



- PFE
- SI
- SIP

Rapport de Stage

Sujet:

Application pour vérification des calculs hydrologiques pour détermination de débit de crue

résumé :

Pour réussir un dimensionnement judicieux des ouvrages routiers, le recours à une étude hydrologique et hydraulique très poussées est indispensable. Toutefois, ces études peuvent présenter des complexités en matière des calculs surtout lorsqu'ils sont répétitifs, induisant ainsi une perte de temps et d'énergie. Et puisque les entreprises aujourd'hui sont confrontées à des contraintes techniques et socio-économiques qui les pousse à renforcer leur rentabilité, le recours à une automatisation des calculs répétitifs s'avère le moyen le plus efficace. C'est dans ce cadre où s'inscrit notre projet de fin d'étude proposé par le bureau d'études ATOMAS INGENIERIE.

L'objectif de ce travail est d'élaborer une application d'automatisation du calcul hydrologique. Il s'agit d'automatiser les calculs hydrologiques afin d'exploiter les différentes méthodes de calcul des débits de crue : les méthodes statistiques, hydrométéorologiques et empiriques.

Une étude de cas permettant de valider l'application par une comparaison des résultats donnés par la plateforme et ceux trouvés manuellement, et ce afin de valoriser notre travail de fin d'étude en s'assurant de l'opérationnalité de la plateforme programmée.

Réalisé par :

Abidaoui Abdessamad *3IHE*

Ouagague Ibrahim *3IHE*

Encadré par :

Aaribi Mehdi *Atomas*

Jury :

Ahatab Jihane *EHTP*

Mohamed Ezzoudaly *Atomas*

Serhir Najat *EHTP*

Aouiche Ismail *EHTP*

Année universitaire : 2021- 2022



Atomas Ingénierie
VILLA 31 BIS RUE COMMANDANT DRISS
HARTI CITE OLM SOUSSI II RABAT

Dédicace :

On dédie ce modeste travail

A ALLAH

Le très Haut, le très Grand, le Clément, L'Omniscient, l'Omnipotent. Le Tout Puissant, le très miséricordieux d'avoir permis à ce travail d'aboutir à son terme.

Au PROPHÈTE MOHAMED paix et salut sur lui.

A nos **Chers parents**

Amour pour les sacrifices qu'ils ont consentis pour notre instruction et notre bien-être. Trouvez ici, chers parents, dans ce modeste travail, le fruit de tant de dévouements et de sacrifices ainsi que l'expression de notre gratitude et notre amour profond.

A nos **Familles** et nos **Amis**

Pour leur support infini 

A Madame Maaroufi Karima

Qui a œuvré pour notre réussite, de par son soutien, ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans notre vie.

Remerciements :

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réussite de ce projet.

Plus particulièrement nous adressons l'expression de notre vive reconnaissance à **Pr. Serhir Najat**, Professeur à l'école Hassania des travaux publics pour toute l'aide qu'il nous a apporté et ses remarques pertinentes pour améliorer notre travail.

Nous remercions également monsieur **Aaribi Mehdi**, Gérant de la société **Atomas Ingenierie** pour nous avoir accordé ce stage et avoir mis à notre disposition les moyens nécessaires pour le bon déroulement de ce projet, et aussi pour son encadrement, sa disponibilité et ses conseils si précieux qui ont contribués à la réussite de ce travail...

Nous saluons le dynamisme de toute l'équipe de la direction performance réseau, notamment les techniciens qui nous ont assisté lors de nos investigations de terrain.

Nos remerciements les plus sincères sont adressés aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre travail.

Pour finir, nous remercions le corps professoral et les responsables de l'école Hassania des Travaux Publics qui ont contribué à notre formation tout au longs de nos parcours.

Table de matières:

Dédicace :	1
Remerciements :	2
Résumé :	7
Abstract :	8
..... ملخص :	9
Liste de Figures :	10
Liste de Tables :	11
Introduction :	12
CHAPITRE 1 : HYDROLOGIE POUR DETERMINATION DE CRUES	
I. Généralités :.....	14
II. Les méthodes statistiques.....	15
1. Définition de base.....	15
2. Le traitement statistique des données:	16
3. Procédure générale de l'ajustement	17
4. Considérations théoriques :	19
a. La loi normale :	19
b. La loi Galton (Lognormal à 2 paramètres) :.....	20
c. La loi de Gumbel :	20
d. La loi de Frechet :.....	22
e. La loi Pearson III :	22
5. Sélection d'un modèle statistique :	24
Le test d'adéquation de χ^2 :	24
III. Les méthodes empiriques :.....	26
1. Formule de Fuller :.....	26
2. Formule d'Hazan et Lazarevic :.....	27
3. La formule de Mac-Math :.....	29
4. La formule de Mallet-Gauthier :	30
5. Remarque sur les méthodes empirique :	31
IV. Les méthodes analogiques :	32
1. La méthode des débits spécifiques :	32
2. La méthode de Francou- Rodier :	33

V.	Méthodes hydrométéorologiques :	34
1.	Temps de concentration :	34
a.	Formule Espagnole :	34
b.	Formule de Van Te Chow :	34
c.	Formule Californienne :	35
d.	Formule US Corps :	35
e.	Formule de Turrazza et Passini :	35
f.	Formule de Kiripich :	35
g.	Formule de Giondotti :	35
h.	Formule de Ventura :	36
i.	Valeurs à retenir :	36
2.	Méthode de Gradex :	36
a.	Hypothèses de la méthode du GRADEX :	37
b.	Démarche :	37
3.	Méthode rationnelle :	39
I.	Le langage VBA :	41
1.	Définition :	41
2.	Pourquoi le VBA ?	42
II.	Guide d'utilisation :	43
1.	Ajustement des débits :	43
2.	Validation :	44
3.	Graph des fréquences observées et des fréquences théoriques:	44
4.	Ajustement des pluies :	45
5.	Les méthodes empiriques :	46
a.	Formule de fuller :	46
b.	Formule d'Hazan et Lazarevic :	47
c.	Formule de Mac-Math :	47
d.	Formule de Mallet-Gauthier :	47
6.	Temps de concentration :	48
e.	Paramètres nécessaires :	48
f.	Etapes :	48
7.	Méthodes hydrométéorologiques :	49
8.	Méthodes analogiques :	50

I. Généralités :.....	53
1. Ajustement des débits :.....	54
a. Comparaison des résultats :.....	54
b. Les graphs fournis :.....	55
c. Test Khi deux :.....	56
2. Ajustement des pluies :.....	57
a. Comparaison des résultats :.....	57
b. Verification khi-deux :.....	60
3. Temps de concentration :.....	61
4. Méthodes empiriques :.....	61
a. Fuller :	62
b. Hazan Lazarevic:	62
c. Mac-Math :	63
d. Mallet Gauthier :	63
5. Méthodes analogiques :	64
a. Bassin jaugé :	64
b. Débits spécifiques :.....	64
c. Francou-Rodier :.....	64
6. Méthodes hydrométéorologiques :	65
a. Gradex :.....	66
b. Rationnelle :	66

Conclusion

Bibliographie

Annexes

Liste de figures:

Figure 1: Etapes de l'analyse fréquentielle

Figure 2: Catégorie des ponceaux hydrauliques

Figure 3: Types des buses

Figure 4: Types de contrôle à l'entrée

Figure 5: Types de contrôle à la sortie

Figure 6: Ajustement statistique des débits

Figure 7: Comparaison des lois avec les critères AIC et BIC

Figure 8: Graphe des valeurs observées et théoriques

Figure 9: Ajustement des pluies et calcul du Gp

Figure 10: Calcul des débits avec les formules empiriques

Figure 11: Calcul du temps de concentration

Figure 12: Calcul des débits avec les méthodes hydrométéorologiques

Figure 13: Calcul des débits avec les méthodes analogiques

Figure 14: Pré dimensionnement des dalots et buses

Figure 15: Graph des débits fourni par l'application

Figure 16: Graph des débits fourni par HyfranPlus

Figure 17: Comparaison des lois avec les critères AIC et BIC fourni par l'application

Figure 18: Comparaison des lois avec les critères AIC et BIC fourni par HyfranPlus

Figure 19: Graph des pluies fourni par l'application

Figure 20: Graph des pluies fourni par HyfranPlus

Figure 21: Comparaison des lois avec les critères AIC et BIC fourni par l'application

Figure 22: Comparaison des lois avec les critères AIC et BIC fourni par HyfranPlus

Liste de tables:

Table 1: Moyenne de la variable réduite de Gumbel

Table 2: Ecart-type de la variable réduite de Gumbel

Table 3: Formules de Hazan et Lazarevic pour chaque région

Table 4: Valeurs du coefficient K de la formule de Mac-Math

Table 5: Coefficients de pertes de charges à l'entrée

Table 6: Hauteur à la sortie suivant le type d'écoulement

Table 7: Station hydrométrique Tahanouat

Table 8: Caractéristiques du bassin de l'oued Rhéraya

Table 9: Comparaison des débits ajustés par l'application et HyfranPlus ; Loi normale

Table 10: Comparaison des débits ajustés par l'application et HyfranPlus ; Loi Gumbel

Table 4: Comparaison des débits ajustés par l'application et HyfranPlus ; Loi Galton

Table 5: Comparaison des pluies ajustés par l'application et HyfranPlus ; Loi normale

Table 6: Comparaison des pluies ajustés par l'application et HyfranPlus ; Loi Gumbel

Table 7: Comparaison des pluies ajustés par l'application et HyfranPlus ; Loi Galton

Table 8: Comparaison des pluies ajustés par l'application et HyfranPlus ; Loi Pearson 3

Table 9 : Comparaison des temps de concentration calculés manuellement et par l'application

Table 10: Comparaison des débits calculés manuellement et par l'application ; Fuller

Table 11: Comparaison des débits calculés manuellement et par l'application ; Hazan Lazrevic

Table 12: Comparaison des débits calculés manuellement et par l'application ; Mac-Math

Table 13: Comparaison des débits calculés manuellement et par l'application ; Mallet Gauthier

Table 14: Les débits obtenus par ajustement du bassin jaugé; Rheraya

Table 15: Comparaison des débits calculés manuellement et par l'application ; Débits spécifiques

Table 16: Comparaison des débits calculés manuellement et par l'application ; Francou-Rodier

Table 17: Coefficients de ruissellement SETRA

Table 18: Comparaison des débits calculés manuellement et par l'application ; Gradex

Table 19: Comparaison des débits calculés manuellement et par l'application ; Rationnelle

Résumé:

Pour réussir un dimensionnement judicieux des ouvrages routiers, le recours à une étude hydrologique et hydraulique très poussées est indispensable. Toutefois, ces études peuvent présenter des complexités en matière des calculs surtout lorsqu'ils sont répétitifs, induisant ainsi une perte de temps et d'énergie. Et puisque les entreprises aujourd'hui sont confrontées à des contraintes techniques et socio-économiques qui les pousse à renforcer leur rentabilité, le recours à une automatisation des calculs répétitifs s'avère le moyen le plus efficace. C'est dans ce cadre où s'inscrit notre projet de fin d'étude proposé par le bureau d'études ATOMAS INGENIEURIE.

L'objectif de ce travail est d'élaborer une application d'automatisation du calcul hydrologique et du prédimensionnement des petits ouvrages hydrauliques. Il s'agit d'automatiser les calculs hydrologiques afin d'exploiter les différentes méthodes de calcul des débits de crue : les méthodes statistiques, hydrométéorologiques et empiriques.

Une étude de cas permettant de valider l'application par une comparaison des résultats donnés par la plateforme et ceux trouvés manuellement, et ce afin de valoriser notre travail de fin d'étude en s'assurant de l'opérationnalité de la plateforme programmée.

Abstract:

To succeed in a judicious dimensioning of road works, the use of a very thorough hydrological and hydraulic study is essential. However, these studies can present complexities in terms of calculations especially when they are repetitive, thus inducing a loss of time and energy. And since companies today are faced with technical and socio-economic constraints that push them to strengthen their profitability, the use of automation of repetitive calculations proves to be the most effective means. It is in this context that our end-of-study project proposed by the ATOMAS INGENIEURIE design office fits.

The objective of this work is to develop an application for automating the hydrological calculation and the pre-dimensioning of small hydraulic structures. This involves:

Automate hydrological calculations in order to exploit the different methods for calculating flood flows: statistical, hydrometeorological and empirical methods.

A case study to validate the application by comparing the results given by the platform and those found manually, in order to enhance our end-of-study work by ensuring the operability of the programmed platform.

ملخص

لتحقيق النجاح في التحريم الحكيم لأعمال الطرق، من الضروري استخدام دراسة هيدرولوجية، وهيدروليكيّة دقيقة للغاية. ومع ذلك، يمكن أن تشمل هذه الدراسات تعقيدات من حيث الحسابات خاصة عندما تكون متكررة، مما يؤدي إلى إهدار الوقت والطاقة. وبما أن الشركات تواجه اليوم ضغطاً عالمياً لتعزيز الربحية، فإن استخدام الحسابات بطريقة آلية هو الطريقة الأكثر فعالية. وفي هذا السياق، تم اقتراح هذا المشروع من طرف مكتب ATOMAS

INGENIEURIE

الهدف من هذا العمل هو تطوير تطبيق لأتمتة الحساب الهيدرولوجي وتحريم المنشآت الهيدروليكيّة الصغيرة. من أجل تحقيق هذا الهدف تم تحديد ثلاثة أجزاء رئيسية يقوم الجزء الأول بأتمتة الحسابات الهيدرولوجية، من أجل مواصفة الطرق المختلفة لحساب تدفقات الفيضانات، والتي تقسم إلى ثلاثة أنواع رئيسية: الأساليب الإحصائية والطرق المعتمدة على الجوية المائية والطرق التجريبية. الأرصاد الجيولوجية هي جزء ثانٍ من التطبيق حيث تتم التحكم في المنشآت المائية (القوهات ومجاري الصرف) من خلال تطبيق صيغة تعتمد على حساب Delorme، طرفيتين لتحديد أبعاد هذه المنشآت: طريقة Bureau Of معدلات التدفق للمنشآت المائية. وطريقة التحكم في المنبع والمصب، التي طورها ومعادلة الطاقة الحرجة Manning-Strickler والتي تستند إلى صيغة Road Public.

يقوم الجزء الثالث دراسة حالة تؤيد فعالية التطبيق من خلال مقارنة النتائج التي تقدمها المنصة والنتائج التي تم العثور عليها يدوياً، وذلك من أجل تعزيز عملنا في هذا المشروع من خلال ضمان المنصة المبرمجة بطريقة جيدة.

Introduction :

Les infrastructures routières sont essentielles pour la performance des activités économiques d'un pays. Elles favorisent en particulier la circulation des marchandises, et des personnes. Les routes apportent ainsi de nombreux avantages du point de vue social et économique. Dans les milieux ruraux, les infrastructures permettent de les désenclaver et d'assurer la commercialisation des produits agricoles. Des études ont montré que les investissements publics, notamment en infrastructures rurales, contribuent fortement à la croissance de la production agricole et à la réduction de la pauvreté à la base.

La prise en compte des cours d'eau dans les projets d'infrastructures linéaires est indispensable. En effet, chaque projet de réalisation d'une infrastructure linéaire doit faire l'objet d'une étude des enjeux hydrauliques et doit prendre en compte les risques d'inondations. Les problèmes liés à l'eau surgissent en tout point : traversée des grandes rivières, franchissement des petits cours d'eau ou des thalwegs.

De ce fait, leur franchissement et aménagement doit se faire de façon à assurer la pérennité des projets d'infrastructures routières. Pour ce faire, l'étude hydraulique doit s'intégrer dans l'étude générale d'un projet et se développer progressivement au fur et à mesure de l'avancement du projet. Donc, pour réussir le dimensionnement judicieux des ouvrages, les trois grandes étapes suivantes doivent être respectées : l'étude climatologique, l'étude hydrologique et les calculs hydrauliques en fonction des débits et de la topographie du terrain naturel.

Notre projet va se limiter aux aspects de calculs hydrologique. Son objectif est de rendre plus rapide le calcul du débit de crue de projet, utilisé pour le dimensionnement des petits ouvrages hydrauliques. Ce débit de projet est basé sur les données hydrologiques, les caractéristiques du bassin versant, mais aussi fortement sur les méthodes de calcul utilisées.

Partant de ces considérations, le présent travail vise l'élaboration d'une application d'automatisation du calcul hydrologique et du prédimensionnement des petits ouvrages hydrauliques, réalisé dans le cadre de notre projet de fin d'étude.

La réalisation de ce travail est scindée en trois chapitres :

Le premier chapitre synthétise les principales méthodes utilisées pour l'estimation des crues de projet au Maroc. Quatre grandes familles sont distinguées. Les méthodes statistiques sont utilisées lorsqu'on dispose de suffisamment de données hydrologiques en un site (bassin jaugé).

La deuxième famille englobe les méthodes hydrométéorologiques. Elles reposent sur des paramètres régionaux calculés à partir de l'information apportée par la pluie. La troisième famille est constituée par les méthodes empiriques qui sont utilisées lorsqu'on ne possède que peu ou pas de données sur les débits des crues dans une région. Enfin la quatrième famille qui s'agit des méthodes analogiques, elles sont utilisées lorsqu'on dispose des débits maximaux instantanés ou journaliers au niveau d'un bassin voisin et hydrologiquement comparable avec le bassin concerné par l'étude.

Le deuxième chapitre présente le langage de programmation avec un guide d'utilisation de l'application qui contient toutes les pages, les données nécessaires pour appliquer chaque méthode et les étapes de l'utilisation.

Le troisième chapitre s'agit d'un exemple traité par l'application élaborée pour assurer avec une petite comparaison avec les calculs manuels et les résultats du logiciel HyfranPlus.

CHAPITRE 1 : HYDROLOGIE POUR DETERMINATION DE CRUES

I. Généralités :

La défense contre les crues et les problèmes d'irrigation ont été historiquement à l'origine du développement de l'hydrologie.

L'importance économique extrême de l'étude des crues s'explique en grande partie par des considérations de géographie : les zones de fortes concentrations urbaines sont très fréquemment près des fleuves ; les terres agricoles les plus riches sont généralement dans les basses vallées. D'autres considérations économiques justifient également une étude approfondie des crues : par exemple, les ouvrages de franchissement représentent une part très importante des coûts des infrastructures routières ou ferroviaires, le coût de l'évacuateur de crue qui protège une retenue en terre peut très bien être du même ordre de grandeur que celui de la digue elle-même...

La prévision et la prédétermination des crues sont donc nécessaires pour plusieurs raisons ; alors on trouve dans la littérature plusieurs méthodes pour étudier les crues. Parmi ces méthodes, il y en a qui sont anciennes, et d'autres réadaptés ou encore nouvelles.

D'abord qu'est-ce qu'une crue ? Les définitions s'articulent autour de deux concepts justifiés par l'existence de deux phénomènes qui peuvent être plus ou moins liés :

- La crue est une augmentation brutale du débit quel que soit ce débit ;
- La crue est la période durant laquelle le débit dépasse un certain multiple (2 à 3 par exemple) du débit moyen annuel.

L'estimation des débits de projets ne doit pas être basée sur une seule méthode. On choisit les méthodes convenables selon les données disponibles et les caractéristiques de la région.

Une multitude de méthodes d'estimation des crues de projets existent et sont utilisées dans le but de dimensionnement des ouvrages hydrauliques en génie civil (barrages, ponts, ouvrages de franchissement routier, réseaux d'assainissement...).

Ces différentes méthodes peuvent être classées en trois grandes familles à savoir :

- *Les méthodes statistiques* ;
- *Les méthodes empiriques* ;
- *Les méthodes analogiques*.
- *Les méthodes hydrométéorologiques* ;

II. Les méthodes statistiques

L'analyse fréquentielle des événements extrêmes est l'un des outils privilégiés pour l'estimation des débits de crue pour une période de retour donnée. Elle est basée sur des méthodes statistiques de prédétermination, consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus, afin d'en définir les probabilités d'apparition future. Cette prédétermination repose sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle probabiliste fréquentiel, qui est une loi de probabilité décrivant le comportement statistique d'un processus.

Cette méthode est utilisée quand on dispose de suffisamment de données hydrologiques en un site (bassin jaugé), on fait alors recours aux ajustements statistiques de lois de probabilités.

1. Définition de base

Les caractéristiques d'une crue de fréquence donnée peuvent se déterminer par les méthodes statistiques si on dispose de données hydrométriques s'étendant sur une période suffisamment longue, une vingtaine d'années d'affilée au minimum.

Les principales définitions :

Soit X la variable aléatoire continue que nous devons étudier : débit de pointe d'une crue, précipitation journalière, hauteur d'eau à une échelle, etc.

La fonction de répartition $F(x)$ est la probabilité pour que cette variable étudié X soit inférieure ou égale à x , x étant une valeur que peut prendre X .

$$F(x) = \text{Prob} [X \leq x]$$

Cette fonction $F(x)$ appelée encore fonction de non-dépassement tend asymptotiquement vers 1 (pour $X \rightarrow \infty$). La fonction $F(x)$ est liée à la fonction de dépassement $P(x)$ par la relation :

$$P(x) = 1 - F(x)$$

En pratique, ayant un échantillon de N valeurs de X à étudier, classées par ordre décroissant, la fonction de dépassement $P(x)$ est donnée expérimentalement, pour chaque X_R de rang R , par :

$$P(X_R) = \frac{R}{N+1}$$

Le temps de retour T , notion pratique, quoique très contestée, est donné par :

$$T = \frac{1}{P} = \frac{1}{1 - F}$$

Un échantillon de N valeurs de X_i se caractérise d'une part par ses valeurs centrales comme la moyenne algébrique \bar{X} telle que :

$$m = \bar{X} = \frac{\sum X_i}{N}$$

Et d'autre part par des paramètres de dispersion : variance.

$$\sigma^2 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N-1} = \frac{1}{N-1} (\sum X_i^2 - N \cdot \bar{X}^2)$$

2. Le traitement statistique des données:

a) La description :

La définition des paramètres types du phénomène à étudier :

- Valeurs centrales ;
- Paramètres de dispersion ;
- Caractéristiques de forme des courbes de fréquences.

b) L'analyse :

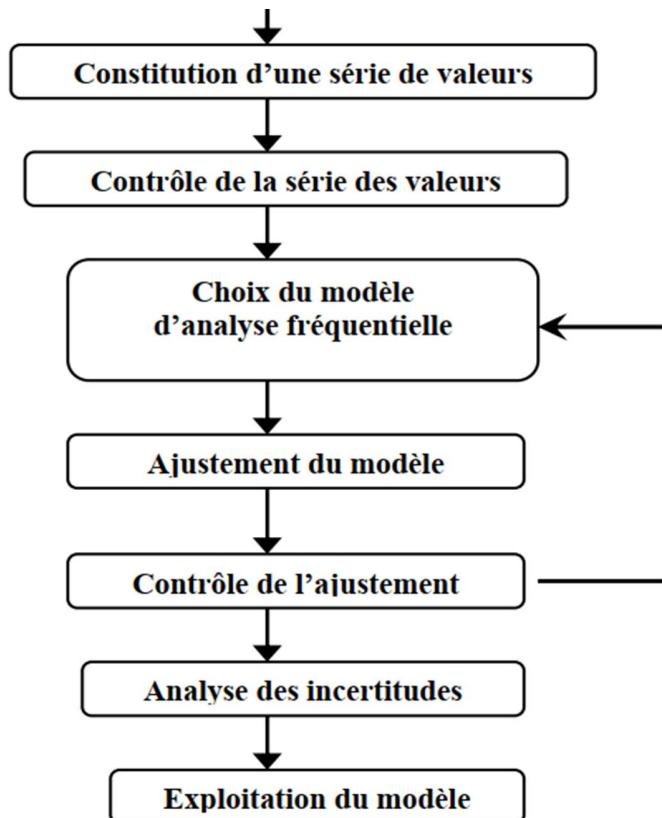
Cette étape consiste à formaliser les données expérimentales par une expression mathématique tenant compte des valeurs types calculées à la première étape : La recherche d'un ajustement théorique adéquat.

c) La prévision :

Il s'agit de projeter dans l'avenir le modèle choisi pour pouvoir prendre des décisions optimales et sécuritaires.

3. Procédure générale de l'ajustement

Figure 23 : Etapes de l'analyse fréquentielle



L'ajustement statistique se fait en passant par deux étapes :

- ❖ Détermination des fréquences empiriques :

On considère un nombre N d'observations et on classe les N différentes valeurs de débits de pointe par ordre croissant. La fréquence empirique d'une valeur X_j , de rang j, peut être estimée à partir des formules suivantes :

Hazen : Choix traditionnel

$$F_j = \frac{j - 0.5}{N}$$

Weibull : Non biaisé, pour toutes distributions

$$F_j = \frac{j}{N + 1}$$

❖ **Choix de la fonction de répartition théorique :**

Dans la littérature, il existe plusieurs fonctions de distribution qui sont utilisées en hydrologie.

Il faut y aller par des tests successifs en essayant d'ajuster fonction par fonction en commençant par la plus simple, qui contient peu de paramètres jusqu'à avoir la loi probabiliste qui représente le mieux la distribution empirique.

L'analyse statistique commence par la critique des données de base et le calcul des caractéristiques statistiques de base de l'échantillon (moyenne, écart type, variance...). Ensuite les données sont triées par un ordre de classement donné et le choix des deux fonctions de répartition empirique et statistique est fait.

La qualité de l'ajustement est jugée acceptable d'après le tracé de l'ajustement graphique. On confirme ensuite par le test d'adéquation statistique de « Khi Deux » pour retenir ou rejeter la fonction de répartition théorique ajustée. En cas de rejet, ces étapes sont reprises pour un choix différent de la fonction de répartition théorique.

❖ **Analyse des incertitudes**

A ce stade de l'analyse nous disposons d'un modèle fréquentiel, obtenu après plusieurs étapes. On est donc en droit de se poser la question de sa fiabilité ou degré de confiance que l'on peut y accorder.

L'incertitude liée au phénomène de la fluctuation d'échantillonnage peut être évaluée par la procédure classique de l'**intervalle de confiance**. La construction d'un tel intervalle peut être effectuée par la méthode dite de l'erreur-type.

Remarque : Notre application à ce stade ne peut pas encore analyser les incertitudes.

4. Considérations théoriques :

a. La loi normale :

Lorsqu'une variable aléatoire subit l'influence de plusieurs paramètres dont aucun n'est prépondérant, on dit que cette variable suit une distribution « normale », c'est la loi la plus connue, définie par sa densité de probabilité :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$$

Les paramètres m et σ représentent respectivement la moyenne et l'écart type de la variable aléatoire.

Lorsqu'on fait un changement de variable $t = \frac{x-m}{\sigma}$ dans la loi normale, on trouve la loi normale centrée réduite de moyenne 0 et d'écart type 1, dont la densité de probabilité est définie par :

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-t^2}{2}}$$

Ajustement :

Soit X un échantillon de données observées de débit ou de pluie sur lesquelles on veut appliquer l'ajustement par la loi normale centrée réduite, soit U la variable réduite correspondante et N l'effectif de l'échantillon.

La fréquence au non dépassement d'une valeur X_i est donnée par :

$$F(X_i) = F(U_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{U_i} e^{\frac{-t^2}{2}} dt$$

On calcule la moyenne m et l'écart type.

On classe les différentes N valeurs de X par ordre croissant et on affecte à chaque valeur un rang i allant de 1 jusqu'à N .

On calcule la fréquence empirique dans notre cas on utilise la formule de **Hazen**.

On calcule la fréquence théorique de chaque observation X_i

On calcule les valeurs théoriques $X_{th,i}$: $X_{th,i} = U_i \cdot \sigma + m$

b. La loi Galton (Lognormal à 2 paramètres) :

Lorsque les valeurs du logarithme d'une variable X suivent une distribution normale, on dit que la variable X suit une loi de Galton. La loi log-normale est préconisée par certains hydrologues qui la justifient en argumentant que l'apparition d'un évènement hydrologique résulte de l'action combinée d'un grand nombre de facteurs qui se multiplient.

La loi Galton est définie par sa densité de probabilité :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_{\log} \sqrt{2\pi}} e^{\frac{(\log x - \mu_{\log})^2}{2\sigma_{\log}^2}}$$

Les paramètres représentent respectivement la moyenne et l'écart type de la variable aléatoire $\ln(x)$.

Lorsqu'on fait un changement de variable $t = \frac{y - \mu_y}{\sigma_y}$ avec $y = \ln(x)$ on trouve la loi-log normale centrée réduite de moyenne 0 et d'écart type 1.

Soit X un échantillon de données observées de débit ou de pluie sur lesquelles on veut appliquer l'ajustement par la loi log-normale centrée réduite, soit la variable réduite correspondante et N l'effectif de l'échantillon. Posons : $y = \ln(x)$. Alors y suit la loi normale centrée réduite.

Pour effectuer l'ajustement statistique, on suit les mêmes étapes mentionnées pour la loi normale centrée réduite (Y au lieu de X).

Pour les valeurs théorique $X_{th,i}$: $X_{th,i} = e^{Y_{th,i}}$

c. La loi de Gumbel :

Certains phénomènes naturels de nature continue s'écartent parfois considérablement de leurs limites normales de variation, et l'analyse statistique de ces valeurs extrêmes permet de prévoir leur fréquence d'apparition grâce à la théorie de Gumbel. Cette théorie permet de déterminer les débits de crues de longues périodes de retour, l'échantillon est formé par les débits ou les pluies maximums journaliers pour chaque année de mesure.

La fonction de répartition de la loi de Gumbel est de la forme :

$$F(x) = e^{-e^{a(x-x_0)}}$$

La variable réduite de Gumbel est définie par $y = a(x - x_0)$; $F(x) = e^{-e^y}$

Avec a et x_0 sont les paramètres de la loi définis par :

- $N < 100 : \frac{1}{a} = \frac{\sigma}{\sigma_N}$ et $x_0 = m - \frac{1}{a}y_N$
- $N \geq 100 : \frac{1}{a} = 0.78 \cdot \sigma$ et $x_0 = m - \frac{0.577}{a}$

Avec y_N et σ_N sont la moyenne et l'écart type de la variable réduite de Gumbel calculés un échantillon de taille N . Ils sont donnés aux tables 20 et 21 ci-dessous en fonction de N .

Table 20: Moyenne de la variable réduite de Gumbel y_N

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0.4952	0.4996	0.5035	0.507	0.51	0.5128	0.5157	0.5181	0.5202	0.522
20	0.5236	0.5252	0.5268	0.5283	0.5296	0.5309	0.532	0.5332	0.5343	0.5353
30	0.5362	0.5371	0.538	0.5388	0.5396	0.5463	0.541	0.5418	0.5424	0.543
40	0.5436	0.5442	0.5448	0.5453	0.5458	0.5463	0.5468	0.5473	0.5477	0.5481
50	0.5485	0.5489	0.5493	0.5497	0.5501	0.5504	0.5508	0.5511	0.5515	0.5518
60	0.5521	0.5524	0.5527	0.553	0.5533	0.5535	0.5538	0.554	0.5543	0.5545
70	0.5548	0.555	0.5552	0.5555	0.5557	0.5559	0.5561	0.5563	0.5565	0.5567
80	0.5569	0.557	0.5572	0.5574	0.5576	0.5578	0.558	0.5581	0.5583	0.5585
90	0.5586	0.5587	0.5589	0.5591	0.5592	0.5593	0.5595	0.5596	0.5598	0.5599
100	0.56									

Table 21: Ecart-type de la variable réduite de Gumbel σ_N

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0.9496	0.9676	0.9833	0.9971	1.0095	1.0206	1.0316	1.0411	1.0493	1.0565
20	1.0628	1.0696	1.0754	1.0811	1.0864	1.0915	1.0961	1.1004	1.1047	1.1086
30	1.1124	1.1159	1.1193	1.1226	1.1255	1.1285	1.1313	1.1339	1.1363	1.1388
40	1.1413	1.1436	1.1458	1.148	1.1499	1.1519	1.1538	1.1557	1.1574	1.159
50	1.1607	1.1623	1.1638	1.1658	1.1667	1.1681	1.1696	1.1708	1.1721	1.1734
60	1.1747	1.1759	1.177	1.1782	1.1793	1.1803	1.1814	1.1824	1.1834	1.1844
70	1.1854	1.1873	1.1873	1.1881	1.189	1.1898	1.1906	1.1915	1.1923	1.193
80	1.1938	1.1945	1.1953	1.1959	1.1967	1.1973	1.198	1.1987	1.1994	1.2001
90	1.2007	1.2013	1.202	1.2026	1.2032	1.2038	1.2044	1.2049	1.2055	1.206
100	1.2065									

La loi de distribution de la variable réduite de Gumbel est donnée par : $y = -\ln(\ln(F))$. F est la probabilité au non dépassement.

Soit X un échantillon de données observées de débit ou de pluie sur lesquelles on veut appliquer l'ajustement par la loi de Gumbel centrée réduite, soit y la variable réduite correspondante et N l'effectif de l'échantillon.

L'ajustement à la loi de Gumbel consiste à fixer 2 à 3 probabilités F .

On calcule la variable réduite $y(F)$ de Gumbel à partir de $F_{th,i}$: $y_i = -\ln(-\ln(F_{th,i}))$.

On calcule a et x_0 en tenant en compte le tables 20 et 21.

On calcule les valeurs théoriques $X_{th,i}$: $X_{th,i} = \frac{1}{a}y_i + x_0$

d. La loi de Frechet:

On dit que la variable X suit une loi de Frechet si la variable $Z = \ln(X)$ suit une loi de Gumbel.

La variable réduite y de Frechet est définie par : $y = a(z - z_0)$ où $y = -\ln(-\ln(F))$.

Les paramètres de la loi de Frechet sont calculés par les mêmes relations que celles de la loi de Gumbel :

$$\text{- } N < 100 : \quad \frac{1}{a} = \frac{\sigma_z}{\sigma_N} \quad \text{et} \quad z_0 = m_z - \frac{1}{a}y_N$$

$$\text{- } N \geq 100 : \quad \frac{1}{a} = 0.78 \cdot \sigma_z \quad \text{et} \quad z_0 = m_z - \frac{0.577}{a}$$

De même comme pour le cas de la variable de Gumble on a :

La variable réduite de Gumbel : $y_i = -\ln(-\ln(F_{th,i}))$

Les valeurs théoriques $Z_{th,i}$: $Z_{th,i} = \frac{1}{a}y_i + z_0$

Les valeurs théoriques $X_{th,i}$: $X_{th,i} = e^{Z_{th,i}}$

e. La loi Pearson III:

Elle complète ces deux lois fondamentales : à faible coefficient de variation, elle tend vers la loi de Gauss, à coefficient de variation plus fort, elle se rapproche de la loi de Gumbel. La fonction de densité de probabilité de la loi de Pearson Type III a deux paramètres :

$$f(x) = \frac{\alpha}{\Gamma(\beta)} (\alpha x)^{\beta-1} e^{-\alpha x}$$

Estimation des paramètres : $\beta = \left(\frac{2}{C_s}\right)^2$ et $\alpha = \frac{\sqrt{\beta}}{\sigma}$

Avec :

- α : paramètre de l'échelle.
- β : paramètre de forme.
- C_s : coefficient d'asymétrie.
- $\Gamma(\beta)$: L'intégrale eulérienne.

Soit X un échantillon de données observées de débit ou de pluie sur lesquelles on veut appliquer l'ajustement par la loi normale centrée réduite, soit K la variable réduite correspondante et soit n le nombre de cet effectif.

La fréquence au non dépassement d'une valeur X_i est donnée par :

$$F(X_i) = \frac{\alpha}{\Gamma(\beta)} \int_0^{X_i} (\alpha t)^{\beta-1} e^{-\alpha t} dt$$

La moyenne et l'écart type des X: m et σ .

Le coefficient d'asymétrie : $C_s = \frac{N}{(N-1)(N-2)} \times \frac{\sum_1^N (X_i - m)^3}{\sigma^3}$

Classement de X_i .

Fréquence empirique.

Calculer la variable réduite U_i par la table de la loi normale.

On calcule la variable réduite K_i : $K_i = \frac{2}{C_s} \left(\left(\frac{C_s}{6} \left(U_i - \frac{C_s}{6} \right) + 1 \right)^3 - 1 \right)$

On calcule la valeurs théoriques $X_{th,i}$: $X_{th,i} = K_i \cdot \sigma + m$

(Statistiques appliquées à l'hydrologie, AMACHNOUG)

5. Sélection d'un modèle statistique :

Il existe toujours des écarts entre les fréquences expérimentales des valeurs observées et les fréquences des mêmes valeurs calculées à partir d'une fonction de répartition quelconque. **L'ajustement graphique** est la première étape mais reste insuffisante pour le choix définitif de la loi théorique. Le test statistique d'adéquation consiste à comparer l'adéquation de plusieurs lois afin d'adopter le moins mauvais ajustement. Les tests les plus utilisés sont le test χ^2 et le test de Kolmogorov Smirnov (L'application ne fait pas le test de Kolmogorov Smirnov).

Le test d'adéquation de χ^2 :

Ce test permet de faire une comparaison entre la distribution empirique et la distribution théorique. Le principe consiste à faire l'hypothèse que les deux distributions ne diffèrent pas. Si la probabilité qu'il en soit ainsi est faible, on rejette l'hypothèse et on conclura que la distribution théorique ne s'ajuste pas à l'échantillon étudié. Si au contraire cette probabilité est forte, la loi théorique sera acceptée.

Soit un échantillon de taille n (X₁, X₂, ..., X_n).

Hypothèse : H₀ : x₁, x₂, ..., x_n sont issus d'une population distribuée selon la loi de probabilité F(x) à p paramètres.

La mise en œuvre consiste à subdiviser l'échantillon en k classes équiprobables, chacune ayant une probabilité théorique : P_i telle que P_i = $\frac{v_i}{n}$ où v_i est l'effectif théorique (nombre d'éléments) de chaque classe i.

En réalité l'effectif réel de chaque classe i est n_i, plus ou moins différent de v_i. Le problème est de vérifier si l'écart entre les v_i et les n_i des différentes classes est significatif. La vérification se fait par le calcul de la moyenne des carrés des écarts entre ces deux effectifs:

$$\chi^2_{calculé} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i - v_i}{v_i}$$

Cette quantité suit une loi χ^2 à μ degrés de liberté. Avec : $\mu = k - p - 1 \geq 1$ Ce qui implique que $k \geq p + 2$

$\chi^2_{calculé}$ dépend du découpage en k classes et le chiffre obtenu n'a un sens que si la taille de l'échantillon est importante. Le test n'est significatif que si $v_i \geq 5$.

$\chi^2_{calculé}$ est comparée à une valeur tabulée $\chi^2_{tabulé}$, fonction du nombre de degré de liberté et du seuil de signification α imposé en général à 5%.

Des tables donnant la loi $\chi^2_{tabulé}$ à la probabilité α de dépassement existent. D'autres tables permettent de donner la loi à la probabilité au Non dépassement ($1-\alpha$) (Annexes).

-Si $\chi^2_{calculé} > \chi^2_{tabulé; \mu; \alpha}$ On rejette l'hypothèse nulle.

-Si $\chi^2_{calculé} \leq \chi^2_{tabulé; \mu; \alpha}$ la loi d'ajustement sera retenue.

III. Les méthodes empiriques :

Les méthodes empiriques sont utilisées lorsqu'on ne possède que peu ou pas de données sur les débits des crues au niveau du bassin du projet. Des formules sont établies pour de nombreux cours d'eau et dans divers pays, permettant d'estimer des débits maximums de crues à partir de certaines caractéristiques du bassin versant en les complétant parfois par certaines données météorologiques en particulier la pluviométrie.

Formules empiriques utilisées au Maroc :

Plusieurs formules empiriques existent dans la littérature. On s'intéressera aux relations qui sont les plus utilisées au Maroc (Pr. N. Serhir - EHTP Cours hydrologie opérationnelle), à savoir :

- La formule de Fuller ;
- La formule d'Hasan-Lazarevic (Myer) ;
- La formule de Mac-Math (pour les petits bassins) ;
- La formule de Mallet-Gauthier.

1. Formule de Fuller :

La formule de Fuller est développée par Fuller depuis 1914 et permet l'estimation des débits de crues de projet pour une période de retour T pour un bassin urbain ou rural donné. La formule de base s'exprime par (Pr. N. Serhir - EHTP Cours hydrologie opérationnelle) :

$$Q_{max}(T) = q \times (1 + a \cdot \log(T))$$

Avec :

- $Q_{max}(T)$: le débit de la crue de projet pour la période de retour T en m³/s;
- q : la moyenne des débits maxima de chaque année en m³/s pour toutes les années de mesure disponibles ;
- a : facteur régional,
- T : la période de retour en années.

Plusieurs versions de cette formule existent pour différentes régions. Notamment pour le cas du Maroc où la formule de Fuller devient en fonction de la période de retour T (Pr. N. Serhir - EHTP Cours hydrologie opérationnelle) :

$$Q_{max} = q \times (1 + \alpha \times \log(T)) \times \left(1 + \frac{2.66}{S^{0.3}}\right)$$

Avec :

$$\alpha = \begin{cases} 0.8 \text{ à } 1.2 \\ 2 \\ 3 \text{ à } 3.5 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \text{les oueds rifains} \\ \text{le nord} \\ \text{les oueds sahariens} \end{cases}$$

2. Formule d'Hazan et Lazarevic :

La formule de Myer permet de calculer le débit de crue de projet pour un bassin urbain ou rural donné. Le débit de la crue de projet pour la période de retour T se calcule par la formule suivante (Pr. N. Serhir - EHTP Cours hydrologie opérationnelle) :

$$Q_{max}(T) = C \times S^\alpha$$

Avec :

- $Q_{max}(T)$: le débit de la crue de projet de période de retour T en m³/s ;
- C : cote "Myer" du bassin, fonction des caractéristiques du bassin ;
- A : la surface du bassin versant en Km² ;
- α : exposant généralement pris au Maroc égal à 0.5 (variant de 0.4 à 0.8 suivant les régions).

Dans leur étude, Hazan et al (1969), ont adapté cette formule pour permettre de calculer le débit de la crue de projet millénaire (T=1000ans) pour les bassins du Nord et du Sud-Est du Maroc connaissant la superficie du bassin versant A en Km², sa pluviométrie moyenne et la localisation de la zone à étudier.

Table 22: Formules de Hazan et Lazarevic pour chaque région

RÉGIONS	FORMULES (T=1000 ans) Q en m ³ /s	PLUVIOMÉTRIE (mm/an)
Provinces du Nord		
Rif central	$Q = 15,55 * S^{0,776}$	1000-1300
Rif occidental	$Q = 9,78 * S^{0,793}$	800-1000
Rif oriental	$Q = 7,58 * S^{0,808}$	600-800
Moyen Atlas		
Moyen Atlas	$Q = 19,94 * S^{0,636}$	700-900
Moyen Atlas Karst	$Q = 13,47 * S^{0,587}$	400-700
Haut Atlas saharien		
	$Q = 9,38 * S^{0,742}$	200-400

Les débits de récurrences autres que millénial, sont calculés à partir de cette méthode par la formule initiale de Fuller :

$$Q_{max}(T) = q \times (1 + 0.8 \cdot \log(T))$$

De ce raisonnement on peut tirer la valeur de la grandeur q en appliquant la formule de Fuller à T=1000ans. Ce qui permet d'écrire que :

$$Q_{max}(1000) = q \times (1 + 0.8 \cdot \log(1000))$$

Ainsi la formule de Fuller, combinée avec la méthode d'Hazan Lazarevic permet de calculer le débit max pour n'importe quelle valeur de T, Q(1000) est calculée par la méthode d'Hazan Laraevic.

La formule finale s'exprime par :

$$Q_{max}(T) = \frac{Q(1000) \times (1 + 0.8 \cdot \log(T))}{1 + 0.8 \cdot \log(1000)}$$

Remarque :

Au niveau de la plateforme pour utiliser la méthode de Fuller on doit avoir la série des débits max pour déterminer q.

Remarque :

D'autres formules régionales ont été déterminées dans le bassin de Sebou :

Ces formules sont de la forme (Pr. N. Serhir - EHTP Cours hydrologie opérationnelle):

$$Q_{max}(T) = a(T) \times S^\alpha$$

Avec :

- $Q(T)$: débit de pointe en m^3/s de la crue de période de retour T.
- S : Superficie du bassin versant (km^2)
- α : coefficient régional égal à 0.725
- $a(T)$: Paramètre variable suivant la zone considérée dans le bassin de Sebou, dépend de T et intègre les différents paramètres influençant la genèse des crues.

Ces méthodes-là ne sont pas incluses dans notre plateforme.

3. La formule de Mac-Math :

L'énoncé de la formule de Mac Math pour l'estimation des débits de crues de période de retour T est (Pr. N. Serhir - EHTP Cours hydrologie opérationnelle) :

$$Q_{max} = K \times P(24h, T) \times S^{0.58} \times I^{0.42}$$

Où :

- Q_T : débit de pointe en m^3/s de période de retour T années ;
- K : coefficient dépendant de la nature du bassin versant (couvert végétal, topographie) ;
- $P(24h, T)$: précipitation moyenne max de durée sur 24 heures en mm de période de retour T (elle est calculée par ajustement statistique sur la base des Pmaxjour observées au différents postes de pluie disponibles);
- S : superficie du bassin versant en km^2 ;
- I : pente moyenne du bassin versant en m/m .

Table 23: Valeurs du coefficient K de la formule de Mac-Math

Coefficient K	
0.11	Bassin versant de grande dimension
0.22	Terre cultivée et terrain vague des zones suburbaines
0.32	Terrain non aménagé, non rocheux à pente moyenne
0.42	Terrain non aménagé, non rocheux à pente forte

La formule de Mac Math est utilisée pour les bassins versants, urbains ou ruraux, situés dans les zones arides à semi-arides et de surface de tailles petites.

Une grande sensibilité est attachée au coefficient régional K. Une description et connaissance détaillée de la zone d'étude sont cruciales (Pr. N. Serhir - EHTP Cours hydrologie opérationnelle).

Remarque :

La plateforme a traité le cas d'un seul post de précipitation de pluie, dans le cas de plusieurs stations on peut utiliser la méthode des polygones de Thiessen ou moyenne arithmétique pour avoir $P(24h, T)$.

4. La formule de Mallet-Gauthier :

La formule de Mallet et Gauthier, développée par Coutagne en 1951 permet l'estimation des débits de crue de période de retour T pour un bassin donne, selon la forme générale (Pr. N. Serhir - EHTP Cours hydrologie opérationnelle) :

$$Q_{max} = 2 \times K \times \log(1 + aP_{an}) \times \frac{S}{\sqrt{L}} \times \sqrt{1 + 4 \log(T) - \log(S)}$$

Avec :

- $Q(T)$: débit max en m³/s de période de retour T ;
- S = Superficie du bassin versant en km² ;
- P_{an} = Précipitation moyenne interannuelle dans le bassin versant concerné par le projet en m, calculée à partir des hauteurs de précipitations annuelles aux différents postes

pluviométriques internes et externes du bassin versant (comme pour le cas de la formule de Mac Math on a traité le cas d'un seul poste pluviométrique);

- L = Longueur du talweg principal en km ;
- K = coefficient variant de 0.5 à 6 (Il a été décreté de la prendre égale à 2 au Maroc depuis les inondations de 1996.) ;
- a = coefficient variant de 20 à 30.

Au Maroc les valeurs habituellement utilisées sont **K=2 et a=20**.

La méthode est d'une utilisation difficile à cause de l'incertitude qui pèse sur l'estimation de ces coefficients K et a. Elle peut donner des résultats assez contrastés s'ils ne sont pas fixés avec une bonne connaissance de la nature du bassin (les caractéristiques topographiques, climatologiques et géologiques du bassin).

5. Remarque sur les méthodes empirique :

Les formules empiriques sont nombreuses et il faut être conscient de la fragilité et l'étroitesse du champ d'application de chacune d'elles. Ne perdons pas de vue que ces relations sont basées sur l'analyse de données recueillies dans des bassins aux conditions climatologiques et topographiques particulières, et qu'on ne peut sans vérification les extrapoler à d'autres bassins ayant des conditions différentes de celles pour lesquelles elles ont été établies. Les dangers d'une extrapolation inconsidérée de ces formules sont certains. Il suffit pour s'en convaincre de comparer les débits de crue obtenus par l'application de ces différentes formules pour une même valeur des paramètres pris en compte.

Par conséquent, il faut les utiliser avec beaucoup de réserve.

Une des façons d'optimiser l'utilisation des telles formules est de les confronter aux données de la station hydrologique du bassin limitrophe ou du bassin similaire le plus proche, de façon à concerner au mieux le choix des paramètres. Les résultats des études de crues doivent être aussi confrontées aux données recueillies sur le terrain de l'étude. Et ce menant des enquêtes de crues auprès des riverains. Toutefois il faut toujours se rappeler que (Pr. N. Serhir - EHTP Cours hydrologie opérationnelle) : « ***Une mauvaise mesure vaut mieux qu'un long calcul*** »

(Pr. N. Serhir - EHTP Cours hydrologie opérationnelle)

IV. Les méthodes analogiques :

Elles se basent sur la comparaison avec des bassins versants régionaux sur lesquels existent des données hydrologiques Ces méthodes consistent à extrapoler le débit de projet au site non jaugé à partir des données de débit max observées dans un bassin jaugé qui lui est hydrologiquement comparable.

On se base dans cette comparaison sur les paramètres qui définissent géométriquement et morphologiquement le bassin : forme, pentes et indices de pente, paramètres du rectangle équivalent, caractéristiques du relief, densité de drainage et rapport de confluence ainsi que des paramètres climatiques, géologiques et pédologiques renseignant sur les types de précipitations, les perméabilités des sols, la nature de végétation. Toutes ces informations sont capables d'aider l'ingénieur à comprendre le comportement hydrologique du bassin et par conséquent son régime d'écoulement.

Les méthodes les plus utilisées au Maroc sont la méthode des débits spécifiques et la méthode régionale de Francou-Rodier.

1. La méthode des débits spécifiques :

La méthode des débits spécifiques consiste à évaluer le débit $Q_{max2}(T)$ recherché à partir de $Q_{max1}(T)$ en tenant compte uniquement de l'influence respective des surfaces des bassins versants. Cela revient donc à négliger les autres facteurs qui contribuent au comportement hydrologique de chacun des bassins : nature sol et végétation, topographie,

Elle suppose que si ces facteurs sont identiques pour les deux bassins, alors les débits spécifiques pour une même période de retour seront identiques. Ce qui permet d'écrire :

$$Q_{max2}(T) = \frac{S_2}{S_1} Q_{max1}(T)$$

- $Q_{max2}(T)$: le débit de crue de projet d'une période de retour T en m^3/s ;
- S_2 : la surface du bassin B_2 en Km^2 ;
- $Q_{max1}(T)$: le débit de crue de projet d'une période de retour T déterminé par ajustement statistique en m^3/s . ;
- S_1 : la surface du bassin B_1 en Km^2 ;

2. La méthode de Francou-Rodier :

La formule permet l'estimation des débits de crue de projet pour un bassin non jaugé par analogie avec d'autres bassins versants régionaux similaires et limitrophes. Les critères de similitude sont essentiellement la morphologie (particulièrement relief, forme, pentes) et le régime pluviométrique.

Le débit de crue de projet pour une période de retour T, $Q_{max1}(T)$ d'un bassin B1 non jaugé est calculé par transposition d'un autre bassin B2 semblable à l'aide de la formule suivante :

$$Q_{max} (T) = Q_{max1}(T) \times \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{1-0.1K}$$

Avec :

- $Q_{max2}(T)$: le débit de crue de projet d'une période de retour T en m³/s au bassin non jaugé ;
- S_2 : la surface du bassin B2 en Km² ;
- $Q_{max1}(T)$ le débit de crue de projet d'une période de retour T déterminé par ajustement statistique en m³/s.
- S_1 : la surface du bassin B1 en Km² ;

Le débit de projet est estimé dans ce cas pour la même période de retour utilisée pour le bassin de référence. Le paramètre K peut être estimé pour le bassin jaugé par la formule suivante (Méthodes de calcul d'un débit de projet, SERHIR) :

$$K = 10 \times \left(1 - \frac{\ln \frac{Q_{max2}}{10^6}}{\ln \frac{S_2}{10^8}} \right)$$

V. Méthodes hydrométéorologiques :

Les méthodes de Gradex et rationnelle sont parmi les méthodes d'estimation des crues les plus utilisées au Maroc. Elles sont utilisées pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques. Ces méthodes reposent sur des paramètres régionaux calculés à partir de l'information apportée par la pluie.

Avant de se lancer dans le calcul des débits de crue par les différentes formules, il faut tout d'abord déterminer le temps de concentration puisqu'il s'agit d'un paramètre indispensable pour le calcul des débits.

1. Temps de concentration :

On définit le temps de concentration, t_c , comme le temps au bout duquel la particule d'eau tombée dans la zone la plus éloignée de l'exutoire va atteindre celui-ci.

Le temps de concentration est une caractéristique du bassin qui dépend essentiellement de la superficie du bassin, des pentes, de la longueur et de densité du réseau hydrographique.

La littérature propose plusieurs formules empiriques pour le calcul du temps de concentration. Certaines sont plus répandues au Maroc on citera :

a. Formule Espagnole :

$$t_c = 0.3 \times \left(\frac{L}{I^{0.25}} \right)^{0.77}$$

- L : la longueur du cours d'eau principal en km ;
- I : la pente moyenne du cours d'eau principal en m/m.

b. Formule de Van Te Chow:

$$t_c = 0.123 \times (L \times I^{-0.5})^{0.64}$$

- L : la longueur du cours d'eau principal en km ;
- I : la pente moyenne du cours d'eau principal en m/m.

c. Formule Californienne :

$$t_c = 0.1452 \times \left(\frac{L}{I^{0.5}} \right)^{0.77}$$

- L : la longueur du cours d'eau principal en km ;
- I : la pente moyenne du cours d'eau principal en m/m.

d. Formule US Corps :

$$t_c = 0.278 \times (L \times I^{-0.25})^{0.77}$$

- L : la longueur du cours d'eau principal en km ;
- I : la pente moyenne du cours d'eau principal en m/m.

e. Formule de Turrazza et Passini :

$$t_c = \frac{0.108}{\sqrt{I}} \sqrt[3]{SL}$$

- L : la longueur du cours d'eau principal en km ;
- I : la pente moyenne du cours d'eau principal en m/m.
- S : la surface du bassin en Km².

f. Formule de Kiripich :

$$t_c = 0.945 \times \frac{L^{1.155}}{D^{0.385}}$$

- L : la longueur du cours d'eau principal en Km ;
- D : la différence d'altitude entre les extrémités du cours d'eau principal en m.

g. Formule de Giondotti :

$$t_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{h}}$$

- S : la surface du bassin en Km² ;
- L : la longueur du cours d'eau principal en Km ;
- h : la différence entre altitude moyenne du bassin et celle de l'exutoire en m.

h. Formule de Ventura :

$$t_c = 0.1272 \sqrt{\frac{S}{I}}$$

- I : la pente moyenne du cours d'eau principal en m/m ;
- S : la surface du bassin en Km².

i. Valeurs à retenir :

Le tableau suivant donne le domaine de validité des formules précédentes en termes de surface et de pente :

Formule	Surface	Pente
Kirpitch	0,004 Km ² ≤ S ≤ 0,81 Km ²	0,03 ≤ I ≤ 0,1
Ven Te Chow	0,01 Km ² ≤ S ≤ 18,5 Km ²	0,0051 ≤ I ≤ 0,09
Passini	Petite	
Ventura	1 Km ² ≤ S ≤ 20 Km ²	Faible
Californienne	Petite	Forte
US Corps	S ≤ 12000 Km ²	
Espagnole		
Giandotti	170 Km ² ≤ S ≤ 70 000 Km ²	

Remarque : lorsque le temps de concentration est calculé, les résultats des différentes méthodes sont affichés dans l'application, avec une recommandation des méthodes les plus adaptées au bassin. L'utilisateur doit choisir les méthodes qui lui semblent appropriées.

2. Méthode de Gradex :

La méthode du GRADEX est une approche hydro pluviométrique probabiliste du calcul des débits de crues extrêmes de période de retour supérieure à cent ans. La méthode se base sur l'information apportée par la loi de probabilité de la pluie spatiale pour les valeurs fortes. En effet, on suppose que la loi de distribution de la rétention du bassin ne change pas pour les pluies intenses, d'où on déduit le comportement asymptotique des volumes des crues extrêmes à partir de la distribution de la pluie moyenne maximale annuelle (pour un pas de temps adéquat). La distribution des débits instantanés maxima est déduite des volumes, par un coefficient de forme moyenne des hydrogrammes de ruissellement direct, rapport moyen de la pointe d'une crue par le volume moyen sur le pas temps considéré. La méthode s'applique à des bassins de quelques dizaines à plusieurs milliers de kilomètres carrés, qui sont homogènes pluviométriquement (la méthode ne s'applique

pas à des bassins trop grands, où le comportement asymptotique de la pluie spatiale tend à devenir normal).

a. Hypothèses de la méthode du GRADEX :

- La distribution des pluies de quelques heures à plusieurs jours ponctuelles ou spatiales sur un bassin versant est à décroissance exponentielle (loi de Gumbel, Somme de deux exponentielles, ...).
- La distribution de la rétention ne change pas pour les pluies intenses (valable à partir d'une certaine période de retour), c'est à dire l'espérance de la rétention reste constante, d'où le comportement asymptotique des volumes moyens de crues extrêmes aura le même comportement asymptotique que les pluies spatiales maximales annuelles.

b. Démarche :

L'application de la méthode nécessite la disponibilité des séries de mesure de pluie max jour assez longues homogènes, et indépendantes, aux différents postes pluviométriques régionaux (on a traité le cas d'un seul poste pluviométrique). Le temps de concentration du bassin et la surface du bassin doivent être calculés avec précision.

1. Préparer la série des pluies max jour annuelles et vérifier l'homogénéité et l'indépendance ;
2. Ajuster la série à la loi Gumbel puis relever le Gradex des pluies de durée 24h. C'est le $Gp(24h)$ qui est la pente de la droite de Gumbel représentant la série des pluies max jour annuelles sur du papier Gumbel ;
3. Calculer le Gradex moyen de pluie du bassin versant $Gp(24h)$ par pondération des valeurs des Gradex des pluies de durée 24h des stations internes et avoisinantes $Gp_{poste}(24h)$ (par la méthode des polygones de Thiessen,...) (ces pour le cas de plusieurs stations pluviométriques) ;
4. Calculer le débit de saturation $Q(T_s = 10 \text{ ans})$ par la méthode statistique en cas de disponibilité d'une série de données de débit ou par la méthode rationnelle ou par formule empirique dans le cas échéant. La période de retour T_s de saturation dépend de la connaissance disponible sur la perméabilité du bassin (la période de retour de 10ans est recommandée)

(Le débit de saturation $Q(T_s= 10\text{ans})$ est Calculé par la méthode statistique en cas de disponibilité d'une série de données de débit ou par la méthode rationnelle ou par formule empirique);

5. Calculer le temps de concentration t_c et disposer de la surface du bassin versant ;
6. Calculer le Gradex de pluie de durée t_c à partir de $G_p(24h)$ par la formule régionale :

$$G_p(t_c) = G_p(24h) \times \left(\frac{t_c}{24}\right)^{0.3}$$

7. Le Gradex de débit sur une durée égale à t_c représente la variation de l'écoulement obtenue à partir d'une variation de pluie de même durée au cours d'un écoulement intégral, au-delà des conditions de saturation du bassin. Le Gradex de pluie de durée égale à t_c $G_p(t_c)$ est alors converti en un Gradex de débit de durée correspondante $G_d(t_c)$ en se basant sur la surface du bassin versant par la formule:

$$G_d(t_c) = G_p(t_c) \times \frac{S}{3.6 \times t_c}$$

8. Calculer le débit max moyen $Q_{max}(T)$ en m³/s pour une période de retour dépassant 100ans en extrapolant la fonction de répartition débit au-delà de la période de retour T_s par une droite de pente égale au Gradex de pluie convertie en débit :

$$Q_{max}(T) = G_d(t_c) \times (y(T) - y(T_s)) + Q(T_s)$$

$y(T)$ étant la variable réduite de Gumbel définie par :

$$y(T) = -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right)$$

9. Pour une plus grande sécurité dans le calcul, transformer le débit max moyen en un débit de pointe en multipliant par le coefficient de pointe moyen qui joue le rôle d'un coefficient de sécurité. Il peut être calculé sur la base des crues exceptionnelles observées dans la région (si disponibles), par la moyenne des rapports entre les pointes de ces crues avec le débit de crue de projet de période de retour T calculé par la méthode Gradex :

$$Q_{pointe}(T) = R_p \times Q_{max}(T)$$

R_p : Coefficient de pointe moyen.

3. Méthode rationnelle :

Cette méthode est bien adaptée aux petits bassins dont la superficie n'excède pas 150 km. La méthode rationnelle est basée sur l'hypothèse qu'une pluie constante et uniforme sur l'ensemble d'un bassin versant produit un débit maximal lorsque toutes les surfaces contribuent à l'écoulement, c'est-à-dire pour une durée égale au temps de concentration. Elle est fondée sur la proportionnalité et la linéarité de la transformation pluie-débit, exprimées par la relation suivante:

$$Q_{max} = \frac{C \times I(t_c, T) \times S}{3.6}$$

$$I(t_c, T) = \frac{P(t_c, T)}{t_c}$$

$$P(t_c, T) = P(24h, T) \times \left(\frac{t_c}{24h}\right)^{0.3}$$

- Qmax : Le débit max de la crue de projet calculé m3/s pour la période de retour T ;
- tc : Le temps de concentration en heures ;
- T : La période de retour en ans ;
- I(tc,T) : Intensité de la pluie moyenne maximale tombée au cours du temps de concentration ;
- C : Le coefficient d'écoulement moyen (interannuel ou à défaut annuel) ;
- S : La surface du BV en Km2.

Remarque :

Dans la plateforme on a travaillé par le Coefficient de ruissèlement.

Pour calculer le coefficient moyen d'écoulement on peut calculer sir la base de données de débits moyen annuels et de pluies moyennes annuelles observés à l'échelle de la région dans un autre bassin ou sinon estimer un coefficient de ruissellement sur la base d'une bonne connaissance des pentes, nature du sol et végétation du bassin étudié.

Chapitre 2 : Développement informatique pour vérification des débits de crues et guide d'utilisation

Il existe plusieurs méthodes utilisées pour l'estimation du débit du projet, qui est nécessaire pour dimensionner les ouvrages hydrauliques : barrages, ponts, dalots et buses, réseaux d'assainissement...

Dans ce chapitre on va présenter une application codée avec le langage VBA qui va automatiser les formules et les méthodes détaillées dans les chapitres précédents.

Cette application va aider l'utilisateur à faire les calculs hydrologiques pour déterminer le débit maximal en fonction des périodes de retour ; en saisissant juste les caractéristiques du bassin et les séries des pluies journalières maximales et les débits maximaux des années précédentes (Si elles sont disponibles). Après, cette plateforme va servir au pré dimensionnement des petits ouvrages hydrauliques POH (notamment les dalots et les buses).

I. Le langage VBA :

1. Définition :

La définition de **VBA** est **Visual Basic pour Applications**. Il s'agit d'un langage de programmation avec lequel vous pouvez contrôler et manipuler à la fois Excel et les autres applications Office : Word, Access, Outlook...

Ce langage simple permet de créer des programmes informatiques plus ou moins complexes afin d'automatiser des actions répétitives ou d'effectuer un nombre important d'opérations lors de l'exécution d'une seule commande.

Sous leur forme la plus accessible, ces petits programmes sont appelés « **macros** » , ou encore « **macro-commande** ». Il s'agit de suites d'instructions mémorisées par l'enregistreur VBA ou programmées par l'utilisateur. Ces instructions peuvent par la suite s'exécuter à l'aide d'une commande unique, par l'intermédiaire du clavier ou de la souris.

2. Pourquoi le VBA ?

Le langage VBA a plusieurs avantages, il permet de :

- D'automatiser des tâches répétitives et fastidieuses (sans aucunes valeurs ajoutées pour le collaborateur).
- De gérer et réduire les risques d'erreurs.
- D'optimiser les temps de traitements.
- De concevoir des interfaces utilisateurs personnalisées.
- D'échanger des données entre les différentes applications de la suite Office.
- De réduire le temps de traitements d'un calcul ou d'une opération digitale qui prends en charge plusieurs paramètres et variables.
- De piloter un très grand nombre de données et de restituer l'information de manière juste et quasi instantanée

II. Guide d'utilisation :

Notre plateforme ne peut pas remplacer le travail de l'ingénieur. Une analyse des données et une bonne maîtrise des concepts d'hydrologie reste cruciale pour qu'elle sera utile. Voici une présentation des différentes pages et comment peut-on les utiliser.

1. Ajustement des débits :

Ce bloc permet d'effectuer l'ajustement statistique des données de débit, pour un seul poste, par les lois : Normale, Gumbel, Galton, Frechet et Pearson type III.

Il permet aussi de calculer la moyenne des débits journaliers maximaux ; qui sera utile pour la méthode de Fuller.

L'utilisateur insère la série des débits journaliers maximaux, puis il clique sur le bouton « Ajustements débits ».

Les ajustements statistiques se font automatiquement et le programme affiche les débits maximaux pour les différentes périodes de retour pour les différentes méthodes.

Pour les graphes on peut les avoir aussi dans le page « Grahpe ».

Années	Qjmax en m ³ /s	Période de retour T						
		Loi	5	10	20	50	100	1000
		Loi normale						
		Loi Gumble						
		Loi Galton						
		Loi frechet						
		Loi Pearson III						
		Qmax(T)						

Ajustement Débits

Moyenne des débits: (pour la formule de Fuller)

.

Figure 24: Ajustement statistique des débits

2. Validation :

Cette feuille permet de voir si les lois choisies valident l'hypothèse de validité au seuil de 5% pour le test khi2. Les résultats s'affichent automatiquement après avoir Cliquer sur « Ajustement Q » dans la page d'ajustement de débits.

Loi de probabilité	Test khi-deux
Loi Normale	
Loi Gumbel	
Loi Galton	
Loi Frechet	
Loi Pearson	

Figure 25: test kхи-deux dans la page Validation

3. Graph des fréquences observées et des fréquences théoriques:

Ce bloc contient un graphe représentant les valeurs des quantiles observées et les valeurs théoriques calculées par les différentes lois de probabilités, en fonction des périodes de retour.

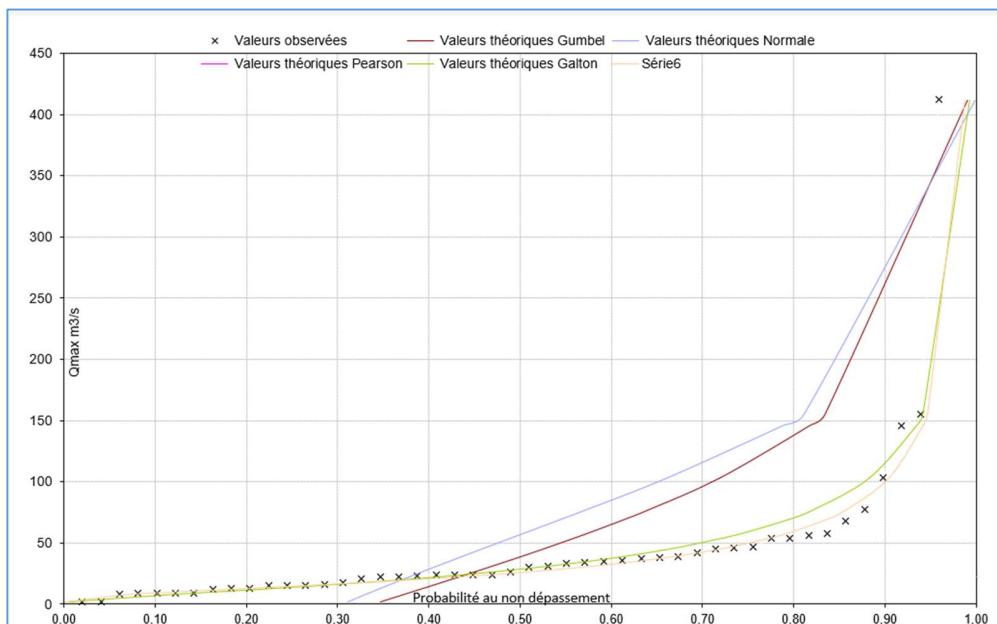


Figure 26: Graphe des valeurs observées et théoriques de débits des différentes lois

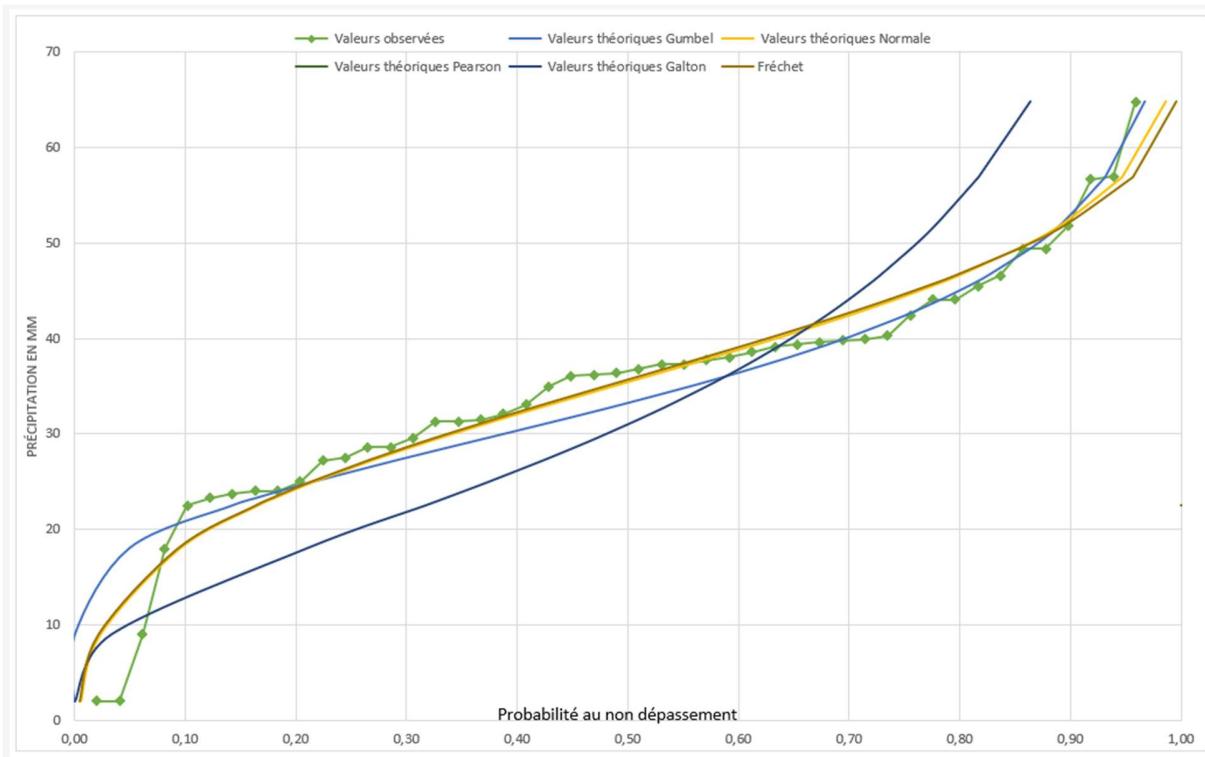


Figure 31 : Graphe des valeurs observées et théoriques de précipitations des différentes lois

Ces graphes s'affichent automatiquement après avoir Cliquer sur « Ajustement Q » ou « Ajustement P » dans la page d'ajustement de débits ou Ajustement des pluies.

4. Ajustement des pluies :

Comme la feuille des ajustements des débits elle permet de faire les ajustements statistiques des pluies journalières maximales insérer par l'utilisateur.

Les résultats des calculs sont les pluies maximales journalières pour les différentes périodes de retour, le Gradex de 24h du poste.

Ces résultats seront utiles pour le calcul du débit par les méthodes : Mac-Math, Gradex et la méthode rationnelle.

Figure 27: Ajustement des pluies et calcul du Gp

5. Les méthodes empiriques :

Cette feuille permet de faire le calcul du débit maximal par différentes méthodes empiriques : Fuller, Hazan, Mac-Math et Mallet Gauthier.

Pour réduire le temps des calculs, on a choisi de séparer les calculs méthode par méthode ; chacune son bouton (cela dépend de la ou les méthodes choisies par l'utilisateur).

a. Formule de fuller :

i. Paramètres nécessaires :

- Surface du bassin ;
 - Paramètres régionaux ;
 - La série des débits maxima pour les années de mesures disponibles.

ii. Etapes :

1. Saisir la série des débits maxima disponiblles dans la feuille nommées « ajustement Q ».
 2. Sélectionner la région (oued rifain, oued saharien ou oued du nord)

3. Saisir la surface du bassin en Km² et choisir la région dans la feuille « Méthodes empiriques ».
4. Cliquer sur le bouton « Fuller » pour avoir Q_{max} pour chaque période de retour.

b. Formule d'Hazan et Lazarevic :

i. Paramètres nécessaires :

- Surface du bassin ;

ii. Etapes : feuille “Méthodes empiriques”

1. Saisir la surface du BV et la zone géographique ;
2. Cliquer « Hazan-Lazarevic ».

c. Formule de Mac-Math :

i. Paramètres nécessaires :

- La surface du BV ;
- La pente moyenne ;
- Plus de 10ans de précipitations max de 24h.

ii. Etapes :

1. Coller la série des pluies max dans la feuille « Ajustement P » ;
2. Cliquer sur le bouton « Ajustement Pluies » ;
3. Saisir la surface et choisir le couvert végétal et la topographie dans la feuille « Méthodes empiriques » ;
4. Cliquer « Mac-Math » pour avoir les débits max pour chaque période de retour.

d. Formule de Mallet-Gauthier :

i. Paramètres nécessaires :

- Module pluviométrique pour les années de mesure disponibles ;
- Surface du BV ;
- Longueur du Talweg principal.

ii. Etapes :

1. Saisir surface du BV, longueur du Talweg et le module pluvio dans la feuille « méthodes empiriques ».

2. Puis, appuyer sur « Mallet-Gauthier ».

Région	Oueds Rifains	Fuller	T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Surface du bassin			Qmax(m ³ /s)						
Zone Géographique	Moyen Atlas (Pluviométr	Hazen	T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Couvert végétal et topog	Terrain non aménagé, n	Mac-Math	Qmax(m ³ /s)						
Pente		MalletGauthier	T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Talweg			Qmax(m ³ /s)						

Figure 28: Calcul des débits avec les formules empiriques

6. Temps de concentration :

Dans cette feuille on effectue le calcul de temps de concentration par différentes méthodes : Espagnoles, Van Te Chow, Californienne, US Corps, Turraza , Kirpitch, Giandotti et Ventura.

Cette étape est nécessaire pour le calcul par les méthodes hydrométéorologiques.

e. Paramètres nécessaires :

- Surface du bassin Km² ;
- La pente moyenne du cours d'eau m/m ;
- Longueur du Talweg principal Km ;
- Différence entre l'altitude moyenne du bassin et celle de l'exutoire (m).

f. Etapes :

1. Remplir le tableau des données dans la feuille « Temps de concentration ».
2. Cliquer le bouton pour calculer le temps de concentration par différentes formules.

Surface (Km²)	Pente (m/m)	Falweg (Km)	Hmoy-Hmin(m)	Espagnole	Van Te Chow	californien	US Corps	Turazza	Kirpitch	Giandotti	Ventura
321	0,1	33,21	3077								
<hr/>											
Formule	Surface	Pente	Calculer Tc								
Kirpitch	0,004 Km ² ≤ S ≤ 0,81 Km ²	0,03 ≤ I ≤ 0,1									
Van Te Chow	0,01 Km ² ≤ S ≤ 18,5 Km ²	0,0051 ≤ I ≤ 0,09									
Passini Turazza	Petite										
Ventura	1 Km ² ≤ S ≤ 20 Km ²	Faible									
Californienne	Petite	Forte									
US Corps	S ≤ 12000 Km ²										
Espagnole											
Giandotti	170 Km ² ≤ S ≤ 70 000 Km ²										

Figure 29: Calcul du temps de concentration

7. Méthodes hydrométéorologiques :

Ce bloc permet de faire le calcul par la méthode de GRADEX et la méthode rationnelle.

i. Paramètres nécessaires pour appliquer la méthode :

- La série des valeurs des pluies maximales journalières annuelles du bassin concerné (normalement il est possible d'avoir plusieurs stations au sein du même bassin, on assume qu'il y en a qu'une seule).
- Le temps de concentration.
- La surface du BV.

ii. Etapes :

1. Entrer la série des valeurs Pjmax dans la feuille « Ajustement P ».
2. Puis « Ajuster pluies » pour avoir valeur du Gp(24h).
3. Calculer le Tc à l'aide de la feuille « temps de concentration ».
4. Saisir Gp(24h), Tc et surface du BV dans la feuille « Méthodes hydro ».
5. Appliquer la méthode « Gradex ».

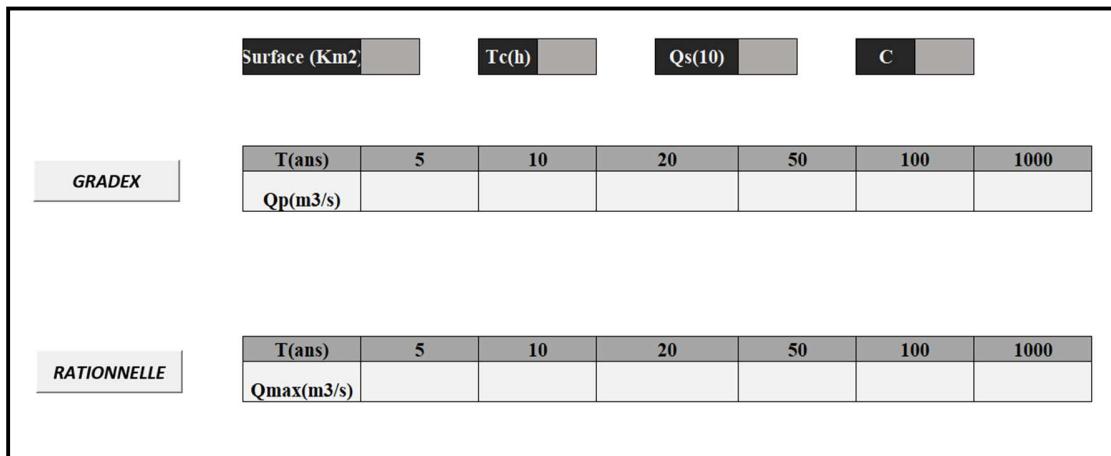


Figure 30: Calcul des débits avec les méthodes hydrométéorologiques

Avant d'effectuer ce calcul, il faut d'abord faire utiliser la feuille « ajustements des pluies » pour calculer les pluies maximales journalières pour les différentes périodes de retour (pour la méthode rationnelle), le Gradex de 24h puis saisir les données nécessaires dans les cases vides :

- Surface du bassin.
- Coefficient d'écoulement ou de ruissement.
- Temps de concentration (à partir du bloc précédent).
- Le débit de saturation $Q(T_s = 10 \text{ ans})$: Calculer par la méthode statistique en cas de disponibilité d'une série de données de débit ou par la méthode rationnelle ou par formule empirique.

8. Méthodes analogiques :

Dans le cas de deux bassins hydrologiquement comparables et si l'on dispose des débits maximums dans l'un de ces bassins, l'ajustement statistique est appliqué à ces données de débits (dans le bloc « ajustements des débits »), ensuite, le débit maximal journalier pour chaque période de retour est transféré au bloc présenté ci-dessous et qui permet d'estimer le débit de crue dans le second bassin, pour les différentes périodes de retour, par les deux méthodes de débits spécifiques et Francou Rodier.

i. **Paramètres nécessaires :**

- Surface du bassin jaugé et du bassin non jaugé ;
- La série des débits maxima du bassin jaugé pour les années de mesure disponibles.

ii. **Etapes :**

1. Saisir la série des débits du bassin jaugé dans la feuille « Ajustement Q ».
2. Ajuster les débits « Ajustement débits ».
3. Saisir les résultats des débits en fonction du T de la feuille « Ajustement Q ».
4. Transposer.

Surface B1:		Surface B2:				
Bassin 1						
T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Qp(m ³ /s)						
<i>Transposer</i>						
Bassin 2						
T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Débits spécifiques						
Francou Rodier						

Figure 31: Calcul des débits avec les méthodes analogiques

Chapitre 3 : Exemple traité par l'application élaboré

I. Généralités :

Dans cette partie, nous voulons montrer que l'application élaborée est fonctionnelle. on propose d'étudier le cas du bassin de l'Oued Rheraya et en se basant sur les mesures fournies par la station pluviométrique et la station de mesure de débits Tahanaout.

Pour vérifier l'ajustement statistique, nous allons comparer les prévisions calculées par notre application avec les prévision calculées par le logiciel HyfranPlus.

On dispose les séries des débits journaliers maximums annuels et des pluies journalières maximales de la station hydrologique Tahanouat : voir annexe

Table 24 : Station hydrométrique Tahanouat

Station	Oued	N°IRE	X	Y	Période disponible
Tahanouat	Rérhaya	1565/53	255.900	80.400	1962-2010

Caractéristiques du bassin :

Table 25: Caractéristiques du bassin de l'oued Rhéraya

BV	Surface (Km ²)	Longueur (Km)	Hmax (m)	Hmin (m)	Périmètre (km)	DH (m)	Pente (m/m)	Altitude moyenne (m)
Rhéraya	321	33.21	4118	1041	108.9	3077	0.1	2020

1. Ajustement des débits :

La fréquence empirique est calculée par la méthode de Hazen :

$$F_j = \frac{j - 0.5}{N}$$

a. Comparaison des résultats :

Loi normale :

Table 26: Comparaison des débits ajustés par l'application et HyfranPlus ;Loi normale

T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Application	149.01	197.46	237.11	282.25	313.1	396.78
HyfranPlus	151	199	240	285	316	401

Loi Gumbel :

On a N=50 donc $y_N = 0.5485$ et $\sigma_N = 1.1607$

Table 27: Comparaison des débits ajustés par l'application et HyfranPlus ;Loi Gumbel

T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Application	135.78	200.24	262.07	342.1	402.07	600.24
HyfranPlus	137	202	264	345	406	606

La différence entre les résultats est expliquée par le fait que HyfranPlus utilise les formules

$1/a=0.78*\sigma$ et $x0=m-(0.577/a)$ quel que soit la valeur de N.

Loi Galton (lognormale à deux paramètres) :

Table 28: Comparaison des débits ajustés par l'application et HyfranPlus ; Loi Galton 2p

T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Application	70.35	112.4	164.93	255.23	343.9	772.57
HyfranPlus	70.7	113	168	260	349	794

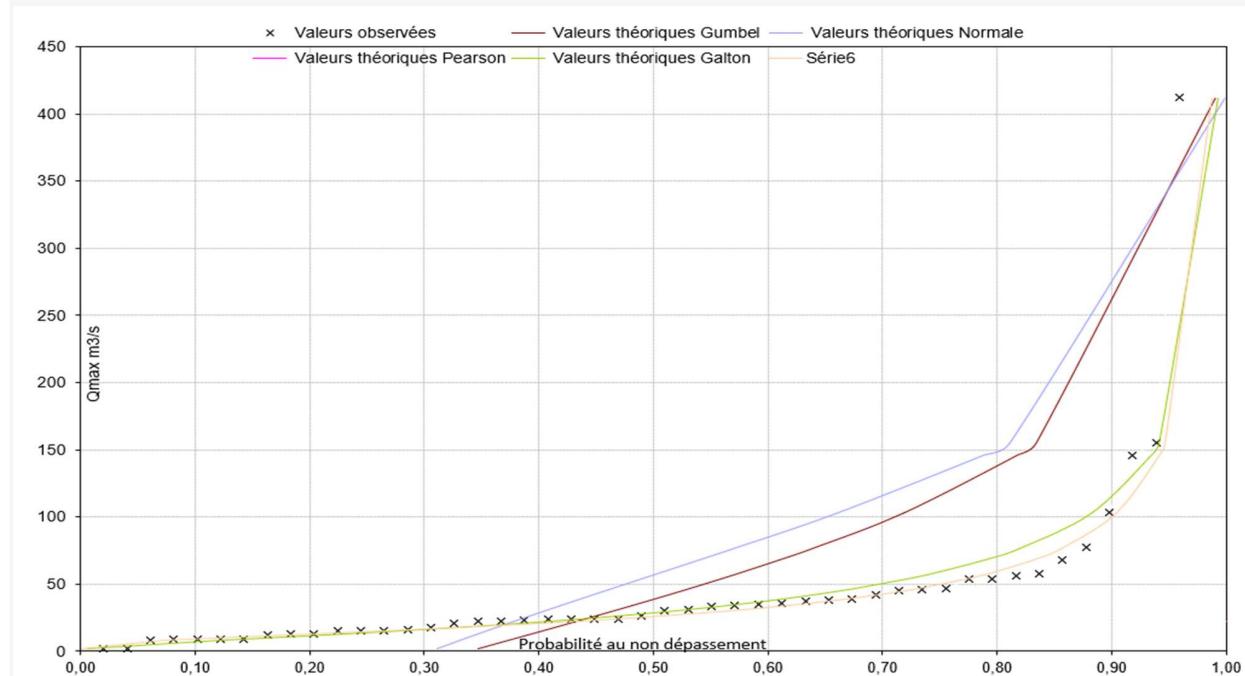
b. Les graphs fournis :

Figure 32: Graphe des résultats de l'ajustement de débits fourni par l'application

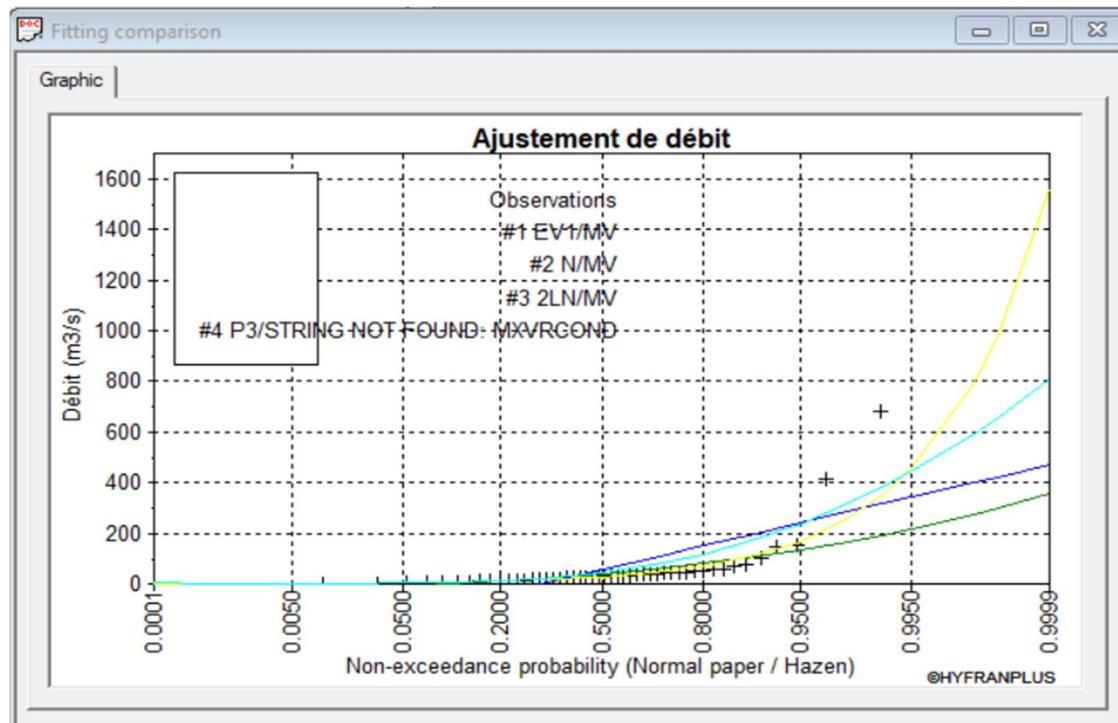


Figure 33: Graphe des résultats de l'ajustement de débits fourni par HyfranPlus

c. Test Khi deux :

Loi de probabilité	Test khi-deux
Loi Normale	on rejette l'hypothèse de validité au seuil 5%
Loi Gumbel	on rejette l'hypothèse de validité au seuil 5%
Loi Galton	on accepte l'hypothèse de validité au seuil 5%
Loi Frechet	on accepte l'hypothèse de validité au seuil 5%
Loi Pearson	on rejette l'hypothèse de validité au seuil 5%

Figure 34: résultat du critère de khi-deux pour les différents loi fournis par l'application

Pour les résultats du test Khi-deux par hyfran+ ils sont les mêmes.

On va donc choisir la loi de Galton (lognormale à deux paramètres) d'après le graffe et les résultats du test khi-2.

2. Ajustement des pluies :

La fréquence empirique est calculée par la méthode de Hazen.

$$F_j = \frac{j - 0.5}{N}$$

a. Comparaison des résultats :

iii. Loi normale :

Table 29: Comparaison des pluies ajustés par l'application et HyfranPlus ;Loi normale

T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Application	46.53	52.34	57.08	62.49	66.18	76.2
HyfranPlus	47.4	52.1	55.9	60.2	63.1	71.1

iv. Loi Gumbel :

On a N=50 donc $y_N = 0.5485$ et $\sigma_N = 1.1607$

Table 30: Comparaison des pluies ajustés par l'application et HyfranPlus ;Loi Gumbel

T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Application	44.95	53.67	60.07	69.64	76.83	100.56
HyfranPlus	46.2	52.3	58.2	65.8	71.6	90.5

La différence entre les résultats est expliquée par le fait que HyfranPlus utilise les formules

$1/a=0.78 * \sigma$ et $x_0=m-(0.577/a)$ quel que soit la valeur de N.

v. Loi Galton à 2 paramètres :

Table 31: Comparaison des pluies ajustés par l'application et HyfranPlus ;Loi Galton(Log normale à 2 paramètres)

T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Application	46.58	52.34	57.57	64.18	69.12	84.52
HyfranPlus	46.6	52.4	57.7	64.3	69.1	84.5

vi. Loi Pearson type 3 :

Table 32: Comparaison des pluies ajustés par l'application et HyfranPlus ;Loi Pearson 3

T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Application	46.72	52.59	57.87	64.44	69.27	83.89
HyfranPlus	46.8	52.7	58.0	64.5	69.1	83.6

vii. Les graphs fournis :

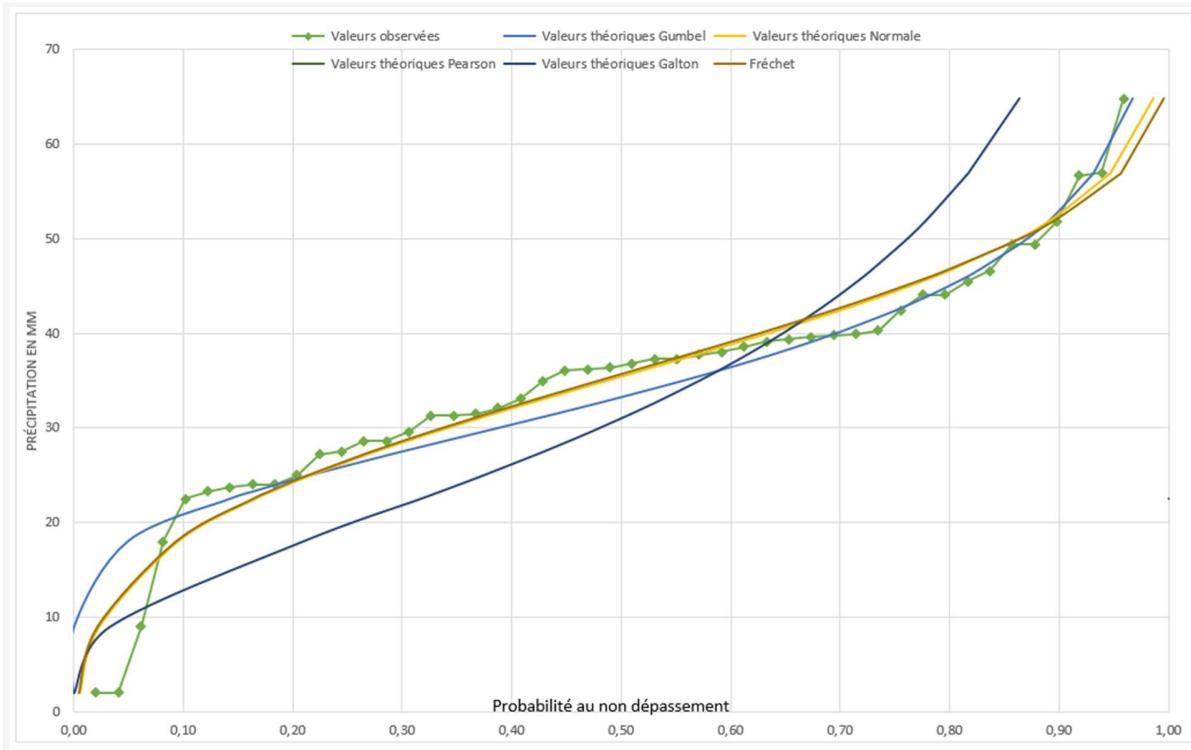


Figure 35: Graphe des résultats de l'ajustement de pluie fourni par l'application

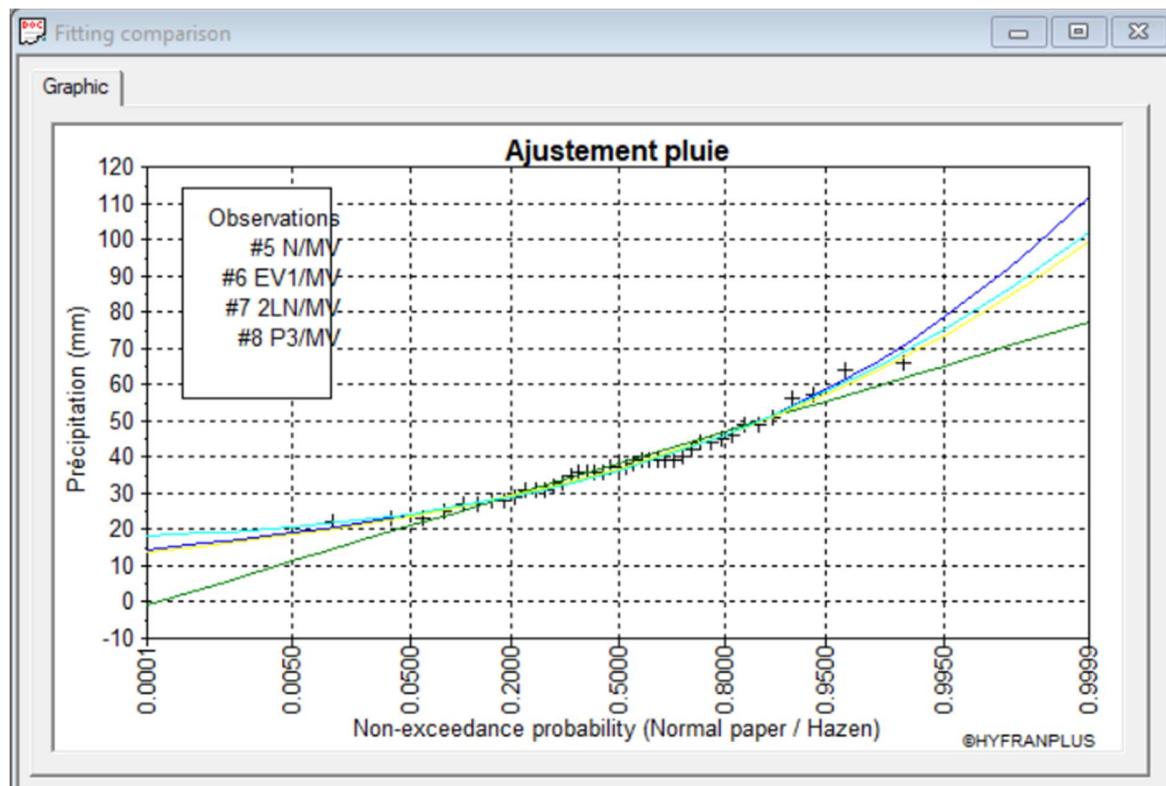


Figure 36: Graph des résultats de l'ajustement de pluies fourni par HyfranPlus

b. Verification khi-deux :

Loi de probabilité	Test khi-deux
Loi Normale	on accepte l'hypothèse de validité au seuil 5%
Loi Gumbel	on accepte l'hypothèse de validité au seuil 5%
Loi Galton	on accepte l'hypothèse de validité au seuil 5%
Loi Frechet	on accepte l'hypothèse de validité au seuil 5%
Loi Pearson	on accepte l'hypothèse de validité au seuil 5%

Figure 37: résultats de test khi-deux pour différentes lois fournis par l'application

Ils sont les mêmes résultats pour Hyfranplus.

3. Temps de concentration :

Table 33 : Comparaison des temps de concentration calculés manuellement et par l'application

Méthode	Espagnole	Van Te Chow	Californienne	US Corps	Turazza	Kirpich	Giandotti	Ventura
Application	6,9342307	2,418339	5,22809	6,425	7,51648	3,81106	4,853182	7,206752
Manuel	6.9	2.42	5.23	6.42	7.52	3.82	2.74	7.21

Pour la valeur à retenir on peut utiliser la moyenne des méthodes valides : qui sont d'après le tableau au-dessus : US Corps, Espagnole et Giandotti donc $t_c=5.45$

4. Méthodes empiriques :

Région : Oued rifain

Donc pour méthode de fuller : $a=1$ (on a pris la moyenne entre 0.8 et 1.2 puisque on n'a pas de données supplémentaires sur le bassin)

Zone géographique : Haut Atlas

Donc pour la méthode de Hazan et lazarevic $Q(1000)=9.38 * S^{0.742}$.

Couvert végétal et topographie : Couvert végétal faible et dispersé avec pente forte

Puisque la pente moyenne du bassin est forte on a pris $K=0.42$ pour la méthode Mac-math.

Module pluviométrique : 378 mm/an ;

Surface du bassin : 321 Km²

Longueur du Talweg : 33.21 Km

Pente du bassin versant : 0.1 m/m

Pente moyenne d'écoulement : 0.072 m/m (pente forte)

a. Fuller :*Table 34:Comparaison des débits calculés manuellement et par l'application ;Fuller*

T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Application	104.412	124.924	145.137	172.55	193.06	261.206
Manuel	104.399	124.908	145.418	172.532	193.04	261.173

b. Hazan Lazarevic:*Table 35:Comparaison des débits calculés manuellement et par l'application ;Hazan Lazrevic*

T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Application	---	---	---	---	---	697.249
Manuel	---	---	---	---	---	697.249

Pour les petits ouvrages hydrauliques on ne peut pas dimensionner en utilisant T=1000ans, souvent la période de retour est 25ans à 50ans pour ce fait comme on a vu au-dessus on peut utiliser la formule :

$$Q_{max}(T) = \frac{Q(1000) \times (1 + 0.8 \cdot \log(T))}{1 + 0.8 \cdot \log(1000)}$$

Application numérique :

$$Q_{max}(25) = 434.41 \text{m}^3/\text{s} \quad Q_{max}(50) = 483.79 \text{m}^3/\text{s}$$

c. Mac-Math :*Table 36: Comparaison des débits calculés manuellement et par l'application ; Mac-Math*

T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Application	211.229	246.684	259.12	283.682	300.433	345.92
Manuel	211.23	246.684	259.12	283.68	300.433	345.92

Normalement la formule de Mac-maths est utilisée pour les petits bassins donc pour ce cas on doit la tenir en compte (bassin de grande surface), ces résultats sont juste pour montrer que l'application est fonctionnelle.

d. Mallet Gauthier :*Table 37: Comparaison des débits calculés manuellement et par l'application ; Mallet Gauthier*

T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Application	235.915	328.073	399.51	477.825	529.42	673.019
Manuel	235.9	328.07	399.5	477.8	529.42	673.018

5. Méthodes analogiques :

Dans cette partie on va calculer les débits de pointe du bassin de l'oued al Bahja ($S = 321 \text{ Km}^2$) à l'aide des débits calculés avec l'ajustement statistique de la série des débits de Tahanaout.

D'après les graphes et le test khi deux, la loi retenue est la loi de Galton (Lognormale a 2p)

a. Bassin jaugé :

Table 38: Les débits obtenus par ajustement statistique des débits max journalières du bassin jaugé; Rheraya

T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Oued Rheraya	70.35	112.4	164.93	255.23	343.9	772.57

b. Débits spécifiques :

Table 39: Comparaison des débits calculés manuellement et par l'application ; Débits spécifiques

T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Application	70.569	112.750	165.443	256.025	344.971	774.976
Manuel	70.569	112.750	165.443	256.025	344.971	774.976

c. Francou-Rodier :

Table 40: Comparaison des débits calculés manuellement et par l'application ;Francou-Rodier

T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Application	70.515	112.651	165.283	255.7497	344.575	773.932
Manuel	70.515	112.651	165.283	255.7497	344.575	773.932

On remarque qu'il n'y a pas beaucoup de différence entre les débits de crues calculés par les deux méthodes et cela est due au fait que : S1/S2 ≈ 1

6. Méthodes hydrométéorologiques :

Le tableau qui donne les coefficients de ruissellements recommandés par le guide SETRA pour la crue décennale est comme suit :

Table 41: Coefficients de ruissellement SETRA

Couverture végétale	Morphologie	MOYENNE % PENTE	AVEC SABLE TERRAIN GROSSIER	ARGILEUX OU LIMONEUX	TERRAIN ARGILEU COMPAC
Bois	Presque plat	0 - 5 %	0.10	0.30	0.40
	Onduleux	5 - 10 %	0.25	0.35	0.50
	Montagneux	10 - 30 %	0,30	0.50	0.60
Pâturage	Presque plat	0 - 5 %	0.10	0.30	0.40
	Onduleux	5 - 10 %	0.15	0.36	0.55
	Montagneux	10 - 30 %	0.22	0.42	0.60
Culture	Presque plat	0 - 5 %	0.30	0.50	0.60
	Onduleux	5 - 10 %	0.40	0.60	0.70
	Montagneux	10 - 30 %	0.52	0.72	0.82

On prend le coefficient de ruissellement pour notre bassin versant = 0,25.

On peut calculer le coefficient d'écoulement avec la formule $Ce' = \left(\frac{1}{N}\right) \sum \frac{Q_{max,an}}{P_{jmax;annule}} = 1.69$;

Pour les résultats on a choisi d'utiliser le coefficient de ruissellement 0.25 car cette notion de Ce n'implique pas que toute l'eau éoulée provienne des précipitations considérées. Une partie peut provenir de précipitations antérieures ou tombées hors du bassin (s'il existe des transferts, de surface ou souterrains), ni réciprocement que toutes les précipitations non évapotranspirées se soient éoulées (différences de stock et sorties souterraines), Donc pour éviter toute erreur (la valeur de Ce est très grande) on a travaillé avec Cr déterminer par le guide SETRA.

a. Gradex :*Table 42: Comparaison des débits calculés manuellement et par l'application ; Gradex*

T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Application	132.397	141.94	151.094	162.943	171.819	201.16
Manuel	132.39	141.94	151.101	162.943	171.82	201.16

b. Rationnelle :*Table 43: Comparaison des débits calculés manuellement et par l'application ; Rationnelle*

T(ans)	5	10	20	50	100	1000
Application	121.99	142.469	149.653	163.837	173.511	199.782
Manuel	121.99	142.469	149.653	163.83	173.511	199.7821

Normalement cette méthode est adaptée aux petits bassins dont la superficie ne dépasse pas 150km². Donc on ne doit pas prendre ces valeurs en compte. Nous avons juste voulu montrer que notre plateforme est capable d'exécuter cette méthode.

CONCLUSION

Dans ce projet, il a été question d'élaborer une application informatique pour automatiser les calculs hydrologiques et pré-dimensionner les petits ouvrages hydrauliques. Son objectif est de rendre plus rapide le calcul du débit de projet. Ce débit de projet est basé sur les données hydrologiques, les caractéristiques du bassin versant, mais aussi fortement sur les méthodes de calcul utilisées.

Les travaux effectués au cours de ce projet ont été déclinés en plusieurs étapes : La première partie consiste en la présentation des formules et méthodes nécessaires pour le calcul du débit de projet. Nous avons traité les méthodes statistiques, les méthodes hydrométéorologiques (Gradex, rationnelle et SCS), les méthodes analogiques (méthode de Francou-Rodier et des débits spécifiques), et les quatre méthodes empiriques les plus utilisées au Maroc dont : la formule de Fuller, la formule de Mac-Math, la formule de Mallet-Gauthier, et la formule d'Hazan Lasareviç.

Après avoir présenté ces méthodes, nous avons procédé à l'élaboration des algorithmes de calcul permettant leur programmation par le langage VBA. La deuxième partie consiste en la transformation des calculs présentés dans les deux parties précédentes en un code VBA, permettant ainsi d'élaborer une plateforme informatique dont l'objectif est de rendre plus rapide les calculs hydrologiques, afin d'exploiter les différentes méthodes de calcul des débits de crues. Cette plateforme est complétée par un guide, pratique et bien documenté par des graphes et des explications synthétisant la démarche à suivre pour calculer le débit de projet. Elle est réalisée sous forme de feuilles Excel et permet de fournir des recommandations et les détails utiles sur les différentes étapes requises.

La dernière partie est une phase primordiale pour vérifier et vérifier la précision, la fiabilité et la rapidité des calculs effectués par les programmes intégrés dans la plateforme. La vérification de la partie hydrologique a été faite en comparant les résultats fournis par l'application avec ceux donnés par le logiciel HyfranPlus (pour les ajustements statistiques), ou bien avec les résultats calculés manuellement (pour les autres paramètres et formules).

En somme, les résultats de la vérification témoignent de la réussite et la fiabilité de notre plateforme. Plusieurs perspectives sont envisageables pour améliorer ce travail :

- Intégrer une partie de traitement de données pluviométriques pour combler les données manquantes et homogénéiser les données hétérogènes, par le biais de méthodes statistiques, numériques ou graphiques.
- Programmer autres lois de probabilités (loi exponentielle, loi Pearson type II, ...)
- Lier l'application au logiciel ArcGis pour en extraire les caractéristiques des bassins versants de façon automatique sans avoir à les saisir manuellement.
- Incorporer une fonctionnalité qui aide au choix de la méthode d'estimation des crues de projets la plus adaptée selon les données disponibles, l'ouvrage à dimensionner et la période de retour préconisée.
- Intégrer le dimensionnement hydraulique des ponts (calcul des remous, calcul des affouillements, ...).

Bibliographie:

- ❖ AHATTAB Jihane « Mémoire : READAPTATION DES METHODES D'ESTIMATION DE CRUES AUX DONNEES HYDROLOGIQUES EXTREMES RECENTES DES BASSINS VERSANTS DE TENSIFT ET ESSAOUIRA. » 2016.
- ❖ AMACHNOUG « Statistiques appliquées à l'hydrologie »
- ❖ HAJHOUJI Youssef « Thèse Doctorat : Modélisation hydrologique du bassin versant de l'oued Rheraya et sa contribution à la recharge de la nappe du Haouz (bassin du Tensift, Maroc). » 2018 UNIVERSITÉ DE TOULOUSE.
- ❖ SERHIR Najat. « Cours : Hydrologie Opérationnelle. » 2021-2022 EHTP.
- ❖ SERHIR Najat. « Cours : Méthodes de calcul d'un débit de projet. » 2021-2022 EHTP.
- ❖ SETRA. « Assainissement routier. » 2006.

ANNEXES :

Annexe 1 : Presentation de l'organisme d'accueil :

Atomas Ingénierie est un bureau d'étude marocain fondé en 2015, depuis sa création il a contribué à des grands projets au niveau national et international.

1-Domaine d'interventions :

Le bureau d'études Atomas Ingénierie peut intervenir dans toutes les phases de la vie d'un projet ou d'un ensemble de projets dans les domaines suivants :

- **Infrastructure et Transport :**
 - Déploiement réussi sur tous les projets ;
 - Couverture de l'ensemble des domaines fonctionnels et métiers ;
 - Visualisation BIM et développement d'outils d'aide à la décision ;
 - Assistance technique et maîtrise d'œuvre.
- **Bâtiment :**
 - Produire des maquettes BIM et d'outils de prise de décision ;
 - Etude fiable avec respect de qualité et du délai ;
 - Réaliser des études d'énergie renouvelable ;
 - Réalisation de l'étude industrielle ;
 - Assistance technique et maîtrise d'œuvre

Pour poursuivre cette dynamique Atomas Ingénierie adopte une culture de partage d'information et veille sur l'accompagnement de la promotion de l'entité en utilisant les meilleurs outils disponibles sur le marché international.

2-Principaux objectifs :

Atomas Ingénierie souhaite accompagner ses clients pour la réalisation des 3 objectifs suivants :

- **Les satisfaites :**
 - Offrir un service personnalisé de qualité au client ;
 - Définir les règles et cibles en matière de standards et niveaux de qualité requis ;
 - Adopter des méthodes, dispositifs et canaux de communication avec le client ;
 - Adopter des stratégies orienté client en améliorant notre connaissance au besoin de client ;
 - Se mettre à la place du client et faire preuve d'empathie à son égard.
- **Organisation et gestion des tâches :**
 - Une organisation comportant une définition claire des responsabilités qui dispose des ressources et des compétences adéquats ;
 - La diffusion en interne d'informations pertinentes, fiables, dont la connaissance permet à chacun d'exercer ses responsabilités ;
 - Proposer des plans d'action opérationnel ;

- Une surveillance permanente du dispositif de contrôle interne ainsi qu'un examen régulier de son fonctionnement.
- **Exécution dans les règles d'art et respect du délai :**
 - Mettre à disposition des ressources pour la qualification / fiabilisation des prestations ;
 - Analyse et traitement des problématiques ;
 - Respect et connaissance parfait des normes en vigueur.

3-Fiche technique :

 ATOMAS INGENIERIE	
- Nom de l'entreprise	Atomas Ingénierie
- Raison sociale	Conseil, Ingénierie et Développement
- Forme juridique	Société à responsabilité limitée
- Année de fondation	2015
- Adresse	Residence Errabii Hay Ennahda Imm Ennakhil 5a Appt N° 12 - Rabat
- Capitale Social	100000 DH
- Téléphone	05-37-65-42-68
- Site web/Email	www.atomas.ma / mail@atomas.ma

Annexe 2 : SERIE DES PLUIES JOURNALIERES MAXIMALES ANNUELLES DE LA STATION TAHANOUAT

Années	Pjmax en mm
1970	36.1
1971	28.6
1972	32.1
1973	39.9
1974	49.4
1975	39.4
1976	25
1977	38.6
1978	31.3
1979	22.5
1980	35
1981	37.7
1982	27.2
1983	33.1
1984	37.3
1985	37.3
1986	45.5
1987	23.7
1988	64.8
1989	36.2
1990	56.7
1991	39.6
1992	29.6
1993	46.6
1994	36.8
1995	42.4
1996	57
1997	31.5
1998	36.4
1999	27.5
2000	28.6
2001	31.3
2002	39.8
2003	49.4

2004	23.3
2005	66.2
2006	44.1
2007	39.1
2008	40.3
2009	44.1
2010	51.8

Annexe 3 : SERIE DES DEBITS JOURNALIER MAXIMAUX ANNUELS DE LA STATION TAHANOUAT

Années	Qjmax en m ³ /s
1962	13
1963	34
1964	13
1965	35
1966	37
1967	54
1968	56
1969	9
1970	8
1971	24
1972	15
1973	42
1974	47
1975	12
1976	16
1977	9
1978	21
1979	9
1980	39
1981	36
1982	33
1983	22
1984	30
1985	23
1986	54
1987	155
1988	146
1989	58
1990	103
1991	26
1992	77
1993	24
1994	45
1995	680
1996	68
1997	15

1998	31
1999	46
2000	412
2002	15
2003	22
2004	18
2005	9
2006	24
2007	2
2008	2
2009	24
2010	38

Annexe 4 : LOI DU KHI-DEUX AVEC k DEGRÉS DE LIBERTÉ
QUANTILES D'ORDRE $1 - \gamma$

k	γ										
	0.995	0.990	0.975	0.950	0.900	0.500	0.100	0.050	0.025	0.010	0.005
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.45	2.71	3.84	5.02	6.63	7.88
2	0.01	0.02	0.05	0.10	0.21	1.39	4.61	5.99	7.38	9.21	10.60
3	0.07	0.11	0.22	0.35	0.58	2.37	6.25	7.81	9.35	11.34	12.84
4	0.21	0.30	0.48	0.71	1.06	3.36	7.78	9.94	11.14	13.28	14.86
5	0.41	0.55	0.83	1.15	1.61	4.35	9.24	11.07	12.83	15.09	16.75
6	0.68	0.87	1.24	1.64	2.20	5.35	10.65	12.59	14.45	16.81	18.55
7	0.99	1.24	1.69	2.17	2.83	6.35	12.02	14.07	16.01	18.48	20.28
8	1.34	1.65	2.18	2.73	3.49	7.34	13.36	15.51	17.53	20.09	21.96
9	1.73	2.09	2.70	3.33	4.17	8.34	14.68	16.92	19.02	21.67	23.59
10	2.16	2.56	3.25	3.94	4.87	9.34	15.99	18.31	20.48	23.21	25.19
11	2.60	3.05	3.82	4.57	5.58	10.34	17.28	19.68	21.92	24.72	26.76
12	3.07	3.57	4.40	5.23	6.30	11.34	18.55	21.03	23.34	26.22	28.30
13	3.57	4.11	5.01	5.89	7.04	12.34	19.81	22.36	24.74	27.69	29.82
14	4.07	4.66	5.63	6.57	7.79	13.34	21.06	23.68	26.12	29.14	31.32
15	4.60	5.23	6.27	7.26	8.55	14.34	22.31	25.00	27.49	30.58	32.80
16	5.14	5.81	6.91	7.96	9.31	15.34	23.54	26.30	28.85	32.00	34.27
17	5.70	6.41	7.56	8.67	10.09	16.34	24.77	27.59	30.19	33.41	35.72
18	6.26	7.01	8.23	9.39	10.87	17.34	25.99	28.87	31.53	34.81	37.16
19	6.84	7.63	8.81	10.12	11.65	18.34	27.20	30.14	32.85	36.19	38.58
20	7.43	8.26	9.59	10.85	12.44	19.34	28.41	31.41	34.17	37.57	40.00
21	8.03	8.90	10.28	11.59	13.24	20.34	29.62	32.67	35.48	38.93	41.40
22	8.64	9.54	10.98	12.34	14.04	21.34	30.81	33.92	36.78	40.29	42.80
23	9.26	10.20	11.69	13.09	14.85	22.34	32.01	35.17	38.08	41.64	44.18
24	9.89	10.86	12.40	13.85	15.66	23.34	33.20	36.42	39.36	42.98	45.56
25	10.52	11.52	13.12	14.61	16.47	24.34	34.28	37.65	40.65	44.31	46.93
26	11.16	12.20	13.84	15.38	17.29	25.34	35.56	38.89	41.92	45.64	48.29
27	11.81	12.88	14.57	16.15	18.11	26.34	36.74	40.11	43.19	46.96	49.65
28	12.46	13.57	15.31	16.93	18.94	27.34	37.92	41.34	44.46	48.28	50.99
29	13.12	14.26	16.05	17.71	19.77	28.34	39.09	42.56	45.72	49.59	52.34
30	13.79	14.95	16.79	18.49	20.60	29.34	40.26	43.77	46.98	50.89	53.67
40	20.71	22.16	24.43	26.51	29.05	39.34	51.81	55.76	59.34	63.69	66.77
50	27.99	29.71	32.36	34.76	37.69	49.33	63.17	67.50	71.42	76.15	79.49
60	35.53	37.48	40.48	43.19	46.46	59.33	74.40	79.08	83.30	88.38	91.95
70	43.28	45.44	48.76	51.74	55.33	69.33	85.53	90.53	95.02	100.42	104.22
80	51.17	53.54	57.15	60.39	64.28	79.33	96.58	101.88	106.63	112.33	116.32
90	59.20	61.75	65.65	69.13	73.29	89.33	107.57	113.14	118.14	124.12	128.30
100	67.33	70.06	74.22	77.93	82.36	99.33	118.50	124.34	129.56	135.81	140.17

Si k est entre 30 et 100 mais n'est pas un multiple de 10, on utilise la table ci-haut et on fait une interpolation linéaire. Si $k > 100$ on peut, grâce au théorème limite central, approximer la loi $\chi^2(k)$ par la loi $N(k, 2k)$.