

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة سعيدة – د. مولاي الطاهر  
UNIVERSITÉ DE SAÏDA - Dr MOULAY TAHAR



Faculté de Technologie

Département de Génie Civil et d'Hydraulique

## PROJET DE FIN DE CYCLE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master en hydraulique

Spécialité : Hydraulique urbaine

---

# Crues et/ou inondations : Etude météorologique

---

Présenté par :

**BENZERGA Mohamed Amine**

**SAÏDI Nadji**

Soutenu le 20/06/2023, devant le jury composé de :

M.	HADJEM Mohamed	MAA	Président
M.	TALBI Okacha	MCA	Encadreur
M.	CHAFI Chafi	MAA	Examineur

## ***Dédicaces***

*Je dédie ce modeste travail :*

***A ma très chère mère,***  
*qui m'a permis de m'accomplir,*  
*et qui m'a soutenu tout au long de mon parcours,*  
*Je lui exprime ici ma reconnaissance et tout mon amour.*

***A mon père,***  
*pour son encouragement et sa patience.*

***A mon grand-père et ma grand-mère.***

***A mes oncles.***

***A mon binôme et ami Saidi Nadji,***  
*je tiens à le remercier pour sa sincère amitié,*  
*saches que je te réserve la même affection.*

***A toutes les familles Abdelli et Benzerga.***

## **Dédicaces**

*Je souhaite dédier ce mémoire :*

***A ma mère,***

*pour son soutien et ses sacrifices tout  
et pour son désir sincère de me voir réussir dans mes études.*

***A ma grand-mère Abdelli Berkana,***

*qui m'a toujours encouragé à poursuivre mes études.*

***A mes frères et mon oncle Abederrahmane.***

***A toute la famille Fedlaoui et la famille Saidi.***

***A mes chers amis et surtout mon binôme Benzerga M. A.,***

*que notre amitié continue de grandir,  
je suis honoré de te compter parmi mes amis les plus chers.*

## **Remerciements**

Tout d'abord, nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements à M. Okacha TALBI, pour nous avoir fait confiance et accepter de diriger ce travail qui l'a lui-même proposé. Nous lui sommes reconnaissants pour sa disponibilité et sa grande patience tout au long de la préparation de ce mémoire.

Nous souhaitons également remercier les membres du jury qui ont généreusement consacré leur temps pour lire et critiquer ce travail de manière impartiale.

Nous tenons aussi à remercier M. KOURAT S. pour nous avoir aidés à démarrer ce travail et pour nous avoir fourni quelques données. De la même, on tient aussi à remercier Mme OUIS S. pour avoir mis à notre disposition une partie des données nécessaires. Enfin un vif remerciement à tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation et pour être toujours disponibles.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire.

## ملخص

### السّينول و/أو الفيضانات: دراسة الامطار

تعرضت الجزائر مرة أخرى للفيضانات خلال شهر ماي 2023، وهذا يعد دليلاً على أنها عُرضة لهذه الظاهرة. لذلك تعد دراسة السيول و/أو الفيضانات موضوع الساعة. في هذه المذكرة، يتعلق الأمر بالمساعدة في التنبؤ بهذه الكوارث الطبيعية والوقاية منها. في هذا السياق، فإن معرفة المعلومات، حول قيم الهطول المطري وخصوصاً القيم القصوى وتكرارها، ضرورية. إن الهدف الرئيسي لهذه الدراسة هو تحليل إحصائي للأمطار السنوية والأمطار اليومية القصوى. تعتمد المنهجية المقترحة على استخدام نماذج التعديل غاما، غامبل والقانون المعمم للقيم القصوى. تم إجراء هذه الدراسة على مدينة رباحيه (سعيدة)، وهذا مع الأخذ بعين الاعتبار وجود محطة أرصاد جوية واحدة داخل محيط منطقة الدراسة. تم تحديد القانونين جاما وغامبل على أنهما الأكثر ملائمة لتعديل الأمطار السنوية والأمطار اليومية القصوى على التوالي، حيث تم استخدام هذه الأخيرة لتحديث خريطة المباني المعرضة لخطر الفيضانات في منطقة الدراسة.

**الكلمات المفتاحية:** الفيضانات، التحليل الإحصائي، الامطار، قانون غاما، قانون غامبل، قانون المعمم للقيم القصوى.

## **Résumé**

### **Crues et/ou inondations : Etude météorologique**

L'Algérie a encore été touchée par les inondations durant le mois de Mai 2023. C'est une preuve que le pays est vulnérable au phénomène en question. Par conséquent, l'étude des crues et/ou inondations est un sujet d'actualité. Dans ce mémoire, il est question d'aider à anticiper et prévenir ces catastrophes naturelles. Dans cette optique, l'information sur les valeurs des précipitations surtout extrêmes et leurs fréquences est nécessaire. L'objectif principal, de cette étude, est une analyse statistique des pluies annuelles et des pluies journalières maximales. L'approche méthodologique préconisée est basée sur l'emploi des modèles d'ajustement de Gamma, de Gumbel et GEV (loi Généralisée des Valeurs Extrêmes). Une application a été menée sur l'agglomération de Rebahia (Saïda), en prenant en compte une seule station disponible dans le périmètre de la zone d'étude. Les lois Gamma et Gumbel ont été identifiées comme les distributions les plus adéquates pour l'ajustement respectivement des pluies annuelles et des pluies journalières maximales. Ces dernières ont été utilisées pour la mise à jour de la carte des bâtiments à risque d'inondations de la zone d'étude.

**Mots clés :** Inondations, analyse statistique, précipitations, loi Gamma, loi de Gumbel, loi GEV.

## **Abstract**

### **Flooding: Meteorological study**

Algeria was again affected by the floods during May 2023. This is proof that the country is vulnerable to the phenomenon in question. Consequently, the study of floods is a topical subject. In this study, it is a question of helping to anticipate and prevent these natural disasters. In this context, the information on the values of especially extreme precipitation and their frequencies is necessary. The main objective of this study is a statistical analysis of annual rainfall and maximum daily rainfall. The methodological approach adopted is based on the use of Gamma, Gumbel and GEV (Generalized Extreme Values Law) adjustment models. An application was conducted on the Rebahia agglomeration (Saïda), taking into account a single meteorological station available within the perimeter of the area study. The Gamma and Gumbel laws have been identified as the most adequate distributions for the adjustment of annual rainfall and maximum daily rainfall respectively. This latter were used to update the map of buildings at flooding risk of the area study.

**Keywords:** Floods, statistical analysis, precipitation, Gamma model, Gumbel model, GEV model.

# Table des matières

Dédicaces

Remerciements

Résumés

Liste des figures

Liste des tableaux

**Introduction** ..... 1

## **Chapitre I – Les inondations : Définitions et mécanismes**

I.1. Le risque d'inondation.....	4
I.1.1. L'Aléa .....	4
I.1.2. La Vulnérabilité .....	4
I.2. Définitions.....	4
I.2.1. La Crue.....	4
I.2.2. L'inondation.....	5
I.3. La différence entre crue et inondation : .....	6
I.4. Paramètres fondamentaux d'un cours d'eau .....	6
I.4.1. Les lits d'un cours d'eau .....	6
I.4.1.1. Le lit mineur.....	6
I.4.1.2. Le lit majeur.....	6
I.4.2. Rives et Berges : .....	7
I.4.3. Ripsisylve .....	7
I.4.4. Alluvions et substratum : .....	8
I.5. Les eaux d'inondations.....	8
I.5.1. Stagnation d'eaux pluviales.....	8
I.5.2. Débordement des eaux d'un cours d'eau : .....	8
I.5.2.1. Inondation par débordement direct : .....	9
I.5.2.2. Inondation par débordement indirect : .....	10
I.5.3. Les eaux issues de la rupture d'ouvrages ou d'embâcles.....	10
I.5.4. Ruissellement en secteur urbain : .....	11
I.5.5. Crues torrentielles : .....	12
I.5.6. Submersion des zones littorales ou lacustres : .....	13
I.6. Les paramètres d'une inondation.....	14



I.6.1. Le débit .....	14
I.6.2. La vitesse d'écoulement.....	14
I.6.3. La hauteur de submersion .....	15
I.6.4. La durée de submersion .....	15
I.6.5. La fréquence et la période de retour .....	15
I.6.6. Le volume de matière transportée.....	16

## **Chapitre II – Historique des inondations en Algérie**

II.1. Crue et/ou inondation : une menace permanente.....	17
II.2. Causes et types d'inondations catastrophiques en Algérie.....	18
II.2.1. Les causes des inondations qui ont touché l'Algérie.....	18
II.2.2. Les types des inondations en Algérie .....	19
II.3. Les inondations catastrophiques en Algérie (1980 - 2019) .....	20
II.3.1. La région du centre de l'Algérie .....	20
II.3.2. La région du l'Est de l'Algérie.....	21
II.3.3. La région du Sud de l'Algérie .....	23
II.3.4. La région de l'Ouest de l'Algérie.....	24
II.4. Historique des inondations dans la commune de Rebahia .....	25
II.5. Les inondations de Mai 2023 en Algérie.....	26

## **Chapitre III – La météorologie**

III.1. La météorologie.....	27
III.1.1. Les principes de base de la météorologie.....	27
III.1.1.1. L'atmosphère et ses propriétés.....	27
III.1.1.2. Les différentes couches de l'atmosphère .....	28
III.1.2. Les cycles de l'eau et leur rôle dans les précipitations : .....	30
III.1.2.1. L'évaporation et la transpiration .....	31
III.1.2.2. Précipitation .....	32
III.1.2.3. Interception.....	32
III.1.2.4. Infiltration.....	32
III.1.2.5. Les écoulements .....	33
III.2. Les instruments et les méthodes de mesure des précipitations .....	34
III.2.1. Les radars météorologiques.....	34
III.2.2. Les satellites météorologiques .....	34
III.3. La prévision météorologique.....	35

III.3.1. Les systèmes de prévision et d'annonce des crues et/ou inondation.....	35
III.3.1.1. Définition des systèmes de prévision et d'annonce des crues.....	35
III.3.1.2. Considérations météorologiques .....	35
III.3.1.3. Considérations hydrologiques .....	37
III.3.2. Principaux aspects des systèmes de prévisions des crues .....	37
III.3.2.1. Considérations de base .....	37
III.3.2.2. Exigences relatives aux données .....	40
III.3.3. Méthodes et modèles de prévision des crues .....	43
III.3.3.1. Surveillance et prévision des précipitations .....	44
III.3.3.2. Modélisation événementielle et simulation continue .....	44

## **Chapitre IV – Cadres expérimental et méthodologique**

IV.1. Présentation de la zone d'étude.....	46
IV.1.1. Situation géographique .....	46
IV.1.2. Climat.....	46
IV.1.3. Pluviométrie .....	46
IV.2. Objectifs de l'étude .....	48
IV.3. Données et matériels utilisés.....	48
IV.3.1. Collecte des données .....	48
IV.3.2. Matériels utilisés .....	48
IV.4. Approche méthodologique .....	49
IV.4.1. Test d'hypothèses.....	49
IV.4.1.1. Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz.....	49
IV.4.1.2. Test de stationnarité de Kendall.....	49
IV.4.1.3. Le test d'homogénéité de Wilcoxon à l'échelle annuelle .....	50
IV.4.2. Choix des modèles d'ajustement.....	50
IV.4.2.1. La loi Gamma.....	51
IV.4.2.2. La loi de GEV .....	51
IV.4.2.3. La loi de Gumbel.....	52
IV.4.3. Adéquation des méthodes d'ajustement.....	52
IV.4.3.1. Critère d'information Bayésien (BIC) .....	52
IV.4.3.2. Critère d'information d'Akaike (AIC) .....	53
IV.4.4. Caractérisation des périodes de retour .....	53

## **Chapitre V – Résultats et interprétations**

V.1. Régime pluviométrique de la zone d'étude.....	54
V.1.1. Précipitations moyennes mensuelles interannuelles.....	54
V.1.2. Précipitations annuelles.....	54
V.2. Choix de la méthode de calcul de la fréquence empirique.....	56
V.3. Traitement des précipitations annuelles (PA) .....	57
V.3.1. Statistiques de base de l'échantillon (PA).....	57
V.3.2. Tests d'hypothèses de PA.....	57
V.3.3. Ajustement des pluies annuelles.....	58
V.3.4. Validation des méthodes d'ajustement.....	58
V.3.4.1. Examen visuel des graphiques d'ajustement.....	58
V.3.4.2. Examen numérique par utilisation des critères d'ajustement.....	58
V.3.5. Adéquation de la méthode d'ajustement des PA.....	61
V.3.6. Prédiction des précipitations annuelles .....	62
V.4. Traitement des pluies journalières maximales (PJMax).....	62
V.4.1. Statistiques de base de l'échantillon (PJMax).....	64
V.4.2. Tests d'hypothèses des PJMax .....	64
V.4.3. Ajustement des pluies journalières maximales .....	64
V.4.3.1. Examen visuel des graphiques d'ajustement.....	65
V.4.3.2. Examen numérique par utilisation des critères d'ajustement.....	68
V.4.4. Adéquation de la méthode d'ajustement des PJMax.....	68
V.4.5. Prédiction des précipitations journalières maximales .....	69
V.5. Révision de la carte des bâtiments à risque d'inondation .....	69
<b>Conclusion .....</b>	<b>72</b>
<b>Références bibliographiques et webographie .....</b>	<b>74</b>

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> - Définition du risque .....	5
<b>Figure I.2</b> - Structure d'un cours d'eau .....	7
<b>Figure I.3</b> - Inondation par stagnation d'eau pluviale .....	8
<b>Figure I.4</b> - Inondation par débordement direct .....	9
<b>Figure I.5</b> - Inondation par débordement indirect .....	10
<b>Figure I.6</b> - Rupture d'ouvrages ou d'embâcles .....	11
<b>Figure I.7</b> - Ruissellement en secteur urbain.....	12
<b>Figure I.8</b> - Crue torrentielle .....	12
<b>Figure I.9</b> - Submersions marines .....	13
<b>Figure II.1</b> - Illustration des dégâts causés par les inondations de Mai 2023 en Algérie .....	26
<b>Figure III.1</b> - Structure verticale de l’atmosphère .....	28
<b>Figure III.2</b> - Les cycles de l'eau.....	30
<b>Figure III.3</b> - Les écoulements.....	33
<b>Figure IV.1</b> - Situation géographique de la zone d’étude. ....	47
<b>Figure V.1</b> - Précipitations moyennes mensuelles interannuelles (1960-2018).....	54
<b>Figure V.2</b> - Précipitations annuelles (1960-2018) .....	56
<b>Figure V.3</b> - Ajustement graphique des PA selon la loi Gamma (MMV).....	59
<b>Figure V.4</b> - Ajustement graphique des PA selon la loi Gamma (MM) .....	59
<b>Figure V.5</b> - Ajustement graphique des PA selon la loi Gumbel (MMV) .....	60
<b>Figure V.6</b> - Ajustement graphique des PA selon la loi Gumbel (MM) .....	60
<b>Figure V.7</b> - Variation des pluies journalières maximales (2000-2021) .....	63
<b>Figure V.8</b> - Ajustement graphique des PJMax selon la loi GEV (MMV) .....	66
<b>Figure V.9</b> - Ajustement graphique des PJMax selon la loi GEV (MM) .....	66
<b>Figure V.10</b> - Ajustement graphique des PJMax selon la loi Gumbel (MMV) .....	67
<b>Figure V.11</b> - Ajustement graphique des PJMax selon la loi Gumbel (MM) .....	67
<b>Figure V.12</b> - Carte des zones inondables et des bâtiments à risque.....	70
selon le critère topographique.....	70
<b>Figure V.13</b> - Carte des zones inondables et des bâtiments à risque.....	71
selon les critères topographique et météorologique.....	71

## Liste des tableaux

<b>Tableau II.1</b> - Historicité d'inondations dans la commune de Rebahia.....	25
<b>Tableau V.1</b> - Précipitations moyennes mensuelles interannuelles (1960-2018) .....	54
<b>Tableau V.2</b> - Précipitations annuelles (1960-2018).....	55
<b>Tableau V.3</b> - Formules de calcul de la fréquence empirique.....	56
<b>Tableau V.4</b> - Statistiques de base des précipitations annuelles .....	57
<b>Tableau V.5</b> - Résultats des tests d'hypothèses des PAMax.....	57
<b>Tableau V.6</b> - Examen numérique des lois d'ajustement - MMV .....	61
<b>Tableau V.7</b> - Examen numérique des lois d'ajustement - MM .....	61
<b>Tableau V.8</b> - Statistiques descriptives des PA (échantillon et population) .....	62
<b>Tableau V.9</b> - Estimation des PA selon la loi de Gamma (méthode des moments) .....	62
<b>Tableau V.10</b> - Précipitations journalières maximales (PJMax).....	63
<b>Tableau V.11</b> - Caractéristiques statistiques des séries pluviométriques.....	64
<b>Tableau V.12</b> - Résultats des tests d'hypothèses des PJMax .....	64
<b>Tableau V.13</b> - Examen numérique des lois d'ajustement - MMV .....	68
<b>Tableau V.14</b> - Examen numérique des lois d'ajustement - MM .....	68
<b>Tableau V.15</b> - Statistiques descriptives des PJMax (échantillon et population) .....	69
<b>Tableau V.16</b> - Estimation des PJMax selon la loi de Gumbel (méthode des moments) .....	69
<b>Tableau V.17</b> – Hauteurs des pluies journalières potentielles .....	70

# Introduction

---

Il est bien plus beau de savoir quelque chose de tout  
que de savoir tout d'une chose;  
cette universalité est la plus belle. ✍

**Blaise Pascal**

Les inondations sont des catastrophes naturelles qui ont des conséquences dramatiques sur les populations et les infrastructures touchées. Elles peuvent survenir suite à des pluies intenses, des débordements de cours d'eau ou des phénomènes de marée. Pour mieux comprendre et prévenir ces événements, les études météorologiques sont essentielles. En effet, la météorologie permet de prévoir les précipitations et d'analyser les phénomènes climatiques qui peuvent conduire à des inondations. Ces informations sont cruciales pour établir des systèmes d'alerte précoce, planifier des mesures de prévention et de gestion de crise, ainsi que pour concevoir des infrastructures adaptées aux risques d'inondations. Dans ce contexte, les études météorologiques constituent une pierre angulaire dans la lutte contre les inondations, en permettant de mieux anticiper et de mieux gérer ces événements dévastateurs.

Les études météorologiques sont indispensables pour comprendre et prévoir les phénomènes climatiques qui peuvent impacter nos vies et nos activités. Cependant, pour exploiter au mieux les données météorologiques, il est également crucial d'appliquer des méthodes statistiques rigoureuses. Les études statistiques permettent en effet d'analyser les données météorologiques, d'en extraire des tendances et des modèles, et de les utiliser pour établir des prévisions fiables. Les statistiques jouent également un rôle important dans la vérification et la validation des modèles météorologiques, en permettant d'évaluer leur précision et leur fiabilité. Dans un contexte de changement climatique, les études statistiques sont particulièrement importantes pour comprendre les évolutions passées et futures du climat, ainsi que pour établir des projections sur les risques météorologiques et leurs impacts potentiels. En somme, les études statistiques sont un élément clé de l'étude météorologique, permettant de maximiser l'utilisation des données et d'améliorer la fiabilité des prévisions.

Les précipitations jouent un rôle dans la compréhension du climat et de ses tendances. Comme, elles sont nécessaires pour la prévision des phénomènes météorologiques liés à l'eau. Elles sont une variable clé dans de nombreux domaines, tels que l'agriculture, l'hydrologie, l'environnement, l'aménagement du territoire, ou encore la gestion des risques naturels. Les études statistiques permettent d'analyser les précipitations passées, d'en extraire des caractéristiques telles que la fréquence, l'intensité, la durée, ou encore la répartition spatiale, et de les utiliser pour établir des prévisions sur les précipitations futures.

L'étude statistique des précipitations est nécessaire pour mieux comprendre les événements météorologiques surtout extrêmes, tels que les pluies torrentielles, les crues et/ou les inondations. En analysant les données historiques, il est possible de déterminer la probabilité d'occurrence de ces événements et d'estimer leur intensité. Ces informations sont cruciales pour établir des plans

de prévention et de gestion de crise, ainsi que pour concevoir des infrastructures adaptées aux risques d'inondations. Les précipitations sont également importantes dans le contexte du changement climatique. En effet, elles sont l'un des paramètres météorologiques les plus sensibles aux variations climatiques. Leur étude statistique permet de déterminer si elles ont changé au fil du temps et d'identifier les tendances émergentes. Ces informations sont utiles pour comprendre les impacts du changement climatique sur l'hydrologie et l'environnement, ainsi que pour établir des projections sur les précipitations futures.

La connaissance des quantiles des précipitations de fréquences rares est nécessaire pour la conception des ouvrages hydrauliques tels que les ouvrages de protection contre les inondations, les réseaux d'assainissement, assainissement pluvial, dans de nombreuses applications d'ingénierie, etc.

Ce modeste travail est la suite d'un mémoire de fin d'étude de Master, réalisé pendant l'année universitaire 2020/2021 et intitulé « Les inondations : Etude du risque dans la région de Saïda ». L'étude avait pour objectif de cartographier les zones potentiellement inondables, les bâtiments à risque et d'estimer les hauteurs de précipitations journalières potentiellement dangereuses, qui seront à l'origine d'éventuelles inondations, en se basant sur le seul critère topographique.

L'objectif principal du présent travail est, d'abord, de réaliser une étude statistique des précipitations, qui vise, l'ajustement des échantillons des pluies annuelles et des pluies journalières maximales. Ensuite, d'utiliser ces dernières pour la mise à jour de la carte des bâtiments à risque d'inondations.

Le mémoire est composé de cinq chapitres :

Le premier chapitre : **Les inondations : Définitions et mécanismes**

Consacré à la description des phénomènes crue et inondation, leur définition et leur mécanisme.

Le deuxième chapitre : **Historique des inondations en Algérie**

Résume l'historique des principales inondations qui ont frappé l'Algérie, y compris celles du mois de mai 2023.

Le troisième chapitre : **La météorologie**

Dans ce chapitre, c'est la météorologie qui a été évoquée, sous tous ses aspects.



**Le quatrième chapitre : Cadre expérimental et méthodologique**

A travers lequel, on a abordé tout ce qui est démarche méthodologique adoptée dans le cadre de ce travail. On a commencé par la description de la zone d'étude, des lois utilisées, des étapes de traitements des données exogènes collectées.

**Le Cinquième chapitre : Résultats & Interprétation**

Comme son nom l'indique, ce chapitre a fait l'objet de l'application des modèles utilisés et de la présentation des différents résultats sous forme de tableaux ou graphes. On a essayé aussi de donner du relief à ces résultats, en les interprétant et en étudiant leur cohérence.

# **Les inondations : Définitions et mécanismes**

---

## **I.1. Le risque d'inondation**

Les inondations sont des phénomènes naturels fréquents et extrêmement destructeurs, causant des dommages considérables aux personnes et aux biens. Dans le cadre de cette étude, nous montrons certains concepts liés aux risques d'inondations tels que la vulnérabilité, l'aléa, l'inondation, ainsi que le cadre législatif qui traite de ces dangers. En matière de lutte contre les inondations, il est important de savoir que « Le risque zéro n'existe pas ».

Le risque peut être défini comme la combinaison de la sévérité et de la probabilité d'un effet nuisible qui menace la santé, les biens ou l'environnement. Le risque d'inondation est une notion complexe qui implique deux éléments clés (Fig. I.1) [[www.geoconfluences.ens-lyon.fr](http://www.geoconfluences.ens-lyon.fr)]

### **I.1.1. L'Aléa**

Il est défini comme la probabilité qu'un phénomène naturel se produise, dans notre cas une inondation. Il est caractérisé par plusieurs paramètres hydrauliques qui déterminent la capacité plus ou moins destructrice de l'inondation.

### **I.1.2. La Vulnérabilité**

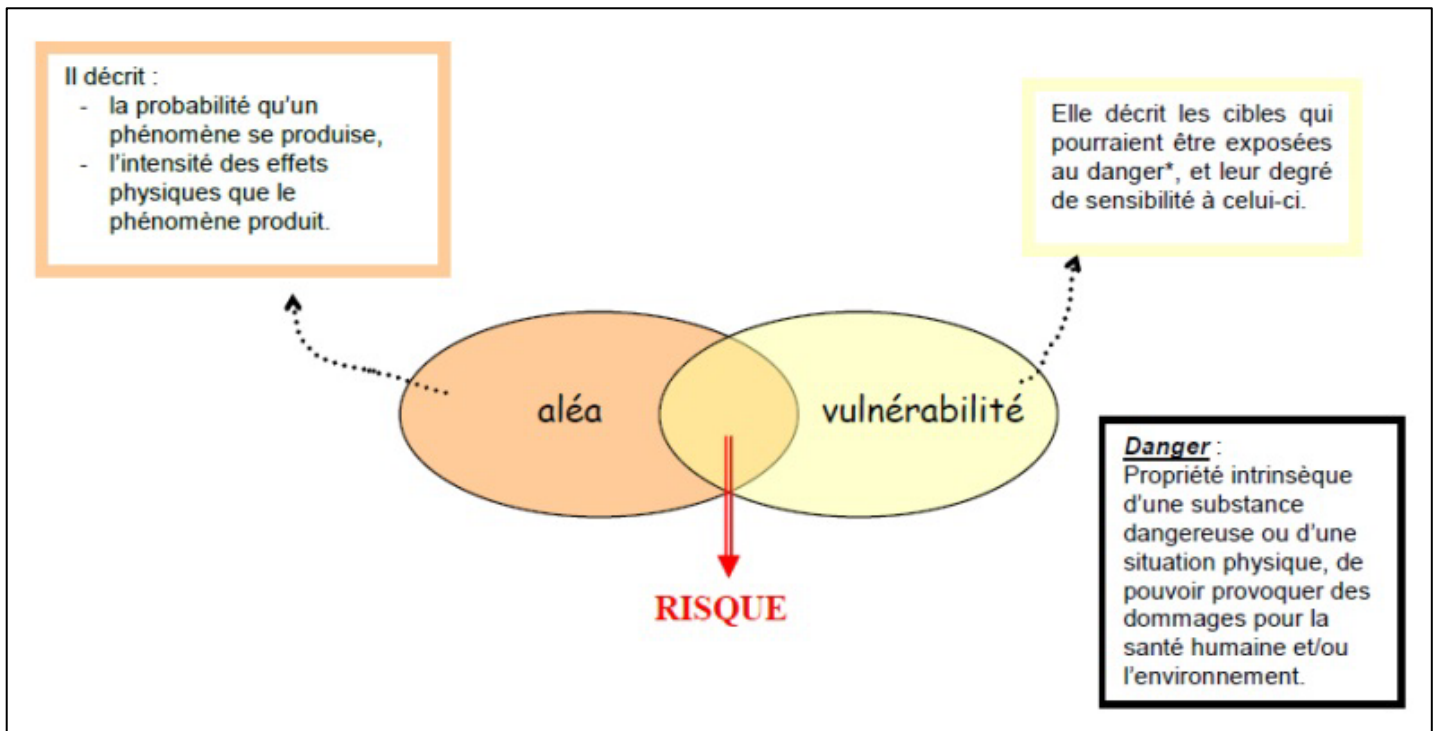
Elle est définie comme l'évaluation de la capacité d'un site, occupé humainement ou économiquement, à être affecté par l'aléa.

## **I.2. Définitions**

### **I.2.1. La Crue**

Elle se caractérise par une augmentation du volume d'eau qui s'écoule dans une rivière et peut concerner toute la zone d'inondation. Pour déterminer si une rivière est en crue, de nombreux géographes et hydrologues utilisent le critère selon lequel le débit doit être trois à cinq fois supérieur au débit moyen. Toutefois, dans la pratique, une rivière est considérée en crue lorsqu'elle dépasse les limites de son lit mineur. Les crues sont un phénomène naturel périodique qui devient exceptionnel lorsque les débits sont significatifs par rapport au débit moyen ; c'est ce qu'on appelle une crue critique, qui peut entraîner des inondations dans les zones riveraines.

Lorsqu'on parle de crue, on fait référence à l'hydrogramme qui est un graphique représentant les fluctuations du débit au cours du temps. Plus spécifiquement, la partie ascendante de ce hydrogramme est appelée "crue", tandis que la partie descendante est appelée "décru". Différents critères sont utilisés pour définir une crue, tels que son origine, sa durée, sa fréquence, son débit maximal et son volume total. [SALOMON, 1997]



Source : [www.dspace.univ-tiaret.dz](http://www.dspace.univ-tiaret.dz)

**Figure I.1 - Définition du risque**

### I.2.2. L'inondation

D'un point de vue étymologique, le mot inondation vient du latin « inundatio » qui signifie submersion. Une inondation est une submersion, rapide ou lente, d'une zone généralement émergée. Il convient de souligner que les eaux responsables de l'inondation ne proviennent pas du réseau d'eau potable ou d'assainissement dans le cadre d'un fonctionnement normal. [FROMONT, 2010]

Les eaux qui peuvent provoquer une inondation peuvent avoir plusieurs origines :

- ☞ Les eaux de débordement d'un cours d'eau en crue sont souvent la source la plus courante d'inondation, surtout dans les zones à risque élevé.
- ☞ Les eaux provenant du réseau d'assainissement sont également une source d'inondation fréquente. En cas de crue, les eaux peuvent remonter par les canalisations d'égout et inonder les habitations ou les rues.
- ☞ Les eaux de ruissellement peuvent provenir des terrains environnants, tels que les pentes naturelles ou les surfaces imperméabilisées, comme les routes et les parkings.

- ☞ Les eaux qui remontent de la nappe phréatique peuvent également causer des inondations. Cela se produit souvent dans les zones où la nappe phréatique est proche de la surface du sol, en particulier dans les zones inondables.
- ☞ Enfin, les eaux issues de la rupture d'ouvrages ou d'embâcles peuvent provoquer des inondations soudaines et violentes. Ces ouvrages peuvent être des barrages, des digues ou tout autre obstacle naturel ou artificiel qui bloque le cours d'eau. [www.eaufrance.fr]

### **I.3. La différence entre crue et inondation :**

La crue désigne une période de fort débit d'un fleuve ou d'une rivière. Il peut y en avoir plusieurs au cours de l'année, en fait chaque fois que se produit un épisode de pluie ou d'orage intense. On peut parler par exemple de la crue annuelle, qui est le débit le plus élevé observé pour une année donnée. Pour qu'il y ait inondations, il faut que le débit de crue dépasse un seuil donné, au-delà duquel la rivière sort de son « lit mineur », c'est-à-dire son tracé normal, puis déborde dans son lit majeur. Dès lors, le cours d'eau s'élargit dans la plaine, en général alluviale, formée précisément par le dépôt d'alluvions lors des crues précédentes.

Ce sont des phénomènes naturels qui façonnent l'environnement, avec lesquels les écosystèmes naturels sont en parfait équilibre.

### **I.4. Paramètres fondamentaux d'un cours d'eau**

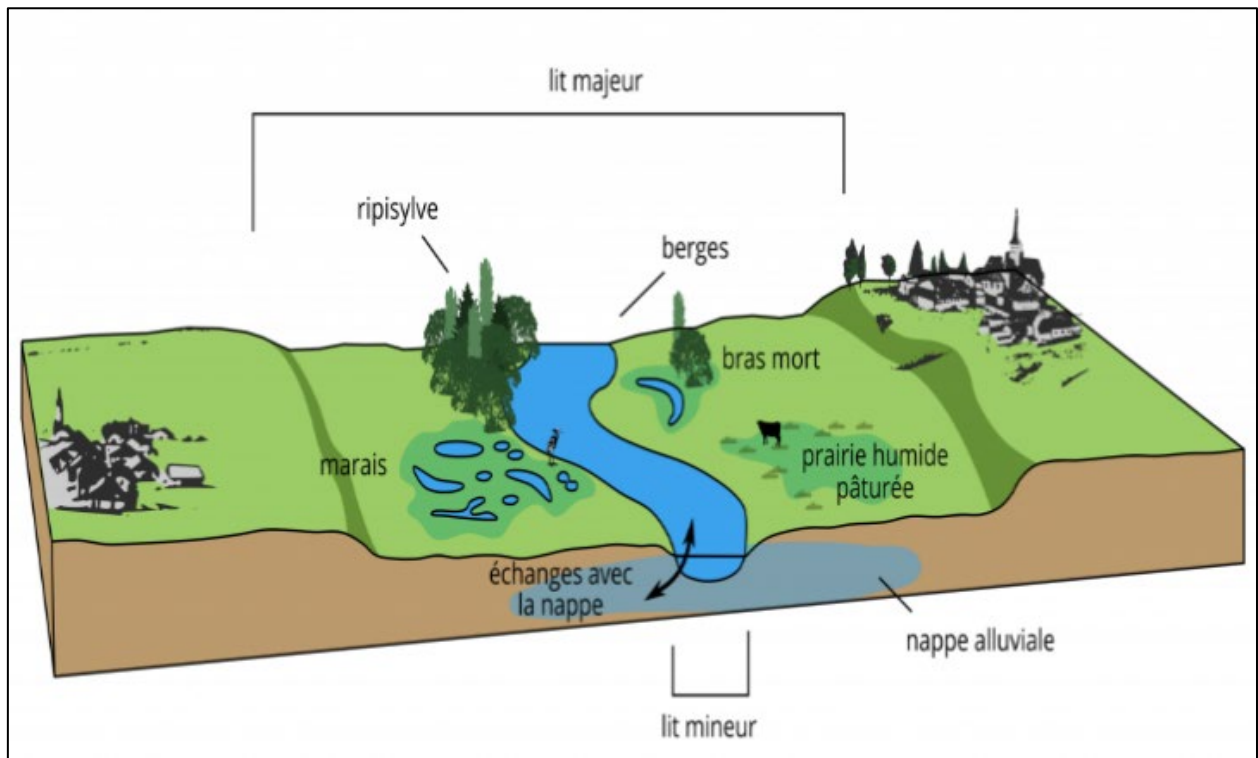
#### **I.4.1. Les lits d'un cours d'eau**

##### **I.4.1.1. Le lit mineur**

Le lit mineur d'un cours d'eau est le canal principal où s'écoule normalement l'eau. En cas de crue ou d'inondation, l'eau peut déborder de ce canal et envahir une zone plus large appelée lit majeur.

##### **I.4.1.2. Le lit majeur**

Le lit majeur peut être divisé en deux parties distinctes : une zone d'écoulement située près du lit mineur où le courant est plus rapide, et une zone de stockage d'eau où le courant est plus lent. Cette zone de stockage est cruciale car elle permet d'atténuer la montée des eaux en aval, en ralentissant leur progression.



Source : <http://smabv.fr/wp-content/uploads/2021/08/htd.png>

**Figure I.2 - Structure d'un cours d'eau**

#### **I.4.2. Rives et Berges :**

La berge est une pente naturelle qui sépare le lit mineur et le lit majeur d'une rivière. En revanche, la rive est un milieu géographique situé entre les milieux aquatique et terrestre. Elle commence au sommet de la berge et est constituée d'une zone plate et plus ou moins étendue qui est influencée par l'environnement aquatique.

#### **I.4.3. Ripisylve**

La ripisylve est une formation végétale naturelle située sur les rives des cours d'eau. Elle peut être constituée d'une véritable forêt alluviale qui s'étend sur plusieurs dizaines ou centaines de mètres de part et d'autre du lit mineur. Le rôle de la ripisylve sur les crues peut être important : lorsqu'elle occupe une part significative du lit majeur, elle augmente notablement la rugosité du lit. Cela a deux conséquences hydrauliques importantes :

- Une diminution des vitesses dans le lit majeur, réduisant ainsi les effets érosifs du courant.
- Un écrêtement des crues en aval.

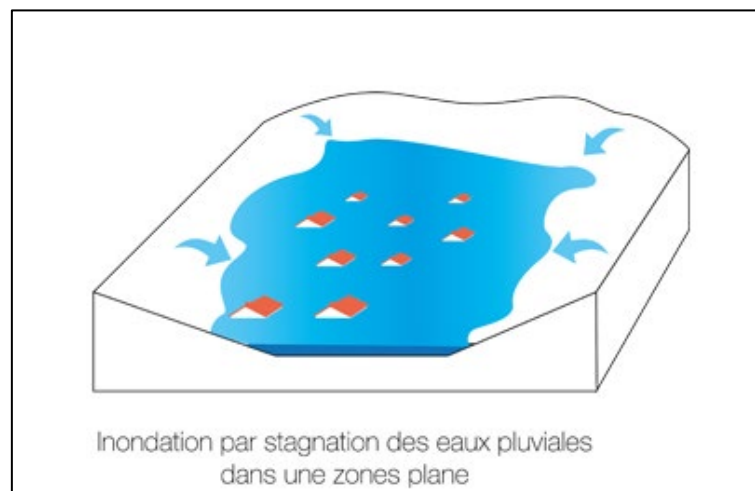
#### I.4.4. Alluvions et substratum :

Les alluvions sont des matériaux, tels que des sédiments fins ou grossiers, qui sont alternativement déposés ou enlevés par le courant d'une rivière. Elles recouvrent généralement le substrat, qui est une couche formée de roches plus ou moins dures telles que des schistes, des grès ou des marnes. [DEGOUTTE, 2012]

### I.5. Les eaux d'inondations

#### I.5.1. Stagnation d'eaux pluviales

Les inondations causées par une capacité insuffisante d'infiltration ou d'évacuation des sols et des réseaux d'eaux pluviales pendant les pluies anormales sont courantes. Dans les zones urbaines, les zones de dépression ou à pente très faible où l'eau de pluie peut stagner sont souvent responsables des inondations des quartiers les plus bas. Lorsque ces inondations touchent des zones étendues, elles sont appelées inondations de plaine. Bien que ces inondations ne présentent généralement pas de danger pour la vie humaine, elles peuvent causer des dommages matériels parfois importants. [C.N.F.P.T, 2004]



Source : <http://www.risquesnaturels.re/>

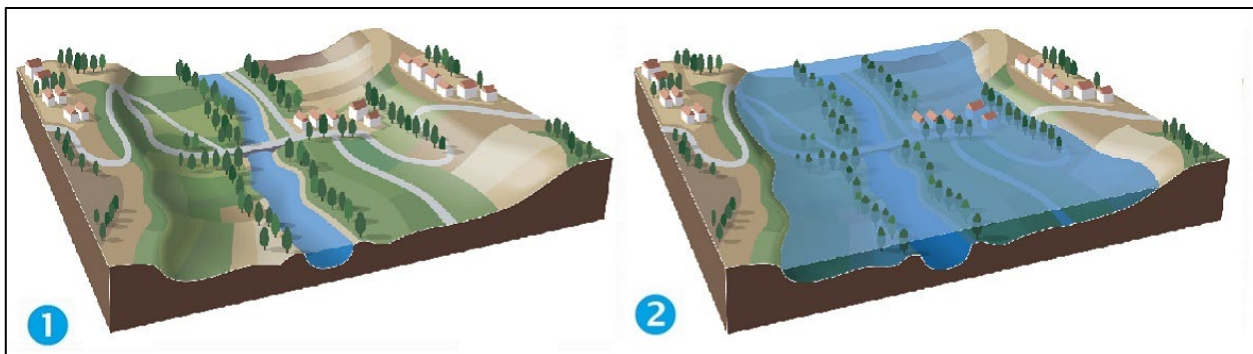
**Figure I.3** - Inondation par stagnation d'eau pluviale

#### I.5.2. Débordement des eaux d'un cours d'eau :

Des pluies violentes ou prolongées peuvent augmenter le débit des cours d'eau au point de provoquer des débordements, inondant des zones de faible altitude et de faible pente en aval des rivières. Les dégâts peuvent être importants et il existe un risque de noyade, en particulier lors du franchissement de gués lors de l'arrivée de l'onde de crue. Les débordements peuvent prendre deux formes :

### I.5.2.1. Inondation par débordement direct :

Inondation par débordement direct (Fig. I.4), le cours d'eau sort de son lit mineur pour occuper son lit majeur, qui est un espace occupé par le cours d'eau lors d'une inondation. Cela se produit par submersion de berge ou par contournement d'un système d'endiguement limité. Le lit mineur correspond à l'espace dans lequel s'écoule habituellement le cours d'eau. Ce type d'inondation peut causer des dégâts importants, notamment en cas de submersion de zones habitées ou de terres agricoles.



Source : <https://sedipecc.com>

*Figure I.4 - Inondation par débordement direct*

De manière générale, il est commun de catégoriser les phénomènes responsables des débordements directs en deux grandes classifications :

- Les crues océaniques, sont des phénomènes qui se caractérisent par des précipitations abondantes et prolongées sur plusieurs jours ou semaines. Elles engendrent une augmentation du débit des grands fleuves de plaine et de leurs affluents, causant des débordements lents et durables. Ces inondations sont connues sous le nom d'inondations fluviales. En revanche, sur les petits affluents des grands fleuves ou dans les parties les plus en amont du cours, les montées d'eau peuvent être plus rapides.
- Les crues torrentielles sont des phénomènes soudains et violents qui se produisent généralement dans les petits cours d'eau de la région méditerranéenne ou en montagne. Elles sont causées par des pluies intenses et localisées d'origine orageuse qui peuvent se produire en quelques heures ou sur une ou deux journées.

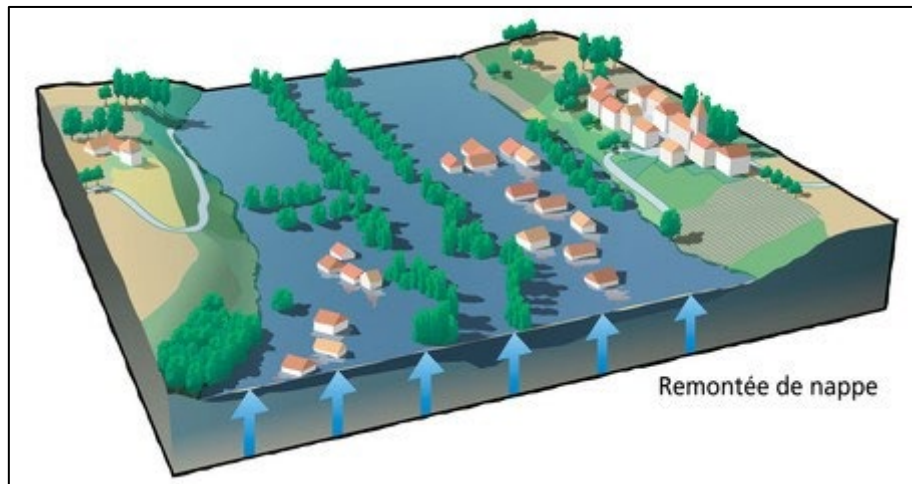
Ces catégories de crues peuvent être trop générales pour décrire précisément les phénomènes d'inondation. Les temps de propagation, la violence des phénomènes, et la difficulté de prévision peuvent varier considérablement d'une zone à une autre. Ainsi, même dans les zones considérées



comme ayant un climat océanique, les inondations peuvent être rapides et violentes. Il est donc important de comprendre les caractéristiques locales de la submersion pour pouvoir prévoir et gérer les risques d'inondation de manière efficace.

#### **I.5.2.2. Inondation par débordement indirect :**

L'inondation par remontée d'eau peut avoir différentes causes telles que la remontée de l'eau dans les réseaux d'assainissement ou les eaux pluviales, ou encore la remontée des nappes souterraines (Fig. I.5).



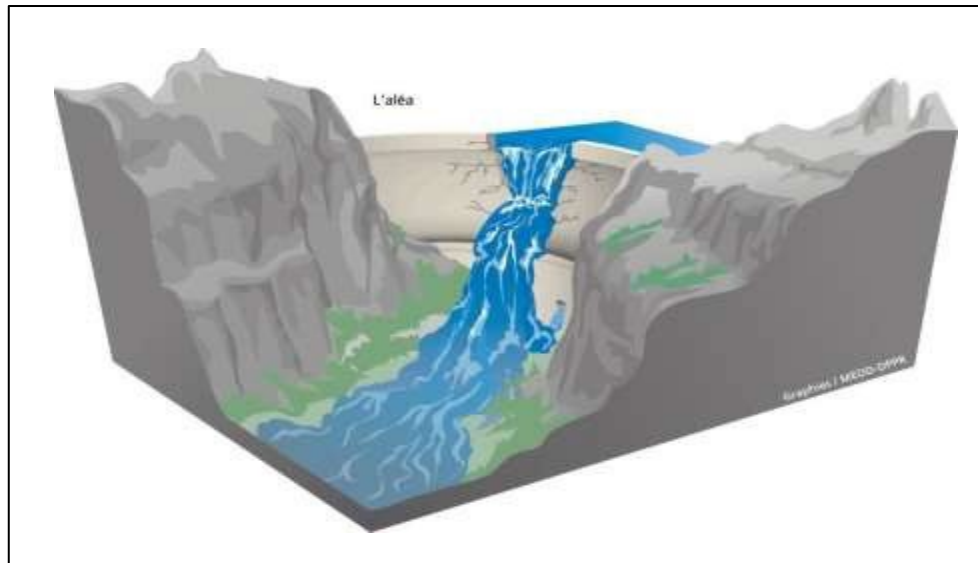
Source : <https://www.georisques.gouv.fr/>

**Figure I.5 - Inondation par débordement indirect**

Ces phénomènes sont complexes à anticiper, en particulier lorsqu'ils sont causés par des problèmes de fonctionnement du système en période de crue, tels que des équipements de pompage des eaux usées insuffisamment dimensionnés ou dysfonctionnels qui ne permettent pas leur évacuation vers la rivière en crue, ou la défaillance d'ouvrages empêchant l'intrusion des crues dans le réseau. Leur prévision est souvent basée sur les événements passés que le site a connus. [C.N.F.P.T, 2004]

#### **I.5.3. Les eaux issues de la rupture d'ouvrages ou d'embâcles**

Les rivières endiguées peuvent subir des inondations soudaines, soit par débordement au-dessus de la digue, soit par rupture de celle-ci (Fig. I.6). Si une rupture se produit, un mur d'eau de plusieurs mètres de haut peut entrer dans la zone endiguée à une vitesse de 3 à 4 km/h, laissant peu de temps pour une intervention d'urgence. De même, un embâcle peut bloquer un cours d'eau en formant une digue naturelle, entraînant une importante retenue d'eau. Cette digue peut être constituée d'éléments solides charriés par le cours d'eau ou provoquée par un glissement de terrain.



Source : [www.mementodumaire.net](http://www.mementodumaire.net)

**Figure I.6 - Rupture d'ouvrages ou d'embâcles**

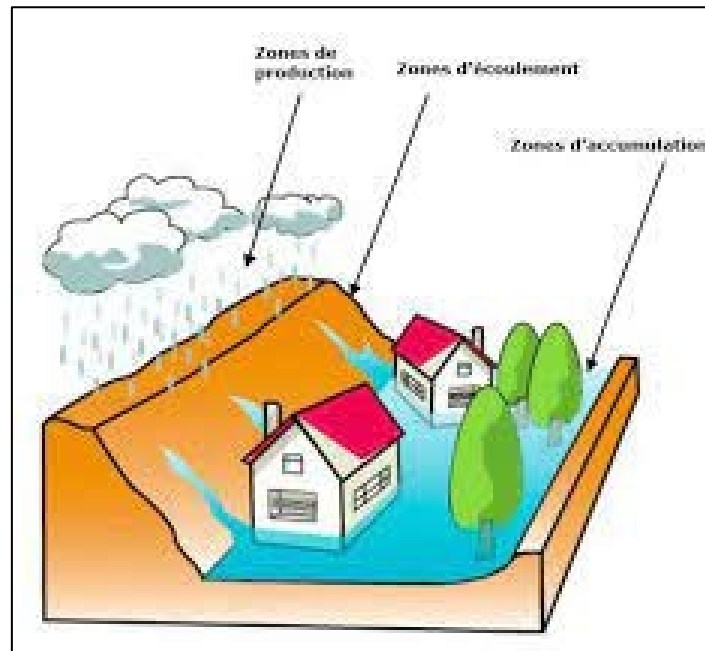
La lame déversant et l'affouillement sont des phénomènes qui peuvent provoquer la rupture brutale d'une digue, entraînant une augmentation soudaine du courant et la propagation d'une onde de crue destructrice. Cette onde de crue peut être particulièrement importante si la retenue était volumineuse et que la hauteur de la digue avant la rupture était importante. Dans ce cas, l'eau peut emporter des voitures, des caravanes et même des piétons.

D'autre part, une rupture d'embâcle peut se produire plusieurs jours après une période de pluies exceptionnelles ou l'apparition d'un mouvement de terrain.

#### **I.5.4. Ruissellement en secteur urbain :**

En milieu urbain, de fortes pluies (plusieurs centimètres de pluie par heure) peuvent causer un ruissellement très important en raison de l'imperméabilisation des sols (causée par les surfaces goudronnées, etc.), ce qui réduit l'infiltration. Ce ruissellement intense peut saturer les réseaux de drainage pluvial, provoquant des inondations dans les zones les plus basses (Fig. I.7). Ce phénomène est extrêmement localisé, intense, rapide et éphémère, mais l'accumulation d'eau dans les zones inondées peut persister plus longtemps.

Ce phénomène se produit dans des situations particulières, comme des versants très raides et/ou très imperméabilisés, des petits cours d'eau artificiels, un réseau d'assainissement sous-dimensionné, une topographie plane ou en cuvette, ou encore un sol gelé. [C.N.F.P.T, 2004]

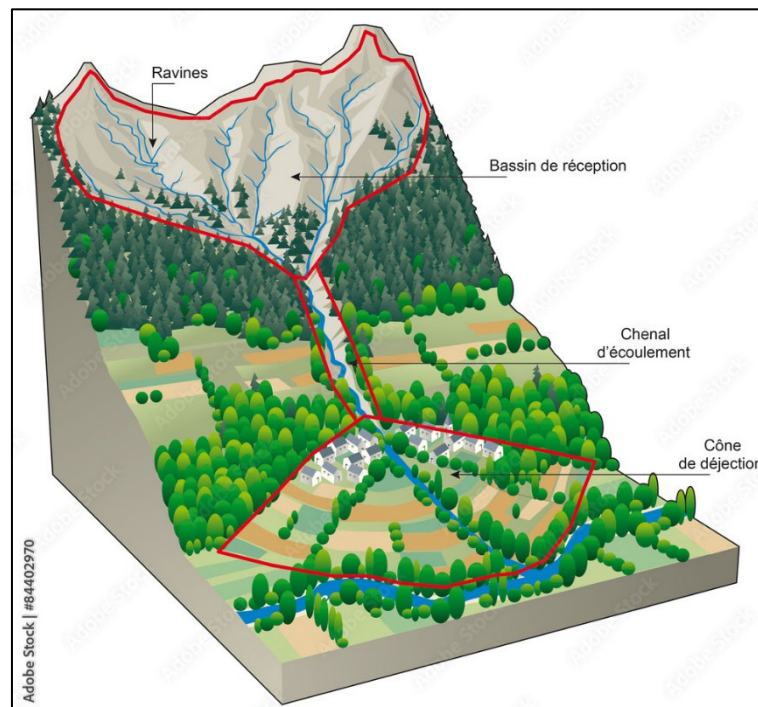


Source : <https://www.nord.gouv.fr/>

**Figure I.7 - Ruissellement en secteur urbain**

### I.5.5. Crues torrentielles :

Lorsqu'il pleut abondamment et soudainement dans un bassin versant d'un cours d'eau (Fig. I.8), le débit du cours d'eau peut augmenter considérablement en raison de la forte pente. Le cours d'eau transporte également des matériaux solides tels que des sables et des cailloux de tailles diverses vers l'aval.



Source : <https://stock.adobe.com/>

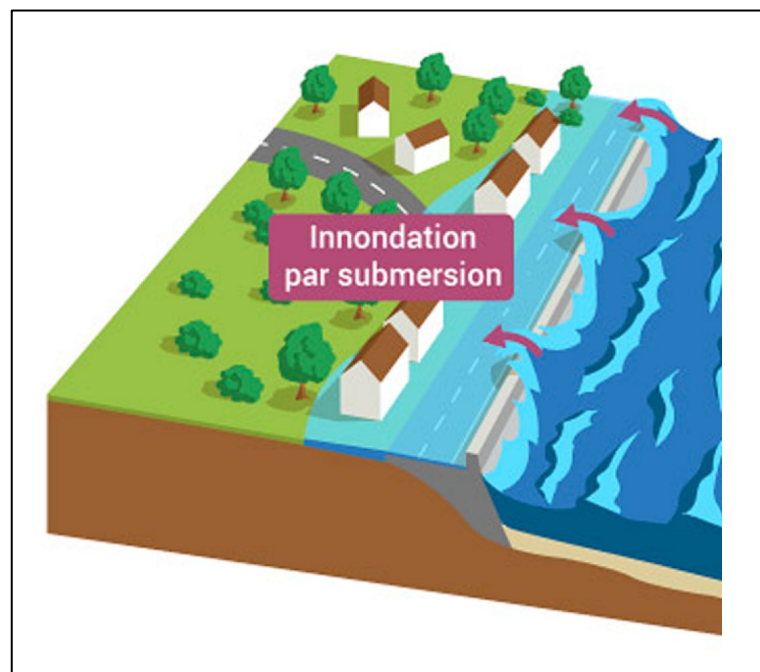
**Figure I.8 - Crue torrentielle**

Toutefois, en raison de la forme du lit ou de la présence d'obstacles tels que des ponts, des conduites d'eau ou des déchets ménagers, le lit peut être obstrué et le cours d'eau peut déborder, causant des dommages aux habitations et aux installations dans le voisinage. Cette montée soudaine des eaux est appelée crue éclair et constitue le risque humain le plus important. Ces crues ont des phénomènes à cinétique rapide qui se produisent dans les zones montagneuses, mais aussi sur les rivières alimentées par des pluies intenses.

La crue torrentielle peut emporter avec elle une grande quantité de matériaux tels que des sables, des cailloux et même des arbres, ce qui peut causer des dommages importants aux infrastructures et aux habitations situées sur son passage. La densité de l'eau peut également jouer un rôle dans la capacité de la crue torrentielle à emporter des objets lourds ou à déraciner des arbres.

### **I.5.6. Submersion des zones littorales ou lacustres :**

Les submersions marines (Fig. I.9) surviennent lorsqu'il y a des conditions météorologiques et marégraphiques sévères, telles qu'une forte dépression, des vents de mer, des marées de tempête et des ondes de tempête, qui provoquent des inondations temporaires dans les zones côtières.



Source : [www.eaufrance.fr](http://www.eaufrance.fr)

**Figure I.9 - Submersions marines**

En général, ces inondations touchent les terrains situés en dessous du niveau des plus hautes mers, mais il peut également arriver que des projections d'eau franchissent les ouvrages de protection et affectent des terrains situés au-dessus de ce niveau.

Les submersions sont dues :

- Si un cordon dunaire est rompu ou détruit à cause d'une érosion intense, cela peut entraîner le transport de grandes quantités de sédiments par les eaux marines et la création des « épandages de tempête ».
- Des projections de sable et de galets peuvent causer des dommages importants aux fronts de mer urbanisés lorsqu'il y a débordement ou rupture de digues ou d'ouvrages de protection, ou encore lorsque ces derniers sont exceptionnellement franchis par des « paquets de mer ».
- Des vagues de forte amplitude peuvent être causées par des glissements sous-marins, « en particulier sur la façade méditerranéenne ».

Les submersions sont de courte durée, allant de quelques heures à quelques dizaines d'heures, sauf dans les marais maritimes où elles peuvent durer exceptionnellement plusieurs jours en raison de leur origine. Ces inondations se manifestent par l'envahissement d'eaux salées particulièrement agressives.

Lorsque l'élévation du niveau de la mer s'ajoute à une surcote causée par les submersions, les conséquences peuvent être graves. En effet, depuis plus de 100 ans, on estime généralement que le niveau moyen des mers a augmenté d'environ 1,2 - 1,3, voire 1,5 mm/an. Cette élévation pourrait réduire la période de retour des inondations catastrophiques de ce type.  
[[www.urbanicites.hypotheses.org](http://www.urbanicites.hypotheses.org)]

## **I.6. Les paramètres d'une inondation**

### **I.6.1. Le débit**

Le débit est une mesure importante de l'eau qui coule à travers un cours d'eau à un endroit spécifique et à un moment donné, et elle est exprimée en m<sup>3</sup>/s. Le débit est déterminé par la hauteur de l'eau, la surface transversale de la section du cours d'eau et la vitesse de l'écoulement.

### **I.6.2. La vitesse d'écoulement**

Lors d'une inondation, la vitesse d'écoulement de l'eau est mesurée à son maximum à un point donné. Cette vitesse peut être si élevée qu'elle peut emporter des objets ou même des personnes. Elle peut également accroître le risque d'érosion des berges et exercer une pression dynamique sur les constructions, ce qui peut les fragiliser, les endommager ou les détruire.

C'est pourquoi il est important de surveiller et de mesurer la vitesse d'écoulement pendant une inondation afin de prendre les mesures nécessaires pour protéger les personnes et les biens.

### **I.6.3. La hauteur de submersion**

La hauteur de submersion est mesurée au point le plus élevé pendant une crue donnée. Cette mesure est importante car elle indique les risques potentiels pour les personnes, tels que les noyades, ainsi que les dommages directs causés par l'eau et indirects causés par la pression statique exercée sur les biens. La laisse d'inondation, qui est la marque laissée par le niveau le plus élevé de l'eau, indique également les dégradations potentielles causées par la crue en fonction de sa durée, de la hauteur de submersion et de la vitesse d'écoulement. Ces mesures sont essentielles pour évaluer les risques liés aux crues et prendre les mesures nécessaires pour protéger les personnes et les biens. [M.D.E, 2004]

### **I.6.4. La durée de submersion**

La durée de submersion fait référence à la période de temps pendant laquelle une surface de terrain donnée reste inondée. Cette durée peut varier considérablement, allant de quelques heures à plusieurs mois, en fonction de la gravité et de la durée de la crue. Cette mesure est importante car elle peut avoir un impact sur l'état du terrain et la croissance des plantes, ainsi que sur la capacité des structures à résister à la pression de l'eau. La durée de submersion est donc un paramètre important à prendre en compte lors de la planification et de la gestion des risques liés aux crues.

### **I.6.5. La fréquence et la période de retour**

Les crues historiques sont analysées afin de les classer en fonction de leur fréquence, qui est la probabilité qu'un événement similaire se produise chaque année ou le nombre moyen d'événements similaires qui se produisent pendant une période donnée dans une zone donnée. Cette classification est basée sur des données telles que les dates, les secteurs concernés, les débits et les laisses laissées par les crues historiques.

En revanche, la période de retour est l'intervalle moyen de temps entre les événements similaires, tels que des crues d'intensité comparable en termes de débits, de hauteurs ou de couples débit-hauteur, lorsqu'on observe les événements sur plusieurs siècles. Par exemple, une crue centennale est une crue de forte amplitude qui a une probabilité de se produire chaque cent ans. Cette mesure est importante car elle permet de comprendre l'ampleur des risques liés aux crues et de prendre les mesures nécessaires pour protéger les personnes et les biens en fonction de la fréquence et de la gravité des événements passés.

### **I.6.6. Le volume de matière transportée**

Le transport solide désigne le volume de matériaux tels que les argiles, limons, sables, graviers, galets, blocs, etc., aussi sont arraché des sols de bassin versant. Ces matériaux sont transportés par le courant soit en suspension dans l'eau, soit en étant déplacés sur le fond du lit, sous l'effet des forces exercées par le courant. Il est important de noter que le transport solide ne comprend pas les matériaux flottants tels que les bois morts.

## Historique des inondations en Algérie

---



## **II.1. Crue et/ou inondation : une menace permanente**

Les crues et les inondations sont un problème majeur pour le développement économique et social en Algérie, où ces phénomènes se manifestent de manière catastrophique. Ces inondations sont les catastrophes naturelles les plus destructrices et les plus fréquentes, entraînant d'importants dégâts matériels et humains.

Les différentes régions de l'Algérie font face régulièrement à des catastrophes naturelles, qui sont souvent exacerbées par d'autres facteurs amplifiant les crues. Ces événements dramatiques entraînent souvent de lourds dégâts matériels et humains et ne sont pas toujours liés à des conditions météorologiques exceptionnelles, mais surviennent dans de nombreuses régions à la suite d'épisodes pluvieux saisonniers qui ne sont rien d'exceptionnel.

L'inventaire des inondations catastrophiques dans tout le pays au cours des 30 dernières années montre que le risque d'inondation n'épargne aucune région et que ces événements sont imprévisibles dans le temps et l'espace. Il est en effet important de noter que les inondations ne sont pas seulement causées par des pluies exceptionnelles, mais peuvent également être le résultat d'autres facteurs, tels que l'urbanisation non contrôlée, le mauvais aménagement des bassins versants, l'utilisation excessive des sols, la déforestation, la destruction des zones humides et la négligence en matière d'entretien des infrastructures de drainage.

Il est donc crucial de mettre en place des stratégies de prévention et de gestion des risques d'inondation, notamment en améliorant la surveillance météorologique, en développant les infrastructures de drainage, en réglementant l'utilisation des sols, en sensibilisant la population aux risques d'inondation et en renforçant les capacités des organismes chargés de la gestion des risques de catastrophe. Il est également important de souligner que la prévention et la gestion des risques d'inondation sont des défis mondiaux, qui nécessitent une coopération internationale et une action coordonnée à tous les niveaux, notamment au niveau national, régional et international. En effet, les activités humaines peuvent avoir un impact considérable sur l'intensification des inondations. L'urbanisation anarchique et la construction d'infrastructures sur les zones inondables peuvent réduire la capacité des cours d'eau à absorber les eaux de pluie et augmenter les risques d'inondations.

De plus, le manque d'entretien, des réseaux d'assainissement et de collecte des eaux pluviales, peut entraîner une accumulation d'eau dans les zones urbaines. Par ailleurs, les facteurs géographiques et météorologiques jouent également un rôle important dans l'apparition des inondations. Les régions encaissées ou en pente, ainsi que les sols imperméables, sont plus susceptibles de subir des

inondations. Les précipitations intenses et prolongées peuvent également provoquer des inondations soudaines et dévastatrices.

Il est donc important de mettre en place des mesures de prévention et de gestion des risques d'inondations, en impliquant tous les acteurs concernés tels que les autorités locales, les urbanistes, les ingénieurs hydrauliques et les populations riveraines. Les mesures de prévention peuvent inclure des actions telles que l'interdiction de construire sur les zones inondables, la construction de réseaux d'assainissement efficaces, la gestion durable des déchets et la sensibilisation de la population à la gestion des risques d'inondations. [LAHLAH, 2004]

## **II.2. Causes et types d'inondations catastrophiques en Algérie**

Les inondations peuvent être amplifiées par des facteurs tels que la déforestation, l'urbanisation anarchique, l'obstruction des cours d'eau par des débris et des déchets, la construction de barrages et de digues qui peuvent modifier le régime hydraulique des cours d'eau, etc. Par conséquent, la gestion des bassins versants et des zones à risque d'inondation est cruciale pour prévenir les inondations et réduire leurs impacts. La mise en place d'un système d'alerte précoce, la construction de systèmes de drainage efficaces, la restauration des zones humides et la gestion durable des terres sont quelques-unes des mesures importantes pour réduire les risques d'inondations.

### **II.2.1. Les causes des inondations qui ont touché l'Algérie**

- Les inondations causées par des situations météorologiques remarquables, caractérisées par une forte pluviosité, sont très fréquentes en Algérie. Elles peuvent toucher plusieurs régions et provoquer des dégâts considérables. Les événements que nous avons cités en sont des exemples concrets. Les inondations de décembre 1957 des bassins de Mazafran et de la Sebaou, par exemple, ont été déclenchées par une crue soudaine et violente de l'oued Mazafran, qui a causé la mort de 1 500 personnes et d'importants dégâts matériels. Les inondations de l'automne 1969 en Algérie et en Tunisie ont également été dévastatrices, touchant de nombreuses villes et provoquant des pertes humaines et matérielles importantes. Les autres événements que nous avons mentionnés sont également des exemples marquants de ces inondations catastrophiques liées à des phénomènes météorologiques remarquables.
- L'impact de l'homme sur les inondations ne doit pas être négligé. Les constructions sur les rives des cours d'eau et les urbanisations anarchiques, ainsi que la mauvaise gestion des déchets et des eaux pluviales, contribuent grandement à l'aggravation des inondations lors

des averses saisonnières. Les inondations de Tiaret et de la plaine de Mzab en sont des exemples concrets. Il est donc important de prendre en compte ces facteurs dans la planification urbaine et la gestion des risques d'inondation.

- Les régions traversées par des oueds ou situées au pied d'une montagne (Ain Défla, Batna, Médéa) sont souvent plus exposées aux inondations en raison de leur environnement topographique défavorable. Les crues des oueds (Bordj Bou Arreridj, Oued R'hiau, Sidi Bel Abbés) peuvent rapidement déborder et inonder les zones urbaines environnantes, causant des dégâts matériels et humains importants. Les villes situées au pied d'une montagne sont également sujettes aux inondations car l'eau de pluie peut s'accumuler rapidement en raison de la topographie et des pentes naturelles, entraînant des crues soudaines et des inondations. Les inondations dans ces zones peuvent être exacerbées par des facteurs tels que l'urbanisation anarchique, la déforestation et le défrichement des terres, qui augmentent le ruissellement des eaux de pluie et la vulnérabilité aux inondations.

Les villes densément peuplées et mal planifiées sont plus vulnérables aux inondations. Les infrastructures d'assainissement et de drainage ne sont souvent pas adaptées pour faire face aux fortes pluies, ce qui peut entraîner des dégâts matériels et des pertes humaines importantes. De plus, l'expansion urbaine incontrôlée peut entraîner une occupation des zones à risque, comme les plaines inondables, ce qui peut aggraver les conséquences des inondations. Il est donc important de prendre en compte les risques d'inondation lors de l'urbanisation et de mettre en place des mesures d'atténuation appropriées et d'éduquer les citoyens pour réduire les pertes humaines et matérielles.

### **II.2.2. Les types des inondations en Algérie**

- Les inondations provoquées par des crues torrentielles, également appelées crues éclair, se produisent généralement sur de petits bassins versants d'une superficie de quelques dizaines de kilomètres carrés. Elles sont souvent liées à des précipitations isolées et localement intenses, issues de phénomènes de convection tels que les tempêtes orageuses, qui se produisent principalement en automne et en été.
- Les crues de cette nature présentent un danger particulier en raison de leur caractère soudain et rapide. Des écoulements très rapides et violents peuvent se produire en moins d'une heure après une forte pluie, et les débits des cours d'eau peuvent augmenter de quelques mètres cubes par seconde à plusieurs milliers de mètres cubes par seconde en seulement deux ou trois heures.

- Ces crues sont très dangereuses en raison de leur soudaineté et de leur rapidité. Les ruissellements sont extrêmement rapides et violents, pouvant survenir moins d'une heure après la pluie, et les débits des oueds peuvent passer de quelques mètres cubes par seconde à plusieurs milliers en deux ou trois heures seulement. Un exemple notable de ces crues est l'inondation de la ville de Oued R'hiou en octobre 1993, où seulement 20 minutes de pluie ont entraîné 23 décès, 20 blessés et plusieurs disparus.

Les inondations qui affectent les grands bassins versants sont principalement causées par des précipitations abondantes et durables s'étendant sur de vastes étendues. Ces crues sont massives, de progression lente et facilement prévisibles, sauf lorsqu'elles sont soudainement amplifiées par des affluents plus courts et plus rapides. Ci-après, nous exposons une liste descriptive des inondations les plus dévastatrices survenues en Algérie au cours des 20 dernières années. [LAHLAH, 2004]

### **II.3. Les inondations catastrophiques en Algérie (1980 - 2019)**

Pour réduire les conséquences négatives des inondations, il est essentiel de bien identifier les zones à risque et les facteurs qui augmentent l'ampleur des pertes et des dégâts. Il est donc nécessaire de recenser les inondations afin de mieux comprendre les régions qui sont réellement à risque et de fournir des paramètres hydrologiques pour caractériser ces événements.

Dans la suite, on présentera brièvement les inondations qui se sont produites en Algérie au cours des trente dernières années, classées en quatre régions.

#### **II.3.1. La région du centre de l'Algérie**

##### **➤ Evènement du 27/01/1992**

Entre le 24 et le 28 janvier 1992, de fortes pluies généralisées ont touché plusieurs régions du centre du pays, provoquant des inondations catastrophiques dans les wilayas d'Alger, Blida, Tipaza, Chlef, Ain Defla et Médéa. Les dégâts sont considérables, notamment Des pertes en vies humaines et un nombre important de blessés. 637 familles ont été touchées par les intempéries, dont 361 à Alger, 106 à Tipaza, 87 à Médéa, 36 à Ain Defla et 23 à Chlef.

Les dégâts ont également été significatifs pour les infrastructures routières et les exploitations agricoles. Par exemple, le pont reliant Bougara à Bouinan a été emporté et des dommages ont été causés au pont reliant l'Arbaa à Bougara.

➤ **Evènement du 06/02/1996**

La région d'El Khemis à Ain Defla a subi une forte pluie pendant 17 heures et 35 minutes, atteignant une hauteur de 81 mm. Cette pluie a provoqué des débordements des cours d'eau qui mènent du massif Zaccar vers l'oued Cheliff, causant des dommages importants. Environ 158 familles ont été touchées et des dégâts matériels considérables ont été signalés.

➤ **Evènement du 24/09/1998**

Les wilayas de Bouira et de Médéa ont été frappées par de fortes pluies qui ont entraîné des inondations catastrophiques. Les conséquences de ces intempéries sont très graves : plusieurs personnes sont portées disparues et des centaines de familles ont été touchées par les inondations. Les dégâts matériels sont également considérables : plusieurs hectares de terres agricoles ont été endommagés, et des véhicules ainsi que du bétail ont été emportés par les crues. En outre, la perte d'une retenue collinaire dans la région d'Ahl El Ksar a été enregistrée.

➤ **Evènement du 28/09/2000**

Pluies diluviennes dans la région de Bou Saada, crues de l'Oued Bou Saada. Elles ont occasionné les dégâts : 1 mort et 1 disparu, 13 habitations détruites, 38 familles évacuées et 193 têtes de bétail emportées par les eaux.

➤ **Evènement du 10/11/2001**

Des pluies diluviennes ont causé des crues importantes dans le quartier de Bab-El-Oued, avec plus de 204 mm de pluie en 24 heures. Les zones basses ont été particulièrement touchées par les torrents de boue qui ont dévalé les pentes du bassin versant de l'Oued Koriche en amont. Malheureusement, cette catastrophe a entraîné la mort de plus de 800 personnes et 150 personnes ont été portées disparues.

Les pertes matérielles ont été considérables, évaluées à plus de 30 milliards de DA par les sources officielles. Cette catastrophe a également eu un impact psychologique important sur la population.  
[www.Protectioncivile.dz]

### **II.3.2. La région du l'Est de l'Algérie**

➤ **Evènement du 11/11/1982**

Des pluies orageuses violentes se sont abattues sur la région d'Annaba, notamment sur les Monts de L'Edough, sur une zone restreinte de quelques kilomètres seulement. Entre le 10 et le 11 novembre 1982, il y a eu une accumulation de 167 mm de pluie à L'Edough et 160 mm à Seraidi.

Les précipitations ont été intenses, avec 35 mm en 40 minutes seulement à Seraïdi, provoquant de fortes crues des oueds Bouhdid, Forcha, Zied et Aneb.

➤ **Evènement du 03/02/1984**

Une importante série de précipitations a affecté la région de l'Est de l'Algérie, avec une concentration maximale de pluie dans les montagnes de Constantine (120 mm) et les montagnes de la Medjerda (80 mm), provoquant des inondations catastrophiques dans toutes les wilayas de la région. Les dégâts sont considérables : Jijel a enregistré 20 décès, la perte de 500 têtes de bétail et des dégâts évalués à 50 millions DA. Constantine a vu 1 140 familles sinistrées et 200 hectares de cultures détruites. Skikda a eu 8 000 habitations envahies par les eaux. Guelma a signalé 3 disparus, 157 familles sinistrées, 2 ponts détruits et les canalisations d'AEP détruites à 100 %. Khenchla a enregistré 777 familles sinistrées et des pertes importantes en cheptel. Oum El Bouaghi a vu la destruction de 144 maisons et 429 familles sinistrées.

➤ **Evènement du 01/01/1985**

Des pluies exceptionnelles se sont abattues sur toute la région Est de l'Algérie, avec une accumulation de plus de 250 mm en 4 jours et de 195 mm en une seule journée. Les conséquences ont été désastreuses, avec des inondations très graves dans les wilayas de Jijel, Constantine, Skikda, Guelma, Annaba et El Tarf.

➤ **Evènement du 05/07/1987**

Des pluies orageuses très violentes se sont abattues sur Batna, avec une pluie journalière atteignant 57 mm. Les conséquences ont été tragiques, avec 2 décès et de nombreuses familles sinistrées. Les dégâts sont évalués à 175 millions de centimes.

➤ **Evènement du 01/09/1989**

La wilaya de Biskra a connu de fortes chutes de pluie accompagnées de grêles et d'un vent violent. Ces conditions météorologiques ont provoqué le débordement des oueds El Arab, El Mellah et El Kheddra. Les conséquences ont été tragiques, avec 2 décès et 35 blessés. En outre, 400 palmiers, des serres et des cultures de maraîchage ont été détruits.

➤ **Evènement du 21/09/1989**

Des pluies orageuses importantes ont touché la wilaya de Msila, en particulier la commune de Sidi Aïssa. Les dégâts sont importants, avec une personne disparue et plus de 200 familles touchées à Sidi Aïssa. Les crues ont également emporté deux ouvrages d'art chevauchant les RN 08 et RN 40, endommagé trois ponts sur les RN 40 et RN 60, emporté deux gués sur la RN 60 et détérioré

plusieurs kilomètres de routes. En outre, une retenue collinaire et douze digues de déviations ont été perdues.

➤ **Evènement du 06/09/1994**

Les fortes pluies orageuses qui se sont abattues sur la wilaya d'Oum El Bouaghi ont causé d'importants dégâts dans la région de Bir El Hanchir. Parmi les conséquences de ces intempéries, on peut noter la sinistralité de 350 familles ainsi que la détérioration de 43 habitations, 15 puits et de terres agricoles.

➤ **Evènement du 04/04/1996**

Des inondations catastrophiques ont frappé les wilayas d'Annaba et El Tarf, causant des dégâts considérables. À Annaba, on dénombre 5 morts et 10 blessés. Dans la wilaya d'El Tarf, les inondations ont endommagé 4 ouvrages et ont entraîné des pertes importantes dans les plaines agricoles de Bouteldja et El Iam.

➤ **Evènement du 12/ 2005 et 09/2009**

La wilaya d'Annaba a été frappée par une inondation catastrophique qui a été causée par une combinaison de facteurs physiques et anthropiques. Les conditions météorologiques extrêmes, la topographie, la géologie et l'hydrodynamique de la région, ainsi que la géomorphologie des bassins ont créé des zones propices à la stagnation de l'eau et à l'accumulation de sédiments pendant les crues, notamment dans les secteurs nord et ouest de la ville. De plus, l'urbanisation rapide et non réglementée des zones en amont du massif de l'Edough a entraîné la destruction des zones boisées, aggravant ainsi les risques d'inondation.

**Evènement du 02/ 2019**

Fortes pluies équivalant à 140mm, soit environ 51 jours de pluie, ont entraîné de graves inondations dans la wilaya d'Annaba. Les eaux ont submergé des dizaines de voitures, obligeant certains habitants à utiliser des barques pour se déplacer et s'approvisionner. [www.Protectioncivile.dz]

### **II.3.3. La région du Sud de l'Algérie**

➤ **Evènement du 03/06/1991**

Un violent orage local s'est abattu sur Ghardaïa, entraînant une accumulation de 8 mm de pluie en seulement 3 heures. Les dégâts étaient importants, neuf personnes ont perdu la vie suite à des intempéries importantes qui ont également causé des dommages importants aux troupeaux et aux

plantations de palmiers. Une partie de la digue d'El Atteuf a été détruite et les ponts, les routes et les systèmes d'assainissement près de l'oued Mzab ont été endommagés.

➤ **Evènement du 14/01/1999**

Suite à de fortes chutes de pluies, avec une mesure de 74 mm à Adrar, l'ouest du Sahara a été touché par des inondations importantes à Adrar. Les dégâts ont été considérables, avec notamment 12 personnes décédées et plusieurs autres portées disparues. Au total, 174 habitations ont été détruites dans les localités de Reggan, Tsabit, Timimoune et Adrar, toutes situées dans la région touchée.

➤ **Evènement du 15/09/2015**

Des précipitations intenses ont frappé la ville de Tamanrasset, causant des crues de l'Oued Amsel. Les dégâts ont été importants, avec 13 victimes et d'importantes pertes matérielles. [www.Protectioncivile.dz]

### **II.3.4. La région de l'Ouest de l'Algérie**

➤ **Evènement du 17/06/1989**

Des pluies diluviennes se sont abattues sur Tiaret, avec un orage violent d'une durée de seulement 15 minutes. Les conséquences ont été importantes, avec des affaissements de terrains et des dégâts matériels considérables.

➤ **Evènement du 20/10/1993**

La ville de Oued R'hiou a subi de fortes pluies orageuses qui ont causé de violentes crues de l'Oued Grigra, un petit cours d'eau situé en amont de la ville. Les conséquences sont dramatiques : 22 personnes ont perdu la vie, tandis que 20 autres ont été blessées et plusieurs sont portées disparues. De nombreuses familles ont été touchées par les inondations, entraînant de graves dégâts matériels.

➤ **Evènement du 14/10/2000**

La wilaya d'Ain Temouchent a été touchée par de fortes pluies en une période de quatre heures, provoquant des crues catastrophiques de l'oued El Maleh. Les conséquences ont été dramatiques, avec quatre morts et plusieurs personnes portées disparues. De nombreuses habitations ont été démolies et d'importants dégâts matériels ont été enregistrés dans la région.

➤ **Evènement du 23/10/2000**

Les régions d'Ain Sefra et Mechria ont été touchées par des pluies torrentielles entraînant des inondations catastrophiques dans la wilaya de Naama. [www.protectioncivile.dz]



## II.4. Historique des inondations dans la commune de Rebahia

Selon l'étude de BENTALEB et OUARDI réalisée en 2021, La commune de Rebahia a été victime de plusieurs crues et inondation, surtout l'agglomération de Rebahia qui est notre zone d'étude. Le tableau II.1, extrait de ladite étude, informe sur les principaux évènements.

*Tableau II.1 - Historicité d'inondations dans la commune de Rebahia*

Année	Commune	Zone inondé	Date
2008	Ouled Khaled	Chef-lieu	11.10.08
		Chef-lieu	12.10.08
		Chef-lieu	14.10.08
		Chef-lieu	25.10.08
		Chef-lieu	25.10.08
2009	Ouled Khaled	G.I.P.E.C	16.09.09
		Belhadj Benfakha	29.09.09
2012	Ouled Khaled	Cité Amir Abdelkader	10.11.12
		Cité Tahar Azoui	10.11.12
		Cité Tahar Azoui	13.11.12
		OFLA	13.11.12
		Lycée Boudiaf	13.11.12
		Bidonville	13.11.12
		Ecole Khadari	14.11.12
2013	Ouled Khaled	Cité Khelil Yahia	25.04.13
		Cité Tahar Azoui	28.04.13
		Cité Amel	09.09.13
2014	Ouled Khaled	Chef-lieu	22.09.14
		Chef-lieu	28.09.14
		Cité 105 Logements	29.09.14
		Chef-lieu	12.10.14
2019	Ouled Khaled	Cité 105 logements	11.09.19

Source : [Bentaleb et Ouardi, 2021]

## II.5. Les inondations de Mai 2023 en Algérie

Les inondations ont encore frappé le Nord de l'Algérie et ont montré que ce pays est très vulnérable. Des pluies torrentielles qui ont assez duré pour provoquer des crues et des inondations au niveau de plusieurs villes du pays : Tipaza, Khenchela, Guelma, Boumerdès, El Tarf, etc.

D'après le bilan rendu public par le ministère de l'Intérieur et des collectivités locales, deux personnes sont mortes suite aux pluies diluviennes qui se sont abattues sur plusieurs wilayas de l'Est et du Centre de l'Algérie. Les pluies diluviennes ont provoqué d'importants dégâts matériels aux infrastructures routières, aux habitations, aux établissements scolaires, etc. La photo, de la figure II.1, est une illustration parfaite des dégâts causés par ces récentes inondations.



Source : <https://www.aps.dz/>

**Figure II.1** – Illustration des dégâts causés par les inondations de Mai 2023 en Algérie

## Chapitre III

# La météorologie

---

### **III.1. La météorologie**

La météorologie est une science qui étudie les phénomènes atmosphériques, tels que la température, la pression atmosphérique, la précipitation, la vitesse et la direction du vent, l'humidité, la formation de nuages, la foudre et les ouragans, ainsi que leur relation avec les variations à court terme de la météo et les changements climatiques à plus long terme. Cette discipline s'appuie sur des modèles mathématiques et informatiques pour comprendre et prévoir les conditions météorologiques, ainsi que sur des observations en temps réel de l'atmosphère.

La météorologie est largement utilisée dans de nombreux domaines, tels que l'agriculture, l'aviation, la navigation maritime, la production d'énergie, la gestion des ressources en eau, la planification urbaine et la gestion des catastrophes naturelles. En plus de comprendre et de prévoir les conditions météorologiques, la météorologie est également étroitement liée à d'autres domaines de recherche, tels que la climatologie, l'océanographie, la physique atmosphérique et la chimie atmosphérique.

La météorologie est utilisée pour comprendre les phénomènes naturels, tels que les tempêtes et les ouragans, et pour développer des techniques de prévision afin de minimiser les dommages causés par ces événements. Elle est également utilisée pour étudier l'impact des activités humaines sur le climat et pour développer des stratégies d'adaptation au changement climatique. La météorologie est une discipline en constante évolution, qui utilise de plus en plus les technologies modernes, telles que les satellites, les radars et les modèles numériques, pour améliorer la précision des prévisions météorologiques et climatiques. [STRACHEY, 2006]

#### **III.1.1. Les principes de base de la météorologie**

Les conditions météorologiques que nous observons sont créées par l'interaction entre l'atmosphère terrestre et le rayonnement solaire. La météorologie repose sur un ensemble de principes scientifiques qui expliquent cette interaction. Dans cette section, nous aborderons les principes fondamentaux de la météorologie, notamment :

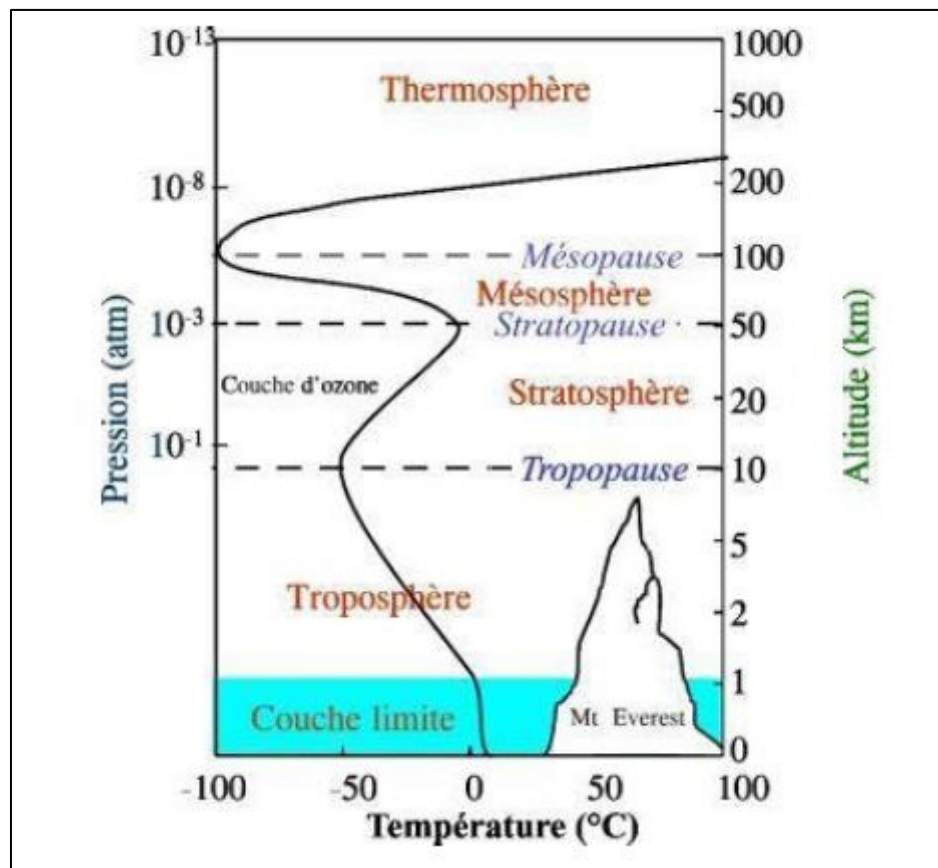
##### **III.1.1.1. L'atmosphère et ses propriétés**

La terre est entourée d'un manteau de gaz appelé l'atmosphère, qui se concentre principalement dans les premiers 5000 mètres. C'est considérablement faible comparé au rayon terrestre de la terre 6 400 000 mètres. En fait, si la Terre était de la taille d'une orange, l'atmosphère ne serait pas plus épaisse qu'une feuille de papier. Néanmoins, l'atmosphère joue un rôle vital dans la création des

conditions propices à la vie sur Terre. En effet, elle est la force motrice derrière les conditions favorables à l'épanouissement de la vie sur notre planète.

### III.1.1.2. Les différentes couches de l'atmosphère

Il existe quatre couches dans les 500 premiers kilomètres de l'atmosphère, distinguées en fonction de la répartition verticale des températures : la troposphère, la stratosphère, la mésosphère et la thermosphère (Fig. III.1).



Source : [www.atmo-franche-comte.org](http://www.atmo-franche-comte.org)

**Figure III.1 - Structure verticale de l'atmosphère**

#### III.1.1.2.1. Troposphère

La première couche de l'atmosphère est la troposphère, qui s'étend entre 8 km aux pôles et 16 km au-dessus de l'Équateur. La tropopause marque la frontière entre la troposphère et la stratosphère, et se caractérise par une stabilisation de la température. À mesure que l'altitude augmente, la température diminue en moyenne de  $0,60^{\circ}\text{C}$  tous les 100 mètres en raison de la raréfaction de l'air et de l'éloignement progressif du sol. La troposphère est la plus dense des quatre couches de l'atmosphère, contenant jusqu'à 75% de la masse totale de l'atmosphère. Elle est principalement composée d'azote (78%) et d'oxygène (21%) avec de faibles concentrations d'autres gaz en trace. La majeure partie de l'humidité atmosphérique se trouve dans la troposphère.

La tropopause marque la fin de la troposphère, au-delà de laquelle la température commence à augmenter dans la stratosphère. Cette augmentation de la température limite la convection d'air au-delà de la tropopause, confinant ainsi la plupart des phénomènes climatiques (tels que les nuages porteurs d'orages et les cumulonimbus) à la troposphère. La troposphère est la couche la plus agitée de l'atmosphère, constamment en mouvement vertical et horizontal.

#### **III.1.1.2.2. Stratosphère**

La stratosphère est la deuxième couche majeure de l'atmosphère, située au-dessus de la troposphère et séparée d'elle par la tropopause. Elle s'étend à une altitude d'environ 12 à 50 km, bien que sa limite inférieure soit plus élevée à l'équateur et plus basse aux pôles. La stratosphère est caractérisée par une augmentation de température avec l'altitude, atteignant près de 0°C en haut de la couche. Cette élévation de température est due à l'absorption des rayons ultraviolets (UV) du Soleil par la couche d'ozone. En conséquence, la stratosphère est très stable et manque de turbulence atmosphérique, ce qui la rend presque exempte de nuages et de phénomènes météorologiques. La stratopause marque la frontière entre la stratosphère et la mésosphère, qui se situe au-dessus. Les conditions atmosphériques de la stratosphère sont avantageuses pour les vols de longue distance, car elle est au-dessus des temps orageux et a des vents forts et réguliers.

#### **III.1.1.2.3. Mésosphère**

La mésosphère est également caractérisée par une faible densité atmosphérique, ce qui en fait une région très difficile à étudier. Les phénomènes qui se produisent dans la mésosphère sont très différents de ceux qui se produisent dans les couches inférieures de l'atmosphère. Les nuages noctiluques, qui sont des nuages lumineux nocturnes, se forment dans la mésosphère à des altitudes d'environ 80 kilomètres. Ces nuages sont faits de cristaux de glace et sont souvent observés pendant les mois d'été dans les régions polaires. La mésosphère est également la couche où se produisent les météores. Les météores sont des objets provenant de l'espace qui brûlent en entrant dans l'atmosphère terrestre. Les météores produisent une traînée lumineuse, communément appelée une étoile filante, lorsqu'ils brûlent dans la mésosphère.

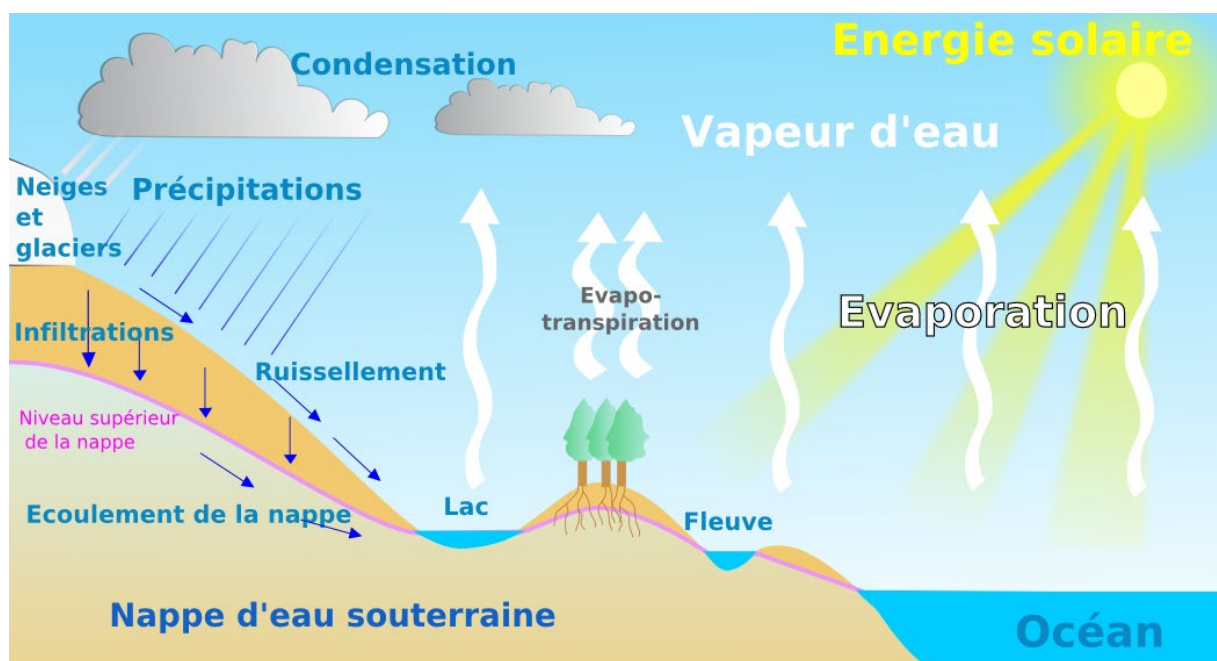
#### **III.1.1.2.4. Thermosphère**

Dans la thermosphère, la température augmente avec l'altitude et se maintient jusqu'à un niveau appelé "thermopause" situé de 250 kilomètres à 500 kilomètres suivant l'activité solaire, après quoi la température oscille entre 300°C et 1600°C suivant l'énergie qu'elle reçoit par le Soleil. Les températures sont élevées, mais comme la densité de matière est extrêmement faible, il ferait très froid pour nous, puisque les quelques molécules d'air ne sont pas suffisantes pour transférer une

chaleur convenable pour nous. La thermosphère est également la région où près des pôles se forment les aurores boréales et australes, en raison de l'interaction entre les particules solaires chargées et la haute atmosphère terrestre. [HENRI et CREMONIN, 2011]

### III.1.2. Les cycles de l'eau et leur rôle dans les précipitations :

Le cycle de l'eau est un phénomène naturel qui permet le renouvellement de l'eau sur Terre (Fig. III.2). Ce cycle commence par l'évaporation de l'eau depuis les surfaces liquides, comme les océans, les lacs, les rivières et les nappes phréatiques, sous l'effet du rayonnement solaire. L'eau vaporisée se transforme en nuages qui peuvent se déplacer sur de longues distances transportant l'eau dans l'atmosphère.



Source : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle\\_de\\_l'eau](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_de_l'eau)

**Figure III.2 - Les cycles de l'eau**

Lorsque ces nuages se refroidissent, l'eau qu'ils contiennent se condense et forme des gouttelettes qui peuvent retomber au sol sous forme de précipitations, comme de la pluie, de la neige, de la grêle ou de la bruine. Cette eau tombe sur le sol, s'infiltre dans les nappes souterraines ou s'écoule vers les rivières, les lacs et les océans.

L'eau qui s'infiltre dans les sols peut être utilisée par les plantes ou rejoindre les nappes souterraines où elle peut être stockée pendant de longues périodes. Cette eau peut ensuite être pompée pour l'irrigation ou pour l'approvisionnement en eau potable.

Le cycle de l'eau est donc un processus complexe qui permet le renouvellement de l'eau sur Terre et qui est essentiel pour la survie de toutes les formes de vie.

Le soleil est l'élément clé du cycle de l'eau, car il fournit l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau dans les océans, les lacs et les rivières. L'énergie solaire est également responsable de la fonte des glaciers et des neiges, qui libèrent de l'eau liquide dans les rivières et les lacs.

L'évapotranspiration, qui est la combinaison de l'évaporation de l'eau libre dans les océans et les rivières, et de la transpiration des plantes, est une étape cruciale du cycle de l'eau. Elle permet de maintenir l'humidité dans l'atmosphère et de réguler la température de la planète.

Le ruissellement de surface est également important car il transporte l'eau des rivières et des lacs vers les océans, et permet de maintenir un équilibre entre les différentes sources d'eau douce. L'infiltration de l'eau dans le sol permet quant à elle de recharger les nappes phréatiques et les aquifères.

En résumé, le cycle de l'eau est un processus naturel complexe qui permet de maintenir l'eau en mouvement constant sur la planète, tout en la filtrant et en la purifiant pour la rendre potable pour les êtres vivants. [<https://fondationdaniellemitterrand.org/le-cycle-de-leau/>]

Le cycle de l'eau comprend l'ensemble des processus de transformation de l'eau sur Terre, impliquant les phases principales suivantes :

#### **III.1.2.1. L'évaporation et la transpiration**

La température, le vent, les rapports énergétiques entre la surface et l'atmosphère ainsi que les caractéristiques physiques de la surface sont autant de facteurs qui influencent le processus d'évaporation. L'évaporation se produit principalement à partir des océans, qui couvrent 70 % de la surface terrestre et contiennent 97 % de l'eau disponible, mais elle peut également se produire directement à partir de l'atmosphère en temps de pluie, au niveau des plans d'eau, du sol humide et à travers la végétation. Dans ce dernier cas, on parle de transpiration, un processus par lequel la vapeur d'eau s'échappe des feuilles des plantes.

L'évapotranspiration regroupe le flux de transpiration et le flux d'évaporation. La sublimation est le processus d'évaporation directe à partir d'un manteau neigeux, sans passer par l'état liquide. Les nuages formés par l'évaporation peuvent être transportés par les vents et les courants, qui sont générés par le gradient de pression entre les centres de haute et basse pression. L'existence de ces centres est directement liée au gradient de température entre les différentes zones exposées au soleil. [BENNIS, 2009]



### III.1.2.2. Précipitation

Les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la Terre, sous forme liquide (bruine, pluie, averse) et/ou sous forme solide (neige, grésil, grêle), ainsi que les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre, etc.), sont toutes considérées comme faisant partie des précipitations. Ces précipitations sont provoquées par des changements de température ou de pression. Les nuages se déplacent dans l'atmosphère sous l'effet des vents. Lorsqu'il y a un changement climatique et par effet de gravité, les nuages deviennent plus lourds et retombent sur le sol sous forme d'eau pluviale, de grêle ou de neige. Environ 79% de ces précipitations tombent sur les océans, tandis que les 21% restants tombent sur la terre et alimentent les nappes phréatiques, soit par infiltration, soit par ruissellement. [HINGRAY et PICOUE, 2009].

Trois types de précipitations sont généralement distingués :

- Le premier type est les précipitations convectives. Elles sont de courte durée, très intenses et de faible extension spatiale, de type orageux. Ce type de précipitation est causé par une ascension rapide de masses d'air dans l'atmosphère.
- Le deuxième type est les précipitations orographiques, qui se produisent au niveau des massifs montagneux. Elles résultent de la rencontre entre une masse d'air chaud et humide et un relief topographique. L'intensité et la fréquence des précipitations assez régulières dépendent de l'altitude, de la pente et de l'orientation du relief.
- Le troisième type est les précipitations frontales, également appelées précipitations de type cyclonique. Elles se produisent lorsque deux masses d'air de températures et de vitesses différentes se rencontrent. Le glissement d'une masse d'air chaud sur une masse d'air plus froide donne naissance à des précipitations peu intenses mais longues et étendues. [SCHRIVER-MAZZUOLI, 2012]

### III.1.2.3. Interception

Une partie de l'eau des précipitations ne parvient pas jusqu'au sol. Une partie est interceptée verticalement par le couvert végétal et peut s'évaporer dans l'atmosphère. Elle peut également retourner au sol par égouttement de la végétation ou par ruissellement le long des troncs, dans le cas des forêts. [SCHRIVER-MAZZUOLI, 2012]

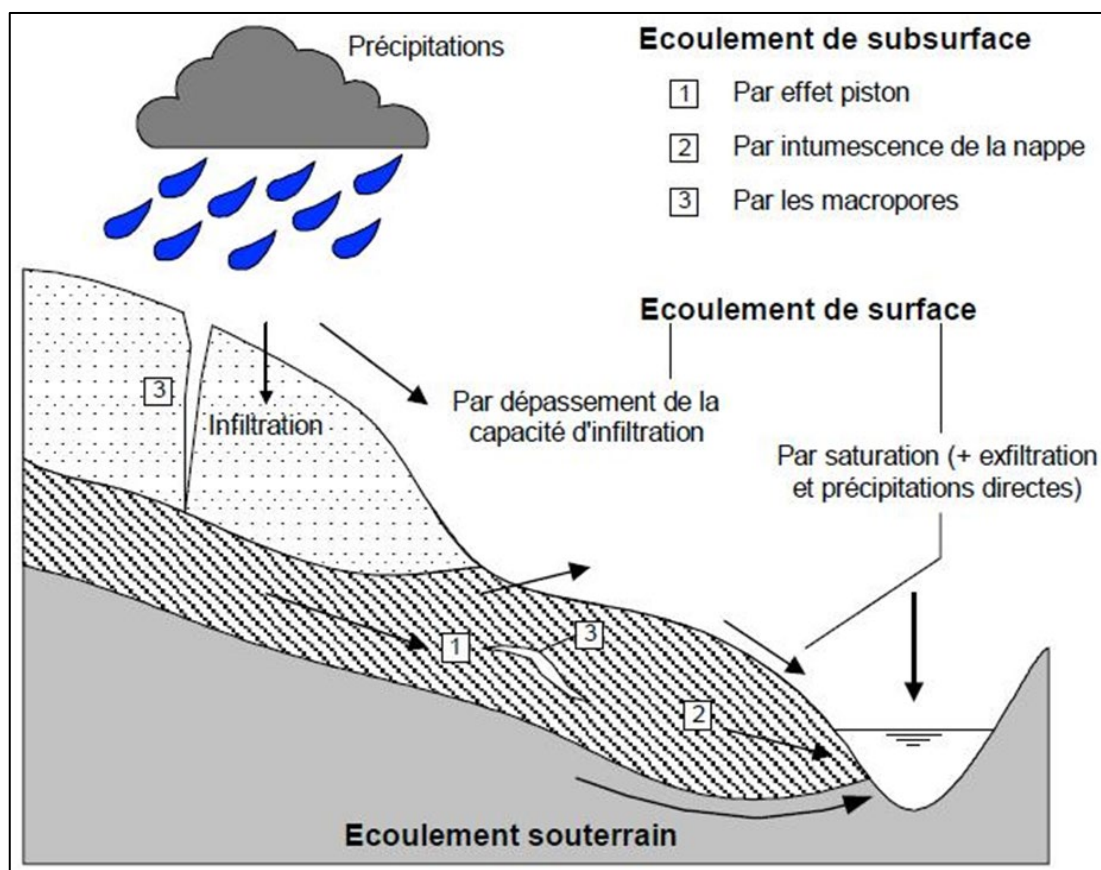
### III.1.2.4. Infiltration

Cette partie du cycle hydrologique est essentielle pour renouveler les réserves d'eau du sol, alimenter les eaux souterraines et reconstituer les nappes phréatiques.

L'infiltration se réfère au mouvement de l'eau pénétrant dans les couches superficielles du sol et à l'écoulement de cette eau dans le sol et le sous-sol, sous l'effet de la gravité et de la pression. La percolation, quant à elle, désigne plutôt l'infiltration profonde dans le sol, en direction de la nappe phréatique.

### III.1.2.5. Les écoulements

La perméabilité de la roche aquifère est un facteur important pour la vitesse de l'écoulement souterrain (Fig. III.3). Les roches poreuses, telles que les sables et les grès, permettent un écoulement plus rapide que les roches plus denses, comme le granite ou le schiste. La topographie joue également un rôle important dans la direction de l'écoulement souterrain. L'eau souterraine s'écoule généralement des zones de recharge élevées, comme les montagnes, vers les zones de décharge plus basses, comme les vallées. La recharge de la nappe phréatique peut varier en fonction de la saison, de la pluviométrie et de l'utilisation des sols.



Source : <https://docplayer.fr>

**Figure III.3 - Les écoulements**

## **III.2. Les instruments et les méthodes de mesure des précipitations**

### **III.2.1. Les radars météorologiques**

Les radars météorologiques sont des instruments de mesure utilisés pour détecter les précipitations dans l'atmosphère, telles que la pluie, la neige, la grêle et la bruine. Les radars météorologiques émettent des ondes électromagnétiques de haute fréquence qui sont réfléchies par les gouttes de précipitation dans l'atmosphère. En mesurant le temps qu'il faut pour que les ondes reviennent au radar, les radars peuvent déterminer la distance de la précipitation et sa densité.

La mesure des précipitations est importante en météorologie car elle peut avoir un impact significatif sur les conditions météorologiques et la vie humaine. Par exemple, des précipitations intenses peuvent causer des inondations, des glissements de terrain et des dommages aux infrastructures, tandis que des précipitations insuffisantes peuvent entraîner des sécheresses et des pénuries d'eau. Les radars météorologiques sont utilisés pour surveiller les précipitations et fournir des prévisions météorologiques plus précises. [TRIDON, 2011]

### **III.2.2. Les satellites météorologiques**

Les satellites météorologiques sont des instruments spatiaux utilisés pour surveiller les conditions météorologiques à grande échelle à partir de l'espace. Les satellites météorologiques sont équipés de capteurs et d'instruments pour mesurer les paramètres atmosphériques tels que la température de surface, les précipitations, la vitesse du vent, l'humidité et la couverture nuageuse. Les satellites météorologiques peuvent être géostationnaires ou en orbite polaire.

Les données collectées par les satellites météorologiques sont utilisées pour produire des images météorologiques, des cartes de prévision météorologique à court et à long terme. Ces données sont utilisées pour surveiller les phénomènes météorologiques tels que les tempêtes, les ouragans, les typhons et les cyclones, ainsi que pour prévoir les conditions météorologiques futures dans différentes régions du monde.

Les satellites météorologiques sont également utilisés pour surveiller les conditions environnementales, telles que la qualité de l'air, la couverture végétale et la fonte des glaces polaires. Les données collectées par les satellites météorologiques sont essentielles pour comprendre les changements climatiques à grande échelle et pour prendre des mesures pour les atténuer. [N. U. C. R., 2003]

### **III.3. La prévision météorologique**

#### **III.3.1. Les systèmes de prévision et d'annonce des crues et/ou inondation**

##### **III.3.1.1. Définition des systèmes de prévision et d'annonce des crues**

Afin de mettre en place un système de prévision de crues en temps réel efficace, il est nécessaire de connecter de manière organisée les différentes structures de base. Pour y parvenir, il est indispensable de disposer des éléments suivants :

- Des prévisions précises concernant les précipitations, exprimées en termes de quantité et de durée, pour lesquelles les modèles de prévision météorologique numérique sont indispensables.
- Un réseau de stations hydrométriques manuelles ou automatiques, reliées à un centre de commande par tout type de télémesure.
- Un logiciel de modélisation des prévisions de crues, connecté au réseau d'observation et fonctionnant en temps réel.

Les annonces de crues sont différentes des prévisions, car elles sont émises lorsqu'un événement se produit ou est imminent. Elles doivent être transmises à divers utilisateurs pour plusieurs raisons, notamment :

- Préparer les équipes d'intervention et le personnel d'urgence à intervenir.
- Avertir la population de la période et de la localisation de l'événement.
- Informer les personnes des impacts prévisibles, tels que les routes, les habitations et les structures de défense anti-inondations.
- Donner aux personnes et aux organisations le temps de mettre en place des mesures préventives.
- Dans les cas extrêmes, donner l'ordre d'évacuation et communiquer les procédures d'urgence. [O.M.M, 2011]

##### **III.3.1.2. Considérations météorologiques**

Les inondations sont souvent causées par des phénomènes météorologiques tels que la pluie, la neige ou la fonte des neiges. Prévoir avec précision et en temps opportun ces événements extrêmes est crucial pour anticiper et annoncer les crues. Les connaissances requises pour traiter cette question sont principalement de deux ordres : la climatologie associée aux inondations et la météorologie opérationnelle. Idéalement, le Service météorologique national, éventuellement en

collaboration avec des organismes de recherche appropriés, devrait être équipé pour fournir les deux types de connaissances.

La climatologie englobe la compréhension des systèmes météorologiques produisant des précipitations, de leur saisonnalité et de leur comportement extrême. Comprendre les types de systèmes météorologiques à l'origine des inondations est crucial pour déterminer les équipements d'observation et de prévision nécessaires. Par exemple, dans une région aride où les crues éclair sont fréquentes, il est essentiel de pouvoir identifier rapidement l'événement. Dans ce cas, les satellites et les radars sont des outils d'observation et de prévision plus efficaces que la prévision synoptique à grande échelle, qui a des limites d'utilisation.

Il est crucial d'avoir une compréhension de la saisonnalité des systèmes météorologiques produisant des précipitations, car cela a une incidence sur les missions du personnel, l'organisation des alertes et les modalités de travail associées. Dans les régions où la saison des pluies est bien définie, comme en Asie (mousson), en Afrique tropicale et en Amérique centrale, il est important de disposer d'un effectif suffisant pour assurer une surveillance continue 24 heures sur 24 en cas de conditions extrêmes et des mises à jour régulières de la situation. Cependant, dans les zones tempérées et continentales, les événements de crues sont plus aléatoires. Par conséquent, une certaine flexibilité est nécessaire au sein des organisations pour permettre au personnel de remplir correctement son rôle en termes d'annonce des crues, même si ses tâches quotidiennes peuvent être diverses.

Les données statistiques hydrométéorologiques, telles que les précipitations, sont cruciales pour les opérations de prévision et d'annonce des crues. Elles sont généralement traitées séparément des données climatologiques. L'objectif de ces données et statistiques est d'estimer la gravité et la probabilité des événements passés ou prévus et de les mettre en perspective. Les observations à long terme sont essentielles pour cela, ce qui nécessite des investissements dans l'installation et l'entretien de réseaux de pluviomètres, en complément des stations d'évaporation et/ou climatologiques. Il faut également garantir le personnel et les équipements nécessaires pour le traitement et l'analyse des observations, ainsi que pour maintenir une base de données flexible et accessible.

Pouvoir accéder en temps réel aux données hydrométéorologiques est essentiel pour faire fonctionner efficacement les systèmes de prévision et d'annonce des crues. Il est donc important que les pluviomètres soient équipés de télémesures pour permettre une communication directe avec le centre de contrôle de prévision et d'annonce des crues. Les télémesures permettent :

- Une surveillance continue de la situation.
- L'émission d'alertes en cas de dépassement de seuils de précipitations ou d'autres indicateurs de déclenchement.
- La fourniture de données pour les modèles de prévision pluie-débit.

Avoir accès à ces données en temps réel permet aux équipes de prendre rapidement les décisions nécessaires pour protéger la population et les biens en cas de crue. Cela implique d'investir dans des équipements de mesure et de communication, ainsi que de former et de soutenir le personnel en charge du traitement et de l'analyse des données.

### **III.3.1.3. Considérations hydrologiques**

La disponibilité d'informations hydrologiques en temps réel est essentielle pour le fonctionnement des systèmes de prévision et d'annonce des crues. Les principales exigences concernent les mesures de niveaux d'eau des lacs et rivières, le débit des rivières et parfois le niveau des nappes souterraines. Les stations d'observation jouent un rôle crucial dans la fourniture de ces données, qui sont utilisées pour les statistiques à long terme et envoyées en temps réel au centre de commande pour une surveillance opérationnelle.

La relation entre les niveaux d'eau en amont et en aval est également importante pour la prévision des crues. Les premiers systèmes reposaient sur la connaissance de cette relation ainsi que du temps de propagation de la crue entre les deux points, présentés sous forme de tableaux ou de graphiques de corrélations de niveau-à-niveau et de temps de parcours. Cependant, la modélisation des crues en temps réel a considérablement évolué, offrant des informations plus complètes et précises sur les prévisions de niveaux, la période de la crue et l'étendue des inondations. [O.M.M, 2011]

## **III.3.2. Principaux aspects des systèmes de prévisions des crues**

### **III.3.2.1. Considérations de base**

La nécessité de systèmes de prévision et d'annonce des crues est une réponse aux limites des mesures structurelles de protection anti-inondations. Étant donné que les populations et les biens matériels sont souvent situés dans des zones inondables, il est urgent de fournir des systèmes de prévision et d'annonce des crues adaptés pour répondre aux attentes des communautés en termes de sécurité et de protection des actifs. Les services de prévision et d'annonce des crues sont généralement des services d'État dont le but principal est de fournir des informations fiables et en

temps opportun aux services de protection civile et au grand public afin de permettre aux populations de prendre des mesures adéquates pour se protéger des inondations.

Au niveau local, les services de prévision et d'annonce des crues offrent de nombreux avantages, mais à grande échelle, ils opèrent en soutien des services de protection civile et d'intervention d'urgence. L'objectif d'un service national de prévision des crues est de fournir une gamme complète de prestations sur l'ensemble du territoire national. Cela peut nécessiter des compromis, comme une sophistication moindre du service ou de l'équipement dans les zones moins exposées, ou une approche par étapes qui se focalise d'abord sur les zones où le risque est élevé.

Pour concevoir un service de prévision et d'annonce des crues, il est important de comprendre les caractéristiques hydro morphologiques du bassin hydrographique, la topographie, la géologie et les sols, ainsi que le degré de développement des infrastructures, ainsi que les principaux processus physiques qui se produisent lors d'événements hydrométéorologiques. En outre, des considérations organisationnelles et opérationnelles doivent être prises en compte pour déterminer le type de service nécessaire ou réalisable techniquement et économiquement.

#### **III.3.2.1.1. Types de bassins hydrographiques**

Les bassins hydrographiques dans le monde sont très variés et présentent des particularités spécifiques en réaction aux événements météorologiques. Cependant, il est possible de classifier ces bassins en cinq grands types selon leur réponse spatiale et temporelle : les bassins urbains de petite taille, les bassins versants supérieurs et hydrographiques, les rivières de taille moyenne, les estuaires et les systèmes hydrographiques influencés par les eaux souterraines. Chacun de ces types de bassins a des caractéristiques et des délais de réaction différents, allant de quelques heures pour les bassins urbains à plusieurs semaines pour les grands bassins hydrographiques continentaux. Les estuaires ont des délais de propagation de plusieurs heures tandis que les systèmes hydrographiques influencés par les eaux souterraines peuvent connaître des inondations de longue durée, durant plusieurs semaines.

#### **III.3.2.1.2. Processus physiques**

Le type de service de prévision des inondations dépend principalement des processus d'inondation qui se produisent dans le bassin. Ces exemples ci-dessus illustrent ces processus et montrent que tout service de prévision doit pouvoir s'adapter à une variété de bassins différents.

Par exemple, les bassins supérieurs ont une réaction rapide aux précipitations intenses, qui peut être amplifiée si l'infiltration dans le sol est réduite en raison de la saturation du bassin. Les bassins

urbains présentent des caractéristiques spécifiques liées à la superficie des zones revêtues et à la capacité - ou au déficit de capacité - des systèmes d'évacuation des eaux pluviales. L'intensité des précipitations est un facteur significatif de la genèse des inondations, en particulier pour les inondations pluviales qui affectent souvent les quartiers situés en contrebas des villes ou les zones où l'évacuation des eaux de surface est insuffisante.

Les processus décrits peuvent être surveillés et prévus en combinant observation et modélisation. Il est important de disposer d'observations et de prévisions météorologiques de bonne qualité pour générer des estimations de crue par modélisation. Cela est particulièrement important dans les bassins montagneux et urbains, où la rapidité de transmission et de traitement des données est essentielle. Dans les grands bassins versants, les délais associés aux prévisions et aux observations peuvent ne pas être aussi essentiels, et un échantillonnage de données à des intervalles de quelques heures peut être suffisant.

Les processus majeurs des bassins versants supérieurs et urbains sont liés à l'interaction de l'infiltration et du ruissellement qui se combinent pour générer des écoulements concentrés dans les tronçons inférieurs des rivières et les zones topographiques basses. Les bassins hydrographiques situés en montagne et en milieu urbain présentent des défis particuliers pour garantir des délais de réaction suffisants. Il est donc essentiel de concevoir un service de prévision et d'annonce des crues adapté à chaque type de bassin hydrographique.

#### **III.3.2.1.3. Type de service**

Le niveau de service pour la prévision et l'alerte des crues varie selon la faisabilité technique et la justification économique de la protection des populations, des zones d'importance et des infrastructures vulnérables. Les raisons pour choisir un certain niveau de service comprennent le coût et la complexité de la modélisation, le nombre de sites vulnérables, la fréquence d'événements extrêmes, l'efficacité des moyens de surveillance et de modélisation, et le niveau de développement économique.

Différents types de services de prévision et d'alerte des crues sont disponibles, allant d'une simple alerte de crue basée sur des seuils à une prévision quantitative du niveau d'eau basée sur des outils sophistiqués de modélisation. La carte de vigilance et la prévision d'inondations sont deux autres services disponibles pour aider à protéger les populations et les zones vulnérables contre les crues.



#### **III.3.2.1.4. Délais de prévision**

Les délais de prévision peuvent varier selon le type de bassin hydrographique, mais le principe de base consiste à prévoir le temps nécessaire pour une mise en œuvre efficace des mesures de préparation. Les besoins de la communauté ou de la région cible déterminent la période minimum requise. Les propriétaires individuels et les entreprises peuvent nécessiter une à deux heures pour prendre des mesures de protection, tandis que la protection des infrastructures importantes et le déplacement des animaux peuvent nécessiter plusieurs heures. Pour les grandes rivières, les délais peuvent être de plusieurs jours pour l'évacuation des populations à risque. Les délais minimums doivent être flexibles et dépendre de la structure du bassin hydrographique et des équipements de prévision et d'annonce des crues. Dans les petits bassins hydrographiques urbains, il peut être difficile de fournir un système d'annonce des crues efficace en raison du temps de parcours de l'onde de crue. Pour résoudre ce problème, des systèmes sophistiqués d'alarme automatisée peuvent être mis en place.

Il existe trois situations pouvant affecter les délais de prévision. Dans la première, seules les prévisions basées sur les hauteurs d'eau historiques sont disponibles, permettant une extrapolation de la hauteur d'eau sur une période de quelques heures. Dans la deuxième, des données de pluviométrie télétransmises ou des informations pluviométriques par radar peuvent permettre une anticipation supplémentaire, soit par l'expérience d'un prévisionniste expérimenté, soit en utilisant ces données comme paramètres d'entrée dans un modèle de prévision hydrologique sophistiqué. Dans la troisième situation, des délais supplémentaires peuvent être fournis si un système de prévision de la pluviométrie est disponible, et si cette prévision peut être utilisée par le modèle de prévision du bassin hydrographique. Cela nécessite une coopération officielle entre le fournisseur du service météorologique et le service d'annonce des crues. [O.M.M, 2011]

#### **III.3.2.2. Exigences relatives aux données**

##### **III.3.2.2.1. Exigences techniques générales**

Les exigences relatives aux données nécessaires pour un système de prévision des crues dépendent de la nature du système et de ses objectifs spécifiques. Ces exigences techniques sont abordées dans les chapitres suivants du manuel. Les exigences globales pour un tel système sont les suivantes :

- Un sous-système de collecte de données en temps réel pour la réception et le traitement d'informations pertinentes telles que les données météorologiques, les mesures de débit et d'humidité du sol, qui peuvent être obtenues à partir de différentes sources, y compris des

stations manuelles ou automatiques, des plates-formes de collecte de données terrestres, des radars au sol, des satellites, des capteurs aériens, ainsi qu'un système d'information géographique (SIG) pour présenter les informations sous un format convivial .

- L'accès aux résultats d'un module de prévision météorologique numérique, y compris les modèles numériques de prévision du temps (PNT) pour les données de prévision météorologique, par exemple la prévision quantitative des précipitations (PQP), pendant les délais nécessaires pour le modèle de prévision de crue.
- Un module de combinaison de données pour optimiser l'utilisation des données de différentes sources, pour contrôler le réécalonnage des outils et techniques de mesure et pour initialiser la correction des erreurs du modèle.
- Un module de modélisation de bassin hydrographique convivial pour estimer le débit total à la sortie du bassin hydrographique et évaluer les incertitudes.
- Un module de modélisation de propagation pour estimer le déplacement de l'onde de crue le long du cours d'eau, les hauteurs d'eau, les effets des ruptures de digues et du fonctionnement des retenues, ainsi que l'interaction avec la plaine inondable et les zones inondées pour fournir une prévision des inondations liées à la crue.
- Un module de correction d'erreur intégrant un algorithme pour optimiser les estimations de débit basées sur la mise à jour des données fournies par le réseau de mesure ;
- Un module de modélisation des marées ou des estuaires si les effets de remontée influencent la crue.
- Des moyens de communication, des logiciels SIG et des systèmes d'aide à la décision appropriés pour générer des prévisions détaillées à différents niveaux et des prévisions cartographiées en temps réel indiquant les zones inondées. [O.M.M, 2011]

#### III.3.2.2.2. Données hydrologiques

Les informations en question se concentrent principalement sur la mesure du débit et de la hauteur de l'eau, et les instruments de surveillance doivent pouvoir enregistrer de manière précise les valeurs maximales de ces deux paramètres.

Pour élaborer un système de prévision des crues, il est nécessaire de mettre en place un réseau de stations de mesure. De nombreuses stations de mesure sont équipées d'instruments, allant des simples échelles limnométriques aux dispositifs de détection Doppler ou à ultrasons, qui permettent de mesurer la hauteur ou le débit de l'eau. La composition du réseau de stations de mesure dépend des exigences en termes de délais et de précision ainsi que des endroits où les prévisions doivent être effectuées (points de prévision). Ces derniers correspondent généralement

à l'emplacement d'une station de mesure, en partie en raison de l'approche de modélisation et en partie pour permettre une vérification opérationnelle. Toutefois, il peut également être nécessaire de désigner des points de prévision pour des tronçons spécifiques d'une rivière où l'impact des crues est potentiellement élevé, en particulier aux abords de petites et grandes villes ou de zones agricoles.

Si un point de prévision est situé à une station de mesure, il est important de contrôler régulièrement l'étalonnage précis (relation hauteur-débit). Les stations de mesure aux points de prévision doivent également être équipées de liaisons télétransmises avec le centre de commande opérationnel.

### **III.3.2.2.3. Données météorologiques**

Afin de mettre en place et de faire fonctionner un système de prévision et d'alerte des crues, il est nécessaire de disposer de données préalables telles que l'intensité et la durée des précipitations, les prévisions de précipitations ainsi que des données historiques pour étalonner les modèles pluie-débit.

Les données et les prévisions météorologiques en temps réel sont essentielles pour permettre une réaction rapide dans la prévision et l'alerte des crues. La distribution des précipitations est la variable clé parmi les données météorologiques, qui peut être obtenue à partir d'un réseau de pluviomètres ou d'une couverture radar. Ces données permettront une estimation plus précise des précipitations pour la zone modélisée, qu'il s'agisse d'un maillage ou d'une moyenne de bassin.

Les méthodes classiques de prévision des précipitations, qui utilisent des pluviomètres télétransmis et des radars météorologiques au sol pour indiquer la répartition spatiale, restent très répandues. Cette situation s'explique par le développement progressif de vastes réseaux hydrométéorologiques conventionnels et par leur rentabilité avérée. L'utilisation de données radar offre trois principaux avantages :

- Une résolution spatiale plus précise du champ de précipitations ;
- La disponibilité des données en temps réel ;
- La capacité de suivre les orages annoncés avant qu'ils n'atteignent la limite du bassin hydrographique concerné.

L'utilisation du radar présente des avantages, notamment lorsque les pluviomètres sont rares et/ou lorsque les orages sont localisés. Cependant, si les orages sont étendus, couvrant simultanément les sites de nombreux pluviomètres, ces derniers auront tendance à fournir des mesures de

précipitations plus précises que le radar. Néanmoins, le radar offre toujours une meilleure indication de la répartition spatiale.

#### **III.3.2.2.4. Données topographiques**

Les données topographiques sont essentielles pour les systèmes de prévision des crues. Les modèles hydrauliques nécessitent des données topographiques précises pour simuler les écoulements et l'extension des inondations.

Les cartes topographiques conventionnelles peuvent fournir des informations sur les reliefs et les bassins hydrographiques, mais les données topographiques plus détaillées sont maintenant accessibles grâce aux modèles numériques d'élévation (MNE). Les données satellites peuvent fournir des données topographiques à l'échelle mondiale, tandis que les relevés de télédétection par laser (LIDAR) ou par radar aéroporté à visée latérale (SLAR) peuvent fournir des données plus précises à des échelles plus petites. En combinant ces données avec un système d'information géographique (SIG), il est possible de visualiser l'étendue des inondations et l'infrastructure des plaines inondables pour faciliter la planification et la gestion des inondations. [O.M.M, 2011]

#### **III.3.3. Méthodes et modèles de prévision des crues**

Les modèles, de bassins versants, basés sur les précipitations sont des outils de modélisation utilisés pour estimer les débits d'eau dans un bassin versant, en utilisant des données de précipitations comme entrées. Ces modèles sont généralement utilisés pour évaluer l'impact des précipitations sur les écoulements d'eau de surface et de subsurface dans le bassin versant.

Il existe différents types de modèles de bassins versants basés sur les précipitations, mais la plupart sont basés sur des équations de bilan hydrique qui prennent en compte les précipitations, l'évapotranspiration, l'infiltration, la recharge de la nappe phréatique, le ruissellement de surface et le débit de base.

Les modèles de bassins versants basés sur les précipitations sont utilisés dans de nombreuses applications, notamment la gestion des ressources en eau, la prévision des crues, la planification de l'utilisation des terres et la modélisation des écosystèmes. Les données de précipitations sont généralement collectées à partir de stations météorologiques et peuvent également être obtenues à partir de données de télédétection. Ces modèles sont souvent utilisés en conjonction avec d'autres outils de modélisation, tels que les modèles de qualité de l'eau, pour évaluer l'impact des activités humaines sur les écosystèmes aquatiques et les sources d'eau potable. [O.M.M, 2011]

### **III.3.3.1. Surveillance et prévision des précipitations**

La surveillance des précipitations consiste en la collecte et l'analyse des données météorologiques pour mesurer la quantité, la fréquence, l'intensité et la durée des précipitations dans une zone géographique donnée. La surveillance des précipitations peut être effectuée à l'aide de différentes technologies, telles que les stations météorologiques, les radars météorologiques, les satellites et les capteurs de précipitations au sol.

La surveillance des précipitations est essentielle pour comprendre le climat local, prédire les conditions météorologiques futures et prévoir les risques de crues et d'inondations. Les données de surveillance des précipitations sont également utilisées dans la modélisation des bassins versants, la gestion des ressources en eau et la planification de la gestion des risques naturels.

La prévision des précipitations consiste à utiliser les données de surveillance pour prédire les conditions météorologiques futures, y compris les précipitations. Les prévisions de précipitations peuvent être réalisées sur de courtes échéances, comme quelques heures ou quelques jours, ou sur de plus longues échéances, telles que des mois ou des saisons.

Les prévisions de précipitations sont utilisées dans de nombreuses applications, telles que la planification agricole, la gestion des ressources en eau, la prévention des crues et des glissements de terrain, la sécurité publique, le transport et la production d'énergie. Les modèles de prévision des précipitations utilisent des données de surveillance, des modèles météorologiques et des algorithmes pour prédire la quantité, l'intensité et la durée des précipitations futures dans une zone géographique donnée.

### **III.3.3.2. Modélisation événementielle et simulation continue**

Les méthodes et modèles de prévision des crues utilisent deux types de modélisation : la modélisation événementielle et la simulation continue. La modélisation événementielle consiste à modéliser les précipitations et les écoulements pendant un événement de crue spécifique. Cette méthode est utile pour les prévisions à court terme car elle permet de prendre en compte les conditions météorologiques et hydrologiques actuelles et de simuler l'évolution de la crue au cours des prochaines heures ou jours.

La simulation continue, quant à elle, est basée sur une modélisation mathématique des processus hydrologiques et météorologiques qui régissent le comportement du bassin versant au fil du temps. Cette méthode permet de simuler les écoulements et les crues sur de plus longues périodes, généralement de plusieurs mois à plusieurs années. Elle est particulièrement utile pour l'évaluation des risques d'inondation à long terme et la planification de la gestion des ressources en eau.

En utilisant ces deux types de modélisation, les prévisionnistes peuvent fournir des prévisions de crues précises et fiables, adaptées aux besoins des utilisateurs tels que les gestionnaires de barrages, les autorités locales et les services de secours en cas d'urgence.

# Cadres Expérimental et méthodologique

---

## **IV.1. Présentation de la zone d'étude**

### **IV.1.1. Situation géographique**

Tout d'abord, la wilaya de Saïda occupe une position centrale dans l'Ouest du pays, elle est limitée géographiquement au Nord par la wilaya de Mascara, au Sud, par la wilaya d'El Bayadh, à l'Est, par la wilaya de Tiaret, à l'Ouest, par la wilaya de Sidi Bel Abbès, elle s'étend sur une superficie de 6765,40 km<sup>2</sup>. Elle est située à cheval entre l'atlas tellien (Fig. IV.1), représenté par les monts de Saïda et les monts de Daïa et le début de la steppe, presque à la limite de Chott chergui.

D'une superficie d'environ 300 ha, l'agglomération de Rebahia (A.C.L) se situe à la limite Sud de la commune d'Ouled Khaled au contact direct de la commune et de la ville de Saïda. Elle est traversée du Nord au Sud par la RN6 et d'Est en Ouest par le Chemin de Wilaya (CW07). Elle se trouve en position mitoyenne avec l'oued Saïda qui se trouve sur son côté Sud [BENTALEB et OUARDI, 2021].

Le choix de la zone d'étude a été plus motivé par le fait que cette étude est une continuité de celle de Bentaleb et Ouardi, qui a porté sur « Les inondations : Etude du risque dans la région de Saïda ».

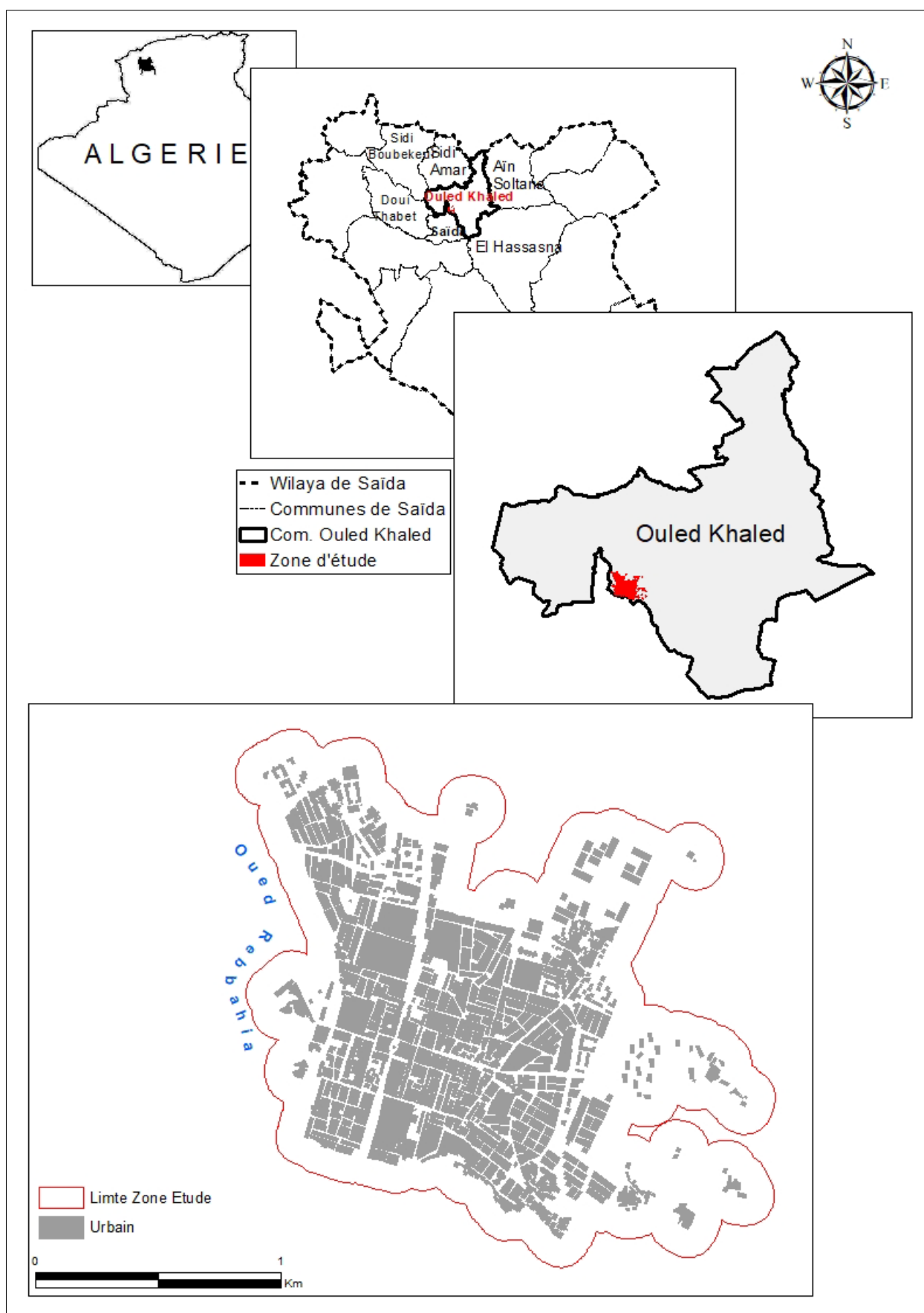
### **IV.1.2. Climat**

Par rapport au climat du pays, caractérisé par un contraste entre un climat méditerranéen au littoral et désertique au Sud, la wilaya de Saïda, située dans les hautes plaines oranaises, constitue un climat intermédiaire de type semi-aride. Cette zone est marquée par une sécheresse estivale opposée à un hiver pluvieux et froid.

### **IV.1.3. Pluviométrie**

Selon les mesures effectuées au niveau de la station de Saïda (Rebahia), la pluviométrie moyenne est comprise entre 250mm et 500 mm/an, avec des pointes sur le Nord Est, sur les zones montagneuses. Ces dernières années (depuis 1998), les quantités de pluie sont de plus en plus faibles et particulièrement, en hiver et au début du printemps. Cette pluviométrie se caractérise, également, par son irrégularité et ses formes orageuses, ce qui entraîne des dégâts sur les cultures et provoque, souvent, des inondations dévastatrices (Tab. II.1).





Source : BENTALEB et OUARDI, 2021

**Figure IV.1** - Situation géographique de la zone d'étude.

## **IV.2. Objectifs de l'étude**

L'objectif principal de ce travail, axé sur l'analyse statistique, est d'essayer de trouver les modèles d'ajustement adéquats pour les deux échantillons de données pluviométriques. Le premier est celui des précipitations annuelles. Au fait, on pense qu'une étude statistique d'ajustement, de ce type de données, pourra mettre en évidence le type de climat et de ses futures tendances. Le deuxième échantillon est relatif aux pluies journalières maximales. On sait que les valeurs extrêmes des variables climatiques, présentent un intérêt tout particulier lorsqu'on parle en termes de risque de crues et/ou inondations [BENKHALED, 2007]. Prédire la récurrence de pluies extrêmes fournit des éléments indispensables pour pouvoir anticiper et prévoir la construction d'infrastructures telles les digues et les ouvrages d'assainissement, afin de protéger efficacement les populations et leurs biens.

## **IV.3. Données et matériels utilisés**

### **IV.3.1. Collecte des données**

L'approche méthodologique adoptée dans le cadre de cette étude, s'appuie essentiellement sur l'utilisation des données exogènes relatives à la mesures des précipitations au niveau de la station de Saïda (Code : 111104). Il s'agit d'un relevé qui s'étale sur une période d'enregistrement de 1960 à 2019 pour les pluviométries mensuelles et implicitement annuelles ; et d'un autre relevé d'une période d'enregistrement de 22 ans (de 2000 à 2021) des pluies journalières maximales.

### **IV.3.2. Matériels utilisés**

On a opté pour le logiciel Hyfran-Plus. Ce dernier a été conçu pour l'analyse fréquentielle en hydrologie particulièrement pour les valeurs extrêmes. Il peut être utilisé pour n'importe quelle série de valeurs dans divers domaines avec différents pas de temps, tels que l'ingénierie, l'environnement, la météorologie, les sciences médicales, etc. ; Mais, à conditions que les observations soient Indépendantes.

Le logiciel comprend un certain nombre d'outils mathématiques puissants, flexibles et conviviaux utilisés pour l'analyse statistique des événements extrêmes. Il est aussi doté d'un Système d'Aide à la Décision (SAD) développé pour permettre de choisir la classe de distributions la plus adéquate pour estimer le quantile de période de retour [EL ADLOUNI et BOBEE, 2014].

## **IV.4. Approche méthodologique**

L'approche méthodologique adoptée est basée, essentiellement, sur l'utilisation des lois d'ajustement des données. Mais avant tout ajustement les échantillons de données doivent d'abord subir ce qu'on appelle les tests d'hypothèse.

### **IV.4.1. Test d'hypothèses**

Avant de procéder à l'ajustement d'une série de données à l'aide d'une loi de distribution statistique, il est primordial de vérifier si les données sont indépendantes. En effet, les observations doivent être indépendantes de la même variable aléatoire et provenir de la même distribution statistique, dans notre cas de la même station.

L'analyse fréquentielle passe en premier lieu par l'appréciation de la qualité des séries à posséder une fonction de distribution en utilisant les tests d'indépendance de Wald-Wolfowitz, de stationnarité de Kendall et d'homogénéité de Wilcoxon [KOUASSI et al., 2018].

Ces tests, que hyfran-plus possède, fonctionnent tous sur le même principe qui consiste à énoncer une hypothèse sur la population mère et à vérifier sur les observations constatées si celles-ci sont vraisemblables dans le cadre de cette hypothèse. L'hypothèse à tester est appelée  $H_0$  (hypothèse nulle) et s'accompagne impérativement de son hypothèse alternative appelée  $H_1$ . Le test s'attachera à valider ou à rejeter  $H_0$  (et par conséquent à tirer la conclusion inverse pour  $H_0$ ). Si le résultat du test amène à accepter l'hypothèse nulle  $H_0$ , alors la probabilité que la répartition soit aléatoire est élevée. En revanche, le rejet de  $H_0$  signifie que cette répartition des réponses recèle des informations qui ne semblent pas être aléatoires et qu'il convient d'approfondir l'analyse.

#### **IV.4.1.1. Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz**

Ce test est utile pour vérifier dans les observations l'existence d'une dépendance séquentielle qui conduirait, lorsque celle-ci est avérée, à définir le type et le niveau de celle-ci avant de continuer l'étude du processus des fréquences. Pour cela les hypothèses sont les suivantes :

- $H_0$  : les observations sont indépendantes ;
- $H_1$  : les observations sont dépendantes.

#### **IV.4.1.2. Test de stationnarité de Kendall**

C'est un test de corrélation sur le rang. Il sert à détecter les tendances dans les séries. Pour ce test, les hypothèses sont les suivantes :

- $H_0$  : il n'y a aucune tendance dans les observations ;
- $H_1$  : il y a une tendance dans les observations.

#### IV.4.1.3. Le test d'homogénéité de Wilcoxon à l'échelle annuelle

Ce dernier test consiste à découper la série selon les différentes ruptures et à vérifier si ces sous-séries ont la même moyenne. Les hypothèses sont donc :

- $H_0$  : les moyennes des deux sous-échantillons sont égales ;
- $H_1$  : les moyennes des deux sous-échantillons sont différentes.

#### IV.4.2. Choix des modèles d'ajustement

Il est essentiel de choisir la loi appropriée en fonction des caractéristiques des données et des hypothèses sous-jacentes du modèle statistique. Il existe de nombreuses lois d'ajustement, à savoir :

- ☞ La loi binomiale : Elle est utilisée pour modéliser les données discrètes qui représentent le nombre de succès dans une série d'essais indépendants, chacun ayant deux résultats possibles.
- ☞ Les distributions Gamma sont utilisées pour modéliser une grande variété de phénomènes, et tout particulièrement les phénomènes se déroulant au cours du temps où par essence, le temps écoulé est une grandeur réelle positive.
- ☞ La loi normale (loi de Gauss) : Cette loi est utilisée dans de nombreux domaines pour modéliser les données continues qui suivent une distribution symétrique en forme de cloche.
- ☞ La loi de Poisson : Elle est utilisée pour modéliser les données discrètes qui représentent des occurrences d'événements rares dans un intervalle fixe.
- ☞ La loi exponentielle : Cette loi est utilisée pour modéliser les temps entre les occurrences d'événements rares et aléatoires.
- ☞ La loi de Pareto : Cette loi est utilisée pour modéliser des phénomènes qui présentent une distribution de puissance, c'est-à-dire une distribution où de nombreux petits événements se produisent et quelques rares événements de grande ampleur.
- ☞ La loi GEV (Generalized Extreme Value) est une loi d'ajustement statistique utilisée pour modéliser les valeurs extrêmes d'une variable aléatoire. Elle est particulièrement adaptée pour étudier les queues de distribution, c'est-à-dire les valeurs extrêmement élevées ou basses qui surviennent rarement.
- ☞ La loi de Gumbel, également connue sous le nom de distribution de type I de valeur extrême (Type I Extreme Value Distribution), est une loi d'ajustement statistique utilisée

pour modéliser les valeurs extrêmes d'une variable aléatoire. Elle fait partie de la famille des lois de valeur extrême, tout comme la loi GEV dont elle est un cas particulier.

Le choix d'une loi d'ajustement est guidé par des considérations théoriques et pratiques. Dans le cas de cette étude, il s'agit, d'une part, de manipuler un échantillon de pluies annuelles où on a été orienté dans nos choix par le logiciel utilisé. sont les deux modèles gamma et Gumbel qui ont été retenus (§V.3.3). D'autres part, on a à manipuler un échantillon de valeurs extrêmes (Pluie journalière maximales) ; où on a opté pour deux lois, régulièrement utilisées dans ce cas précis [BENKHALED, 2007] : La loi généralisée des valeurs extrêmes GEV et la loi de Gumbel (§V.4.3).

#### IV.4.2.1. La loi Gamma

Elle est souvent utilisée pour analyser des phénomènes où les événements se produisent de manière indépendante et de façon continue dans le temps (Formule 01).

$$f(x) = \frac{\alpha^\lambda}{\Gamma(\lambda)} x^{\lambda-1} e^{-\alpha x} \quad (01)$$

Où :

$x$  : est la variable aléatoire ;

$\lambda$  : paramètre de forme qui contrôle la forme de la distribution et détermine si la distribution est symétrique ou asymétrique. Plus la valeur de  $\lambda$  est élevée, plus la distribution sera concentrée autour de la valeur moyenne.

$\alpha$  : paramètre d'échelle qui contrôle l'étendue ou la dispersion de la distribution. Une valeur plus élevée de  $\alpha$  entraîne une distribution plus étalée, tandis qu'une valeur plus faible entraîne une distribution plus concentrée.

#### IV.4.2.2. La loi de GEV

La loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV), illustrée par la formule 02, a été introduite par JENKINSON en 1955. C'est une distribution à trois paramètres qui combine les trois types en une seule forme. En hydrologie, la loi GEV est parmi les distributions les plus utilisées en analyse des extrêmes [EL ADLOUNI et TAHA, 2008].

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[ 1 - \frac{k}{\alpha} (x - u) \right]^{\frac{1}{k}-1} \exp \left\{ - \left[ 1 - \frac{k}{\alpha} (x - u) \right]^{1/k} \right\} \quad (02)$$

Avec :  $u$ ,  $\alpha$  et  $k$  sont les paramètres de la fonction.

$\alpha$  : paramètre d'échelle

$u$  : paramètre de position

$k$  : paramètre de forme, il est également déterminant dans le comportement des distributions dites de queue.

#### IV.4.2.3. La loi de Gumbel

La loi de Gumbel (Formule 03) est utilisée par la plupart des services météorologiques officiels, pour décrire la fréquence des pluies extrêmes [kouassi et al., 2018]. Selon ce dernier auteur, en hydrologie, les maxima saisonniers ou annuels sont souvent modélisés par cette loi.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-u}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-u}{\alpha}\right)\right] \quad (03)$$

Avec  $u$  et  $\alpha$  sont les paramètres de la fonction.

$\mu$ : paramètre de position.

$\alpha$  : paramètre de dispersion.

La simplicité du calcul de la distribution de Gumbel a contribué à sa popularité. N'empêche que la littérature hydrologique montre depuis peu un certain scepticisme vis-à-vis de la modélisation des maxima annuels ou saisonniers par la loi Gumbel. Dans ce sens, d'autres travaux ont montré également que la distribution, exacte des maxima à la loi de Gumbel pour de longues séries, fait de la distribution de Gumbel une approximation inadéquate.

#### IV.4.3. Adéquation des méthodes d'ajustement

De nombreuses techniques existent pour comparer les différentes méthodes d'ajustement et pour pouvoir en choisir la meilleure. Hyfran-Plus offre la possibilité de contrôler l'adéquation des différentes lois. N'empêche que l'examen visuel des graphiques d'ajustement, même s'il peut paraître rudimentaire, reste un bon moyen pour juger de la qualité d'un ajustement et devrait toujours constituer un préambule à tout test statistique [BOUCEFANE, 2018]. En termes numériques, pour vérifier l'adéquation d'une méthode d'ajustement, on utilise les deux critères suivants :

##### IV.4.3.1. Critère d'information Bayésien (BIC)

Connu sous le nom de BIC pour l'acronyme de l'anglais "Bayesian Information Criterion", c'est une mesure utilisée en statistique pour évaluer et comparer des modèles probabilistes. Le BIC est dérivé de la théorie de l'inférence bayésienne et est souvent utilisé pour sélectionner le meilleur

modèle parmi plusieurs candidats, en tentant de trouver un équilibre entre la complexité du modèle et sa capacité à expliquer les données.

Le BIC est une mesure utilisée pour évaluer et sélectionner les modèles d'ajustement. Il pénalise la complexité du modèle et favorise les modèles qui fournissent un bon ajustement aux données avec un nombre minimal de paramètres. Le modèle avec la valeur BIC la plus basse est considéré comme le meilleur modèle, car il offre le meilleur compromis entre ajustement aux données et complexité du modèle.

#### **IV.4.3.2. Critère d'information d'Akaike (AIC)**

Il est nommé d'après le statisticien Hirotugu Akaike. C'est une mesure utilisée pour comparer et sélectionner des modèles statistiques concurrents. L'AIC est basé sur le principe de maximisation de la vraisemblance tout en pénalisant la complexité du modèle. Il cherche à trouver le modèle qui fournit le meilleur ajustement aux données tout en évitant le surajustement.

Pour comparer les modèles d'ajustement, on calcule les valeurs d'AIC pour chaque modèle candidat. Le modèle avec la valeur d'AIC la plus basse est considéré comme le meilleur modèle, indiquant le meilleur compromis entre ajustement aux données et complexité du modèle.

#### **IV.4.4. Caractérisation des périodes de retour**

La période de retour (ou temps de retour) caractérise le temps statistique entre deux occurrences d'un événement naturel d'une intensité donnée. Ce terme est très utilisé pour caractériser les risques naturels. Un événement pluvieux est qualifié de très exceptionnel si sa période de retour est au-delà de 100 ans ; d'exceptionnel si la période de retour est située dans l'intervalle de 30 à 100 ans ; de très anormal si la période de retour est comprise entre 10 à 30 ans ; d'anormal si la période de retour est située entre 6 à 10 ans et de normal si la période de retour est à moins de six ans [kouassi et al., 2018].

Une fois le modèle adéquat d'ajustement identifié, le logiciel utilisé permet l'estimation de valeurs extrêmes hors échantillons, qui permettent d'anticiper en lançant des opérations d'aménagement et de lutte contre les crues et/ou inondations.

## Résultats et interprétations

---



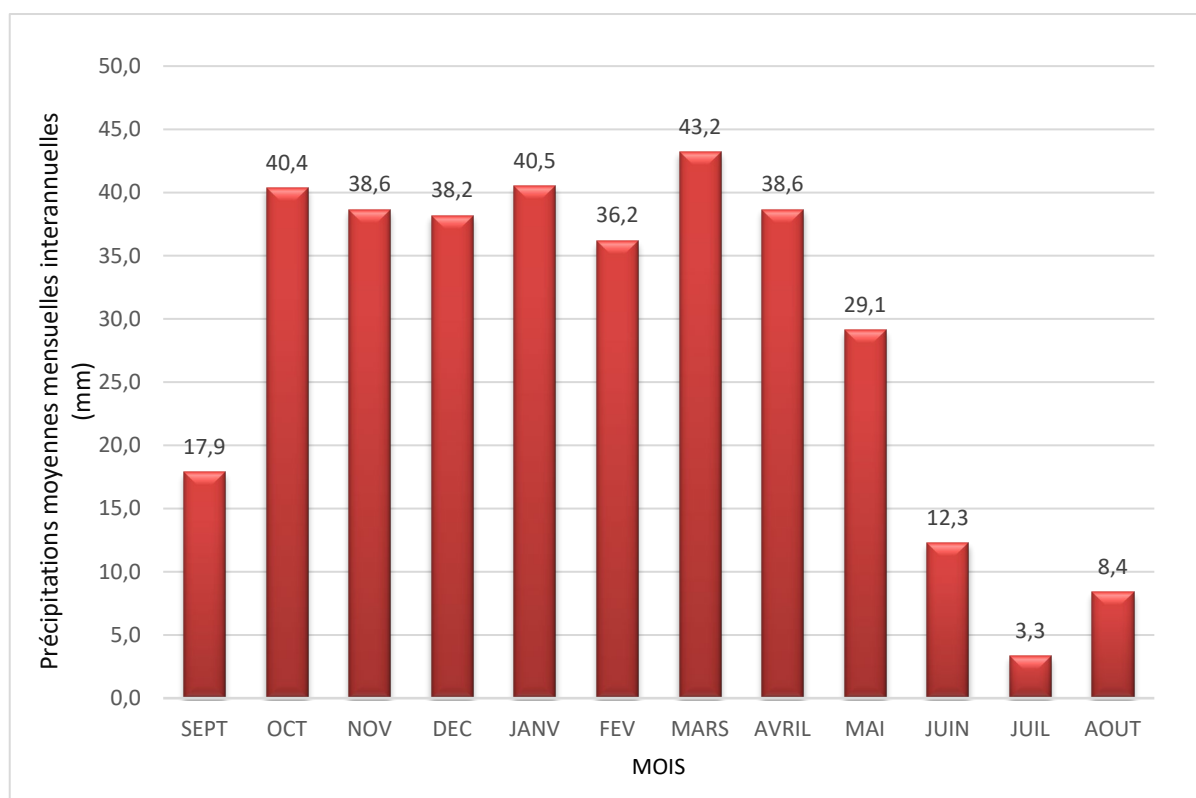
## V.1. Régime pluviométrique de la zone d'étude

### V.1.1. Précipitations moyennes mensuelles interannuelles

La traduction graphique, du tableau V.1 des variations des moyennes mensuelles interannuelles des précipitations sur la même période d'enregistrement, montre une variation (Fig. V.1). Les fortes valeurs sont enregistrées au cours des mois de janvier et Mars (les mois les plus pluvieux), alors que les faibles valeurs caractérisent les mois de Juillet et Août (les mois les plus secs).

**Tableau V.1** - Précipitations moyennes mensuelles interannuelles (1960-2018)

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Jui.	Aout
PMMI (mm)	17,9	40,4	38,6	38,2	40,5	36,2	43,2	38,6	29,1	12,3	3,3	8,4



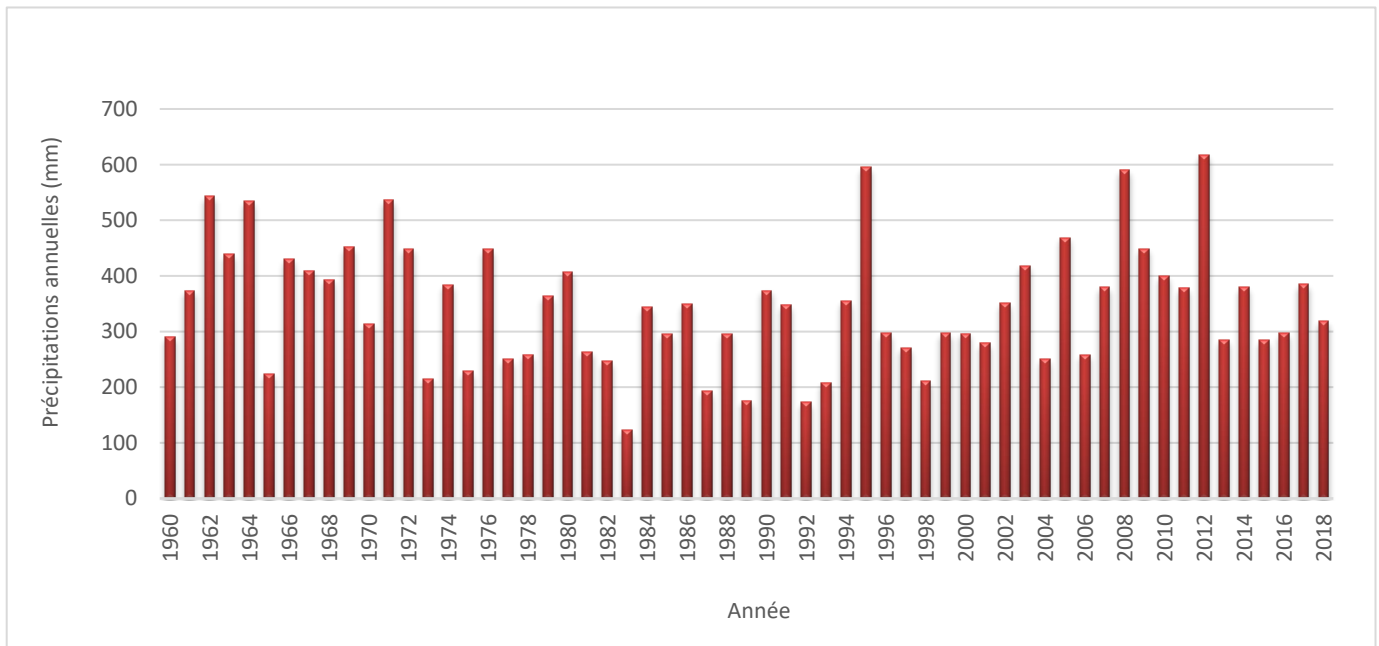
**Figure V.1** - Précipitations moyennes mensuelles interannuelles (1960-2018)

### V.1.2. Précipitations annuelles

L'analyse de l'évolution du cumul annuel des précipitations basée sur (Tab. V.2), sur une période de 59 ans, montre que les années 1995, 2008 et 2012 sont les plus arrosées avec environ 600 mm (Fig. V.2). Par contre, 1983, 1989 et 1992 sont les années les plus sèches avec un cumul autour de 200 mm. La précipitation moyenne annuelle est égale à 347 mm.

**Tableau V.2 - Précipitations annuelles (1960-2018)**

<b>Année</b>	<b>P. annuelle</b>	<b>Année</b>	<b>P. annuelle</b>	<b>Année</b>	<b>P. annuelle</b>
1960	290,7	1980	407,8	2000	296,5
1961	373,8	1981	263,7	2001	279,4
1962	543,8	1982	246,9	2002	350,9
1963	439,1	1983	122,5	2003	418,8
1964	533,9	1984	344,2	2004	250,8
1965	224,7	1985	296,0	2005	468,8
1966	430,3	1986	350,2	2006	258,9
1967	409,5	1987	192,4	2007	380,0
1968	393,2	1988	296,2	2008	590,0
1969	452,1	1989	175,9	2009	449,2
1970	314,4	1990	373,7	2010	399,3
1971	535,9	1991	347,2	2011	378,2
1972	449,1	1992	173,3	2012	618,3
1973	215,4	1993	208,1	2013	285,5
1974	384,5	1994	354,7	2014	379,8
1975	229,2	1995	595,6	2015	284,4
1976	448,7	1996	296,8	2016	297,1
1977	250,1	1997	270,8	2017	385,0
1978	258,7	1998	210,8	2018	319,0
1979	363,5	1999	297,0		



**Figure V.2 - Précipitations annuelles (1960-2018)**

## V.2. Choix de la méthode de calcul de la fréquence empirique

La fréquence empirique d'un événement est le nombre de réalisations observées de cet événement divisé par le nombre d'expériences. Différentes formules sont proposées pour le calcul des fréquences empiriques des valeurs extrêmes (Tab. V.3).

**Tableau V.3 - Formules de calcul de la fréquence empirique**

Auteur	Valeur de (a)	Formule
Hazan	0.5	$f_i = \frac{i - 0.5}{N}$
Cunnane	0.40	$f_i = \frac{i - 0.4}{N + 0.2}$
Gringorten	0.44	$f_i = \frac{i - 0.44}{N + 0.12}$

Avec  $i$  le rang dans l'échantillon classé et  $N$  la taille de l'échantillon.

Le tableau V.3 résume les méthodes de calcul les plus utilisées. Dans notre cas, on a opté pour les deux dernières ; celle de Cunnane pour les précipitations annuelles et celle de Gringorten, recommandée généralement pour les valeurs extrêmes, qu'on a utilisé pour les pluies journalières maximales. [BOUCEFIANE, 2018].

### V.3. Traitement des précipitations annuelles (PA)

Les précipitations annuelles (Tab. V.2) fournissent des informations, qui peuvent aider dans la connaissance du climat et de ses tendances dans une région donnée. Elles peuvent aussi contribuer dans les domaines de la gestion des ressources en eau et de l'analyse des risques naturels.

#### V.3.1. Statistiques de base de l'échantillon (PA)

Afin d'avoir une vue d'ensemble de l'échantillon des pluies annuelles, quelques paramètres sont calculés et qui caractérisent les données observés (Tab. V.4). L'écart-type indique que l'échantillon n'est pas assez dispersé et qu'il est dans sa globalité homogène.

*Tableau V.4 - Statistiques de base des précipitations annuelles*

Station	N	Min	Max	$\bar{x}$ (mm)	$\sigma$ (mm)	$C_v$
Saïda	59	122.5	618.3	347.2	110.5	0.32

Où :

N : Nombre d'observations ;

$\bar{x}$  : La moyenne ;

$\sigma$  : L'écart type ;

$C_v$  : Le coefficient de variation.

#### V.3.2. Tests d'hypothèses de PA

On rappelle qu'avant d'entamer l'ajustement de n'importe quelle série de données, on doit d'abord procéder à quelques vérifications relatives à ces données, c'est ce qu'on appelle : Les tests d'hypothèses. Ils sont en nombre de trois : Le test d'indépendance, le test de stationnarité et celui d'homogénéité. Le logiciel utilisé permet ces tests, en adoptant pour chacun une méthode bien déterminée (Tab. V.5). L'analyse des résultats des tests d'hypothèses permet d'admettre que l'échantillon de données est aléatoire.

*Tableau V.5 - Résultats des tests d'hypothèses des PAMax*

Station	Test d'indépendance (Wald-Wolfowitz)		Test de Stationnarité (Kendall)		Test d'Homogénéité (Wilcoxon)	
	$ U $	Conclusion	$ K $	Conclusion	$ W $	Conclusion
Saïda	0.867	accepté H0 à 5%	0.265	accepté H0 à 5%	0.275	accepté H0 à 5%

### **V.3.3. Ajustement des pluies annuelles**

Comme on l'a déjà cité dans le chapitre précédent (§IV.4.2), on a opté pour deux modèles d'ajustement, qui sont la loi de Gamma et celle de Gumbel, l'estimation des paramètres de distribution, pour chacune des deux lois, est basée sur trois méthodes : le maximum de vraisemblance (notée MMV), la méthode des moments (notée MM) et le celle des moments pondérés. Dans la présente étude, on a considéré que les deux premières. Car, la troisième nécessite l'attribution d'un poids pour chaque observation et ce n'est le cas des pluviométries en général qui ne sont pas des valeurs pondérées.

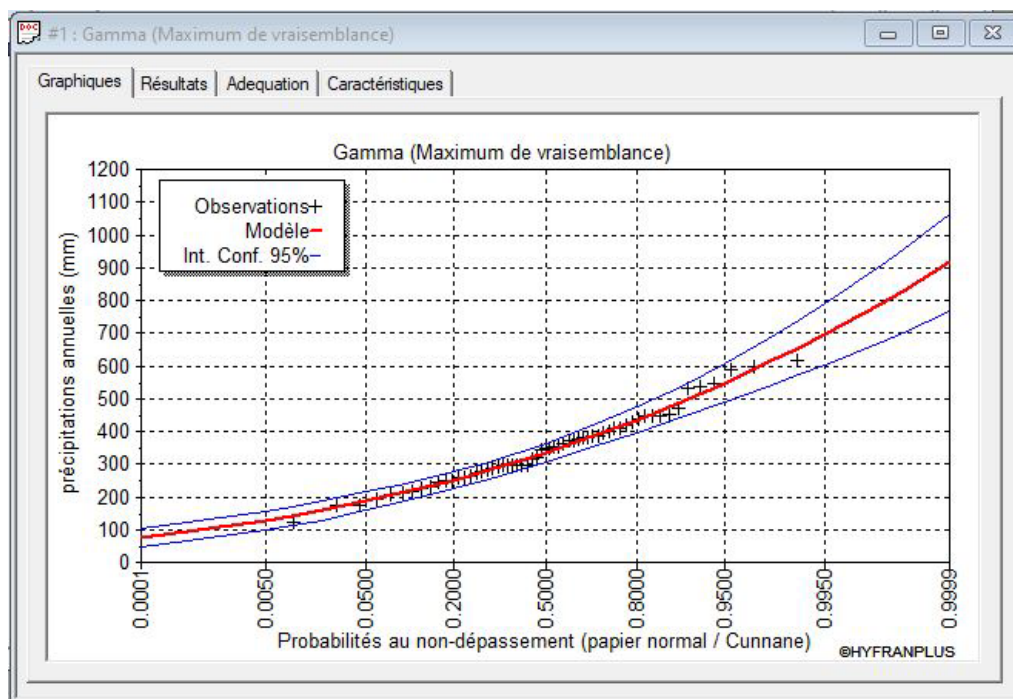
### **V.3.4. Validation des méthodes d'ajustement**

#### **V.3.4.1. Examen visuel des graphiques d'ajustement**

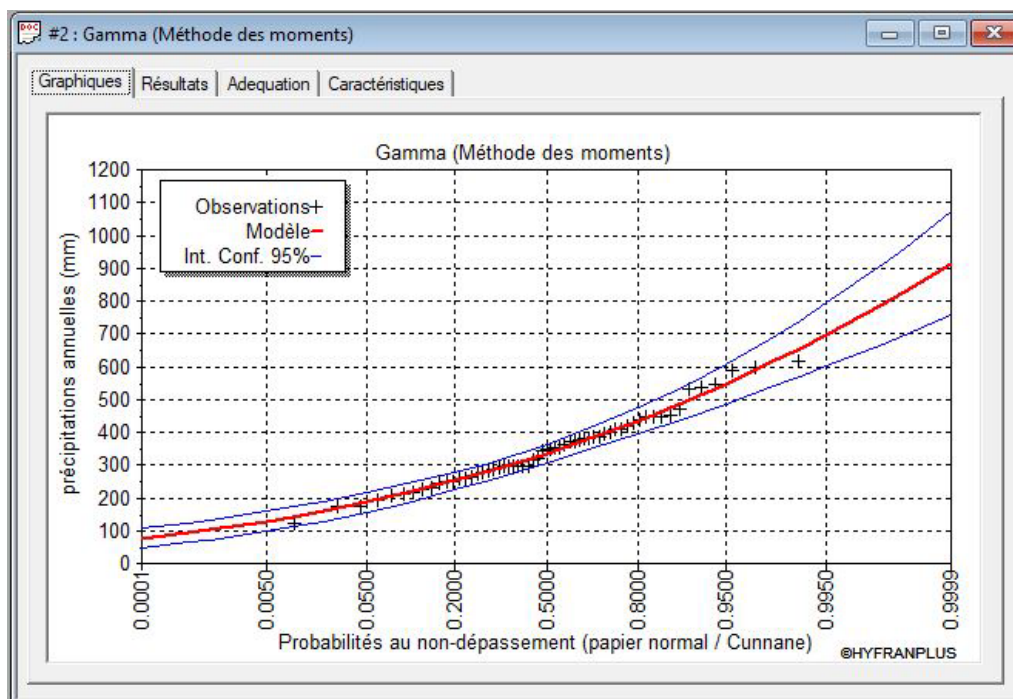
Un examen visuel doit être le préambule dans une validation relative à une opération d'ajustement. Dans ce sens, Hyfran-Plus offre la possibilité de visualiser les graphiques d'ajustement de l'échantillon de données. Ainsi, pour chaque modèle d'ajustement (Gamma et Gumbel), on a obtenu deux graphiques relatifs à la méthode du maximum de vraisemblance et à celle des moments. Les figures (V.3, V.4, V.5, V.6) illustrent des graphiques d'ajustement. Visuellement on remarque que la loi Gamma présente le meilleur ajustement de l'échantillon aléatoire des précipitations annuelles.

#### **V.3.4.2. Examen numérique par utilisation des critères d'ajustement**

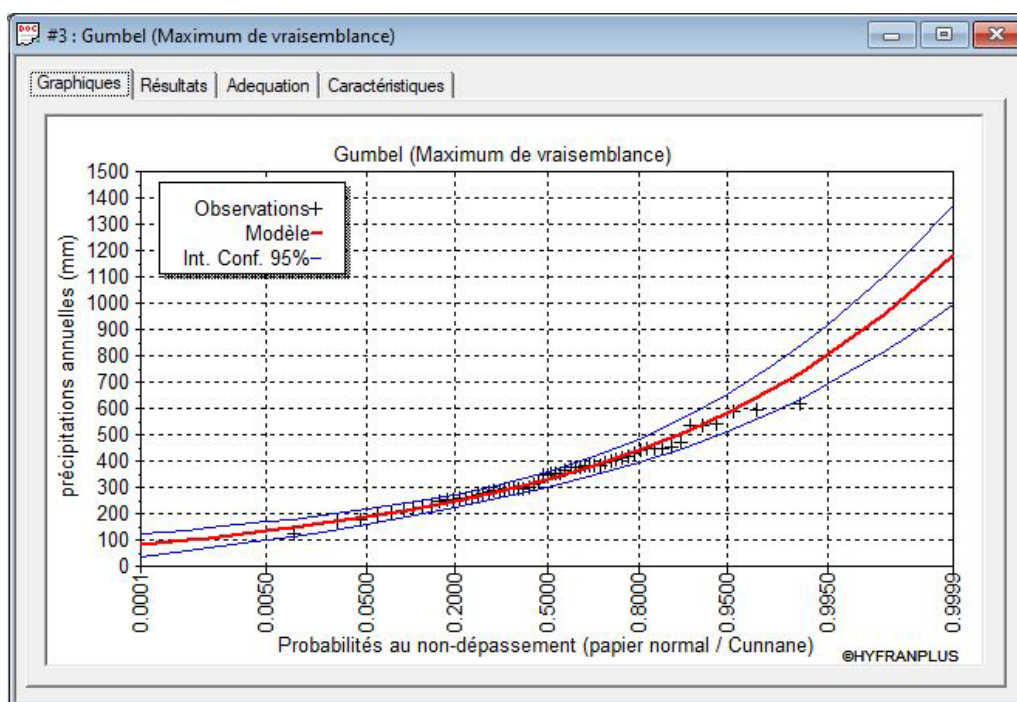
Pour plus d'examens, il y a deux critères d'information à vérifier via le logiciel utilisé : Bayésien (BIC) et d'Akaike (AIC). Ces deux critères permettent un classement des modèles d'ajustement utilisés. Le meilleur ajustement correspond à la plus faible valeur de ces deux critères. Les tableaux (V.6 et V.7)



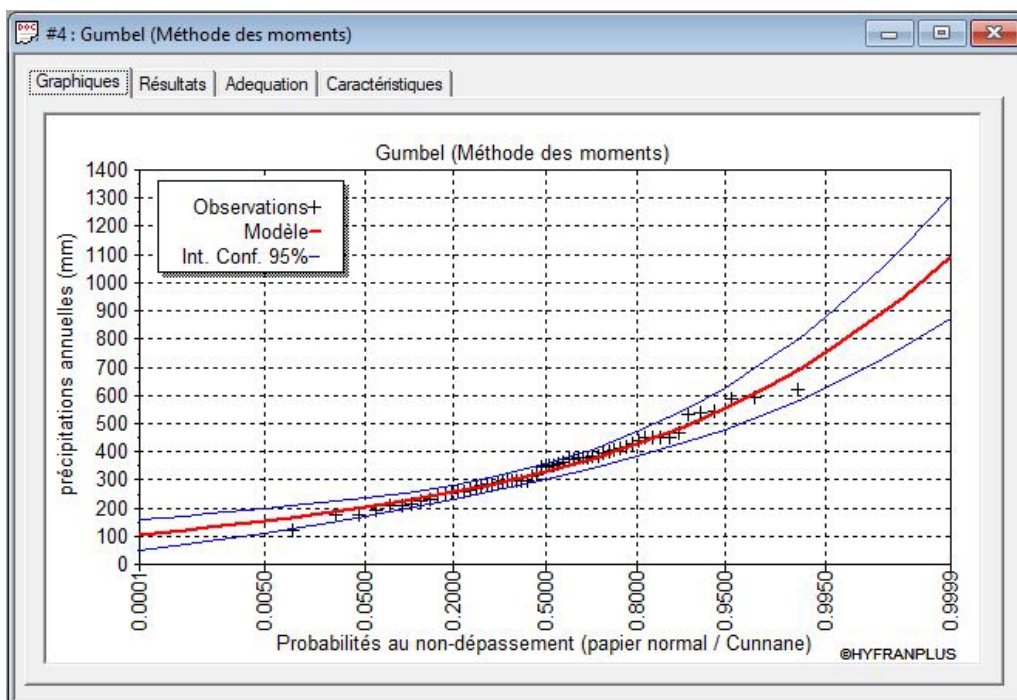
**Figure V.3 - Ajustement graphique des PA selon la loi Gamma (MMV)**



**Figure V.4 - Ajustement graphique des PA selon la loi Gamma (MM)**



*Figure V.5 - Ajustement graphique des PA selon la loi Gumbel (MMV)*



*Figure V.6 - Ajustement graphique des PA selon la loi Gumbel (MM)*

**Tableau V.6 - Examen numérique des lois d'ajustement - MMV**

	<b>Nombre de Paramètres</b>	<b>BIC</b>	<b>AIC</b>
Gamma (Maximum de vraisemblance)	2	<b>726.959</b>	<b>722.804</b>
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	728.615	724.460

**Tableau V.7 - Examen numérique des lois d'ajustement - MM**

	<b>Nb de Paramètres</b>	<b>BIC</b>	<b>AIC</b>
Gamma (méthode des moments)	2	726.959	722.804
Gumbel (méthode des moments)	2	730.059	725.903

### V.3.5. Adéquation de la méthode d'ajustement des PA

Les examens visuels et numériques ont mis en évidence l'adéquation de La loi de Gamma avec l'échantillon de données. Il nous reste maintenant à connaître la méthode d'ajustement à utiliser : maximum de vraisemblance ou méthode des moments ?

Pour pouvoir répondre à la question ci-dessus, on a dressé le tableau V.8, issu de Hyfran-Plus. Il montre que quelques paramètres de l'échantillon et ceux estimés de la population, par la méthode des moments, ont les mêmes valeurs (en gras, ce qui permet de conclure que c'est cette méthode qui est plus en adéquation avec les données de départ.



**Tableau V.8 - Statistiques descriptives des PA (échantillon et population)**

	<b>Caractéristiques de l'échantillon</b>	Caractéristiques de la population par Gamma - MMV	<b>Caractéristiques de la population par Gamma - MM</b>
Minimum	122.5		
Maximum	618.3		
Moyenne	346.7	346.7	346.7
Ecart-Type	<b>110.5</b>	110.8	<b>110.5</b>
Médiane	347.2	335.0	335.1
Coefficient de variation	<b>0.3189</b>	0.3195	<b>0.3189</b>

### V.3.6. Prédiction des précipitations annuelles

Le tableau V.9 présente les estimations des précipitations annuelles pour différentes périodes de retour selon la loi de Gamma (méthode des moments), en se basant sur une période d'observation conséquente de 59 ans. Comme remarques, on peut dire, relativement au tableau V.4, que les précipitations estimées ne sont pas des valeurs exceptionnelles ; par conséquent les tendances climatiques futures, de la région d'étude, ne seront pas lointaines du semi-aride.

**Tableau V.9 - Estimation des PA selon la loi de Gamma (méthode des moments)**

Période de retour	200	100	50	20	10	5	3	2
Précipitation estimée (mm)	<b>696.8</b>	<b>654.2</b>	<b>609.5</b>	<b>546.3</b>	<b>493.8</b>	<b>434.7</b>	<b>385.1</b>	<b>335.1</b>

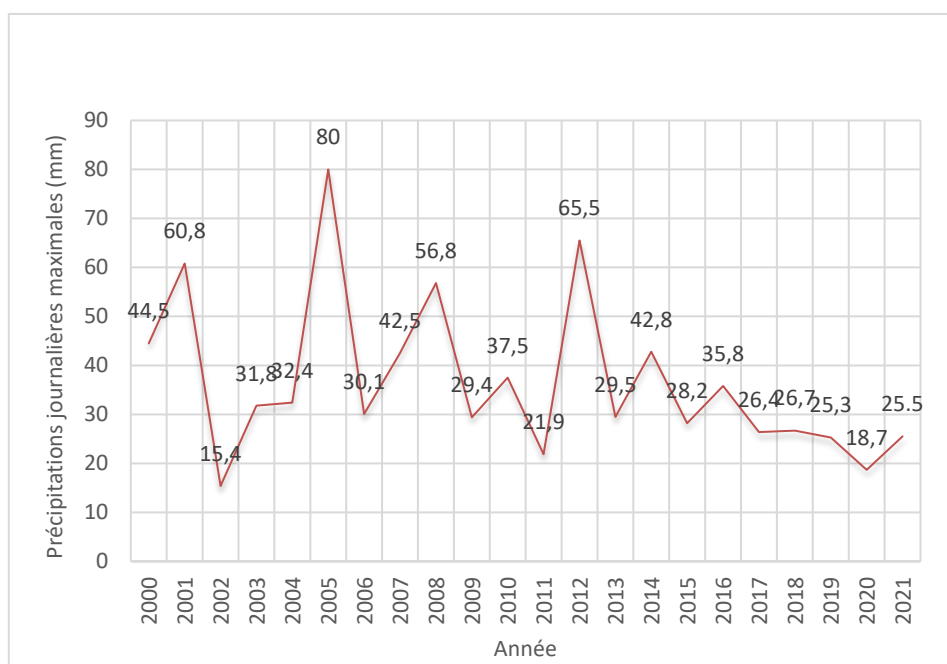
### V.4. Traitement des pluies journalières maximales (PJMax)

Les précipitations journalières maximales (Tab. V.10, Fig. V.7) sont la variable qui fait le plus souvent l'objet d'analyses statistiques pour l'évaluation des risques de pluies extrêmes. Ces dernières ont toujours constitué un risque et font l'objet des études d'aménagements contre les crues et/ou inondations.

Les précipitations journalières maximales sont essentielles pour évaluer les risques et pour prendre des décisions éclairées et anticipées.

**Tableau V.10 - Précipitations journalières maximales (PJMax)**

Année	PJMax	Année	PJMax
2000	44,5	2011	21,9
2001	60,8	2012	65,5
2002	15,4	2013	29,5
2003	31,8	2014	42,8
2004	32,4	2015	28,2
2005	80,0	2016	35,8
2006	30,1	2017	26,4
2007	42,5	2018	26,7
2008	56,8	2019	25,3
2009	29,4	2020	18,7
2010	37,5	2021	25,5

**Figure V.7 - Variation des pluies journalières maximales (2000-2021)**

### V.4.1. Statistiques de base de l'échantillon (PJMax)

Afin d'avoir une vue d'ensemble sur l'échantillon de données du tableau V.10, quelques paramètres sont calculés et donnés par Hyfran-Plus (Tab. V11).

**Tableau V.11 - Caractéristiques statistiques des séries pluviométriques**

Station	N	Min	Max	$\bar{x}$ (mm)	$\sigma$ (mm)	$C_v$
Saïda	22	15.4	80.0	36,7	16,2	0,44

Où :

N : Nombre d'observations ;

$\bar{x}$  : La moyenne

$\sigma$  : L'écart type

$C_v$  : Le coefficient de variation

### V.4.2. Tests d'hypothèses des PJMax

On a vérifié les hypothèses de base de l'échantillon des PJMax, à savoir l'hypothèse d'indépendance, de stationnarité et d'homogénéité (Tab. V.12).

**Tableau V.12 - Résultats des tests d'hypothèses des PJMax**

Station	Test d'indépendance (Wald-Wolfowitz)		Test de Stationnarité (Kendall)		Test d'Homogénéité (Wilcoxon)	
	$ U $	Conclusion	$ K $	Conclusion	$ W $	Conclusion
Saïda	0.612	accepté H0 à 5%	2.43	rejeté H0 à 5% accepté H0 à 1%	1.35	accepté H0 à 5%

Le tableau, ci-dessus, montre que seul le test de stationnarité n'a pas été vérifié à 5%, mais accepté à 1%. D'après [BOUCEFIANE,2018], cela peut être dû à la présence de valeurs aberrantes, de valeurs vraiment exceptionnelles ou à des anomalies de mesures.

### V.4.3. Ajustement des pluies journalières maximales

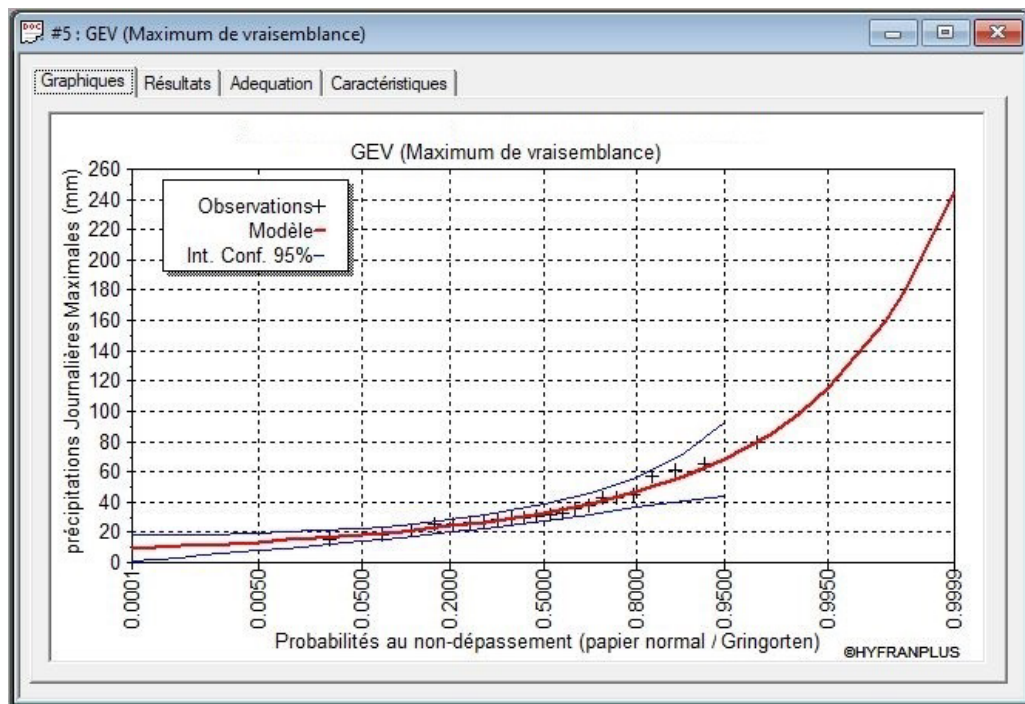
L'évaluation des fréquences d'occurrence des événements pluvieux extrêmes constitue l'un des défis principaux pour les planificateurs d'infrastructures. Ainsi, il est nécessaire d'effectuer une analyse statistique des données historiques relatives aux précipitations journalières maximales afin

de déterminer les périodes de retour de ces valeurs extrêmes. Malheureusement, ce travail d'ajustement porte sur des données dont la période d'enregistrement est courte 22 ans (2000 - 2021). Au fait, on sait que la précision de ce travail est proportionnelle à la période d'observation, plus cette dernière est longue et plus la précision de calculs et des prédictions augmente.

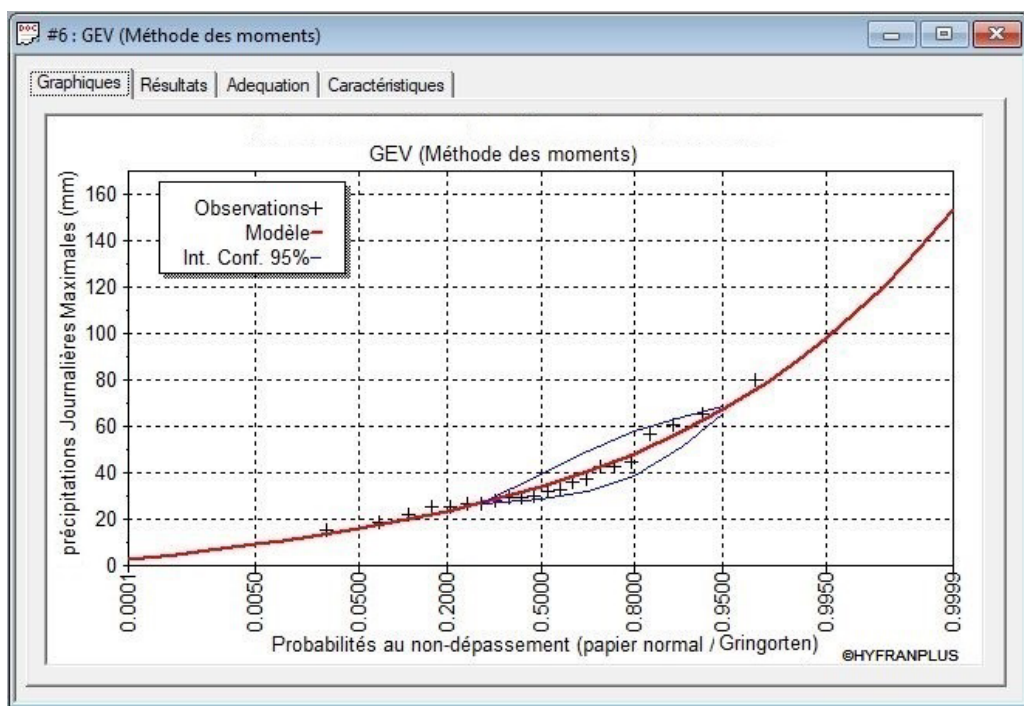
Comme on l'a déjà précisé dans la section IV.4.2 du chapitre précédent, on a fait appel aux deux modèles de Gumbel et loi GEV comme lois d'ajustement des pluies journalières maximales. Au fait la littérature a prouvé qu'elles sont les plus employées dans le cas de l'étude de valeurs extrêmes.

#### **V.4.3.1. Examen visuel des graphiques d'ajustement**

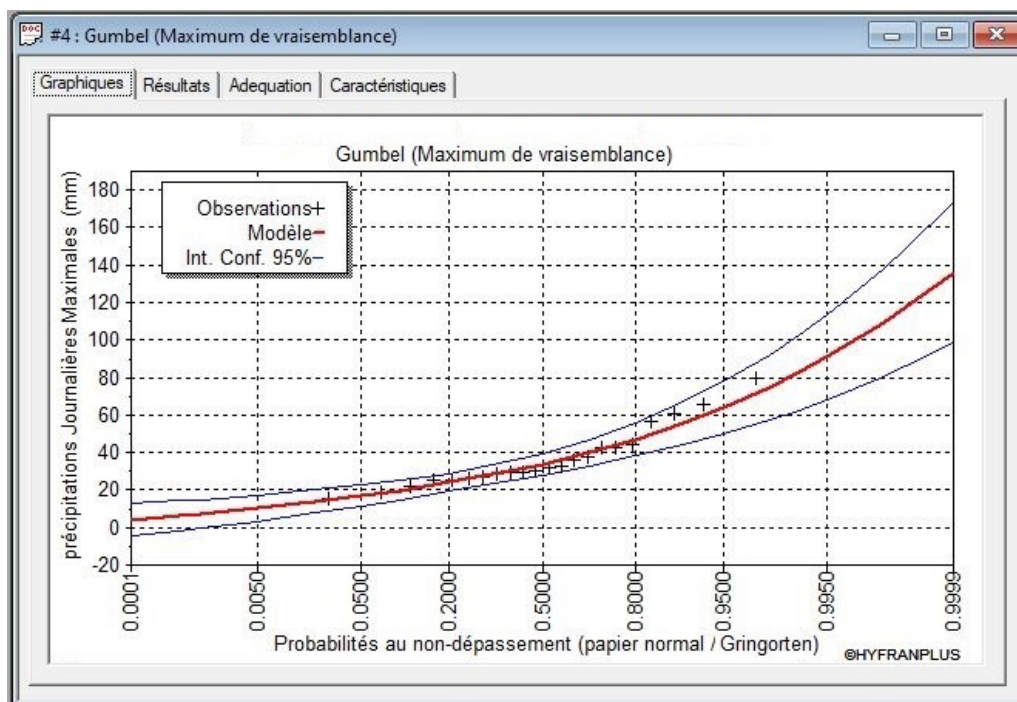
Les figures (V.8, V.9, V.10 et V.11) montrent les graphiques permettant l'examen visuel. Ils présentent les courbes d'ajustement des deux lois de GEV et Gumbel (méthode Maximum de vraisemblance et méthode des moments). Visuellement on remarque que la loi de Gumbel présente les meilleurs ajustements de la variable des précipitations journalières maximales.



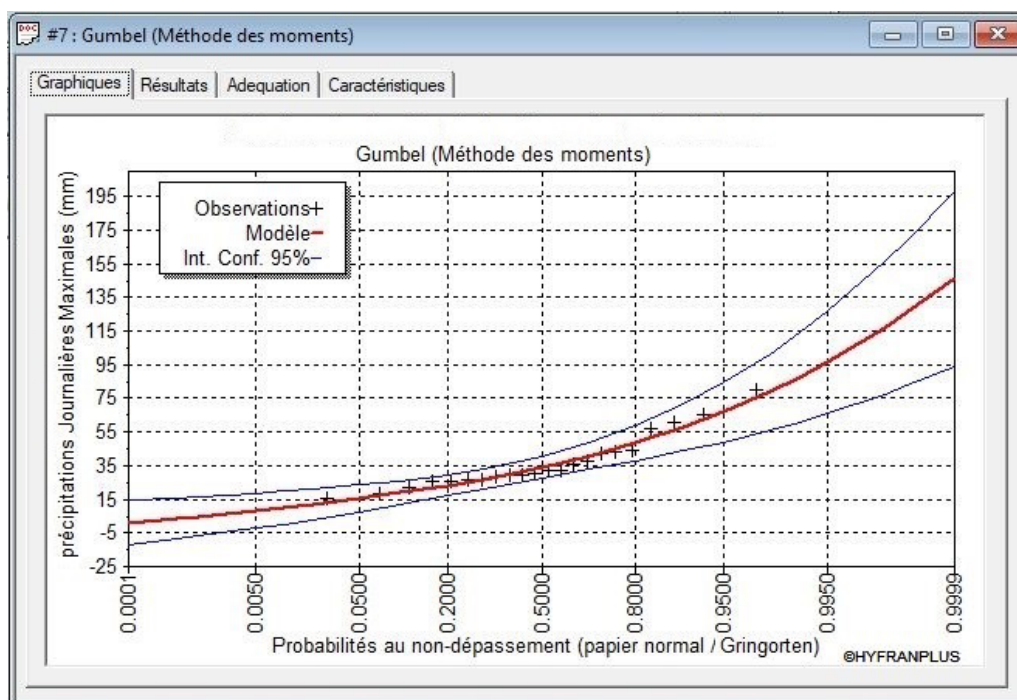
*Figure V.8 - Ajustement graphique des PJMax selon la loi GEV (MMV)*



*Figure V.9 - Ajustement graphique des PJMax selon la loi GEV (MM)*



**Figure V.10 - Ajustement graphique des PJMax selon la loi Gumbel (MMV)**



**Figure V.11 - Ajustement graphique des PJMax selon la loi Gumbel (MM)**

### V.4.3.2. Examen numérique par utilisation des critères d'ajustement

Les tableaux V.13, et V.14 montrent les valeurs observées du critère d'information bayésien (BIC) et de celui d'Akaike (AIC). Ces critères permettent de comparer le degré d'ajustement. Les meilleurs ajustements correspondent aux plus faibles valeurs de ces deux critères dans chaque méthode.

*Tableau V.13 - Examen numérique des lois d'ajustement - MMV*

	<b>Nb de Paramètres</b>	<b>BIC</b>	<b>AIC</b>
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	<b>2</b>	<b>183.651</b>	<b>181.469</b>
GEV (Maximum de vraisemblance)	<b>3</b>	185.783	182.510

*Tableau V.14 - Examen numérique des lois d'ajustement - MM*

	<b>Nb de Paramètres</b>	<b>BIC</b>	<b>AIC</b>
Gumbel (méthode des moments)	<b>2</b>	184.212	182.030
GEV (méthode des moments)	<b>3</b>	187.003	183.730

Les résultats des deux tableaux confirment l'examen visuel, que c'est la loi de Gumbel qui est la plus adéquate pour l'échantillon.

### V.4.4. Adéquation de la méthode d'ajustement des PJMax

Le tableau V.15, issu de Hyfran-Plus, montre que quelques paramètres de l'échantillon et les mêmes estimés pour la population, par la méthode des moments, ont les mêmes valeurs (en gras). Ce qui permet de conclure que c'est la méthode des moments qui est la plus en adéquation avec l'échantillon de données.

**Tableau V.15** - Statistiques descriptives des PJMax (échantillon et population)

	Caractéristiques de l'échantillon	Caractéristiques de la population par Gumbel - MMV	Caractéristiques de la population par Gumbel - MM
Minimum	15.4		
Maximum	80.0		
Moyenne	<b>36.7</b>	36.2	<b>36.7</b>
Ecart-Type	<b>16.2</b>	14.8	<b>16.2</b>
Médiane	31.0	33.8	34.0
Coefficient de variation	<b>0,443</b>	0,409	<b>0.443</b>

#### V.4.5. Prédiction des précipitations journalières maximales

Le tableau V.16 présente les estimations des précipitations journalières maximales calculées pour les différentes périodes de retour selon la loi de Gumbel (méthode des moments).

**Tableau V.16** - Estimation des PJMax selon la loi de Gumbel (méthode des moments)

Période de retour	200	100	50	20	10	5	3	2
Précipitation estimée (mm)	<b>96.5</b>	<b>87.7</b>	<b>78.8</b>	<b>67.0</b>	<b>57.9</b>	<b>48.4</b>	<b>40.8</b>	<b>34.0</b>

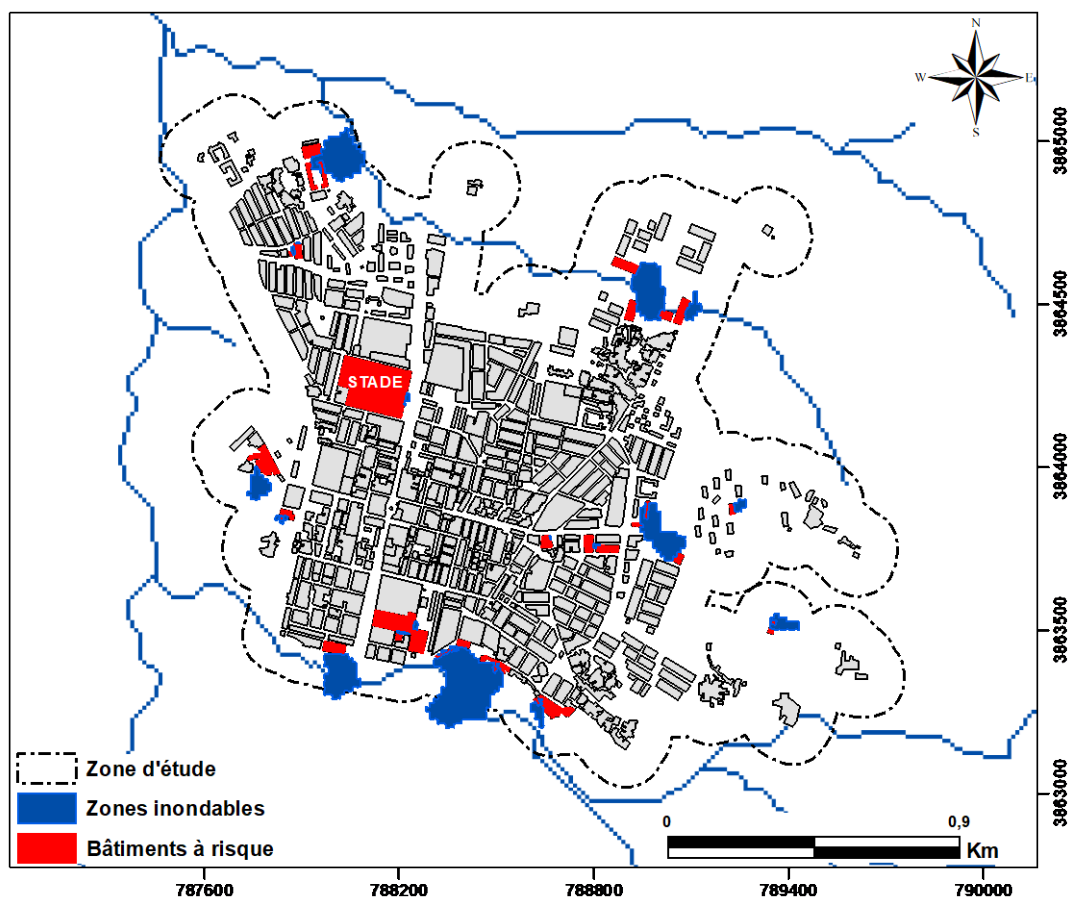
Tout d'abord, on tient à signaler que malheureusement le traitement d'ajustement, des pluies journalières maximales, a été effectué sur un échantillon de données, dont la période d'enregistrement est relativement courte (22 ans). Donc, les valeurs du tableau ci-dessus sont à prendre avec une certaine réserve vis-à-vis de leur précision et signification. Car, elles peuvent être loin de la réalité.

#### V.5. Révision de la carte des bâtiments à risque d'inondation

L'étude de BENTALEB et OUARDI (2021) a abouti à la cartographie des zones potentiellement inondables (Fig. V.12). Ce sont les « points bleus », des zones dont le relief est favorable au phénomène d'inondation (zones basses, cuvettes, etc.). La carte montre aussi qu'il y a 21 bâtiments à risque en contact direct avec ces zones. L'étude a aussi abouti à la détermination des hauteurs



des précipitations susceptibles de provoquer d'éventuelles inondations au niveau de ces zones (Tab. V.17).

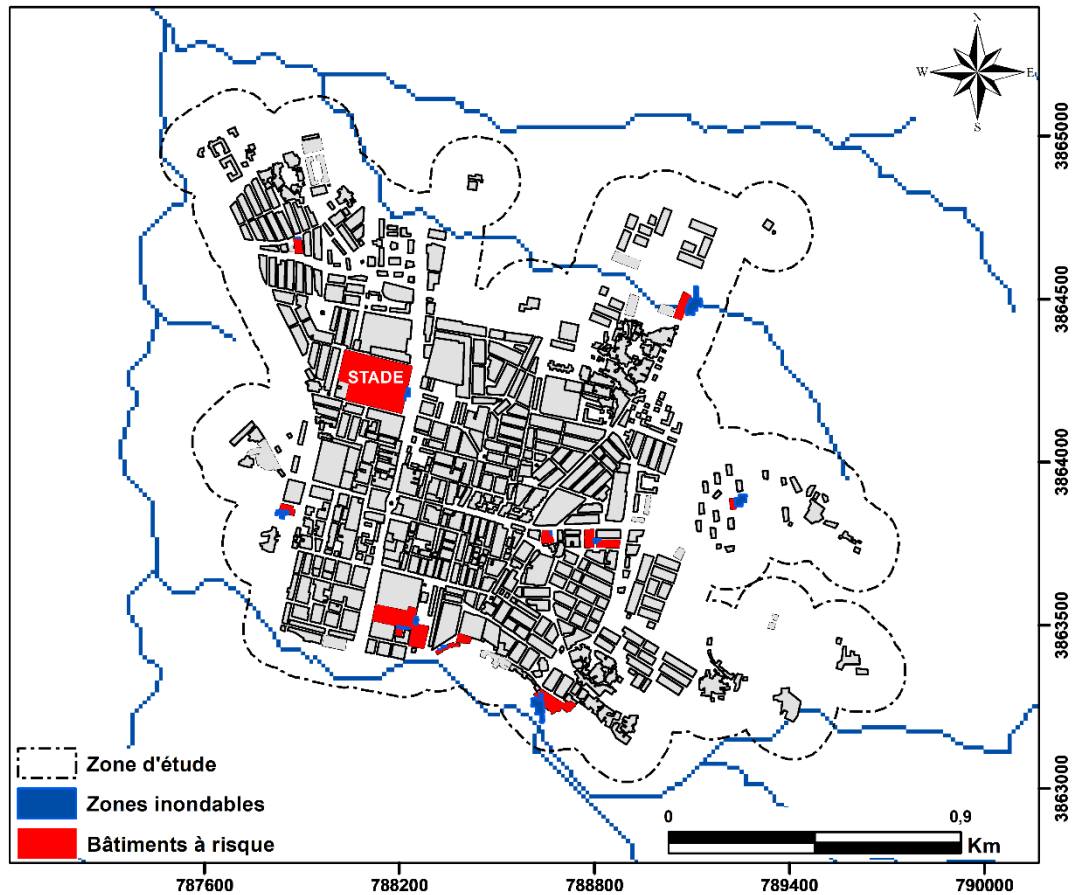


*Figure V.12 – Carte des zones inondables et des bâtiments à risque selon le critère topographique*

*Tableau V.17 – Hauteurs des pluies journalières potentielles*

N°	Hauteur des pluies (mm)	N°	Hauteur des pluies (mm)
1	<b>535</b>	12	9
2	3	13	8
3	<b>327</b>	14	47
4	<b>303</b>	15	76
5	10	16	<b>114</b>
6	10	17	<b>266</b>
7	3	18	<b>232</b>
8	<b>201</b>	19	39
9	4	20	82
10	<b>163</b>	21	19
11	41		

En analysant les tableaux V.10, V.16 et V.17, on remarquera que le dernier tableau contient des valeurs relativement exagérées par rapport à l'historique des pluies journalières maximales de la zone d'étude (Tab. V.10), et aussi par rapport à celles estimées pour différentes périodes de retour (V.16). Ce qui amène à ne pas les considérer dans la cartographie des zones potentiellement inondables basée sur les deux critères de la topographie et celui des précipitations journalières potentielles. Cette analyse a permis une mise à jour de la carte (Fig. V.12) et a abouti à une nouvelle carte illustrée dans la figure V.13.



*Figure V.13 – Carte des zones inondables et des bâtiments à risque selon les critères topographique et météorologique*

# Conclusion

---

La science est l'asymptote de la vérité,  
elle s'approche sans cesse et ne touche jamais. ✍

**Victor Hugo**

L'évolution climatique peut se traduire par une accentuation des événements exceptionnels de type inondations. Il est important de bien connaître ces événements et leur évolution (fréquence, intensité, etc.) sur une période historique relativement longue. En effet, c'est à partir de l'étude des précipitations et l'évaluation de leurs probabilités d'occurrence que s'effectue la politique de gestion de l'eau et de la prévention des risques.

La validité des résultats d'une analyse fréquentielle dépend du choix du modèle d'ajustement et plus particulièrement de son type. Diverses pistes peuvent contribuer à faciliter ce choix, mais il n'existe malheureusement pas de méthode universelle et infaillible.

Ce mémoire examine une question d'une importance considérable tant au niveau national qu'international : les inondations. Ce phénomène complexe associe à la fois le risque (le phénomène physique lui-même) et la vulnérabilité, qui représente les dommages résultant de ce risque sur les éléments en jeu.

D'abord en première partie, on a procédé à la vérification des tests d'hypothèses de l'indépendance, de l'homogénéité et de la stationnarité des données. Les échantillons de données de la région d'étude sont formés de valeurs aléatoires et indépendantes les uns des autres et que les deux échantillons sont relativement homogènes en vue des valeurs de leurs écart-types.

La deuxième partie de l'étude était consacrée à l'ajustement des échantillons, aux différents modèles statistiques. On a commencé par l'analyse de la distribution de précipitations annuelles à l'aide de deux modèles différents qui sont la loi Gamma et celle de Gumbel. De la même manière, on a essayé de faire l'ajustement des pluies journalières maximales en utilisant, cette fois-ci, la loi de Gumbel et celle généralisée des valeurs extrêmes (GEV). Pour chacune des deux opérations d'ajustement, on a toujours essayé de vérifier l'adéquation des modèles adoptés. Ceci étant possible à l'aide d'examens visuels et numériques. Il s'est avéré que la loi de Gamma (Méthode des moments) est la plus adéquate avec les précipitations annuelles ; et que les pluies journalières maximales obéissent dans leur ajustement au modèle de Gumbel (Méthode des moments).

En ce qui concerne la partie relative aux pluies journalières maximales, elle a permis de procéder à la validation d'une partie des résultats d'une étude déjà faite [BENTALEB et OUARDI, 2021]. Ladite étude a permis de cartographier les zones à risque d'inondations et d'estimer les pluviométries journalières potentielles, qui peuvent provoquer ces inondations, en se basant que sur le paramètre topographique. Au cours de l'actuelle étude, on a pu mettre à jour la carte des zones potentiellement inondables, en ajoutant un deuxième paramètre relatif à la météorologie.

Cette étude recèle certainement quelques faiblesses et carences. Par conséquent, un très grand travail reste à faire pour affiner l'approche méthodologique adoptée. En termes de données, ce travail, basé sur les statistiques, exige des périodes d'observations longues et de préférence de nombreuses stations météorologiques.

Enfin, comme perspectives, on envisage d'approfondir les maigres connaissances dans le domaine des statistiques et de tester d'autres logiciels et d'autres modèles d'ajustement. Cela doit permettre aussi d'affiner cette recherche pour atteindre des résultats significatifs avec une certaine précision.

Tout cela dans le but de pouvoir prévenir et anticiper pour lutter efficacement contre le phénomène de crue et/ou inondation.

# Références bibliographiques et Webographie

---

- AMIOT, L. 2021** : *Diagnostic Climatique Territorial – Focus : ressources en eau*. Guide méthodologique, Université de Rennes 2, 146 p.
- BENABDESSELEM, T. & AMARCHI, H., 2013** : *Approche régionale pour l'estimation des précipitations journalières maximales extrêmes du Nord Est Algérien*. Courrier du Savoir, n°17, pp. 175-184.
- BENGHARBI, M., 2021** : *Identification des zones à risque d'inondation par la logique floue et l'analyse multicritères - Cas d'étude nouvelle ville de Boughezoul*. Mémoire de Master, Université Ziane Achour, Djelfa, 63 p.
- BENKHALED, A., 2007** : *Distributions statistiques des pluies maximales annuelles dans la région de Cheliff, comparaison des techniques et résultats*. Courrier du Savoir, N°08, Juin 2007, pp.83-91.
- BENNIS, S., 2009** : *Hydraulique et hydrologie : Hydraulique, Hydrologie, Mécanique des Fluides- Cycle hydrologique- Hydraulique - Problèmes et exercices, Hydrologie - Problèmes et exercices*, École de Technologie Supérieure, Université du Québec, 451p.
- BENTALEB, M. S.E. & OUARDI, A. I.E., 2021** : *Les inondations : Etude du risque dans la région de Saïda*. Mémoire de Master en hydraulique urbaine, Université de de Saïda, 43 p.
- BOUCEFIANE, A., 2018** : *Analyse statistique des pluies journalières dans la région steppique de l'Ouest Algérie*. Thèse de Doctorat en sciences, Université des Sciences et Technologie d'Oran (USTO) Mohamed Boudiaf, 205 p.
- C.N.F.P.T, 2008** : *Gestion des risques - Risques naturels*. Tome 4, Centre National de la Fonction Publique Territoriale, France, 20 p.
- DEGOUTTE, G., 2012** : *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières : Hydraulique et morphologie fluviales appliquées*. Extrait du livre, Edition Tec et Doc Lavoisier, Paris, pp. 95-150.
- EL ADLOUNI, S. & BOBEE, B., 2014** : *Analyse Fréquentielle avec le logiciel HYFRAN-PLUS*. Guide d'utilisateur disponible avec la version Démo, 71 p.
- FROMONT, N., 2010** : *Les cahiers de l'eau du réseau des CPIE : La morphologie des cours d'eau (hydro morphologie)*. Centres Permanents d'Initiatives pour l'Environnement paris, 24 p.

- EL ADLOUNI, S. & TAHA, B. M. J. O., 2008** : *Comparaison des méthodes d'estimation des paramètres du modèle GEV non stationnaire*. Revue des sciences de l'eau, Volume 21, n° 1, 2008, pp. 35-50.
- HENRI, B., & CREMONINI, R., 2011** : *Stations météo : Que se mesurent – elles ? Comment ? Quelles sont les processus associés aux paramètres associés ? A quoi servent les données collectées*. École polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse, 38p.
- HINGRAY, B., PICOUE, C. & MUSY, A., 2009** : *Hydrologie 2 : Une science pour l'ingénieur*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Université de Science et Ingénierie de l'Environnement, Suisse, 640 p.
- KOUASSI, A. M., NASSA, R. A., YAO, K. B., KOUAME, K. F. & BIEMI, J., 2018** : *Modélisation statistique des pluies maximales annuelles dans le district d'Abidjan (sud de la Cote d'Ivoire)*. Revue des sciences de l'eau, 31(2), 147-160. <https://doi.org/10.7202/1051697ar>.
- LAHLAH, S., 2004** : *Les inondations en Algérie : Risques Naturels, Inondation, Prévision, Protection*, Actes des Journées Techniques, Batna, 15 p.
- M.D.E, 2004** : *les inondations : Document d'information*, Etude et rapport internes, Ministère de l'Ecologie, Paris, 20 p.
- MEDDI, M., & TOUMI, S., 2016** : Approche régionale pour l'estimation des pluies maximale journalières du Nord de l'Algérie. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°28, Dec 2016, pp. 285-301.
- N. U. C. R., 2003** : *Météorologie par satellite et climat mondial : Programme d'études*. Centres Régionaux Formation Aux Sciences et Techniques Spatiales, Nations unies, New York, 25 p.
- O.M.M, 2011** : *Manuel sur la prévision et l'annonce des crues*. Organisation Météorologique Mondiale, Suisse, 152 p.
- SALMON, N., 1997** : *L'Homme face aux crues et aux inondations*. Presses Universitaires de Bordeaux, 140 p.
- SCHRIVER-MAZZUOLI, L., 2012** : *La gestion durable de l'eau : Ressources – Qualité – Organisation*. Edition Dunod, livre de Technique et Ingénierie, Paris, 256 p.



**STRACHEY, M., 2006** : *Découverte de la Coopération internationale*. Dossier n°4, fondation Eduki, Centre pour l'Education et la Sensibilisation à la coopération internationale, Genève, 57 p.

**STRANGEWAYS, I., 2010**: *A History of rain gauges, early Measurements*. Book of Werther, 138p.

**TRIDON, F., 2011** : *Mesure des précipitations à l'aide d'un radar en bande X non-cohérent à haute résolution et d'un radar en bande K à visée verticale*. *Sciences de la Terre*. Thèse de Doctorat en Physique de l'Atmosphère, Université de Blaise Pascal - Clermont- Ferrand II, 199 p.

## Webographie

[01] <http://smabv.fr/wp-content/uploads/2021/08/htd.png>

[02] <http://www.risquesnaturels.re/>

[03] <https://sedipecc.com>

[04] <https://www.georisques.gouv.fr/>

[05] <https://www.mementodumaire.net>

[06] <https://stock.adobe.com/>

[07] <https://www.nord.gouv.fr/>

[08] <https://www.eaufrance.fr>

[09] <https://www.urbanicites.hypotheses.org>

[10] <https://www.atmo-franche-comte.org>

[11] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle\\_de\\_l'eau](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_de_l'eau)

[12] <https://docplayer.fr/>

[13] <https://fondationdaniellemitterrand.org/le-cycle-de-leau/>

[14] <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/vulnerabilite>

[15] <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/alea>

[16] <https://urbanicites.hypotheses.org/389>

[17] <https://www.protectioncivile.dz>

[18] <http://www.wrpllc.com/books/HyfranPlus/indexhyfranplus3.html>

[19] <https://www.eaufrance.fr/les-inondations-et-les-submersions-marines>