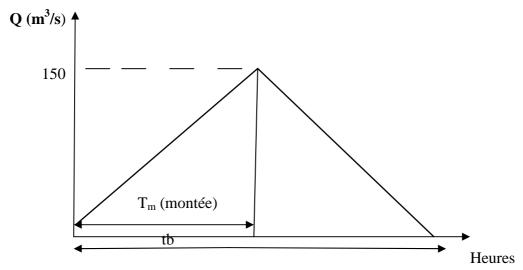
### **Exercices:**

**Ex 1**: Les caractéristiques du bassin versant d'un barrage collinaire sont comme suit :

Superficie du bassin versant
 Coefficient de ruissellement
 : 8 %

➤ Volume de la crue millénale (Q 1000 = 150 m³/s) est de 1.000.000 de m³

Volume de la tranche morte : 500.000 m³
 Volume de l'envasement annuel : 20.000 m³
 Débit spécifique du bassin versant : 1,015 l/s/ K m²



- a) Calculer les apports moyens annuels
- b) Calculer le temps de base tb de la crue millénale en heure
- c) Calculer la pluviométrie du bassin versant en mm
- d) Calculer la durée de vie du barrage

### **Réponses**:

a) Le débit spécifique est de 1.015 l/s/ Km<sup>2</sup>; la superficie du bassin versant est de 100 Km<sup>2</sup>; soit un débit moyen d'apports qui est de 101,5 l/s. Ceci correspond à un volume annuel

$$V = 3.2 \text{ Mm}^3$$

b- Le volume de la crue millénale est de  $1.10^6~\text{m}^3$ . D'après l'hydrogramme de crue  $\,$  le volume est  $V=(t_b~x~Q_p)~/2$ 

Tb (heures) = 3,7 heures; (3 heures 42 minutes)
D'où

c) -Le coefficient de ruissellement est  $R = \underline{\text{débit ruisselle}} = \underline{\text{volume ruisselle}}$ Débit tombé

volume tombé

R = 8%; volume ruisselle = 3,2 Mm<sup>3</sup>

Volume tombé = 
$$P \times S$$
 avec  $P = pluviomètre et  $S = surface du B.V.$   
Volume tombé en  $Mm^3 = P (mm) \times 10^{-3} \times 100 \times 10^6 \times 10^{-6} \implies$   
Volume tombé en  $Mm^3 = P (mm) \times 10^{-1} donc 3,2 / Px0, 1 = 0,08$$ 

c) Le volume de la tranche morte étant de 500.000m<sup>3</sup> et compte tenu de l'envasement annuel qui est de 20.000m<sup>3</sup>, la branche morte sera complément comblée au bout de 25 ans ( durée de vie du barrage).

## $\mathbf{Ex} \mathbf{2}$ :

Au site du barrage Ait Hammou sur l'oued Tamri, la surface du bassin versant est  $S=1258\,$  Km². la pluviométrie moyenne est de 362 mm. Pour calculer le volume moyen interannuel au niveau du barrage, on a utilisé les données hydrologiques disponibles au niveau de certains bassins de la région du Souss comme indiquées dans le tableau ci-après :

Station hydrologique	Surface en Km <sup>2</sup>	Pluie moyenne en	Débit moyen annuel
		mm	$(m^3/s)$
Tamri	1746	370	1,64
Zerrar	1346	395	1,39
Imi Mikki	451	392	0,81
Youssef ben Tachfine	3780	263	4,40
Abdelmouméne	1300	304	2,53
Aoulouz	4450	281	5,88

- 1) pour les bassins cités ci-dessus, calculer la lame d'eau écoulée et le coefficient de ruissellement. le coefficient de ruissellement retenu pour calculer l'apport d'eau moyen annuel au niveau du barrage Ait Hammou est la moyenne des coefficients de ces différents bassins, calculer alors le volume moyen annuel ruisselé en millions de m³ au niveau de ce barrage.
- 2) Les relevés de crues au niveau du site du barrage Ait Hammou a permis de dégager les débits de crues maximales annuels suivants :

Années	Débit de pointe de la crue maximale	Années	Débit de pointe de la crue
	enregistrée (m³/s)		maximale enregistrée (m³/s)
1979	1703	1986	229
1980	814	1987	186
1981	728	1988	183
1982	608	1989	132
1983	575	1990	125
1984	284	1991	74
1985	249	1992	37

- 3) sur un graphique semi logarithmique, tracer le nuage de points : débit de pointe en fonction de la fréquence expérimentale. (F= (Rang 0,5) /taille de l'échantillon.
- 4) Dans la détermination des débits de pointe pour les fréquences ci-dessus, nous avons considéré que la loi entre débit de pointe et fréquence expérimentale est linéaire. Tracer sur le graphique la droite de corrélation approximative entre débit de pointe et fréquence expérimentale, en déduire les débits de pointe suivants :

Période de retour (an)	Fréquence	Débit de pointe en m³/s
50	0,02	?
100	0,01	?
1000	0,001	?
5000	0,0002	?
10000	0,0001	?

### **Réponse :**

1) les valeurs calculées sont consignées dans le tableau suivant

Station	Surface	Pluie	Débit moyen	Lame d'eau	Coefficient de
hydrologique	en Km²	moyenne	annuel (m <sup>3</sup> /s)	écoulée en	ruissellement
		en mm		mm	en %
Tamri	1746	370	1,64	29,6	8
Zerrar	1346	395	1,39	32,6	8,3
Imi Mikki	451	392	0,81	56,6	14,4
Youssef ben	3780	263	4,40	36,7	14
Tachfine					
Abdelmouméne	1300	304	2,53	61,4	20,2
Aoulouz	4450	281	5,88	41,7	14,8
Moyenne					13,3

- 2) Le volume moyen annuel ruisselé au niveau du barrage est comme suit :
  - P = 362 mm
  - $S = 1258 \text{ Km}^2$
  - R = 13.3 %

D'où V =  $362 \times 10^{-3} \times 1258 \times 10^{6} \times 0,133$ , soit **V = 60,6 \text{ Mm}^3** 

3) après avoir tracé la courbe Q = f (fréquence) en échelle semi logarithmique, les débits de projets pour différentes périodes de retour ont été déterminés graphiquement comme suit :

Période de retour (an)	Fréquence	Débit de pointe en m³/s
50	0,02	1320
100	0,01	1580
1000	0,001	2340
5000	0,0002	2860
10000	0,0001	3080

#### **Ex 3**:

On dispose d'une série de débits moyens journaliers maximums  $Q_{jmax}$ . L'ajustement à la loi de Gumbel nécessite le calcul des deux paramètres de position  $Q_0$  et d'échelle A, en utilisant les formules suivantes :

$$A = 0.78x \delta$$

$$Q_0 = Q_{moy} - 0.5772/A$$

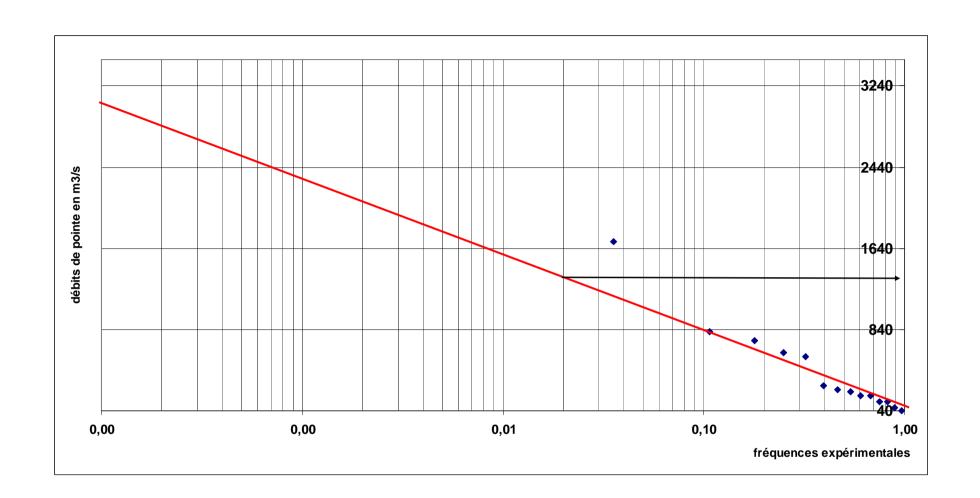
ou  $\delta\;$  est l'écart type et  $Q_{moy}$  est la moyenne.

Si la moyenne de l'échantillon est de  $Q_{moy}=43,057$  et  $\delta=26,726$ , on admet que la loi de Gumbel est de la forme  $Q_{jmax}=A~x~u~+Q_0$ . Déterminer les débits pour les périodes de retour suivantes :

T (an)	5	10	20	30	50	100	200	1000	10000
variable de	1,50	2,25	2,97	3,38	3,90	4,60	5,30	6,91	9,21
Gumbel u									

# **Réponses**:

période de retour T (an)	5	10	20	30	50	100	200	1000	10000
variable de Gumbel U	1,5	2,25	2,97	3,38	3,9	4,6	5,3	6,91	9,21
$Q_{JMAX}$	74,3	89,9	105,0	113,5	124,3	138,9	153,5	187,1	235,1



# **Exercice:**

Les données hydrométriques d'une crue sont comme suit :

Temps en	Débits en m³/s
heures	
1	16,2
3	82,2
3	619,8
4	1211,1
5	874,8
6	882,9
7	894,3
8	761,7
9	720,6
10	544,5
11	370,2
12	322,8
13	280,8
14	230,7
15	216,3
16	183,6
17	158,7
18	135,6
19	119,4
20	100,2

Calculer le volume de la crue sachant que celui-ci peut être approché par la formule

$$Q = \Sigma \; ((Qi + Q_{i+1})/2) \; x \; (t_{i+1} - t_i))$$

# **Réponses:**

	débits en m³		t en	1	
débits	/s	temps	heures	$(Q_{i} + Q_{i+1})/2$	$((Q_1 + Q_{1+1})/2) * 3600$
			ileures		, ,
Q1	16,2	T1	1	49,2	177120
Q2	82,2	T2	2	351	1263600
Q3	619,8	T3	3	915,45	3295620
Q4	1211,1	T4	4	1042,95	3754620
Q5	874,8	T5	5	878,85	3163860
Q6	882,9	T6	6	888,6	3198960
Q7	894,3	T7	7	828	2980800
Q8	761,7	T8	8	741,15	2668140
Q9	720,6	Т9	9	632,55	2277180
Q10	544,5	T10	10	457,35	1646460
Q11	370,2	T11	11	346,5	1247400
Q12	322,8	T12	12	301,8	1086480
Q13	280,8	T13	13	255,75	920700
Q14	230,7	T14	14	223,5	804600
Q15	216,3	T15	15	199,95	719820

Q16	183,6	T16	16	171,15	616140
Q17	158,7	T17	17	147,15	529740
Q18	135,6	T18	18	127,5	459000
Q19	119,4	T19	19	109,8	395280
Q20	100,2	T20	20	50,1	180360
					31385880

Volume de la crue = 31,4 Mm<sup>3</sup>

# Entretien et aménagement de cours d'eau

### I) Introduction:

Après une longue période sans entretien, les rivières ne remplissent plus leur fonction naturelle d'évacuation des eaux. Ceci entraîne des surfaces inondées beaucoup plus importantes pendant un temps beaucoup plus long lors des crues. Dans certains cas, le lit d'une rivière est transformé en dépotoir en temps sec, lors du passage d'une crue, le lixiviat peut s'infiltrer en profondeur et contaminer ainsi les eaux souterraines.

Le développement de végétation dans le lit de la rivière occasionne aussi une obstruction du lit d'où la nécessité de faucardage.



### Invasion d'un cours d'eau par des plantes sauvages

#### II) Méthodes de traitements :

### II.1) <u>Le recalibrage</u> :

La méthode qui semble la plus efficace vue l'urgence des travaux et la moins onéreuse consiste à rechercher à l'aide d'engins puissants, des tracés rectilignes permettant d'évacuer dans un lit unique et sans débordement le débit de pointe de la crue décennale. C'est la méthode de recalibrage.

Le recalibrage s'applique aux tronçons de rivière dont la section est jugée insuffisante. La rivière est transformée en un canal à section régulière. On réalise un nouveau profil en travers de forme trapézoïdale en élargissant la section du lit de façon à créer un chenal unique destiné à accepter à la fois des débits d'étiage et les débits de crues. La section est calculée en fonction de l'importance des crues que l'on veut contenir (crue décennale ou quinquennale)

### II.2) Aménagement de seuils :

L'aménagement de seuils et de diguettes au niveau des oueds est très utile à plusieurs titres :

- \* Renforcer le temps de séjour de l'eau et favoriser l'infiltration au profit des nappes d'eau souterraines.
- \* Laminer les crues pour éviter les dégâts en aval.
- \* Minimiser le dépôt solide pour réduire tant que possible l'envasement des barrages et le colmatage des ouvrages d'assainissement. Pour les barrages on parle souvent de dégradation spécifique est qui s'exprime en m³/km²/an.

### **Remarque**:

Il est indispensable de procéder à un curage du cours d'eau au voisinage des seuils aménagés après passage d'une crue et notamment vis-à-vis des produits charriés (gravats, troncs d'arbres.)

### Exemple: traitement d'oueds dans les jbilètes.

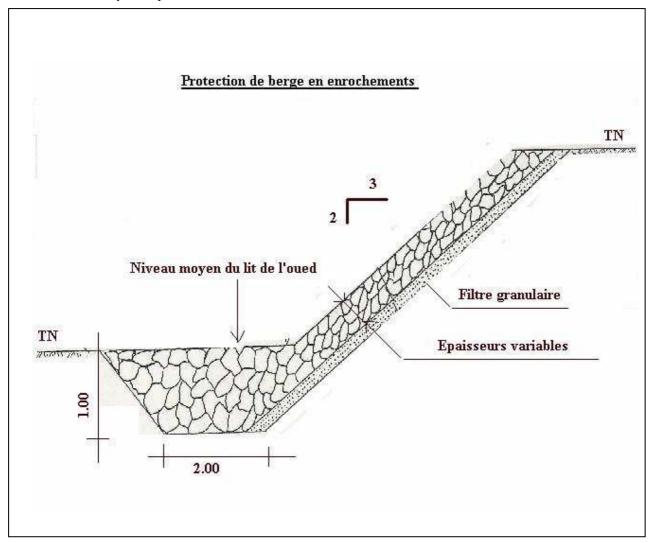
Des diguettes en maçonnerie et en gabions de hauteur ne dépassent pas 1 m ont été aménagés le long de grands thalwegs dans les jbiletes. Cette opération a permis d'augmenter l'infiltration au niveau des schistes altérés de la région. L'amplitude de variation de niveau d'eau dans la nappe varie dans un rapport de 4 à 6 entre l'amont et l'aval des diguettes. (Voir schéma des diguettes).

### II.3) Endiguement des rives :

Cette technique consiste à élever la hauteur des berges jusqu'à une hauteur permettant d'éviter les débordements et canaliser les eaux de crues.

### **II.4) Protection des berges**:

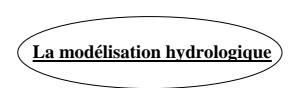
Il s'agit de renforcer la tenue des berges et notamment lorsqu'il s'agit de terrains meubles et friables. Ainsi et pour éviter un sapement des berges lors du passage d'une crue, on procède à la pose de matériaux au niveau des berges et du fond du lit.



<u>Traitement du lit de l'oued Bouzemmour (Jbilétes – région de Marrakech)</u>



www.GenieCivilPDF.com



### I) Introduction:

La modélisation des phénomènes hydrologiques (débits de crue, d'étiage, transformation débit-pluie) est un outil de plus en plus indispensable et notamment si on tient compte de la faible taille des séries hydrométriques ou tout simplement leur absence. Ces modèles, les résultas sont également et de plus en plus couplées à des images satellites de bassins versants pour le suivi, la description ainsi que la prévision de certains paramètres. L'objectif final d'une étude par modèle est la prévision de phénomènes ou paramètres hydrologiques (inondations par exemple) ainsi que le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques (débits de projets pour ponts, barrages...)

### II) Les données nécessaires à une étude de modélisation :

Deux outils sont indispensables:

- un modèle numérique de terrain (MNT) : données, levés topographiques, profils et ce après avoir délimité le ou les tronçons d'étude
- **un modèle hydrodynamique** pour la simulation des phénomènes étudiés en décrivant des paramètres hydrauliques tels que, niveau d'eau, débit, vitesse, côte amont, côte aval.

Le domaine étudié doit faire l'objet d'un maillage afin de faciliter l'entrée des données ainsi que la compréhension des résultas affichés par le modèle. (Phase de discrétisation spatiale des données).

Il existe actuellement plusieurs logiciels qui sont adaptés aux objectifs demandés et problèmes posés, les résultas doivent être exploités avec prudence compte tenu des différentes approximations retenues dans le modèle hydrodynamique.

### III) les composantes d'un modèle de simulation :

Cinq éléments constitutifs sont à signaler :

- 1) la géométrie de l'espace physique étudié
- 2) les entrées du système
- 3) les lois mathématiques décrivant le phénomène à simuler
- 4) l'état initial et les conditions aux limites
- 5) les sorties du système

### IV) Le calage d'un modèle :

Cette étape consiste après avoir collecté le maximum de données et d'informations jugées fiables à ajuster les valeurs simulées pour reproduire des scénarios observés dans la réalité. C'est la phase de validation afin de passer aux prévisions futures.