

# **DETERMINATION DES CRUES DE PROJET PAR LES ASPECTS DU DEBIT DE POINTE ET DE L'HYDROGRAMME DE CRUE AU NIVEAU DE LA COMMUNE AIN BOUKELLAL, BASSIN VERSANT DE L'OUED LARBAA, MAROC**

***Badr Layan***

Faculté des Sciences Département de Géologie, Fès, USMBA, Maroc

***Abdallah Dridri***

Faculté des Sciences Département de Géologie, Fès, USMBA, Maroc

***Lahcen Benaabidate***

Laboratoire de Géorressources et Environneent, Faculté des Sciences et Techniques, USMBA,  
Fez.

***Mahmoud Zemzami***

Laboratoire de Géorressources et Environneent, Faculté des Sciences et Techniques, USMBA,  
Fez.

---

## **Abstract**

The peak flow of a flood can be determined by several empirical methods. Among these methods, the method of Gradex is used in this work for the estimation of the design flood and volumes corresponding to the flow. This approach has allowed recognizing the flow of different frequencies by the aspects of peak flows and the flood hydrogram. The study was based on the annual maximum daily rainfall for a long series of observations (49 years), and the curves of the intensity-duration-frequency (IDF) of Taza rainfall station located in the watershed the Oued Larbaâ. The application of the Gradex method allowed to approach the maximum flood at the level of Ain Boukellal rural county for the frequency of rare occurrence (return periods ranging from 10 to 1000 years).

---

**Keywords:** Oued Larbaâ catchment, Gradex method, peak flow

---

## Résumé

Le débit de pointe d'une crue peut être déterminé par plusieurs méthodes empiriques. Parmi ces méthodes, la méthode du Gradex est utilisée dans ce travail pour l'estimation de la crue de projet et des volumes correspondant aux débits. Cette approche a permis de reconnaître le débit de différentes fréquences par les aspects du débit de pointe et de l'hydrogramme de crue. L'étude a été basée sur les pluies journalières maximales annuelles pour une longue série d'observation (49 ans), et sur les courbes de l'intensité-durée-fréquence (IDF) de la station pluviométrique de Taza situé dans le bassin versant de l'Oued Larbaâ. L'application de la méthode du Gradex a permis d'approcher le débit maximal d'inondations au niveau de la commune rurale Ain Boukellal pour la fréquence d'occurrence rare (périodes de retour allant de 10 à 1000 ans).

---

**Mots-clés:** Bassin versant de l'Oued Larbaâ, méthode du Gradex, Débit de pointe

## Introduction

Le Maroc, à l'instar des autres pays du monde, souffre des problèmes de gestion des ressources en eau. Ces derniers nécessitent une bonne connaissance de la variabilité spatio-temporelle du régime hydrologique à l'échelle des bassins versants (les crues et les étiages), afin de réaliser une bonne gestion des risques d'inondation que ce soit à l'échelle des bassins versants ou à l'échelle des plaines alluviales. Cette étude s'intéresse au phénomène d'écoulement extrême des crues de l'Oued Larbaâ au niveau de la commune Ain Boukellal. Ces crues constituent un risque pour toutes les composantes du bassin versant étudié. En effet, les débordements qui ont eu lieu les dernières années, en particulier pendant les années 2000 et 2010, ont causé des pertes humaines et des dégâts matériels considérables (Layan, 2008).

## Contexte géographique du terrain d'étude

Le bassin versant de l'Oued Larbaâ se situe dans le préif oriental entre les latitudes ( $34^{\circ} 15' 405$ , et  $34^{\circ} 30' N$ ), et les longitudes ( $3^{\circ} 55' 622$  et  $4^{\circ} 00' 645 E$ ). La superficie du BV étudié est estimée à 247 Km<sup>2</sup>. Le bassin versant s'étend principalement sur un domaine collinaire préifain. Au Nord, il est limité par le bassin versant de l'Oued Lamsoun, au Sud par les sous-bassins versants de l'Oued Larbaâ, à l'Ouest par le bassin versant de Lahdar, et à l'Est par les affluents de Moulouya (Fig.1).

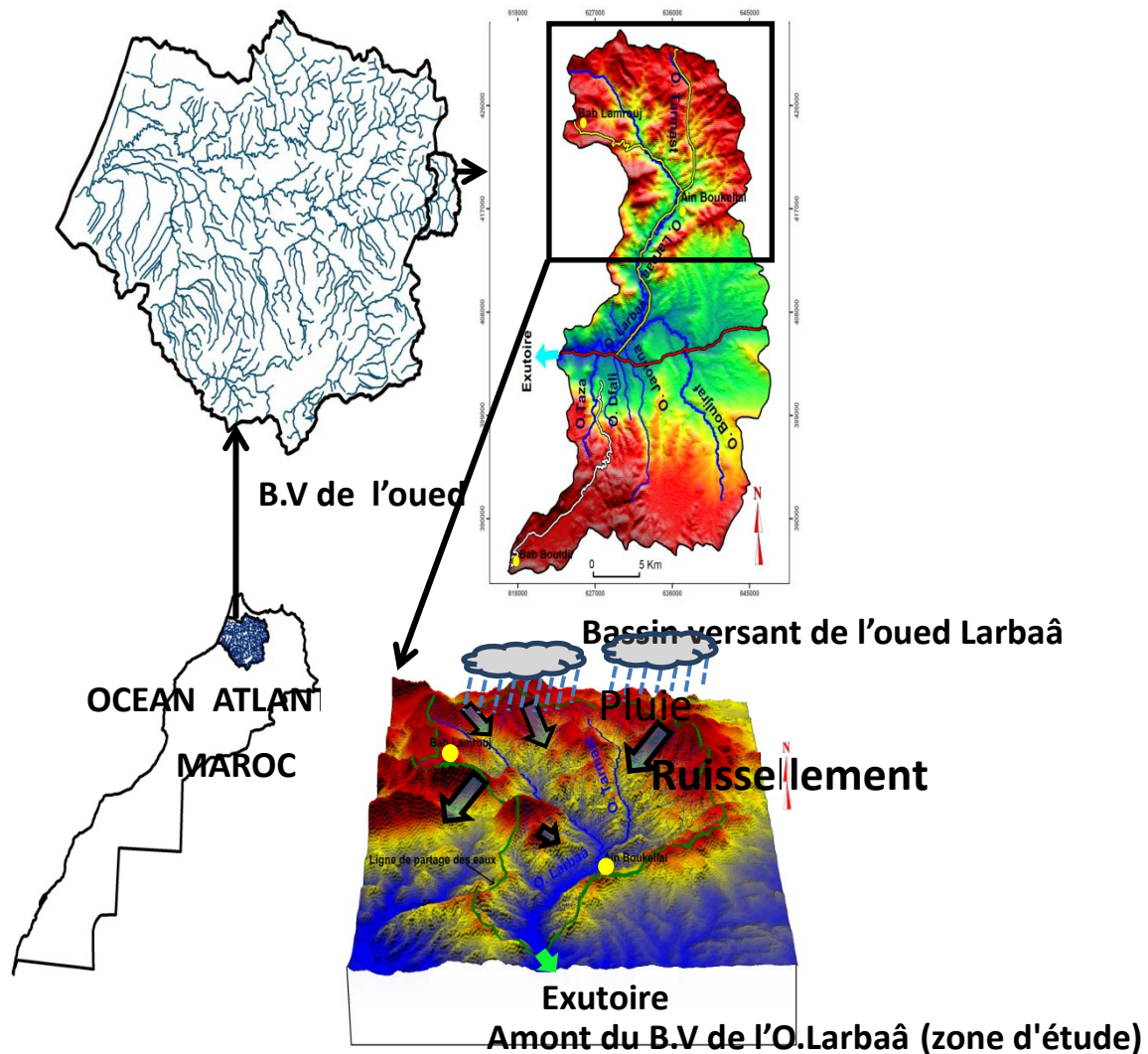


Fig.1. Localisation du secteur d'étude

### Objectifs et Méthodologie

Etant donné l'absence des jaugeages journaliers des débits facilitant l'analyse statistique des crues anciennes, on a eu recours à l'étude hydrologique. Cette approche vise la reconnaissance des crues de projet par les aspects du débit de pointe et de l'hydrogramme de crue. L'étude des crues a été réalisée grâce à l'utilisation de la méthode du Gradex permettant d'atteindre deux objectifs principaux ; notamment l'estimation des débits de pointe ( $Q_p$ ) à l'exutoire du bassin versant étudié, pour des périodes de retour allant de 10 à 1000 ans et la détermination de la forme de l'hydrogramme des crues et l'estimation des volumes de crues.

La méthode du Gradex, a donc pour but de rechercher les débits maximaux de crues pour des fréquences d'apparition rares à très rares (temps de retour plus de 100 ans). Elle s'applique notamment lorsque l'on dispose d'une longue série de pluie sur le bassin, permettant ainsi de valoriser au maximum l'ensemble des données disponibles. De manière générale, on dispose souvent de plus d'informations pluviométriques (Meylan et Musy,

1999). Cette méthode introduite par Guillot et Duband (1967) depuis, elle est utilisée par plusieurs auteurs tel que Naghettini et al (1996). Le Gradex est une méthode très convenable pour les bassins versants dont on ne dispose pas de données de débits (Zemzami et al, 2012).

Cette méthode s'appuie sur les hypothèses suivantes:

- les débits maximum recherchés sont provoqués uniquement par des pluies maximales, uniformément réparties sur le bassin. Il n'y a donc pas diverses origines de formation des crues.

- les pluies maximales et les débits correspondants suivent une même loi de distribution statistique, dite des extrême en raison de la nature du phénomène recherché (crues rares). Ceci exprime surtout le fait que le comportement asymptotique des lois de distribution des pluies et des débits est identique. La loi de Gumbel (Gumbel, 1958) est souvent utilisée dans ce but et dans ce cas uniquement, le caractère exponentiel de cette distribution est décrit par la pente de la droite d'ajustement des pluies observées, mesurées sur un diagramme de probabilité adéquat. La pente de cette droite est le gradient de cette distribution exponentielle.

La méthode de Gradex a été appliquée selon les étapes suivantes :

- Ajustement par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières et détermination, des  $P_{jmax}(T)$  pour T allant de 2 à 1000 ans.
- Détermination du gradex journalier ( $G_p(24)$ ).
- Choix d'un hydrogramme unitaire.
- Calcul du Gradex des pluies sur le temps de concentration  $G_p(T_c)$  à partir du Gradex des pluies en 24 heures.
- Calcul du débit de pointe de référence  $Q_p(T)$  période de retour décennale) en utilisant les formules empiriques de Caquot.
- Calcul des débits de pointe et des lames d'eau ruisselées pour chaque période de retour par la méthode du Gradex.

### **Données disponibles**

La présente étude a été basée sur les pluies journalières maximales annuelles et les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) du poste situé sur le bassin versant de l'Oued Larbaâ. Les coefficients de Montana sont nécessaires à l'application de certaines formules liées à la méthode du Gradex (Musy, 1998), les paramètres (a et b) adoptés pour l'estimation du débit de point sont obtenus à partir des courbes (IDF) de la station météorologique de Taza.

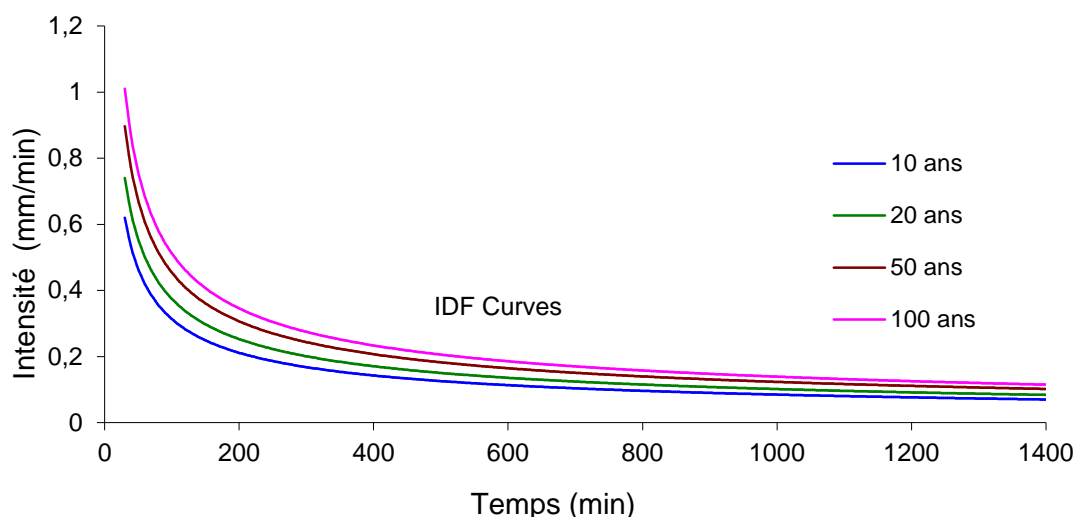


Fig.2. Courbes Intensité-Durée-Fréquence de la Station de Taza

Le bassin versant concerné par la présente étude a été délimité sur une carte topographique de 1/50000. Les caractéristiques géométriques (superficie, longueur du talweg, dénivelée maximale...) de la partie amont du bassin versant de l’Oued Larbaâ sont représentées dans le tableau ci-dessous (Tab.1).

Tab.1. Caractéristiques géométriques du secteur d’étude

Sbv Km <sup>2</sup>	L du Talweg Km	H max m	H min m	D max m	Périmètre Km	Indice de forme
247	30.15	1361	499	862	71.11	1.27

Le temps de concentration  $T_c$  des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point situé le plus loin possible de l’exutoire pour atteindre ce dernier.

Théoriquement on estime que  $T_c$  est la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement. Pratiquement le temps de concentration peut être déduit de mesures sur le terrain ou s'estimer à l'aide de formules le plus souvent empiriques.

Dans cette étude nous avons calculé le temps de concentration par trois formules empiriques:

- La formule de Giondotti

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta H}} \quad (1)$$

$T_c$  : le temps de concentration en heure.

S : la surface du bassin versant en km<sup>2</sup>.

L : la longueur du talweg en Km.

$\Delta H$  : la dénivelée maximale du bassin versant en m.

- La formule de Kirplich

$$T_c = 0.01947 \times L^{0.77} \times I^{-0.385} \quad (2)$$

$T_c$  : le temps de concentration en min.

$L$  : la longueur du Talweg en m.

$I$  : la pente moyenne du talweg en m/m.

- La formule de Turrazza

$$T_c = 1.662 \times S_{bv}^{0.5} \quad (3)$$

$T_c$  : le temps de concentration en min.

$S_{bv}$  : la surface du bassin versant en Ha.

Les valeurs adoptées sont les moyennes des résultats des trois formules. (Tab 2).

Tab.2. Temps de concentration en heures pour Oued Larbaâ

	Giordotti	Kirplich	Turazza	Valeurs adoptées
$T_c$ en H	4.6	3.61	4.35	4.18

## Application et discussion

### Estimation du Gradex

Pour estimer le Gradex, différentes approches sont possibles. Lorsque la série d'observation est longue (>30 ans) le plus simple et le plus efficace est d'ajuster directement les pluies maximales annuelles à une loi de Gumbel. Lorsque la série est plus courte, il est souvent préférable de travailler sur les pluies supérieures à un seuil (nombre de pluies supérieures au seuil ajusté à une loi de poisson, hauteur de cette précipitation ajustée à une loi de Fuller (Laborde, 2000)). On admet généralement qu'une quinzaine d'années d'observations donne une estimation relativement fiable du Gradex. Cette façon d'estimer les Gradex permet d'extrapoler les précipitations jusqu'à des périodes de retour de plusieurs milliers d'années (Duband, 1982).

### Hauteurs des pluies extrêmes

Parmi les lois de distribution qui peuvent rendre compte de la statistique des phénomènes extrêmes, c'est la loi de Gumbel qui s'adapte le mieux aux variables pluviométriques. La loi de Gumbel a pour expression :

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-x_0}{g}\right)\right] \quad (4)$$

$$avec : u = \frac{x - x_0}{g} \tag{5}$$

Dans un graphique de Gumbel la distribution s'écrit comme suit :

$$u = -\ln[-\ln(f(x))] \tag{6}$$

U étant la variable de Gumbel. Le terme g représente la pente de la droite d'ajustement. Bien souvent et surtout pour les pluies, on appelle g "le Gradex" (contraction de gradient de l'exponentielle) (Meylan et Musy, 1999)

En hydrologie, la Probabilité des valeurs d'un échantillon observé est donnée par la formule de Hasen:

$$F_i = \frac{i - 0.5}{n} \tag{7}$$

Dans cette étude, on a ajusté les pluies maximales journalières de la station météorologique de Taza pour une série d'observation assez longue (29 ans) par la loi de Gumbel, cet ajustement a permis d'estimer les valeurs des précipitations pour différentes fréquences de retour (Fig. 3). Par ailleurs ce Gradex présente une constance quelle que soit la période sur laquelle on prend la pluie maximale.

Ajustement par la loi de Gumbel des Pj max de la station de Taza

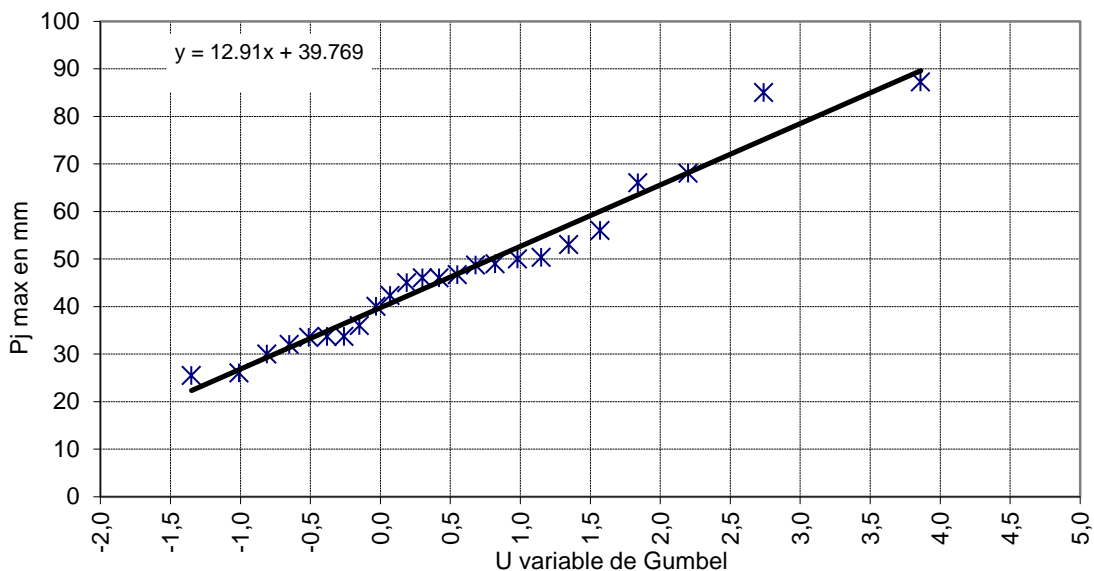


Fig.3. Ajustement des pluies maximales journalières de la station de Taza par la loi de Gumbel

D'après le tableau 3, ci-dessous, on a pu reconnaître le Gradex et les pluies maximales journalières pour différentes périodes de retour.

Tab.3. Pluies maximales journalières par période de retour

Gradex	T 2 ans	T 5 ans	T 10 ans	T 20 ans	T 50 ans	T 100 ans	T 1000 ans
12.91	40.4	59	69	78	91.5	101.5	130

Les valeurs représentées dans le tableau suivant (Tab.4) correspondent à des valeurs journalières. Le passage aux pluies en 24 heures se fera en multipliant les valeurs par un coefficient égal à 1,15.

Tab.4. Pluies maximales journalières en 24 heures

Gradex	T 2 ans	T 5 ans	T 10 ans	T 20 ans	T 50 ans	T 100 ans	T 1000 ans
14.85	46.46	67.85	79.35	89.7	105.225	116.725	149.5

### Estimation du débit de référence (T 10 ans)

La méthode du Gradex repose sur une certaine fréquence dite de référence (T) généralement comprise entre la fréquence décennale et vingtennaire (ABHS, 2005), selon la perméabilité des sols. Pour le cas du bassin versant de l'oued Larbaâ, on va considérer comme fréquence de référence la fréquence décennale (T = 10 ans). Le débit de référence  $Q_p(T=10 \text{ ans})$  est calculé par la formule empirique de Caquot :

$$Q_p(T=10 \text{ ans}) = K^{\frac{I}{U}} I^{\frac{V}{U}} C^{\frac{1}{U}} A^{\frac{W}{U}} \quad (8)$$

$Q_p(T=10 \text{ ans})$  : débit de référence de la fréquence décennale.

I : la pente moyenne du Talweg.

C : coefficient du ruissellement pris égal à 20%.

A : la superficie du bassin versant (en hectares).

Les coefficients d'expression (K, U, V et W) sont calculés par les formules suivantes :

$$K = 0.5^{b(T)} \frac{a(T)}{6.6} \quad (9)$$

$$U = 1 + 0.287b(T) \quad (10)$$

$$V = -0.41b(T) \quad (11)$$

$$W = 0.95 + 0.507b(T) \quad (12)$$

Les valeurs des paramètres a (T) et b (T) sont obtenus par la formule de Montana :

$$i(t, T) = a(T)t^{b(T)} \quad (13)$$

La formule devient alors par période de retour (10 ans) comme suit :



$$Q_p(T=10) = 0.9987 \times I^{0.2783} \times C^{1.195} \times A^{0.791} \quad (14)$$

Le débit de référence  $Q_p$  ( $T = 10$  ans) calculé par la formule empirique de Caquot égale :

$$Q_p(T=10) = 161 \text{ m}^3/\text{s}$$

Après cette étape, on va calculer le Coefficient d'allongement et le Coefficient d'influence pour le bassin versant de l'Oued Larbaâ, ces deux derniers visent à corriger le débit de référence calculé par la formule empirique de Caquot.

- Coefficient d'allongement  $M$  :

$$M = \frac{L}{\sqrt{A}} \quad (15)$$

$L$  : longueur du talweg en hm.

$A$  : surface du bassin versant en ha.

- Coefficient d'influence  $m$  :

$$m = \left( \frac{M}{2} \right)^{0.7.b} \quad (16)$$

En effet; le débit calculé par la méthode du Gradex est corrigé par un coefficient d'influence  $m$ .

$$Q_p(T=10) = 158 \text{ m}^3/\text{s} \quad (17)$$

La détermination du coefficient d'influence est basée sur les paramètres pluviométriques déduits des courbes (IDF) et sur les caractéristiques géométriques du bassin versant de l'Oued Larbaâ ( $A$  et  $L$ ).

### **Détermination de l'hydrogramme de crue**

Cette détermination peut se faire directement si l'on connaît des couples averse-crue, soit dans le cas contraire par des méthodes empiriques ou par comparaison avec des bassins analogues. Dans cette étude, on a adopté des méthodes empiriques qui ont permis de déterminer un hydrogramme unitaire de forme triangulaire simplifiée, avec un temps de base égal à deux fois le temps de pointe qui est pris égal au temps de concentration du bassin versant.

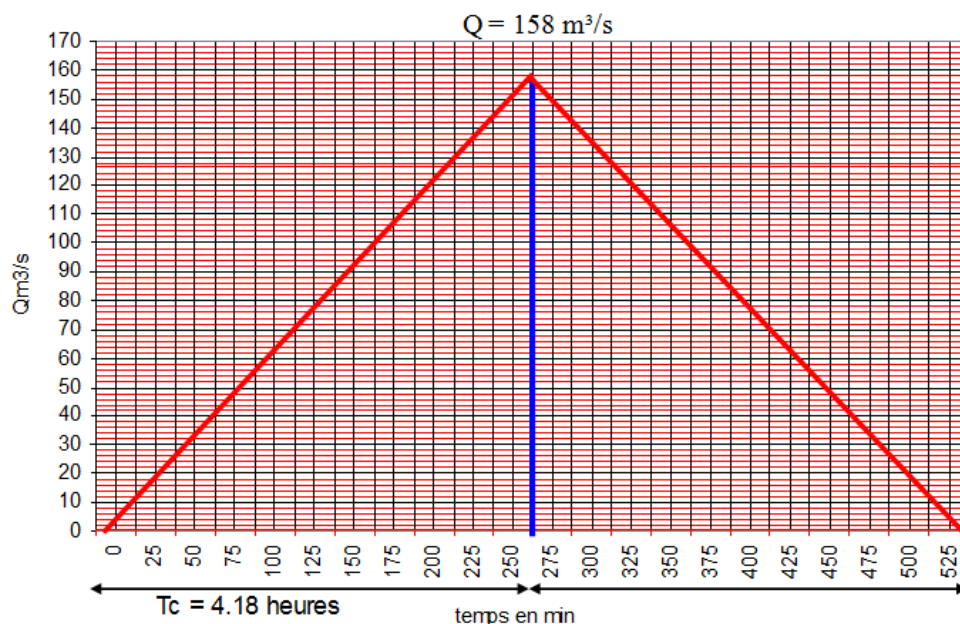


Figure.4. Hydrogramme de crue simplifié

**Calcul de la lame d'eau ruisselée et du volume d'eau pour la fréquence 10 ans**

Le volume d'eau V (T = 10 ans) correspondant au débit de référence Qp (T=10ans) a été déduit à partir de l'hydrogramme type choisi en utilisant la formule suivante :

$$V(T = 10 \text{ ans}) = \frac{Q \times 2Tc}{2} \quad (18)$$

Lr (T = 10 ans) est la lame d'eau ruisselée de référence ; elle est déduite du volume de référence V(T = 10 ans) divisé par la superficie du bassin versant.

$$Lr (T = 10 \text{ ans}) = \frac{V}{Sbv} \quad (19)$$

Les résultats sont groupés dans le tableau ci-après (Tab.5):

Tab.5. Débit, lame d'eau ruisselée et volume d'eau pour (T=10 ans)

	Qp (T=10 ans) m3/s	V(T=10 ans) Mm <sup>3</sup>	Lr (T=10 ans) mm
Oued Larbaâ	158	2.38	9.63

**Calcul des lames d'eau ruisselées et des débits de pointe pour différentes fréquences**

Le principe de base sur lequel on s'est basé pour le calcul des crues par la méthode du Gradex est que la crue est d'autant plus importante en terme de débit de pointe, si le bassin versant considéré est soumis à un épisode pluvieux dont la durée coïncide avec le temps de concentration du bassin. D'autre part, on considère qu'une pluie d'une période de retour T engendre une crue de même période de retour.

- Le passage des pluies en 24 heures P(24) aux pluies sur le temps de concentration P(Tc) pour chaque fréquence se fait en utilisant la formule suivante :

$$P(Tc) = P(24) \times \left(\frac{Tc}{24}\right)^{(1-b)} \quad (20)$$

b est le coefficient de Montana pris égal à 0.568.

Par conséquent, les lames d'eau ruisselées  $L_r(T, T_c)$  au bassin étudié, sur le temps de concentration et pour différentes périodes de retour, sont obtenues en utilisant l'équation ci-dessous:

$$L_r(T/T_c) = L_r(T_r/T_c) + G_p(Tc) \times [U(T) - U(T_r)] \quad (21)$$

$$U(T) = -\ln(-\ln(1 - \frac{1}{T})) \text{ est la variable de Gumbel.} \quad (22)$$

$R(T_r/T_c)$  est la lame d'eau ruisselée de référence.

$G_p(Tc)$  est le Gradex sur le temps de concentration calculé à partir du Gradex en 24 heures par la formule suivante :

$$G_p(Tc) = G_p(24) \times \left(\frac{Tc}{24}\right)^{(1-b)} \quad (23)$$

A partir de la lame d'eau ruisselée, on a pu déduire le volume de la crue en la multipliant par la superficie totale du bassin versant. Ainsi le débit de pointe est déduit en injectant ce volume dans l'hydrogramme type choisi (Tab.6).

Tab.6. Débits, lames d'eau ruisselées et volumes d'eaux pour différentes période de retour

T ans	Lame d'eau ruisselée en mm	Volume d'eau en Mm <sup>3</sup>	Débit en m <sup>3</sup> /s
10	9.63	2.38	158
20	14.65	3.62	240
50	21.14	5.22	347
100	26.02	6.43	427
1000	42.06	10.39	690

## Conclusion

L'étude hydrologique menée par application de la méthode du Gradex a permis d'avoir un débit allant de 158 à 690 m<sup>3</sup>/s pour les périodes allant de 10 à 1000 ans. Ces résultats constituent un document utile à la modélisation hydraulique qui permet le calcul des profils d'écoulement et de la propagation des crues dans les cours d'eau. En effet, l'étude hydrologique constitue le socle sur lequel se construisent toutes les modélisations

hydrauliques de rivière, qui permettent la prévision des inondations et la gestion des risques hydrologiques dans les plaines inondables.

### **Références:**

- ABHS, (2005) Etude de la protection de la ville de Boulemane contre les inondations. Agence du Bassin Hydraulique de Sebou. 2004228/MI/E/Hydrologie-A0.
- Duband, D. (1982), - Hydrologie statistique approfondie. Ecole national supérieure d'hydraulique de Grenoble. pp. II-11.
- Guillot, P. and Duband, D. (1967), - La méthode du gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies, in Floods and Their Computation. Proceedings of the Leningrad Symposium, IASH Publ. 84: 560–569.
- Gumbel, E.J. (1958), - Statistics of Extremes. Columbia University Press, ISBN 0-483-43604-7.
- Laborde, J.P. (2000), - Elément l'hydrologie de surface. Université de Nice - Sophia Antipolis. Ed. 2000, pp 66, 82, 117,119.
- Layan, B. (2008), - Hydrologie, Modélisation hydraulique et gestion du risque d'inondation dans le bassin versant de l'Oued Larbaâ. Cas de Sebt Boukellal (Maroc, Taza). Faculté des Sciences Dehar El Mahraz, Fès, Maroc. Mémoire du Master : 88 p.
- Mark, A. and Marek, P.E. (2011), - Hydraulic Design Manual. Texas Department of Transportation. Manual notice. 2011-1. TxDOT 10/201.  
<http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/hyd/hyd.pdf>.
- Meylan, P. and Musy, A. (1999), - Hydrologie fréquentielle. Office fédéral de l'éducation et de la science/suisse (n 96.01). pp 181, 251, 275, 305, 371.
- Musy, A. (1998), - Hydrologie Appliquée. Office fédéral de l'éducation et de la science/suisse (n 96.01) : 111-121.
- Naghetini, M. Potter, K.W. and Illangasekare, T. (1996), - Estimating the upper tail of flood-peak frequency distributions using hydrometeorological information. Water Resources Research, Vol. 32: 1729-1740. <http://www.agu.org/pubs/crossref/1996/96WR00200.shtml>
- Zemzami, M. Benaabidate, L. Layan, B. and Dridri, A. (2012), - Design flood estimation in ungauged catchments and statistical characterization using principal components analysis: application of Gradex method in Upper Moulouya. Hydrological Processes, DOI: 10.1002/hyp.9212. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.9212/abstract>.