

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département : Hydraulique

Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique

*Impact du changement climatique sur
les courbes IDF et les périodes de retour*

Par: **Nadji Rayene**

Présenté et soutenu publiquement le 15/07/2021 par :

Composition du Jury :

Président

LEFKIR Abdelouahab

MCA ENSTP

Promoteurs

Mr. A.BERMAD

Professeur ENP

Mr. H.BOUTAGHANE

MCA U.ANNABA

Mme LAMECHE EL Khensa

Doctorante

Examineurs

OULEBSIR Rafik

Dr ENP

ALIANE Youcef

Doctorant U Annaba

ENP 2021

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département : Hydraulique

Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique

***Impact du changement climatique sur
les courbes IDF et les périodes de retour***

Par: Nadji Rayene

Présenté et soutenu publiquement le 15/07/2021 par :

Composition du Jury :

Président

LEFKIR Abdelouahab

MCA ENSTP

Promoteurs

Mr. A.BERMAD

Professeur ENP

Mr. H.BOUTAGHANE

MCA U.ANNABA

Mme LAMECHE EL Khensa

Doctorante

Examineurs

OULEBSIR Rafik

Dr ENP

ALIANE Youcef

Doctorant U Annaba

ENP 2021

من المتوقع أن يؤثر تغيير المناخ العالمي على أنماط هطول الأمطار في المستقبل. يجب أن تؤخذ هذه التغيرات في الاعتبار عند تقييم مخاطر الفيضانات المستقبلية. تقدم هذه الدراسة طريقة لقياس الزيادة في مخاطر الفيضانات الناجمة عن تغير المناخ في شمال الجزائر لإدارة مخاطر الفيضانات في المناطق الحضرية. لهذا استخدمنا برنامج Matlab الذي يساعدنا على إنشاء منحنيات IDF و كذلك أمطار المشروع للمناخ الحالي و المناخ المستقبلي لهذه المنطقة و كذلك تحديد آثار تغير المناخ على فترات العوده لمختلف الهياكل في قطاع الري

كلمات مفتاحية

Matlab منحنيات, IDF فترات العوده , أمطار المشروع, التغير المناخي.

Abstract:

Global climate change is expected to affect future precipitation patterns. These changes should be taken into account when assessing future flood risks.

This study presents a method for quantifying the increase in flood risk caused by climate change in northern Algeria for flood risk management in urban areas. For this we used a Matlab program which helps us to establish the IDF curves as well as the project rains of the current climate and future climates for this region as well as the determination of the effects of climate change on the return periods of the different hydraulic structures.

Keywords: Climate change, project rains, IDF curves, Matlab, Return period.

Résumé

Le changement climatique mondial devrait affecter les futurs régimes de précipitations. Ces changements doivent être pris en compte lors de l'évaluation des futurs risques d'inondation.

Cette étude présente une méthode de quantification de l'augmentation du risque d'inondation causée par le changement climatique dans le nord algérien pour la gestion des risques d'inondation en milieu urbain. Pour cela on a utilisé un programme Matlab qui nous aide à établir les courbe IDF ainsi que les pluies de projets du climat actuelle et climats future pour la cette région ainsi que la détermination des effets du changement climatique sur les périodes de retours des différents structure hydraulique.

Mots clés : Changement climatique, la pluie de projet, les courbes IDF, le logiciel Matlab, Période de retour.

Dédicace

A mon Père Hocine

A ma Chère Mère Soraya

A mon Frère Tedj Eddine

A mes familles NADJI et KHAREZI.

A mes amis

*Aya, Labiba, Jeehan, Hdjer, Chaïma, Rym, Zainb,
Malek*

A qui je souhaite un avenir radieux plein de réussite

*And For those we have lost but we still carry them
in our heart*

Remerciements

Tout d'abord, je remercie le bon dieu de ma avoir donné le courage, la patience et la volonté d'accomplir ce travail

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon cher professeur et encadrant Mr BERMAD, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

J'ai eu l'honneur d'être parmi vos élèves et de bénéficier de votre riche enseignement. Vos qualités pédagogiques et humaines sont pour moi un modèle. Votre gentillesse, et votre disponibilité permanente ont toujours suscité mon admiration.

Je remercie également Mr BOUTAGHANE et M^{me} LAMECHE EL Khensa pour le temps qu'il m'ont consacré et de ses précieux informations

Mes remerciements vont également pour les membres du jury d'avoir accepté de juger mon travail

Je dois un remerciement à tous les enseignants pour leurs qualités scientifiques et pédagogiques

Je tiens à remercier chaleureusement, tous mes proches et tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont apporté leurs sollicitudes pour accomplir ce Travail

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des acronymes

Introduction générale15

Chapitre I : Généralité sur le changement climatique

I.1 Introduction : 18

I.2 Prévision hydrologique : 18

I.3 Les précipitations :..... 19

I.3.1 Définition des précipitations : 19

I.3.2 Mécanismes de formation des précipitations 19

I.3.3 Mesure des précipitations :..... 22

I.3.3.1 L'appareillage :..... 23

I.3.3.2 L'appareillage de mesure :..... 23

I.3.4 Mesures de la hauteur d'eau précipité..... 25

I.3.5 Notion d'averses et d'intensités..... 26

I.3.6 Période de retour 28

I.4 Les inondations 29

I.4.1 Les types d'inondations 30

I.4.2 Les causes d'inondations 30

I.5 Courbe IDF :..... 31

I.5.1 Introduction : 31

I.5.2 Qu'est-ce qu'une courbe IDF ? 31

I.5.3 Principe général : 32

I.5.4 Pour quoi les courbes IDF ? 33

I.5.5 Construction des courbes IDF :..... 33

I.6 Changement climatique :..... 34

I.6.1 Notions associées au changement climatique : 34

I.6.2 Les changements climatiques observés : 36

I.6.3 La modélisation des changements climatiques :..... 37

Table des matières

I.6.4 La modélisation climatique :	38
I.6.5 Scénarios utilisés dans le RE5 du GIEC (2014).....	40
I.6.5.1 Les projections climatiques:	40
I.7 RICCAR ?	42
I.7.1 Objectifs	42
I.7.1.1 Le RICCAR atteindra les objectifs suivants :	42
I.7.1.2 Mandat :	42
I.7.1.3 Piliers	42
I.7.2 Méthodologie	43
I.7.3 Les résultats d'initiative régionale:	44
I.7.4 Évaluation intégrée :	45

Chapitre II: Présentation de la zone d'étude

II.1 Introduction :	47
II.2 La région hydrographique Algérois-Hodna-Soummam.....	47
II.2.1 L'Algérois :	47
II.2.2 La Soummam (15) :	48
II.2.3 Le Hodna (05) :	49
II.3 Situation Géographique	49
II.3.1 Le climat.....	50
II.3.2 Le relief	50
II.3.3 La pluviométrie	50
II.4 Conclusion :	51

Chapitre III : Traitement et exploitation des données

III.1 Introduction :	53
III.2 Pluie journalière :	53
III.3 Disponibilité des données :	53
III.4 Étude d'homogénéité des séries :	54
III.5 Transformation des données :	54
III.5.1 Problème dans l'enregistrement :	56

Table des matières

III.5.2 Elaboration d'un nouvel outil de traitement des données pluviographique (Matlab) :.....	56
III.6 L'utilisation des modèles climatique pour le calcul des précipitations :....	57
III.7 Modèle du système terrestre	57
III.7.1 EC EARTH	57
III.7.2 GFDL_ESM2M.....	57
III.8 Les précipitations dans un contexte de changements climatiques	58
III.8.1 Impacts des changements climatiques sur les précipitations	58
III.8.2 Impacts sur les courbes IDF	58
III.9 Pourquoi la rédaction d'échelle statistique « DOWNSCALING »?	59
III.10 Pourquoi corriger les biais ?	60
III.10.1 Ajustement de l'occurrence pour les données sur les précipitations	60
III.10.2 Quantile Mapping :.....	61
III.10.3 Les étapes de la correction de biais par la méthode de Quantile Mapping.....	61
Chapitre IV : Etablissement des courbes IDF et les pluies de projet	
IV.1 Introduction.....	65
IV.2 Types des séries étudiés	65
IV.3 Hydrologie statistique :	65
IV.3.1 Présentation du logiciel HYFRAN	65
IV.3.2 Utilisation du HYFRAN PLUS :.....	66
IV.3.2.1 Saisie des données :.....	66
IV.3.2.2 Teste d'hypothèse :	70
IV.3.2.3 Analyse fréquentielle.....	72
IV.3.2.3.1 Détermination de la loi d'ajustement le plus adéquat	72
IV.3.2.4 Tests d'adéquation	72
IV.3.2.4.1 Test du χ^2 de Pearson.....	72
IV.4 Etablissement des courbes IDF :	76

Table des matières

IV.4.1 Détermination des exposants climatique.....	84
IV.5 Élaboration de pluies de projet	89
IV.5.1 L'approche déterministe.....	90
IV.5.2 L'approche statistique	90
IV.5.2.1 Construction de la pluie de projet à partir de la méthode « pluie de projet double triangle ».....	90
IV.5.2.2 Construction de la pluie de projet à partir de la méthode « Pluie De Type Chicago »	91
IV.5.2.3 Construction de la pluie de projet à partir de la méthode « Pluie De Type Composite»	93
IV.6 Discussion et comparaison des résultats	97
IV.7 Conclusion	98
Chapitre V: Evaluation des risques d'ingénierie sur les ouvrages hydraulique sous les effets du changement climatique	
V.1 Introduction :.....	100
V.2 Changement climatique et ressources en eau	100
V.3 Précipitations maximales probables (PMP)	102
V.4 Évaluation des risques techniques modifiée en raison du changement climatique	103
V.5 Conclusion	109
Conclusion générale :.....	110

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Relation entre période de retour T (en années), probabilité de dépassement $P=1/T$, au nom de dépassement $P'=1-P$	29
Tableau I-2 : Profils représentatifs des scénarios les plus considérés dans les études (GIEC-GT1 2013)	39
Tableau I-3 : Comparaison entre SRES et RCP (GIEC-GT1 2013)	39
Tableau II-1 : Régions hydrographiques et leurs bassins versants	47
Tableau II-2 : Potentialités en eau de surface du bassin de l'Algérois	48
Tableau III-1 : Les coordonnées et les caractéristiques des stations retenues dans l'étude	54
Tableau IV -1 : Critères de comparaison des lois d'ajustement	76
Tableau IV-2 : Variable réduite de Gauss	77
Tableau IV-3 : Pluies pour différentes fréquences	77
Tableau IV-4 : Station Baraki 021421	77
Tableau IV-5 : Station Bir Mourad Rais 020509	78
Tableau IV-6 : Station Hamiz Barrage 020602	78
Tableau IV-7 : Station Mahelma ferme	78
Tableau IV-8 : Pr 6 EC EARTH 2046-2065	79
Tableau IV-9 : Pr 6 EC EARTH 2081-2100	79
Tableau IV-10 : Pr 6 ESM2M 2046-2065	79
Tableau IV-11 : Pr 6 ESM2M 2081-2100	80
Tableau IV-12 : Pr 7 EC EARTH 2046-2065	80
Tableau IV-13 : Pr 7 EC EARTH 2081-2100	80
Tableau IV-14 : Pr 7 GFDL 2046-2065	81
Tableau IV-15 : Pr 7 GFDL 2081-2100	81
Tableau IV-16 : Exposant climatique Montana de la station 021421	84
Tableau IV-17 : Exposant climatique Montana de la station 020509	85
Tableau IV-18 : Exposant climatique Montana de la station 020602	85
Tableau IV-19 : Exposant climatique Montana de la station 020511	85
Tableau IV-20 : Exposant climatique Montana de la station Pr 6 Ec earth 2046-2065	85
Tableau IV-21 : Exposant climatique Montana de la station Pr 6 Ec earth 2081-2100	85
Tableau IV-22 : Exposant climatique Montana de la station Pr 6 ESM2M 2046-2065	86
Tableau IV-23 : Exposant climatique de la station Pr 6 ESM2M 2081-2100	86
Tableau IV-24 : Exposant climatique Montana de la station Pr 7 Ec earth 2046-2065	86
Tableau IV-25 : Exposant climatique Montana de la station Pr 7 Ec earth 2081-2100	86
Tableau IV-26 : Exposant climatique Montana de la station Pr 7 GFDL 2046-2065	86
Tableau IV-27 : Exposant climatique Montana de la station Pr 7 GFDL 2081-2100	87
Tableau IV-28 : Exposant climatique Talbot de la station 021421	87
Tableau IV-29 : Exposant climatique Talbot de la station 020509	87
Tableau IV-30 : Exposant climatique Talbot de la station 020602	87
Tableau IV-31 : Exposant climatique Talbot de la station 020511	87
Tableau IV-32 : Exposant climatique Talbot de la station Pr 6 Ec earth 2046-2065	88
Tableau IV-33 : Exposant climatique Talbot de la station Pr 6 Ec earth 2081-2100	88
Tableau IV-34 : Exposant climatique Talbot de la station Pr 6 Esm2m 2046-2065	88

Liste des tableaux

Tableau IV-35 : Exposant climatique Talbot de la station Pr 6 ESM2M 2081-2100	88
Tableau IV-36 : Exposant climatique Talbot de la station Pr 7 Ec earth 2046-2065	88
Tableau IV-37 : Exposant climatique Talbot de la station Pr 7 Ec earth 2081-2100.....	89
Tableau IV-38 : Exposant climatique Talbot de la station Pr 7 GFDL 2046-2065.....	89
Tableau IV-39 : Exposant climatique Talbot de la station Pr 7 GFDL 2081-2100.....	89
Tableau IV-40 : Pluie de projet de la station 021421	94
Tableau IV-41 : Pluie de projet de la station 020509.....	94
Tableau IV-42 : Pluie de projet de la station 020602.....	94
Tableau IV-43 : Pluie de projet de la station 020511	94
Tableau IV-44 : Pluie de projet de la station Pr 6 EC EARTH 2046-2065	94
Tableau IV-45 : Pluie de projet de la station Pr 6 EC EARTH 2081-2100	95
Tableau IV-46 : Pluie de projet de la station Pr 6 ESM2M 2046-2065	95
Tableau IV-47 : Pluie de projet de la station Pr 6 ESM2M 2081-2100	95
Tableau IV-48 : Pluie de projet de la station Pr 7 EC EARTH 2046-2065	95
Tableau IV-49 : Pluie de projet de la station Pr 7 EC EARTH 2081-2100	95
Tableau IV-50 : Pluie de projet de la station Pr 7 GFDL 2046-2065	96
Tableau IV-51 : Pluie de projet de la station Pr 7 GFDL 2081-2100	96
Tableau V-1 : Caractéristiques des séries de données.....	101
Tableau V-2 : Valeurs numériques PMP.....	102
Tableau V-3 : Efficacité des précipitations	103
Tableau V-4 : Caractéristiques des précipitations ayant un impact sur le climat.....	107
Tableau V-5 : Comparaison des périodes de retour	108

Liste des figures

Figure I-1: Types de précipitation typique associés à un front chaud avançant sur de l'air glacial	19
Figure I-2: Les différents types de précipitation	20
Figure I -3: Précipitation convective	20
Figure I -4: Précipitation orographique	21
Figure I -5: Précipitation frontale.....	22
Figure I -6: Jauges de pluie cylindrique	24
Figure I -7: Jauges de pluie ordinaires	24
Figure I -8: Jauges de pluie à siphon.....	25
Figure I -9: Enregistreur de jauge de pluie auget basculeur.....	25
Figure I -10: Courbe des pluies cumulées et hyétogramme	27
Figure I -11: Conditions pour la distinction de deux averses consécutives	28
Figure I -12: Définition de la notion de période de retour	28
Figure I -13: Les types d'inondations	30
Figure I -14: Représentation schématique des courbes IDF.....	33
Figure I -15: Schéma explicatif de l'effet de serre	37
Figure I -16: Voies de concentration représentatives (RCP).....	40
Figure I -17: Changements observés concernant les précipitations annuelles sur les terres émergées (Source: IPCC 2013)	41
Figure I -18: Evolution de la température moyenne en surface entre 1986-2005 et 2081-2100 (Source: IPCC 2013)	41
Figure I -19: Evolution des précipitations moyennes entre 1986-2005 et 2081-2100 (Source: IPCC 2013).....	41
Figure I -20: Cadre de mise en œuvre de RICCAR	43
Figure I -21: Sponsor de RICCAR.....	44
Figure I -22: Evaluation intégrée.....	45
Figure II-1: Région hydrographique Algérois-Hodna-Soummam	48
Figure III-1: Figure de donnée brute de la station 020509.....	54
Figure III-2: Donnée RICCAR historique corrigée.....	62
Figure III -3: Donnée RICCAR future corrigée(2020-2100)	63
Figure IV-1: Diagramme SAD	66
Figure IV -2: Interface du logiciel HYFRAN description	67
Figure IV -3: Remplissement des informations de la série	67
Figure IV -4 : Interface du logiciel HYFRAN data	68
Figure IV -5: Exemple de test d'indépendance d'une série (station Baraki).....	70
Figure IV-6: Exemple de test de la stationnarité (station Baraki).....	71
Figure IV -7: Exemple de test d'homogénéité (station Baraki).....	71
Figure IV -8: Graphique de la probabilité de non dépassement.....	71
Figure IV -9: Histogramme de pluie	72
Figure IV -10: Ajustement de la série a la loi Gumbel	73
Figure IV -11: Graphique de la distribution loi Gumbel.....	74
Figure IV -12: Test d'adéquation de la loi Gumbel.....	74
Figure IV -13: Ajustement de la série a la loi GEV	74
Figure IV -14: Graphique de la distribution loi Gumbel.....	75

Liste des figures

Figure IV -15: Test d'adéquation de la loi GEV.....	75
Figure IV -16: Courbes IDF de la station 021421	81
Figure IV -17: Courbes IDF station 021421 (forme logarithmique).....	82
Figure IV -18: Courbes IDF station Bir Mourad Rais et Hamiz Barrage	82
Figure IV -19: Courbes IDF des stations Mahelma Ferme et Pr 6 Ec Earth 2046-2065	83
Figure IV -20: Courbes IDF des stations Pr 6 Ec Earth 2081-2100 et Pr 6 Esm2m 2046-2065	83
Figure IV-21: Courbes IDF des stations Pr 6 Esm2m 2081-2099 et Pr 7 Ec Earth 2046-2065	83
Figure IV -22: Courbes IDF Pr 7 Ec Earth 2081-2100 et Pr 7 GFDL 2046-2065	84
Figure IV -23: Courbe IDF de station Pr 7 2081-2100	84
Figure IV -24: Pluie de projet double triangle	91
Figure IV -25: La pluie de Chicago.....	92
Figure IV -26: Pluie de projet BARAKI (100 ans) double triangle	96
Figure IV -27: Pluie de projet BARAKI (100 ans) composite.....	97
Figure IV-28: Pluie de projet BARAKI (100 ans) Chicago.....	97
Figure V-1: Température moyenne d'air (°C) obtenu de la recherche climate unit (CRU) série chronologique mensuelle pour la période de 1901 à 2014. L'anomalie est calculée avec par rapport à la période de base 1981-2010 et filtres en trait plein (rouge) 5 ans moyenne mobile.	101
Figure V-2: Tendances des stations météorologiques et graphes PDF	106

Liste des acronymes

GIEC: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC en anglais)

SRES: Special Report on Emission Scenarios

IDF: Intensité Durée Fréquence

ANRH: Agence Nationale de Ressources Hydraulique

RICCAR: Regional Initiative of climate change in the Arab Region

CCNUCC: Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques

WMO: World Meteorological Organization

CNRM: Centre National De Recherches Météorologiques

RCM: Regional Climate Model

GCM: Global Climate Model

RCP: Representative Concentration Pathway

GES : Gaz à Effet de Serre

RHM: Regional Hydrological model

AV: Assessment Vulnerability

CORDEX: COordinated Regional climate Downscaling Experiment

CM: Climate Models

QM: Quantile Mapping

SMA: Série Maximale Annuelle

SAD: Système Aide à Décision

PMP: Probable Maximum Précipitation

Introduction générale

Introduction générale

Les événements de précipitations d'une ampleur spécifique qui conduisent à des inondations catastrophiques sont examinés de près par de nombreuses études de recherche visant à comprendre l'influence du changement et de la variabilité climatiques sur ces événements. Selon GIEC (2007d.2008) les augmentations de la fréquence des événements de fortes précipitations (fréquence ou proportion des précipitations totales provenant de fortes chutes) sur la plupart des zones sont indiquées comme probables sur la base des tendances dans la dernière partie du vingtième siècle. En outre, le GIEC (2007a) suggère que l'augmentation de la fréquence de ces événements est très probablement basée sur les projections de différents modèles de changement climatique pour le XXI^e siècle, compte tenu du rapport spécial sur les scénarios d'émissions (SRES). Les variations des futurs événements de précipitations extrêmes sont liées au climat changement et variabilité.

Les relations intensité/durée/fréquence (IDF) des précipitations extrêmes sont largement utilisées pour l'estimation des crues. Ils décrivent la relation entre l'intensité moyenne des précipitations et la fréquence d'occurrence (l'inverse de la période de retour) pour différents intervalles de temps d'une durée donnée. Ces intervalles sur lesquels l'intensité des précipitations est moyennée ou « agrégée » sont appelés « niveaux d'agrégation » ou simplement « durées ». Conditionnées à de telles durées, les relations conditionnelles IDF (ou relations intensité/fréquence) sont essentiellement des fonctions de distribution cumulative de l'intensité des précipitations (Eagleson, 1970; Chow et al., 1988). Comme on s'intéresse à des intensités de précipitations assez exceptionnelles (faible fréquence) lors de la conception des ouvrages d'eaux pluviales, les fonctions de distribution correspondent à des distributions de valeurs extrêmes. Pour dériver les relations IDF, le type approprié de distribution est sélectionné d'abord par une analyse des valeurs extrêmes et les paramètres de distribution sont calibrés pour une plage donnée de niveaux d'agrégation. Ensuite, les relations entre les paramètres du modèle et le niveau d'agrégation sont analysées.

Néanmoins, la partie intégrale de l'ensemble des systèmes de ressources en eau, les ouvrages d'art tels que les barrages, les canaux, et les puits sont également soumis aux impacts du changement climatique. Zakai SEN en (2017) examine la performance des ouvrages d'art en tenant compte de l'impact du changement climatique sur la formulation de l'évaluation des risques.

Notre travail consiste à établir les courbes IDF de trois périodes différentes ; la première période et de 1986-2005 appelés aussi période historique avec les données de l'ANRH, la deuxième entre 2046-2065 future proche et la troisième c'est entre 2081-2100 future éloigné avec les données RICCAR. Ainsi que l'évaluation du risque mené par le changement climatique sur les constructions hydrauliques.

L'objectif principal de l'établissement des courbes IDF des différents environ est pour visualiser l'impact du climat futur sur ces courbes et l'évaluation des risques du ce changements sur la période de retour des ouvrages hydrauliques.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail qui s'articule autour de (05) chapitres :

Introduction générale

- Chapitre I: Généralité sur le changement climatique pour mieux apprécie les notions de base sur les courbes IDF et le changement climatique.
- Chapitre II: donne une présentation de la zone d'étude de bassin versant de côtier de l'Algérois.
- Chapitre III : Traitement et exploitation des données pluviographiques et RICCAR.
- Chapitre IV : établissement des courbes IDF et les pluies de projets.
- Chapitre V: évaluation des risques d'ingénierie sur les ouvrages hydrauliques sous les effets du changement climatique.

Enfin, nous clôturerons le tout par une conclusion générale ainsi que par des recommandations et des perspectives relatives à des sujets pouvant donner suite à cette étude.

*Chapitre I : Généralités sur le
changement climatique*

I.1 Introduction :

Presque quotidiennement, nous pouvons observer que le monde est submergé par des catastrophes hydrométéorologiques telles que les ouragans, les inondations et les sécheresses, qui sont tous associés à des pertes et des souffrances dévastatrices par conséquent.

Les configurations optimales des systèmes d'infrastructures hydrauliques représentent un grand défi pour les chercheurs. L'incertitude apportée par le changement climatique (ou les extrêmes climatiques) fait le défi encore plus important. Lutter contre les effets du changement climatique dans le développement des plans de gestion des catastrophes a été à l'ordre du jour de nombreux gouvernements et institutions.

La modélisation hydrodynamique des crues est un aspect important dans le développement de l'atténuation des crues et les stratégies d'adaptation au climat. Par conséquent, une planification de la gestion des catastrophes plus efficace nécessite à la fois les scénarios de changement climatique actuels et projetés pour lesquels une gamme de mesures optimales doit être faite.

I.2 Prévision hydrologique :

Une des principales vocations dans de nombreux pays est de fournir des prévisions et de signaler les événements extrêmes, principalement les risques d'inondations, de sécheresses, de tornades et d'avalanches.

Pour ce qui est de la prévision, les informations doivent en premier lieu être disponibles de façon fiable et claire dans des délais suffisamment courts pour que les décisions appropriées puissent être prises rapidement et en toute certitude.

Une prévision hydrologique consiste à faire l'estimation préalable de l'état futur d'une caractéristique hydrologique. Le besoin de telles prévisions croît avec l'expansion économique d'un pays et l'utilisation de ses ressources en eau.

Les méthodes de prévision vont de l'utilisation de formules empiriques simples ou de corrélations à celle de modèles mathématiques complexes simulant toutes les phases du bilan hydrologique d'un bassin. Les processus hydrologiques sont influencés par les facteurs météorologiques, mais les changements qu'ils provoquent dans le régime ne se manifestent pas immédiatement. La durée du ruissellement causé par les précipitations dans un bassin relativement vaste, par exemple, est nettement supérieure à celle de la précipitation elle-même. De même, la fonte des neiges ne provoque pas immédiatement une augmentation brusque du débit, etc. Le rythme relativement lent du déroulement des processus hydrologiques et le fait qu'ils suivent avec un certain retard les processus météorologiques plus rapides, permettent de prévoir et de calculer à l'avance un certain nombre d'éléments importants du régime hydrologique (Guide des pratiques).

I.3 Les précipitations :

I.3.1 Définition des précipitations :

Les précipitations sont les chutes d'eau du ciel sous différentes formes; sous forme liquide (bruine, pluie, averse) ou bien sous forme solide (neige, grésil, grêle). Ils se forment tous à partir des nuages qui s'élèvent à environ 8 à 16 kilomètres au-dessus du sol dans la troposphère terrestre à cause d'un changement de température ou de pression.

Les précipitations ont lieu chaque fois qu'une ou toutes les formes de particules d'eau tombent de ces niveaux élevés de l'atmosphère et atteignent la surface de la terre. La chute au sol est causée par la traînée de friction et la gravité. Lorsqu'une particule tombant tombe du nuage, elle laisse derrière elle un sillage turbulent, provoquant des chutes plus rapides et continues.

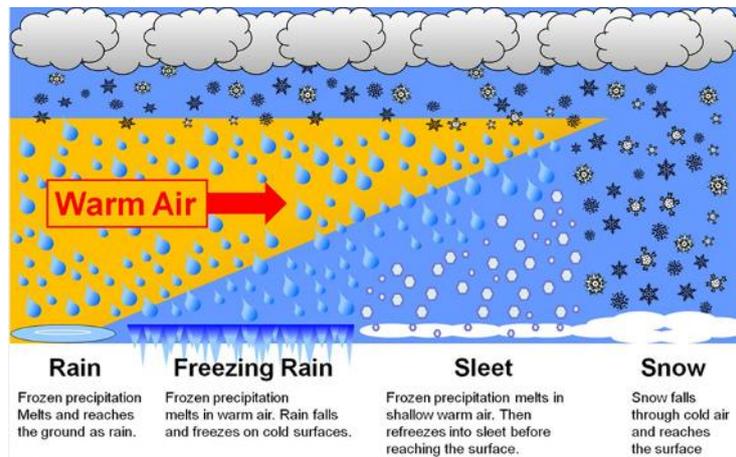


Figure I-1 : Types de précipitation typique associés à un front chaud avançant sur de l'air glacial

I.3.2 Mécanismes de formation des précipitations

La formation de la précipitation nécessite la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique. La saturation est une étape essentielle à tout déclenchement.

Lorsque l'air local devient saturé de vapeur d'eau et ne peut plus maintenir le niveau de vapeur d'eau sous forme gazeuse. Cela se produit lorsque de l'air humide moins dense se refroidit, généralement lorsqu'une masse d'air monte dans l'atmosphère. Cependant, une masse d'air peut également se refroidir sans changement d'altitude (par exemple par refroidissement radiatif ou contact du sol avec un terrain froid).

Il existe plusieurs types de précipitations qui sont :

- Convective
- Orographique
- Frontale

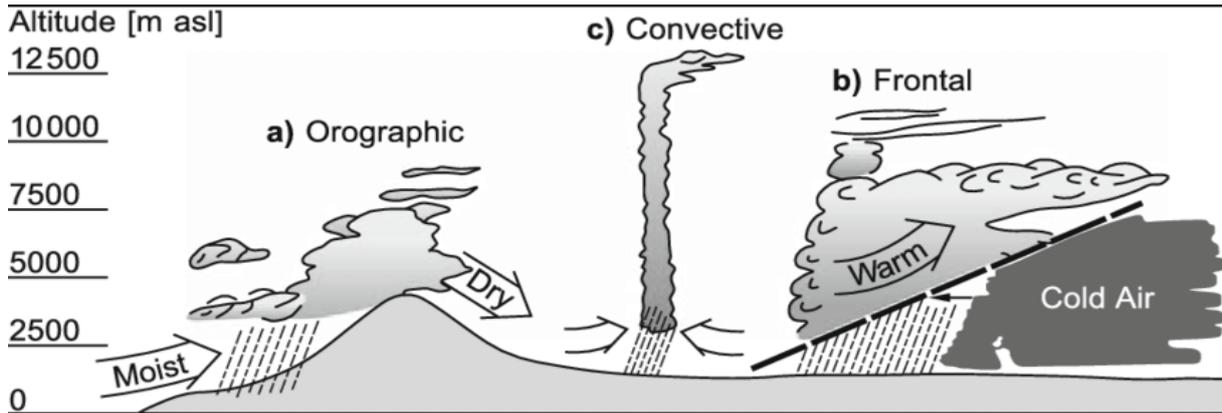


Figure I-2 : Les différents types de précipitation

Les précipitations convectives :

Très fréquent dans les zones où le sol est chauffé par le soleil brûlant, comme les tropiques. Se résultent d'une ascension rapide des masses d'air dans l'atmosphère, à développement vertical important avec une augmentation importante de température. Les précipitations résultantes de ce processus sont en général orageuses, de courte durée (moins d'une heure), de forte intensité et de faible extension spatiale.

Mécanisme de formation :

L'air en s'échauffant devient léger et monte en courants de convection.

Au fur et à mesure que l'air monte, il se dilate et diminue la température et, par la suite, une condensation se produit et des cumulus se forment.

De fortes pluies accompagnées d'éclairs et de tonnerre se produisent qui ne dure pas longtemps.

Une telle pluie se produit généralement en été ou dans la partie la plus chaude de la journée. Ce type de pluie a généralement lieu dans les régions équatoriales et les parties internes des continents, principalement dans l'hémisphère nord ; Cette pluviométrie est généralement associée à la grêle.

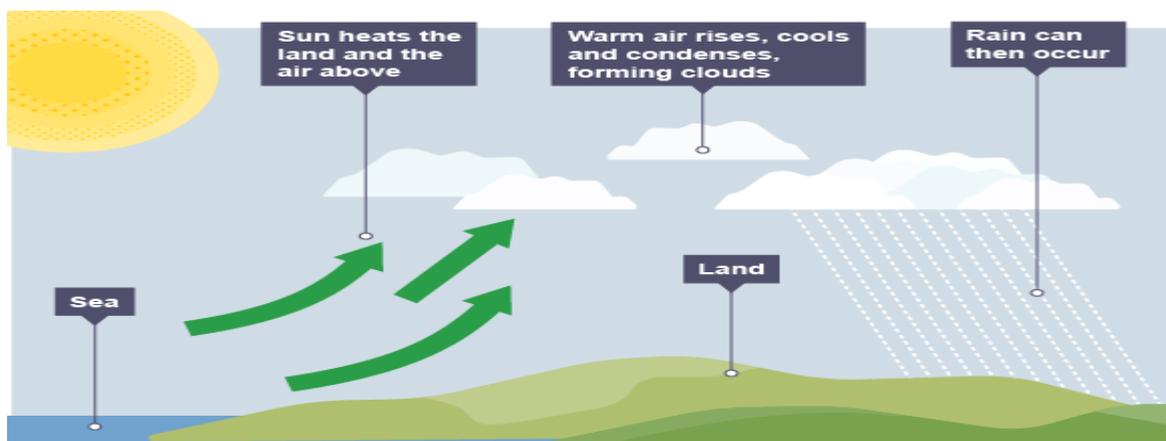


Figure I-3 : Précipitation convective

Chapitre I : Généralités sur le changement climatique

Les précipitations orographiques :

Comme son nom l'indique (du grec o ros, montagne), ce type de précipitations résulte de la rencontre entre une masse d'air chaude et humide et une barrière topographique particulière. Par conséquent, ce type de précipitations n'est pas « spatialement mobile » et se produit souvent au niveau des massifs montagneux. Les caractéristiques des précipitations orographiques dépendent de l'altitude, de la pente et de son orientation, mais aussi de la distance séparant l'origine de la masse d'air chaud du lieu de soulèvement. En général, elles présentent une intensité et une fréquence assez régulières.

Mécanisme de formation :

- Lorsque la masse d'air saturée vient sur une montagne, elle est forcée de se lever.
- L'air croissant se développe, éventuellement, la température tombe et l'humidité est condensée.
- La principale caractéristique de ce type de pluie est que les pentes au vent ont plus de précipitations.
- Après avoir donné de la pluie sur le côté venteux, lorsque ces vents atteignent l'autre pente, ils se lâchent et leur température augmente. Ensuite, leur capacité à prendre en humidité augmente et donc, ces pentes sous le vent restent sèches et sans pluie.
- La région située sur le côté sous le vent est connue sous le nom de zone de pluie.

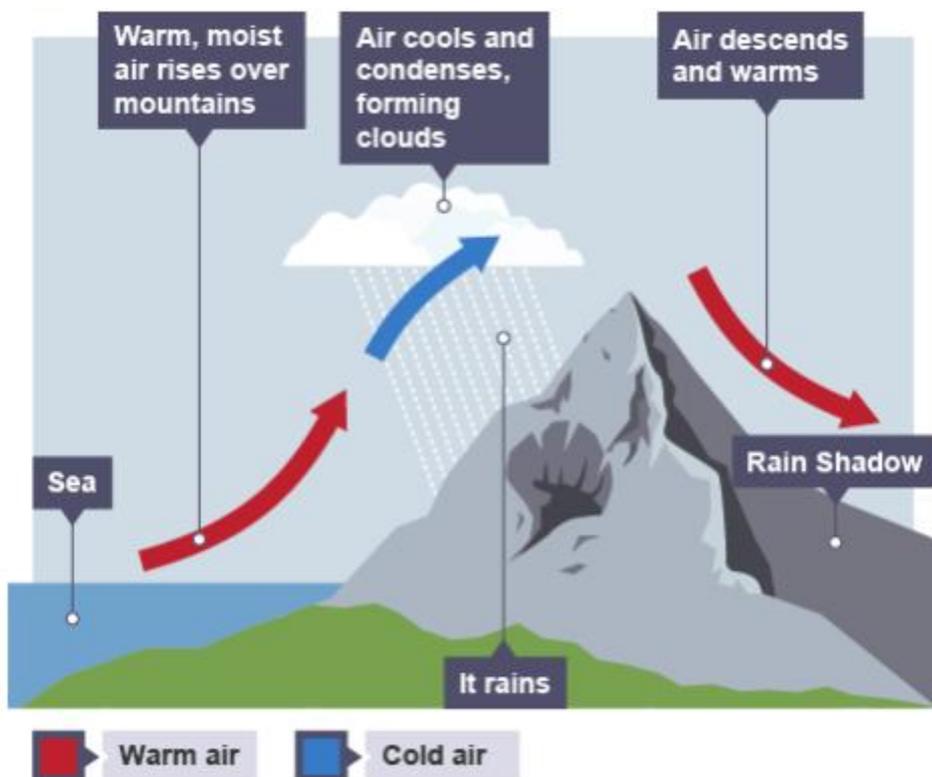


Figure I-4 : Précipitation orographique

Chapitre I : Généralités sur le changement climatique

Les précipitations frontales :

Les précipitations frontales ou de type cyclonique. Elles sont associées aux surfaces de contact entre deux masses d'air de température, de gradient thermique vertical, d'humidité et de vitesse de déplacement différents, que l'on nomme « fronts ». Les fronts froids (une masse d'air froide pénètre dans une région chaude) créent des précipitations brèves, peu étendues et intenses. Du fait d'une faible pente du front, les fronts chauds (une masse d'air chaude pénètre dans une région occupée par une masse d'air plus froide) génèrent des précipitations longues, étendues, mais peu intenses.

Mécanisme de formation :

- Lorsque deux masses d'air de la densité, de la température et de l'humidité contrairement à se rencontrer, il est formé.
- La couche qui les sépare est connue comme front.
- Un front chaud et le front froid sont les deux parties de l'avant.
- Au front chaud, le vent chaud plus chaud augmente légèrement sur l'air froid plus lourd.
- Comme l'air chaud se lève, il se refroidit et l'humidité présente de manière à former des nuages
- Cette pluie tombe progressivement pendant quelques heures à quelques jours.

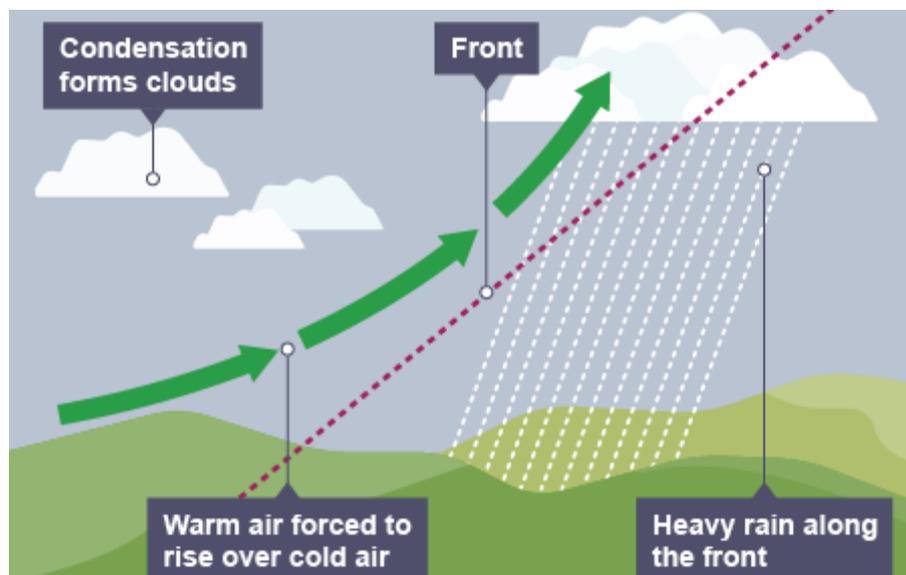


Figure I-5 : Précipitation frontale

I.3.3 Mesure des précipitations :

Quelle que soit la forme de la précipitation, liquide ou solide, on mesure la quantité d'eau tombée durant un certain laps de temps.

Les précipitations sont mesurées à l'aide d'un pluviomètre et, plus récemment par les techniques de télédétection telles que le radar météorologique. Lorsqu'elle est classée en fonction du taux de précipitations, la pluie peut être divisée en catégories.

Chapitre I : Généralités sur le changement climatique

- La pluie légère décrit les précipitations qui tombent à un taux compris entre une trace et 2,5 millimètres par heure.
- Une pluie modérée décrit des précipitations avec un taux de précipitation compris entre 2,6 millimètres et 7,6 millimètres par heure.
- Les fortes pluies décrivent les précipitations avec un taux de précipitation supérieur à 7,6 millimètres par heure.

L'intensité des chutes de neige est classée en termes de visibilité.

- Lorsque la visibilité est supérieure à 1 kilomètre, la neige est jugée faible.
- La neige modérée décrit une chute de neige avec des restrictions de visibilité comprises entre 0,5 kilomètre et 1 kilomètre.
- Les fortes chutes de neige décrivent les conditions où la visibilité est limitée à moins de 0,5 kilomètre.

I.3.3.1 L'appareillage :

Il existe deux catégories principales d'appareils de mesure des précipitations : les pluviomètres et les pluviographes.

- Le pluviomètre : instrument de base de la mesure des précipitations liquides ou solides. Il indique la quantité d'eau totale précipitée et recueillie à l'intérieur d'une surface calibrée dans un intervalle de temps séparant deux relevés ; en mm ($1 \text{ mm} = 1 \text{ L/m}^2 = 10 \text{ m}^3/\text{ha}$)
- Le pluviographe : instrument captant la précipitation de la même manière que le pluviomètre mais avec un dispositif permettant de connaître, outre la hauteur d'eau totale, leur répartition dans le temps, autrement dit l'intensité de la pluie, en mm/h, sur des pas de temps courts de l'ordre de 1 à 6 minutes en général, les pas de temps étant fixes ou variables.

I.3.3.2 L'appareillage de mesure :

Le pluviomètre est un instrument de mesure qui sert à trouver la quantité de pluie tombée sur une région supposons que l'eau des précipitations est uniformément répartie.

Si nous examinons de près des jauges de pluie différentes, nous remarquerons que la majorité d'entre eux travaillent sur le même principe de base. La pluie tombe dans un entonnoir cylindrique qui recueille l'eau, qui tombe dans un mécanisme de mesure différent. Ces différents mécanismes et méthodes de collecte et de mesure des précipitations rendent chaque jauge de pluie différente. Il existe principalement cinq types de jauges de pluie:

- i. Jauges de pluie cylindrique
- ii. Jauges de pluie ordinaires
- iii. Jauges de pluie à SIPHON
- iv. Jauges de pluie auget basculeur
- v. Enregistreur de jauge de pluie auget basculeur

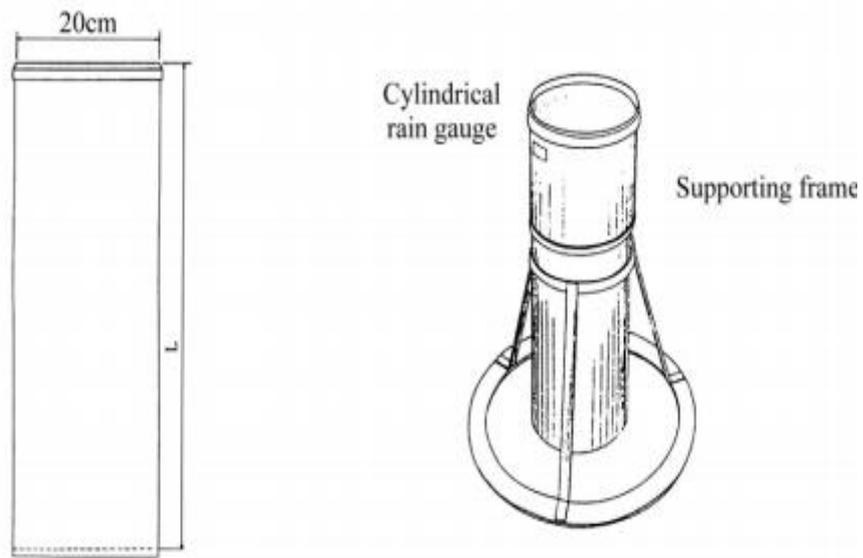


Figure I-6 : Jauges de pluie cylindrique

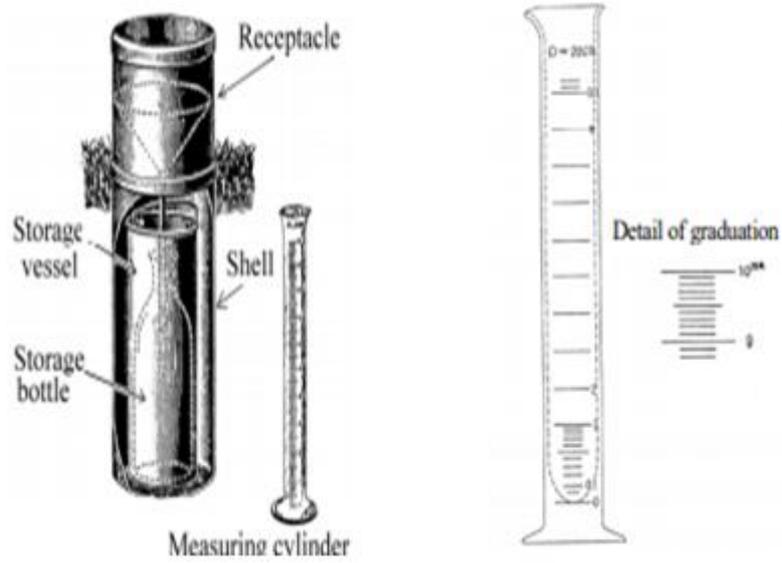


Figure I-7 : Jauges de pluie ordinaires

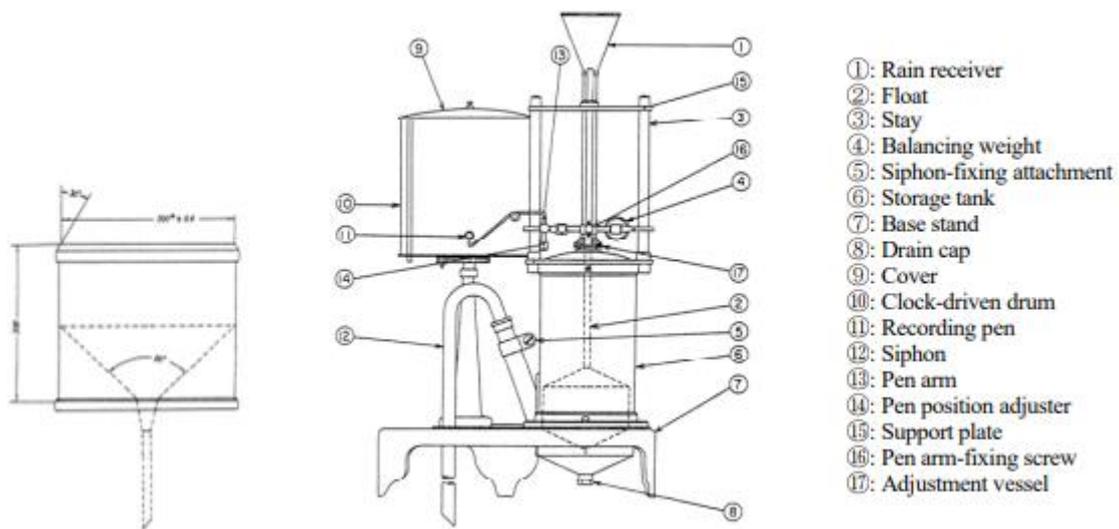


Figure I-8 : Jauges de pluie à siphon

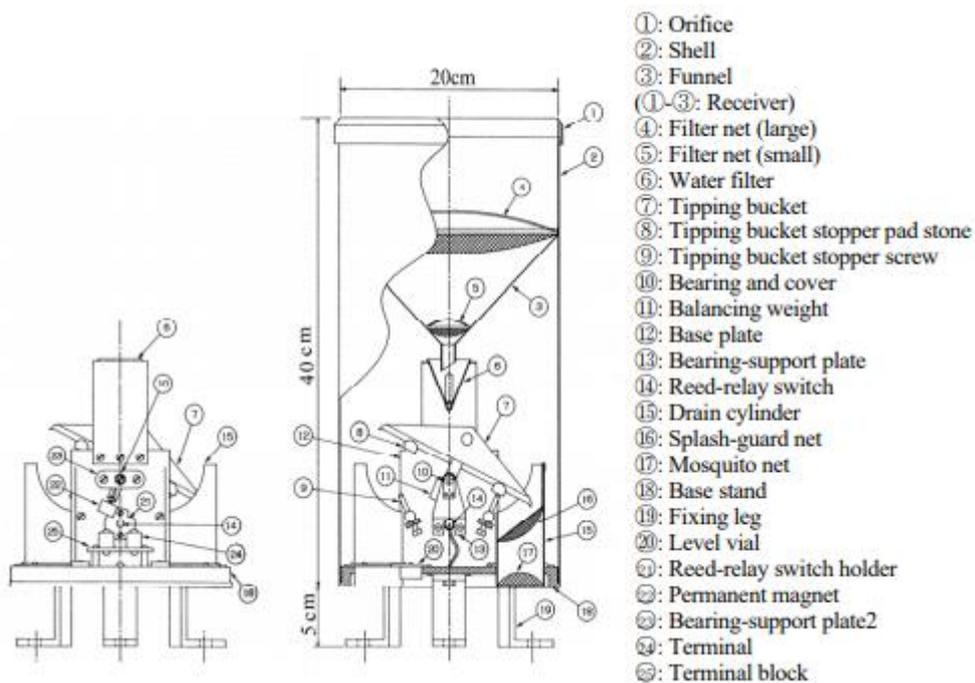


Figure I-9 : Enregistreur de jauge de pluie à augets basculeurs

I.3.4 Mesures de la hauteur d'eau précipité

La hauteur d'eau précipité ou bien la lame d'eau précipitée par unité de surface horizontale en (mm).L'intensité des précipitations est une mesure de la quantité de pluie qui tombe au fil du temps.

L'intensité de la pluie est mesurée dans la hauteur de la couche d'eau recouvrant le sol sur une période de temps. Cela signifie que si la pluie reste là où elle tombe, elle formerait

une couche d'une certaine hauteur. Parfois, les gens parlent du volume d'eau qui tombe sur un mètre carré dans un laps de temps: Un millimètre d'eau équivaut à un litre d'eau sur un mètre carré.

I.3.5 Notion d'averses et d'intensités

D'un point de vue météorologique, on devrait utiliser le terme pluie continue et averse distinctivement.

La première différence apparaît: la durée. Généralement une averse est courte, de quelques minutes à moins d'1h. Elle peut aussi commencer et se terminer soudainement. Alors qu'une pluie peut durer beaucoup plus longtemps et même parfois toute une journée.

L'intensité distingue aussi ces précipitations. La pluie continue gardera une intensité constante généralement faible ou modérée. Et les averses sont plus instables et souvent plus intenses.

Et enfin, les prévisions météo sont plus fiables concernant la pluie continue car elle représente une perturbation à grande échelle contrairement à l'averse concernant le point de l'échelle mais ça ne nous empêche pas à pouvoir déterminer les zones qui seront touchées par ce type de précipitation.

L'intensité moyenne d'une averse s'exprime par le rapport entre la hauteur de pluie observée et la durée t de l'averse:

$$i_m = \frac{h}{t} \quad \text{I-1}$$

Où :

i_m : intensité moyenne de la pluie [mm/h, mm/min] ou ramenée à la surface [l/s.ha],

h : hauteur de pluie de l'averse [mm],

t : durée de l'averse [h ou min].

L'intensité des précipitations est variable dans le temps au cours d'un même événement (averse).

On utilise généralement l'intensité moyenne de ce dernier au lieu d'utiliser l'averse complet ; on s'intéresse à déterminer sur un intervalle de temps la plus grande valeur (hauteur) obtenue. On parle dans ce cas d'une intensité maximale.

Deux types de courbes déduites des enregistrements d'un pluviographe (pluviogramme) permettent d'analyser les averses d'une station :

- La courbe des hauteurs de pluie cumulée,
- le hyétogramme.

Chapitre I : Généralités sur le changement climatique

La courbe des hauteurs de pluie cumulées représente en ordonnée, pour chaque instant t , l'intégrale de la hauteur de pluie tombée depuis le début de l'averse.

Le hyétoqramme est la représentation, sous la forme d'un histogramme, de l'intensité de la pluie en fonction du temps. Il représente la dérivée en un point donné, par rapport au temps, de la courbe des précipitations cumulées. Les éléments importants d'un hyétoqramme sont le pas de temps Dt et sa forme. Communément, on choisit le plus petit pas de temps possible selon la capacité des instruments de mesure. Quant à la forme du hyétoqramme, elle est en général caractéristique du type de l'averse et varie donc d'un événement à un autre.

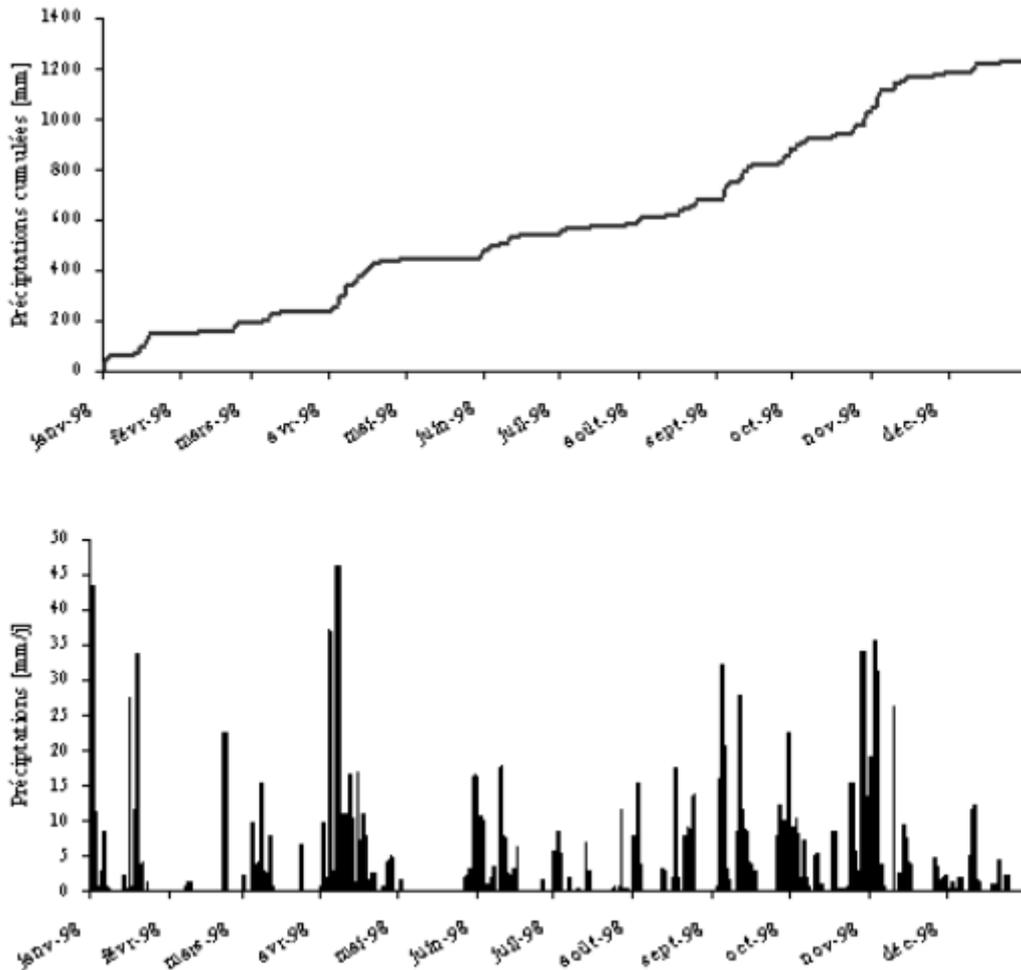


Figure I-10 : Courbe des pluies cumulées et hyétoqramme

Le critère de continuité d'un épisode pluvieux varie selon le bassin versant. Généralement, deux averses sont considérées comme distinctes :

1) si la précipitation ΔH tombant durant l'intervalle de temps Δt qui les sépare est inférieure à un certain seuil

Chapitre I : Généralités sur le changement climatique

2) si cet intervalle de temps est lui-même supérieur à une certaine valeur définie compte tenu du type de problème étudié. En représentant les averses sous forme de hyétogramme, la problématique de la séparation des averses se résume comme suit :

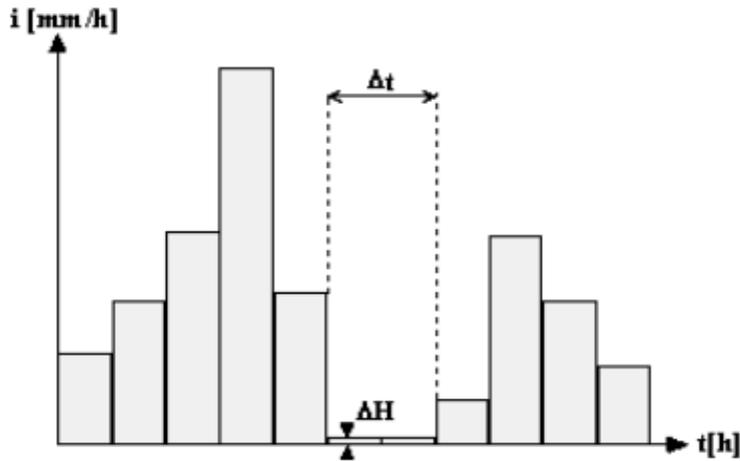


Figure I-11 : Conditions pour la distinction de deux averses consécutives

I.3.6 Période de retour

On définit la période de retour T_s comme étant l'intervalle de temps moyen entre deux événements, dont l'intensité atteint ou dépasse un certain seuil « s » (voir figure I.2). Cela veut dire que sur un intervalle de temps T_s , il y a en moyenne un événement d'intensité supérieure ou égale à « s ». T_s est comptée dans une unité de temps arbitraire; en hydrologie c'est le plus souvent l'année. (DEFrance–2009)

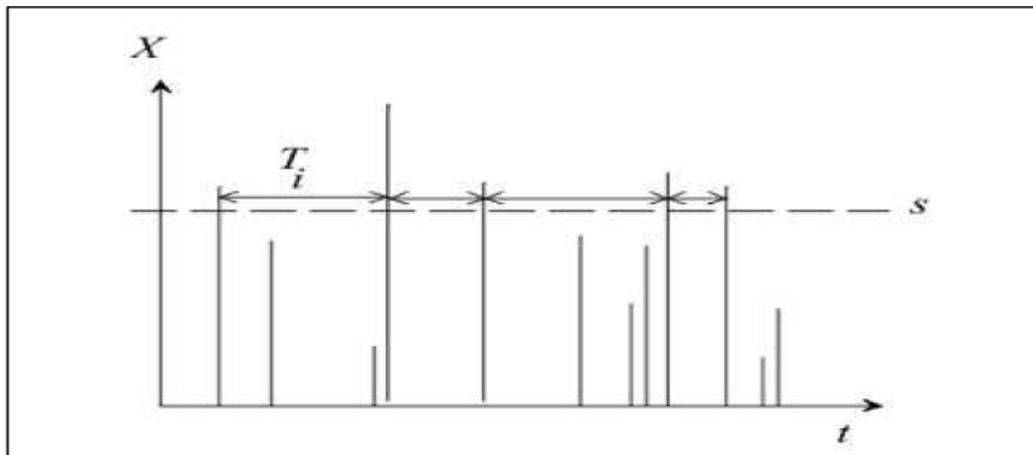


Figure I-12 : Définition de la notion de période de retour

Chapitre I : Généralités sur le changement climatique

On cherche à savoir la probabilité pour qu'un événement pluvieux (par exemple une hauteur, une durée ou intensité de pluie) soit atteint ou dépassée.

Si par exemple on considère l'intensité de pluie i . Le temps de retour T d'un événement est l'inverse de la fréquence d'apparition de ce l'événement. Cette formule veut dire qu'en moyenne toutes les T années l'intensité de pluie i sera atteinte ou dépassée.

$$F(x_i) = 1 - \frac{1}{T} \qquad T = \frac{1}{1 - F(x_i)}$$

T : temps de retour

i : une variable aléatoire

$F(x_i)$: la probabilité appelée fréquence de non dépassement : $F(x_i) = P(i \leq x_i)$

$1 - F(x_i)$: est la fréquence d'apparition (ou de dépassement) donnée par complément de $F(x_i)$ à l'unité.

La période de retour d'une pluie est le temps statistique qu'il faut attendre pour observer la pluie telle que définie ; c'est-à-dire sur sa hauteur de précipitation, son intensité, sa durée. L'avantage de la période de retour est de rendre plus « parlante » la notion de probabilité d'occurrence. Les phénomènes extrêmes sont en effet associés à des probabilités d'occurrence très petites et pour le commun des mortels, il y a peu de différence entre 0,01 et 0,001, alors qu'en termes de probabilité des phénomènes extrêmes, c'est une différence colossale. Le tableau 4.1 donne les correspondances entre périodes de retour et probabilité de dépassement et non-dépassement (**Christophe Ancey, 2011**).

Tableau I-1 : Relation entre période de retour T (en années), probabilité de dépassement $P=1/T$, au non dépassement $P'=1-P$

T (ans)	P	P'
1	1	0
10	0.1	0.9
100	0.01	0.99
1000	0.001	0.999

I.4 Les inondations

Une inondation est la submersion d'une zone rapide ou lente qui peut être provoquée de plusieurs façons, par des pluies importantes en durée et (ou) en intensité.

Un cours d'eau présente :

- Le lit mineur où les eaux y sont en permanence ;
- le lit moyen qui est l'espace fluvial, sur lequel s'écoulent les crues aux périodes de retour de 1 à 10 ans en moyenne. Le lit moyen est donc soumis à un risque fréquent d'inondation. La vitesse de l'eau y est forte et cet espace est soumis à de fortes érosions et transports solides lors des crues ;
- Le lit majeur qui est l'espace occupé par un cours d'eau lors d'une inondation. Hors du lit majeur, le risque d'inondation fluviale est nul (ce qui n'exclut pas le risque d'inondation par ruissellement pluvial, en zone urbanisée notamment).

I.4.1 Les types d'inondations

Il existe trois principaux types d'inondations :

1. Inondation par débordement direct
2. Inondation par accumulation d'eau ruisselée
3. Inondation par remontée dans les réseaux d'assainissement dans des points bas localisés

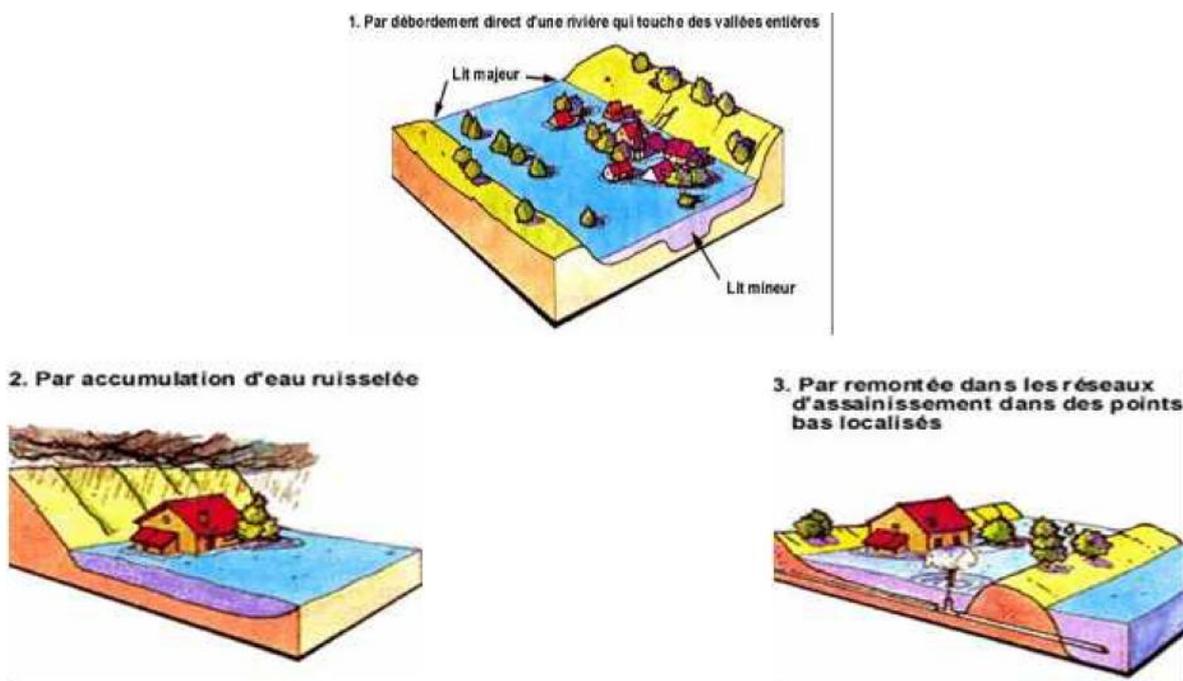


Figure I-13 : Les types d'inondations

I.4.2 Les causes d'inondations

Plusieurs facteurs provoquent les inondations parmi ces facteurs on trouve :

- Souvent les trois zones des cours d'eau (le lit mineur, le lit moyen et le lit majeur) sont transformées par l'activité humaine ou par les changements climatiques.
- Ainsi avec un sol plus propice au ruissellement il y a une diminution de la perméabilité de l'ensemble du bassin dû aux déboisements, aux incendies de forêts, aux multiplications de surfaces revêtues (routes, maisons,...) et rend alors les crues beaucoup plus brutales.
- La répartition et l'intensité des précipitations dans le bassin versant (qui est le lieu où les rivières collectent l'eau d'un territoire plus ou moins grand) et la durée des précipitations.

I.5 Courbe IDF :

I.5.1 Introduction :

Les courbes intensité-durée-fréquence des précipitations (IDF) jouent un rôle important dans l'ingénierie et la gestion des ressources en eau.

Les applications des courbes IDF vont de l'évaluation des événements pluviométriques, de la classification des régimes climatiques, pour la conception des systèmes de drainage urbains, etc.

Les courbes intensité-durée-fréquence des précipitations (IDF) sont des représentations graphiques de la probabilité qu'une intensité moyenne des précipitations se produise au cours d'une période donnée (Dupont et Allen 2000).

Fournissant une relation mathématique entre l'intensité des précipitations i , la durée d et la période de retour T (ou équivalent à la fréquence annuelle de dépassement f), les courbes IDF permettent d'estimer la période de retour d'un événement pluviométrique observé ou inversement de la l'intensité des précipitations correspondant à une période de retour donnée (Elsebaie 2012).

Les tempêtes de conception dérivées des courbes IDF sont couramment adoptées dans l'ingénierie des ressources en eau pour la conception de systèmes de drainage urbains, l'évaluation de l'endurance des structures hydrauliques et l'évaluation des vulnérabilités régionales aux inondations (Keifer et Chu 1957).

La première courbe IDF a été établie dès 1932, alors que depuis lors, de nombreux ensembles de relations IDF ont été construits pour plusieurs régions du monde (Chow 1988; Gellens 2002; Grimaldi et al.2011).

I.5.2 Qu'est-ce qu'une courbe IDF ?

Il est bien connu que l'intensité (le I d'IDF) de la pluie est très variable. Aux profanes cette variabilité peut sembler totalement aléatoire. Pour celui qui s'y intéresse d'un peu plus près, même s'il n'est pas météorologue, il apparaît toutefois qu'il y a certaines « règles » observables qui régissent le phénomène : le chaos n'est pas total !

De l'observation on déduit que, « en moyenne », plus la durée analysée (le D d'IDF) augmente, plus l'intensité diminue : les averses les plus brèves sont souvent les plus violentes; au contraire les longues pluies, d'automne par exemple, sont généralement assez «tranquilles» (de faible intensité).

Cette tendance à l'augmentation de l'intensité lorsque la durée diminue, ou inversement à la diminution de l'intensité lorsque la durée augmente, n'est toutefois qu'une moyenne. Finalement, pour mieux caractériser le phénomène on associe à chaque événement une probabilité d'apparition. Pratiquement les ingénieurs et les hydrologues parlent de temps de

retour : tel événement se produit, en moyenne sur une longue période, toutes les x années. On parle de fréquence d'apparition.

Donc Les courbes IDF mettent la relation entre les intensités, la durée et la fréquence d'apparition des pluies qui sont liées par deux lois générales de pluviosité.

- Pour une même fréquence d'apparition (donc un même temps de retour) l'intensité d'une pluie est d'autant plus forte que sa durée est courte.
- A durée de pluie égale, une précipitation sera d'autant plus intense que sa fréquence d'apparition sera petite (donc que son temps de retour sera grand)

I.5.3 Principe général :

Les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) ou Hauteur-Durée-Fréquence (HDF) permettent d'estimer les fréquences de dépassement F des événements pluvieux observés à partir de leur durée et de leur intensité moyenne I ou de leur hauteur H , par interpolation graphique ou mathématique.

En pratique, on remplace généralement la fréquence de dépassement F par la période de retour T associée, définie comme l'intervalle de temps moyen séparant deux événements dont l'intensité moyenne ou la hauteur atteint ou dépasse un seuil donné.

La période de retour T est généralement exprimée en années (Bertrand-Krajewski *et al.* 2000) Précisons dès à présent que pour estimer avec une incertitude acceptable un événement de période de retour T , il faut disposer d'observations sur une durée minimale d'environ 3 à 5 fois la période de retour T .

Ainsi, une estimation raisonnable d'une hauteur de pluie centenaire demande au minimum 30 à 40 ans de données ; Pour un objectif de dimensionnement hydraulique des réseaux, on s'intéresse généralement aux événements dits « fréquents », c'est à dire de périodes de retour égales à 1, 2, 5 et 10 ans, voire plus pour certains ouvrages structurants. Dans une logique de gestion du risque, des événements « exceptionnels » de périodes de retour de l'ordre de 50 à 100 ans sont étudiés, ce qui impose la plupart du temps l'utilisation de méthodes d'extrapolation des observations, méthodes fondées sur des lois statistiques applicables aux valeurs extrêmes (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2007).

La courbe IDF (Réméniéras, 1980) est une relation entre l'intensité moyenne maximale (mesurée en mm/h) de pluie (mesurée en mm/h), la durée de référence ou résolution (ou durée d'agrégation) de cette pluie (mesurée en minutes) et la période de retour de l'événement pluvieux T (mesurée en années) ($T=1/p$) : $i = f(T, d)$, où p est la probabilité de dépassement annuelle. Les relations entre l'intensité, la durée et la fréquence d'apparition des pluies sont étudiées statistiquement et reportées selon des courbes caractéristiques appelées les courbes IDF (Ghanmi, 2014).

Les lois permettant d'établir les relations entre les intensités, la durée et la fréquence d'apparition des pluies peuvent être représentées selon des courbes caractéristiques : on parle généralement de courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF). La notion de fréquence est en fait exprimée par la notion de temps de retour.

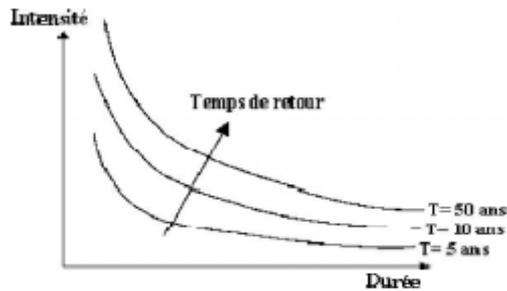


Figure I-14 : Représentation schématique des courbes IDF

I.5.4 Pourquoi les courbes IDF ?

Les courbes IDF servent à calculer l'intensité des pluies pour différentes périodes de retour, cette intensité sera introduite dans la relation de la méthode rationnelle

$$Q = C.I.A \quad \text{I-2}$$

C: coefficient de ruissellement,

I : intensité

A : superficie (Bertrand-Krajewski et al. 2000).

I.5.5 Construction des courbes IDF :

Les courbes IDF sont établies sur la base de l'analyse d'averses enregistrées à une station au cours d'une longue période. Les courbes obtenues peuvent donc être construites de manière analytique ou statistique. (LABORDE – 2000)

Représentation analytique

Différentes formules sont proposées pour représenter l'intensité critique d'une pluie en fonction de sa durée.

La forme la plus générale (avec T variable) est la suivante :

$$I = k.T^a / (t+c)^b \quad \text{I-3}$$

i : intensité totale [mm/h], [mm/min] ou intensité spécifique [l/s.ha],

T : période de retour en années,

t : durée de référence [h] ou [min],

k, a, b, c : paramètres d'ajustement.

- Formule de Talbot

$$i = \frac{a}{b+t} \quad \text{I-4}$$

- Formule de Montana

$$i = \frac{a}{t^b} \quad \text{I-5}$$

Avec :

i: intensité maximale de la pluie [mm/h],

t: durée de la pluie [minutes ou heures],

T; intervalle de récurrence (ou temps de retour) [années],

a, b: constantes locales,

I.6 Changement climatique :

I.6.1 Notions associées au changement climatique :

a. Le climat :

Le climat est l'état physique de l'atmosphère en un lieu et à un moment donnée. Il correspond à la distribution statique des conditions de l'atmosphère terrestre dans une région donnée pendant une période de temps donnée .La météorologie désigne la prévision du climat à venir à court terme et dans des zones ponctuelles.

Le climat est une ressource naturelle qui affecte une bonne partie des activités humaines telles que la production agricole, la consommation d'énergie et l'utilisation de certaines ressources telle que l'eau (OKM,1992) .Le climat est défini comme l'état moyen sur une période d'au moins 30 ans de l'atmosphère en un lieu donné ,en termes de températures et de précipitations ou encore d'humidité. La détermination du climat est effectuée à l'aide de moyennes établis à partir de mesures annuelles et mensuelles sur des données atmosphériques locales : température, pression atmosphérique, précipitations, ensoleillement, humidité, vitesse du vent, sont également pris en compte leur récurrence ainsi que les phénomènes exceptionnels (Pagney , 1993).

Le terme climat est apparu dans la langue française au XIIe siècle comme dérivé du latin « climatis » qui provient du grec « Klima » qui désigne l'inclinaison de la Terre par rapport au soleil. Les premiers découpages climatiques ont été établis selon l'inclinaison des rayons du Soleil par rapport à l'horizon.

Selon le phénomène qui domine , on dit que le climat est chaud , froid ou tempéré ,sec ou humide ,calme ou venteux .On considère toutefois la chaleur qui exerce la plus grande influence, viennent ensuite les quantités d'eau tombée dans les diverses saisons de l'année ,l'humidité ou la sécheresse de l'air ,les vents dominats , le nombre et la répartition des orages au cours de l'année, la nébulosité de l'air ,la nature du sol et celle de la végétation qui le recouvre . (Donald A. Wilhite, 2005)

b. Changement climatique :

Les changements climatiques désignent une variation statistiquement significative de l'état moyen du climat ou de sa variabilité persistant pendant de longues périodes (généralement, pendant des décennies ou plus). Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels ou à des forçages externes, ou encore à des changements anthropiques persistants de la composition de l'atmosphère ou de l'affectation des terres. On notera que la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), dans son Article 1, définit les changements climatiques » comme étant des «changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours des périodes comparables.

La CCNUCC fait ainsi une distinction entre les « changements climatiques » qui peuvent être attribués aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère, et la « variabilité climatique » due à des causes naturelles. (WMO., 2008)

c. Variabilité climatique :

La variabilité climatique désigne des variations de l'état moyen et d'autres statistiques (écarts standards, phénomènes extrêmes, etc.) du climat à toutes les échelles temporelles et spatiales au-delà des phénomènes climatiques individuels. La variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique (variabilité interne), ou à des variations des forçages externes anthropiques ou naturels (variabilité externe) (ONERC, 2007). Les évolutions possibles de ces variables climatiques peuvent être ramenées à deux types de modifications à analyser (Ouarda et al, 1999):

- Le changement de la moyenne.
- Le changement de la variance.

De nombreuses études à travers le monde ont été menées pour la détection de ces changements. En Afrique sahélienne et non sahélienne beaucoup d'auteurs ont mis en évidence, à partir des séries hydro-pluviométriques, une phase sèche qui a débuté vers les années 1970 et qui perdure jusqu'à présent. Dans cette région, il a été constaté :

- Diminution de la pluviométrie annuelle (Hubert et Carbonnel, 1998; Paturel et al, 1995; Paturel. et al, 1997; Tarhule Aondover et Woo Ming-ko, 1998; Moron Vincent, 1994 ; Servat et al, 1999),
- Diminution du nombre de jours de pluie (Paturel J.E. et al, 1997; Servat et al., 1997; Houndénou et Hernandez., 1998; Tarhule Aondover et Woo Ming-ko, 1998; Servat et al., 1999),
- Diminution des débits des rivières (Sircoulon, 1987; Opoku-Ankomah et Amisigo., 1998),
- Diminution des niveaux des lacs (Sircoulon, 1987),

Chapitre I : Généralités sur le changement climatique

- Fortes intensités de pluies (Houndénou et Hernandez, 1998; Tarhule et Woo, 1998, GIEC, 2008)
- ainsi qu'un raccourcissement de la saison pluvieuse (Bello, 1998 ; Servat et al, 1999). Assani (1999) a mis en évidence, à l'aide du filtre récursif passe-bas de Hanning d'ordre 2 ;
- La succession de phases sèches et humides à Lubumbashi (Congo-Kinshasa);
- La dernière phase sèche en date a commencé vers les années 1980 et se prolonge, jusqu'à nos jours ;
- Les précipitations sont significativement corrélées aux indices d'oscillation australe pendant la saison de pluies.

Kadi (1995) a étudié aussi l'évolution pluviométrique par rapport à l'indice de normalité sur quelques pays méditerranéens (Italie, Algérie, France, Grèce, Espagne Maroc, Portugal et Moyen-Orient) et a montré que :

- Certaines zones sont plus affectées que d'autres, par exemple l'Algérie et l'Espagne dans la partie occidentale et la Grèce et le Moyen-Orient dans la partie orientale;
- Généralement, la sécheresse est apparue sur la majorité des pays du bassin méditerranéen depuis les débuts des années 80.

Les études effectuées par GIEC (2008) sur le changement climatique des pays du bassin méditerranéen, prévoient :

- Une augmentation des températures et;
- Une accentuation de la variabilité climatique.

Cela s'est particulièrement caractérisé par une modification de l'intensité, de la répartition des précipitations, et une amplification des phénomènes extrêmes tels que l'inondation et la sécheresse. La rapidité et la persistance de ces phénomènes, dans le temps et dans l'espace, présagent que cette tendance est en passe de devenir structurelle en relation avec le réchauffement climatique. (FARAH, 2012)

I.6.2 Les changements climatiques observés :

Les observations mettent en évidence un changement de la composition de l'atmosphère (augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre tels que le CO₂ et le méthane (CH₄), etc.), ainsi qu'un changement du climat mondial (températures, précipitations, niveau de la mer, glace marine, et dans certaines régions, phénomènes climatiques extrêmes, y compris vagues de chaleur, fortes précipitations, et sécheresses, etc.). Onze des douze dernières années (1995–2006) figurent parmi les douze années les plus chaudes depuis 1850, date à laquelle ont débuté les relevés instrumentaux de la température à la surface du globe.

Chapitre I : Généralités sur le changement climatique

Les températures ont augmenté presque partout dans le monde, bien que de manière plus sensible aux latitudes élevées de l'hémisphère Nord. Par ailleurs les terres émergées se sont réchauffées plus rapidement que les océans (GIEC, 2007). Cette évolution n'est pas uniforme et tend à varier d'une région à une autre, par exemple, le réchauffement en Afrique est légèrement plus élevé par rapport à la tendance mondiale en On ne peut dire à l'heure actuelle si l'accélération du rythme qui a été constatée entre 1993 et 2003 traduit une variation décennale ou un renforcement de la tendance à long terme. Entre 1900 et 2005, les précipitations ont fortement augmenté dans l'Est de l'Amérique du Nord et du Sud, dans le Nord de l'Europe et dans le Nord et le Centre de l'Asie, tandis qu'elles diminuaient au Sahel, en Méditerranée, en Afrique australe et dans une partie de l'Asie du Sud.

Il est probable que la sécheresse a progressé à l'échelle du globe depuis les années 1970. Il est très probable que les journées froides, les nuits froides et le gel ont été moins fréquents sur la plus grande partie des terres émergées depuis cinquante ans et que le nombre de journées chaudes et de nuits chaudes a au contraire augmenté. De plus, la fréquence des phénomènes ci-après s'est probablement accrue : vagues de chaleur sur la majeure partie des terres émergées, fortes précipitations dans la plupart des régions et, depuis 1975, élévations extrêmes du niveau de la mer dans le monde entier (GIEC, 2007). (FARAH, 2012)



Figure I-15 : Schéma explicatif de l'effet de serre

I.6.3 La modélisation des changements climatiques :

La modélisation des changements climatiques est basée sur l'utilisation des modèles climatiques et des scénarios des changements climatiques. Elle permet d'estimer des prévisions ou tendances climatiques pour le futur. Plusieurs groupes de chercheurs se sont penchés sur la problématique des changements climatiques tant pour le développement des modèles climatiques afin d'améliorer la qualité des projections obtenues (Prudhomme et al. 2002 ; CNRM 2010 ; IPCC 2013 ; CCmaC 2014) que pour l'utilisation des résultats des

modèles climatiques (Mailhot et al. 2007 ; Mailhot et al. 2008a ; IPCC 2013 ; Mailhot et al. 2014). La section I.6.4 présente les éléments clés de la modélisation climatique. La section I.6.4 permet de présenter les projections obtenues à partir de la modélisation du climat futur.

I.6.4 La modélisation climatique :

Il existe deux principaux groupes de modèles climatiques : les modèles de circulation globale (MCG) et les modèles régionaux de climat (MRC). Les MCG permettent de réaliser une simulation globale du climat terrestre et les MRC permettent de réaliser une simulation locale ou régionale du climat. En effet, les MCG représentent des outils indispensables pour l'estimation du climat sur l'ensemble de la planète qui sont calés à l'aide des données disponibles sur les climats anciens (Bizec 2006). Ils ont été développés pour déterminer l'effet de l'augmentation des gaz à effets de serres (GES) sur l'évolution du climat au cours du XXI^{ème} siècle.

Les MCG possèdent plusieurs avantages tels que la prédiction de l'évolution globale du réchauffement de la planète, l'évolution de l'augmentation du niveau moyen global de la mer. En effet, ces modèles favorisent l'interprétation de la redistribution des éléments physiques, radiatifs ou thermodynamiques associés aux changements de phase de l'eau tels que la chaleur et l'humidité (Beniston 2009). Toutefois, les MCG possèdent plusieurs inconvénients tels que la représentation adéquate des phénomènes climatiques régionaux ou locaux compte tenu de leur faible résolution spatiale, la génération des incertitudes dues à leur structure interne (GIEC-GT1 2001; Prudhomme et al. 2002). Ainsi, les MRC ont été développés afin de dépasser les limites des MCG.

L'un des inconvénients majeurs de ces modèles est qu'ils possèdent les MCG comme conditions aux limites initiales propageant ainsi les incertitudes générées par les modèles globaux. Toutefois, les techniques d'auto imbrication permettent de réduire cette prolifération des incertitudes. Contrairement aux MRC, les MCG possèdent les scénarios de circulations atmosphériques comme conditions aux limites initiales.

Comme les modèles climatiques, les scénarios de changements climatiques peuvent être regroupés en trois principales classes référant ainsi à leur génération de développement. La première classe qui représente la première génération ne considère que les émissions des GES dans ces paramètres (classe devenue quasi inexistante). Ensuite, la seconde qui est composée des scénarios du rapport spécial sur les scénarios d'émission des GES (SRES), en plus des émissions des GES, considère les effets des aérosols sulfatés. La troisième classe est principalement composée de l'ensemble des profils représentatifs de l'évolution de concentration (RCP) et permet d'intégrer des politiques climatiques pour le XXI^{ème} siècle. Les scénarios les plus mentionnés dans la littérature sont principalement :

➤ Pour les SRES : A1, A1B et A2

Les scénarios de type A1 considèrent un état d'émissions des GES le plus négligeable possible, tandis que ceux de type A2, considèrent l'état d'émission des GES le plus important

Chapitre I : Généralités sur le changement climatique

possible. Quant aux scénarios de type A1B, ils représentent l'état intermédiaire entre les scénarios de type A1 et A2 (Mailhot et al. 2014).

➤ Pour les scénarios de type RCP

Les scénarios de type RCP représentent les scénarios les plus utilisés. Ils sont représentés dans le Tableau I-2. Notons que le profil de type RCP6.0 est quasiment équivalent au RCP4.5 (Sirastav et al. 2015). Les chiffres désignant chacun des profils expriment le changement de forçage radiatif associé aux concentrations des émissions des GES (Mailhot et al. 2014).

Tableau I-2 : Profils représentatifs des scénarios les plus considérés dans les études (GIEC-GT1 2013)

Nom du scénario	Type de scénario
RCP2.6	Scénario d'atténuation conduisant à un niveau de forçage très bas.
RCP4.5	Scénario de stabilisation.
RCP8.5	Scénario lié aux émissions des gaz à effet de serre très élevées.

Une brève comparaison des scénarios de type SRES et RCP est présentée au Tableau I-3.

Tableau I-3 : Comparaison entre SRES et RCP (GIEC-GT1 2013)

SRES	RCP
N'intègrent pas de politiques climatiques	Intègrent les politiques climatiques
Profil décrit jusqu'en 2100	Profil décrit jusqu'en 2300
Peuvent être définis à partir de la croissance économique et de la croissance de la population mondiale	Peuvent être définis à partir des nouveaux scénarios sociaux-économiques qui sont définis en termes de défi d'adaptation et défi d'atténuation à atteindre

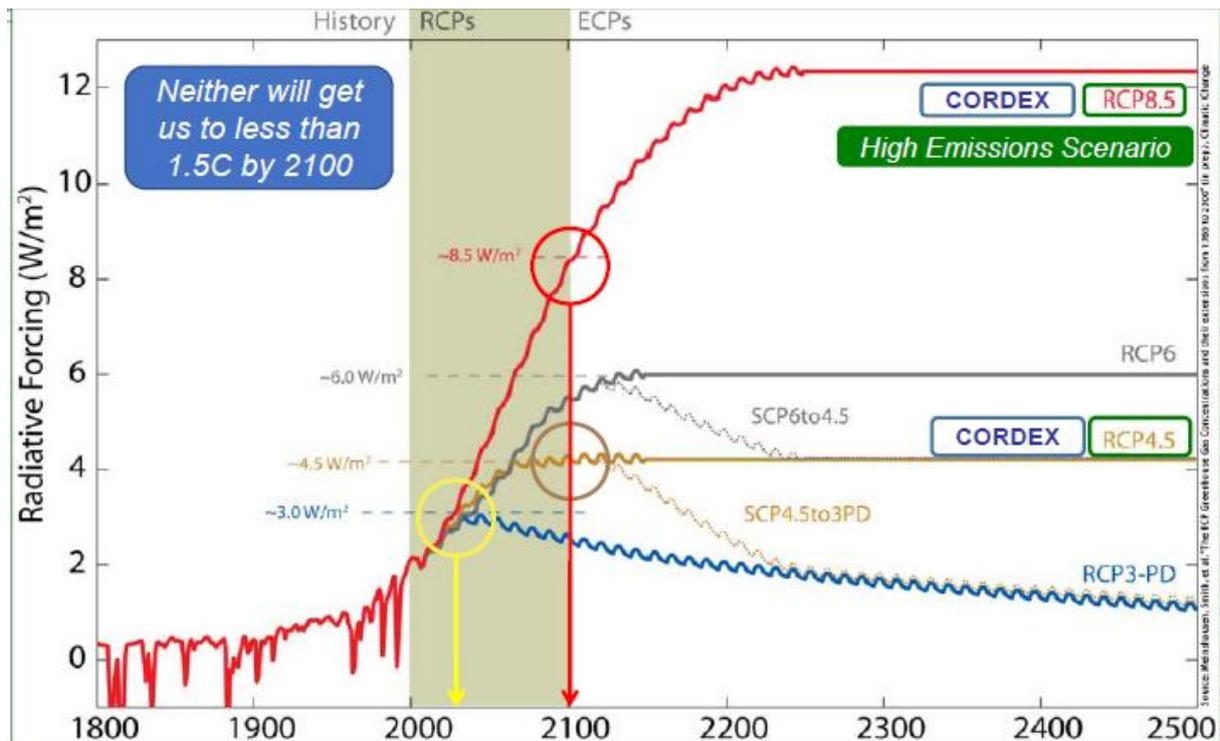


Figure I-16 : Voies de concentration représentatives (RCP)

I.6.5 Scénarios utilisés dans le RE5 du GIEC (2014)

I.6.5.1 Les projections climatiques:

Le cinquième rapport du GIEC présente les changements observés de l'évolution du climat au cours des trois dernières décennies. Ces observations confirment l'hypothèse selon laquelle le climat évolue vers un réchauffement global de la planète émise dans leurs précédents rapports en montrant que les décennies plus ressenties sont plus chaudes que leurs précédentes (GIEC-GT1 2001 ; WG1-IPCC 2007 ; GIEC-GT1 2013 ; IPCC 2013). Il ressort de ce rapport que la période de 1983 à 2012 est enregistrée comme étant la plus chaude période relevée dans l'hémisphère Nord à ce jour.

Le Figure I.15 montrent les résultats des observations de l'évolution du climat au cours de la dernière décennie tel que présenté dans le cinquième rapport du GIEC. Ainsi, l'évolution des températures et des changements concernant les précipitations est explicitement montrée dans les résultats de ces observations.

Durant la période allant de 1901 à 2010, une augmentation globale de 0,19 m du niveau moyen de la mer est relevée (IPCC 2013).

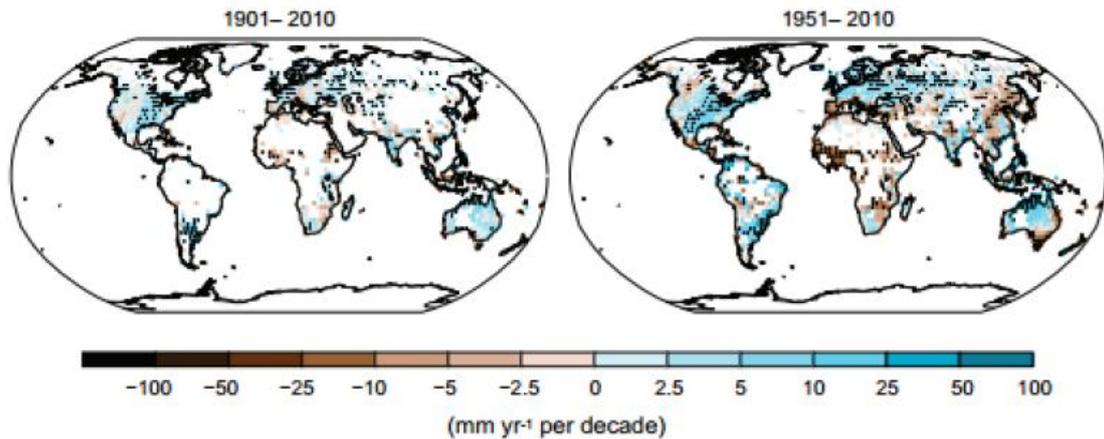


Figure I-17 : Changements observés concernant les précipitations annuelles sur les terres émergées (IPCC 2013)

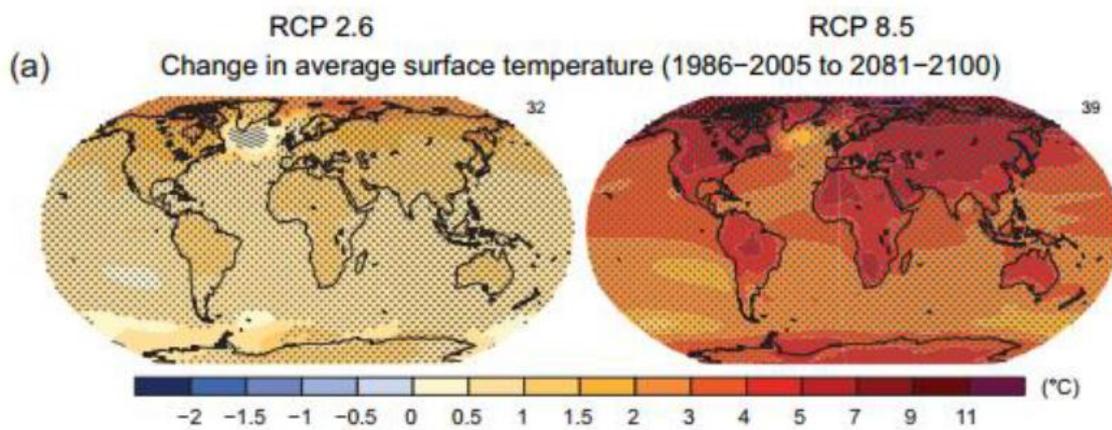


Figure I-18 : Evolution de la température moyenne en surface entre 1986-2005 et 2081-2100 (IPCC 2013)

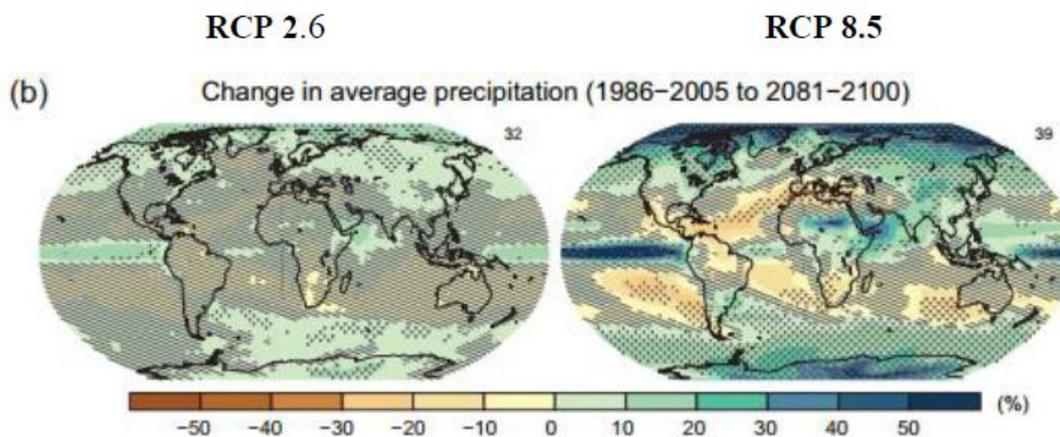


Figure I-19 : Evolution des précipitations moyennes entre 1986-2005 et 2081-2100 (IPCC 2013)

I.7 RICCAR ?

L'initiative régionale pour l'évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau et la vulnérabilité socio-économique dans la région arabe (RICCAR) est le résultat d'un effort de collaboration entre les Nations Unies et la Ligue des États arabes (LEA) et les organisations spécialisées respectives pour répondre à la demande du Conseil ministériel arabe de l'eau et du Conseil des ministres arabes responsables de l'environnement d'approfondir la compréhension de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau et ses implications associées pour la vulnérabilité socio-économique dans la région arabe

L'initiative régionale vise à évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau douce dans la région arabe à travers une évaluation consultative et intégrée qui cherche à identifier la vulnérabilité socio-économique et environnementale causée par les impacts du changement climatique sur les ressources en eau dans la région arabe.

I.7.1 Objectifs

I.7.1.1 Le RICCAR atteindra les objectifs suivants :

L'Initiative régionale vise à évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau douce dans la région arabe à travers une initiative régionale consultative et intégrée qui cherche à identifier la vulnérabilité socio-économique et environnementale causée par les impacts du changement climatique sur les ressources en eau sur la base des spécificités régionales.

Les résultats de l'évaluation visent à fournir une plate-forme commune pour traiter et répondre aux impacts du changement climatique sur les ressources en eau douce dans la région arabe en servant de base au dialogue, à la définition des priorités et à la formulation de politiques sur l'adaptation au changement climatique au niveau régional.

I.7.1.2 Mandat :

Les gouvernements arabes ont appelé à la préparation de l'évaluation à travers diverses déclarations et résolutions sur lesquelles est basée la coordination ONU-Ligue des États arabes (UN-LAS).

I.7.1.3 Piliers

Pilier 1 : Examen de base

Développer une image claire de l'état actuel des ressources en eau douce et du climat dans la région arabe sur la base d'un ensemble commun d'indicateurs et de méthodes.

Pilier 2 : Analyse d'impact et évaluation de la vulnérabilité

Examiner les modèles de circulation mondiale (GCM) existants et sélectionner un ou deux modèles climatiques régionaux (RCM) pour une application au niveau de la région arabe

Chapitre I : Généralités sur le changement climatique

qui peuvent être convenablement réduits et intégrer la modélisation hydrologique et l'élaboration de scénarios pour servir de base analytique pour procéder à l'évaluation de la vulnérabilité.

Pilier 3 : Renforcement des capacités et renforcement institutionnel

Renforcement institutionnel et renforcement des capacités en matière de gestion des connaissances, de modélisation, d'analyse d'impact et d'évaluation de la vulnérabilité, en mettant l'accent sur le travail à travers les réseaux existants sur le changement climatique pour améliorer les capacités dans ces domaines.

Pilier 4 : Sensibilisation et diffusion de l'information

Des activités de sensibilisation ainsi que des outils pour présenter des messages clés simplifiés aux parties prenantes ciblées sur les résultats. Il sera mis en œuvre à travers : une brochure, un site Web, des documents techniques, des notes d'orientation, une cartographie.

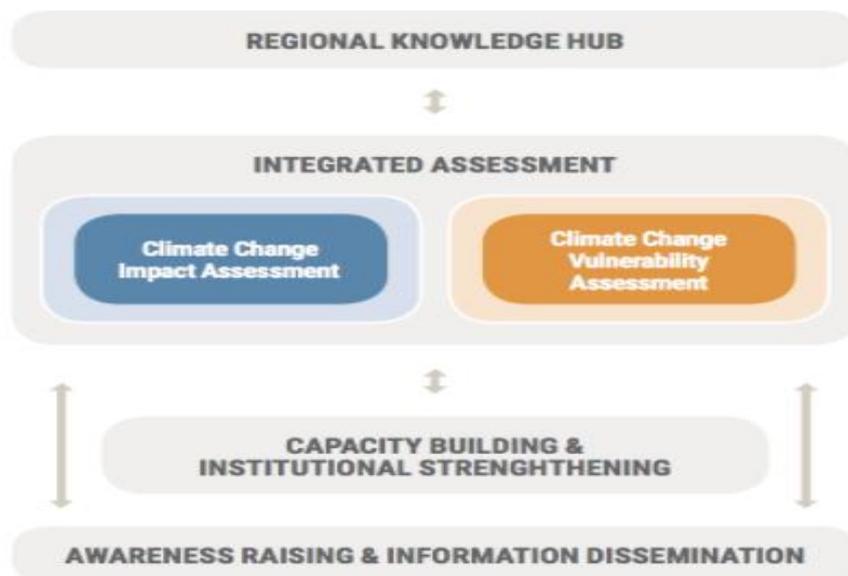


Figure I-20 : Cadre de mise en œuvre de RICCAR

I.7.2 Méthodologie

La méthodologie intégrée combine des outils d'évaluation de l'impact du changement climatique et d'évaluation de la vulnérabilité.

Les cinq étapes de l'analyse comprennent :

1. Sélection de voies de concentration représentatives (RCP) et examen des modèles climatiques mondiaux (MCG) disponibles.
2. Mettre en œuvre un ensemble de modèles climatiques régionaux (MCR) sur un domaine arabe pour réduire les projections climatiques.

Chapitre I : Généralités sur le changement climatique

3. Interfaçage des modèles hydrologiques régionaux (RHM) avec les sorties du MCR pour analyser les impacts du changement climatique sur les ressources en eau.
4. Mener une évaluation de la vulnérabilité socio-économique (AV) basée sur les résultats de l'évaluation d'impact.
5. Réalisation d'une cartographie intégrée (IM) pour faciliter l'analyse et le dialogue sur les politiques régionales.

I.7.3 Les résultats d'initiative régionale:

1. Établir un pôle arabe de connaissances sur le climat et l'eau.
2. Délimiter un domaine arabe pour la modélisation du climat régional conformément aux protocoles CORDEX.
3. Compléter un ensemble de projections climatiques régionales pour la région arabe sur la base de voies de concentration représentatives.
4. Mener une analyse détaillée des impacts du changement climatique sur les ressources en eau sur la base d'outils de modélisation hydrologique.
5. Intégrer l'analyse des événements météorologiques extrêmes dans l'évaluation de l'impact du changement climatique et l'évaluation de la vulnérabilité.
6. Identifiez les points chauds de vulnérabilité.
7. Accroître la capacité des ministères de l'eau et des institutions météorologiques arabes à s'engager dans la prévision et la projection du changement climatique.
8. Fournir une compréhension scientifique commune et comparable des impacts du changement climatique et des vulnérabilités associées dans la région arabe.
9. Informer le dialogue politique, les négociations et les échanges entre les décideurs arabes.

I.7.4. Partenariats de RICCAR :



Figure I-21 : Sponsor de RICCAR

I.7.4 Évaluation intégrée :

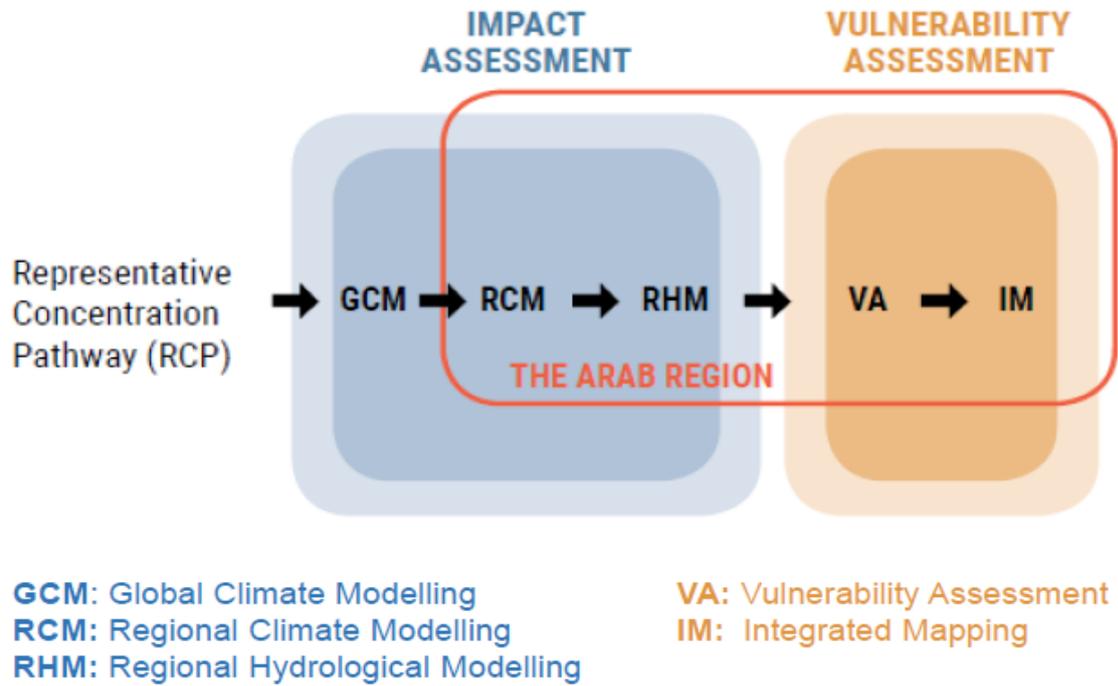


Figure I-22 : Evaluation intégrée

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1 Introduction :

Le pays est divisé en cinq bassins hydrographiques regroupant les 19 bassins versants du pays (Tableau II-1). Les ressources en eau superficielle renouvelables internes totalisent environ 9.8 km³/an pour l'ensemble du pays dont le Sahara, bassin le plus important par la surface, ne renferme que 0.6 km³. Les ressources en eau souterraine renouvelables contenues dans les nappes du nord du pays sont estimées à près de 1.5 km³/an. Ces nappes sont alimentées essentiellement par les précipitations dont la répartition demeure irrégulière à la fois dans le temps et dans l'espace.

Tableau II-1 : Régions hydrographique et leurs bassins versants

Bassins hydrographiques	Superficie en km ²	Bassins versants
Oranie-Chott Chergui	77 169	Côtiers oranais Macta Tafna Chott Chergui
Chélif-Zahrez	56 227	Côtiers Dahra Chélif Chott Zahrez
Algérois-Hodna-Soummam	47 431	Côtiers algérois Sébaou Isser Soummam Chott Hodna
Constantinois-Seybousse-Mellegue	44 348	Côtiers constantinois Kébir Rhumel Medjerdah Mellegue Seybousse Hauts Plateaux Constantinois
Sahara	2 018 054	Sahara Chott Melghir

II.2 La région hydrographique Algérois-Hodna-Soummam

Le bassin hydrographique Algérois-Hodna-Soummam (Figure II-1) couvre une superficie de 47 588 Km². Il se situe dans la partie centrale de l'Algérie du Nord, il est limité au Nord par la mer Méditerranée, à l'Ouest par le bassin Chellif-Zahrez, à l'Est par le bassin Constantinois-Seybousse-Mellègue et enfin au Sud par le bassin du Sahara.

II.2.1 L'Algérois :

Il s'étend sur une superficie de 12.147 kilomètres carrés, son réseau hydrographique compte 22 Oueds principaux totalisant une longueur de 818 kilomètres, variant entre 13 et 97 kilomètres. La pluviométrie moyenne annuelle du bassin de l'Algérois varie entre 600 et 800mm dans les régions côtières, et entre 500 et 1000 mm dans les régions intérieures ; les écoulements annuels de surface sont estimés à 3 489 millions de m³. L'ensemble du bassin est composé de trois bassins:

- Isser (09) : 4 149 km²
- Côtier-Algérois (02a) : 3 886 km²

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

- Côtier-Algérois (02b) : 4 585 km²

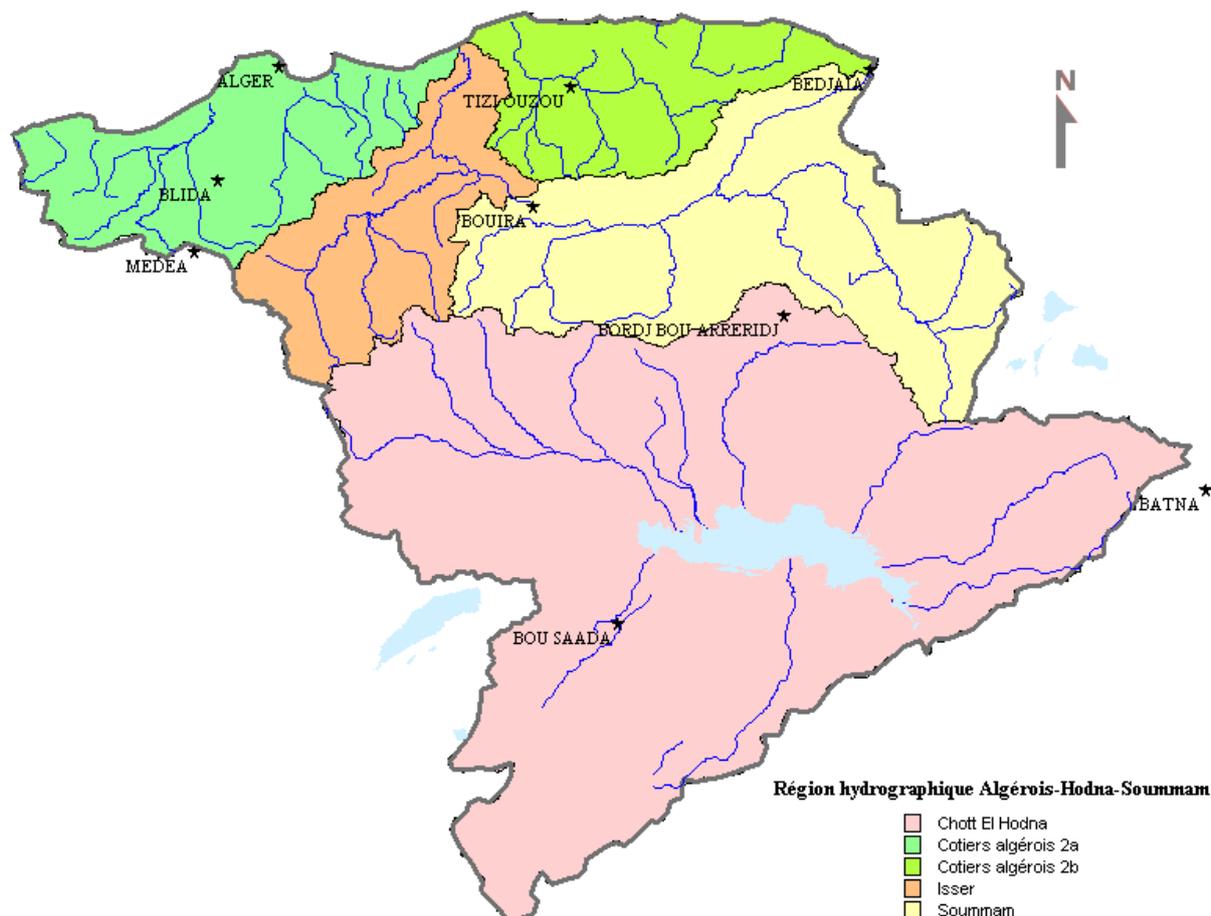


Figure II-1 : Région hydrographique Algérois-Hodna-Soummam

Tableau II-2 : Potentialités en eau de surface du bassin de l'Algérois

Bassin versant	Code	Superficie (km ²)	Apport annuel (hm ³)	Débit spécifique annuel (mm/an)
Côtiers Sébaou	2a	5914	1083	237
Côtiers Sébaou	2b	2400	1677	430
Isser	9	4149	729	165

II.2.2 La Soummam (15) :

Le bassin versant de la Soummam s'étend sur une superficie de 9 125 km². Il couvre une région essentiellement montagneuse dont les montagnes s'arrêtent à quelques kilomètres de la mer. Il est caractérisé par un réseau hydrographique très marqué et bien alimenté, ayant provoqué des érosions profondes (Défense, 1964 ; SEZB, 1997). Il reçoit une quantité importante d'eau, estimée à environ 700 millions de mètres cubes par an. On y retrouve des cours d'eau permanents et temporaires dont le plus important est l'Oued Soummam. Il est

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

formé de la confluence de l'Oued Sahel qui descend des montagnes du Djurdjura et du plateau de Bouira, et de l'Oued BouSellam qui descend du plateau Sétifien. Cet oued parcourt toute la vallée de la Soummam sur environ 90 km orienté Sud-Ouest – Nord-Est et débouche en mer à Bejaia (Bennabi, 1985; Benhamiche, 1997). Le bassin versant de la Soummam est drainé par un réseau dense d'affluents temporaires. Le profil en long présente un aspect général concave, tout à fait classique : les pentes décroissent d'amont vers l'aval (3.6 % en aval du confluent Sahel-Boussellam, 0.3 % dans la plaine de Bejaia) soit une pente moyenne de 1.95 % (Coyne et Belier, 1973).

Géologiquement, le bassin-versant de l'oued Soummam est constitué, sur la rive gauche, par de l'Oligocène traversé par des formations du Crétacé inférieur, et du Miocène qui apparaît dans la partie aval, en bordure de l'Oued. Des terrasses alluviales importantes tapissent en général le pied des pentes, sauf dans la région de Sidi-Aich où le Crétacé apparaît jusque dans le lit. Sur la rive droite, il est en majeure partie formé de Crétacé inférieur moyen et supérieur. Les terrasses alluviales sont beaucoup plus restreintes (Admiraal, 1993).

II.2.3 Le Hodna (05) :

Il couvre une superficie de 25 843 km². Le bassin versant du Hodna est un bassin endoréique sous forme d'une vaste dépression allongée Est-Ouest. Le chevelu hydrographique est moins dense, il est représenté par plusieurs petits oueds qui prennent leur naissance des monts du Hodna, situés au Nord. Les oueds qui existent dans toute la région sont des oueds temporaires et il n'y a écoulement superficiel que pendant les fortes et rares chutes de pluies. Ces oueds trouvent leurs exutoires dans le Chott El Hodna. Ce dernier est une vaste dépression endoréique salée avec une superficie de 362.000 ha.

Cette zone humide chevauchant deux wilaya, M'Sila sur 1000 km² et Batna sur 100 km², est située au Sud-Est de l'Algérie entre 35°18' et 35° 32' de latitude et entre 4°15' et 5°06' de longitude. Elle atteint une altitude maximale de 400 m. Le Chott el Hodna est considéré parmi les zones humides représentatives au niveau de la Méditerranée, du point de vue superficie et bassin versant. Ce dernier se situe à l'extrême Est des Hauts Plateaux, orienté ONO-ESE, et s'étend sur 220 km de long et 90 km de large. L'alimentation du Chott El Hodna est assurée par au moins 22 cours d'eau principaux, à cela se rajoute des ressources d'eau douce. Le chott se met en eau uniquement en hiver ; en été il se trouve à sec et couvert par des croûtes de sel.

La zone d'étude concerne le bassin versant des côtiers Algérois, il est situé au centre Nord de l'Algérie, nous présentons dans ce chapitre une synthèse des caractéristiques géographiques, climatiques ainsi que les caractéristiques de forme de ce bassin.

II.3 Situation Géographique

Le bassin hydrographique côtier Algérois est situé dans la partie centrale de l'Algérie du Nord. Il s'étend sur une superficie de 12 320 km². Il est limité :

- Au Nord par la mer Méditerranée.

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

- À l'Est par le bassin hydrographique des Côtiers Constantinois.
- Au Sud par le bassin de la Soummam et l'Isser.
- À l'Ouest par le bassin de Cheliff.

II.3.1 Le climat

Le climat algérien est un climat de transition entre le climat tempéré humide et le climat désertique. Il varie de manière contrastée, du type méditerranéen et semi-aride dans le Nord vers le type désertique dans le Sahara.

Le bassin des côtiers Algérois se caractérise par un climat type méditerranéen, pluvieux en hiver, sec en été avec une pluviométrie moyenne avoisinant les 900 mm par an, sauf que l'Est est beaucoup plus pluvieux que l'Ouest qui s'approche d'un climat semi-aride, comme le montre la carte pluviométrique de l'ANRH

La température du bassin côtiers Algérois est caractérisé par un climat assez doux, où les minimales sont de l'ordre de 12°C à Alger, 10°C à Tizi Ouzou, 10°C à Blida ou 8°C. Les hauts lieux comme Miliana ou Tablat, les températures maximales dépassent rarement les 30°C en moyenne en été.

II.3.2 Le relief

Le relief est considéré comme l'un des facteurs d'influence de la réponse hydrologique et par conséquent de la forme de l'hydrogramme de crue. Une pente plus forte entraîne une durée plus faible de concentration des eaux de ruissellement dans le réseau de drainage. Le relief du bassin versant est souvent caractérisé par une courbe hypsométrique où l'on porte sur l'axe des abscisses, les altitudes et sur l'axe des ordonnées, la surface.

L'altimétrie joue un rôle essentiel dans l'étude du comportement hydrologique d'un bassin versant. En effet, plusieurs paramètres physiques, comme la pente moyenne, par exemple, dépendent des caractéristiques altimétriques. L'altitude du bassin versant peut également jouer un rôle important sur les conditions climatiques du bassin (pluviosité).

Le bassin versant des côtiers de l'Algérois est caractérisé par un relief très accidenté avec des sommets qui atteignent les 1415 m (Djebel Dahra) dans la partie Ouest du bassin et 2308 m (Djebel Djurdjura, Kabylie) dans la partie Est du bassin. Ces chaînes montagneuses et l'Atlas Bliidiéen qui succèdent à la plaine de la Mitidja causent l'appauvrissement progressif de l'atmosphère en vapeur d'eau, celle-ci à une grande influence sur les variations spatiales de la pluviométrie. (Meddi, 2005)

II.3.3 La pluviométrie

La pluviométrie moyenne annuelle sur 25 ans varie de 532 mm à 950 mm. Cette variabilité est engendrée par l'effet d'altitude, la distance à la mer, la forme du relief et l'effet des vents dominants. (Meddi, 2005)

Les stations pluviographiques coïncidant avec la direction des vents dominants Nord-Ouest sont les mieux arrosés.

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

La variabilité spatiale de la pluviométrie d'une année à une autre varie de 18 % à 47 %. 70 % des stations ont une variation spatiale plus ou moins proche de la moyenne 25 % et 30 % ont une variation spatiale de plus de 30 % (Meddi, 2005).

II.4 Conclusion :

Comme évoqué plus haut, l'Algérie du Nord est drainée par un réseau hydrographique assez dense. Elle est caractérisée par des précipitations relativement faibles, irrégulières et inégalement réparties. Le gradient pluviométrique est généralement décroissant de l'Est à l'Ouest. Le relief de cette zone est structuré par une chaîne montagneuse orientée Est-Ouest: l'Atlas tellien. Le climat du Centre Nord de l'Algérie est essentiellement méditerranéen caractérisé par des précipitations et des températures d'une variabilité spatiotemporelle très marquante.

Chapitre III : Traitement et exploitation des données

III.1 Introduction :

Les précipitations journalières, notamment les pluies, constituent un phénomène naturel fluctuant complexe qui a un très fort impact hydrologique, surtout lorsqu'elles ont un caractère extrême. Les précipitations journalières maximales annuelles dans le Nord-Est Algérien présentent une distribution fortement irrégulière du fait de la présence dans la majorité des séries observées de quelques valeurs très exceptionnelles ou hors-normes. Cette distribution est aussi marquée dans la partie Est du bassin versant côtiers Algérois.

III.2 Pluie journalière :

Dans la présente étude nous intéressons à la partie orientale du Nord d'Algérie, qui est connue par son apport pluvieux important et forme des ressources importantes par rapport à l'Ouest où la semi aridité est dominante (Mebarki, 2005).

Nombreux auteurs affirment une variabilité importante du régime climatique durant les quatre dernières décennies et ayant eu des impacts sur les ressources en eau. Les conséquences du changement climatique ont été observées à travers un décalage saisonnier, des pluies irrégulières et même des inondations (Kouame et al., 2014), tous ces événements causés principalement par des variations du régime pluviométrique, qui peut être considéré comme le principal impact parmi les impacts du changement climatique.

Du l'immense importance aux précipitations quotidiennes maximales, et ce qu'elles peuvent causer comme dégâts en cas de forte intensité produisant des fortes crues, dans ce contexte que la communauté scientifique s'intéresse de plus en plus aux précipitations journalières maximales annuelles (Taibi et al., 2015).

Les fortes crues de l'Algérie sont causées par des précipitations maximales journalières, nous citons à titre d'exemple l'inondation catastrophique survenue à Bab El Oued (Alger) à cause des pluies diluviennes (260 mm pendant une journée). La lutte contre ces crues se fait par la mise en place des projets de protections contre les inondations adéquate (Boutoutaou et al., 2014). La réalisation de ces projets nécessite au préalable l'étude des précipitations, qui est considérée comme étant la première et la principale cause des crues ; de ce fait il est indispensable de déterminer la quantité de pluie (la lame d'eau précipitée) ainsi son fréquence (période de retour). C'est dans ce contexte que notre étude fait objet et s'intitule : Analyse fréquentielle des précipitations journalières maximales annuelles dans le Nord-Est d'Algérie, et prenons exemple du Bassin de Oued Sébaou (Partie Est du Bassin versant Côtiers Algérois).

III.3 Disponibilité des données :

Les données proviennent de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques d'Alger (A.N.R.H). Elles sont de qualité et de durée variables. Cela a nécessité un choix des stations basé sur trois critères :

- La taille de l'échantillon (information couvrant les quatre dernières décennies).

Chapitre III : Traitement et exploitation des données

- La position géographique (spécialement homogène pour ne pas favoriser une région en particulier).
- La qualité des données (pas de lacunes de plus de cinq années consécutives).

Parmi les stations situées dans la zone d'étude, quatre stations ont été retenues. Les coordonnées et les caractéristiques de ces stations sont représenté dans le tableau suivant:

Tableau III-1 : Les coordonnées et les caractéristiques des stations retenues dans l'étude

Station	Code	Coordonnées			Durée d'observation
		X(m)	Y(m)	Z(m)	
Bir Mourad Rais	020509	531.1	382.8	140	1951-2013
Mahelma ferme	020511	517	376.85	150	1949-2013
Hamiz barrage	020602	558.55	367.4	130	1905-2013
Baraki	021421	535.05	376.5	20	1970-2015

III.4 Étude d'homogénéité des séries :

Une série est dite homogène si les observations qui la composent ont été observées de la même façon et sont issues de la même population. Pour les statisticiens, la série de données est dite homogène si les propriétés statistiques de l'erreur de mesure affectant ces données sont restées invariables au cours de la période d'observation. (KHALDI, 2005)

D'une façon générale les éléments climatiques dans le temps ne se produisent pas de la même façon et la série correspondante n'est pas purement stationnaire. Les causes perturbatrices les plus courantes de l'homogénéité des observations sont :

- Le mauvais état ou la défectuosité d'appareils de mesures.
- Un changement d'observateur.
- Le déplacement de la station (différences topographiques).
- Le changement de type d'appareils, de leurs conditions d'installations (hauteur au-dessus du sol).

III.5 Transformation des données :

Les données obtenues de l'ANRH sont des données à pas de temps journalier regroupé (archivés) sous format (classeur Excel)

Chapitre III : Traitement et exploitation des données

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	jun	juil	août	annuel	
1	Code station : 020509													
2	Nom station : BIRMANDREIS ANRH													
3	X : 531.1													
3	Y : 382.8													
3	Z : 140													
4	1951													
5														
6	1	0	0	0.1	0.1	0.2	2.5	0	0	0	0	0	0	0
6	2	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0.3	0	0	0
6	3	0	8.1	0.1	0.9	0	0	0	9.7	9.7	0	0	0	0
6	4	0	0.2	0	0.2	19.2	0	0	9.3	8.5	0	0	0	0
6	5	0	29.6	0	0	0.3	2.9	0	3	0.9	0	2.8	0	0
6	6	0	1	0	0.5	0	5.8	0	0	15.2	0	0	0	0
6	7	0	2.7	0	4.7	40	13.3	0	16.4	0.5	0	0	0	0
6	8	0	0	0	0.1	3.4	0.2	0	0	3.6	0	0	0	0
6	9	0	0	9.5	0	0	0	0	0	0.3	0	0	0	0
6	10	0	3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	11	1.5	0.3	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0
6	12	0.4	0	0	0	0	0	5.4	0	0	0	0	0	0
6	13	0	0	1.7	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0
6	14	0	1.9	0	0	31.9	2.9	0	0.3	0	0	0	0	0
6	15	19.1	17.9	2	0	2	11.3	0	0	0	0	0	0	0
6	16	0.2	43.5	1.7	0	1	1.8	0.3	0.3	0	0	0	0	0
6	17	0.4	43.5	0	0	3	5.3	0	0	0	0	0	0	0
6	18	0	2.2	0	0	0.9	0.1	0.6	0	5.1	0.1	0	0	0
6	19	0	53.9	0	0.2	8.5	4.2	0	0	0.1	0	0	0	0
6	20	0	0	0	0.8	8.7	19.6	11	0	0	0	0	0	0
6	21	0	17.8	4.5	0.1	2.4	3.4	2.9	0	0.2	0	0	0	0
6	22	0	5.4	51.5	0	21.7	0.1	0	0	1.9	0	0	0.9	0
6	23	0.1	2.2	4.2	0	23.2	0	0	0	1.5	0	0	8.3	0
6	24	0	17.8	0	0	19.4	0	0	29.1	0.1	0	0.2	1.7	0
6	25	0	9	0.1	0	13.1	0	0	0.4	0	0	0.3	0	0
6	26	0	0.1	0	0	6.3	0	0	2.3	0	0	0.1	0	0
6	27	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0
6	28	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	2.4	0	0
6	29	0	0	0	21	4	0.2	0	0	0.4	0	0	0	0
6	30	0	0	0.4	3	0	0	1.6	22.8	0.8	0	0	0	0
6	31	0	0.3	5.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure III-1 : Figure de données brutes de la station 020509

Ou :

- 1 : code de la station, le code c'est indiqué en tenant compte les numéros des bassins versants et sous bassin versants dans la carte hydro climatologique de l'Algérie.
- 2 : nom de la station associés a la code de la station
- 3 : les coordonnées géographiques de la station pluviométrique
- 4 : l'année de la série chronologique hydrométéorologique
- 5 : les noms des 12 mois et la dernière case les résultats annuel
- 6 : les jours du mois

- Calcul des intensités de différentes périodes de retour à différents pas de temps: 5min, 15 min, 30 min, 1h, 4h, 8h, 16h et 24 h.
- La construction des courbes IDF.
- Le calcul des paramètres a et b selon la méthode de Montana et Talbot.
- La construction des pluies de projets.

III.6 L'utilisation des modèles climatique pour le calcul des précipitations :

Le changement climatique a produit une série d'impacts diversifiés et importants sur les écosystèmes et les systèmes humains (tels que l'agriculture, les transports, les ressources en eau, les ressources naturelles, les activités économiques et les infrastructures). Afin de limiter les risques et d'identifier les opportunités liées au changement, nous devons comprendre comment la société est affectée et quelles mesures peuvent être prises pour s'adapter et réduire le changement climatique.

Le modèle du système terrestre (ESM) est un outil qui intègre toutes nos connaissances sur le système terrestre et peut être utilisé pour répondre aux hypothèses scientifiques sur les changements climatiques et environnementaux. Par conséquent, ces modèles permettent aux scientifiques d'étudier les interactions complexes au sein du système Terre et sont importants pour comprendre et prévoir la planification et les changements climatiques.

III.7 Modèle du système terrestre

III.7.1 EC EARTH

EC-Earth a été développé dans le cadre de l'Union européenne, facilitant ainsi la coopération internationale et l'acquisition de connaissances et de grandes bases de données. L'objectif principal d'EC-Earth est de développer une gestion écologiquement rationnelle et basée sur le système de prévision saisonnière de l'ECMWF, de fournir des informations climatiques pour les services climatologiques et de faire progresser la science sur le système terrestre, sa variabilité, sa prévisibilité et les changements à long terme qui en résultent. Vient de forces extérieures.

EC-Earth est devenu un modèle de pointe dans le paysage des modèles du système terrestre européen, comme en témoigne sa participation à de nombreux projets européens, ses contributions majeures au CMIP5 et au programme CMIP6 en cours.

III.7.2 GFDL_ESM2M

La configuration de base du modèle couplé et les fonctionnalités de simulation de la version 4.1 du GFDL Earth System Model (ESM4.1), qui repose sur le développement de composants et de modèles couplés au GFDL de 2013 à 2018, utilisés pour coupler la chimie

du carbone- simulation climatique comme modèle couplé Contribution à la sixième phase du projet.

Contrairement aux travaux de développement CM4.0 de GFDL qui se concentrent sur la résolution océanique du climat physique, ESM4.1 se concentre sur l'intégrité de l'interaction avec le système terrestre. Par rapport au modèle couplé ESM2-carbone et CM3-chimie de la génération précédente du GFDL, ESM4.1 présente une résolution horizontale deux fois supérieure à celle de l'atmosphère (2° à 1°) et de l'océan (1° à $0,5^\circ$).

ESM4.1 rassemble les principaux développements représentatifs de la dynamique et de la physique du CM4.0 et de l'émission d'aérosols et de leurs précurseurs, Concurrence de la végétation et de la canopée des écosystèmes terrestres, ainsi que des incendies de plusieurs jours ; écologie marine et interactions biogéochimiques, le cycle complet terre-atmosphère-océan du dioxyde de carbone, de la poussière et du fer, et le cycle interactif océan-atmosphère de l'azote.

III.8 Les précipitations dans un contexte de changements climatiques

Cette section décrit l'évolution des chutes d'eau dans le contexte du changement climatique. Les paragraphes suivants traiteront de l'impact du changement climatique sur les précipitations et les courbes intensité-durée-fréquence (courbes IDF).

III.8.1 Impacts des changements climatiques sur les précipitations

Comme démontré dans les résultats des rapports du GIEC, les impacts des changements climatiques sur les précipitations sont caractérisés par une augmentation probable de la moyenne annuelle des précipitations, une probable augmentation des intensités et des fréquences des épisodes de précipitations extrêmes (IPCC 2013). En effet, plusieurs études citées par Mailhot et al. (2014) indiquent que les intensités des épisodes de précipitations extrêmes augmenteront probablement plus rapidement que les intensités moyennes. Une explication appuyant ce phénomène est donnée par Mailhot et al. (2014) en se basant sur les fonctions de contrôles des intensités moyennes et des épisodes des pluies extrêmes.

La hausse projetée des intensités et des fréquences des précipitations (extrêmes ou moyenne) ne permet plus l'utilisation des courbes IDF dans leur forme de base dont la conception est réalisée par l'analyse fréquentielle des événements extrêmes passés. Ainsi, il devient primordial de revoir les éléments de base importants à la conception de ces courbes. La section 3.7.2 présente les différentes méthodes de mise à jour des courbes IDF dans un climat changeant.

III.8.2 Impacts sur les courbes IDF

Dans un contexte de changements climatiques, l'utilisation des courbes IDF développées à partir des événements extrêmes passés devient désuète. En effet, la méthodologie de mise en place des courbes IDF suppose que les données météorologiques sur lesquelles elles sont basées restent stationnaires. Cette hypothèse de base est réfutée dans un contexte de changements climatiques compte tenu des impacts de ces derniers sur les

précipitations. Pour résoudre ce problème, certains auteurs tel que Prudhomme et al. (2002) recommande la prise en compte de l'évolution du climat dans les modèles hydrologiques.

Plusieurs auteurs proposent différentes méthodes de mise à jour des courbes IDF dans un climat changeant. En exemple, Mailhot et al. (2007) ont proposé des coefficients correcteurs des courbes IDF pour les régions du Sud du Québec.

III.9 Pourquoi la rédaction d'échelle statistique « DOWNSCALING »?

Des études récentes ont montré que la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre, tels que sous forme de dioxyde de carbone, a considérablement augmenté en raison des activités humaines. Les gaz à effet de serre ont entraîné des changements régionaux et mondiaux du climat et des variables liées au climat, comme la température et les précipitations (Watson et al., 1996).

Les modèles climatiques ont la capacité à prévoir les conséquences de l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre. Cependant, les résolutions des modèles climatiques sont assez grossières pour l'hydrologie et l'environnement.

La modélisation qui a un impact sur les évaluations au moyen de modèles mathématiques (par exemple, modélisation des sécheresses/inondations) pour lesquels on utilise la sortie du modèle climatique mondial (GCM) variables ne convient pas. Pour combler cet écart, des modèles climatiques régionaux (RCM) sont développés, sur la base de formulations dynamiques utilisant des flancs initiaux et dépendant du temps conditions aux limites des MCG, sans retour de la simulation RCM pour la conduite de GCM (GIEC, 2001).

Les techniques de base du RCM proviennent essentiellement de la prévision numérique du temps développée à l'origine par Dickinson et al. (1989) qui fournissent une résolution spatiale jusqu'à 10-20 km ou moins. Cependant, ces RCM ne sont toujours pas suffisamment fins pour fournir les sorties détaillées à l'échelle spatio-temporelle nécessaires pour les petites études d'impact sur le climat hydrologique et agricole sur les bassins versants, où les scénarios spécifiques au site sont nécessaires (Chen et al., 2011). Cela pourrait entraver une vaste application des projections du GCM pour l'évaluation de l'impact du changement climatique.

Des méthodes de réduction d'échelle statistique ont été développées pour spécifier les GCM ou scénarios RCM dans des échelles spatiales et temporelles plus fines utilisant des statistiques relations entre les variables climatiques de sortie des scénarios et les variables d'intérêt. Les méthodes de réduction d'échelle statistique sont moins coûteuses en calcul et beaucoup plus facile à mettre en œuvre que les RCM.

La réduction d'échelle statistique consiste à établir des statistiques liens entre les modèles atmosphériques à grande échelle et les conditions météorologiques observées à l'échelle locale pour résoudre l'écart d'échelle entre les scénarios de changement climatique et la résolution pour l'évaluation d'impact à l'échelle d'un bassin versant ou d'une station (Maraun et al., 2010).

Après avoir établi une relation statistique à partir des configurations atmosphériques à grande échelle dans modèles climatiques et variables météorologiques d'intérêt local, projections futures des variables d'intérêt peuvent être faites avec la relation établie et l'atmosphère future modèles de modèles climatiques. La relation entre les modèles actuels à grande échelle et la météo locale doit rester valide, appelée stationnaire. Cependant, il n'est

pas certain que les liens statistiques établis seront maintenus dans le futur système climatique sous différentes conditions de forçage des climats futurs possibles (Caffrey et Farmer, 2014). C'est l'un des points faibles de la réduction d'échelle statistique.

III.10 Pourquoi corriger les biais ?

Les résultats du modèle climatique mondial (GCM) et du modèle climatique régional (RCM) seraient présenter des biais systématiques par rapport aux observations provenant de différentes sources, telles que des erreurs dans le paramétrage de la convection et l'orographie à petite échelle non résolue, à grande échelle irréaliste variabilité et variabilité interne imprévisible différente des observations (Cannon et al., 2015).

Les sorties simulées à partir des modèles sont statistiquement différentes par rapport aux observations. Pour effectuer une réduction d'échelle statistique, ce biais doit être corrigé. Un certain nombre de méthodes de correction de biais ont été développées pour ajuster moyenne, variance et moment supérieur des distributions ainsi que tous les quantiles.

Pour ajuster les moments des sorties du modèle à ceux des observations, la méthode Quantile Mapping a été appliqué, tandis que la cartographie des quantiles (QM) a été utilisée pour tous les quantiles. Noter que les sorties GCM sont pour deux périodes distinctes, telles que la base et l'avenir. Une période de référence indique une durée de simulation qui prend en compte les conditions climatiques d'observation, tandis qu'une période future présente la durée de simulation qui prend en compte les forçages climatiques.

Par conséquent, les futurs résultats du GCM sont généralement des données ciblées pour la correction du biais avec le comparaison entre les statistiques des sorties GCM de base et les observations. Supposons que la sortie du modèle cible à ajuster est le modèle projeté dans l'avenir valeur, notée $x_{m,fut}$ avec les données observées y_{obs} . La correction de biais est la procédure qui transforme (ou mappe) la valeur du modèle cible $x_{m,fut}$ dans le domaine d'observation en utilisant la relation avec les observations et la valeur du modèle pour la période de base, $x_{m,base}$. La sortie finale du modèle futur corrigé du biais est notée $\hat{y}_{m,fut}$. Notez que la période de base et la période d'observation sont normalement les mêmes, mais pas nécessairement.

III.10.1 Ajustement de l'occurrence pour les données sur les précipitations

On sait que les valeurs de précipitation des MCG ou des MCR sont plus fréquemment générées que les observations. Pour supprimer cette différence dans l'occurrence des précipitations, une partie des valeurs de précipitation du modèle doit être ramenée à zéro valeur. Cela peut être fait en comparant le nombre de précipitations observées et modélisées valeurs supérieures à zéro

III.10.2 Quantile Mapping :

QM permet la distribution de probabilité des sorties du modèle des GCM et RCM (x) à ajuster à la distribution de probabilité des données observées (y) par appariement la fonction de distribution cumulée (CDF, $F(x;\theta)$).

Grâce à QM, le CDF des données de sortie RCM est transféré aux données observées. Le QM traditionnel peut être défini par

$$\hat{y} = F_0^{-1}(F_{m,base}(x)) \quad \text{III-1}$$

Où F_0^{-1} représente une fonction inverse de CDF pour les données observées et $F_{m,base}$ est le CDF du modèle de sortie du RCM ou du GCM adapté aux sorties du GCM pour la période de référence. Différents CDF pour QM, tels que Gamma, Exponentiel, Double Exponentiel comme ainsi que les distributions de mélanges, ont été appliquées dans la littérature.

III.10.3 Les étapes de la correction de biais par la méthode de Quantile Mapping

1. Distribution exponentielle : F_m et F_o s'adaptent à une distribution exponentielle. Les paramètres de la distribution exponentielle pour les observations et les données GCM sont (α_o) et (α_m) , puisque le paramètre de la distribution exponentielle est la même que la valeur moyenne Le CDF peut être estimé comme

$$\hat{y} = F_0^{-1}(F_{m,base}(x, \alpha_m); \alpha_o) = -\alpha_o \ln(1 - F_{m,base}(x, \alpha_m)) \quad \text{III-2}$$

$$= -\alpha_o \ln\left[1 - 1 + \exp\left(-\frac{x}{\alpha_m}\right)\right] = \frac{\alpha_o}{\alpha_m} x \quad \text{III-3}$$

On fixe x_{fut}

Dans ce cas on peut calculer \hat{y} avec l'équation (3-3)

$$\hat{y} = \frac{\alpha_o}{\alpha_m} x_{fut}$$

2. Distribution gamma : F_m et F_o correspondent à une distribution gamma. Les paramètres de la distribution gamma pour les deux jeux de données sont estimés avec la méthode des moments en utilisant les équations. Par exemple, les paramètres α et β pour les observations sont :

$$\hat{\beta}_0 = \frac{\hat{\sigma}^2}{\hat{\mu}} \quad \text{III-4}$$

$$\hat{\alpha}_0 = \frac{\hat{\mu}}{\hat{\beta}} \quad \text{III-5}$$

On calcul $\hat{\alpha}_0$ et $\hat{\beta}_0$ à partir des équations précédentes.

Remplaçant la valeur de x_{fut} dans l'équation (3-1)

Chapitre III : Traitement et exploitation des données

$$\hat{y} = F_0^{-1}(F_{m,base}(x_{fut}))$$

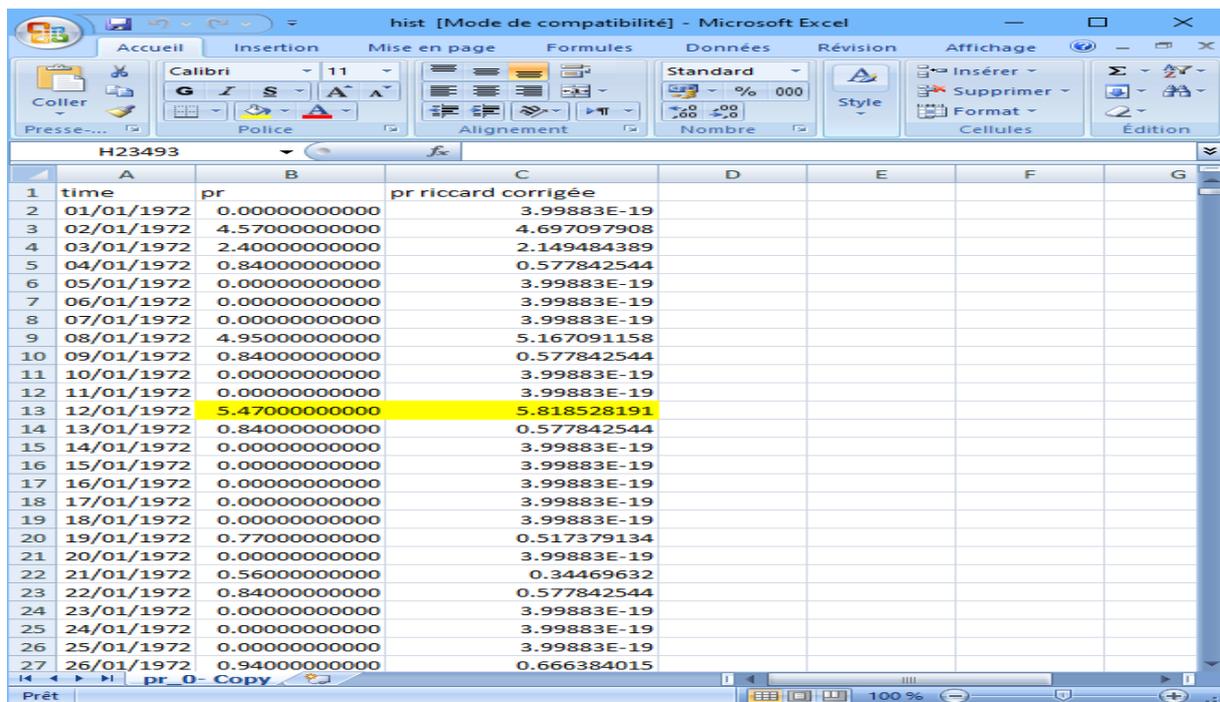
où $F(x; \alpha, \beta)$ définit la CDF avec les paramètres α et β . présente les ensembles de données associés et leurs CDF correspondants. CDF empirique (ECDF) est estimé avec la règle d'estimation générale :

$$F(x_{(i)}) = \frac{i}{(N+1)} \quad \text{III-6}$$

Où $x_{(i)}$ est la $i^{\text{ème}}$ valeur d'ordre croissant, et N est le nombre de données.

Les étapes de la correction de biais:

- Dans la première étape on aura besoin des données terrestres des stations pluviométriques d'un pas de temps journalier de la station la plus proche du point de la projection du satellite.
- Avec ce dernier on sélectionne les données RICCAR de la même période
- La dernière chose qu'on aura besoin c'est les données futures RICCAR
- La donnée RICCAR corrigée en utilisant la méthode "Quantile Mapping" avec une distribution Gamma.
- la correction a été faite sur l'ensemble des données RICCAR (i.e. période historique et période projetée).



The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D	E	F	G
1	time	pr	pr riccard corrigée				
2	01/01/1972	0.0000000000	3.99883E-19				
3	02/01/1972	4.5700000000	4.697097908				
4	03/01/1972	2.4000000000	2.149484389				
5	04/01/1972	0.8400000000	0.577842544				
6	05/01/1972	0.0000000000	3.99883E-19				
7	06/01/1972	0.0000000000	3.99883E-19				
8	07/01/1972	0.0000000000	3.99883E-19				
9	08/01/1972	4.9500000000	5.167091158				
10	09/01/1972	0.8400000000	0.577842544				
11	10/01/1972	0.0000000000	3.99883E-19				
12	11/01/1972	0.0000000000	3.99883E-19				
13	12/01/1972	5.4700000000	5.818528191				
14	13/01/1972	0.8400000000	0.577842544				
15	14/01/1972	0.0000000000	3.99883E-19				
16	15/01/1972	0.0000000000	3.99883E-19				
17	16/01/1972	0.0000000000	3.99883E-19				
18	17/01/1972	0.0000000000	3.99883E-19				
19	18/01/1972	0.0000000000	3.99883E-19				
20	19/01/1972	0.7700000000	0.517379134				
21	20/01/1972	0.0000000000	3.99883E-19				
22	21/01/1972	0.5600000000	0.34469632				
23	22/01/1972	0.8400000000	0.577842544				
24	23/01/1972	0.0000000000	3.99883E-19				
25	24/01/1972	0.0000000000	3.99883E-19				
26	25/01/1972	0.0000000000	3.99883E-19				
27	26/01/1972	0.9400000000	0.666384015				

Figure III-2: Données RICCAR historiques corrigées

Chapitre III : Traitement et exploitation des données

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D	E	F	G
1	time	pr	pr riccard corrigée				
2	01/01/2020	0.0000000000	3.99883E-19				
3	02/01/2020	0.0000000000	3.99883E-19				
4	03/01/2020	0.0000000000	3.99883E-19				
5	04/01/2020	0.0000000000	3.99883E-19				
6	05/01/2020	0.0000000000	3.99883E-19				
7	06/01/2020	0.0000000000	3.99883E-19				
8	07/01/2020	0.0000000000	3.99883E-19				
9	08/01/2020	0.7700000000	0.517379134				
10	09/01/2020	2.6800000000	2.461278514				
11	10/01/2020	0.8400000000	0.577842544				
12	11/01/2020	0.0000000000	3.99883E-19				
13	12/01/2020	0.5600000000	0.34469632				
14	13/01/2020	0.8400000000	0.577842544				
15	14/01/2020	0.0000000000	3.99883E-19				
16	15/01/2020	0.0000000000	3.99883E-19				
17	16/01/2020	0.0000000000	3.99883E-19				
18	17/01/2020	44.3300000000	60.95134862				
19	18/01/2020	17.2500000000	21.80694468				
20	19/01/2020	13.4800000000	16.53434595				
21	20/01/2020	0.8400000000	0.577842544				
22	21/01/2020	0.0000000000	3.99883E-19				
23	22/01/2020	2.4000000000	2.149484389				
24	23/01/2020	2.0100000000	1.726955021				
25	24/01/2020	0.0000000000	3.99883E-19				
26	25/01/2020	9.9600000000	11.7124653				
27	26/01/2020	0.0000000000	3.99883E-19				

Figure III-3 : Données RICCAR futures corrigées 2020-2100

***Chapitre IV : Etablissement des
courbes IDF et des pluies de projet***

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse aux différentes étapes d'établir les courbes IDF et la détermination de la meilleure loi d'ajustement statistique qui sera retenue pour la définition des quantiles de pluie maximale annuelle (mm) pour différentes périodes de retour et suivant des durées allant de 5 minutes jusqu'au 1440 minutes.

L'établissement de la courbe IDF nécessite une série de données pluviométriques à long terme. Cette série de données doit passer par différentes étapes : test d'ajustement, test d'adéquation, estimation des quantiles, et enfin la courbe IDF est tracée.

La deuxième partie du travail consiste à développer un programme sous Matlab, qui pourra compléter les étapes ci-dessus, et par conséquent donner la courbe IDF de chaque station et les paramètres climatiques a et b de la zone. Le programme contient des sous-programmes, dont chacun effectue une tâche spécifique.

IV.2 Types des séries étudiés

Traditionnellement, la recherche statistique sur les événements extrêmes repose sur l'analyse d'échantillons formés à partir de maximums annuels. Ces échantillons sont facilement déduits de toute la série de durée complète. De plus, cette méthode permet l'utilisation directe du modèle de fréquence ajusté dans la probabilité annuelle d'occurrence (Meylan et al, 1999).

La fiabilité de cette méthode dépend de la longueur du SMA. En effet, il est illusoire d'analyser des événements extrêmes à partir de SMA et d'obtenir des résultats très fiables. Il a été déterminé de manière empirique afin d'estimer l'événement de la période de retour T avec une incertitude acceptable.

IV.3 Hydrologie statistique :

L'analyse statistique permet le traitement des données de longue série et de dégager très rapidement les tendances et les évolutions de la variable aléatoire étudiée telle que les hauteurs de pluies. L'essentiel des paramètres à calculer sont les indicateurs de position et les indicateurs de dispersion.

Pour ce la on doit contrôler l'indépendance et la stationnarité d la série des valeurs.

IV.3.1 Présentation du logiciel HYFRAN

Le logiciel HYFRAN-PLUS permet d'ajuster un nombre important de distributions statistiques à une série de données qui vérifient les hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité (cf. Publications sur le SAD). Un Système d'Aide à la Décision (SAD) a été développé pour permettre de choisir la classe de distributions la plus adéquate pour estimer le quantile de période de retour élevée. HYFRAN a été développé par l'équipe du Pr. Bernard Bobée titulaire de la chaire en hydrologie statistique (1992-2004).

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

D'autres développements sont en cours pour des sous classes de distributions par rapport à leurs comportements asymptotiques, sur les outils de discrimination et l'estimation des événements extrêmes dans un cadre stationnaire et non-stationnaire.

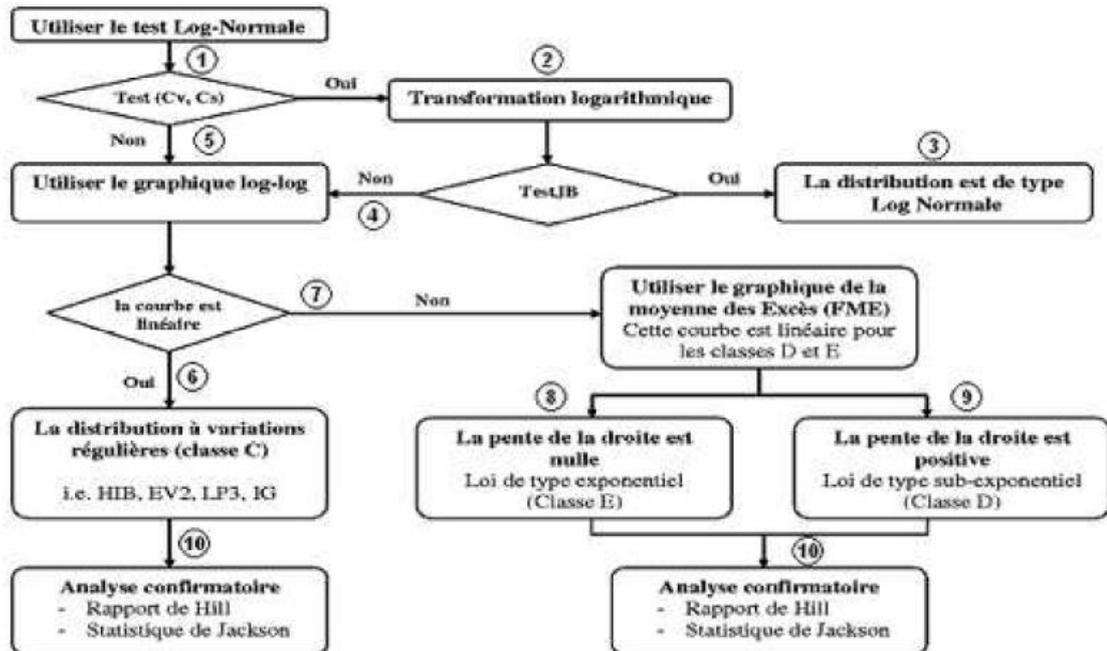


Figure IV-1 : Diagramme SAD

- Le SAD propose aussi des graphiques et des courbes sur lesquels repose le système d'aide à la décision (comparaison entre les différentes valeurs obtenue)

IV.3.2 Utilisation du HYFRAN PLUS :

IV.3.2.1 Saisie des données :

Pour saisir les données et étudier les caractéristiques statistiques de l'échantillon on doit naviguer entre les Cinq onglets différents, nommés :

- Description : pour les différentes informations sur le projet (« titre; nom de la Variable; l'unité de la variable ... »);
- Données : pour entrer les données dans le logiciel ;
- Statistiques de base ;
- Tests d'hypothèse ;
- Graphiques ;

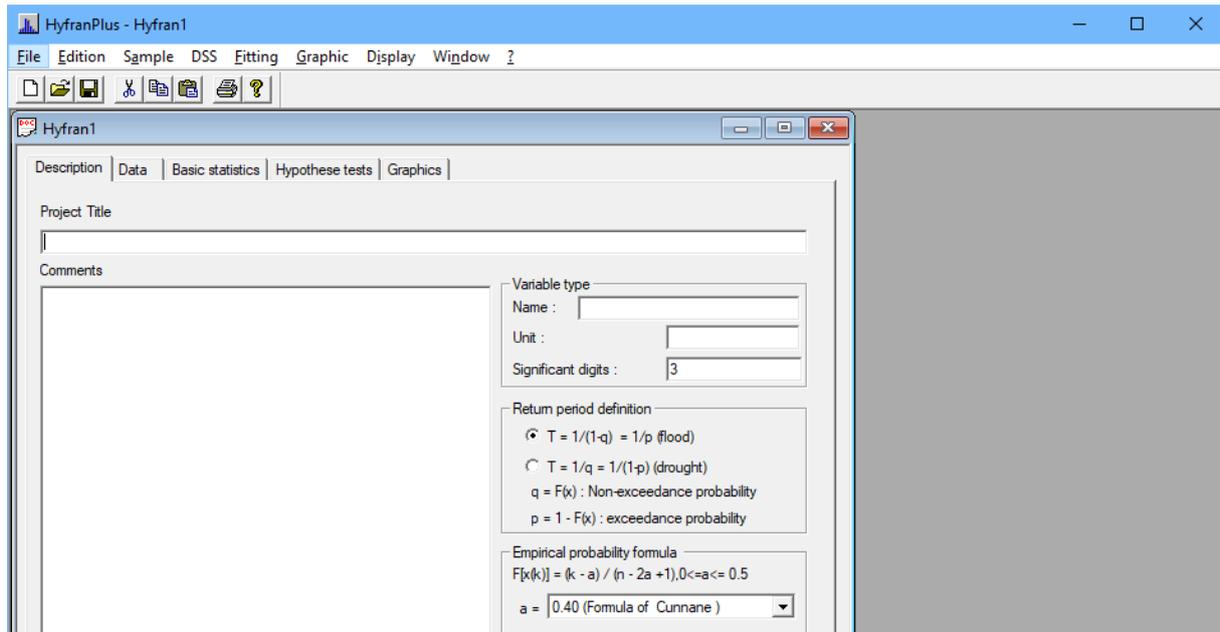


Figure IV-2 : Interface du logiciel HYFRAN description

- On doit tout d'abord déterminer les différentes caractéristiques de notre échantillon ou bien série ; déterminons le nom de notre projet, le nom du variable, son unité de mesure et la formule de la probabilité empirique. On peut même mettre des commentaires.

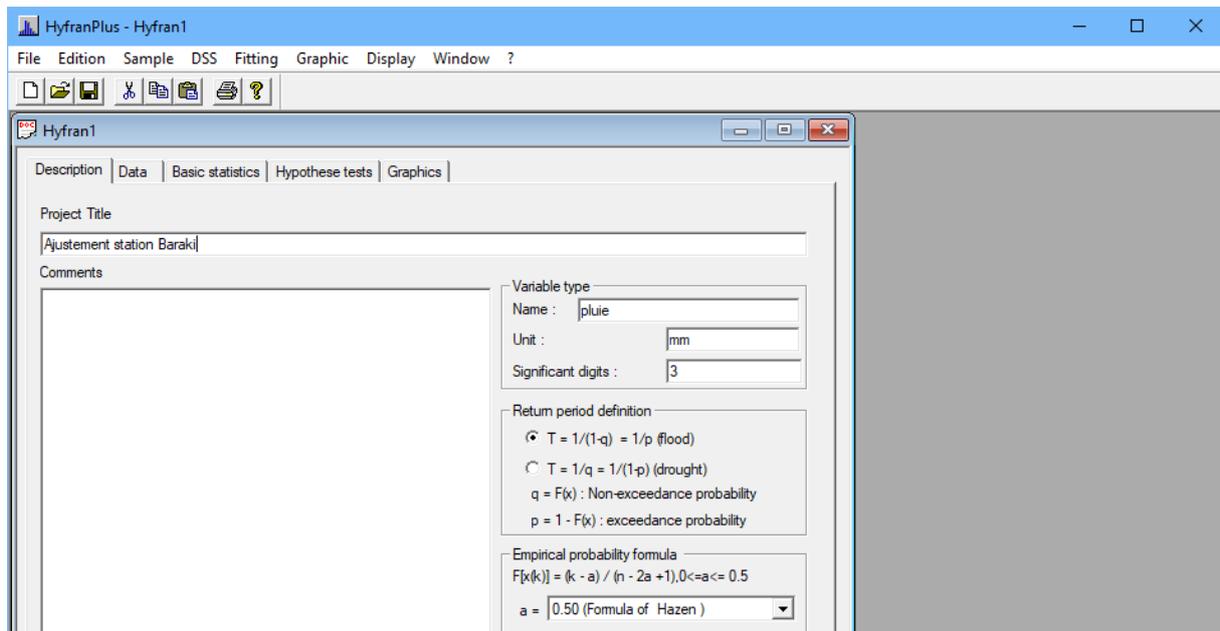


Figure IV-3 : Remplissage des informations de la série

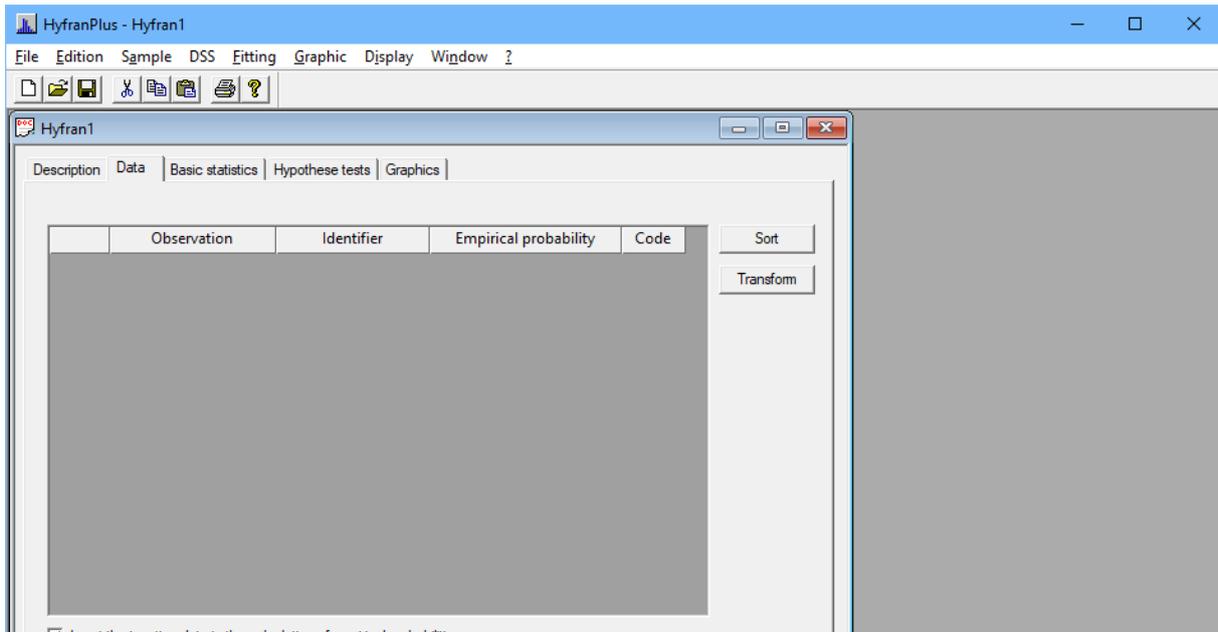
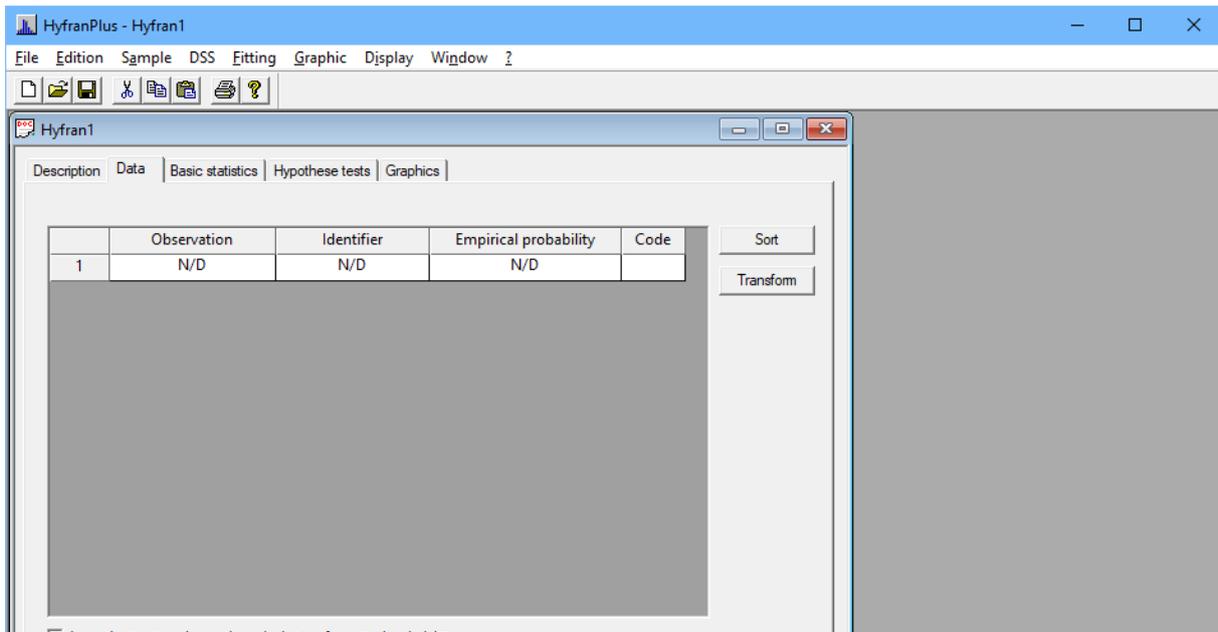


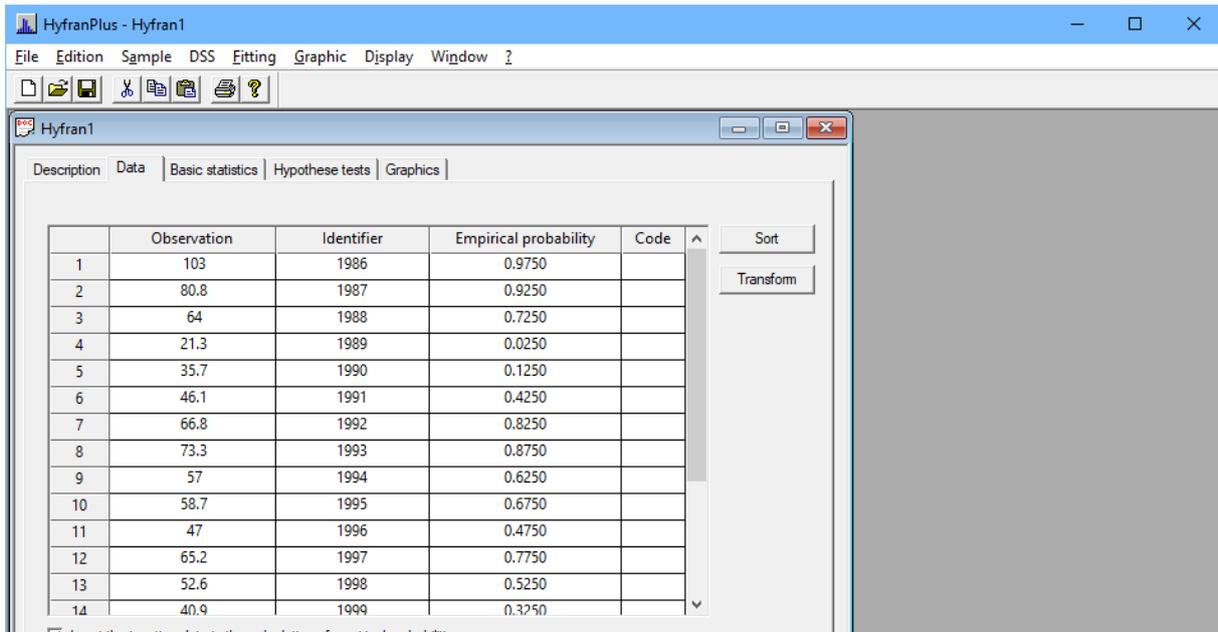
Figure IV-4 : Interface du logiciel HYFRAN data

- Pour qu'on puisse saisir les données on peut le faire manuellement de la manière suivante :
 - sur la barre d'outils on choisit « Sample » on sélectionne ensuite « insert data »

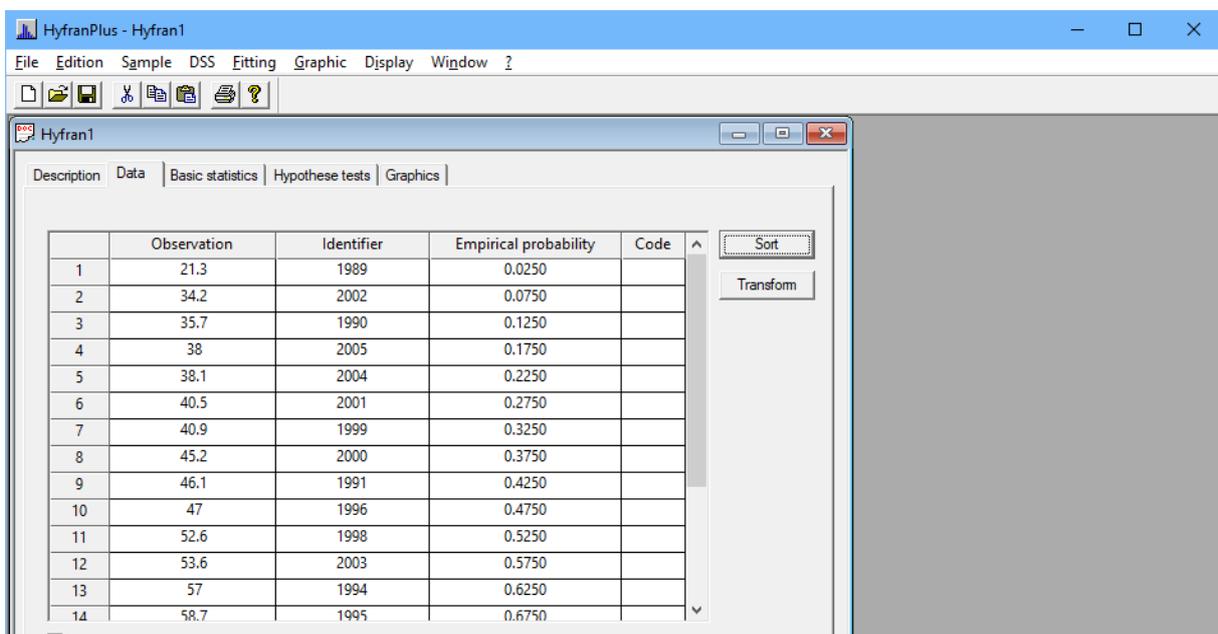
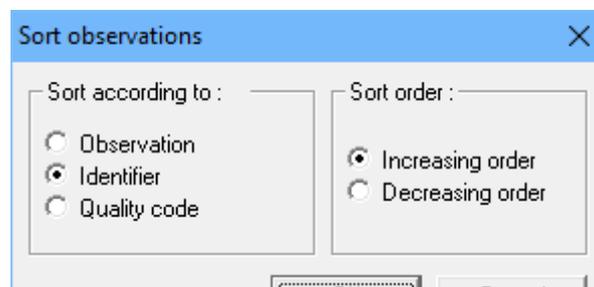


- on peut maintenant faire rentrer les valeurs des pluies et l'année d'observation correspondante, la probabilité empirique va être générée automatiquement.
- Une autre façon de faire c'est de copier les valeurs d'un fichier Excel et les coller directement dans la colonne data le logiciel est capable de la lire.

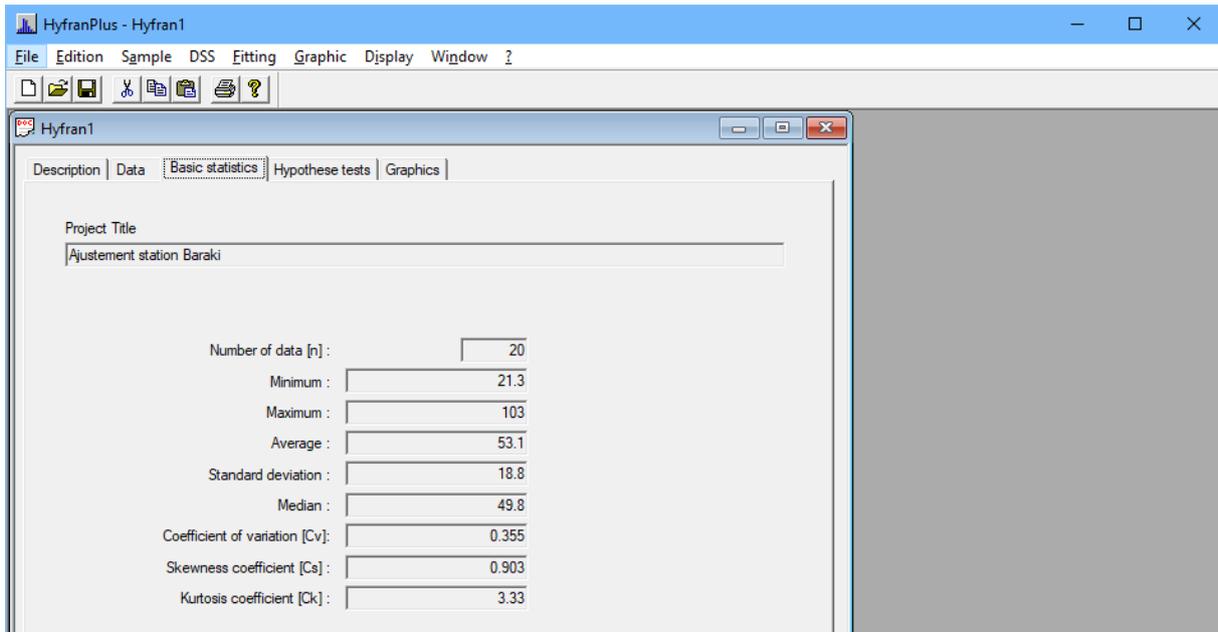
Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet



- On peut maintenant trier les valeurs de notre série d'une façon ascendante ou descendante en utilisant la commande « sort » et les données à trier.



- Dans « basic statistics » on a nous les informations fondamentales sur la série de données ; longueur de la série, le max/min, moyenne ...



IV.3.2.2 Tests d'hypothèses :

Avant d'ajuster l'échantillon à l'aide de la distribution statistique, il est important de vérifier si les données sont indépendantes et distribuées de manière identique, Dans Hyfran Plus, des tests statistiques peuvent être utilisés pour vérifier des hypothèses Indépendance, stabilité et homogénéité.

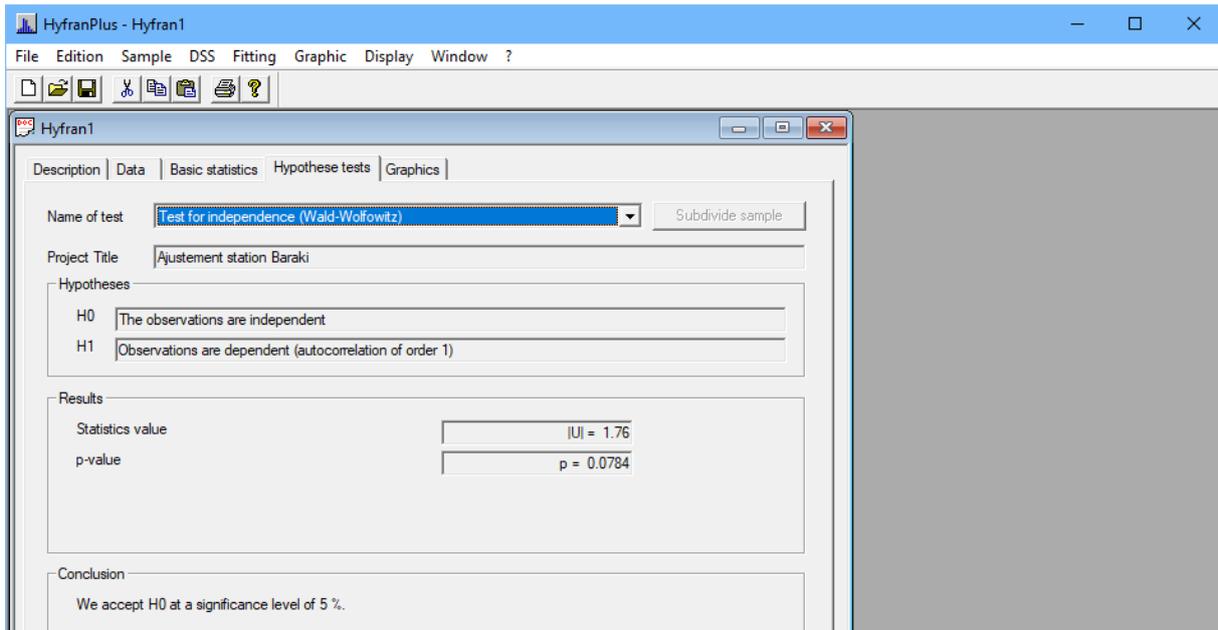


Figure IV-5: Exemple de test d'indépendance d'une série (station Baraki)

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

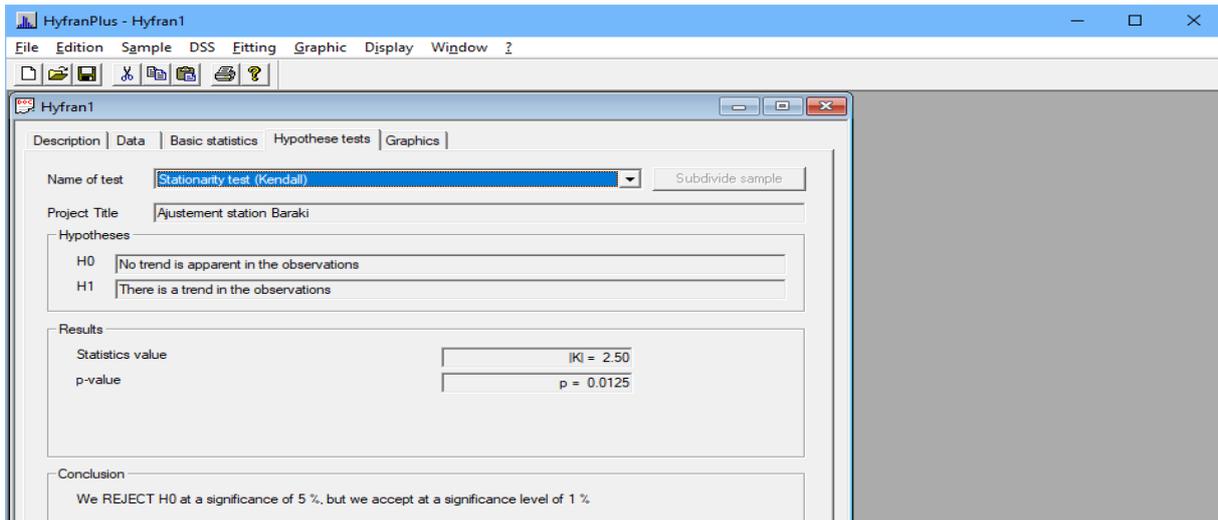


Figure IV-6 : Exemple de test de la stationnarité (Station Baraki)

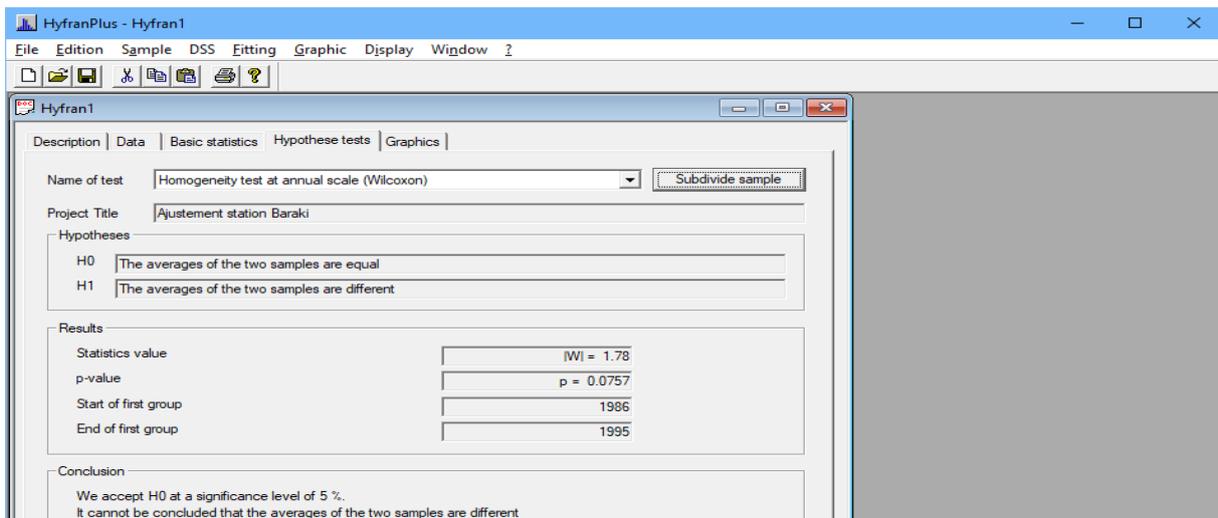


Figure IV-7 : Exemple de test d'homogénéité (Station Baraki)

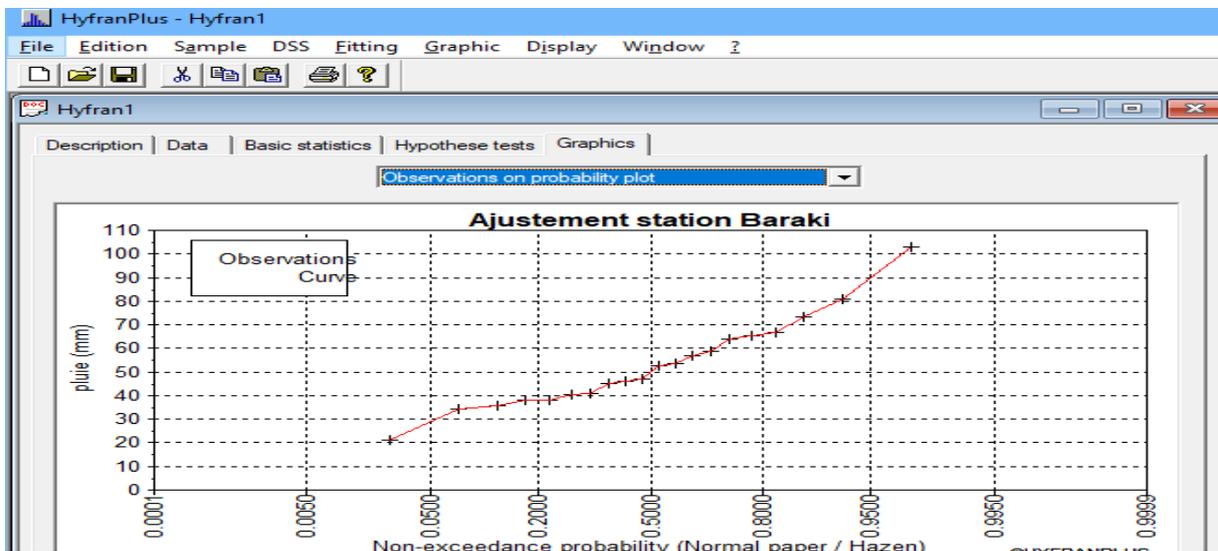


Figure IV-8 : Graphique de la probabilité au non dépassement

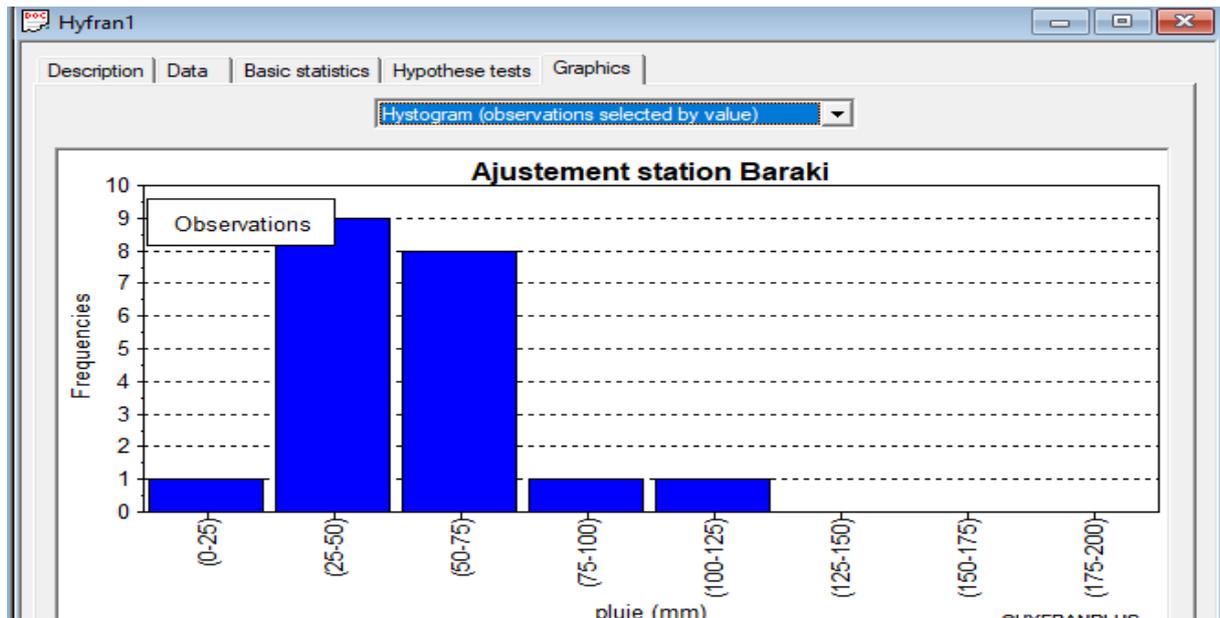


Figure IV-9 : Histogramme de pluie

IV.3.2.3 Analyse fréquentielle

IV.3.2.3.1 Détermination de la loi d'ajustement le plus adéquat

Pour l'ajustement nous avons utilisé le SAD pour choisir la classe qui représente le mieux la forme de la distribution empirique. Ensuite nous avons choisi la loi d'ajustement la plus adéquate selon une étude comparative (graphique et analytique)

IV.3.2.4 Tests d'adéquation

IV.3.2.4.1 Test du χ^2 de Pearson

Parmi tous les tests existants, le test du χ^2 de K. Pearson est le plus pratique et le plus utilisé bien qu'il ne soit pas très puissant (Laborde, 2000) ; La procédure consiste a :

- découper l'échantillon de n éléments, en K classes ($K > 4$) de façon à ce que chaque classe contienne théoriquement plus de 5 valeurs ;
- soit n_i le nombre de valeurs contenu dans la $i^{\text{ème}}$ classe et $n'_i (> 5)$ le nombre théorique qui devrait s'y trouver ; le χ^2 est donné en

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - n'_i)^2}{n_i} \quad \text{IV - 1}$$

Cette variable χ^2 suit une loi de probabilité dite loi du χ^2 , à δ degrés de liberté avec :

- $\delta = K - p - 1$
- K = nombre de classes ;
- p = nombre de paramètres estimés d'après l'échantillon. Si cette probabilité est supérieure à 0.05 (5%) l'ajustement est satisfaisant. Dans le cas contraire, il y a rejet de la loi

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

Loi de Gumbel :

C'est une loi très importante, qui sert dans l'analyse fréquentielle des valeurs extrêmes, et sera notamment l'ingrédient essentiel, en hydrologie opérationnelle, de la méthode du Gradex pour le calcul des crues de projet.

La fonction de répartition de la loi de Gumbel est :

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad \text{IV-2}$$

Ou $F(x)$ = fréquence au non dépassement =FND

et α, β = coefficients d'ajustement.

Par un changement de variable $y = \alpha (x-\beta)$, la loi de Gumbel est :

$$F(x) = F(Y) = e^{-e^{-y}} \quad \text{IV-3}$$

Ou y est la variable réduite de Gumbel, liée à la probabilité attachée à la valeur x

et $F(y)$ = fréquence au non dépassement de la variable réduite y .

L'équation $y = \alpha (x-\beta)$ présentée sous forme :

$$x = \frac{1}{\alpha}y + \beta \quad \text{IV-4}$$

(IV-4) est l'équation d'une droite qui représente la loi de Gumbel sur du papier à l'échelle de probabilité Gumbel.

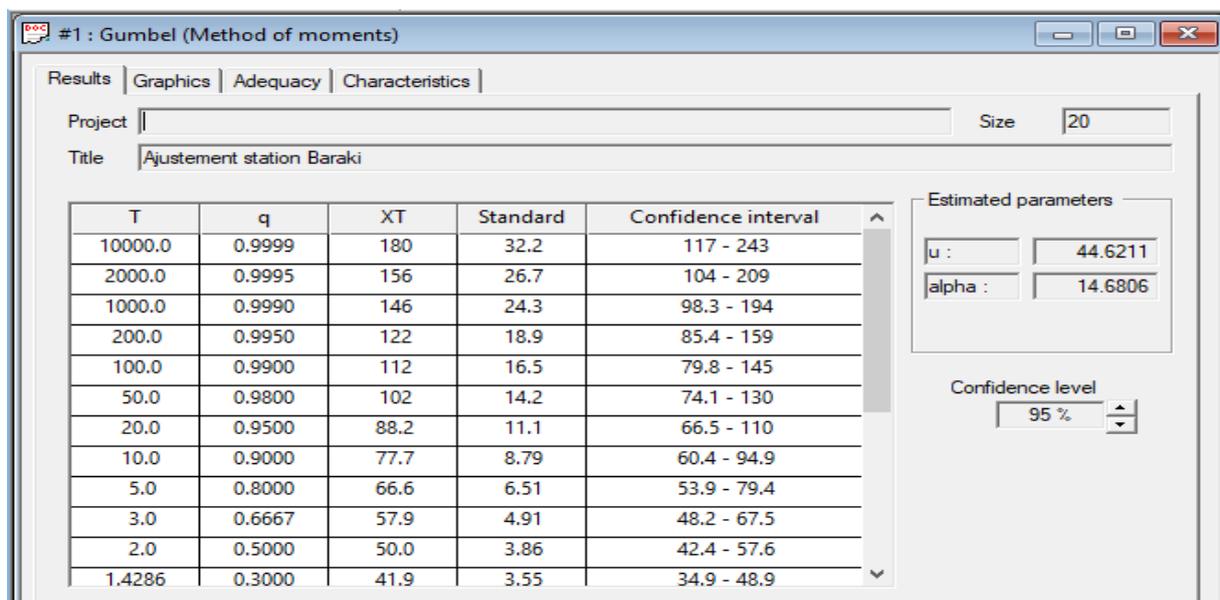


Figure IV-10 : Ajustement de la série à la loi Gumbel

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

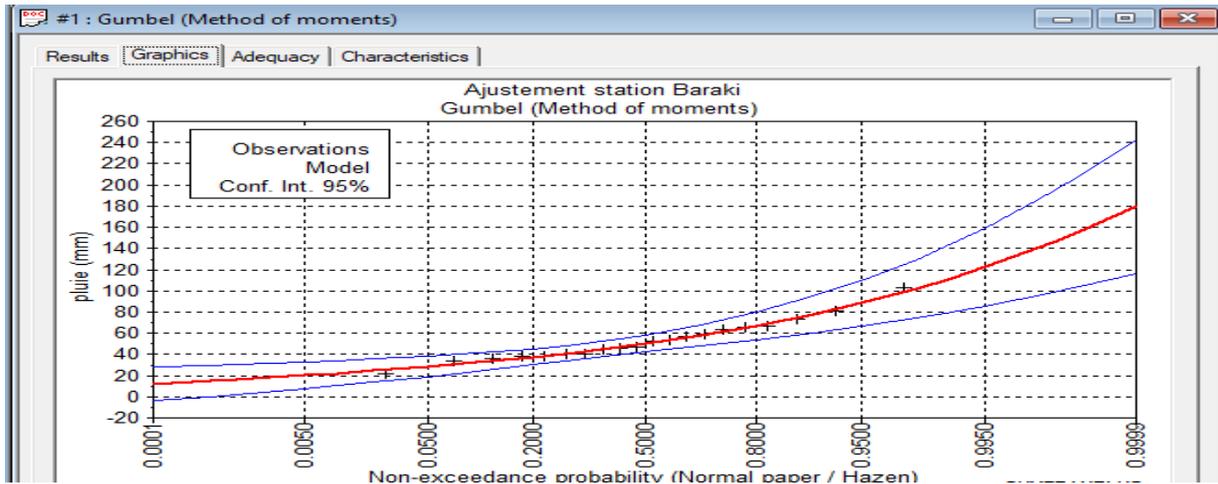


Figure IV-11 : Graphique de la distribution de la loi Gumbel

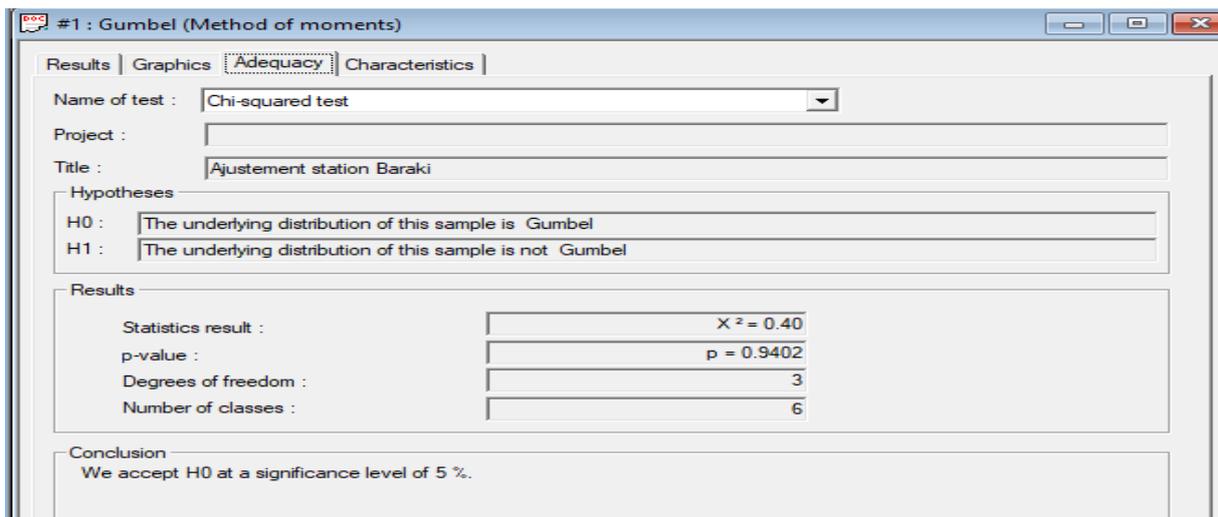


Figure IV-12 : Test d'adéquation du Khi-deux de la loi de Gumbel

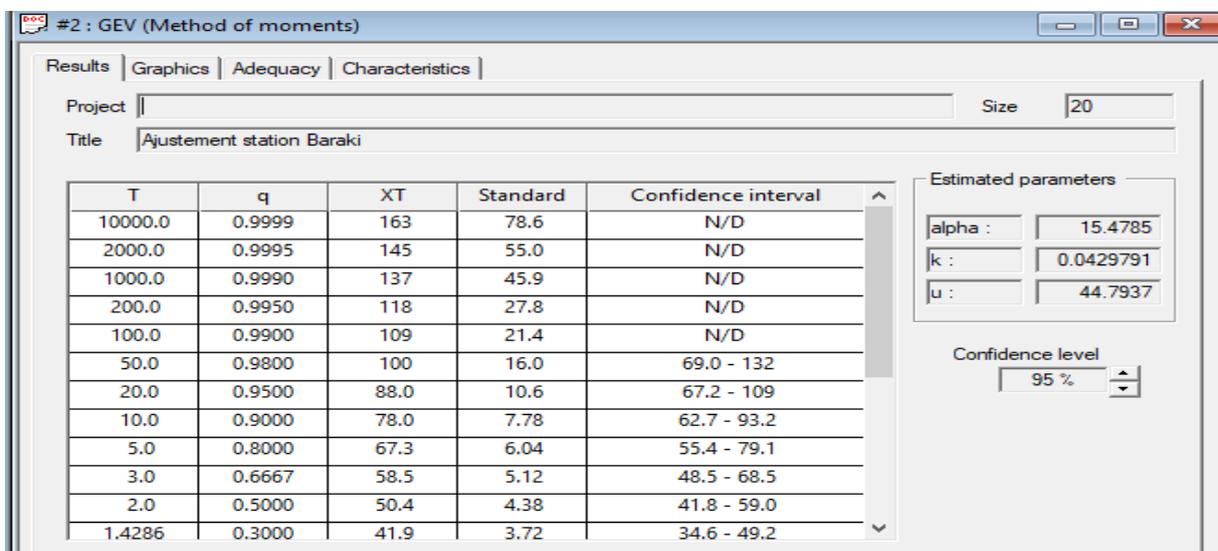


Figure IV-13 : Ajustement de la série à la loi GEV

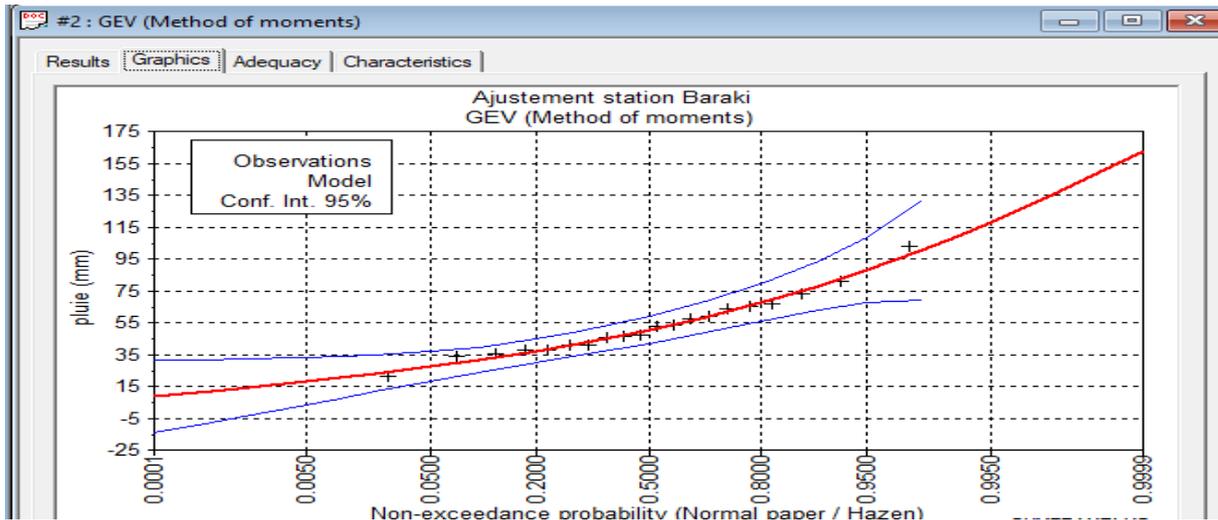


Figure IV-14 : Graphique de la distribution de la loi Gumbel

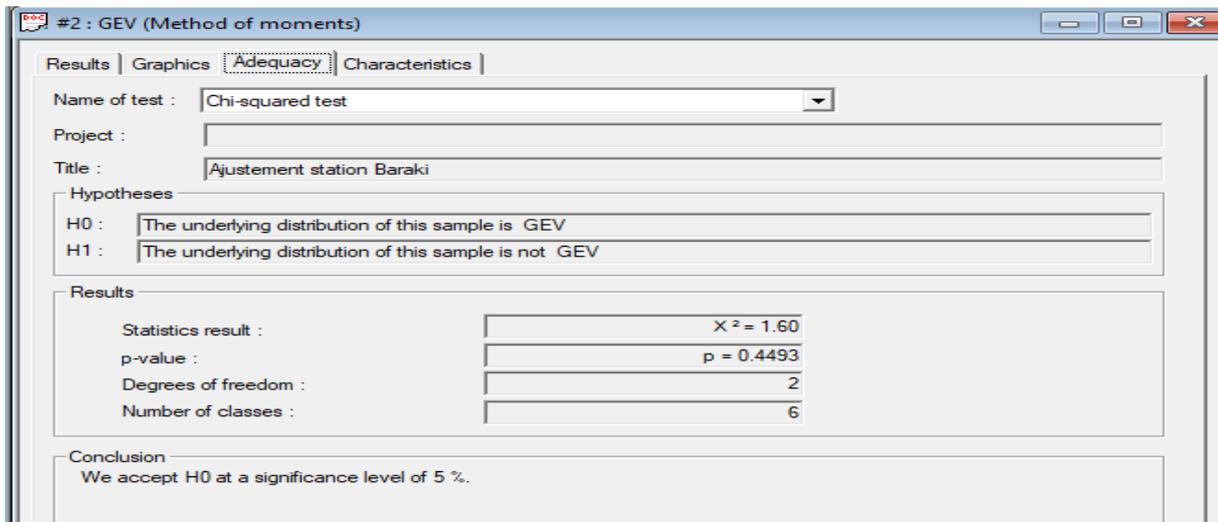


Figure IV-15 : Test d'adéquation du khi-deux de la loi GEV

- Le tableau ci-après montre les valeurs des critères d'information BIC et AIC, ces critères permettent de comparer le degré d'ajustement.
- Les meilleurs ajustements correspondent aux plus faibles valeurs de ces statistiques.

Tableau IV -1 : Critères de comparaison des lois d'ajustement

Model	Nb param.	XT	P(Mi)	P(Mi x)	BIC	AIC
Gumbel (Method of moments)	2	112.154	50.00	81.05	176.823	174.831
GEV (Method of moments)	3	109.400	50.00	18.95	179.729	176.742

P(Mi) : A priori probability P(Mi | x) : A posteriori probability (Method of Schwarz) BIC : Bayesian information criterion AIC : Akaïke information criterion

Ponderated mean by A posteriori probability of quantiles : 111.6321

Nous avons remarqué que le meilleur résultat d'ajustement est trouvé pour la loi Gumbel, malgré que les autres lois soient acceptées pour quelque station au niveau de signification de 5% ou de 1%.

Note : pour les stations étudié L'HYFRAN PLUS a indiqué la classe C (distributions à variations régulières), est d'après l'étude comparative la loi Gumbel est la mieux adéquate.

IV.4 Etablissement des courbes IDF :

Après la transformation des données faite dans le chapitre précédant (donnés pluviométrique de l'ANRH et les données RICCAR) par la suite nous avons affirmé que les données ajuste bien avec la distribution de la loi Gumbel, on peut maintenant travailler avec c'est dernier pour qu'on puisse construire nos courbes IDF.

Comme nos données sont des précipitations journalières tout d'abord on doit transformer la pluie journalière maximale à pluie journalière maximum de fréquence voulue en utilisant la formule suivante :

$$P_j(\%) = \frac{\bar{P}_j}{\sqrt{C_v^2+1}} e^{U \sqrt{\ln(C_v^2+1)}} \quad \text{IV-5}$$

Ou :

\bar{P}_j : La moyenne de la précipitation journalière maximale de la série

C_v : Coefficient de variation

U : variable réduite de Gauss

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

Tableau IV-2 : Variable réduite de Gauss

Fréquences au dépassement, %	50	20	10	5	2	1
Période de retour, années	2	5	10	20	50	100
Variable de Gauss, (u)	0	0,841	1,282	1,645	2,057	2,327

On prend par exemple la station de Baraki:

- On doit déterminer les différentes caractéristiques de la série.

moyenne	Ecart type	Coefficient de variation
53.095	22.8966	0.3456

- En utilisant l'équation (IV-2) on peut déterminer les différentes valeurs de la pluie journalière maximale de fréquence voulue.

Tableau IV-3 : Pluies pour différentes fréquences

P _j (2ans)	P _j (5ans)	P _j (10ans)	P _j (20ans)	P _j (50ans)	P _j (100ans)
50.1820	66.5650	77.1944	87.2059	100.1509	109.6596

- la prochaine étape sera la détermination des intensités à pas de temps différents en utilisant la formule suivante :

$$i(\text{mm/h}) = \left(\frac{P_j(\%)}{24} \right) \times \left(\frac{t}{24 \times 60} \right)^{(b-1)} \quad \text{IV-6}$$

Ou :

$P_j(\%)$: Pluie journalière maximum de fréquence voulue

t: pas de temps (t=5 min, 15 min ... 1440 min)

b : exposant climatique de Montana

- les résultats sont illustrés dans le tableau (4-4)

Tableau IV-4 : Station Baraki 021421

Durée d'agrégation	intensité mm/h					
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
5 min	52.7461	69.9662	81.1387	91.6618	105.2682	115.2628
15 min	28.1988	37.405	43.378	49.0037	56.2779	61.6212
30 min	18.9952	25.1966	29.2201	33.0097	37.9098	41.5091
1 h	12.7955	16.9729	19.6832	22.2359	25.5367	27.9612
4 h	5.8061	7.7016	8.9314	10.0898	11.5875	12.6877
8 h	3.9111	5.1879	6.0164	6.7966	7.8055	8.5466
16 h	2.6346	3.4947	4.0527	4.5783	5.2579	5.7571
24 h	2.0909	2.7735	3.2164	3.6336	4.173	4.5691

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

Tableau IV-5 : Station Bir Mourad Rais 020509

Durée d'agrégation	intensité mm/h					
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
5 min	14.1981	34.2721	54.3464	79.5821	122.5473	162.6193
15 min	10.1	24.38	38.6601	56.6119	87.1758	115.6816
30 min	8.1471	19.6659	31.1849	45.6656	70.3197	93.3136
1 h	6.5718	15.8633	25.155	36.8357	56.7228	75.2707
4 h	4.2761	10.3218	16.3676	23.9679	36.9079	48.9764
8 h	3.4493	8.326	13.2028	19.3335	29.7714	39.5064
16 h	2.7823	6.7161	10.6499	15.5952	24.0149	31.8675
24 h	2.4537	5.9228	9.392	13.7532	21.1783	28.1035

Tableau IV-6 : Station Hamiz Barrage 020602

Durée d'agrégation	intensité mm/h					
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
5 min	66.8376	92.6977	110.0413	126.7265	148.7496	165.219
15 min	34.9558	48.4805	57.5511	66.2775	77.7955	86.4089
30 min	23.2226	32.2077	38.2337	44.031	51.6829	57.4051
1 h	15.4278	21.397	25.4003	29.2517	34.3352	38.1367
4 h	6.8091	9.4436	11.2105	12.9103	15.1539	16.8317
8 h	4.5236	6.2738	7.4476	8.5768	10.0674	11.182
16 h	3.0052	4.1679	4.9478	5.698	6.6882	7.4287
24 h	2.3658	3.2812	3.8951	4.4857	5.2652	5.8481

Tableau IV-7 : Station Mahelma ferme

Durée d'agrégation	intensité mm/h					
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
5 min	69.0655	166.6636	264.5187	386.8911	595.6784	790.3831
15 min	34.9499	84.3385	133.857	195.7824	301.4371	399.9654
30 min	22.7409	54.8766	87.0969	127.3899	196.1363	260.2459
1 h	14.7968	35.7066	56.6714	82.8889	127.6202	169.3344
4 h	6.2646	15.1172	23.9931	35.0929	54.0309	71.6916
8 h	4.0762	9.8363	15.6116	22.8339	35.1563	46.6476
16 h	2.6522	6.4002	10.158	14.8574	22.8752	30.3522
24 h	2.0627	4.9776	7.9001	11.5549	17.7905	23.6056

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

Tableau IV-8 : Pr 6 EC EARTH 2046-2065

intensité mm/h						
Durée d'agrégation	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
5 min	62.1244	148.3538	234.1702	340.9596	522.2762	690.6649
15 min	31.4374	75.0729	118.4995	172.5392	264.2926	349.504
30 min	20.4554	48.8478	77.1042	112.2662	171.9675	227.4121
1 h	13.3098	31.7838	50.1694	73.0484	111.8943	147.9705
4 h	5.635	13.4564	21.2404	30.9267	47.373	62.6466
8 h	3.6665	8.7557	13.8205	20.1231	30.8242	40.7624
16 h	2.3857	5.6971	8.9926	13.0935	20.0564	26.5229
24 h	1.8554	4.4307	6.9937	10.1831	15.5983	20.6274

Tableau IV-9 : Pr 6 EC EARTH 2081-2100

intensité mm/h						
Durée d'agrégation	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
5 min	58.4888	142.4447	227.1727	333.5896	515.9316	686.5943
15 min	29.5977	72.0827	114.9585	168.8097	261.082	347.4441
30 min	19.2584	46.9021	74.8001	109.8395	169.8785	226.0718
1 h	12.5309	30.5179	48.6703	71.4694	110.535	147.0983
4 h	5.3052	12.9204	20.6057	30.2582	46.7975	62.2774
8 h	3.452	8.4069	13.4075	19.6881	30.4498	40.5221
16 h	2.2461	5.4702	8.7239	12.8105	19.8128	26.3666
24 h	1.7468	4.2543	6.7847	9.963	15.4088	20.5058

Tableau IV-10 : Pr 6 ESM2M 2046-2065

intensité mm/h						
Durée d'agrégation	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
5 min	72.9872	172.8134	271.561	393.9484	600.9263	792.499
15 min	36.9345	87.4505	137.4207	199.3536	304.0927	401.0361
30 min	24.0322	56.9015	89.4157	129.7136	197.8643	260.9426
1 h	15.637	37.0242	58.1802	84.4009	128.7445	169.7877
4 h	6.6203	15.675	24.6319	35.733	54.5069	71.8835
8 h	4.3076	10.1993	16.0273	23.2504	35.4661	46.7725
16 h	2.8029	6.6364	10.4285	15.1284	23.0767	30.4335
24 h	2.1798	5.1612	8.1104	11.7657	17.9472	23.6688

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

Tableau IV-11: Pr 6 ESM2M 2081-2100

intensité mm/h						
Durée d'agrégation	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
5 min	63.5065	152.6069	241.676	352.8409	542.1365	718.3714
15 min	32.1368	77.2252	122.2977	178.5516	274.3427	363.5246
30 min	20.9105	50.2482	79.5756	116.1783	178.5069	236.5349
1 h	13.6059	32.695	51.7775	75.5939	116.1492	153.9064
4 h	5.7603	13.8422	21.9212	32.0044	49.1744	65.1598
8 h	3.7481	9.0067	14.2635	20.8243	31.9964	42.3976
16 h	2.4388	5.8604	9.2808	13.5498	20.8191	27.5869
24 h	1.8967	4.5578	7.2179	10.5379	16.1914	21.4549

Tableau IV-12 : Pr 7 EC EARTH 2046-2065

intensité mm/h						
Durée d'agrégation	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
5 min	67.1569	160.7411	254.0295	370.2432	567.7723	751.3846
15 min	33.9841	81.3414	128.5491	187.3579	287.3155	380.2306
30 min	22.1125	52.9265	83.6432	121.9083	186.9478	247.405
1 h	14.3879	34.4377	54.4242	79.3222	121.6415	160.9793
4 h	6.0915	14.58	23.0417	33.5828	51.4997	68.1542
8 h	3.9635	9.4868	14.9926	21.8514	33.5094	44.346
16 h	2.579	6.1728	9.7552	14.2181	21.8036	28.8546
24 h	2.0057	4.8007	7.5868	11.0577	16.9571	22.4408

Tableau IV-13 : Pr 7 EC EARTH 2081-2100

intensité mm/h						
Durée d'agrégation	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
5 min	71.093	171.2019	271.4272	396.6418	610.073	808.9458
15 min	35.9759	86.635	137.353	200.7166	308.7213	409.3589
30 min	23.4085	56.3709	89.3716	130.6005	200.876	266.358
1 h	15.2312	36.6789	58.1515	84.9779	130.7042	173.3114
4 h	6.4485	15.5288	24.6198	35.9773	55.3366	73.3753
8 h	4.1958	10.1042	16.0194	23.4094	36.0059	47.7432
16 h	2.7301	6.5745	10.4233	15.2318	23.428	31.0651
24 h	2.1233	5.1131	8.1064	11.8461	18.2204	24.16

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

Tableau IV-14 : Pr 7 GFDL 2046-2065

intensité mm/h						
Durée d'agrégation	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
5 min	76.07	181.4929	286.3441	416.765	638.1127	843.6053
15 min	38.4945	91.8427	144.9015	210.8997	322.9105	426.898
30 min	25.0472	59.7594	94.2832	137.2263	210.1085	277.7701
1 h	16.2975	38.8837	61.3474	89.2892	136.7115	180.7369
4 h	6.8999	16.4623	25.9728	37.8026	57.8799	76.5191
8 h	4.4896	10.7115	16.8997	24.5971	37.6608	49.7887
16 h	2.9212	6.9697	10.9962	16.0046	24.5048	32.3961
24 h	2.2719	5.4205	8.5519	12.4471	19.0579	25.1951

Tableau IV-15 : Pr 7 GFDL 2081-2100

intensité mm/h						
Durée d'agrégation	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
5 min	61.5113	150.4761	240.5437	353.9054	548.5506	731.0502
15 min	31.1272	76.1469	121.7247	179.0903	277.5885	369.9406
30 min	20.2536	49.5466	79.2027	116.5288	180.6188	240.7096
1 h	13.1784	32.2385	51.5349	75.8219	117.5234	156.6228
4 h	5.5794	13.6489	21.8185	32.1009	49.7562	66.3098
8 h	3.6303	8.8809	14.1966	20.8871	32.3749	43.1459
16 h	2.3622	5.7786	9.2373	13.5907	21.0654	28.0738
24 h	1.8371	4.4941	7.1841	10.5697	16.383	21.8335

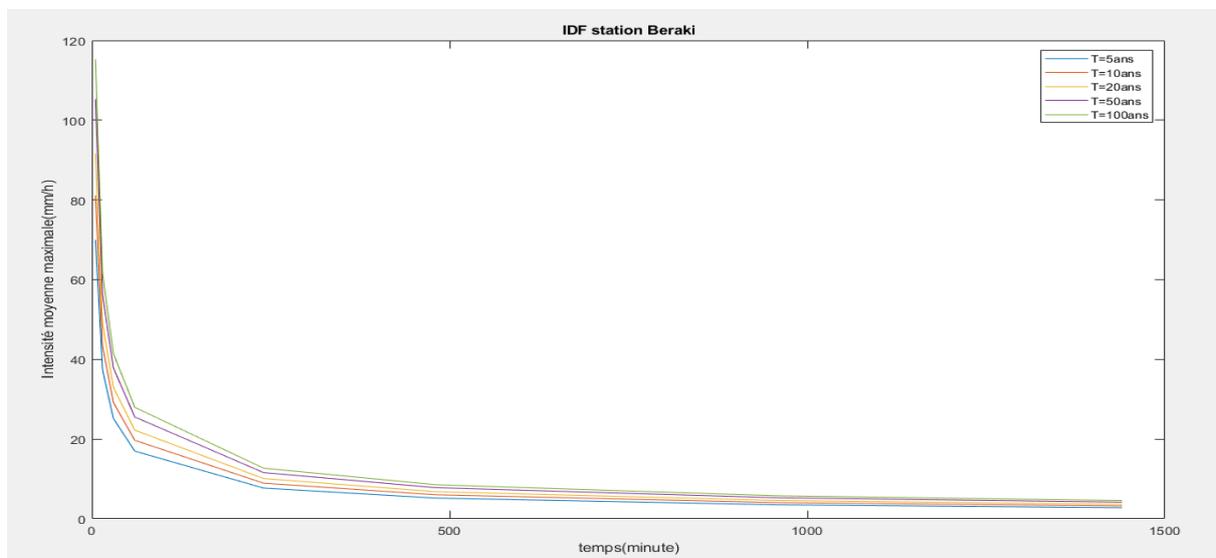


Figure IV-16 : Courbes IDF de la station 021421

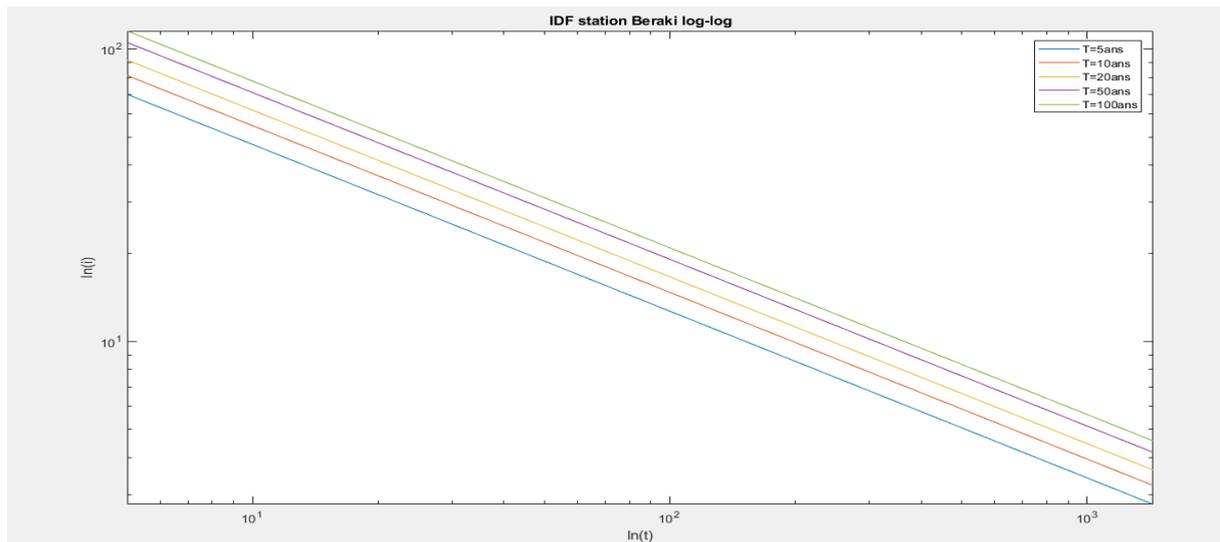


Figure IV-17 : Courbes IDF station 021421 (forme logarithmique)

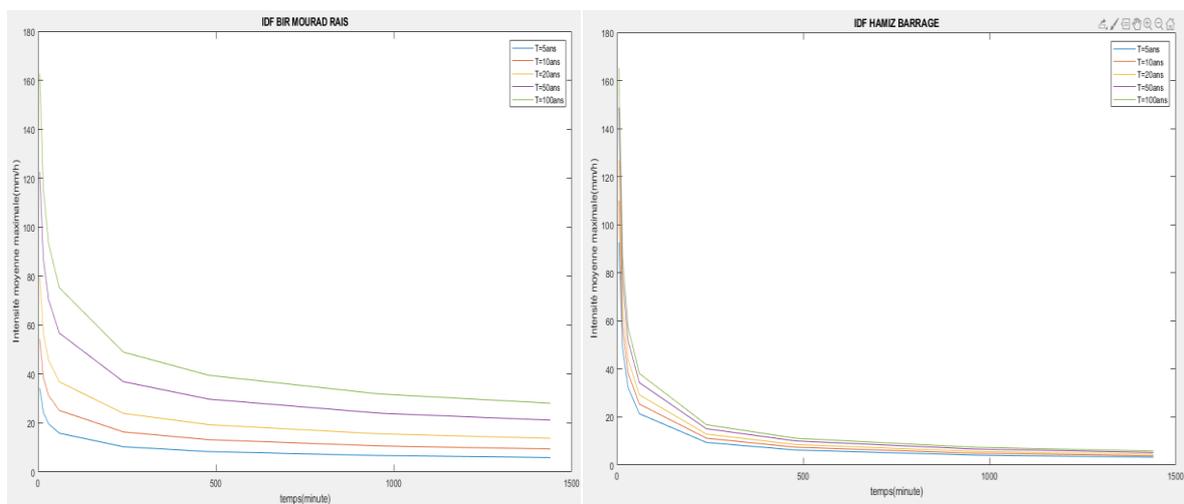


Figure IV-18 : Courbes IDF station Bir Mourad Rais et Hamiz Barrage

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

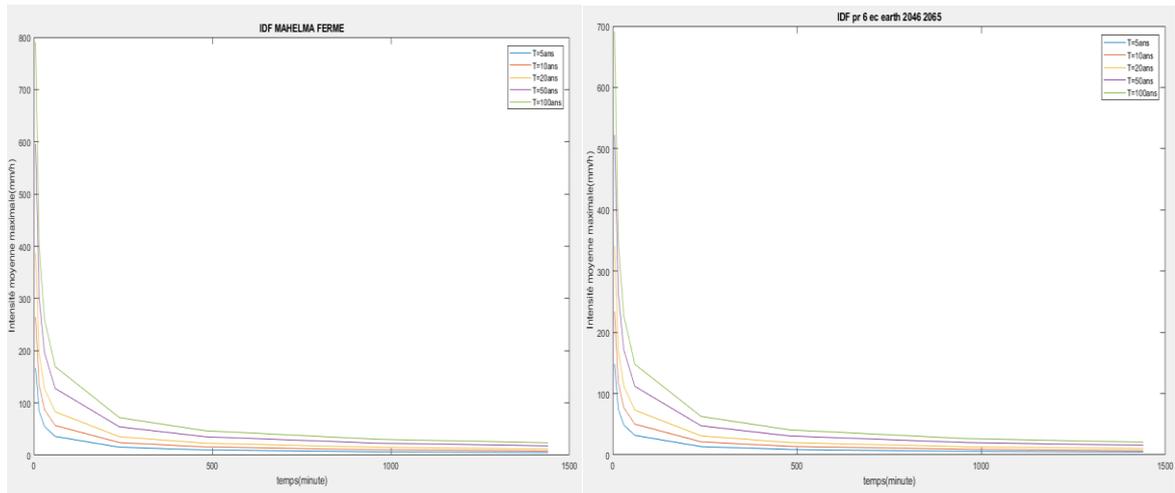


Figure IV-19 : Courbes IDF des stations Mahelma Ferme et Pr 6 Ec Earth 2046-2065

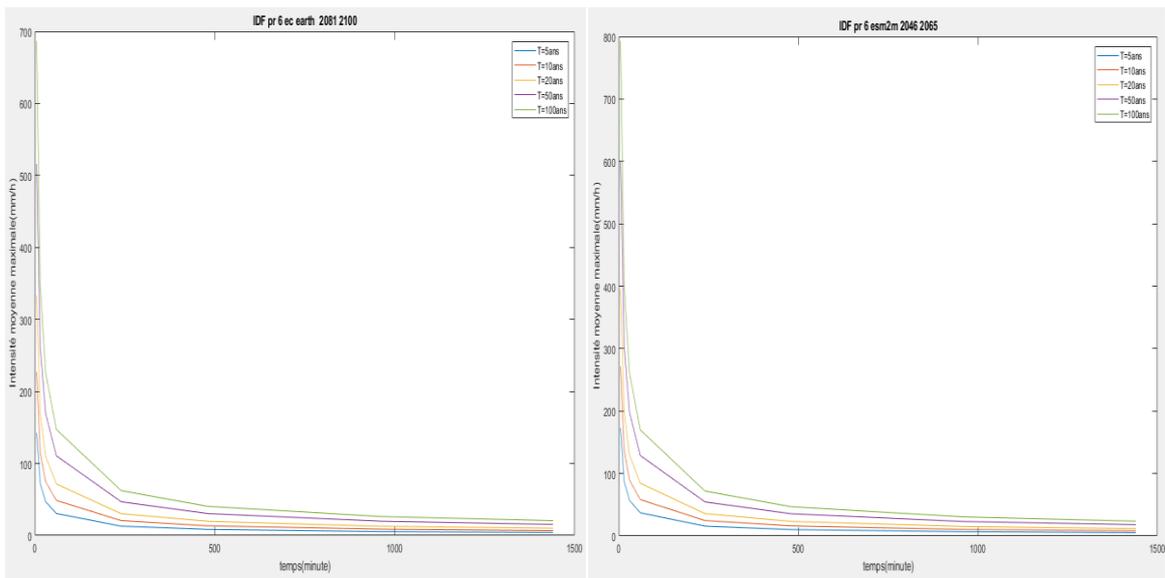


Figure IV-20 : Courbes IDF des stations Pr 6 Ec Earth 2081-2100 et Pr 6 Esm2m 2046-2065

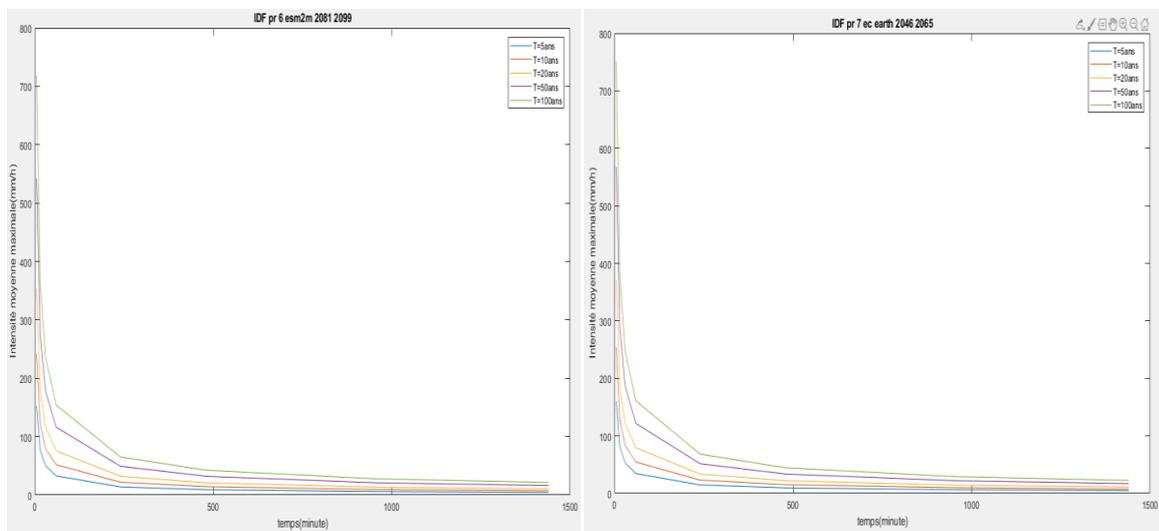


Figure IV-21 : Courbes IDF des stations Pr 6 Esm2m 2081-2099 et Pr 7 Ec Earth 2046-2065

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

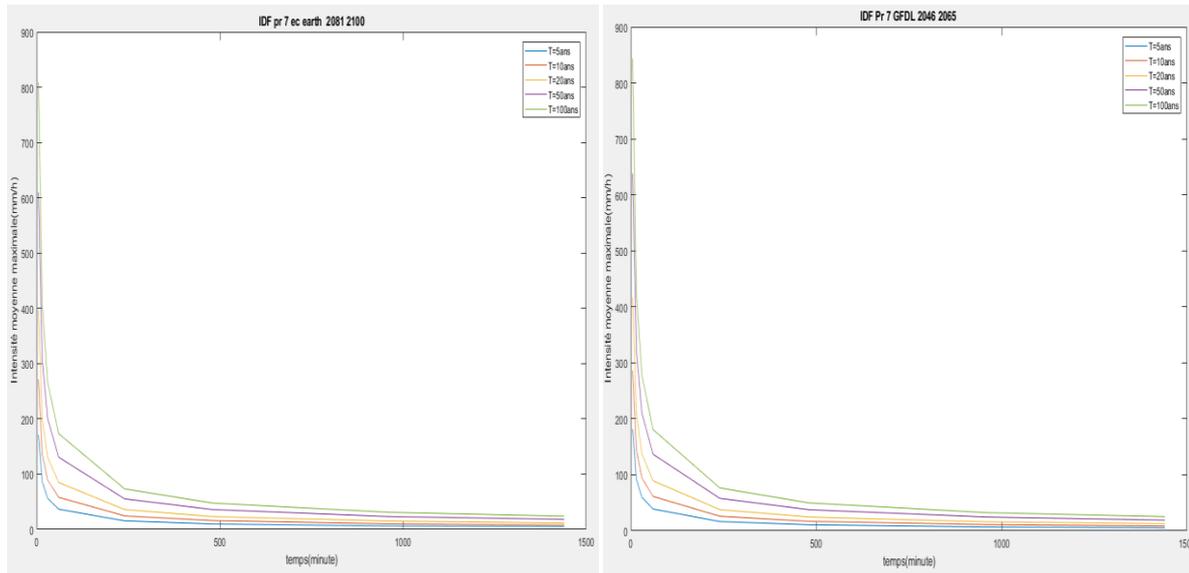


Figure IV-22 : Courbes IDF Pr 7 Ec Earth 2081-2100 et Pr 7 GFDL 2046-2065

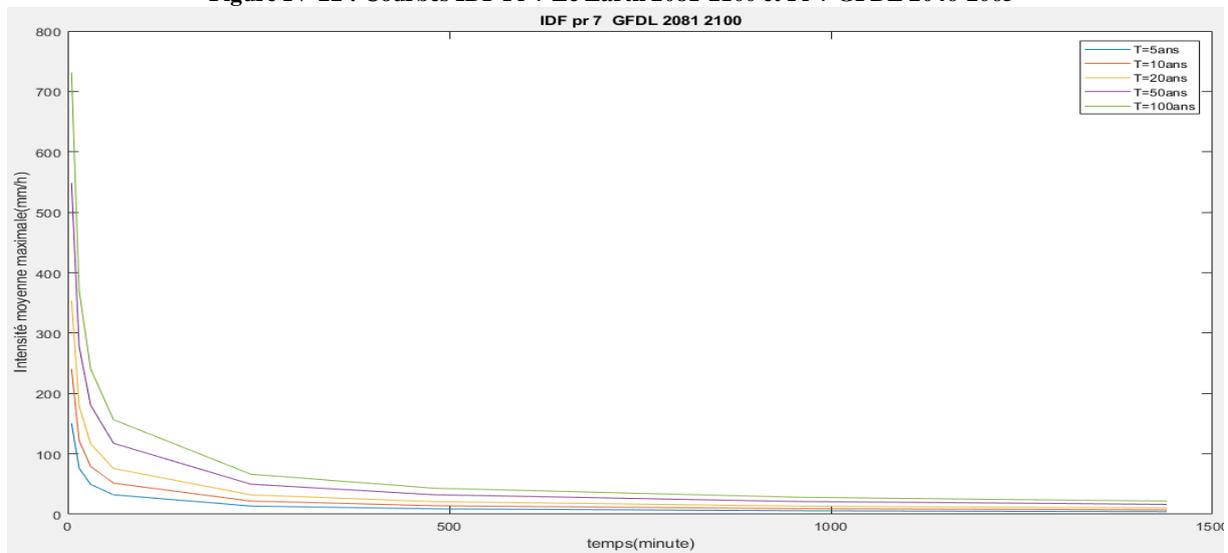


Figure IV-23 : Courbe IDF de station Pr 7 2081-2100

IV.4.1 Détermination des exposants climatique

Pour qu'on puissent déterminer les exposants climatique $a(t)$ et $b(t)$ de Montana, on utilise la méthode des moindres carrés. En transformant l'équation (1-4) an une équation linéaire de la forme $Y=Ax+B$.

Tableau IV-16 : Exposant climatique Montana de la station 021421

Exposant climatique	temps de retour	Station Baraki 021421					
		2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
$a(t)$ Montana		132.0089	175.1061	203.0679	229.4041	263.4573	288.4709
$b(t)$ Montana		0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

Tableau IV-17 : Expositant climatique **Montana** de la station 020509

station 020509							
Expositant climatique	temps de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Montana		23.3835	56.4445	89.5059	131.0679	201.8294	267.826
b(t) Montana		0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31

Tableau IV-18 : Expositant climatique **Montana** de la station 020602

station 020602							
Expositant climatique	temps de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Montana		172.7481	239.5859	284.4119	327.5366	384.4574	427.024
b(t) Montana		0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59

Tableau IV-19 : Expositant climatique **Montana** de la station 020511

station 020511							
Expositant climatique	Temps de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Montana		187.3366	452.0664	717.4931	1049.4	1615.7	2143.9
b(t) Montana		0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62

Tableau IV-20 : Expositant climatique **Montana** de la station Pr 6 Ec earth 2046-2065

Pr 6 EC EARTH 2046-2065							
Expositant climatique	temps de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Montana		168.5093	402.4018	635.1744	924.8352	1416.6	1873.4
b(t) Montana		0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62

Tableau IV-21 : Expositant climatique **Montana** de la station Pr 6 Ec earth 2081-2100

Pr 6 EC EARTH 2081-2100							
Expositant climatique	temps de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Montana		158.6479	386.374	616.1942	904.8444	1399.4	1862.4
b(t) Montana		0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

Tableau IV-22 : Expositant climatique **Montana** de la station Pr 6 ESM2M 2046-2065

Pr 6 ESM2M 2046-2065							
Expositant climatique	temps de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Montana		197.9741	468.7474	736.595	1068.6	1630	2149.6
b(t) Montana		0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62

Tableau IV-23 : Expositant climatique de la station Pr 6 ESM2M 2081-2100

Pr 6 ESM2M 2081-2100							
Expositant climatique	temps de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Montana		172.2581	413.9384	655.5336	957.0625	1470.5	1948.5
b(t) Montana		0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62

Tableau IV-24 : Expositant climatique **Montana** de la station Pr 7 Ec earth 2046-2065

Pr 7 EC EARTH 2046-2065							
Expositant climatique	temps de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Montana		182.1597	436.0018	689.0418	1004.3	1540.1	2038.1
b(t) Montana		0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62

Tableau IV-25 : Expositant climatique **Montana** de la station Pr 7 Ec earth 2081-2100

Pr 7 EC EARTH 2081-2100							
Expositant climatique	temps de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Montana		192.836	464.3763	736.2323	1075.9	1654.8	2194.2
b(t) Montana		0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62

Tableau IV-26 : Expositant climatique **Montana** de la station Pr 7 GFDL 2046-2065

Pr 7 GFDL 2046-2065							
Expositant climatique	temps de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Montana		206.336	492.2901	776.6934	1130.5	1730.8	2288.2
b(t) Montana		0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

Tableau IV-27 : Exposant climatique **Montana** de la station Pr 7 GFDL 2081-2100

Pr 7 GFDL 2081-2100							
Exposant climatique	temps de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Montana		166.8462	408.1585	652.4622	959.95	1487.9	1982.9
b(t) Montana		0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62

Tableau IV-28 : Exposant climatique **Talbot** de la station 021421

021421						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Talbot 10^3	3.1483	4.1761	4.8429	5.471	6.2832	6.8797
b(t) Talbot	175.1227	175.1227	175.1227	175.1227	175.1227	175.1227

Tableau IV-29 : Exposant climatique **Talbot** de la station 020509

020509						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Talbot 10^3	4.4954	10.851	17.207	25.197	38.801	51.489
b(t) Talbot	571.2435	571.2435	571.2435	571.2435	571.2435	571.2435

Tableau IV-30 : Exposant climatique **Talbot** de la station 020602

020602						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Talbot 10^3	3.5397	4.9093	5.8278	6.7114	7.8778	8.75
b(t) Talbot	160.3122	160.3122	160.3122	160.3122	160.3122	160.3122

Tableau IV-31 : Exposant climatique **Talbot** de la station 020511

020511						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Talbot 10^3	3.061	7.3865	11.723	17.147	26.4	35.03
b(t) Talbot	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

Tableau IV-32 : Exposant climatique Talbot de la station Pr 6 Ec earth 2046-2065

PR 6 EC EARTH 2046-2065						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Talbot 10^3	2.7534	6.575	10.378	15.111	23.147	30.61
b(t) Talbot	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252

Tableau IV-33 : Exposant climatique Talbot de la station Pr 6 Ec earth 2081-2100

PR 6 EC EARTH 2081-2100						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Talbot 10^3	2.5922	6.3131	10.068	14.785	22.866	30.43
b(t) Talbot	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252

Tableau IV-34 : Exposant climatique Talbot de la station Pr 6 Esm2m 2046-2065

Pr 6 ESM2M 2046-2065						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Talbot 10^3	3.2348	7.6591	12.036	17.46	26.633	35.124
b(t) Talbot	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252

Tableau IV-35 : Exposant climatique Talbot de la station Pr 6 ESM2M 2081-2100

Pr 6 ESM2M 2081-2100						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Talbot 10^3	2.8146	6.7635	10.711	15.638	24.027	31.838
b(t) Talbot	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252

Tableau IV-36 : Exposant climatique Talbot de la station Pr 7 Ec earth 2046-2065

P 7 EC EARTH 2046-2065						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Talbot 10^3	2.9764	7.124	11.259	16.409	25.164	33.301
b(t) Talbot	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

Tableau IV-37 : Exposant climatique Talbot de la station Pr 7 Ec earth 2081-2100

P 7 EC EARTH 2081-2100						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Talbot 10^3	3.1508	7.5877	12.03	17.579	27.038	35.852
b(t) Talbot	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252

Tableau IV-38 : Exposant climatique Talbot de la station Pr 7 GFDL 2046-2065

Pr 7 GFDL 2046-206533						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Talbot 10^3	3.3714	8.0438	12.691	18.471	28.281	37.389
b(t) Talbot	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252

Tableau IV-39 : Exposant climatique Talbot de la station Pr 7 GFDL 2081-2100

Pr 7 GFDL 2081-2100						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a(t) Talbot 10^3	2.7262	6.6691	10.661	15.685	24.312	32.4
b(t) Talbot	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252	140.1252

IV.5 Élaboration de pluies de projet

En hydrologie urbaine les courbes intensité-durée-fréquence ont été jusqu'aux années soixante les seuls modèles d'intégration des caractéristiques de la pluviométrie locale dans les modèles de calcul des débits de pointes. En effet, à cette époque, en raison de la faible extension des agglomérations urbaines et du surdimensionnement des organes d'évacuation des eaux pluviales, les problèmes d'inondation ou de débordements étaient presque inexistantes et la gestion de l'eau pluviale en milieu urbain se limitait à l'estimation du seul débit maximal à l'exutoire du bassin versant rattaché à une période de retour.

Ainsi les modèles de calcul des pointes de débit représentent la pluie par la seule valeur de l'intensité moyenne maximale mesurable à partir des courbes intensité-durée-fréquence.

Depuis 1970, l'assainissement doit faire face à de nouveaux problèmes liés au développement incessant des villes et à l'insuffisance des réseaux existants. En effet, l'intensité moyenne maximale est insuffisante pour caractériser la pluie et si l'on veut par exemple dimensionner un bassin de rétention ou faire un diagnostic de réseaux complexe; il faudrait au moins disposer d'un hyétogramme (intensité en fonction du temps) complet qui soit représentatif de l'ensemble de la pluviométrie pour l'objectif poursuivi. Une première réponse à ces nouveaux besoins fut l'élaboration de pluies de projet. Une pluie de projet est constituée par un hyétogramme fictif ou parfois réel qui est censé représenter la pluviométrie locale. Ce qu'il faut comprendre c'est que la pluie est un phénomène aléatoire par nature et que les événements pluvieux les plus critiques du point de vue hydraulique pour les réseaux d'assainissement sont les orages qui sont très localisés et qui ont une très faible probabilité de se produire là où se trouve un pluviographe. Ainsi les données pluviographique locales étant rarement suffisantes, on a été amené à établir des pluies fictives appelées pluies de projet.

IV.5.1 L'approche déterministe

Elle consiste à représenter la pluviométrie locale par une pluie de projet unique à laquelle on rattache une période de retour. Elle regroupe les trois méthodes suivantes de représentation de la pluie de projet :

- A partir des courbes « intensité-durée-fréquence », on s'intéresse à l'intensité moyenne pendant le temps de concentration du bassin versant considéré .elle permet de calculer le débit de point à l'exutoire, auquel on fait correspondre la même période de retour.
- A partir d'un hyétogramme (variation de l'intensité en fonction de temps).
- A partir d'un hyétogramme tenant compte de l'emprise de l'averse et de sa trajectoire sur le bassin étudié

IV.5.2 L'approche statistique

Elle consiste à représenter la pluviométrie locale par un ensemble de pluie de projet permettant d'étudier la relation Pluie -Débit à l'exutoire, cette approche essaie :

De mesurer la fréquence d'apparition d'un débit à partir de plusieurs pluies .la période de retour d'une valeur de débit n'étant pas forcément égale à celle du de la pluie ;

- De tenir compte de la variation spatio-temporelle des intensités à partir d'une trajectoire suivie par localement.
- De mesurer la réponse d'un réseau pour les événements pluviométriques les plus violentes observées localement.

Les trois types de pluies de projet utilisés dans ce travail sont :

- les pluies de type double triangle
- les pluies de type Chicago
- les pluies de type composite

IV.5.2.1 Construction de la pluie de projet à partir de la méthode « pluie de projet double triangle »

Les événements pluvieux réels provoquant des désordres dans les réseaux d'assainissement pluvial sont généralement constitués d'une période de pluie intense relativement courte située à l'intérieur d'une séquence de pluie de quelques heures; le point précédent mis à part, aucune forme particulière de distribution temporelle des intensités n'est plus probable qu'une autre.

Desbordes (1974) a donc proposé de choisir une forme particulière de pluie de projet en raisonnant non plus par rapport au phénomène physique, mais par rapport aux éléments auxquels le modèle de ruissellement (utilisé après le modèle pluviométrique) était le plus sensible. Cette analyse de sensibilité, conduite à partir du modèle du réservoir linéaire a permis de montrer qu'une forme simple, doublement triangulaire, fournissait des formes d'hydrogrammes et des valeurs de débit maximum peu sensibles à des erreurs sur le paramètre principal du modèle de ruissellement : le lag time.

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

Cette pluie de projet est entièrement définie par cinq paramètres (Figure 4-18) :

- La durée totale t_3 (quelques heures) ;
- La durée de la période de pluie intense : t_1 (quelques dizaines de minutes) ;
- La position de la pointe d'intensité par rapport au début de la pluie : rapport t_2 / t_3 ;
- L'intensité atteinte au début de la période intense : i_1 ;
- l'intensité maximale atteinte pendant la période intense : i_2 .

Les principaux éléments de choix sont les suivants :

- La durée totale t_3 peut être prise égale à 4 heures (valeur par défaut : en pratique, cette durée devrait être adaptée à chaque bassin versant et à son temps de concentration). Sur cette durée t_3 , il tombe plus de 80 % de la hauteur totale des épisodes pluvieux significatifs dans 73 % des cas. Par ailleurs, pour les grands bassins versants sur lesquels des pluies plus longues pourraient paraître intéressantes, la variation relative du débit de pointe obtenu n'est que de 2 % lorsque la durée totale de la pluie passe de deux à quatre heures.
- La durée de la période de pluie intense t_1 peut être choisie entre quinze minutes et une heure selon la nature et la surface du bassin versant étudié.

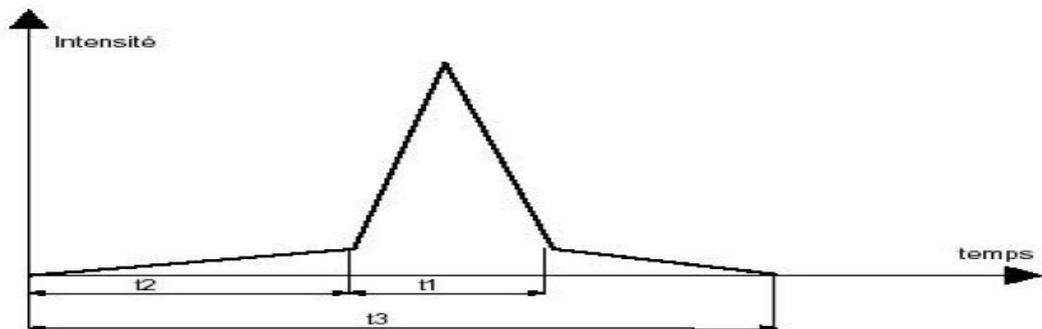


Figure IV-24 : Pluie de projet double triangle

IV.5.2.2 Construction de la pluie de projet à partir de la méthode « Pluie De Type Chicago »

La méthode développée par Kiefer et Chu (1957) utilise les courbes « Intensité – Durée – Fréquence » et les équations qui en dérivent pour établir un hyétogramme synthétique à une station donnée. Le hyétogramme proposé est ajusté à deux courbes exponentielles, l'une avant, l'autre après la pointe de l'averse, cette dernière étant définie par un coefficient d'avancement r . Cette méthode a été développée à Chicago -ce qui lui donne son nom- pour la conception d'égout, mais peut facilement être utilisée dans d'autres zones du globe où les enregistrements adéquats de précipitations sont disponibles. Si l'on considère le hyétogramme suivant (figure 4-19). Une ligne horizontale (dessinée en gras), représentant une intensité donnée i , coupera le hyétogramme avant et après la pointe d'intensité de l'averse.

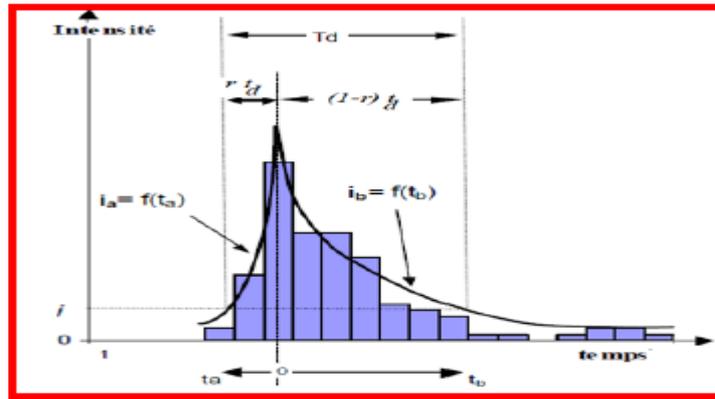


Figure IV-25 : La pluie de Chicago

En partant du pic d'intensité comme origine, on définit le temps d'intersection t_a avant le pic d'intensité, et le temps d'intersection t_b après le pic d'intensité. La durée totale entre les deux intersections t_d est égale :

$$\mathbf{t_d = t_a + t_b}$$

On définit le coefficient d'avancement de l'averse r , défini comme le rapport du temps t_a « avant le pic d'intensité » sur la durée totale de l'averse t_d : soit ($r = t_a / t_d$) : le rapport de la durée écoulée entre le début de l'événement et l'apparition du pic à la durée totale d'où : $r = t_a / t_b$ avec $0 < r < 1$

Le cas idéal est celui dans lequel on peut obtenir la variable r à partir des analyses sur des pluies. En absence d'analyses locales détaillées, on peut donc admettre que : $r = 0.5 * t_d$.

$$\mathbf{t_d = \frac{t_a}{r} = \frac{t_b}{1-r}} \quad \mathbf{IV-4}$$

Comme le montre la figure, on peut ajuster deux courbes exponentielles, $i_a = f(t_a)$ et $i_b = f(t_b)$, au hétérogramme précédent, où i_a , et i_b représentant respectivement l'intensité avant et après le pic d'intensité.

$$\mathbf{i_b = \frac{a[(1-r)\frac{t_b}{1-r} + b]}{(\frac{t_b}{1-r} + b)^{(c+1)}}} \quad \mathbf{IV-5}$$

$$\mathbf{i_a = \frac{a[(1-r)\frac{t_a}{r} + b]}{(\frac{t_a}{r} + b)^{(c+1)}}} \quad \mathbf{IV-6}$$

Etape 1 : Choix du coefficient d'avancement de la pluie r et calcul du temps de pointe.

On peut choisir une pointe d'intensité qui se situe au milieu de la pluie, ce qui équivaut à $r=0.5$. Pour une pluie de 120 min cela signifie que la pointe d'intensité se situe au temps de pointe t_p suivant (mesurée depuis le début de la pluie) : $t_p = 120 \times r = 60$ min.

On peut à partir de ce temps en choisissant un pas de 10 min.

Etape 2 : Calcul des temps relatifs t_a et t_b en prenant comme nouvelle origine des temps t_p .

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

Etape 3 : Calcul des intensités instantanées i_a et i_b relatives aux temps t_a et t_b et d'après les équations (4-5) et (4-6).

Etape 4 : Calcul des intensités moyennes sur les intervalles de temps et construction d'un hyétogramme.

Les intensités obtenues sont des intensités instantanées. Il est alors possible de calculer la lame précipitée sur chaque intervalle en faisant le produit de l'intensité moyenne calculée sur deux intervalles successifs par la durée de cet intervalle. On obtient ainsi des incréments de pluie pour chaque intervalle en mm.

IV.5.2.3 Construction de la pluie de projet à partir de la méthode « Pluie De Type Composite»

La particularité fondamentale de l'averse composite est que les intensités maximales moyennes sur n'importe quelle durée sont identiques à celles lues sur la courbe IDF pour la même durée. On commencera donc par déterminer une durée totale de l'averse afin de pouvoir construire le hyétogramme. L'averse composite ainsi obtenue présente un hyétogramme décroissant dans le temps. Cette forme peu fréquente peut être "réarrangée"; par exemple en situant la pointe d'intensité au centre et les intensités décroissantes placées alternativement avant et après la pointe.

Etape 1 : Choix d'une durée de la pluie totale $n\Delta t$, d'un intervalle de temps Δt , et d'un temps de retour T. on choisit :

$$\Delta t = 1 \text{ heure ; } n\Delta t = 10 \text{ heures}$$

Etape 2 : Calcul des intensités moyennes maximales correspondant à des durées de 1 à 10 heures, selon la formule (Talbot)

Etape 3 : Calcul des lames précipitées cumulées (en mm) durant 1, 2... 10 heures en multipliant les intensités des précipitations (en mm/h) par la durée de pluie (en h) correspondante.

Etape 4 : Calcul des incréments de pluie pour chaque pas de temps à partir de la pluie cumulée. En soustrayant deux valeurs successives de pluie cumulée, on obtient la lame effectivement précipitée durant le pas de temps (en mm).

Etape 5 : Calcul des intensités "composites" (en mm/h) pour chaque intervalle de temps en divisant la lame précipitée (en mm) sur le pas de temps par la durée de ce dernier

Etape 6 : Réarrangement du hyétogramme obtenu. La structure temporelle de cette pluie peut être modifiée pour avoir une structure plus réaliste. L'analyse des structures d'averses « longues » montre que l'intensité maximale se situe généralement près de la moitié de l'averse

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

Tableau IV-40 : Pluie de projet de la station 021421

Station Baraki 021421						
Période de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
méthode Desbordes	105.83	140.38	162.796	183.91	211.21	231.263
méthode composite	127.955	169.729	196.832	222.359	255.367	279.612
méthode Chicago	63.9	84.762	98.297	111.045	127.529	139.637

Tableau IV-41 : Pluie de projet de la station 020509

Station 020509						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
méthode Desbordes	20.4465	49.355	78.2638	114.6056	176.4793	234.1866
méthode composite	32.8589	79.3167	125.7751	184.1787	283.6139	376.3534
méthode Chicago	9.7651	23.5717	37.3784	54.735	84.2855	111.8462

Tableau IV-42 : Pluie de projet de la station 020602

Station 020602						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
méthode Desbordes	64.4859	89.436	106.1693	122.2676	143.5158	259.4056
méthode composite	77.139	106.9848	127.0014	146.2583	171.6758	290.6835
méthode Chicago	40.1402	55.6708	66.0867	102.1073	189.3336	199.2244

Tableau IV-43 : Pluie de projet de la station 020511

Station 020511						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
méthode Desbordes	62.733	151.3824	240.2652	351.4175	541.0613	717.9138
méthode composite	44.3905	107.1198	170.0142	248.6667	382.8607	508.0033
méthode Chicago	24.5765	59.3061	94.1272	137.6726	211.9681	281.2524

Tableau IV-44 : Pluie de projet de la station Pr 6 EC EARTH 2046-2065

Pr 6 EC EARTH 2046-2065						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
méthode Desbordes	56.4283	134.7514	212.6994	309.6974	474.3893	627.3386
méthode composite	39.9293	95.3515	150.5083	219.1451	335.6828	443.9114
méthode Chicago	22.1066	52.7907	83.3279	121.3282	185.8484	245.7684

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

Tableau IV-45 : Pluie de projet de la station Pr 6 EC EARTH 2081-2100

Pr 6 EC EARTH 2081-2100						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
méthode Desbordes	53.1261	129.3841	206.3435	303.0032	468.6264	623.6412
méthode composite	37.5926	91.5536	146.0108	214.4082	331.605	441.295
méthode Chicago	20.8129	50.688	80.8379	118.7056	183.5907	244.3199

Tableau IV-46 : Pluie de projet de la station Pr 6 ESM2M 2046-2065

Pr 6 ESM2M 2046-2065						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
méthode Desbordes	66.2951	156.9684	246.6619	357.8277	545.8281	719.8356
méthode composite	46.9111	111.0725	174.5405	253.2026	386.2336	509.3632
méthode Chicago	25.972	61.4945	96.6331	140.1838	213.8355	282.0053

Tableau IV-47 : Pluie de projet de la station Pr 6 ESM2M 2081-2100

Pr 6 ESM2M 2081-2100						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
méthode Desbordes	57.6837	138.6146	219.517	320.4893	492.4286	652.5047
méthode composite	40.8176	98.0851	155.3325	226.7816	348.4477	461.7192
méthode Chicago	22.5984	54.3041	85.9988	125.556	192.9156	255.6275

Tableau IV-48 : Pluie de projet de la station Pr 7 EC EARTH 2046-2065

Pr 7 EC EARTH 2046-2065						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
méthode Desbordes	60.9994	146.0029	230.7378	336.296	515.7139	682.491
méthode composite	43.1638	103.3132	163.2725	237.9666	364.9245	482.9378
méthode Chicago	23.8973	57.1986	90.3947	131.7485	202.0379	267.3751

Tableau IV-49 : Pluie de projet de la station Pr 7 EC EARTH 2081-2100

Pr 7 EC EARTH 2081-2100						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
méthode Desbordes	64.5745	155.5046	246.5404	360.2742	554.1361	734.7745
méthode composite	45.6936	110.0367	174.4546	254.9338	392.1125	519.9341
méthode Chicago	25.2979	60.921	96.5855	141.1423	217.0903	287.8579

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

Tableau IV-50 : Pluie de projet de la station Pr 7 GFDL 2046-2065

Pr 7 GFDL 2046-2065						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
méthode Desbordes	69.0953	164.8521	260.0895	378.5523	579.6049	766.2561
méthode composite	48.8925	116.651	184.0421	267.8675	410.1345	542.2108
méthode Chicago	27.069	64.583	101.8936	148.303	227.068	300.1912

Tableau IV-51: Pluie de projet de la station Pr 7 GFDL 2081-2100

Pr 7 GFDL 2081-2100						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
méthode Desbordes	55.8714	136.6791	218.4885	321.4562	498.2546	664.0211
méthode composite	39.5352	96.7156	154.6048	227.4658	352.5702	469.8683
méthode Chicago	21.8884	53.5459	85.5958	125.9348	195.198	260.1392

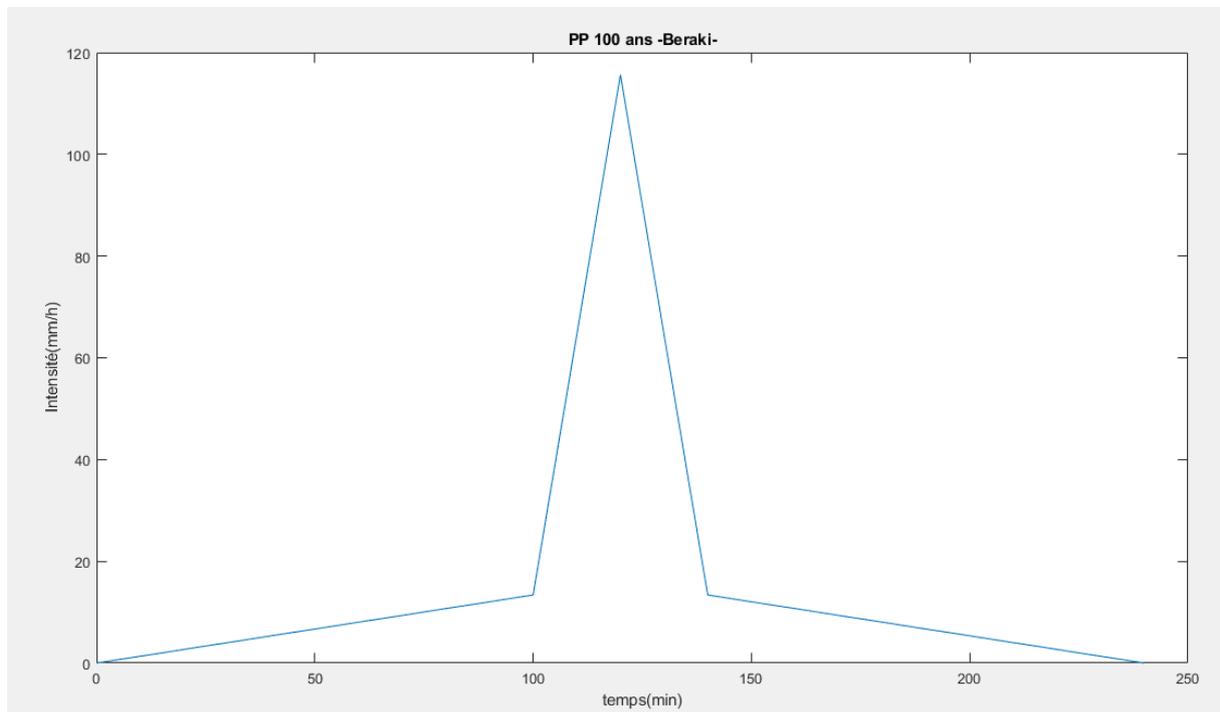


Figure IV-26 : Pluie de projet BARAKI (100 ans) double triangle

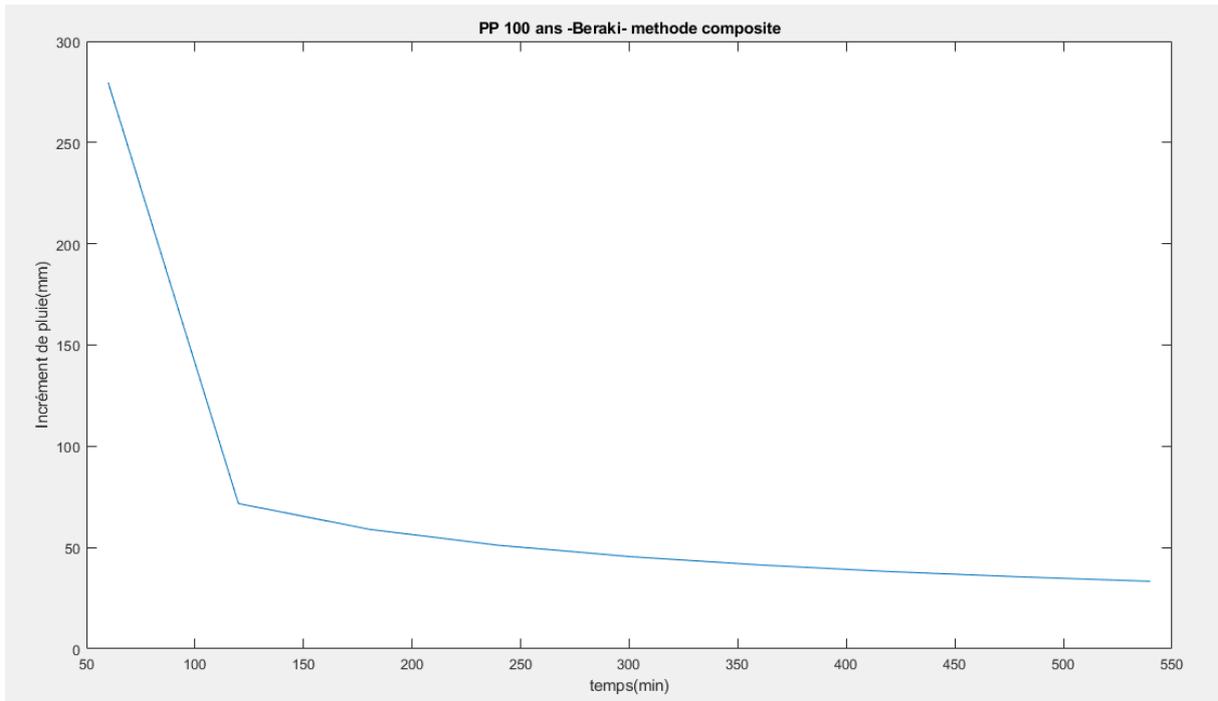


Figure IV-27 : Pluie de projet BARAKI (100 ans) composite

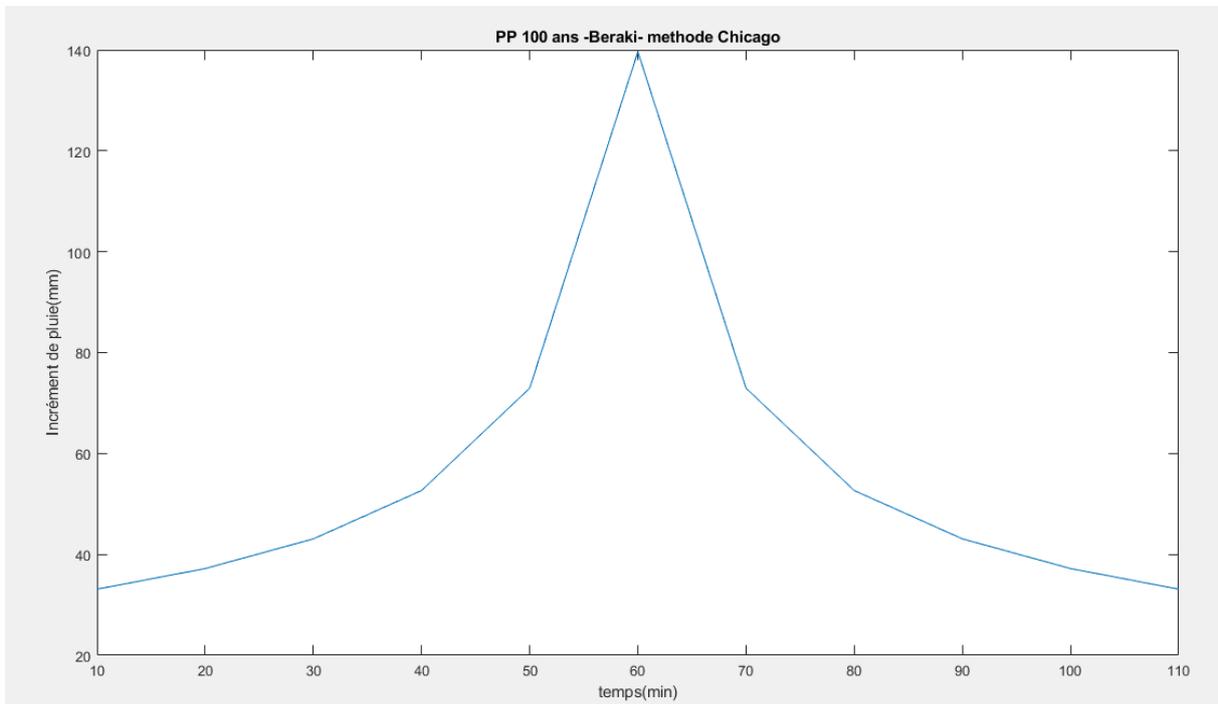


Figure IV-28 : Pluie de projet BARAKI (100 ans) Chicago

IV.6 Discussion et comparaison des résultats

Les courbes IDF entre stations pluviométriques pour toutes les périodes de retour, un peu de tendance sont discernables la même chose est valable pour les donnée RICCAR.

Chapitre IV : Etablissement des courbe IDF et des pluies de projet

Premièrement, les intensités des précipitations pour les ensembles de données station pluviométrique ont été systématiquement inférieures aux intensités correspondantes aux données RICCAR. Quelques exceptions à cette tendance ont été observées à la station Mahelma. Pour les périodes de retour de 2 ans et de 100 ans.

La convergence a été moins prononcée pour le centenaire période de retour par rapport à la période de retour de 2 ans. Une deuxième tendance observable était que les intensités des précipitations pour les conditions futures étaient systématiquement plus élevées qu'historiques conditions pour une résolution spatiale donnée (grille ou station). A la station de Mahelma les intensités pluviométriques historiques étaient plus élevées que certain intensités futures pour future station et comparable avec d'autre même ordre de grandeur.

La dernière tendance générale observée dans le Les courbes IDF étaient une convergence dans les différentes courbes IDF pour une station donnée à mesure que la durée de la tempête augmente. Généralement, les variations entre la station et les sources de données maillées les plus se rapportent probablement aux incertitudes associées aux échelles du modèle alors que les variations entre les scénarios historiques et futurs sont plus probablement liés à l'influence du climat projeté,

Cette comparaison reste valable pour les pluies de projets en faite c'est une fin inévitable ou attendue car les valeurs d'intensité implique directement les résultats obtenue des grands nombre de valeurs extrêmes d'intensité qui ont été observée a mis l'accent sur les changements potentiels dans les conditions météorologiques extrêmes en raison du climat.

Les résultats obtenue par les deux méthodes d'estimation des pluies de projets double triangle et composite sont proche l'un de l'autre; Concernant la méthode qui donne les plus grandes estimations des pluies de projets c'est la méthode de Desbordes (type double triangle) globalement, sauf pour les trois stations pluviométriques « Baraki, Bir Mourad Rais et Hamiz Barrage » la méthode qui donne la plus grandes estimation c'est la méthode composite.

A propos de la méthode de Kiefer et Chu c'est la méthode qui donne les plus modestes valeurs.

IV.7 Conclusion

Les courbes IDF pour les scénarios de changement climatique (intensité des précipitations) et les données historiques sont comparées, La différence relative entre les courbes est déterminée. Les résultats de la comparaison indiquent que la magnitude des précipitations augmentera sous le climat changé pour toutes les durées et périodes de retour. Les résultats de l'étude indiquent que :

- 1) La magnitude des précipitations sera différente à l'avenir,
- 2) Le scénario révèle une augmentation significative de l'intensité des précipitations pour une plage des durées et des périodes de retour
- 3) l'augmentation de l'intensité et de la magnitude des précipitations peut avoir des implications façons dont l'infrastructure municipale actuelle (et future) de gestion de l'eau est conçu, exploité et entretenu.

*Chapitre V: Évaluation des risques
d'ingénierie sur les ouvrages
hydrauliques sous les effets du
changement climatique*

Chapitre V : Évaluation des risques d'ingénierie sur les ouvrages hydrauliques sous les effets du changement climatique

V.1 Introduction :

En général, les modèles climatiques prédisent l'évolution spatiale et temporelle de l'augmentation ou la diminution des précipitations dans différentes parties du monde.

Bien que le changement climatique ait un effet direct sur le cycle hydrologique, les précipitations sont la principale source d'approvisionnement en eau (eaux de surface et souterraines), et en conséquence, les ouvrages hydrauliques existants doivent être gérés et de nouveaux prévus en tenant compte des effets du changement climatique.

À mesure que le climat d'une région se réchauffe, le niveau des chutes de neige diminue, et à son tour, le stockage naturel de l'eau est réduit avec la diminution de la couverture neigeuse, en particulier à haute altitude et dans les régions polaires, où les débits de surface diminuent en fin du printemps et début de l'été. Cela aura un effet direct très significatif sur la collecte des ressources en eau locales et régionales et les systèmes de distribution. Par exemple, en amont de l'Euphrate-Tigre, des chutes de neige ont été observées avec fréquence décroissante au cours des deux dernières décennies et, par conséquent, les débits des rivières sont sur une tendance à la baisse (Şen et al. 2010). Avec plus d'un sixième de la population mondiale dépend des glaciers et des accumulations de neige saisonnières pour leur approvisionnement en eau, les conséquences de ces changements hydrologiques pour la disponibilité future de l'eau, prédits avec une grande confiance et déjà diagnostiqués dans certaines régions, sont susceptibles d'être sévères (Barnett et al. 2005).

Pour les applications pratiques, il est essentiel de pouvoir fournir une simple formulation des risques de l'impact du changement climatique. Le calcul de telles équations de risque est une approche pratique pour traiter l'adaptation au changement climatique de l'ingénierie des structures hydraulique. Si une gamme d'impacts est liée à la température moyenne mondiale et surtout à l'effet de sa tendance alors cela peut impliquer l'adaptation et l'atténuation d'incertitudes.

Rahmstorf et al. (2007) et Füssel (2009) ont déclaré que si des mesures d'atténuation sont attendues, il n'est peut-être pas nécessaire de planifier des adaptations pour les projections les plus élevées de changement climatique sur le long terme. Même si, à court terme, avant que les politiques d'atténuation puissent entrer en vigueur, il semble prudent d'adopter des mesures d'adaptation, d'autant plus que de nombreuses variables suivent au niveau ou au-dessus du niveau des projections intergouvernemental du Groupe d'experts sur l'évolution du climat (GIEC).

V.2 Changement climatique et ressources en eau

L'augmentation de la température moyenne de la Terre est considérée être la preuve du changement climatique. Cependant, le changement climatique ne se concentre pas seulement sur l'augmentation de la température, mais aussi sur changements dans les précipitations, l'évaporation, la vitesse et la direction du vent, au niveau de la mer, et dans les extrêmes, les intensités, les fréquences de périodes sèches et humides.

Chapitre V : Évaluation des risques d'ingénierie sur les ouvrages hydrauliques sous les effets du changement climatique

Ces manifestations du climat le changement attirent davantage l'attention, car ils concernent directement des enjeux humains importants tels que les ressources en eau, la sécurité alimentaire, et la foresterie. La figure 5-1 reflète la température globale anomalies des 114 dernières années.

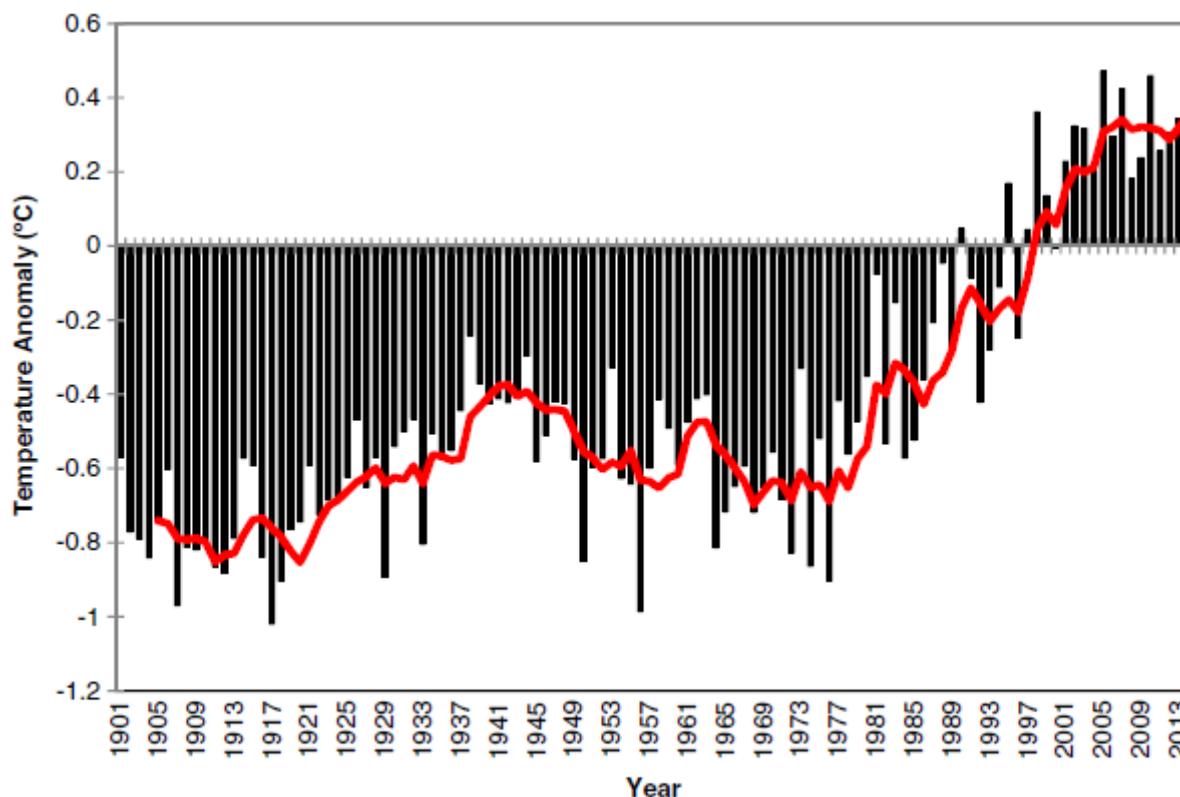


Figure V-1 : Température moyenne d'air (°C) obtenue de la research climate unit (CRU) série chronologique mensuelle pour la période de 1901 à 2014. L'anomalie est calculée avec par rapport à la période de base 1981-2010 et filtres en trait plein (rouge) 5 ans moyenne mobile.

- Les taux d'évapotranspiration (ET) sont appelés à augmenter le long avec l'augmentation de la température et donc entraîner des réductions de l'humidité du sol, l'infiltration et la reconstitution de l'aquifère.
- Le changement de ruissellement de surface dépend des températures et les variabilités des précipitations.

Tableau V-1 : Caractéristiques des séries de données

Nom de station	Code de station	Durée d'enregistrement	Moyenne arithmétique	Ecart type
Bir Mourad Rais	020509	1986-2013	50.8532	24.4421
Mahelma Ferme	020511	1971-2012	59.5061	16.0477
Hamiz Barrage	020602	1907-2012	64.7484	32.1767
Baraki	021421	1973-2014	51.6113	17.2626

Chapitre V : Évaluation des risques d'ingénierie sur les ouvrages hydrauliques sous les effets du changement climatique

V.3 Précipitations maximales probables (PMP)

La procédure de calcul du PMP se trouve dans le manuel WHO (WOM 2009) prévoyait que la longueur de la série de données (plus de 15 ans) sont disponibles. La base du PMP statistique et la méthodologie de calcul est présentée par des considérations de l'équation de fréquence de Hershfield (1965). En général, le PMP est une fonction des précipitations maximales quotidiennes annuelles, moyenne arithmétique, \bar{X} ; et l'écart type, S_x , de séries temporelles de précipitations maximales quotidiennes disponibles (ADMR) par un facteur de l'écart type .

$$PMP = \bar{X} + K_m S_x \quad \text{V-1}$$

K_m est appelé « facteur de fréquence » et il implique une fraction des écarts types autour de la moyenne arithmétique pour atteindre la plus grande précipitation possible valeur au sein d'une série. Si le nombre d'enregistrements ADMR est n, alors l'exclusion du maximum conduit à des série de précipitations quotidiennes maximales de longueur (n – 1) et nouvelle moyenne et des valeurs d'écart type similaires à l'Eq. (V.1).

$$R_{max} = \bar{X}_{n-1} + K_m S_{x(n-1)} \quad \text{V-2}$$

On peut calculer les facteurs de fréquence par la formule suivante :

$$K_m = \frac{R_{max} - \bar{X}_{n-1}}{S_{x(n-1)}} \quad \text{V-3}$$

Tableau V-2 : Valeurs numériques PMP

Station	Période	Paramètre globale		Paramètre maximale		Facteur de fréquence	PMP	
		moyenne	Ecart type	moyenne	Ecart type		historique	Changement climatique
021421	86-13	19.3137	17.4462	53.0950	18.8286	3.4633	79.7350	118.3039
020509	71-12	21.1854	19.6413	61.7050	19.8138	3.1164	82.3951	123.4523
020602	07-12	20.7521	20.6890	61.2400	25.3897	2.1832	65.9199	116.6702
020511	73-14	17.8529	16.9426	51.8550	16.5862	2.0868	53.2087	86.4671

L'application de l'équation. (V.3) avec la moyenne arithmétique et les valeurs d'écart-type dans les colonnes 5 et 6 donnent les valeurs du facteur de fréquence dans la colonne 7. Le tableau V.1 indique également que les valeurs des facteurs de fréquence varient entre 2,08 et 3.46.

D'autre part, on peut observer à partir du même tableau PMP le plus grand (123 mm) à la station 020509.

Chapitre V : Évaluation des risques d'ingénierie sur les ouvrages hydrauliques sous les effets du changement climatique

Afin de voir à quel point les données quotidiennes (réelles) enregistrées sont proches les précipitations maximales correspondent aux valeurs PMP calculées, le facteur d'efficacité, E , est défini comme le rapport de la précipitation maximale quotidienne, R_{max} , au passé et à la précipitation maximale probable PMP calculé.

$$E = \frac{PMP}{R_{max}} \quad \text{V-4}$$

Tableau V-3 : Efficacité des précipitations

	Station			
	021421	020509	020602	020511
Rmax	102.9000	125	109.6000	86.300
PMP (his)	79.7350	82.3951	65.9199	53.2087
PMP (cc)	118.3039	123.4523	116.6702	86.4671
E (his)	0.775	0.659	0.601	0.617
E (cc)	1.15	0.988	1.065	1.002

V.4 Évaluation des risques techniques modifiée en raison du changement climatique

En général, le risque est défini comme la probabilité de survenance de un événement extrême de durée déterminée. Parmi les changements climatiques les événements extrêmes sont la sécheresse ou les inondations qui sont très important pour la conception, la planification, l'exploitation et la maintenance des ouvrages hydraulique.

Dans la définition du risque, il y a deux éléments importants qui impliquent des quantités. Les extrêmes ce sont des événements qui se produisent sur diverses durées, Un événement devient extrême une fois qu'il dépasse un certain niveau. Par exemple, on peut considérer une valeur de précipitation extrême comme une valeur attendue être plus que celles qui se sont produites jusqu'à présent.

Par conséquent, si l'enregistrement de la quantité maximale de précipitations dans une zone est de 85 mm, les quantités dépassant ce niveau seront signalées comme événements extrêmes. Par conséquent, on s'attend que la nature continue à de battre ses records, car on ne sait pas ce que l'absolu les précipitations maximales à n'importe quel endroit du monde pourraient être. Comme les neuf records sont battus, le dernier événement survenu prolonge la durée de ce qui est qualifié d'extrême.

Si les enregistrements sont pour le dernier, disons, 35 ans, puis le temps spécifié attaché au nouvel extrême événement est de 35 ans. Cela implique que lorsque le nouveau record est battu, la nouvelle durée est établie.

Chapitre V : Évaluation des risques d'ingénierie sur les ouvrages hydrauliques sous les effets du changement climatique

Des arguments similaires sont valables pour tout élément du cycle hydrologique, que ce soit l'évaporation, le ruissellement évapotranspiration, etc. Dans toutes ces explications, il n'y a pas ouvrage d'art influençant les quantités de précipitations ou de ruissellement.

Un risque acceptable est un niveau de blessure ou de perte résultant d'une catastrophe ou situation considérée comme tolérable par une société ou une autorité compte tenu des analyses coûts-bénéfices sociales, politiques et économiques. Dans toute étude incertaine, il n'existe pas de solution absolue et sans erreur. Par conséquent, un niveau de vulnérabilité est considéré comme acceptable et doit être mis en balance avec des facteurs tels que le coût, l'équité, la contribution du public et la probabilité de sécheresse (Şen 2015).

Dans le cas d'un ouvrage d'art tel qu'un barrage, la capacité du barrage est liée à la mesure des événements extrêmes et la définition du risque. Le risque est défini comme le dépassement unique du barrage pendant sa durée de vie économique qui nuira à sa stabilité ou causer des dommages. Ceci n'est pas seulement lié aux précipitations ou au ruissellement, mais à d'autres facteurs effectifs du barrage qui doivent être pris en compte considération, par exemple, la vitesse de sédimentation.

Le changement du Climat entraînera une sous-performance ou une surperformance de certains barrages en fonction de son effet sur la région. En général, pour le calcul du risque des formulations pratiques sont développées. Logiquement, puisque le risque simple et classique, r , sans prendre le climat changement en considération, est égal à la probabilité d'occurrence de l'événement dangereux, P , une seule fois pendant toute la existence de la structure, R , sa définition notationnelle est donnée par (Benjamin et Cornell 1970).

$$r = \frac{1}{R} \quad \text{V-5}$$

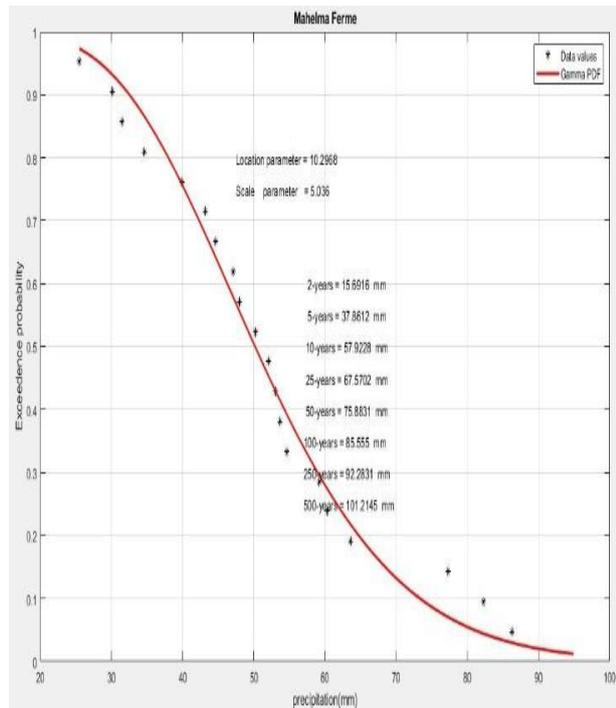
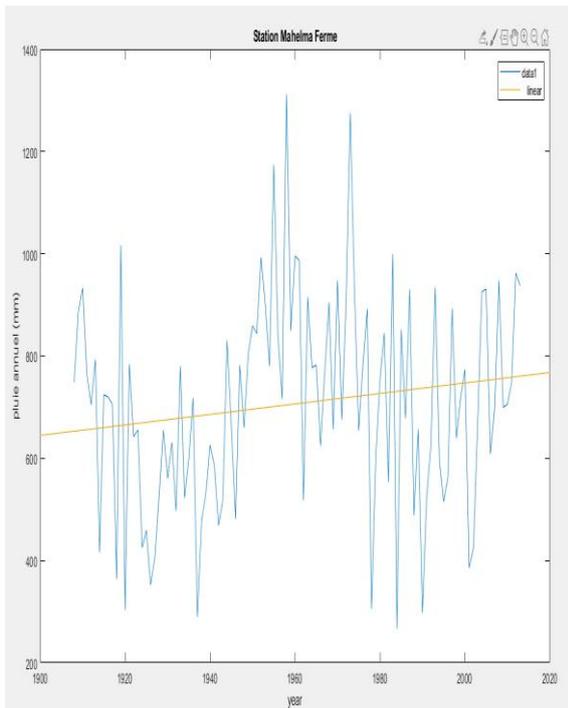
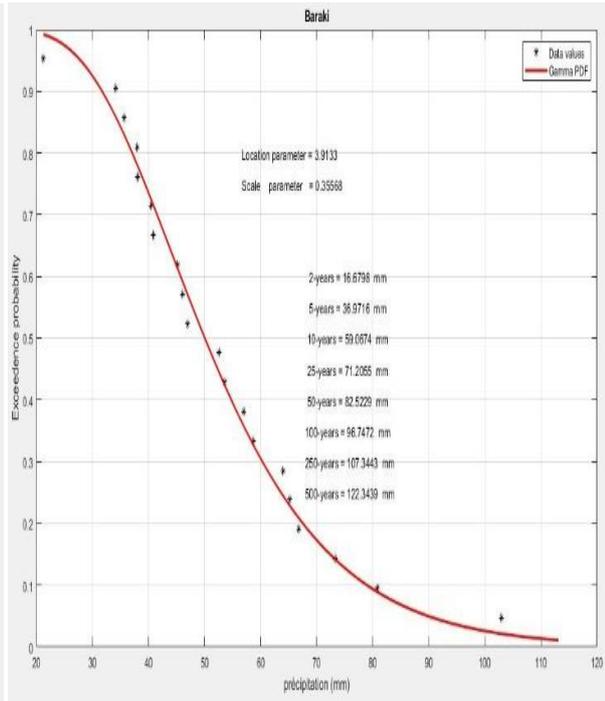
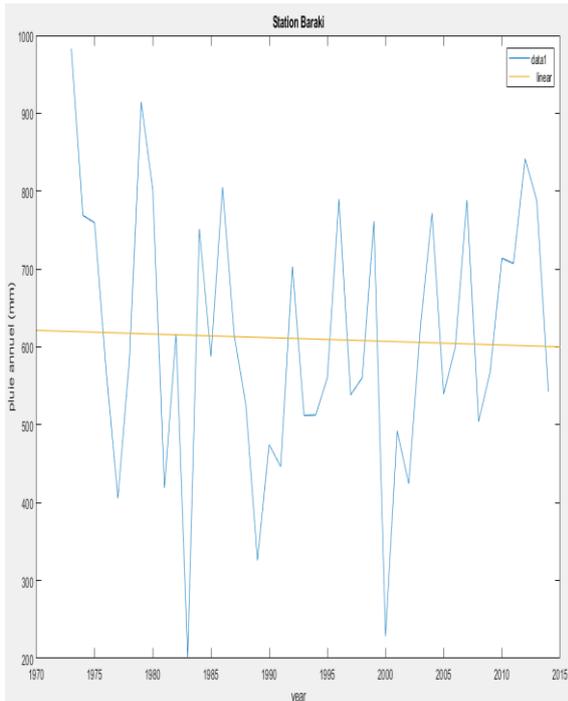
Dans cette expression, l'effet du changement climatique n'est pas pris en considération. La déduction logique et rationnelle rend cette expression sous la forme suivante.

$$C_R = \frac{1+\alpha}{R} \quad \text{V-6}$$

Ici, C_R est le simple risque sous l'impact du changement climatique et α est un facteur de changement climatique qui reflète l'effet changement climatique. S'il n'y a pas d'attente de changement climatique, alors $\alpha = 0$; sinon, pourrait prendre des valeurs positives ou négatives.

Le facteur climatique est équivalent à la pente de la composante tendancielle dans la série chronologique hydrométéorologique. S'il n'y a pas tendance, alors il n'y a pas d'effet de changement climatique. Cependant, en augmentant et les cas de tendance décroissante, prend des valeurs positives et négatives valeur, respectivement. Basé sur l'éq. (V-6), les risques sont plus prononcés dans le cas d'un cas sec (tendance à la baisse) que le en augmentant un. Ceci est logique car en cas de baisse tendance, bien que le niveau de risque diminue mais que la demande sur quantité d'eau et, par conséquent, les ouvrages d'art deviennent plus prononcé.

Chapitre V : Évaluation des risques d'ingénierie sur les ouvrages hydrauliques sous les effets du changement climatique



Chapitre V : Évaluation des risques d'ingénierie sur les ouvrages hydrauliques sous les effets du changement climatique

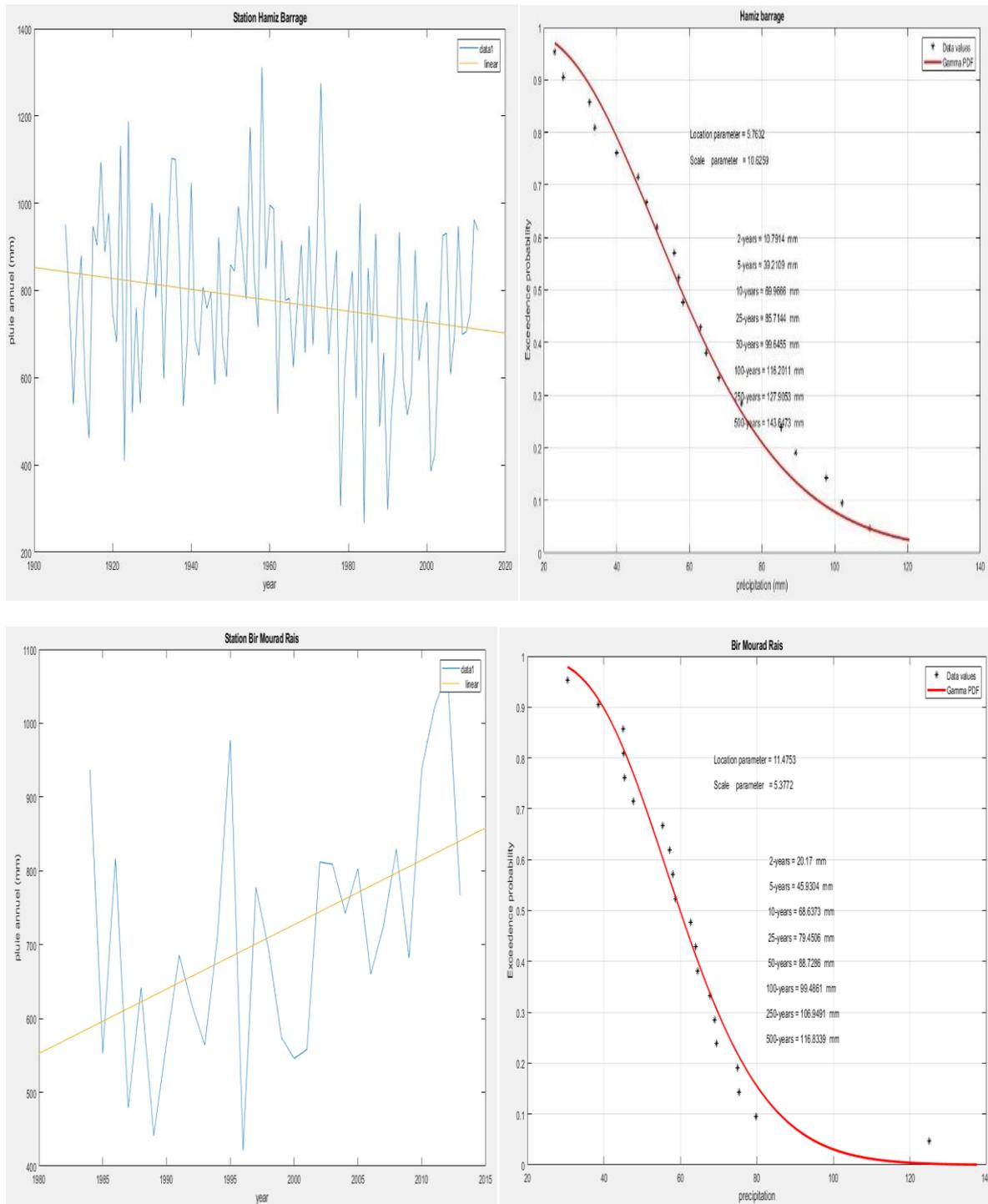


Figure V-2 : Tendence des stations météorologiques et graphes PDF

Chapitre V : Évaluation des risques d'ingénierie sur les ouvrages hydrauliques sous les effets du changement climatique

La série chronologique pour chaque station avec la composante de tendance et fonction de distribution cumulative (CDF) correspondante pour calculs de probabilité de dépassement inversion (calcul de quantité de précipitations pour un niveau de probabilité donné) Le tableau (V-3) présente l'effet du changement climatique sur la relevés de précipitations à chaque station météorologique et les statistiques pour la situation normale (sans l' effet changement climatique) pour des périodes de retour de 10 ans, 50 ans et 100 ans.

La comparaison entre le changement climatique et les cas normaux est donnée quantitativement par les pourcentages d'erreur relative en utilisant l'équation. (V-6). L'erreur relative, β , est calculée en prenant en compte valeurs de considération pour les niveaux de précipitations sous les effets du changement climatique, CP, et sans effet du changement climatique, P, selon l'expression suivante.

$$\beta(\%) = \frac{C_p - P}{C_p} * 100 \quad \text{V-7}$$

Tableau V-4 : Caractéristiques des précipitations ayant un impact sur le climat

Station						
période	Effet climatique		Mahelma	Baraki	Bir Mourad Rais	Hamiz
	Facteur de changement climatique α		0.19	-0.47	0.7	-0.3
10 ans	Risque, Cr		0.081	0.147	0.03	0.13
	précipitation (mm)	historique	15.2571	24.6057	27.6482	30.4416
		Changement climatique	57.9228	59.0674	68.6373	69.9666
	erreur relative (%) β		73.6596	58.3430	59.7184	56.4912
50 ans	Risque, Cr		0.0162	0.0294	0.006	0.026
	précipitation (mm)	historique	50.2338	49.1452	55.7213	58.762
		Changement climatique	75.8831	82.5229	88.7286	99.6455
	erreur relative (%) β		33.8011	40.4466	37.2003	41.0289
100 ans	Risque, Cr		0.0081	0.0147	0.003	0.013
	précipitation (mm)	historique	69.8205	67.9929	73.1081	75.81
		Changement climatique	85.555	96.7472	99.4861	116.2011
	erreur relative (%) β		18.3911	29.7211	26.5143	34.7596

En prenant en considération le niveau de risque lié au changement climatique calculs à partir de l'éq. (V-6), on peut calculer les périodes de retour selon la formulation standard de l'éq. (V-5) comme s'il y avait aucun impact sur le changement climatique. Ainsi, il est possible d'estimer la l'impact du changement climatique sur des périodes de retour plus longues que les calculs traditionnels. Les pourcentages d'erreur relative sont calculés de même que pour l'éq. (V-7) comme,

$$\gamma = 100 * \frac{C_R - R}{C_r} \quad \text{V-8}$$

Où CR et R ont été définis précédemment comme les périodes de retour avec et sans impact sur le changement climatique, respectivement.

Chapitre V : Évaluation des risques d'ingénierie sur les ouvrages hydrauliques sous les effets du changement climatique

Tableau V-5 : Comparaison des périodes de retour

période	Station				
		Baraki	Bir Mourad Rais	Hamiz	Mahelma
10 ans	CR	0.081	0.147	0.03	0.13
	période de retour du changement climatique	12.34567901	6.80272109	33.3333333	7.69230769
	Différence	2.345679012	-3.19727891	23.3333333	-2.30769231
	erreur relative	19	-47	70	-30
50 ans	CR	0.0162	0.0294	0.006	0.026
	période de retour du changement climatique	61.72839506	34.0136054	166.666667	38.4615385
	Différence	11.72839506	-15.9863946	116.666667	-11.5384615
	erreur relative	19	-47	70	-30
100 ans	CR	0.0081	0.0147	0.003	0.013
	période de retour du changement climatique	123.4567901	68.0272109	333.333333	76.9230769
	Différence	23.45679012	-31.9727891	233.333333	-23.0769231
	erreur relative	19	-47	70	-30

Une inspection attentive de ce tableau indique que les périodes de retour des impacts du changement climatique sont plus longues à Baraki et Hamiz qu'à Bir Mourad Rais et Mahelma. Ce détail indique que l'impact du changement climatique devrait être plus prononcé et intense à Baraki et Hamiz qu'à Bir Mourad Rais et Mahelma.

Du point de vue de l'ingénierie, des périodes de retour plus long doivent être considérées dans la planification de la structure hydraulique en raison des impacts du changement climatique que dans le cas comme d'habitude (sans impact sur le changement climatique). Cela implique que les coûts de construction seront plus élevés, ce qui crée un fardeau économique supplémentaire résultant du changement climatique.

L'emplacement de Bir Mourad Rais et Mahelma montre un caractère distinctif différence, car, au lieu de périodes de retour plus longues, les périodes sont dominantes (tableau 5-4). Cela indique qu'à l'avenir, des ouvrages d'art moins coûteux peuvent être nécessaires à ce lieu. De plus, les structures actuelles devraient mieux performer dans les périodes futures.

Chapitre V : Évaluation des risques d'ingénierie sur les ouvrages hydrauliques sous les effets du changement climatique

V.5 Conclusion

L'augmentation de la température dans la basse troposphère due au changement climatique concerne plusieurs éléments du régime du cycle hydrologique.

Une grande partie de la littérature s'intéresse à l'impact de changement climatique sur ces éléments hydrologiques en termes de tendances à la hausse ou à la baisse, mais peu intègrent la façon dont ces effets impactent sur la performance des ouvrages hydrauliques.

Le concept le plus important de tout système de conception de ressources en eau est le risque associé aux conditions hydrométéorologiques des événements. Dans ce chapitre, la formulation des risques telle que présentée dans la littérature est modifiée pour tenir compte des effets du changement climatique. A cet effet, un facteur de changement climatique est importé dans la formulation liée à la pente de tendance dans les données historiques.

La méthodologie est appliquée au bilan annuel des précipitations pour quatre stations météorologiques. Les risques associés au rendement des périodes de 10 ans, 50 ans et 100 ans sont calculés pour chaque station. De plus, la relation entre le niveau de risque et la période de retour (la durée de vie la structure particulière d'ingénierie de l'eau) pour différents facteurs du changement climatique est fournie. Il est recommandé que la simple formulation des risques pour le changement climatique soit incorporée dans l'application pratique d'ingénierie. Cela garantit qu'une certaine incertitude dans les procédures d'adaptation et d'atténuation seront prises en considération, et par conséquent, la conception finale sera plus protégée contre les futurs impacts climatiques. La même procédure peut être appliquée en utilisant le modèle climatique projeté scénarios pour le climat futur, qui seront utiles dans la planification à long terme.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Ce projet de fin d'études nous a permis de manipuler les résultats de mesures des stations pluviométriques de l'ANRH afin de détecter et corriger les erreurs dans la chaîne de traitement des mesures ainsi que l'affectation de la correction de biais des données RICCAR.

Afin de pouvoir utiliser les données historiques et futures, nous avons développé un programme sous Matlab pour collecter et corriger ces données. Celui-ci nous permettra de déterminer l'intensité moyenne maximale à différents pas de temps pour construire et simuler la courbe IDF.

- ❖ L'indépendance, stationnarité et homogénéité des séries étudiées
- ❖ Test d'adéquation (*Test du χ^2 de Pearson*).
- ❖ Test d'ajustement (Lois de Gumbel et GEV)

Après avoir déterminé les quantiles pour chaque période de retour et pour chacune des durées. A travers les résultats obtenus nous avons pu déterminer les exposants climatique a et b de Montana et Talbot à l'aide de la méthode des moindres carrés.

Finalement ce programme nous a permis de déterminer les pluies de projets par les trois méthodes mentionnées dans le chapitre 4.

Après avoir analysé les résultats des courbes IDF et des pluies de projet, nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

- ❖ Accroissement intensités/fréquences des pluies intense ainsi que les pluies de projets.
- ❖ Mise à jour des courbes IDF en climat historique.
- ❖ Accroissement des maxima annuels des données futures.

Les résultats obtenus sont une affirmation des résultats extraits du 5^{ème} et dernier chapitre qui concerne les risques encourus aux ouvrages hydrauliques dû au changement climatique et l'augmentation de la période de retour, qui nous oblige à s'adapter à ces conditions et à adopter de nouvelles stratégies.

Recommandation

- Utiliser les courbes IDF historiques pour les ouvrages de petite durée de vie.
- Malheureusement, de nombreuses directives qualitatives sont manquantes dans notre compréhension des effets du changement climatique sur les structures du système de ressources en eau telles que les barrages et les puits. Dans de nombreux cas, les eaux de crue ne sont pas utilisées de manière bénéfique, en particulier dans les pays développés. Cependant, dans certaines zones des régions arides, comme l'Arabie saoudite, les eaux de crue sont retenues dans de petits réservoirs de surface et, à l'aide d'un ensemble de puits d'injection derrière le réservoir, l'eau retenue est transférée vers l'aquifère non confinée, généralement de type libre. C'est l'un des moyens de mettre les eaux de crue ou de crue éclair à des fins bénéfiques utilisées comme sources de recharge des eaux souterraines pour les zones arides et semi-arides. En outre, l'eau de pluie et le ruissellement peuvent être récupérés pour être utilisés plus tard au cours de la période déficitaire, comme l'a montré une étude de cas pour le bassin de l'oued Hanifa dans la province centrale de l'Arabie saoudite (Şen et al. 2011).

Bibliographie

- (1) Morita, M. (2011). «Quantification of increased flood risk due to global climate change for urban river management planning». *water science & technology*
- (2) Ramesh, S. Teegavarapu, V. (2012) «Floods in a Changing Climate Extreme precipitation». (International hydrology series). Cambridge University Press, New York. 294 pages
- (3) P. P. Mujumdar and D. Nagesh Kumar. (2012). «Floods in a Changing Climate hydrologic modeling». (International hydrology series). United Kingdom at the University Press, Cambridge. 210 pages.
- (4) Giuliano Di Baldassarre. (2012). «Floods in a Changing Climate inundation Modelling». (International hydrology series). United Kingdom at the University Press, Cambridge. 122 pages
- (5) Slobodan P. Simonović. (2012). «Floods in a Changing Climate Risk Management». (International hydrology series). United Kingdom at the University Press, Cambridge. 206 pages.
- (6) Patrick Willems, Jonas Olsson, Karsten Arnbjerg-Nielsen, Simon Beecham, Assela Pathirana, Ida Bülow Gregersen, Henrik Madsen and Van-Thanh-Van Nguyen. (2012). «Impacts of Climate Change on Rainfall Extremes and Urban Drainage Systems». International water association. 238 pages.
- (7) P. Willems. (2000). «Compound intensity/duration/frequency-relationships of extreme precipitation for two seasons and two storm types». *Journal of Hydrology* 233 (2000) 189-205
- (8) JULIA AYOMBO NDOMBET. (2015) . «GESTION DES EAUX PLUVIALES EN ZONES CÔTIÈRES DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES». MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL. 118 pages
- (9) Alain Mailhot, Gérémy Panthou, Guillaume Talbot. (2014). «Recommandations sur les majorations à considérer pour les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) aux horizons 2040-2070 et 2070-2100 pour l'ensemble du Québec PHASE II». Rapport de recherche R1515. 36 pages
- (10) Alain Mailhot . Guillaume Talbot. Daniel Caya. Sbastien Biner. (2011). « Courbes intensité durée fréquence (IDF) en climat historique et futur ». ISRS université d'avant-garde Québec.
- (11) MENASRIA Amine. (2016). «COURBES IDF POUR LES STATIONS PLUVIOMETRIQUES DE LA REGION CENTRE DE L'ALGERIE DU NORD». ENSH
- (12) Khanh-Hung Lam, Jennifer Milton, Michel Nadeau et Luc Vescovi. (2004) . «MISE À JOUR DES COURBES D'INTENSITÉ DURÉE FRÉQUENCE DES PLUIES DE COURTE DURÉE DU CLIMAT RÉCENT AU QUÉBEC ». 57^e CONGRÈS ANNUEL DE L'ASSOCIATION CANADIENNE DES RESSOURCES HYDRIQUES *Eau et changement climatique: comprendre pour mieux s'adapter* 16-18 Juin, 2004, Montréal, Qc, Canada
- (13) Benzaid Yamena, Hamdaoui Saliha. (2016). «Etablissement des courbes IDF à partir de pluies horaires dans le bassin de l'Algérois ». *Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre Khmis-Miliana*.
- (14) Taesam Lee and Vijay P. Singh. (2019). «Statistical Downscaling for Hydrological and Environmental Applications». 13: 978-1-138-62596-9

Bibliographie

- (15) ZEGHDOUDI Izzedine , BOUDJEHEM Fayçal.(2018). « Modélisation des hydrogrammes des crues dans les bassins urbains». l'Université 08 Mai 1945 de Guelma.
- (16) ABOU AMANI. (1990). «PLUIE DE PROJET ET MODELES DE TRANSFERT "PLUIE-DEBIT" POUR IES PETITS BASSINS VERSANTS». ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES
- (17) Skhakhfa.I, analyse de l'aléa pluviométrique dans la ville d'Annaba, mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magister, spécialité : hydraulique urbaine, U.B.B.M Annaba, 2009.
- (18) Roux.C, Analyse des précipitations en hydrologie urbaine exemple de la Seine-Saint-Denis,290p, Mémoire présenté pour l'obtention du titre de Docteur, spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées ,1996.
- (19) RASSOUL Abdelaziz. (2013). «Application de la théorie des valeurs extrêmes pour estimer quelques outils probabilistes dans l'hydrologie et l'actuariat ». Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique, Blida
- (20) REZAK Salima. (2014). « HYDROLOGIE ALGERIENNE : SYNTHÈSE DES APPORTS DE CRUES SUR SIG » THÈSE DE DOCTORAT Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF.
- (21) Zekâi Şen & Abdullah M. Mohorji & Mansour Almazroui .(2017) « Engineering risk assessment on water structures under climate change effects» Arab J Geosci (2017) 10: 517
- (22) A. BENKHALED. (2007). «DISTRIBUTIONS STATISTIQUES DES PLUIES MAXIMALES ANNUELLES DANS LA REGION DU CHELIFF COMPARAISON DES TECHNIQUES ET DES RESULTATS» Université de Biskra, B.P N° 145 RP 07000, Biskra, Algérie, Courrier du Savoir – N°08, Juin 2007, pp.83-91
- (23) Zekâi Şen. (2018). « Earth Systems Data Processing and Visualization Using MATLAB Library of Congress Control Number: 2019932682 pages 284.
- (24) Hanen GHANMI. (2014) «ESTIMATION DES COURBES INTENSITÉ-DURÉE-AIRE- FRÉQUENCE (IDAF) DE LA REGION DE TUNIS DANS UN CONTEXTE MULTIFRACTAL » THÈSE DE DOCTORAT à L'UNIVERSITÉ DE VERSAILLES SAINT-QUENTIN-EN-YVELINES et L'UNIVERSITÉ DE TUNIS EL MANAR.
- (25) J. Boé, L. Terray, F. Habets, E. Martin (2007) « Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies» Royal Meteorological Society, International Journal of Climatology.
- (26) J.P.Dunne, Jasmin John, Alistair Adcroft Niki Zadeh, (2012). «GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics» Journal of Climate 25(19):6646-6665
- (27) Jean-Claude Berges «The GPM global rainfall estimation product: theoretical basis and database access» UMR 8586 PRODIG, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne Paris, France. Climatologie, vol. 16 (2019) 23-51

Bibliographie

- (28) Cécile Picouet, Benoît Hingray, André Musy, hydrologie appliquée , Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne
- (29) Types Of Rainfall -NCERT Notes- [Geography Notes For UPSC]
- (30) Jie Chen, Francois P. Brissette, Diane Chaumont, Marco Braun (2013)
«Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America» Volume49, Issue7 Pages 4187-4205
This article also appears in: Climatic, Hydrological, and Land Use Impacts on Large Rivers
- (31) United nations economic and social commission for western Asia (ESCWA)