

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence :/2019



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع/2019

Mémoire de Master

Filière : Hydraulique

Spécialité : Ouvrages Hydrauliques

Thème

**Etude pluviométriques dans les régions du sud et
sud-est de l'Algérie**

Nom et Prénom de l'étudiant :
BEN MESSAOUD Fatima Zohra

Encadreur :
Pr. BEN KHALED Abdelkader

Promotion Juillet 2019

Remerciement

A l'occasion de la réduction de ce mémoire de fin d'étude je tien particulièrement à remercier ALLAH de m'avoir accordé la foi, le courage, la volonté pour élaborer ce travail.

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à **MR BENKHALED Abdelkader** pour avoir accepté de m'encadrer en ce sujet ainsi pour leurs orientations, leurs judicieux conseils et leur disponibilité durant toute la période de notre projet.*

J'adresse aussi mes vifs remerciements aux membres des jurys pour avoir bien voulu examiner et juger ce travail.

*Je voudrais aussi exprimer ma vive reconnaissance envers tous les enseignants de département d'hydraulique ainsi que tous ceux qui ont participé à ma formation surtout à **MR BOUZIANE M. Toufik** et **MR DJEDRI Toufik**.*

Que tous ce qui a participés de près ou de loin dans l'élaboration de ce mémoire trouvent ici l'expression de mes vifs remerciements.

Dédicace

Avec l'aide de dieu tout puissant on a pu achever ce modeste travail que je dédie.

*A mon père Mohammed et ma mère Aïcha les grands cœurs sur la terre de m'avoir aidé
avec leurs conseils et leurs soutien moral, en espérant que donne la santé.*

A mes chers frères Abdessatar et Yasser.

A ma sœur Leïla, son mari Abdelkader et ses enfants (Yasmine, Mohammed et Maria).

A ma sœur Samira, son mari Elhabib et son fils Ahmed

A ma chère sœur Nour elhouda.

A mon fiançai KEDDI Mohammed Abdelkader

A tous ceux qui portent le nom Ben Messaoud et Ben kadi

A mes chers amies Wahiba, Maïssa et Hadjer

A tous les étudiant et les enseignants d'hydraulique

A mes amis et tous ceux qui m'aiment

M^{lle} . BEN MESSAOUD Fatima Zohra



Sommaire



	Page
Introduction générale	1
Chapitre 1: généralités sur les précipitations	
1.1. Introduction.....	3
1.2. Les précipitations.....	3
1.2.1. Origine des précipitations	3
1.2.2. Formation des précipitations	3
1.2.2.1. Étapes du développement de la précipitation solide ou liquide.....	4
1.2.3. Les différents types des précipitations.....	5
1.2. 3.1. Précipitations de convection	6
1.2.3.2. Précipitations orographiques.....	6
1.2.3.3. Précipitations de front	7
1.3. La mesure des précipitations.....	8
1.3.1. Méthodes de mesure	8
1.3.2. Les instruments.....	10
1.3.2.1. Pluviomètres non enregistreurs.....	10
1.3.2.2. Pluviomètres enregistreurs.....	12
1.3.3. Incertitudes de mesure	15
1.3.3.1. Incertitudes liées à l’environnement de mesure.....	15
1.3.3.2. Incertitudes liées au matériel de mesure	17
1.3.4. Méthodes de détection des anomalies de mesure	18
1.3.4.1. Méthode des doubles cumuls (doubles masses).....	18
1.3.4.2. Méthode du cumul des résidus de régression	21
1.3.4.3. Analyse en composantes principales.....	22
1.4. Conclusion	24
Chapitre 2 : Méthodes d’étude de la tendance et des ruptures	
2.1. Introduction	25
2.2. Généralités.....	25
2.2.1. Hypothèse statistique	25
2.2.2. Test d’hypothèse.....	25
2.2.3. Hypothèse nulle (H_0) et hypothèse alternative (H_1)	25
2.3. La stationnarité.....	26
2.3.1. Tests de tendance.....	27
2.3.1.1. Test de Mann-Kendall.....	27

2.3.1.2. Test de Kruskal-Wallis	27
2.3.1.3. Test de Mann.....	28
2.3.1.4. Test de Kendall	29
2.3.1.5. Test de Gold	29
2.3.1.6. Régression.....	30
2.3.2. Tests de rupture	31
2.3.2.1. Test de PETTIT.....	32
2.3.2.2. Test de Buishand.....	33
2.3.2.3. Test de Wilcoxon	34
2.3.2.4. Test de Mann-Whitney	34
2.3.2.5. Test de Student.....	35
2.4. Conclusion	36

Chapitre 3 : Généralités sur la région d'étude

3.1. Introduction	37
3.2. La géographie.....	37
3.3. Le relief	38
3.4. Le climat.....	39
3.4.1. La pluviométrie.....	40
3.4.2. La température	41
3.5. La géologie.....	42
3.6. L'hydrographie.....	43
3.7. L'hydrologie.....	45
3.7.1. L'hydrologie superficielle	45
3.7.2. L'hydrogéologie	46

Chapitre 4 : Etude de la pluviométrie

4.1. Situation et coordonnées des stations.....	47
4.2. Présentation des données.....	48
4.2.1. Les données de base	48
4.3. Comblement des lacunes.....	50
4.3.1. Identification des périodes lacunaires.....	50
4.4. Comblement des données.....	54
4.4.1. Méthode 1	55
4.4.2. Méthode 2	56
4.4.3. Méthode 3	56

4.5. Constitution des séries pluviométriques.....	58
4.5.1. Analyse des chroniques des pluies	59
4.6. Etude de la tendance et de la rupture des séries pluviométriques	60
4.6.1. Statistiques descriptives.....	60
4.6.1.1. Station de Biskra	60
4.6.1.2. Station de Ghardaïa.....	62
4.6.1.3. Station de El Oued	63
4.6.1.4. Station de Laghouat	64
4.6.1.5. Station de Touggourt.....	65
4.6.3. Test de tendance de Mann-Kendall	66
4.6.4. Tests de détection des ruptures dans les séries pluviométriques	68
4.6.4.1. Station de Biskra	69
4.6.4.2. Station de Ghardaïa.....	70
4.6.4.3. Station de El Oued	72
4.6.4.4. Station de Laghouat	73
4.6.4.5. Station de Touggourt.....	75
4.7. Conclusion	76
Conclusion générale	77
Références bibliographiques	78

Liste des figures

N°	Titre de figure	page
1	Précipitation de convection	6
2	Précipitation orographique	7
3	Front chaud et froid	7
4	Les différents types du pluviomètre et l'effet du vent sur la mesure des précipitations	10
5	Configurations satisfaisantes pour les pluviomètres	11
6	Principe de fonctionnement d'un Pluviographe a pesé	13
7	Pluviographe à augets, avec bidon de récupération de l'eau captée par l'impluvium (photo J.-L. Bertrand-Krajewski)	14
8	Pluviographe à flotteur	15
9	Déficit de captation d'un pluviographe à augets en fonction de la vitesse du vent (d'après Anonyme (1957) repris par Lavabre, 1983)	16
10	Carte géographique de relief de l'Algérie	38
11	Carte du relief de l'Algérie	39
12	Carte du climat en Algérie	40
13	Précipitations moyennes annuelles en Algérie	41
14	Température moyenne en Algérie	42
15	Carte géologique de l'Algérie	43
16	Bassins hydrographiques du Sahara algérien	44
17	Cours d'eau de l'Algérie	44
18	Carte de l'hydrogéologie de l'Algérie	46
19	Situation géographique des stations climatologiques	47
20	Exemple de données brutes de pluie à une station	49
21	Pluies moyennes interannuelles aux stations considérées	49
22	Chroniques des pluies avec périodes lacunaires aux stations considérées	52
23	Exemple de comblement des lacunes pour la station Touggourt	55

Liste des figures

24	Exemple de comblement des lacunes pour la station Touggourt	56
25	Régression entre les stations considérées	58
26	Données de base des stations considérées	58
27	Ensemble des Chroniques des pluies journalières aux stations considérées	60
28	Graphique Box Plot des pluies annuelles à Biskra durant la période (1981-2010)	61
29	Graphique Box Plot des pluies annuelles à Ghardaïa durant la période (1981-2010)	62
30	Graphique Box Plot des pluies annuelles à El Oued durant la période (1981-2010)	63
31	Graphique Box Plot des pluies annuelles à Laghouat durant la période (1981-2010)	64
32	Graphique Box Plot des pluies annuelles à Touggourt durant la période (1981-2010)	65
33	Graphique du test de tendance de Man-Kendall des pluies annuelles aux stations considérées durant la période (1981-2010)	68
34	Graphique de tests d'homogénéité des pluies annuelles à Biskra durant la période (1981-2010)	70
35	Graphique de tests d'homogénéité des pluies annuelles à Ghardaïa durant la période (1981-2010)	71
36	Graphique de tests d'homogénéité des pluies annuelles à El Oued durant la période (1981-2010)	73
37	Graphique de tests d'homogénéité des pluies annuelles à Laghouat durant la période (1980-2010)	74
38	Graphique de tests d'homogénéité des pluies annuelles à Touggourt durant la période (1981-2010)	75

Liste des figures



Liste des tableaux

Liste des tableaux

N°	Titre du tableau	Page
1	Valeurs critiques de Z	33
2	Quelques valeurs des précipitations annuelles de Sahara algérien	40
3	Quelques valeurs de température dans le Sahara algérien	41
4	Quelques oueds de Sahara algérien	45
5	Les coordonnées des stations pluviométriques et la moyenne interannuelle	48
6	les périodes lacunaires avec ces pourcentages dans les stations considérées	53-54
7	Statistiques descriptives de la pluie annuelle à Biskra durant la période (1981-2010)	61
8	Statistiques descriptives de la pluie annuelle à Ghardaïa durant la période (1981-2010)	62
9	statistiques descriptives des pluies annuelles à El Oued durant la période (1981-2010)	63
10	statistiques descriptives des pluies annuelles à Laghouat durant la période (1981-2010)	64
11	statistiques descriptives des pluies annuelles à Touggourt durant la période (1981-2010)	65
12	Résultats du test de Grubbs des pluies annuelles aux stations considérés durant la période (1981-2010)	66
13	Résultats de test de tendance de Man-Kendall des pluies annuelles à Biskra durant la période (1981-2010)	67
14	Résultats de tests d'homogénéité des pluies annuelles à Biskra durant la période (1981-2010)	69
15	Résultats de tests d'homogénéité des pluies annuelles à Ghardaïa durant la période (1981-2010)	70
16	Résultats de tests d'homogénéité des pluies annuelles à El Oued durant la période (1981-2010)	72

Liste des tableaux

17	Résultats de tests d'homogénéité des pluies annuelles à El Oued durant la période (1981-2010)	73
18	Résultats de tests d'homogénéité des pluies annuelles à Touggourt durant la période (1981-2010)	75

Introduction générale

L'eau constitue l'un des éléments à la vie. Son intérêt a incité de nombreux scientifiques à faire des recherches approfondies afin de mieux contrôler et modéliser son cycle.

Les problèmes d'aujourd'hui sont les changements climatiques sur la terre. L'effet de ces changements climatiques ne fait qu'augmenter par l'apparition de phénomènes météorologiques extrêmes (tel que les inondations, les sécheresses et les tempêtes de pluie) ainsi que les changements erratiques de la pluviométrie et de la température. Les inondations et les sécheresses extrêmes peuvent provoquer des pertes économiques et des dommages écologiques et environnementaux. Bien que l'augmentation des précipitations puisse renforcer la production agricole et l'approvisionnement en eau, mais si cette augmentation est associée avec des événements de précipitations extrêmes. Elle peut provoquer des effets tels que les inondations et les retards dans la récolte. D'autre part, une diminution des précipitations pourrait provoquer de longues périodes de sécheresse qui sont associées à l'apparition des pénuries d'eau et l'exposition aux risques d'incendie.

La pluviométrie est un facteur écologique essentiel. Avec la température, elle conditionne les climats terrestres, la nature et le fonctionnement des écosystèmes, leur productivité primaire, etc. Elle est, très probablement, le facteur le plus important conditionnant le développement des sociétés humaines et un enjeu géopolitique qui, bien qu'il soit souvent passé sous silence, est fondamental.

La région de sud et sud-est algérien est une région aride caractérisée par un climat sec est une pluviométrie très rare. En dépit des faibles quantités tombées, cette région est dans certaines périodes caractérisée par des catastrophes et dégâts à cause des précipitations extrêmes (Ghardaïa 2008, Tamanrasset 2017 ; 2018).

Ce travail consiste à faire une étude pluviométrique dans les régions de sud et sud-est de l'Algérie. Ce travail est fait en quatre chapitres :

Au premier chapitre on donne des généralités, définitions sur les précipitations (leurs formations, leurs origines et les différents types de précipitations), les méthodes et les instruments de mesure les précipitations et on termine le chapitre avec les incertitudes de mesure et les méthodes de détection des anomalies de mesure.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude statistique, des rappels sur les tests de tendance et les tests de rupture.

Introduction générale

Dans le troisième chapitre nous avons présenté la zone d'étude (le sud et sud-est de l'Algérie); la situation géologique, hydrographique, géologique, hydrologique et hydrogéologique.

Le quatrième chapitre est réservé à l'étude de l'évolution de la pluviométrie dans 14 stations du sud et du sud-est de l'Algérie. Un traitement préliminaire des données a été fait pour ensuite analyser le volet l'évolution de la pluviométrie. Nous avons pour cela utiliser les techniques statistiques appropriées.

Chapitre 1

Généralités sur les précipitations

Généralités sur les précipitations

1.1. Introduction

Les précipitations constituent un élément très important du cycle hydrologique. Une région ne recevant aucune précipitation pendant une période prolongée subit une sécheresse, tandis qu'à l'opposé, une région qui reçoit un excès de précipitation subira des inondations qui peuvent devenir très dévastatrices, les problèmes surviennent lorsque les précipitations tombent en volume ou avec une intensité extrême ; il peut y avoir pénurie ou surabondance. (Skhakhfa, 2009)

1.2. Les précipitations

Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM) Les précipitations sont les produits solides ou liquides résultant de la condensation de la vapeur d'eau qui tombent des nuages ou qui passent directement de l'air au sol sur lequel ils se déposent. Les précipitations comprennent la pluie, la grêle, la neige, le grésil, la bruine, le givre, la rosée, la gelée blanche et les précipitations de brouillard.

1.2.1. Origine des précipitations

Les précipitations se produisent lorsque la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère se condense en nuages et retombe sur terre. Elles constituent l'unique « entrée » des principaux systèmes hydrologiques continentaux que sont les bassins versants. Elles constituent un phénomène physique qui décrit le transfert d'eau dans sa phase liquide (pluie) ou solide (neige, grêle) entre l'atmosphère et le sol. Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression.

1.2.2. Formation des précipitations

Les hydrométéores qui se forment dans les nuages sont à des températures très froides, souvent au-dessous 0 °C. C'est pour cette raison que presque toutes les précipitations qui arrivent au sol (liquide ou solide) proviennent de la formation de cristaux de glace ou d'eau congelée. Ces précipitations solides tombent et fondent en cours de route si la température de l'air atteint plus de 0 °C et arrivent sous forme liquide au sol (sinon elles restent sous forme solide). (interMET)

Généralités sur les précipitations

1.2.2.1. Étapes du développement de la précipitation solide ou liquide

1.2.2.1.1. La condensation et la sursaturation

Vous savez maintenant que les gouttelettes de nuage se forment par condensation dès que le seuil de saturation de l'air en vapeur d'eau est légèrement dépassé (sursaturation); cela résulte du grand nombre de noyaux de condensation présents dans l'atmosphère. Le diamètre habituel d'une gouttelette de nuage est de 0,02 millimètre, alors que celui d'une gouttelette de pluie peut atteindre 5 millimètres ; c'est dire que la gouttelette de pluie est environ 100 fois plus grosse que la gouttelette de nuage. Mais comment les petites gouttelettes de nuage deviennent-elles des gouttes de pluie. On pourrait croire que les gouttelettes de nuage vont tout simplement grossir et devenir des gouttelettes de pluie. Nous verrons que ce n'est pas exactement le cas. (interMET)

1.2.2.1.2. Le développement des hydrométéores

Au début, les gouttelettes d'eau dans le nuage sont nombreuses et elles ont à peu près la même taille. Leur croissance se fait par condensation de vapeur sur leur surface. Mais le nombre de gouttelettes est très élevé (1 million de gouttelettes par litre) et la compétition pour le partage de la vapeur d'eau disponible est féroce. Seule, la condensation de vapeur d'eau sur les gouttelettes n'est pas suffisante pour former des gouttelettes de précipitation. Cela veut dire qu'il y a d'autres processus qui vont permettre aux gouttelettes de grossir jusqu'à devenir des gouttelettes de précipitation.

On connaît maintenant deux processus permettant de produire les précipitations. Il s'agit des processus de Bergeron et de coalescence. (interMET)

a) Processus de Bergeron

Il faut d'abord savoir que les gouttelettes d'eau ne se solidifient pas à 0 °C comme on pourrait le croire. L'eau pure ne se solidifie qu'à des températures inférieures à -40 °C. On dit alors que le nuage est en surfusion. Cependant, l'eau surfondue gèle facilement en présence de noyaux de congélation. Donc, lorsque la température d'un nuage est au-dessous de 0 °C, on y retrouve des gouttelettes d'eau et des cristaux de glace.

Il se produit alors un phénomène très intéressant : des molécules d'eau quittent les gouttelettes d'eau pour aller sur les cristaux de glace. Ceux-ci grossissent rapidement, aux dépens des gouttelettes, jusqu'à ce qu'ils soient assez lourds pour tomber. Durant leur chute, ils grossiront

Généralités sur les précipitations

encore plus par le processus de coalescence. S'ils passent à travers une couche d'air dont la température est au-dessus de 0 °C, ils pourront fondre et arriveront au sol sous forme de pluie, ou de neige mouillée. (interMET)

b) Processus de coalescence

Si la turbulence (le brassage) dans un nuage est suffisante, les gouttelettes au sein du nuage entreront en collision et se fondront les unes dans les autres pour former de plus grosses gouttelettes. Lorsque celles-ci sont assez lourdes, elles tombent et entrent encore en collision avec d'autres gouttelettes plus petites qui tombent moins vite. Finalement, elles atteindront le sol sous forme de pluie.

Ces gouttes tombent plus rapidement et grossissent par coalescence, c'est-à-dire par rencontre. Les vitesses de chute des très grosses gouttes peuvent atteindre 8 m/s. Les gouttes possèdent alors leur grosseur maximale. En tombant, elles se déforment et se brisent en gouttelettes plus petites qui grossissent à leur tour.

1.2.2.1.3. Chute des hydrométéores

La dernière étape du développement des hydrométéores est leur chute vers le sol. Ce n'est qu'au moment où ils ont un poids assez élevé, que les hydrométéores tombent au sol.

En tombant, ils vont capturer d'autres gouttelettes et ainsi grossir. Mais ils vont aussi se déformer à cause de la friction de l'air. Comme les gouttes se déforment, elles peuvent aussi se briser pour former des gouttes plus petites.

1.2.3. Les différents types des précipitations :

L'étude des précipitations montre que le schéma simpliste selon lequel les nuages prendraient naissance au-dessus des océans, puis poussés par les vents tomberaient en pluie sur les continents, est faux.

En effet, on peut admettre qu'un nuage ayant pris naissance au-dessus de l'Atlantique déverse environ 100 mm sur l'Europe et la Russie Occidentale avant de se dissiper au-delà de l'Oural. Or, un nuage ne contient au maximum que 20 mm d'eau environ. Ce n'est donc qu'au plus 20 mm qui proviennent des océans et 80 mm qui viennent de l'atmosphère au-dessus des continents.

Généralités sur les précipitations

Par ailleurs, on constate des averses dépassant fréquemment 20 mm. Il faut donc que le nuage soit continuellement réalimenté en eau.

Ceci se produit lorsqu'il y a des vents ascendants qui entraînent des masses d'air humide mais non saturé vers la zone de formation du nuage. De telles conditions se présentent lorsque l'on rencontre un ou plusieurs de ces trois cas principaux :

1.2. 3.1. Précipitations de convection

Ce type de précipitation est le résultat du réchauffement de l'air à l'interface avec le sol ; l'air en se réchauffant se dilate et s'élève, produisant ainsi de forts courants verticaux ascendants. L'air se refroidit ensuite au cours de l'ascension et la précipitation se produit lorsque le point de condensation est atteint. Les précipitations par convection peuvent prendre la forme d'une faible averse ou d'un orage de très forte intensité. (Ababsa, 2018)

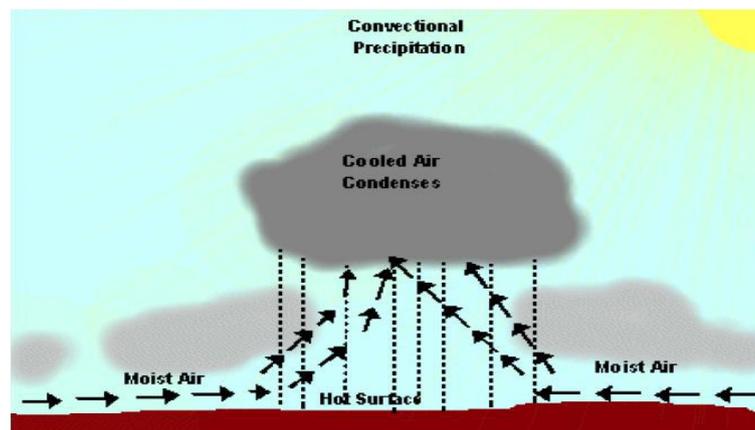


Figure N°1 : Précipitation de convection (Ababsa, 2018)

1.2.3.2. Précipitations orographiques

Si une masse d'air se déplaçant horizontalement rencontre un obstacle topographique (chaîne de montagnes par exemple), il s'ensuit une élévation des masses d'air et par conséquent leur refroidissement. Comme précédemment, on obtient des précipitations sous forme de pluie mais aussi, si l'altitude est suffisante, de la neige. Après le passage de la chaîne, l'air va redescendre, se comprimer et se réchauffer. On a alors des vents chauds et secs (effet de "foehn") (Laborde, 2000).

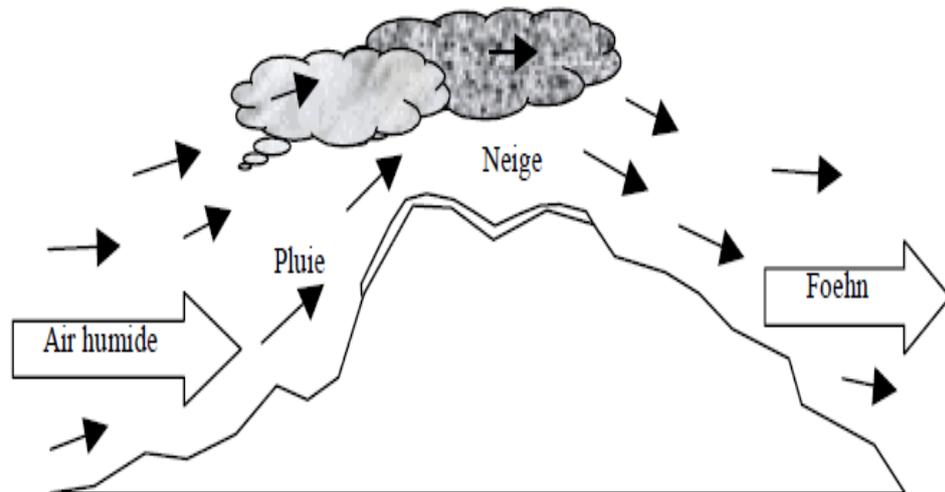


Figure N°2 : Précipitation orographique (Laborde, 2000)

1.2.3.3. Précipitations de front

Lorsque plusieurs masses d'air de propriétés différentes se rencontrent, les plus chaudes et les plus humides sont poussés vers les hautes altitudes où elles se refroidissent et se condensent.

Ce sont ces précipitations qui sont les plus importantes, les plus longues et les plus fréquentes sous nos climats tempérés.

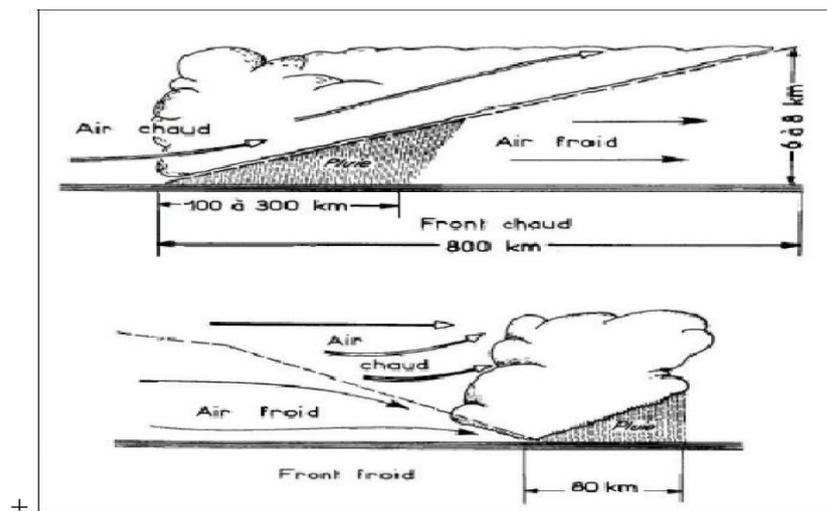


Figure N°3 : Front chaud et froid (DJALAL, 2014)

Généralités sur les précipitations

1.3. La mesure des précipitations

Le problème général de la représentativité des mesures se pose tout particulièrement dans le cas de la mesure des précipitations. Pour cette mesure, les éléments particulièrement sensibles sont l'exposition, le vent et la topographie (OMM, 2014). Des informations détaillées sur la mesure des précipitations sont fournies par le document cité en référence.

L'unité de précipitation est une mesure linéaire de la hauteur, habituellement exprimée en millimètres (volume/surface), ou kg m^{-2} (masse/surface) pour les précipitations liquides. Les quantités quotidiennes de précipitations devraient être lues à 0,2 mm et, si possible, à 0,1 mm près ; les quantités hebdomadaires et mensuelles devraient être lues à 1 mm près (au moins). Les mesures quotidiennes devraient être effectuées à heures fixes communes à tout le réseau ou aux réseaux présentant un intérêt. Les quantités inférieures à 0,1 mm (0,2 mm aux États Unis) sont généralement appelées traces. L'intensité de la précipitation est également exprimée sous la forme d'une mesure linéaire par unité de temps, habituellement des millimètres par heure.

Les observations courantes se font toutes les heures, toutes les trois heures et tous les jours, à des fins synoptiques et climatologiques. Dans certains cas, il est nécessaire d'effectuer des observations plus fréquentes pour mesurer des précipitations de très forte intensité sur de très brèves périodes. Dans le cadre de certaines applications, des pluviomètres totalisateurs sont utilisés à des intervalles d'observation de plusieurs semaines ou plusieurs mois, voire une année dans les zones de montagne ou les déserts.

1.3.1. Méthodes de mesure

Les capteurs de précipitations (ou pluviomètres si seules les précipitations liquides sont mesurées) sont les instruments le plus couramment utilisés pour mesurer les précipitations. On utilise généralement un collecteur ouvert à parois verticales ayant habituellement la forme d'un cylindre droit auquel est adjoit un entonnoir lorsque l'objectif principal est la mesure de la pluie.

Les mesures ponctuelles de précipitations sont la première source de données pour l'analyse surfacique. Toutefois, même la meilleure mesure de précipitations en un point n'est représentative que d'une zone limitée dont la dimension est une fonction de la longueur de la période d'accumulation, de l'homogénéité physiographique de la région, de la topographie

Généralités sur les précipitations

locale et du processus produisant les précipitations. Les radars, et plus récemment les satellites, sont utilisés pour définir et quantifier la répartition spatiale des précipitations.

La mesure des précipitations est particulièrement sensible à l'exposition des pluviomètres de sorte qu'il est important d'enregistrer méticuleusement les métadonnées concernant les mesures afin de réunir un historique complet de la station qui servira aux études climatiques et autres études ainsi que pour l'assurance qualité.

Les changements dans les techniques d'observation des précipitations, essentiellement l'utilisation de différents types de pluviomètres, la modification du site ou de la hauteur d'installation, peuvent causer des inhomogénéités dans les séries temporelles de précipitation. L'utilisation de types de pluviomètres et d'expositions de site différents conduit à des inhomogénéités spatiales. Ceci est dû aux erreurs systématiques des mesures de précipitation, essentiellement celles liées au vent.

La distribution des stations pluviométriques à l'intérieur d'une zone donnée est un critère important, car c'est du nombre et de la répartition géographique des pluviomètres que dépend la représentativité des mesures par rapport à la quantité des précipitations réellement tombée sur cette zone.

Les effets de l'environnement immédiat du site sur le champ de vent peuvent être à l'origine d'anomalies locales, positives ou négatives, dans la quantité des précipitations reçues. D'une manière générale, aucun objet ne devrait être à une distance du pluviomètre inférieure à deux fois sa hauteur au-dessus de l'ouverture de celui-ci. Pour chaque site, l'angle moyen par rapport à la verticale des obstacles devrait être estimé et un plan du site dressé. Les sites sur une pente ou sur un toit devraient être évités.

Il est toutefois préférable de réduire les effets du vent et ceux exercés par le site sur le vent en utilisant un pluviomètre enterré pour la mesure des précipitations liquides ou en assurant l'horizontalité de l'écoulement de l'air au-dessus de l'orifice du capteur, et en adoptant l'une des techniques suivantes, données par ordre décroissant d'efficacité :

- a) Dans les zones à végétation dense et homogène, maintenir par des tontes régulières la hauteur de la végétation au même niveau que l'ouverture du pluviomètre ;
- b) Dans les autres zones, renforcer l'effet des interventions mentionnées en a) par l'emploi de palissades judicieusement disposées ;
- c) Installer des écrans autour du pluviomètre.

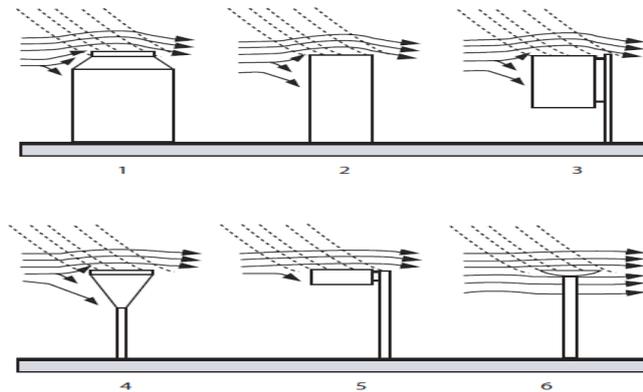


Figure N°4 : Les différents types du pluviomètre et l'effet du vent sur la mesure des précipitations

1.3.2. Les instruments

1.3.2.1. Pluviomètres non enregistreurs

1.3.2.1.1. Capteur ordinaire

Le pluviomètre le plus commun revêt la forme d'un collecteur placé au-dessus d'un entonnoir aboutissant dans un récipient où sont stockées l'eau et la neige fondue accumulées entre les heures d'observation. L'eau stockée est collectée dans récipient gradué ou versée du collecteur dans une éprouvette graduée ; son niveau dans le collecteur peut aussi être directement mesuré à l'aide d'une règle graduée.

Il est particulièrement impératif qu'un pluviomètre possède les caractéristiques suivantes :

- La bague du collecteur devrait avoir une arête tranchante tombant verticalement à l'intérieur et formant à l'extérieur un biseau prononcé. Les nivomètres devraient être conçus de manière à éviter une réduction importante de la surface réceptrice par accumulation de neige mouillée autour de la bague du collecteur ;
- La surface réceptrice devrait être connue à au moins 0,5 pour cent près et l'ensemble de l'instrument devrait être réalisé de manière qu'elle demeure constante pour des utilisations normales de l'appareil ;
- Le collecteur devrait être conçu de manière que les rejaillissements ne fassent ni entrer ni sortir d'eau du pluviomètre. Ceci peut être obtenu au moyen d'une paroi verticale suffisamment profonde et en donnant à la paroi de l'entonnoir une pente suffisamment

Généralités sur les précipitations

accusée (au moins 45°). La figure 5 donne le schéma de deux configurations satisfaisantes ;

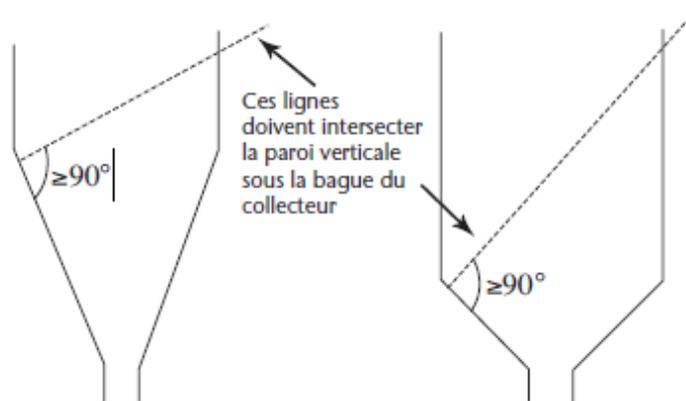


Figure N°5 : Configurations satisfaisantes pour les pluviomètres (OMM, 2014)

- d) La conception devrait viser à minimiser les erreurs dues au mouillage ;
- e) Pour minimiser les pertes par évaporation, le récipient devrait avoir une entrée de surface réduite et être suffisamment protégé du rayonnement. Les pluviomètres destinés à être utilisés dans des endroits où leur relevé ne pourra s'effectuer qu'hebdomadairement ou mensuellement seront conçus d'une manière identique à ceux utilisés pour les mesurages quotidiens, mais seront pourvus d'un seau plus robuste et de capacité plus grande.

Les éprouvettes devraient être en verre ou en matière plastique transparente. L'éprouvette doit être tenue en position verticale lors de la lecture et l'observateur doit être conscient du risque d'erreur de parallaxe.

1.3.2.1.2. Pluviomètres totalisateurs

Les pluviomètres totalisateurs sont utilisés pour mesurer la totalité des précipitations ayant affecté, pendant une saison, une région éloignée ou peu peuplée. Ces appareils comprennent un collecteur au-dessus d'un entonnoir aboutissant dans un récipient suffisamment grand pour stocker la totalité des précipitations recueillies au cours d'une saison (ou d'un mois dans les zones à précipitations importantes). Pour réduire l'évaporation, une huile appropriée ou tout autre agent éliminant l'évaporation devrait être versée dans le récipient de manière à former une couche d'au moins 5 mm (WMO, 1972). Celle-ci devrait permettre aux précipitations d'atteindre sans difficulté la solution qu'elle recouvre.

Généralités sur les précipitations

Dans certains pays, cette solution d'antigel et d'huile est considérée comme déchet toxique et donc nuisible pour l'environnement. Il conviendrait d'obtenir les directives concernant le rejet des substances toxiques auprès des autorités locales de protection de l'environnement.

1.3.2.2. Pluviomètres enregistreurs

Par rapport aux méthodes manuelles, l'enregistrement automatique des précipitations présente l'avantage d'une meilleure résolution temporelle ; il permet en outre de réduire les pertes dues à l'évaporation et au mouillage.

Trois modèles d'enregistreurs automatiques sont généralement utilisés pour la mesure des précipitations :

1.3.2.2.1. Pluviographe à pesée

Dans ces instruments, le poids d'un récipient et de la précipitation qui s'y accumule et enregistré d'une manière continue soit au moyen d'un mécanisme à ressort, soit au moyen d'une balance à poids. Toute la précipitation, qu'elle soit sous forme solide ou liquide, est ainsi enregistrée au fur et à mesure qu'elle se produit. Ce type de pluviomètre ne comporte pas habituellement de dispositif automatique de vidange ; sa capacité (c'est-à-dire la hauteur maximale qui peut s'accumuler avant recharge) va de 150 mm à 750 mm, figure 6 illustre le principe de fonctionnement de pluviographe à pesée. La maintenance de l'appareil devrait permettre de minimiser les pertes par évaporation, ce qui peut être obtenu en mettant dans le récipient du pluviomètre une quantité d'huile (ou de tout autre agent éliminant l'évaporation) suffisante pour former un film à la surface de l'eau. Les difficultés résultant des oscillations qui affectent la balance par vent fort peuvent être réduites par l'emploi soit d'un mécanisme amortisseur à huile, soit, si les travaux récents sont confirmés, d'un microprocesseur programmé de manière à éliminer les effets de ces oscillations sur les indications de l'appareil.

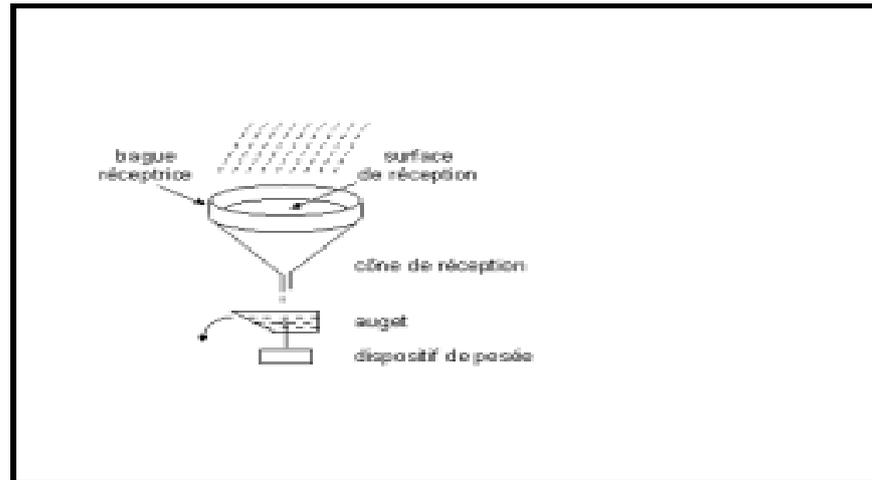


Figure N°6 : Principe de fonctionnement d'un Pluviographe à pesé (Skhakhfa, 2009)

1.3.2.2.2. Pluviographe à augets basculants

Le pluviomètre à augets basculants est utilisé pour mesurer les totaux accumulés et l'intensité de la pluie. Mais il ne peut atteindre l'exactitude voulue à cause de grand non linéarité des erreurs, particulièrement pour les précipitations de hautes intensités.

Le pluviomètre à augets basculants est particulièrement approprié pour les stations météorologiques automatiques car il se prête aux méthodes numériques. L'impulsion provoquée par la fermeture d'un contact peut être surveillée à l'aide d'un enregistreur de données et le total peut être calculé sur des périodes de temps déterminées afin de donner la quantité de précipitations. Il peut également être utilisé avec un enregistreur à diagramme.

Le principe de fonctionnement est simple. Un réservoir métallique léger divisé en deux compartiments, ou augets, est en équilibre instable autour d'un axe horizontal. En position normale, il repose sur l'une des deux butées dont l'équipement est pourvu, ce qui l'empêche de basculer complètement.



Figure N°7 : Pluviographe à augets, avec bidon de récupération de l'eau captée par l'impluvium (photo J.-L. Bertrand-Krajewski)

1.3.2.2.3. Pluviographes à flotteur

Dans ce modèle d'instrument, la pluie passe dans un réservoir contenant un flotteur de faible masse. Le déplacement de celui-ci, lorsque le niveau d'eau monte dans le réservoir, commande le déplacement de la plume sur le diagramme par un mécanisme approprié ou est converti en signal digital par un transducteur. Par un choix judicieux de la surface de réception du pluviomètre, du flotteur et du réservoir, on peut obtenir l'échelle d'enregistrement que l'on souhaite.

Pour obtenir un enregistrement sur une période suffisante (généralement 24 heures), il est nécessaire de disposer soit d'un réservoir de grande contenance (dans ce cas, l'échelle obtenue sur le diagramme ou tout autre moyen d'enregistrement est compressée), soit d'un mécanisme assurant automatiquement la vidange rapide du réservoir quand il est plein, ce qui remet la plume ou tout autre indicateur à zéro. Habituellement, cette fonction est remplie par un dispositif à siphon. Ce dispositif devrait avoir un démarrage franc, sans phénomène de goutte à goutte, aussi bien au début qu'à la fin de la période de siphonage dont la durée ne devrait pas dépasser 15 secondes.

Pendant l'hiver, s'il y a risque de gel, un chauffage (commandé de préférence par thermostat) devrait être installé à l'intérieur de l'appareil. Ceci évite la détérioration du réservoir et de son flotteur tout en permettant de poursuivre l'enregistrement des précipitations durant la période de froid.

Généralités sur les précipitations



Figure N°8 : Pluviographe à flotteur

1.3.3. Incertitudes de mesure

Il est nécessaire, pour utiliser des résultats de mesure, de les exprimer avec leur incertitude associée. Pour cela, il faut tenir compte de toutes les sources d'incertitude significatives intervenant dans le processus de mesure. Dans le domaine de la pluviométrie, ces sources comprennent essentiellement les contributions des appareils de mesure, des méthodes utilisées, du personnel chargé de la gestion des appareils, de l'environnement de mesure et de la fluctuation des précipitations elles-mêmes, (Laplace, 1997). Les incertitudes liées aux appareils de mesure sont maîtrisables par des opérations d'étalonnage et de vérification pour peu qu'elles soient réalisées dans les règles de l'art métrologique. Le personnel doit être suffisamment compétent et formé pour minimiser sa contribution aux incertitudes. L'environnement de mesure, quant à lui, est plus difficile à maîtriser en milieu urbain et peut être à l'origine d'incertitudes importantes. Les précipitations peuvent être elles-mêmes sources d'incertitude dans l'évaluation d'une lame d'eau précipitée à l'échelle d'un bassin versant, notamment l'incertitude due à leur variabilité spatiale. Cette variabilité, mesurée par un pluviographe fixe, observateur eulérien, est encore l'objet de travaux de recherche importants. On sait néanmoins que ces différentes incertitudes de mesure conduisent généralement à une sous-estimation des précipitations réelles. (Skhakhfa, 2009)

1.3.3.1. Incertitudes liées à l'environnement de mesure

Les principales incertitudes liées à l'environnement de mesure sont le déficit de captation dû au vent. Les pluviographes offrent une certaine prise au vent et leur seule présence suffit à modifier les mouvements locaux de l'air, ce qui conduit à sous-estimer la pluie réelle. Les perturbations apportées dépendent essentiellement de la vitesse du vent, de la forme et de la

Généralités sur les précipitations

hauteur du pluviographe et des conditions locales de circulation de l'air. De ce point de vue, les pluviographes en forme de « verre à pied » sont ceux qui perturberaient le moins l'écoulement de l'air.

Diverses études françaises et internationales montrent que le déficit de captation varie de 10% environ pour un vent de 10 à 20 km/h jusqu'à 50 % pour un vent de 40 à 90 km/h. (Figure 9). Un mesurage de la vitesse du vent par anémomètre constitue un complément utile pour évaluer l'ordre de grandeur de l'incertitude sur la valeur de la pluie, ou tout au moins pour attribuer un indice de qualité aux données pluviographiques. Des nombreuses études, tant empiriques que théoriques, ont été réalisées pour évaluer et corriger l'influence du vent sur la valeur de la pluviométrie. Les résultats, même s'ils sont intéressants restent difficilement transposables d'un site de mesure et d'un type de pluviographe à un autre sans recours à des modélisations aérodynamiques fines du champ du vent et des trajectoires des gouttes de pluie.

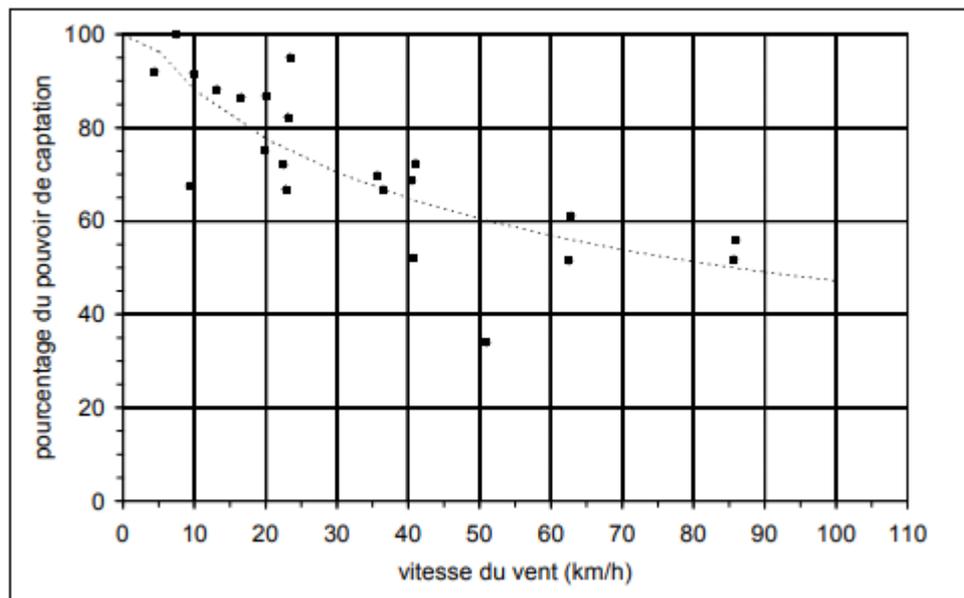


Figure N°9 : Déficit de captation d'un pluviographe à augets en fonction de la vitesse du vent (d'après Anonyme (1957) repris par Lavabre, 1983)

Par ailleurs, le vent est susceptible de provoquer des vibrations du pluviographe, lesquelles peuvent conduire à des basculements intempestifs dans le cas des appareils à augets. Une comparaison entre le nombre de basculements enregistrés et le volume d'eau total recueilli permet de repérer ce type d'erreur. Le vent est également susceptible d'entraîner une sous-

Généralités sur les précipitations

estimation des précipitations en raison de l'évaporation qu'il provoque. Pour un vent de 3 m/s, des mesurages en laboratoire ont montré que le déficit pouvait atteindre 20 g pour un appareil à peser. Pour une surface de réception de 1 000 cm², le déficit peut atteindre jusqu'à 15 g d'eau (Morineau, 1993).

1.3.3.2. Incertitudes liées au matériel de mesure

Les principales incertitudes liées au matériel de mesure sont Les pertes par rétention des gouttes d'eau à la surface du cône : de 4 g pour une surface de 400 cm² jusqu'à 15 à 20 g pour 1 000 cm². Des pertes atteignant jusqu'à 10 % de la hauteur précipitée ont été observées (Einfalt et al. 1998).

1.3.3.2.1. Les pertes par éclaboussement

Sous l'effet de la vitesse, des gouttes de pluie peuvent rejaillir à l'extérieur du cône de réception, entraînant ainsi un déficit de captation, fonction de la taille des gouttes et de l'intensité de la pluie. Cette perte est toutefois généralement considérée comme inférieure à 1 ou 2 % de la masse d'eau recueillie.

1.3.3.2.2. Une mauvaise horizontalité du cône de réception

Un défaut d'horizontalité peut provoquer un déficit de captation estimé à 0,4 %, 1,5 % et 6 % pour des angles d'inclinaison respectifs de 5°, 10° et 20° (Chocat et al. 1997). Dans le cas des appareils à augets, une mauvaise horizontalité peut également perturber les basculements d'augets et leur symétrie ;

1.3.3.2.3. Une installation non conforme

Le pouvoir de captation diminue avec la hauteur du pluviographe (Lavabre, 1988, 1990). Par rapport à un pluviographe enterré dont la surface de réception est affleurant à une hauteur de 0 m, des pluviographes placés respectivement à 1 m, 4 m et 8 m de hauteur présentent des déficits de captation respectifs de 2 - 3 %, 3 - 4 % et 6 - 7 %, ceci pour des précipitations sur 24 heures. Cette diminution de la captation avec la hauteur, qui dépend également de l'aérodynamique du pluviographe, peut jouer un rôle important en milieu urbain où le respect des critères de bonne installation n'est pas toujours facile : l'installation de pluviographes sur les toits des bâtiments est fréquente ;

Généralités sur les précipitations

1.3.3.2.4. Les pertes par rétention d'eau sur la crépine

Jusqu'à 20 g, l'évaporation sous l'effet de la chaleur des gouttes retenues à la surface du cône pour les pluviographes équipés d'un système de chauffage (afin d'éviter les problèmes de gel durant les périodes froides), les précipitations de pluie et de neige peuvent être sous-estimées de 5 à 10 % à cause de l'évaporation due au chauffage (Einfalt et al., 1998) ; une dégradation des bords du cône. Il existe également des sources d'incertitude de mesure propres aux seuls pluviographes à augets.

1.3.3.2.5. Les problèmes mécaniques

Les plus fréquents sont : mauvais pivotement, points durs mécaniques, dilatation non homogène des différents matériaux constitutifs, etc. la présence accidentelle d'insectes dans le mécanisme qui peut conduire à un blocage des augets, la présence de dépôts dans les augets, qui peuvent modifier la valeur de la masse d'eau nécessaire au basculement.

D'autres problèmes peuvent se produire : L'évaporation de l'eau contenue dans les augets entre deux pluies ou durant les périodes pluvieuses de très faible intensité ; et surtout la sous-estimation des fortes intensités due au phénomène de sur remplissage des augets.

1.3.4. Méthodes de détection des anomalies de mesure

Nous avons vu qu'il ya des problèmes et des anomalies dans la mesure des précipitations c'est pourquoi nous avons fourni les méthodes de détection de ces anomalies.

1.3.4.1. Méthode des doubles cumuls (doubles masses)

Cette méthode a été longtemps utilisée car sa mise en œuvre est simple et ne nécessite pas de moyen de calcul particulier.

Elle permet de mettre en évidence des erreurs systématiques dans une série de données. Soit deux séries d'observations (x_i, y_i) sur des variables corrélées entre elles. Il existe alors une relation du type :

$$\hat{y}_i = ax_i + b$$

Généralités sur les précipitations

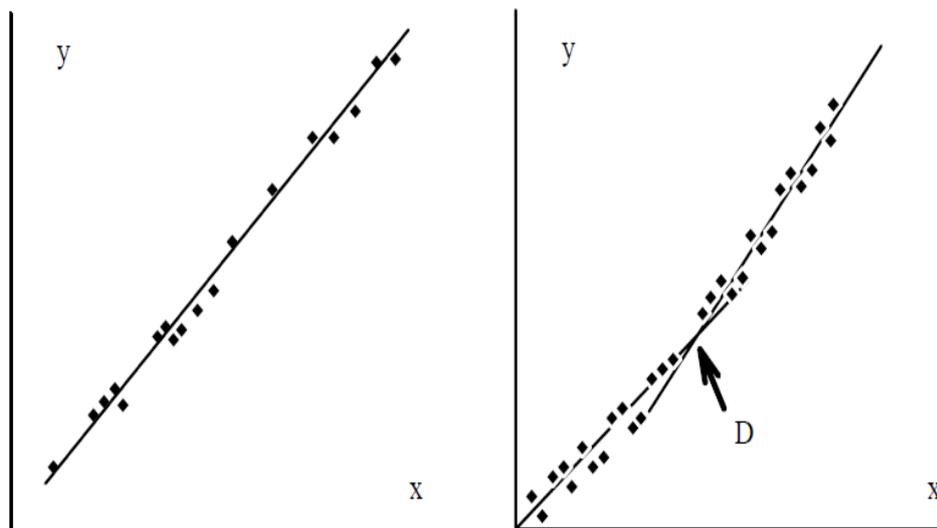
Si à partir d'une certaine date, on commet une erreur systématique sur x par exemple, les variables x et y seront encore corrélées mais avec des coefficients a' et b'.

Si on porte dans un graphique x_i en fonction de y_i , il ne sera généralement pas possible de constater cet écart. Par contre, si on porte non plus x_i et y_i mais Y_i et X_i définis ainsi...

$$x_i = \sum_{j=1}^i X_j$$

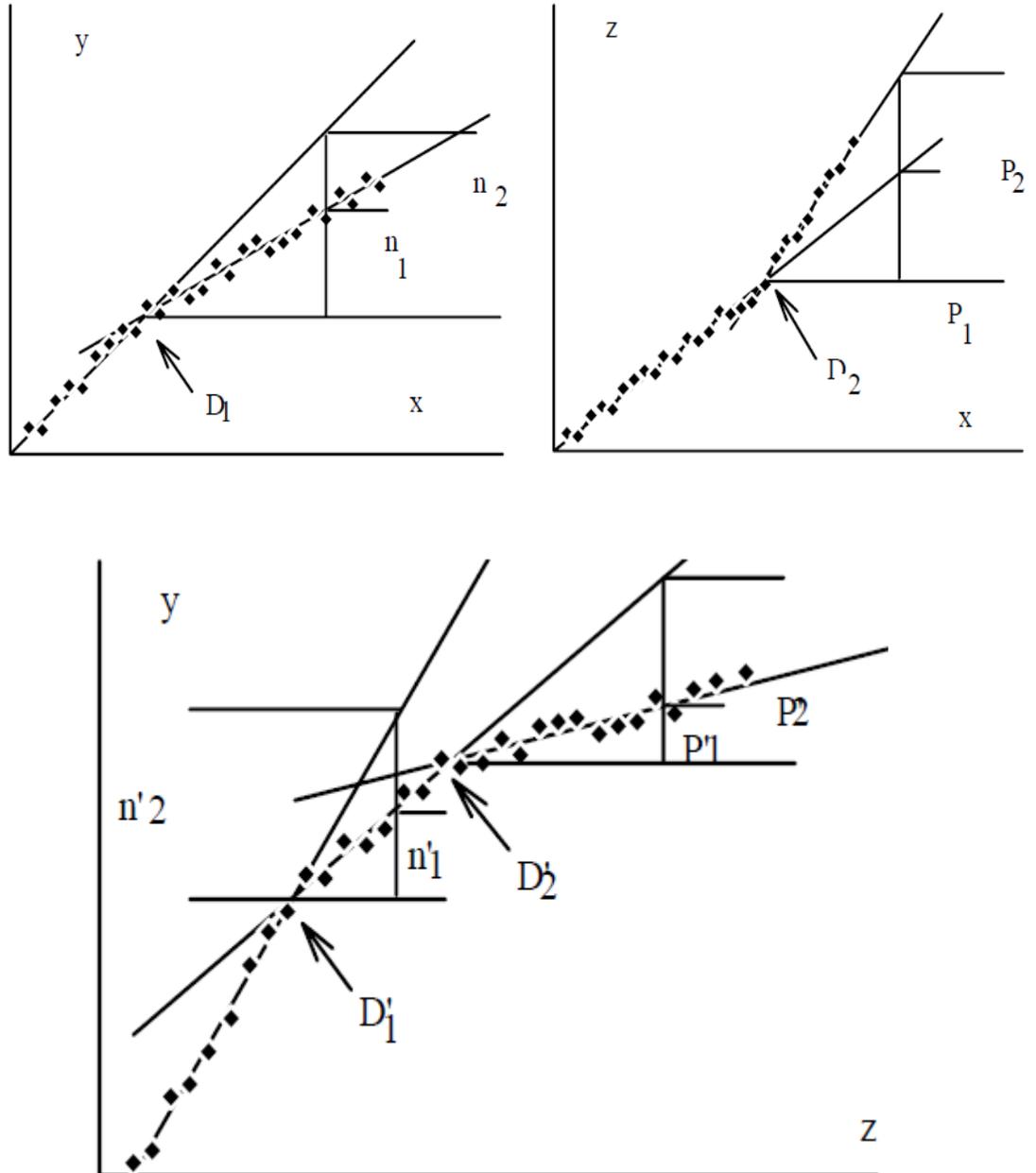
$$y_i = \sum_{j=1}^i Y_j$$

... on aura alors une fonction monotone croissante en fonction du temps. Si x et y sont stables, les points s'aligneront sur une droite de pente $\frac{\bar{y}}{\bar{x}}$, mais si une des séries subit à partir d'une certaine date, une erreur systématique, on verra les points s'aligner selon deux droites :



Sur la figure de gauche, x et y sont stables alors que sur la figure de droite, on constate qu'à partir du point correspondant à la date D, on a commis une sous-estimation systématique de x ou une surestimation systématique de y. Pour lever cette ambiguïté, on effectuera les doubles masses sur plusieurs postes ou on vérifiera que les cassures se font bien aux mêmes dates et dans les mêmes rapports.

Généralités sur les précipitations



Sur les schémas suivants, on vérifierait les points suivants :

$$\left[\begin{array}{l} D_1 \cong D'_1 \\ D_2 \cong D'_2 \end{array} \right] \quad \text{Les dates des cassures sont sensiblement les mêmes}$$

$$\left[\begin{array}{l} \frac{n_2}{n_1} \cong \frac{n'_2}{n'_1} \\ \frac{P_2}{P_1} \cong \frac{P'_2}{P'_1} \end{array} \right] \quad \text{Les erreurs systématiques sont sensiblement les mêmes}$$

Après ces vérifications, on peut alors reconstituer des séries homogènes en considérant que les mesures actuelles sont les bonnes :

- x est la variable stable ;

Généralités sur les précipitations

- les valeurs de y seront multipliées par le rapport $\frac{n_2}{n_1} \cong \frac{n'_2}{n'_1}$ pour la période antérieure à la date

$D1 \cong D'1$;

- les valeurs de z seront multipliées par le rapport $\frac{P_2}{P_1} \cong \frac{P'_2}{P'_1}$ pour la période antérieure à la date

$D2 \cong D'2$. (Laborde, 2000)

1.3.4.2. Méthode du cumul des résidus de régression

Cette méthode beaucoup plus puissante que la méthode des doubles masses, nécessite cependant des calculs un peu plus longs exigeant pour le moins une calculatrice capable de stocker l'ensemble de l'information.

Comme on vient de le dire au paragraphe suivant, le résidu ε_i est une variable aléatoire gaussienne de moyenne nulle et d'écart-type $\sigma_y \sqrt{1 - \sigma^2}$.

On définit alors la variable Z_i , cumul des i premiers résidus :

$$Z_i = \sum_{j=1}^i \varepsilon_j$$

Cette variable Z_i est une variable aléatoire de moyenne nulle et d'écart-type :

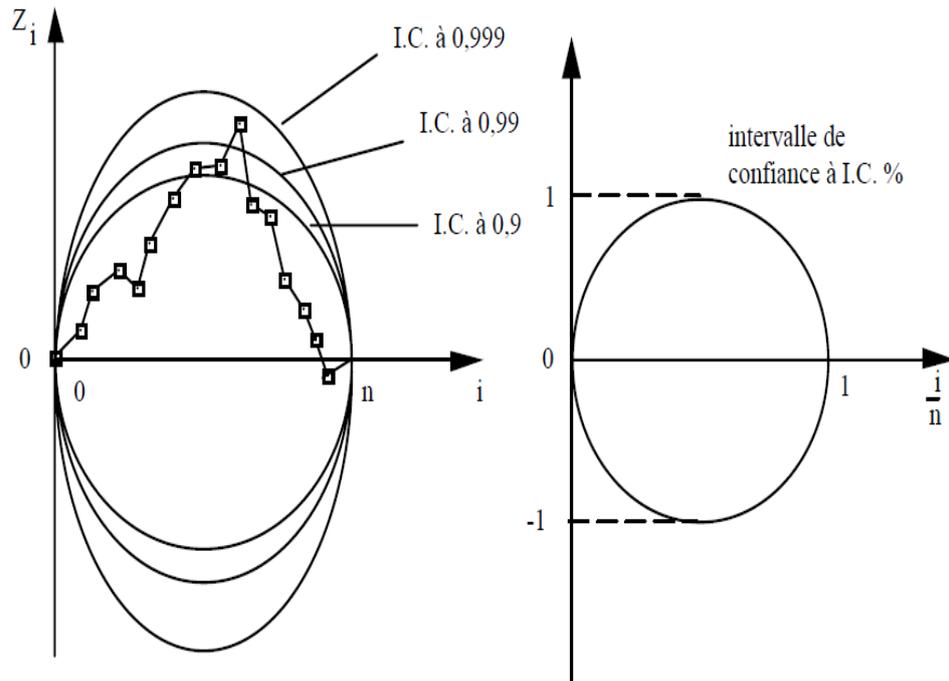
$$\sigma_{Z_i} = \sigma \varepsilon \sqrt{\frac{i(n-i)}{n-1}}$$

Si on se fixe par exemple un intervalle de confiance à 99 %, il y a une chance sur cent pour que Z_i soit extérieur au segment :

$$[-u_{0.995} \sigma_{Z_i}, +u_{0.995} \sigma_{Z_i}] \text{ (Roche, 1960)}$$

$$u_{0.995} = 2.573 \quad , \quad Z_i = \sigma \varepsilon \sqrt{\frac{j(n-j)}{n-1}}$$

Généralités sur les précipitations



Lorsque j varie, le lieu des limites des segments ayant la même probabilité de contenir Z_i sont des ellipses passant par $Z = 0$ pour $i = 0$ et $Z = 0$ pour $i = n$.

Sur les graphiques ci-dessus, on a porté les cumuls des résidus en fonction de i . Plusieurs ellipses ont été tracées en fonction des intervalles de confiance envisagés. L'écart cumulé sort, on le voit, de l'ellipse correspondant à I.C. = 99 %. Il est donc vraisemblable que cela ne soit pas dû au hasard. Pour des commodités de tracé, on préfère souvent porter Z_i en fonction de $\frac{i}{n}$.

On pose $Z_i^i = \frac{2\sqrt{n-1}}{u_{IC}\sigma\epsilon n}$ est la variable réduite de Gauss correspondant à l'intervalle de confiance à IC %. (Laborde, 2000)

1.3.4.3. Analyse en composantes principales

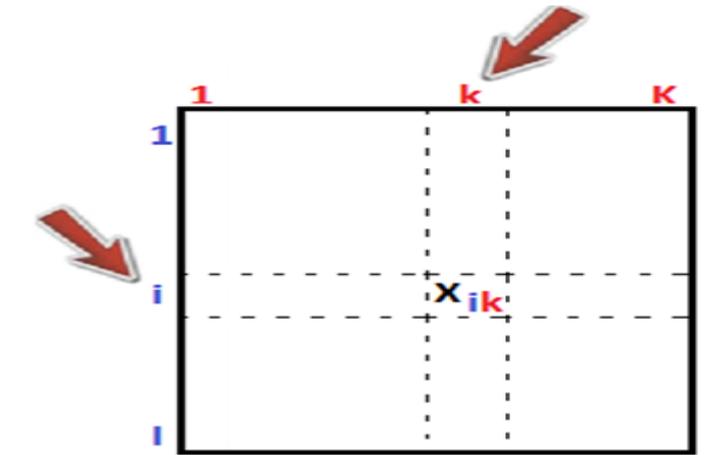
L'analyse en composantes principales, introduite par K. Pearson et Thurston (années 20), est une technique des statistiques descriptives destinée à l'analyse des données multidimensionnelles.

C'est une méthode d'une façon plus générale de la statistique multivariée, qui consiste à transformer des variables liées entre elles (dites "corrélées" en statistique) en nouvelles variables indépendantes les unes des autres (donc "non corrélées"). Ces nouvelles variables sont appelées "composantes principales", ou axes.

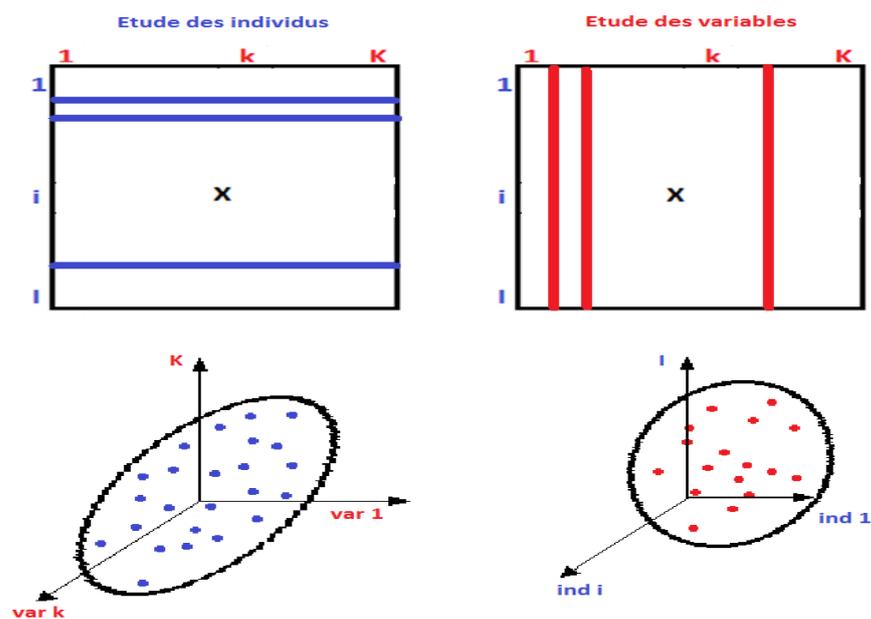
Généralités sur les précipitations

L'objectif de l'Analyse en Composantes Principales est de revenir à un espace de dimension réduite en déformant le moins possible la réalité. Il s'agit donc d'obtenir le résumé le plus pertinent des données initiales.

L'ACP s'intéresse à des tableaux de données avec des individus i en ligne et des variables k en colonnes.



- Pour les individus, on cherche à établir des ressemblances du point de vue de l'ensemble des variables (Construire de groupes d'individus).
- Pour les variables on recherche des ressemblances (liaisons) entre celles-ci (Construire une matrice de corrélation).



Généralités sur les précipitations

1.4. Conclusion

La pluie est un phénomène aléatoire qui varie dans l'espace et dans le temps. Ce caractère rend difficile sa mesure avec précision.

Dans ce chapitre on a présenté des généralités sur les précipitations comme l'origine, les types des précipitations et les méthodes de mesure les précipitations.

Dans la mesure des précipitations, il y a des erreurs dans les données pluviométriques au niveau des stations. Lorsque on utilise ces données, en particulier pour analyser l'évolution de la pluviométrie, il faut tenir compte cette imprécision.

Chapitre 2

Etude de la tendance et des ruptures

Méthodes d'étude de la tendance et des ruptures

2.1. Introduction

À la différence de l'exploration de données, les méthodes de statistiques classiques exigent de se fixer une hypothèse de façon préalable à tout travail.

Il est bien évident que la statistique (c'est-à-dire la variable d'échantillonnage) servant d'estimateur au paramètre de la population ne prendra pas une valeur rigoureusement égale à la valeur théorique proposée dans l'hypothèse. Cette variable aléatoire comporte des fluctuations d'échantillonnage qui sont régies par des distributions connues.

Pour décider si l'hypothèse formulée est supportée ou non par les observations, il faut une méthode qui permettra de conclure si l'écart observé entre la valeur de la statistique obtenue dans l'échantillon et celle du paramètre spécifiée dans l'hypothèse est trop important pour être uniquement imputable au hasard de l'échantillonnage. (Course Hero)

2.2. Généralités

2.2.1. Hypothèse statistique

Une hypothèse statistique est un énoncé (une affirmation) concernant les caractéristiques (valeurs des paramètres, forme de la distribution des observations) d'une population.

2.2.2. Test d'hypothèse

Un test d'hypothèse (ou test statistique) est une démarche qui a pour but de fournir une règle de décision permettant, sur la base de résultats d'échantillon, de faire un choix entre deux hypothèses statistiques.

2.2.3. Hypothèse nulle (H_0) et hypothèse alternative (H_1)

L'hypothèse selon laquelle on fixe à priori un paramètre de la population à une valeur particulière s'appelle l'hypothèse nulle et est notée H_0 . N'importe quelle autre hypothèse qui diffère de l'hypothèse H_0 s'appelle l'hypothèse alternative (ou contre-hypothèse) et est notée H_1 .

C'est l'hypothèse nulle qui est soumise au test et toute la démarche du test s'effectue en considérant cette hypothèse comme vraie.

La littérature spécifique rapporte que pour établir les règles de décision, une démarche est suivie pour accepter ou rejeter l'hypothèse nulle H_0 . Toutefois cette décision est fondée sur

Méthodes d'étude de la tendance et des ruptures

une information partielle, les résultats d'un échantillon. Il est donc statistiquement impossible de prendre la bonne décision à coup sûr. En pratique, la démarche permet, à long terme, de rejeter à tort une hypothèse nulle vraie dans une faible proportion de cas. La conclusion qui sera déduite des résultats de l'échantillon aura un caractère probabiliste : on ne pourra prendre une décision qu'en ayant conscience qu'il y a un certain risque qu'elle soit erronée. Ce risque est donné par le seuil de signification du test.

2.3. La stationnarité

Une série chronologique est dite stationnaire si ses propriétés sont invariables dans le temps. Pour le cas de précipitations, ce concept statistique explique mieux l'évolution de ce paramètre.

La littérature hydrologique s'intéresse plus particulièrement à deux formes majeures de non stationnarité ; les tendances et les ruptures.

- **Une tendance** est un changement graduel dans les propriétés d'une variable aléatoire. On peut noter par ailleurs qu'une série peut présenter des fluctuations notables dans le temps sans qu'il y ait véritablement une direction privilégiée. Ces variations traduisent la variabilité intrinsèque des séries hydrologiques et climatiques.

- **Une rupture** désigne une modification subite dans les propriétés d'un processus aléatoire.

La stationnarité est donc l'étude de changement des éléments climatiques d'une série chronologique.

Concernant la classification des tests de stationnarité, les tests disponibles se focalisent sur des points très particuliers, il importe donc de choisir des tests qui s'approprient bien à la situation. Par exemple, un test de tendance en moyenne pourra aboutir à la conclusion qu'il n'y a pas de tendance en moyenne pour la série testée mais n'apportera aucune information concernant la variance ou la fréquence et la magnitude des extrêmes qui peuvent très bien avoir évolué.

Certains tests détectent très bien un type donné de changement, d'autres s'attachent plus à mettre un simple changement dans la distribution sans en préciser le type. Si l'on ignore la nature du changement, il semble judicieux d'utiliser plusieurs tests différents et de comparer les résultats obtenus. (Belarbi, 2010)

2.3.1. Tests de tendance

2.3.1.1. Test de Mann-Kendall

C'est un test non paramétrique. Il utilise la série des rangs au lieu de la série d'observations qui permet de déterminer le seuil de signification pour la présence d'un terme tendanciel. Soit la série X_i , i varie de 1 à n , on calcule pour chaque élément, le nombre élément qui le précède et qui lui est inférieur et l'on fait la somme de ces nombres (t). Plus (t) est grand, plus l'organisation de la série est importante. La variable (t) est distribuée selon la loi normale.

$$(t) = \sum_{i=1}^n n_i \dots\dots\dots(2.1)$$

La moyenne et la variance sont données respectivement par les formules si après :

$$E(t) = \frac{n(n-1)}{4} \dots\dots\dots(2.2)$$

$$\text{Var}(t) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \dots\dots\dots(2.3)$$

Si on détermine la probabilité (α_1) à l'aide de la table de la loi normale centrée réduite, tel que

$$\alpha = P(|U| > U(t)) \dots\dots\dots(2.4)$$

Avec :

$$U(t) = \frac{[t-E(t)]}{\sqrt{\text{var}(t)}} \dots\dots\dots(2.5)$$

U : variable centrée réduite

L'hypothèse est nulle (absence de tendance significative) est acceptée ou rejetée au niveau de α_0 selon que l'on a $\alpha_1 > \alpha_0$ ou $\alpha_1 < \alpha_0$; On conclue à une tendance croissante ou décroissante selon que $U(t)$ est positive ou négative.

Dans le cas d'une tendance significative, les deux courbes progressive et rétrograde permettent de situer approximativement la date du début de cette tendance. (Belarbi, 2010)

2.3.1.2. Test de Kruskal-Wallis

Ce test très utilisé en pratique, sert à vérifier la tendance en escalier d'une série de données, en vérifiant l'égalité des moyennes de k sous-échantillons (K.ruskall et Wallis, 1952).

Méthodes d'étude de la tendance et des ruptures

Contrairement au test de Terpstra-Jonckheere, l'hypothèse alternative est qu'au moins une des moyennes est différente des autres (Cochet et Bobée, 1980).

Soit la variable K telle que :

$$K = \frac{12}{N(N-1)} \left(\sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} \right) - 3(N+1) \dots\dots\dots(2.6)$$

Où R_i est la somme des rangs de l'échantillon i de taille n_i .

On peut montrer que pour un échantillon contenant plus de deux sous-échantillons ($k > 2$), chacun de taille supérieure à 5 ($n_i > 5$), la statistique K suit approximativement une loi du khi-deux à $k-1$ degrés de liberté.

2.3.1.3. Test de Mann

Le test de Mann est utilisé pour tester si les données d'une série sont ordonnées aléatoirement contre l'alternative d'une tendance monotone dans le temps (WMO, 1988). Considérons les rangs R_i des N observations rangées en ordre chronologique.

Soit la variable S telle que :

$$M = \sum_{i < j}^N S_{ij} \dots\dots\dots(2.7)$$

Où :

$$S_{ij} = 1 \text{ si } (R_j - R_i) > 0$$

$$S_{ij} = 0 \text{ si } (R_j - R_i) = 0$$

$$S_{ij} = -1 \text{ si } (R_j - R_i) < 0$$

On peut montrer que pour un échantillon de grande taille ($N \geq 10$), la statistique M suit approximativement une distribution normale de moyenne $E[M]$ et de variance $\text{Var}[M]$. On calcule ainsi la moyenne et la variance de la variable M de la façon suivante :

$$E[M] = 0 \dots\dots\dots(2.8)$$

$$\text{Var}[M] = \frac{N(N-1)(2N+5)}{18} \dots\dots\dots(2.9)$$

La statistique du test sous l'hypothèse nulle (données distribuées aléatoirement) est alors :

Méthodes d'étude de la tendance et des ruptures

$$Z = \frac{M - E[M]}{\sqrt{\text{Var}M}} \approx N(0,1) \dots\dots\dots (2.10)$$

2.3.1.4. Test de Kendall

Le test d'indépendance de Kendall (1976) peut être utilisé pour tester la stationnarité d'une série de données. Il consiste à assigner une valeur de 1 à chacune des observations X_i supérieure ou inférieure à l'observation la précédant et à l'observation la suivant :

Si $\{X_i > X_{i-1}; X_i > X_{i+1}\}$ ou $\{X_i < X_{i-1}; X_i < X_{i+1}\}$; alors on assigne une valeur de 1 à X_i ; Sinon, on assigne une valeur de 0 à X_i ;

Sinon, on assigne une valeur de 0 à X_i .

Soit la variable K telle que :

K = nombre de valeurs de 1 obtenues par le critère ci-haut

Pour un échantillon de taille N suffisamment grand, on peut montrer que la variable K suit approximativement une distribution normale de moyenne $E [K]$ et de variance $\text{Var} [K]$, données par :

$$E[K] = \frac{2(N-2)}{3} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$\text{Var} [K] = \frac{16N-29}{90} \dots\dots\dots (2.12)$$

La statistique du test sous l'hypothèse nulle (absence de tendance dans la série) est alors :

$$Z = \frac{K - E[K]}{\sqrt{\text{Var} [K]}} \approx N(0,1) \dots\dots\dots (2.13)$$

2.3.1.5. Test de Gold

Le test d'indépendance de Gold peut être utilisé pour tester la stationnarité d'une série de données. Il consiste à évaluer le nombre de séquences de données inférieures ou supérieures à la médiane. (Dany Faucher, Juin 1997)

Soit les variables s et G telles que :

s = le nombre d'observations d'une série de données consécutives inférieures ou supérieures à la médiane.

Méthodes d'étude de la tendance et des ruptures

$G(s)$ = le nombre total de séries de taille s , étant inférieures ou supérieures à la médiane.

L'espérance de la variable $G(s)$ est donnée par :

$$E[G(s)] = \frac{(N+3-s)}{2^{s+1}} \dots\dots\dots (2.14)$$

Où N est la taille de la série de données. On peut montrer que sous l'hypothèse nulle d'absence de tendance, la statistique Q suivante suit approximativement une loi du khi-deux avec $(s'-1)$ degrés de liberté :

$$Q = \sum_{s=1}^{s'} \left(\frac{(G(s)-E[G(s)])^2}{E[G(s)]} \right) \approx \chi^2_{\alpha, (s'-1)} \dots\dots\dots (2.15)$$

Où s' : représente la longueur maximale d'une séquence de données étant inférieures ou supérieures à la médiane.

2.3.1.6. Régression

Une méthode proposée par Woodward et Gray (1993), utilise un modèle de régression pour détecter la présence d'une tendance dans une série de N observations. L'équation suivante représente le modèle où :

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 t + e_1 \dots\dots\dots (2.16)$$

Où :

t : la variable indépendante du modèle, représente le temps;

Y_1 : la variable dépendante du modèle, représente la caractéristique d'intérêt (température, débit, ...);

e_1 : représente les résidus ;

β_0 : représente l'ordonnée à l'origine de la droite de régression;

β_1 : représente la pente de la droite de régression.

L'approche consiste donc à tester l'hypothèse suivante :

$$H_0 : \beta_1 = 0 \quad \text{(la pente de la droite de régression est nulle)}$$

(Absence de tendance dans la série)

Méthodes d'étude de la tendance et des ruptures

Avec l'hypothèse alternative :

$$H_1 : \beta_1 \neq 0 \quad (\text{présence d'une tendance croissante ou décroissante})$$

Si l'on a une idée a priori du sens de la tendance, c'est-à-dire si l'on sait qu'elle est soit croissante ou décroissante, on peut effectuer un test unilatéral ($H_1: \beta_1 > 0$ ou $H_1: \beta_1 < 0$).

Si l'on suppose que les observations sont recueillies à intervalles de temps constants, de façon à ce que $t = 1, 2, 3, \dots, n$, on a l'estimation suivante de la pente de la droite de régression par la méthode des moindres carrés :

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (t - \bar{t}) Y_1}{\sum_{i=1}^n (t - \bar{t})^2} \dots\dots\dots (2.17)$$

Sous l'hypothèse que les résidus sont indépendants et normalement distribués $N(0, \sigma^2)$, on peut estimer la variance de $\widehat{\beta}_1$ de la façon suivante:

$$\widehat{\sigma}_{\beta_1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_1 - \widehat{\beta}_0 - \widehat{\beta}_1 t)^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (t - \bar{t})^2}} \dots\dots\dots (2.18)$$

En utilisant l'identité

$$\sum_{i=1}^n (t - \bar{t})^2 = \frac{n(n^2-1)}{12} \dots\dots\dots (2.19)$$

On obtient :

$$\widehat{\sigma}_{\beta_1} = \sqrt{\frac{12 \sum_{i=1}^n (Y_1 - \widehat{\beta}_0 - \widehat{\beta}_1 t)^2}{n(n-2)(n^2-1)}} \dots\dots\dots (2.20)$$

Où : $\widehat{\beta}_0 = \bar{Y} - \widehat{\beta}_1 \bar{t}$

On peut montrer que, sous l'hypothèse H_0 (pente nulle), la statistique $t_0 = \widehat{\beta}_1 / \widehat{\sigma}_{\beta_1}$ suit approximativement une distribution de Student avec $N-2$ degrés de liberté. (Dany Faucher, Juin 1997)

2.3.2. Tests de rupture

Deux types de rupture sont recherchés : une rupture dans la moyenne et une inversion dans la tendance.

Méthodes d'étude de la tendance et des ruptures

2.3.2.1. Test de PETTIT

Il reprend le fondement du test de Mann – Whitney en le modifiant ; le test de PETTITT est un test sur le rang : il est donc non paramétrique et libre. Ce test est réputé, robuste et ses performances en terme de puissance sont supérieures.

Le test de Pettit consiste à découper la série principale de N éléments en deux sous séries à chaque instant t compris entre 1 et N- 1.

On dit que la série principale présente une rupture à l'instant t si les deux sous séries ont des distributions différentes.

Si l'hypothèse nulle H_0 de non rupture est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée pour l'instant t, présentant le maximum de la valeur absolue de la variable $U_{t,N}$.

$$K_N = \max |U_{t,N}| \dots\dots\dots (2.21)$$

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \dots\dots\dots (2.22)$$

Avec : $D_{ij} = (X_i - X_j)$ où :

$$D_{ij} = 1 \quad \text{Si } X_i - X_j > 0$$

$$D_{ij} = 0 \quad \text{Si } X_i - X_j = 0$$

$$D_{ij} = -1 \quad \text{Si } X_i - X_j < 0$$

D_{ij} étant $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$ où X_i est le vecteur des données trié par date et la fonction *sgn* est définie par :

$$\text{sgn}(X) = 1 \text{ pour } X > 0 ; \text{sgn}(X) = 0 \text{ pour } X = 0 \text{ et } \text{sgn}(X) = -1 \text{ pour } X < 0$$

Soit α , représentant un risque de première espèce, en pratique de 5% ;

H_0 est rejetée si une certaine probabilité calculée à partir d'une série chronologique étudiée est inférieure à α :

$$Pr_0(K_N > K) = 2 \exp [-6K^2 / (N^3 + N^2)] \dots\dots\dots (2.23)$$

Avec K représentant la valeur de K_N prise sur la série étudiée

Le seuil de signification est donné par la quantité suivante :

Méthodes d'étude de la tendance et des ruptures

$$Q = \pm \sqrt{\frac{-(N_3 + N_2) \log\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{6}} \dots\dots\dots (2.24)$$

Ce test a été choisi pour son utilisation dans de nombreuses études de détection de la stationnarité, pour sa robustesse et sa puissance surtout en ce qui concerne le test de rupture sur la moyenne. (Belarbi, 2010)

2.3.2.2. Test de Buishand

Le test de Buishand est un test paramétrique. Il est appliqué pour les chroniques disposant d'au moins 10 valeurs et dont la distribution est normale. Ce test suppose un non changement de la variance de la série. (Ababsa, 2018)

L'hypothèse H₀ est l'absence de rupture dans la chronique.

Ce test est construit à partir des écarts cumulés à la moyenne jusqu'à un rang *k*, noté S_k :

$$S_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}) \dots\dots\dots (2.25)$$

La statistique du test (Z) est obtenue par la division des valeurs S_k par la déviation standard ou écart type :

$$Z = \max \left(\frac{|S_k|}{\sqrt{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n}}} \right) \dots\dots\dots (2.26)$$

Une valeur de Z élevée est un signe d'une rupture dans la chronique. La significativité du test est calculée en comparant la valeur de Z à des valeurs critiques. Ces valeurs prises en compte sont celles évaluées par Buishand (1982) par la génération de séquences aléatoires. Ces valeurs sont données comme suit :

Tableau 1 : Valeurs critiques de Z

N	Z au niveau de confiance		
	α=0,10	α=0,05	α=0,01
10	1,5	1,05	1,14
20	1,10	1,10	1,22
30	1,12	1,12	1,24
40	1,13	1,13	1,26
50	1,14	1,14	1,27
100	1,17	1,17	1,29
∞	1,22	1,22	1,36

Méthodes d'étude de la tendance et des ruptures

2.3.2.3. Test de Wilcoxon

On peut utiliser le test de Wilcoxon pour évaluer s'il existe une différence significative entre la moyenne d'une série avant le saut et la moyenne de la série après le saut. Évidemment, il faut connaître a priori le moment du saut pour être en mesure d'effectuer ce test. (Dany Faucher, Juin 1997)

On divise alors la série de données en deux sous-échantillons de taille n_1 et n_2 , regroupant respectivement les observations situées avant et après le saut de la moyenne respectivement, de sorte que $N = n_1 + n_2$. On cherche donc à tester l'hypothèse suivante :

$H_0 : u_1 = u_2$ les moyennes avant et après le saut sont égales

Avec l'hypothèse alternative (dans le cas d'un test bilatéral):

$H_1 : u_1 \neq u_2$ les moyennes avant et après le saut sont différentes

Tel que déjà mentionné dans la section 2, les tests non paramétriques sont effectués non pas sur les données elles-mêmes, mais sur les rangs associés à ces observations. On range donc la série en ordre croissant et on associe un rang de classement à chacune des observations. On obtient alors :

R_1, R_2, \dots, R_{n_1} : les rangs des observations situées avant le saut dans l'échantillon total ;

S_1, S_2, \dots, S_{n_2} : les rangs des observations situées après le saut dans l'échantillon total.

Pour tous les tests non paramétriques qui s'appuient sur la notion de rang de classement, à moins d'avis contraire, les rangs des données situées dans k sous-groupes sont assignés selon leur position dans l'échantillon total.

2.3.2.4. Test de Mann-Whitney

On peut utiliser le test de Mann-Whitney pour évaluer s'il existe une différence significative entre la moyenne d'une série avant le saut et la moyenne de la série après le saut. On doit cependant connaître a priori le moment du saut pour être en mesure d'effectuer ce test. (Dany Faucher, Juin 1997)

Soit n_1 et n_2 : le nombre d'observations situées avant et après le saut de la moyenne respectivement, de sorte que $N = n_1 + n_2$. On range les données en ordre croissant et on peut ainsi calculer les valeurs suivantes :

Méthodes d'étude de la tendance et des ruptures

$$V = W_r(n_1, n_2) - \frac{n_1(n_1+1)}{2} \dots\dots\dots (2.27)$$

$$W = n_1 n_2 - V \dots\dots\dots (2.28)$$

Où $W_r(n_1, n_2)$ est la statistique du test de Wilcoxon, la somme des rangs des données situées avant le saut de la moyenne. V représente le nombre de fois qu'une observation située avant le saut suit une observation située après le saut dans l'échantillon global selon les rangs qui leur ont été assignés et W représente le nombre de fois qu'une observation située après le saut suit une observation située avant le saut dans l'échantillon global.

Soit la variable U telle que :

$U =$ la plus faible des valeurs entre V et W .

$$U = \text{minimum}(V, W)$$

Pour un échantillon de taille N supérieure à 20 et pour des tailles de groupes n_1 et n_2 supérieures à 3, on peut montrer que la variable U suit approximativement une loi normale de moyenne $E[U]$ et de variance $\text{Var}[U]$, données respectivement par :

$$E[U] = \frac{n_1 n_2}{2} \dots\dots\dots (2.29)$$

$$\text{Var}[U] = \frac{n_1 n_2}{N(N-1)} \left(\frac{N^3 - N}{12} - \sum T \right) \dots\dots\dots (2.30)$$

Avec $T = (J^3 - J) / 12$, où J est le nombre d'égalités à un certain rang. La somme $\sum T$ se fait pour toutes les égalités de rangs dans les deux groupes de données de taille n_1 et n_2 .

La statistique du test sous l'hypothèse nulle (égalité des moyennes) est alors :

$$Z = \frac{U - E(U)}{\sqrt{\text{Var}(U)}} \approx N(0,1) \dots\dots\dots (2.31)$$

Où $N(0,1)$ représente la distribution normale de moyenne nulle et de variance égale à 1.

2.3.2.5. Test de Student

Le test de Student relatif à la comparaison de la moyenne de deux populations peut être utilisé pour évaluer l'existence de sauts dans la moyenne d'une population. Ce test consiste à vérifier si la moyenne des données situées avant un saut est significativement différente de la moyenne des données situées après ce saut. Notons μ_1 la moyenne des n_1 données situées

Méthodes d'étude de la tendance et des ruptures

avant le saut et μ_2 la moyenne des n_2 observations situées après le saut. Le test consiste alors à examiner l'hypothèse suivante :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

Avec l'hypothèse alternative :

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

On peut facilement montrer que la statistique du test, t_0 est distribuée selon une loi de Student à $n_1 + n_2 - 2$ degrés de liberté.

$$t_0 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \approx t_{\alpha/2, n_1 + n_2 - 2} \dots \dots \dots (2.32)$$

Où :

$$S_p = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \dots \dots \dots (2.33)$$

Où s_1^2 et s_2^2 représentent les variances non biaisées des données situées avant et après le saut et S_p représente la variance combinée des deux sous-échantillons. (Dany Faucher, Juin 1997)

2.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné des généralités sur les tests statistiques (les tests de tendance et les tests de détection de rupture), que nous allons utiliser dans le prochaine chapitre (chapitre 4) à l'aide d'un programme de statistique (XLSTAT).

Chapitre 3

Généralités sur la région d'étude

Généralités sur la région d'étude

3.1. Introduction

Le Sahara est le plus grand des déserts, mais également le plus expressif et typique par son extrême aridité, c'est à dire celui dans lequel les conditions désertiques atteignent leur plus grande âpreté.

Le Sahara s'étend à travers le tiers septentrional du continent africain de l'atlantique à la mer rouge, sur une surface totale de 8 millions de Km². C'est là où les conditions climatiques atteignent leur plus grande sévérité. Pratiquement, ces limites se situent en deçà des isohyètes 100 à 150mm. Il est subdivisé en ; Sahara septentrional, méridional, central et occidental. (Dubief, 1952).

Le Sahara septentrional, avec 1 million de km², est soumise à un extrême du climat méditerranéen, où les pluies surviennent toujours en hiver. Il se présente comme une zone de transition entre les steppes méditerranéennes nord africaines et le Sahara central. La pluviosité à laquelle il est soumis est comprise entre 50 et 100 mm, (Le Houerou, 1990).

3.2. La géographie

Avec environ 2 millions de km², le Sahara est l'un des plus grands déserts du monde. Il représente plus de 80% de la superficie de l'Algérie. Il se compose d'immenses dunes, de plaines de sable (ergs), de plaines de pierres (regs), d'oasis et de montagnes volcaniques (massif du Tassili et du Hoggar) où culmine le plus haut mont d'Algérie à 2900 mètres d'altitude. Au nord du Sahara, le grand Erg Occidental et Oriental, sont séparés par des plateaux rocheux, tel la région du M'Zab (figure N°10). Ils sont bordés au sud par le plateau de Tademaït. Ce sont d'immenses mers de sable ponctuées d'oasis. Au cœur du Sahara, on y trouve le massif du Hoggar, constitué de roches volcaniques formant des pics, des « *aiguilles volcaniques* » et de hauts plateaux désertiques.

Généralités sur la région d'étude



Figure N°10 : Carte géographique de relief de l'Algérie (<http://www.carte-du-monde.net>)

3.3. Le relief

Lelubre (1952) admet que, s'il y est une région du globe, où les formes de relief sont particulièrement nettes et visibles, c'est bien le Sahara et si les processus morphogénétiques (vent, eau...etc.) à l'œuvre dans ce milieu sont caractéristiques, rien n'est étonnant à ce que les formes qui en résultent le soient aussi. Les principales familles de paysage saharien sont (figure N°11) :

- **Les Hamadas** : Plateaux rocheux à topographie très monotone, souvent plate à perte de vue (Monod, 1992).
- **Les Regs** : Plaines de graviers et de fragments rocheux. Au Sahara, ils occupent des surfaces démesurées (Monod, 1992).
- **Les accumulations sableuses** : Le sable est un élément essentiel du paysage saharien. Cependant, les dunes sont loin de recouvrir la totalité du Sahara, mais se localisent généralement dans de vastes régions ensablées appelées les ergs (Lelubre, 1952). D'après Gardi (1973), les dunes peuvent avoir des formes différentes en fonction de la direction dominante du vent.
- **Les dépressions**
- **Les dayas** : Petites dépressions circulaires, résultant de la dissolution locale des dalles calcaires ou siliceuses qui constituent les Hamadas (Ozenda, 1991).

Généralités sur la région d'étude

- **Les Sebkhha et les Chott** : Lorsque les eaux s'évaporent sous l'effet de la chaleur, des plaques de sels divers se déposent en surface formant suivant l'origine de leurs eaux (phréatiques ou superficielles) les chotts et les sebkhhas (Monod, 1992).
- **Les lits d'Oueds** : C'est l'espace qui peut être occupé par des eaux d'un cours d'eau. Ses matériaux peuvent avoir comme origine soit des roches en place, soit des matériaux transportés par le cours (Derruau, 1967).

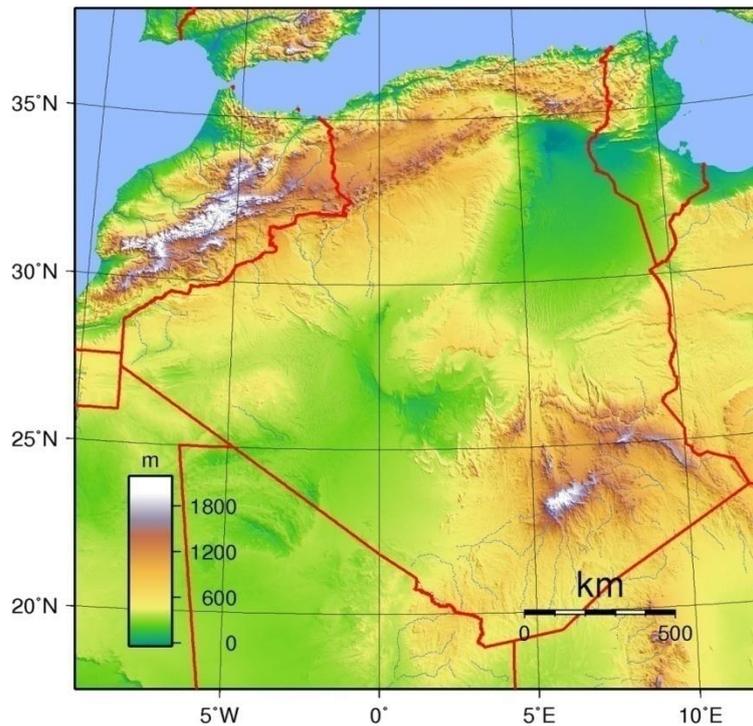


Figure N°11 : Carte du relief de l'Algérie

3.4. Le climat

Les caractères du climat saharien sont dus, tout d'abord, à la situation en latitude, au niveau du tropique, ce qui entraîne de fortes températures, et au régime des vents qui se traduit par des courants chauds et secs (figure N°12). Ce climat est caractérisé notamment par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations, une luminosité intense, une forte évaporation et de grands écarts de température.

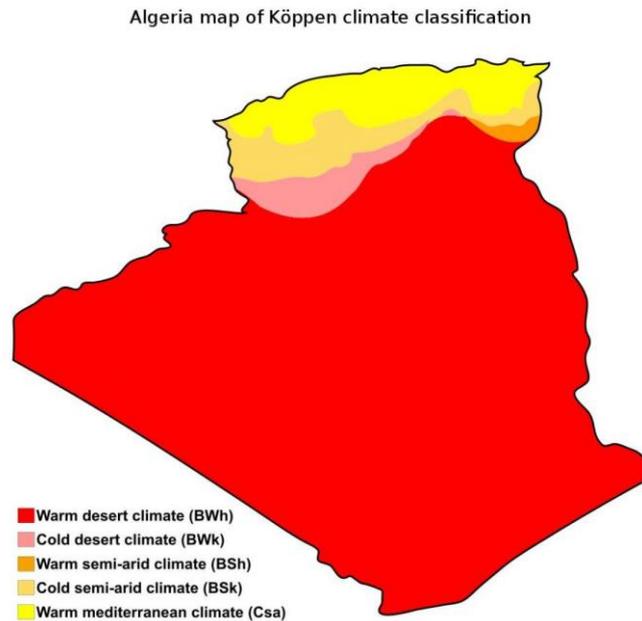


Figure N°12: Carte du climat en Algérie (EarthwiseTM, 2017)

3.4.1. La pluviométrie

Les précipitations ont pratiquement toujours lieu sous forme de pluies. Elles sont caractérisées par leur faible importance quantitative et les pluies torrentielles sont rares, Le tableau N°2 donne des valeurs des précipitations dans quelques zones sahariennes. Elles sont liées aux perturbations soudano-sahariennes ou sahariennes. Cette insuffisance de pluies sahariennes est accompagnée d'une irrégularité très marquée du régime pluviométrique et d'une variabilité inter annuelle considérable, ce qui accentue la sécheresse (figure N°13).

Tableau N°2 : Quelques valeurs des précipitations annuelles de Sahara algérien (Wikipédia)

Station	Biskra	Béni Abbès	In Salah	Bordj Badji Mokhtar	Tamanrasset
Précipitation annuelle (mm)	128,8	36,6	24,51	38,1	42,9

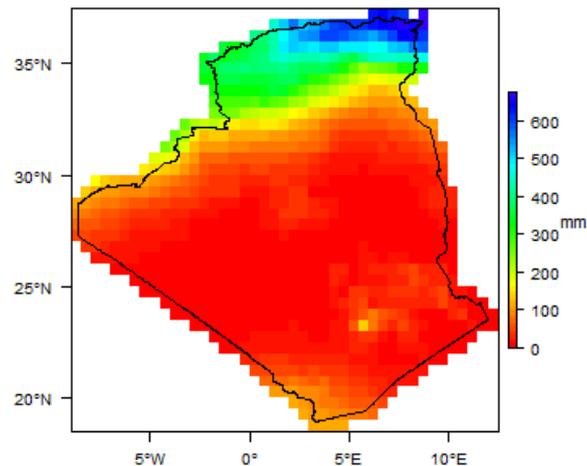


Figure N° 13: Précipitations moyennes annuelles en Algérie (EarthwiseTM, 2017)

3.4.2. La température

Les températures moyennes annuelles sont élevées, avec des maxima absolus pouvant atteindre et dépasser 50 °C, et des minima de janvier variant de 2 à 9 °C (le tableau N°3).

La température du sol en surface peut dépasser 70 °C. Cependant, en profondeur, les températures vont diminuer rapidement et s'équilibrer. Il ne peut geler, normalement, que dans la partie Nord du Sahara et bien entendu sur les montagnes. A cause de la faible nébulosité de l'atmosphère, la quantité de lumière solaire est relativement forte, ce qui a un effet desséchant en augmentant la température. Les durées d'insolation sont évidemment très importantes au Sahara (de 9 à 10 heures par jour) ce désert est avant tout le pays du soleil.

Tableau N°3 : Quelques valeurs de température dans le Sahara algérien (Wikipédia)

Station	Biskra	Béni Abbés	In Salah	Bordj Badji Mokhtar	Tamanrasset
Température minimale moyenne (°C)	17.4	16.35	19.28	20.92	14.86
Température moyenne (°C)	22.84	24.68	27.05	28.46	21.82
Température maximale moyenne (°C)	28.28	32.25	34.83	35.99	28.78

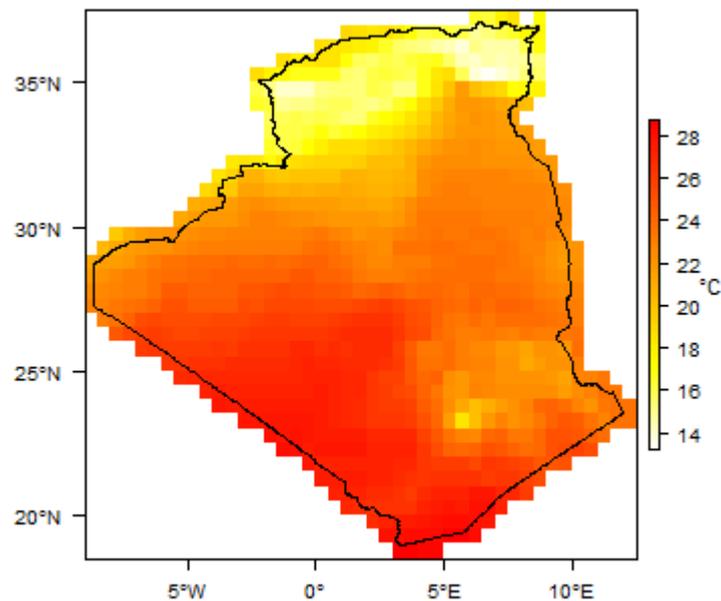


Figure N°14 : Température moyenne en Algérie (EarthwiseTM, 2017)

3.5. La géologie

Schématiquement, on observe un substratum de formation antécambrienne recouvert par des séries sédimentaires pelliculaires plus au moins épaisses.

Ce socle très ancien est formé selon Gardi (1973), de granites, de gneiss, de schistes cristallins et de quartzites, vestiges d'un massif gigantesque à l'époque. Au début de l'ère primaire l'érosion et la désagrégation arasent ce relief et la mue en une vaste pénéplaine. Par la suite, la mer envahit plusieurs fois le socle cristallin du Sahara puis se retire. Il en résulte la formation de diverses couches sédimentaires marines plus au moins considérables. C'est de cette époque que datent les roches calcaires, les grés et les schistes. Au début du secondaire, le Sahara fut un continent, ce qu'atteste la présence de grés riches en bois silicifiés formés à cette époque. Puis la mer déferle une nouvelle fois, et reste jusqu'à l'Eocène au début du Tertiaire. Ce dernier, se caractérise par l'apparition de roches continentales. L'ère Quaternaire au Sahara se distingue par une succession de périodes sèches et humides.

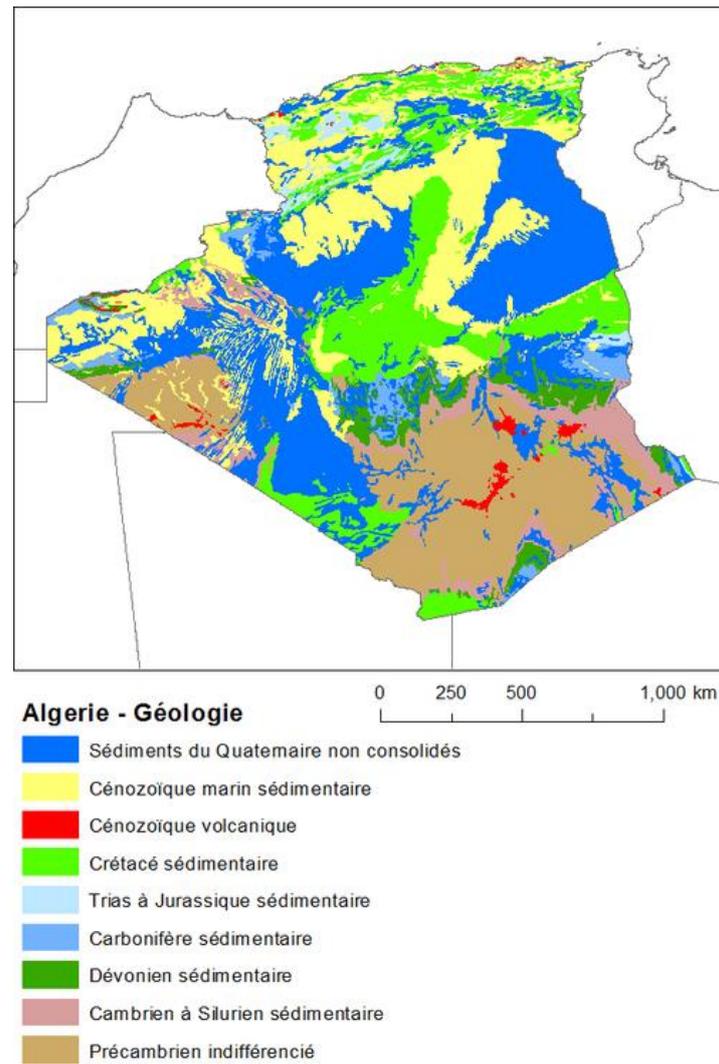


Figure N°15: Carte géologique de l'Algérie (EarthwiseTM, 2017)

3.6. L'hydrographie

Le Sahara de l'Algérie est subdivisée sur quatre bassins hydrographiques :

- **Chott Melhrir** qui contient : Laghouat, Batna, Biskra, Tébessa, Msila, Djelfa, El oued, Khanchla.
- **Hoggar – Tassili** : Adrar, Tamanrasset, Illizi.
- **La Saoura – Tindouf** : Laghouat, Béchar, El Bayadh, Nàama, Tindouf.
- **Sahara Septentrional** : Adrar, Laghouat, Tamanrasset, Djelfa, Ouargla, Illizi, Ghardaïa, El oued.

Généralités sur la région d'étude

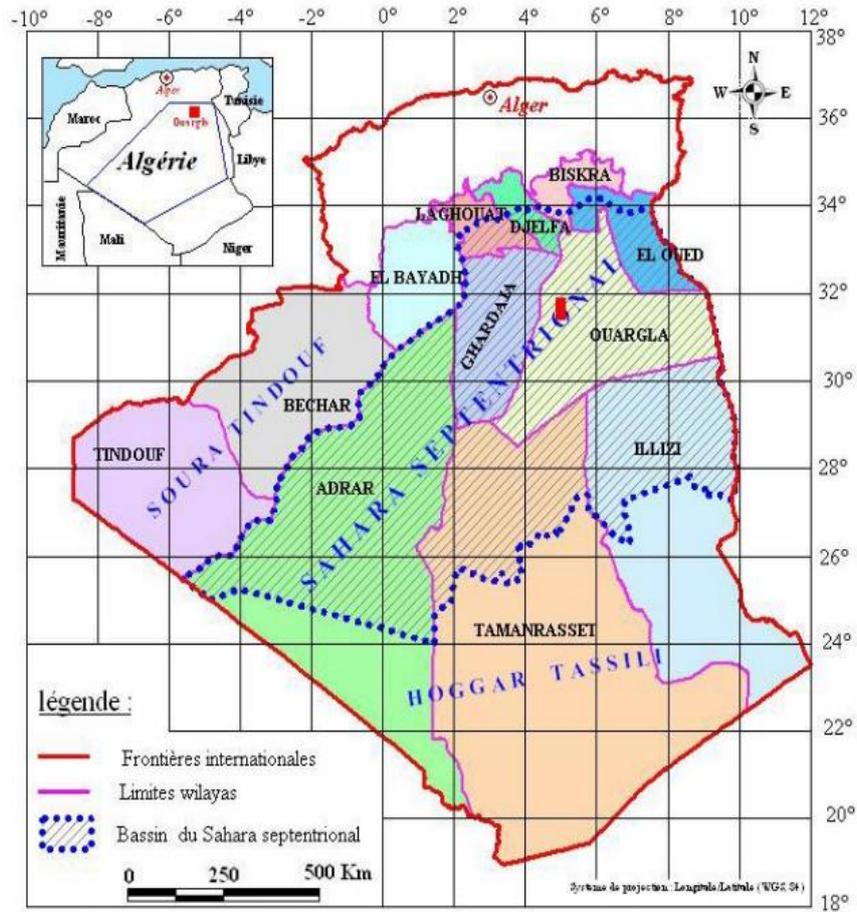


Figure N° 16: Bassins hydrographiques du Sahara algérien (Oulhaci, 2016)

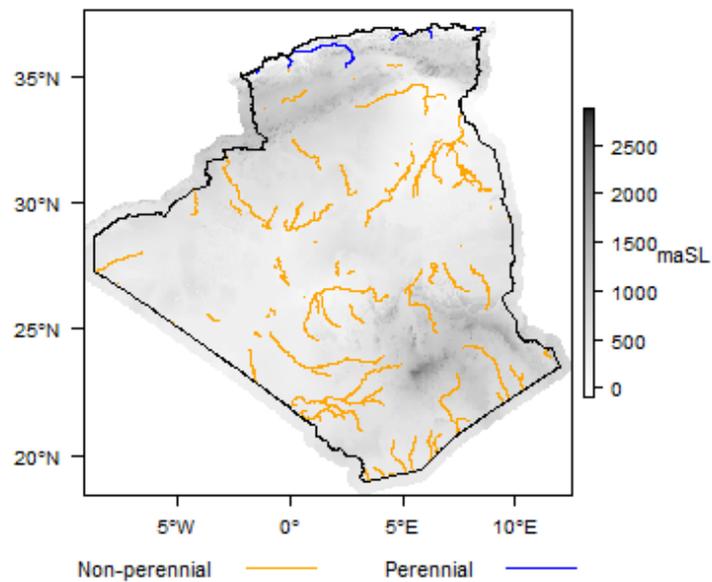


Figure N° 17 : Cours d'eau de l'Algérie (EarthwiseTM, 2017)

*Généralités sur la région d'étude***3.7. L'hydrologie****3.7.1. L'hydrologie superficielle**

Dans ce désert typique qu'est le Sahara, les précipitations sont non seulement rares, mais toujours très irrégulières. Par suite les conditions de l'écoulement y sont particulières (l'absence d'un écoulement permanent dans les talwegs, la désorganisation du réseau hydrographique et la dispersion de l'eau en "mares,"gueltas" ou" redirs").

En effet, les Oueds sahariens n'ont pas un régime de crues régulier mais plutôt de caractère accidentel : quand les pluies s'abattent, les Oueds coulent quelques jours et débordent même. Ce phénomène se produit jusqu'à trois fois par an aux confins Nord du Sahara, beaucoup plus rarement au centre.

Tableau N° 4 : Quelques oueds de Sahara algérien

Bassin versant	Oued	Longueur de l'oued (Km)
Ahaggar – sud	Oued Tamanrasset	400
Ahaggar- sud	Ighergher	350
Mzab	Nsa	320
Mzab	Mzab	320
Confis algéro-marocins	Saoura	810
Aurés-sud constantinois	Biskra	190
Tadmait – sud	Guettara	132
Ajjer – sud	Djanet	96
Ajjer – nord	Ilezi	210

Source : L'hydrologie superficielle au Sahara (Jean Dubief, 1953)

3.7.2. L'hydrogéologie

Au Sahara septentrional, le bassin sédimentaire constitue un vaste bassin hydrogéologique d'une superficie de 780 000 Km², avec un maximum d'épaisseur de 4000 à 5000 m.

Les potentialités du Sahara algérien en terme de ressource en eau, sont évaluées à 5 milliards de m³ par l'A.N.R.H (2000).

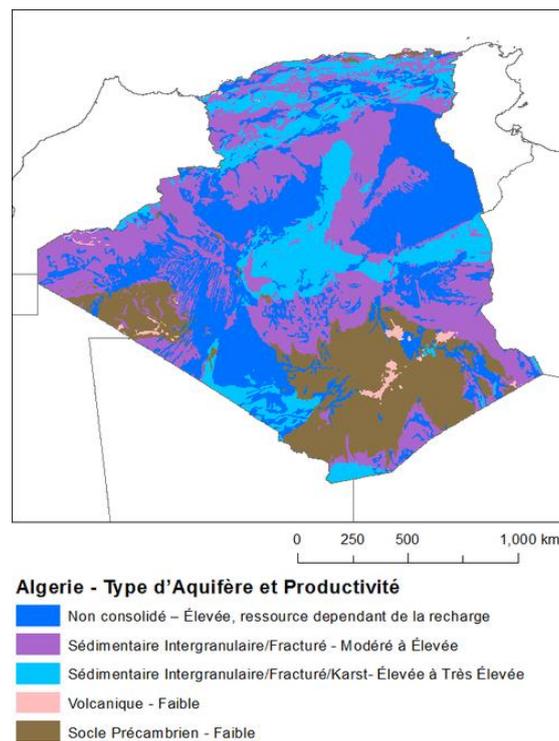


Figure N° 18 : Carte de l'hydrogéologie de l'Algérie (EarthwiseTM, 2017)

Chapitre 4

Etude de la pluviométrie

Etude de la pluviométrie

4.1. Situation et coordonnées des stations

Dans le contexte d'étudier la pluviométrie dans les régions du sud et sud-est algérien on a sélectionné 14 stations pluviométriques (Tamanrasset, Djanet, In Salah, Adrar, In amenas, El Goléa, Ouargla, Béchar, Ghardaïa, El Oued, Ain Safra, Touggourt, Laghouat et Biskra) qui sont caractérisés par des faibles quantités de pluie tombées. Pour cela on a choisi une série des données pluviométriques de ces 14 stations à des longues durées de 1878 jusqu'à 2018, dans certaines années elle fait des crues catastrophiques (Ghardaïa 2008, Tamanrasset 2017 et 2018).

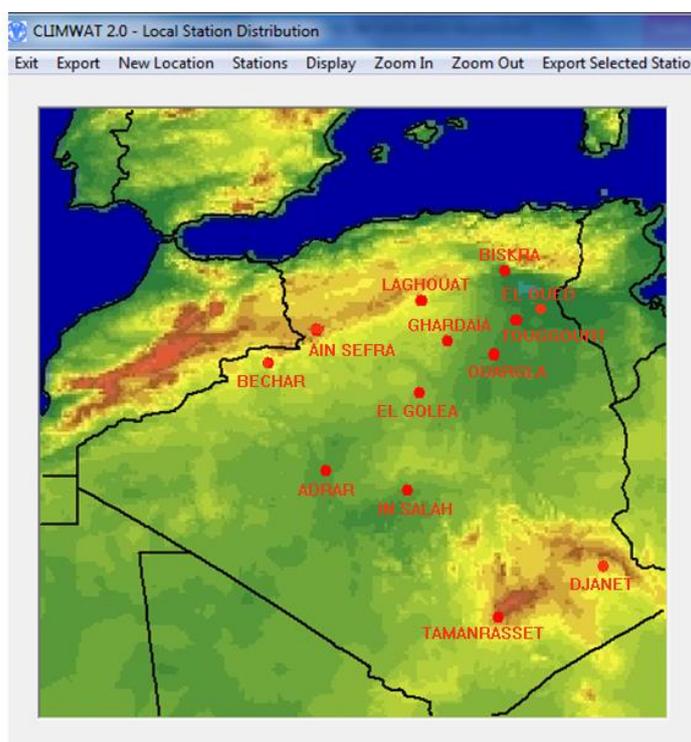


Figure N°19 : Situation géographique des stations climatologiques

La pluviométrie au Sahara est restée peu étudiée au début du XXe siècle. Il a fallu attendre 1953, avec Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara de Dubief (1953), pour la voir traitée. Les réflexions présentées ici s'appuient sur ces travaux fondateurs ainsi que sur des recherches récentes, effectuées en particulier par Meddi.M et Meddi.H (1998) ainsi que par Hirche (2007).

La distribution des stations est très hétérogène avec en particulier une grande dispersion au sud, de plus les stations au Sahara ne sont pas toujours vraiment représentatives de la région car elles sont trop éloignées les unes des autres et généralement mal situées car placées en des

Etude de la pluviométrie

points singuliers, ce qui doit inciter à la prudence dans l'étude des différentes nuances pluviométriques.

Tableau N°5 : les coordonnées des stations pluviométriques et la moyenne interannuelle

Station	Code station	Altitude (m)	Latitude (°)	Longitude (°)	Pluviométrie (mm)
Tamanrasset	60680	1378	22.8	5.5	44.04
Djanet	60670	1054	24.6	9.5	19.8
In Salah	60630	243	27.2	250	11.1
Adrar	60620	264	27.9	-0.9	17.05
In Amenas	60611	562	28.1	9.6	26.92
El Goléa	60590	398	30.4	290	34.5
Ouargla	60580	141	31.9	5.4	14.59
Béchar	60571	806	31.6	-230	47.01
Ghardaïa	60566	450	32.38	3.82	65.2
Ain Safra	60560	1058	32.77	-0.6	161.52
El Oued	60559	63	33.3	6.9	70.11
Touggourt	60555	85	33.1	6	56.52
Laghouat	60545	767	33.8	2.9	170.43
Biskra	60525	81	34.8	5.7	129.07

4.2. Présentation des données

4.2.1. Les données de base

Afin d'étudier l'évolution des précipitations dans les régions du sud et sud-est algérien, on a travaillé avec les données de 14 stations des régions du sud dans une période plus de 30 ans (de 1878 jusqu'à 2018). Les données de ces stations sont caractérisées par les grandes successives périodes lacunaires, et ces lacunes sont trop surtout dans la période après l'indépendance, la figure N°20 présente un exemple de donnée d'une de ces stations

Etude de la pluviométrie

Année	Janv	Fév	Mars	Apr	Mai	Juin	Juill	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
1884	2	6	41.5	0	2,0	3,0	0,0	0,0	0,0	36,0	-999,9	-999,9
1885	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9
1886	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9
1887	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9
1888	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9
1889	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9
1890	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9
1891	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9
1892	0	4	2.5	12.5	10.5	5.0	0.0	0.0	0.0	8.5	-999,9	-999,9
1893	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9
1894	-999,9	6.5	-999,9	12	-999,9	0.0	0.0	0.0	0.0	-999,9	3.1	3.5
1895	0	0.8	1.1	-999,9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1896	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9
1897	0	7	-999,9	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.9
1898	-999,9	-999,9	-999,9	1.5	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9
1899	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	0.0	0.0	0.0	0.0
1900	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1901	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9	-999,9
1902	0	0	11	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	46.0	11.0	0.0

Figure N°20 : Exemple de données brutes de pluie à une station

Selon la figure N°21, les pluies moyennes interannuelles est très faible (ne dépasse pas 200 mm), elles sont variées entre 11.10 mm à In Salah et 170.43 mm à Laghouat.

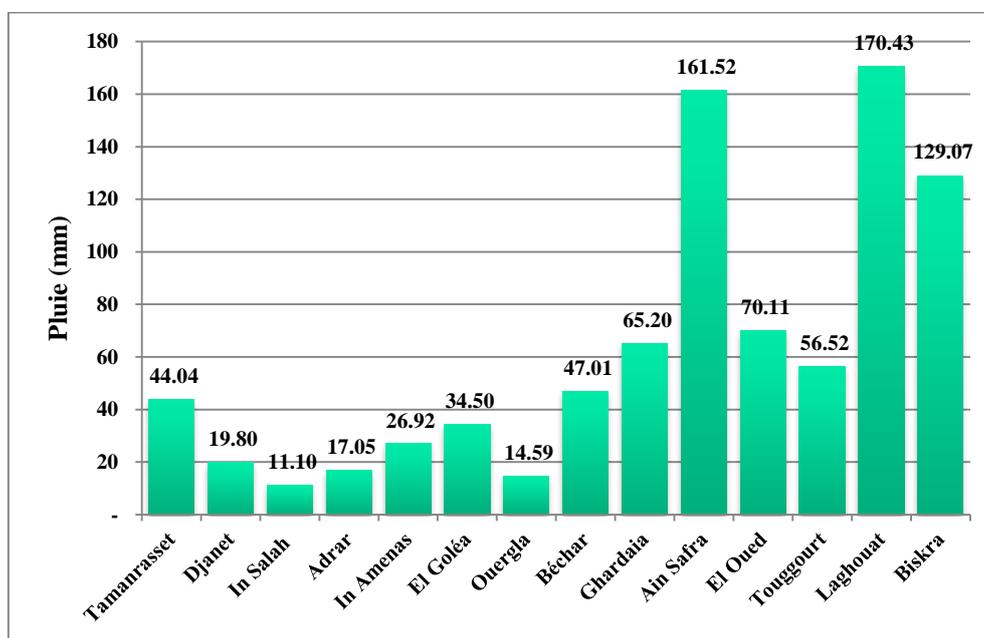


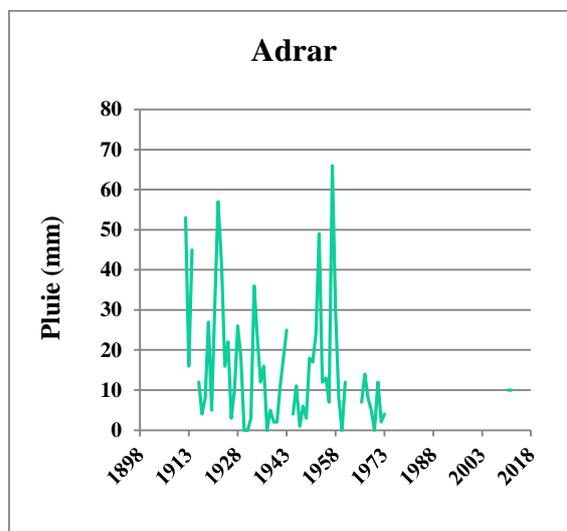
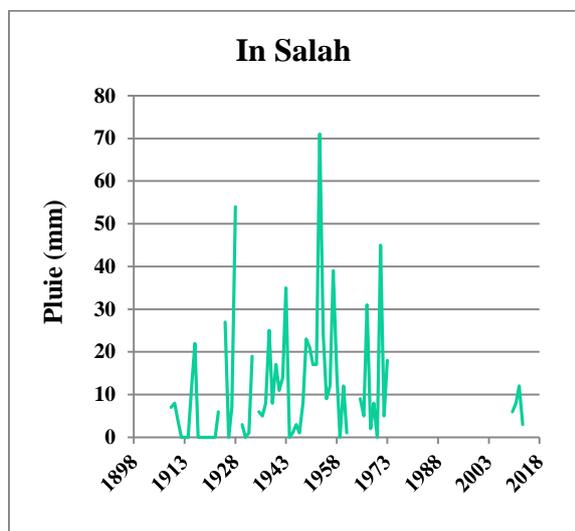
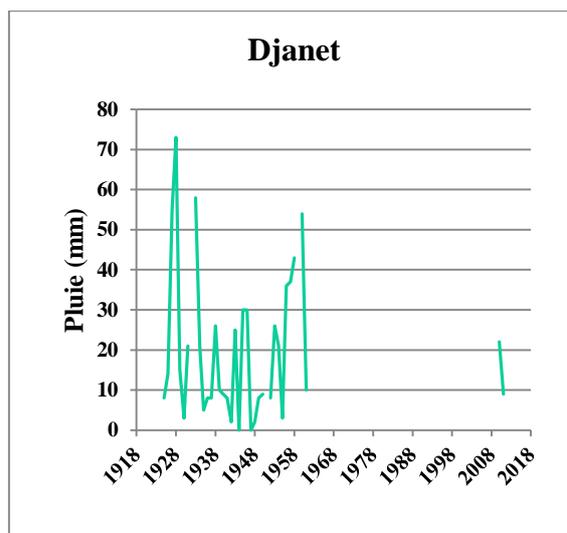
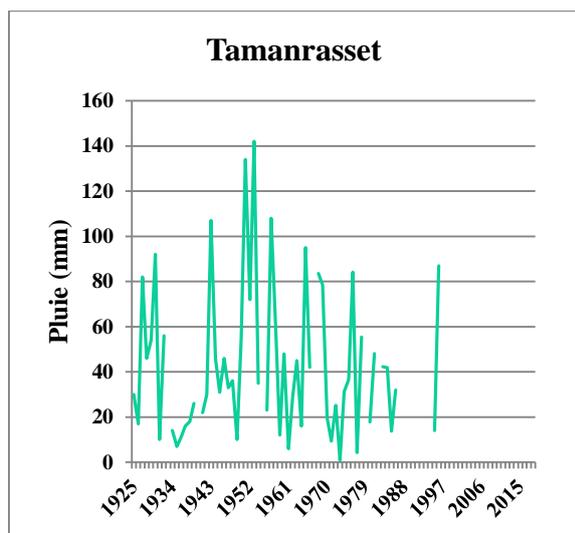
Figure N°21 : Pluies moyennes interannuelles aux stations considérées

Etude de la pluviométrie

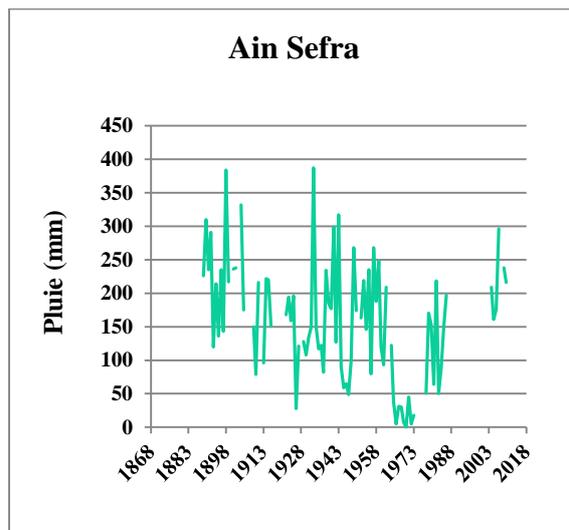
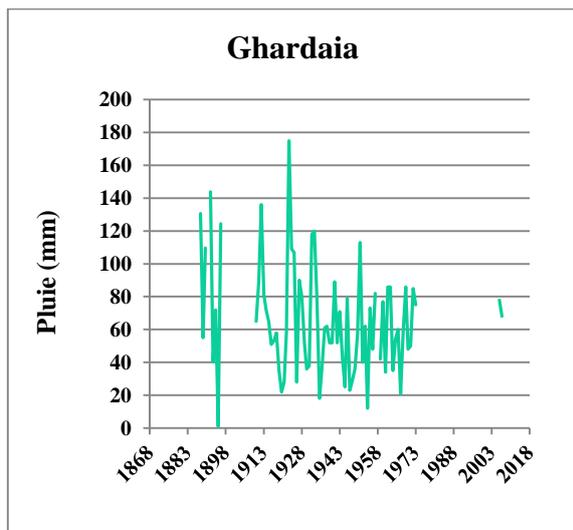
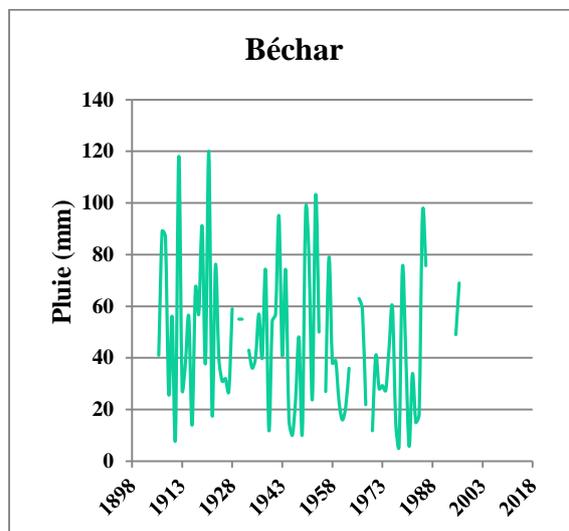
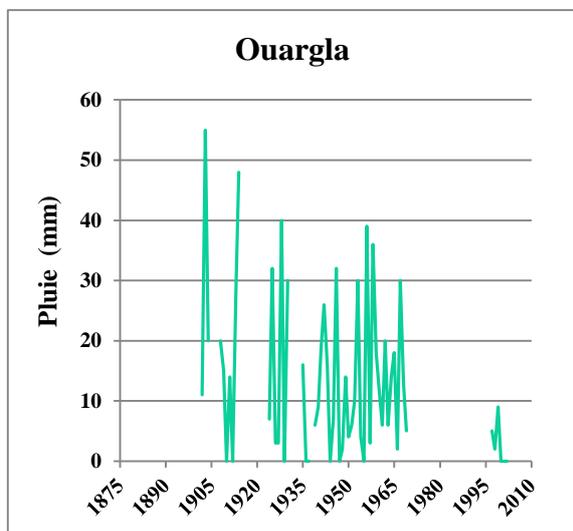
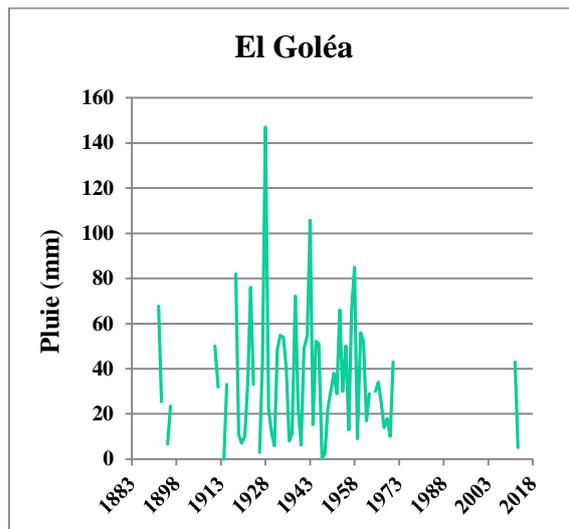
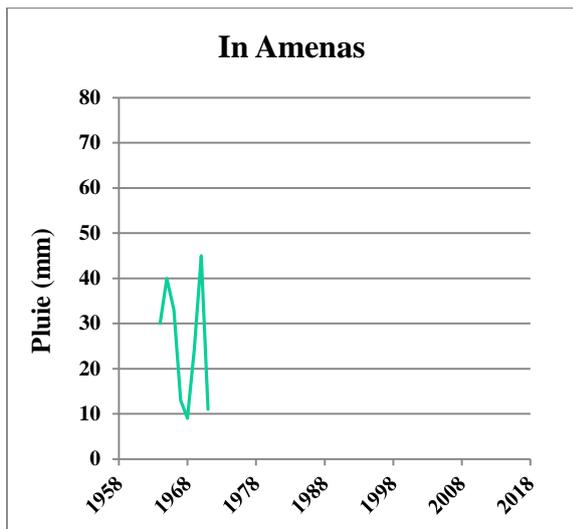
4.3. Comblement des lacunes

4.3.1. Identification des périodes lacunaires

Dans la figure N°22 on a présenté les chroniques de pluie dans les stations considérés qui présentent bien les périodes lacunaires en chaque station, et avec le tableau N°6 qui illustre les périodes lacunaires brièvement avec le pourcentage moyen des lacunes.



Etude de la pluviométrie



Etude de la pluviométrie

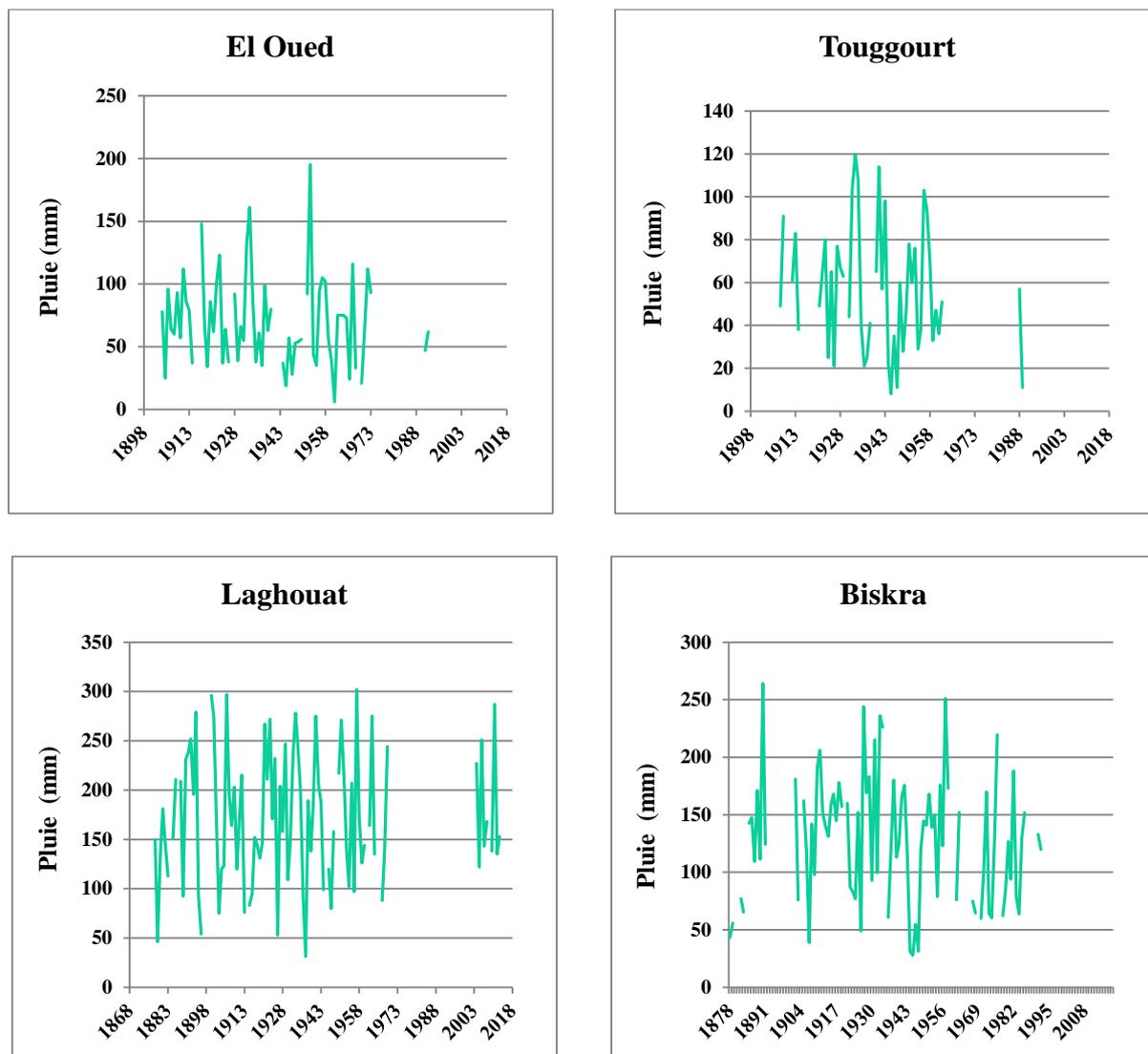


Figure N°22 : Chroniques des pluies avec périodes lacunaires aux stations considérées

Les données pluviométriques des stations sont entachées de plusieurs lacunes et parfois sur des années successives. On peut citer les stations In Salah, Ghardaïa et Laghouat où les lacunes son très importantes. Le tableau ci-dessous présente les périodes lacunaires pour chaque station :

Tableau N°6 : les périodes lacunaires avec ces pourcentages dans les stations considérées

Station	Période d'observation	Périodes lacunaires	Pourcentage de lacunes	Station	Période d'observation	Périodes lacunaires	Pourcentage de lacunes
Tamanrasset	1925 - 2018	1932 - 1934 1939 - 1941 1954 - 1956 1966 - 1968 1978 - 1980 1981 - 1983 1986 - 1995	39.60	Adrar	1906 - 2018	1907 - 2011 1914 - 1916 1943 - 1945 1961 - 1966 1973 - 2011	24.62
Djanet	1925 - 2018	1931 - 1933 1949 - 1952 1985 - 1960 1961 - 2010	39.60	In Amenas	1963 - 2018	1963 - 1964 1971 - 1973 1974 - 1988 1990 - 1998 2000 - 2004 2006 - 2014 2015 - 2018	26.19
In Slah	1905 - 2018	1905 - 1908 1932 - 1925 1928 - 1930 1933 - 1935 1961 - 1965 1973 - 2010	16.45	El Goléa	1892 - 2018	1893 - 1895 1896 - 1911 1912 - 1914 1915 - 1918 1924 - 1926 1963 - 1964 1971 - 2012 2016 - 2018	21.48
Ouergla	1884-2018	1885 - 1891 1893 - 1899 1904 - 1908 1914 - 1924 1930 - 1935 1936 - 1939 1969 - 1997	21.20	El Oued	1904 - 2018	1914 - 1917 1926 - 1928 1940 - 1944 1950 - 1952 1986 - 1970 1973 - 1991 1992 - 1995 1992 - 1995 1999 - 2003 2004 - 2009 2011 - 2018	16.45
Béchar	1906-2018	1928 - 1930 1930 - 1933 1954 - 1956 1963 - 1966 1968 - 1970 1986 - 1995 1997 - 2009 2013 - 2018	6.20	Tougourt	1908 - 2018	1909 - 1912 1914 - 1920 1929 - 1931 1938 - 1940 1962 - 1988 1990 - 2005 2006 - 2009 2010 - 2012 2014 - 2018	18.82

Etude de la pluviométrie

Station	Période d'observation	Périodes lacunaires	Pourcentage de lacunes	Station	Période d'observation	Périodes lacunaires	Pourcentage de lacunes
Ghardaïa	1888-2018	1897 - 1909 1974 - 1988 1992 - 1994 1996 - 2003 2011 - 2018	18.42	Laghouat	1878 - 2018	1883 - 1885 1886 - 1889 1896 - 1900 1913 - 1916 1944 - 1946 1948 - 1950 1960 - 1962 1964 - 1967 1969 - 2004 2008 - 2010 2013 - 2016	13.13
Ain Sefra	1889 - 2018	1899 - 1901 1901 - 1904 1905 - 1909 1911 - 1914 1924 - 1929 1950 - 1952 1962 - 1964 1973 - 1978 1986 - 2004 2007 - 2009 2017 - 2018	18.42	Biskra	1878 - 2018	18879 - 1882 1883 - 1885 1891 - 1902 1903 - 1905 1919 - 1921 1934 - 1936 1958 - 1961 1962 - 1967 1968 - 1970 1976 - 1978 1986 - 1991 1992 - 1995 1996 - 1998 2000 - 2005 2007 - 2010 2014 - 2018	5.91

4.4. Comblement des données

Pour le comblement des données manquantes dans les séries pluviométriques, on utilise 3 méthodes de comblement des données :

Etude de la pluviométrie

4.4.1. Méthode 1

Dans cette méthode on remplace les lacunes par la moyenne des séries sans lacunes (m2). Ces dernières (séries sans lacunes) sont les séries auxquelles on a éliminé les lacunes. Par conséquent leur nombre d'observations se trouve ainsi réduit. Les deux figures suivantes résument le processus.

Lacunes Touggourt - Microsoft Excel

Année	Janv	Fév	Mars	Apr	Mai	Juin	Juill	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
1908	2	5	14	3	0	0	0	0	0	10	11	4
1909	1	2	2	28	5	0	1	0	0	50	2	0
1910	-999.9	0	0	0	-999.9	0	0	0	0	0	-999.9	-999.9
1911	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	0	0	0	21	12	63	19
1912	23	0	2	3	0	0	0	0	13	19	0	1
1913	38	12	0	0	27	0	0	0	0	6	0	0
1914	9	15	0	0	2	0	0	6	2	0	2	2
1915	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9
1916	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9
1917	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9
1918	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9
1919	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9
1920	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9
1921	1	0	21	8	15	0	0	0	0	0	4	0
1922	0	6	2	0	2	1	0	0	0	0	52	2
1923	8	0	9	12	8	0	0	0	10	10	23	0
1924	4	0	0	0	2	5	0	0	0	13	1	0
1925	0	10	31	0	10	0	5	0	4	3	2	0

(a)

comblement à Touggourt - Microsoft Excel

Année	Janv	Fév	Mars	Apr	Mai	Juin	Juill	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
1908	2	5	14	3	0	0	0	0	0	10	11	4
1909	1	2	2	28	5	0	1	0	0	50	2	0
1910	6.68	0	0	0	3.06	0	0	0	0	0	9.82	6.78
1911	6.68	3.66	9	5.62	3.06	0	0	0	21	12	63	19
1912	23	0	2	3	0	0	0	0	13	19	0	1
1913	38	12	0	0	27	0	0	0	0	6	0	0
1914	9	15	0	0	2	0	0	6	2	0	2	2
1915	6.68	3.66	9	5.62	3.06	1.48	0.56	1	1.88	6.98	9.82	6.78
1916	6.68	3.66	9	5.62	3.06	1.48	0.56	1	1.88	6.98	9.82	6.78
1917	6.68	3.66	9	5.62	3.06	1.48	0.56	1	1.88	6.98	9.82	6.78
1918	6.68	3.66	9	5.62	3.06	1.48	0.56	1	1.88	6.98	9.82	6.78
1919	6.68	3.66	9	5.62	3.06	1.48	0.56	1	1.88	6.98	9.82	6.78
1920	6.68	3.66	9	5.62	3.06	1.48	0.56	1	1.88	6.98	9.82	6.78
1921	1	0	21	8	15	0	0	0	0	0	4	0
1922	0	6	2	0	2	1	0	0	0	0	52	2
1923	8	0	9	12	8	0	0	0	10	10	23	0
1924	4	0	0	0	2	5	0	0	0	13	1	0
1925	0	10	31	0	10	0	5	0	4	3	2	0

(b)

Figure N°23 : Exemple de comblement des lacunes pour la station Touggourt

a) Séries avec lacunes b) Séries comblées

Etude de la pluviométrie

4.4.2. Méthode 2

On remplace les lacunes par la moyenne des valeurs avant et après la lacune (m3). On rappelle ici que les séries lacunaires sont les mêmes que celles utilisées dans la 1^{ère} méthode.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Année	Janv	Fév	Mars	Apr	Mai	Juin	Juill	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
2	1908	2	5	14	3	0	0	0	0	0	10	11	4
3	1909	1	2	2	28	5	0	1	0	0	50	2	0
4	1910	12	0	0	0	2.5	0	0	0	0	0	32.5	9.5
5	1911	17.5	0	1	1.5	1.25	0	0	0	21	12	63	19
6	1912	23	0	2	3	0	0	0	0	13	19	0	1
7	1913	38	12	0	0	27	0	0	0	0	6	0	0
8	1914	9	15	0	0	2	0	0	6	2	0	2	2
9	1915	5	7.5	10.5	4	8.5	0	0	3	1	0	3	1
10	1916	3	3.75	15.75	6	11.75	0	0	1.5	0.5	0	3.5	0.5
11	1917	2	1.88	18.38	7	13.38	0	0	0.75	0.25	0	3.25	0.25
12	1918	1.5	0.94	19.68	7.5	14.19	0	0	0.38	0.125	0	3.63	0.12
13	1919	1.25	0.47	20.34	7.75	14.59	0	0	0.18	0.06	0	3.81	0.06
14	1920	1.125	0.23	20.67	7.88	14.79	0	0	0.09	0.03	0	3.91	0.03
15	1921	1	0	21	8	15	0	0	0	0	0	4	0
16	1922	0	6	2	0	2	1	0	0	0	0	52	2
17	1923	8	0	9	12	8	0	0	0	10	10	23	0
18	1924	4	0	0	0	2	5	0	0	0	13	1	0
19	1925	0	10	31	0	10	0	5	0	4	3	2	0

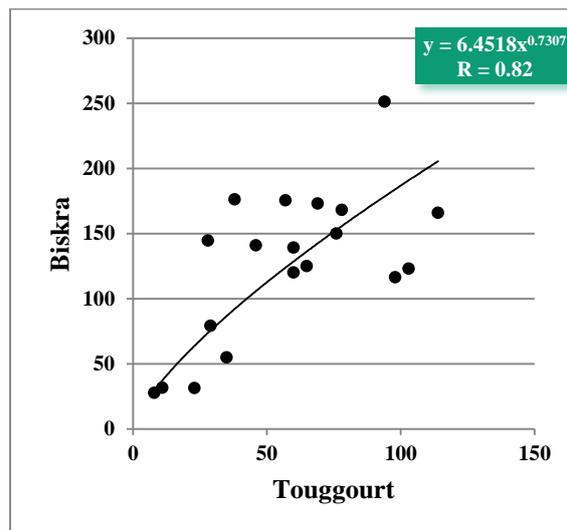
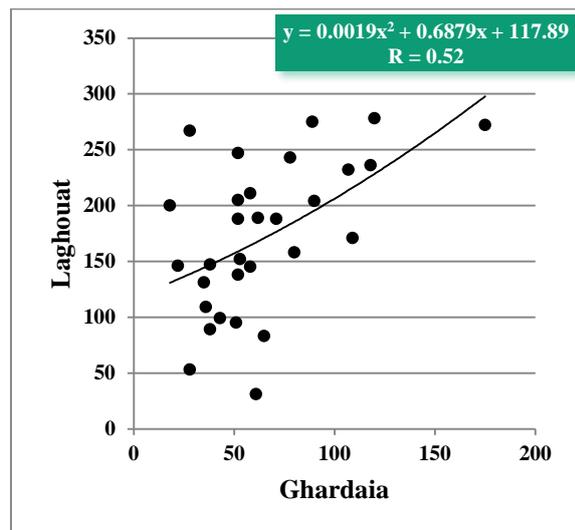
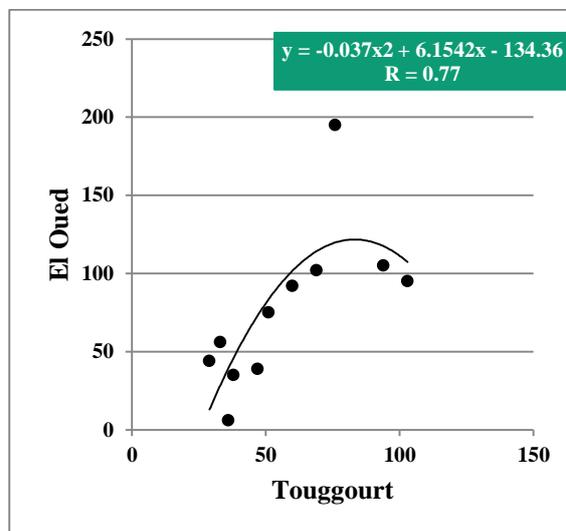
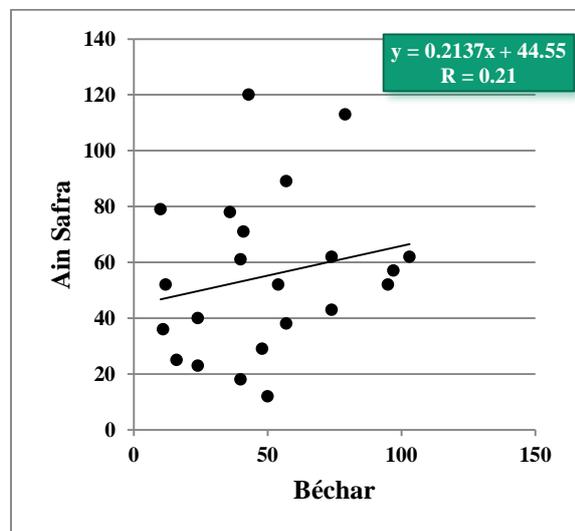
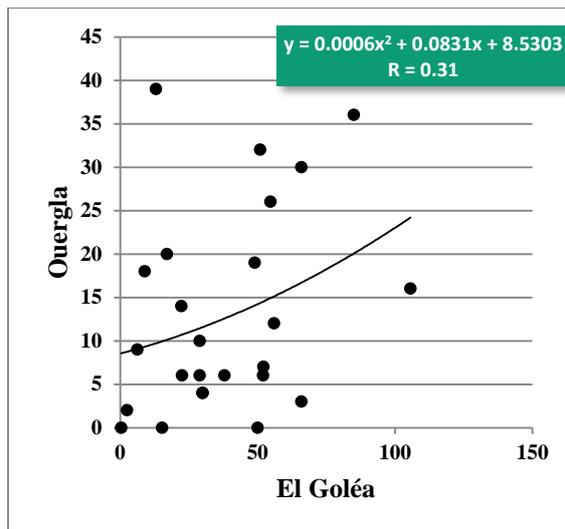
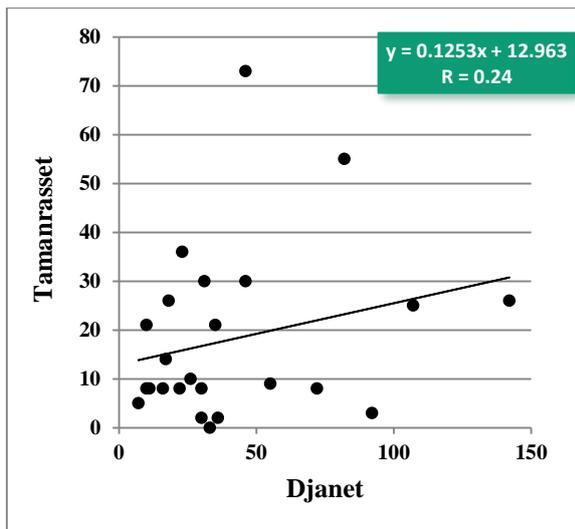
Figure N°24 : Exemple de comblement des lacunes pour la station Touggourt

On observe que les deux méthodes montrent leurs limites lorsque les lacunes sont nombreuses et successives. Ainsi le caractère aléatoire n'est plus retrouvé. Lorsque la série contient beaucoup de lacunes, la méthode de comblement est imprécise. De plus, les écarts entre les valeurs comblées par les deux méthodes varient de 0,02 à 0,61 en termes de moyenne interannuelle (voir tableaux Excel dans les figures N°23 et N°24). L'écart est considérable lorsqu'on traite les données à l'échelle mensuelle.

4.4.3. Méthode 3

On emploie la méthode de régression linéaire. Cette méthode est en réalité employée avant le comblement pour déterminer la faisabilité ou non de la dite méthode. Bien que la méthode a été effectuée entre stations ayant la même similarité climatique, la méthode ne donne pas des résultats satisfaisants pour diverses raisons, entre autres l'éloignement entre les stations et les lacunes. Seules les corrélations El Oued – Touggourt ; Touggourt – Biskra et Adrar – In Salah présentent de bonnes relations fonctionnelles, soit $R = 0.77$; 0.82 et 0.75 respectivement.

Etude de la pluviométrie



Etude de la pluviométrie

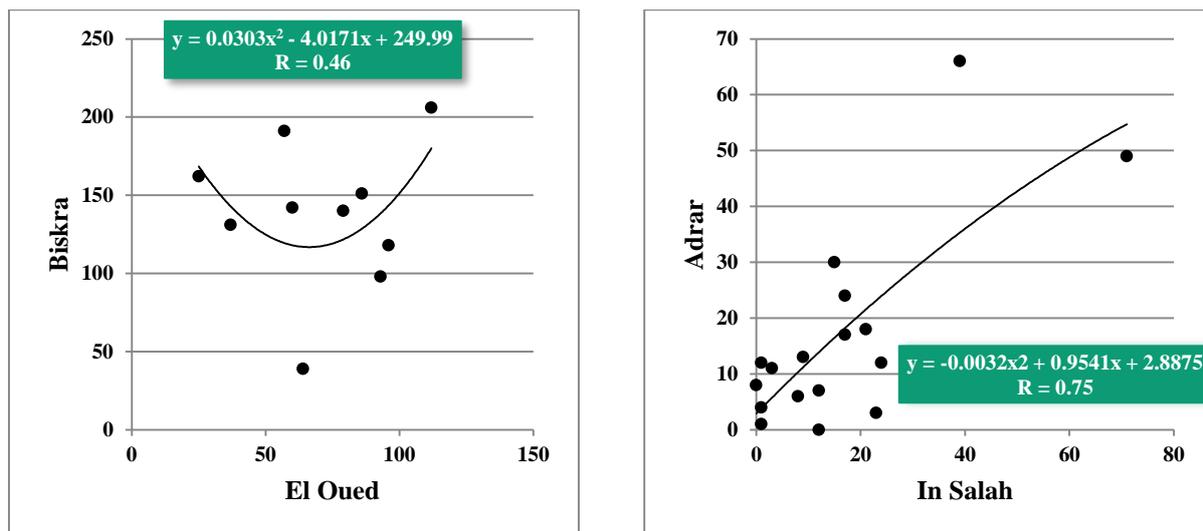


Figure N°25 : Régression entre les stations considérées

Nous remarquons que les modèles de régression, pour les stations El oued – Touggourt et Adrar – In Salah, sont influencés par un point extrême pour la relation El Oued – Touggourt et deux points extrêmes pour la relation Adrar – In Salah (figure N°25).

Au vu de ces résultats, nous avons orienté l'étude de la pluviométrie dans les stations qui présentent de bonnes relations fonctionnelles entre elles.

4.5. Constitution des séries pluviométriques

Le traitement de données qui suit concerne les séries pluviométriques des stations de Biskra, Ghardaïa, El oued, Laghouat, Touggourt sur la période 1981 – 2010 suivantes :

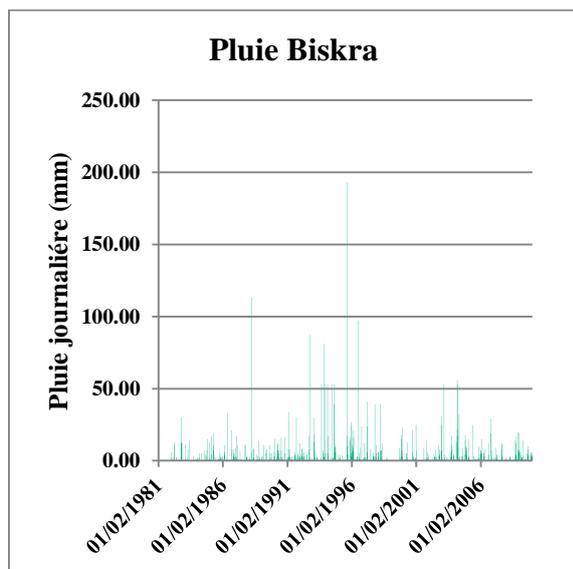
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	Date	Pluie Biskra	Date	Pluie Ghardaia	Date	Pluie El Oued	Date	Pluie Laghouat	Date	Pluie Touggourt		
1												
2	01/02/1981	0.00	01/01/1973	0.00	01/01/1981	0.00	27/03/1957	0.00	04/01/1981	0.00		
3	02/02/1981	0.00	02/01/1973	0.00	02/01/1981	0.00	02/07/1957	0.00	05/01/1981	0.00		
4	03/02/1981	0.00	03/01/1973	0.00	03/01/1981	0.00	03/07/1957	0.00	09/01/1981	0.00		
5	04/02/1981	0.00	04/01/1973	0.00	04/01/1981	0.00	04/07/1957	0.00	22/01/1981	0.00		
6	05/02/1981	0.00	05/01/1973	0.00	05/01/1981	0.00	05/07/1957	0.00	24/01/1981	0.00		
7	06/02/1981	0.00	06/01/1973	0.00	06/01/1981	0.00	06/07/1957	0.00	26/01/1981	0.00		
8	07/02/1981	0.00	07/01/1973	0.00	07/01/1981	0.00	07/07/1957	0.00	28/01/1981	0.00		
9	08/02/1981	0.00	08/01/1973	0.00	08/01/1981	0.00	08/07/1957	0.00	04/02/1981	0.00		
10	09/02/1981	0.00	09/01/1973	0.00	09/01/1981	0.00	09/07/1957	0.00	09/02/1981	0.00		
11	10/02/1981	0.00	10/01/1973	0.00	10/01/1981	0.00	10/07/1957	0.00	23/02/1981	0.00		
12	11/02/1981	0.00	11/01/1973	0.00	11/01/1981	0.00	11/07/1957	0.00	26/02/1981	0.00		
13	12/02/1981	0.00	12/01/1973	0.00	12/01/1981	0.00	12/07/1957	0.00	03/03/1981	0.00		
14	13/02/1981	0.00	13/01/1973	0.00	13/01/1981	0.00	13/07/1957	0.00	04/03/1981	0.00		
15	14/02/1981	0.00	14/01/1973	0.00	14/01/1981	0.00	14/07/1957	0.00	06/03/1981	0.00		
16	15/02/1981	0.00	15/01/1973	0.00	15/01/1981	0.00	15/07/1957	0.00	08/03/1981	0.00		

Figure N°26 : Données de base des stations considérées

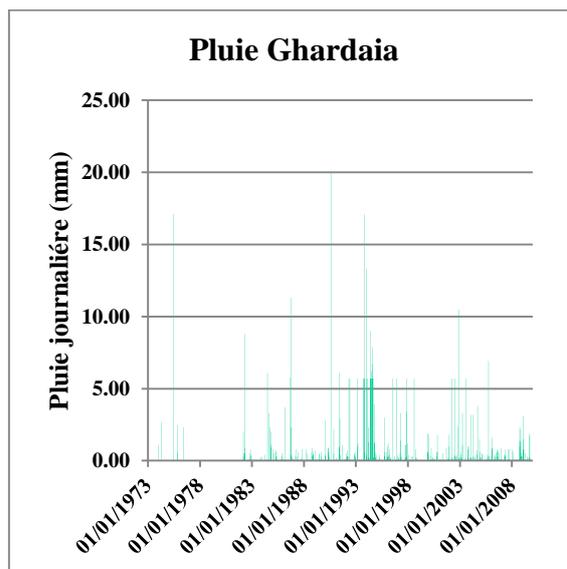
Etude de la pluviométrie

4.5.1. Analyse des chroniques des pluies :

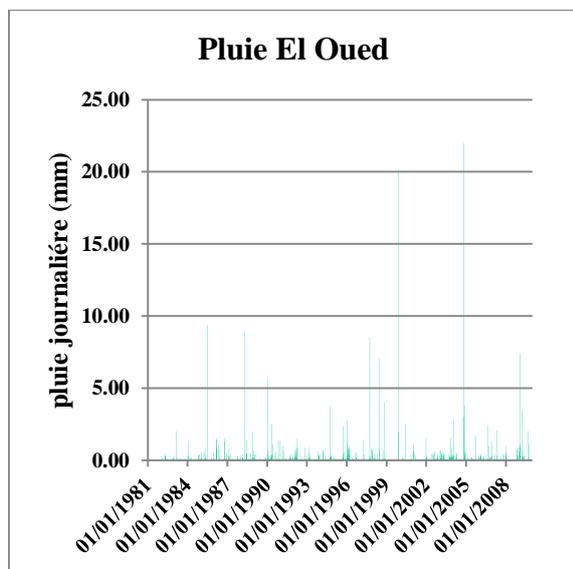
La figure présente les chroniques des pluies journalières des stations considérés dans la période 1981- 2010, la figure illustre bien la faiblesse de pluviométrie dans toutes les stations, on voit qu'il y a une valeur maximale de 193.04 mm dans la station de Biskra et de Touggourt, et une valeur minimale de 0 mm. Les séries journalières de ces stations elle contient aussi des lacunes.



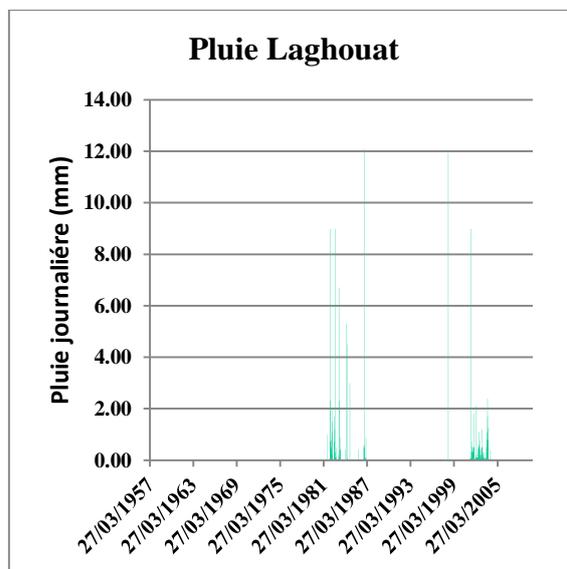
a)



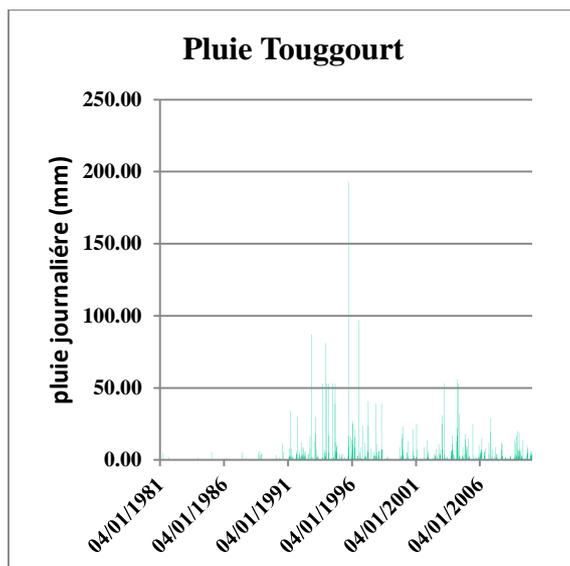
b)



c)



d)



d)

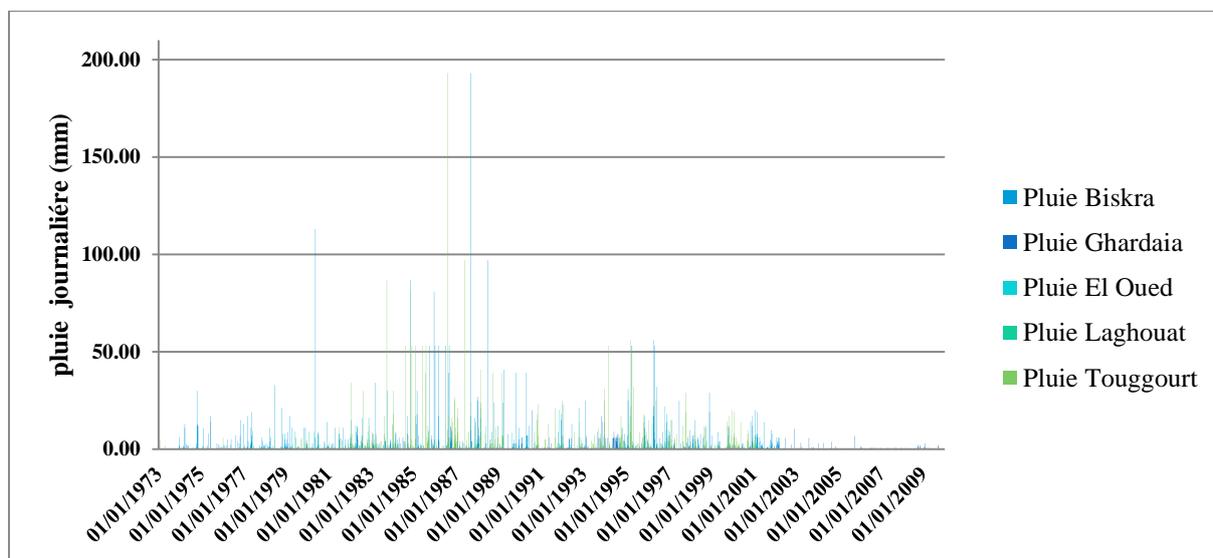


Figure N°27 : Ensemble des Chroniques des pluies journalières aux stations considérées

4.6. Etude de la tendance et de la rupture des séries pluviométriques

4.6.1. Statistiques descriptives

4.6.1.1. Station de Biskra

Les valeurs statistiques de pluie annuelle à Biskra durant la période (1981-2010) sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau N°7 : Statistiques descriptives de la pluie annuelle à Biskra durant la période (1981-2010)

Statistique	Pluie (mm)
Nb. d'observations	30
Minimum	0.000
Maximum	304.040
1er Quartile	74.360
Médiane	117.860
3ème Quartile	187.393
Moyenne	136.585
Ecart-type (n-1)	86.527
Coefficient de variation	0.63

Le box plot est montré dans la figure N°28

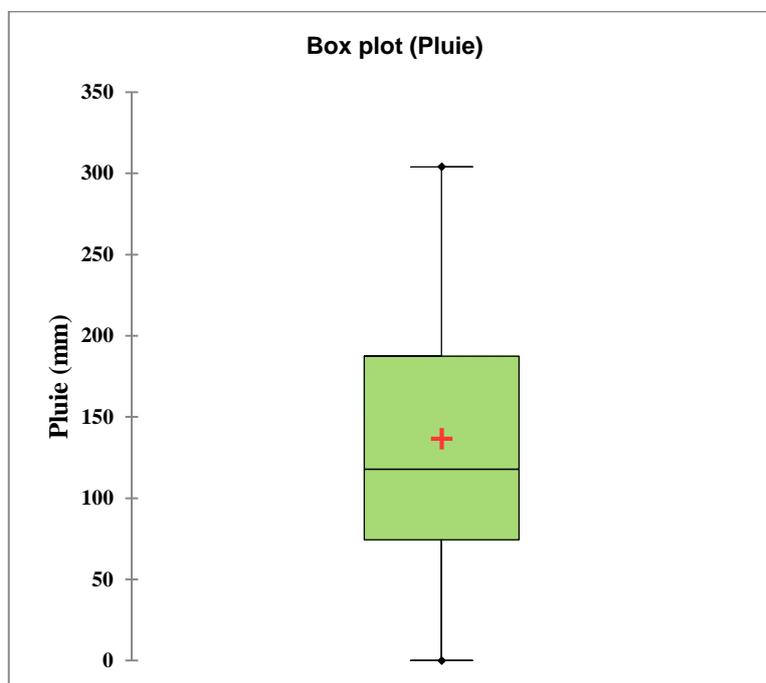


Figure N°28 : Graphique Box Plot des pluies annuelles à Biskra durant la période (1981-2010)

Le graphique montre qu'il n'y a pas de valeur extrême.

4.6.1.2. Station de Ghardaïa

Les valeurs statistiques de pluie annuelle à Ghardaïa durant la période (1981-2010) sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau N°8 : Statistiques descriptives de la pluie annuelle à Ghardaïa durant la période (1981-2010)

Statistique	Pluie (mm)
Nb. d'observations	37
Minimum	0.000
Maximum	99.620
1er Quartile	3.380
Médiane	8.280
3ème Quartile	16.590
Moyenne	13.838
Ecart-type (n-1)	18.634
Coefficient de variation	1.35

Le box plot est montré dans la figure N°29

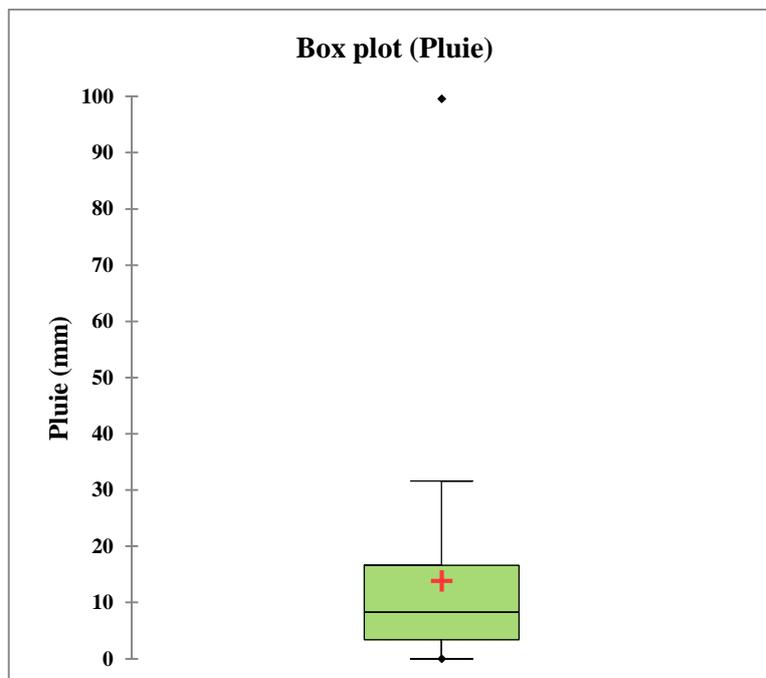


Figure N°29 : Graphique Box Plot des pluies annuelles à Ghardaïa durant la période (1981-2010)

Etude de la pluviométrie

Le graphique montre qu'il y a de valeur extrême.

4.6.1.3. Station de El Oued

Les valeurs statistiques de pluie annuelle à El Oued durant la période (1981-2010) sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau N°9 : statistiques descriptives des pluies annuelles à El Oued durant la période (1981-2010)

Statistique	Pluie (mm)
Nb. d'observations	29
Minimum	0.000
Maximum	35.000
1er Quartile	3.580
Médiane	5.690
3ème Quartile	13.180
Moyenne	8.862
Ecart-type (n-1)	7.634
Coefficient de variation	0.86

Le box plot est montré à la figure N°30

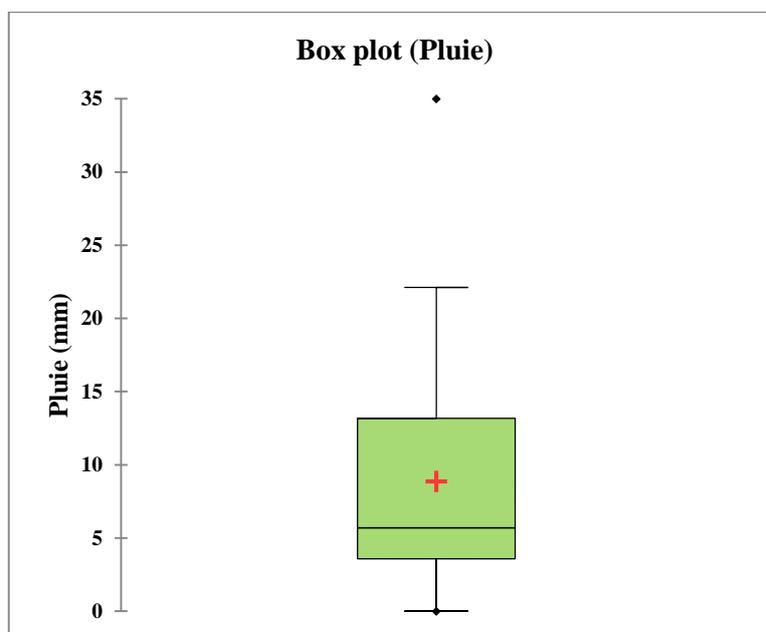


Figure N°30 : Graphique Box Plot des pluies annuelles à El Oued durant la période (1981-2010)

Etude de la pluviométrie

Le graphique montre qu'il y a de valeur extrême.

4.6.1.4. Station de Laghouat

Les valeurs statistiques de pluie annuelle à Laghouat durant la période (1981-2010) sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau N°10 : statistiques descriptives des pluies annuelles à Laghouat durant la période (1981-2010)

Statistique	Pluie (mm)
Nb. d'observations	54
Minimum	0.000
Maximum	33.580
1er Quartile	0.000
Médiane	0.000
3ème Quartile	0.990
Moyenne	3.600
Ecart-type (n-1)	7.656
Coefficient de variation	2.12

Le Box Plot est montré à la figure N°31

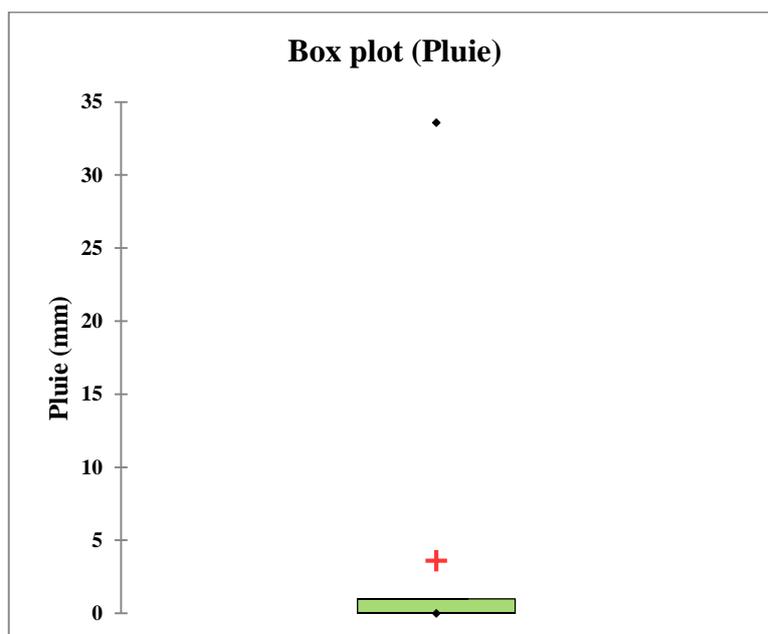


Figure N°31 : Graphique Box Plot des pluies annuelles à Laghouat durant la période (1981-2010)

Etude de la pluviométrie

Le graphique montre qu'il y a une valeur extrême.

4.6.1.5. Station de Touggourt

Les valeurs statistiques de pluie annuelle à Touggourt durant la période (1981-2010) sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau N°11 : statistiques descriptives des pluies annuelles à Touggourt durant la période (1981-2010)

Statistique	Pluie (mm)
Nb. d'observations	30
Minimum	0.890
Maximum	304.040
1er Quartile	9.825
Médiane	87.090
3ème Quartile	179.580
Moyenne	110.501
Ecart-type (n-1)	104.039
Coefficient de variation	0.94

Le Box Plot est montré à la figure N°32

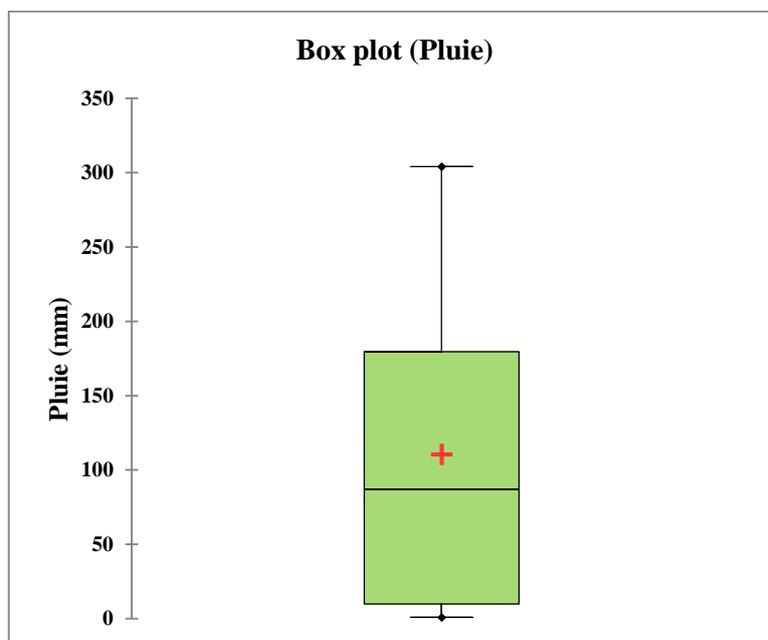


Figure N°32 : Graphique Box Plot des pluies annuelles à Touggourt durant la période (1981-2010)

Etude de la pluviométrie

Le graphique montre qu'il n'y a pas de valeur extrême.

4.6.2. Tests de Grubbs pour les valeurs extrêmes

Les hypothèses du test sont les suivants :

H_0 : il n'y a pas de valeur extrême dans les données

H_1 : le minimum ou le maximum est une valeur extrême

Les résultats de test sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau N°12 : Résultats du test de Grubbs des pluies annuelles aux stations considérés durant la période (1981-2010)

Statistique de Grubbs	Biskra	Ghardaïa	El Oued	Laghouat	Touggourt
G (Valeur observée)	1.935	4.603	3.424	3.916	1.860
G (Valeur critique)	2.908	3.003	2.893	2.952	2.908
p-value (bilatérale)	1.000	< 0.0001	0.003	0.000	1.000
alpha	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

Le test de Grubbs pour les valeurs extrêmes confirme les résultats de Box Plot qu'il y a de valeur extrême aux stations de Ghardaïa, El Oued et Laghouat. Et il n'y a pas de valeurs extrême aux stations de Biskra et Touggourt.

4.6.3. Test de tendance de Mann-Kendall

Ce test est utilisé pour recherche l'existence ou non de tendance dans une série chronologique.

Les hypothèses du test sont les suivants :

H_0 : il n'y a pas de tendance dans la série

H_1 : il existe une tendance dans la série

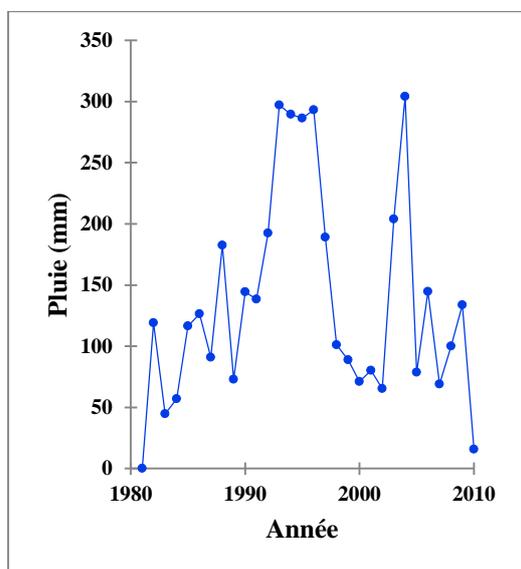
Les résultats de test sont reportés dans le tableau suivant :

Etude de la pluviométrie

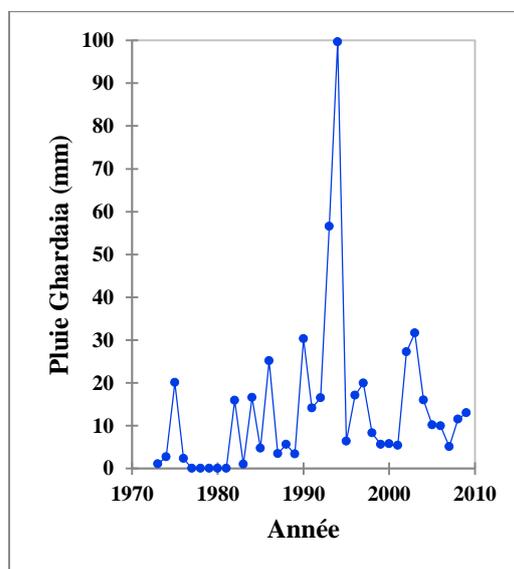
Tableau N°13 : Résultats de test de tendance de Man-Kendall des pluies annuelles à Biskra durant la période (1981-2010)

Test de Man-Kendall	Biskra	Ghardaia	El Oued	Laghouat	Tougourt
Tau de Kendall	0.333	0.389	0.667	0.718	1
S'	4.000	14.000	8.000	45.000	12.000
Var(S')	12.000	44.000	12.000	85.667	12.000
p-value (bilatérale)	0.248	0.035	0.021	< 0.0001	0.001
alpha	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

Le test de tendance de Man-Kendall montre qu'il y a une tendance des pluies annuelles dans toutes les stations à l'exception de station de Biskra. La Figure N°33 montre les résultats de test de Man-Kendall.

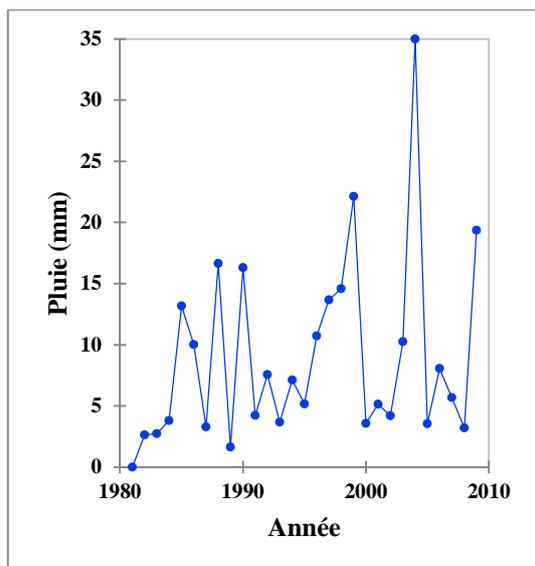


a) Biskra

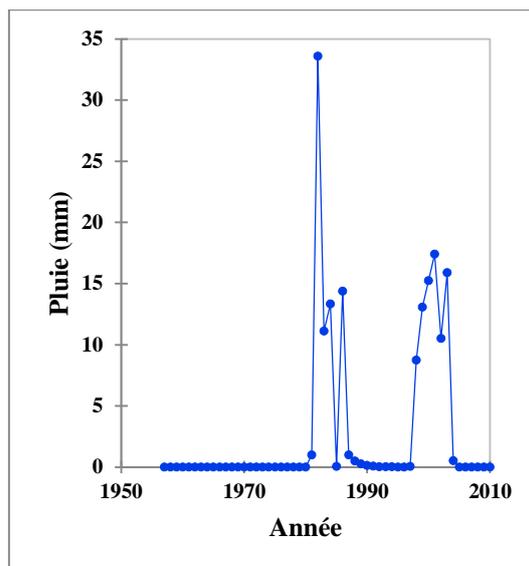


b) Ghardaia

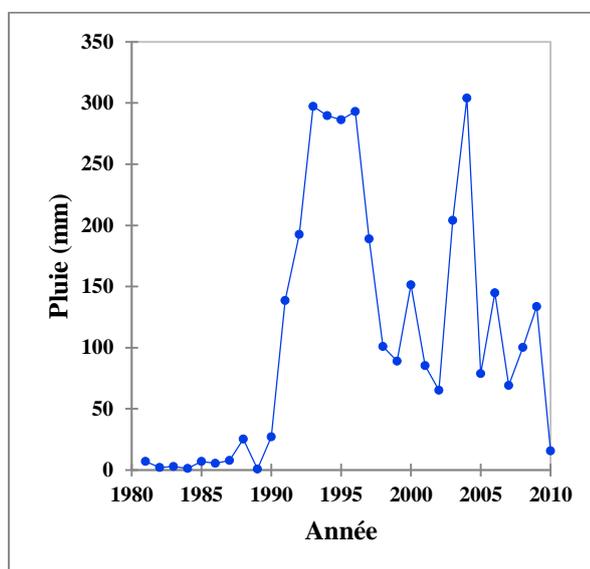
Etude de la pluviométrie



c) El Oued



d) Laghouat



e) Touggourt

Figure N°33 : Graphique du test de tendance de Man-Kendall des pluies annuelles aux stations considérées durant la période (1981-2010)

4.6.4. Tests de détection des ruptures dans les séries pluviométriques

Pour déterminer l'homogénéité des données des pluies annuelles, on utilise les tests suivants :

- Test de Pettitt
- Test de SNHT
- Test de Buishand

Etude de la pluviométrie

Il est à noter que ces tests sont cruciaux pour détecter d'éventuels changements dans les séries chronologiques. Les hypothèses à vérifier sont les suivants :

H_0 : les données sont homogènes

H_1 : il y a une date à partir de laquelle il y a un changement dans les données

4.6.4.1. Station de Biskra

Les résultats de tests d'homogénéité sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau N°14 : Résultats de tests d'homogénéité des pluies annuelles à Biskra durant la période (1981-2010)

Pluie annuelle (mm)	Test de Pettitt	Test de SNHT	Test de Buishand
Statistique	K = 83.000	$T_0 = 4.085$	Q = 4.925
Année de rupture	/	/	/
p-value (bilatéral)	0.625	0.309	0.287
Alpha	0.05	0.05	0.05

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 . La série est homogène.

Les tests confirment la tendance de la hausse des pluies annuelles vers les dernières années. Les résultats sont montrés dans la figure N°34.

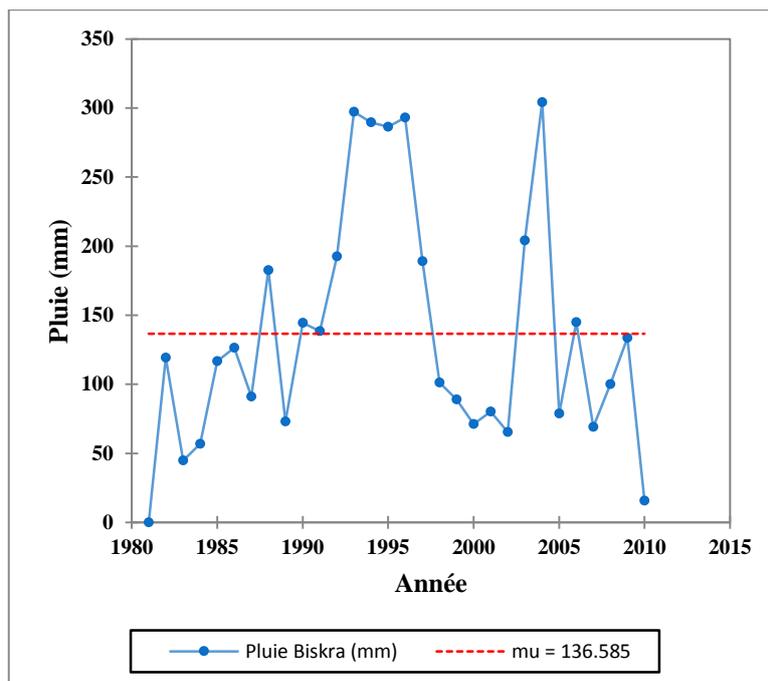


Figure N°34 : Graphique de tests d’homogénéité des pluies annuelles à Biskra durant la période (1981-2010)

4.6.4.2. Station de Ghardaïa

Les résultats de tests d’homogénéité sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau N°15 : Résultats de tests d’homogénéité des pluies annuelles à Ghardaïa durant la période (1981-2010)

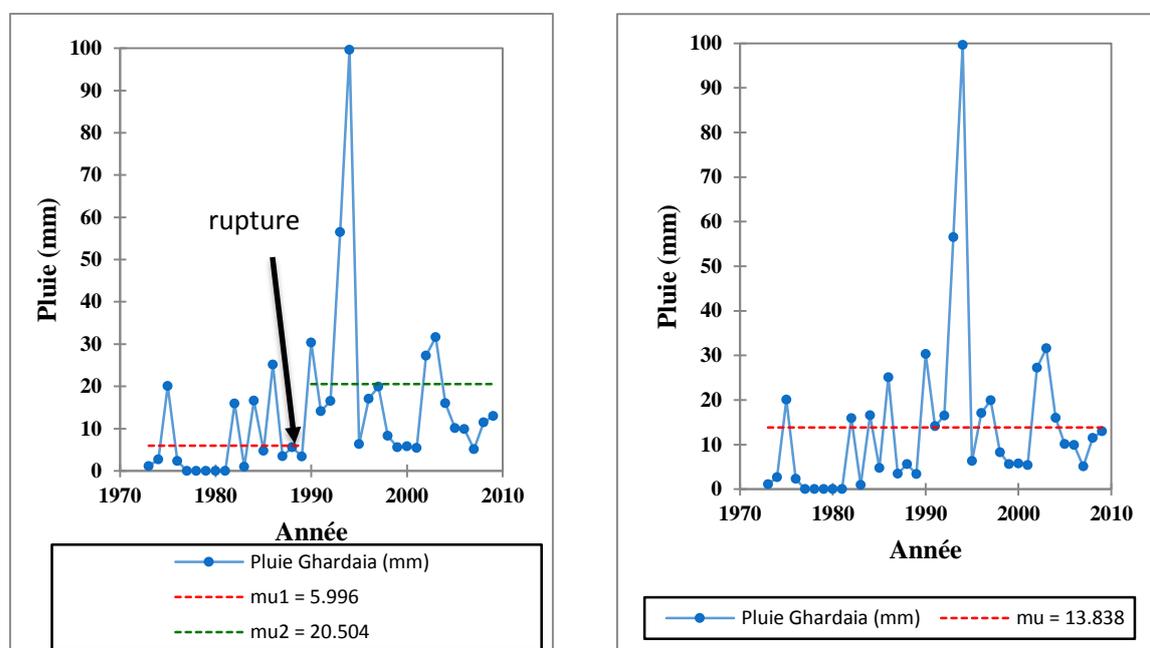
Pluie annuelle (mm)	Test de Pettitt	Test de SNHT	Test de Buishand
Statistique	K = 228.000	$T_0 = 5.570$	Q = 7.253
Année de rupture	1989	/	1989
p-value (bilatéral)	0.003	0.237	0.042
Alpha	0.05	0.05	0.05

Etude de la pluviométrie

- Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification $\alpha=0.05$, on doit rejeter l'hypothèse nulle H_0 , et retenir l'hypothèse alternative H_a .
- Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 .

Les deux tests de Pettitt et Buishand indiquent qu'il y a un changement des pluies annuelles à partir de l'année 1989, et confirment la tendance de la hausse des pluies annuelles vers les dernières années.

Le test de SNHT indique la série des pluies annuelles est homogène. Les résultats sont montrés sur la figure N°35.



a) Rupture en 1989 (d'après PETTIT et Buishand)

b) Pas de rupture

Figure N°35 : Graphique de tests d'homogénéité des pluies annuelles à Ghardaïa durant la période (1981-2010)

Etude de la pluviométrie

4.6.4.3. Station de El Oued

Les résultats de tests d'homogénéité sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau N°16 : Résultats de tests d'homogénéité des pluies annuelles à El Oued durant la période (1981-2010)

Pluie annuelle (mm)	Test de Pettitt	Test de SNHT	Test de Buishand
Statistique	K = 84.000	T ₀ = 3.441	Q = 4.664
Année de rupture	/	/	/
p-value (bilatéral)	0.480	0.439	0.325
Alpha	0.05	0.05	0.05

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H₀.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H₀ alors qu'elle est vraie est de 43.87%.

Les tests indiquent que la série est homogène. Les résultats sont montrés sur la figure N°36.

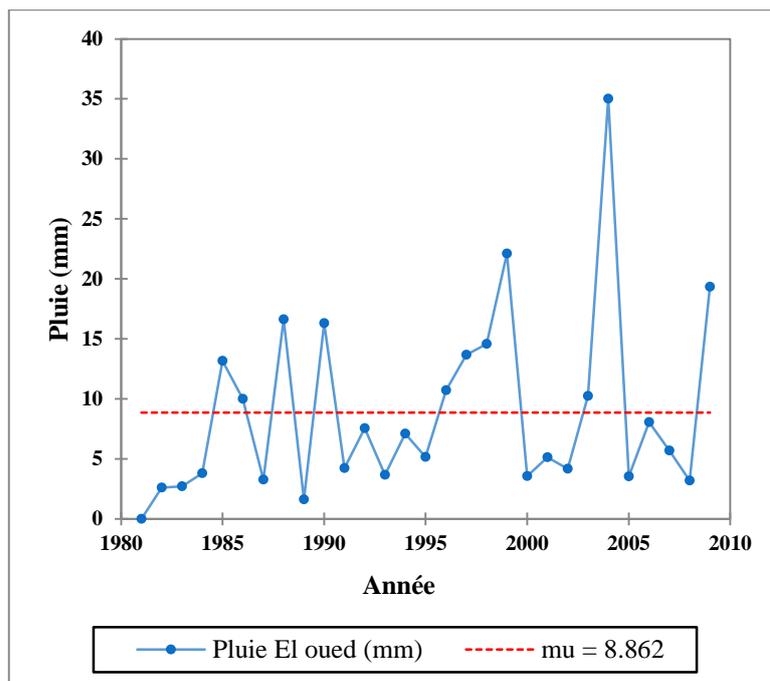


Figure N°36 : Graphique de tests d’homogénéité des pluies annuelles à El Oued durant la période (1981-2010)

4.6.4.4. Station de Laghouat

Les résultats de tests d’homogénéité sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau N°17 : Résultats de tests d’homogénéité des pluies annuelles à El Oued durant la période (1981-2010)

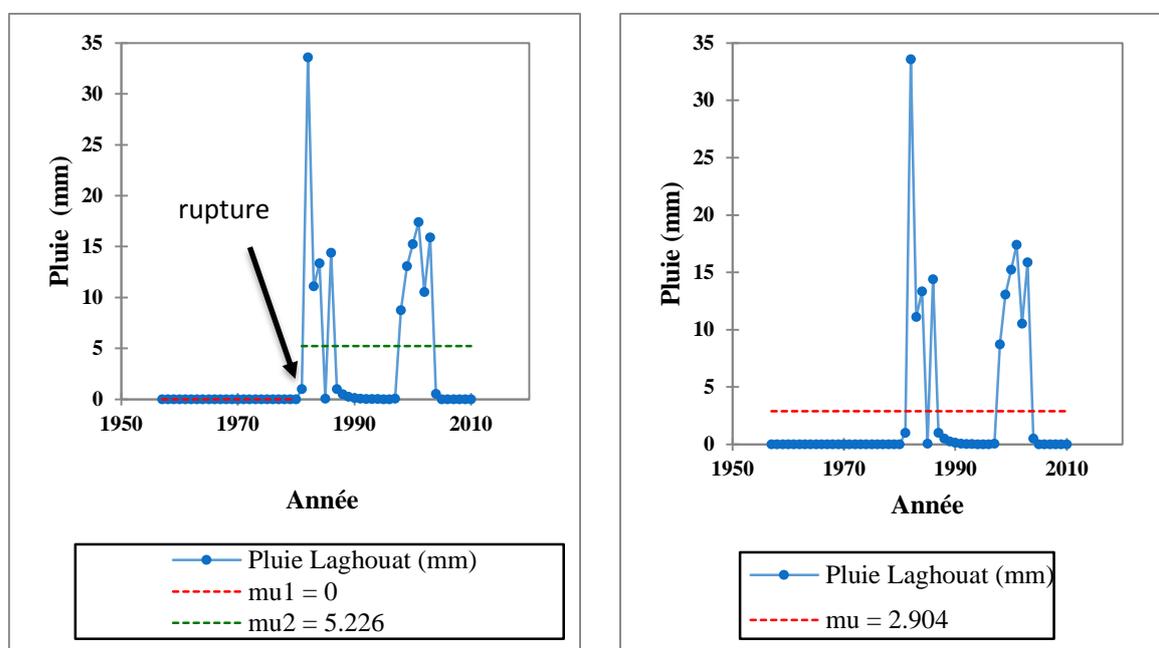
Pluie annuelle (mm)	Test de Pettitt	Test de SNHT	Test de Buishand
Statistique	K = 528.000	$T_0 = 8.696$	Q = 10.906
Année de rupture	1980	/	1981
p-value (bilatéral)	< 0.0001	0.124	0.008
Alpha	0.05	0.05	0.05

Etude de la pluviométrie

- Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification $\alpha=0.05$, on doit rejeter l'hypothèse nulle H_0 , et retenir l'hypothèse alternative H_a .
- Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 .

Les tests de Pettitt et Buishand indiquent qu'il y a changement des pluies annuelles à partir de l'années 1980.

Le test de SNHT confirme la tendance de la hausse des pluies annuelles. Les résultats sont montrés dans la figure N°37.



a) Rupture en 1981(d'après PETTIT et Buishand)

b) Pas de rupture

Figure N°37 : Graphique de tests d'homogénéité des pluies annuelles à Laghouat durant la période (1980-2010)

Etude de la pluviométrie

4.6.4.5. Station de Touggourt

Les résultats de tests d'homogénéité sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau N°18 : Résultats de tests d'homogénéité des pluies annuelles à Touggourt durant la période (1981-2010)

Pluie annuelle (mm)	Test de Pettitt	Test de SNHT	Test de Buishand
Statistique	K = 196.000	$T_0 = 14.361$	Q = 9.952
Année de rupture	1990	1990	1990
p-value (bilatéral)	< 0.0001	0.001	0.001
Alpha	0.05	0.05	0.05

Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification $\alpha=0.05$, on doit rejeter l'hypothèse nulle H_0 , et retenir l'hypothèse alternative H_1 .

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 alors qu'elle est vraie est inférieur à 0.09%.

Les tests indiquent qu'il y a un changement à partir l'année 1990 et confirment la tendance de la hausse des pluies annuelles. Les résultats sont montrés dans la figure N°38.

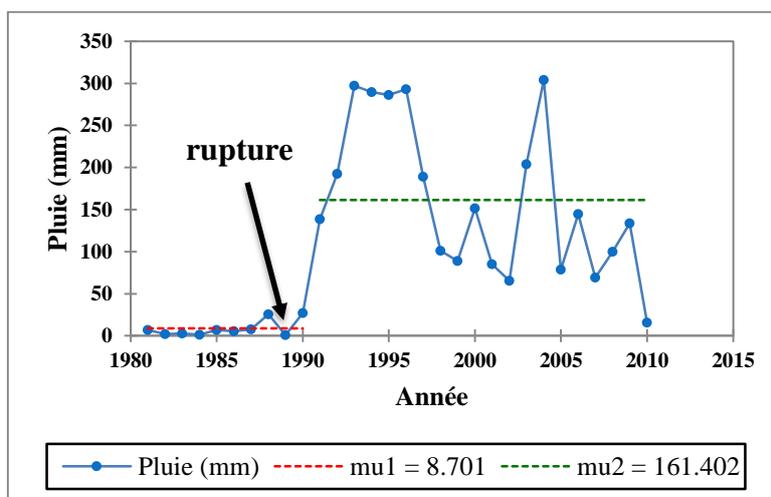


Figure N°38 : Graphique de tests d'homogénéité des pluies annuelles à Touggourt durant la période (1981-2010)

Etude de la pluviométrie

4.7. Conclusion

Les tests statistiques effectués par XLSTAT (test de tendance de Man-Kendall) ont montré que :

- ✓ il y a une tendance dans les stations (Ghardaïa, El Oued, Laghouat et Touggourt).
- ✓ il n'y a pas une tendance dans la station de Biskra.

Les résultats obtenus après utilisation du Test de rupture sur les séries ont montré que :

- **Test de Pettitt :**
 - ✓ il existe une rupture dans les stations de Ghardaïa, Laghouat et Touggourt
 - ✓ il n'y a pas une rupture dans les stations de Biskra et El Oued
- **Test de SNHT**
 - ✓ il n'y a pas une rupture dans les stations de Biskra, Ghardaïa, El Oued et Laghouat
 - ✓ il existe une rupture seulement dans la station de Touggourt
- **Test de Buishand**
 - ✓ il n'y a pas une rupture dans les stations de Biskra et El Oued
 - ✓ il existe une rupture dans les stations de Ghardaïa, Laghouat et Touggourt

Conclusion générale

Les principaux phénomènes météorologiques et surtout pluviométriques jouent un rôle considérable sur le plan physique et, par voie de conséquence, sur le plan humain ; mais ils ne sont pas toujours aisés à analyser et cela par suite de la faiblesse du réseau d'observation, de l'inégale valeur des données pluviométriques et de la grande déficience des archives.

L'étude des précipitations est importante pour l'évaluation du risque d'inondation. La région de sud-est de l'Algérie est une région aride et semi-aride avec une pluviométrie faible mais dans certains cas des ruissellements exceptionnels et des inondations graves.

Pour analyser l'évolution des précipitations, nous avons utilisés les tests statistiques ; le test de tendance de Man-Kendall et les tests de détection des ruptures (test de Pettitt, test de SNHT et test de Buishand).

Dans la première partie de ce travail, c'est-à-dire le contrôle des données, on a constaté des longues périodes lacunaires dans les séries des données étudiées. Pour obtenir des séries plus homogènes, nous avons fait le comblement des lacunes par trois méthodes. Les deux méthodes (1 et 2) montrent leurs limites lorsque les lacunes sont nombreuses et successives. Ainsi le caractère aléatoire n'est plus retrouvé. Lorsque la série contient beaucoup de lacunes, la méthode de comblement est imprécise. La méthode 3 ne donne pas des résultats satisfaisants pour diverses raisons, entre autres l'éloignement entre les stations et les lacunes.

Le test de tendance de Man-Kendall confirme la non stationnarité dans la totalité des stations que nous avons étudiées. Autrement, il y a une tendance de la pluviométrie aux stations considérés.

Les tests de détection des ruptures ont permis de conclure que :

- ✓ Tests de Pettitt et Buishand, les séries ne sont pas homogènes aux stations de Ghardaïa, Laghouat et Touggourt ; mais aux stations de Biskra et El Oued les séries sont homogènes.
- ✓ Test de SNHT la totalité de séries des données sont homogènes à l'exception de la station de Touggourt.

Références bibliographiques

Ababsa. B, (2018), Etude de l'évolution des précipitations dans la région de Guelma ; Université Mohamed Kheider-Biskra.

BELARBI. F, (2010), Etude de la pluviométrie journalière dans le bassin versant de la TAFNA Pour l'obtention du diplôme de Magister en hydraulique ; Université Abou Bekr Belkaid- Tlemcen

BRAHMI. D, (2014), Analyse spatio-temporelle des pluies En Algérie pour l'obtention du diplôme Master en Hydraulique ; Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen

Chehma. A, (2011), « L'effet du Changement Climatique sur l'élevage et la gestion durable des parcours dans les zones arides et semi-arides du Maghreb » ; Université KASDI MERBAH - Ouargla- Algérie, **CMEP TASSILI (N° 09 MDU 754)**

Dany. F, Taha. B.M.J, Ouarda, Bernard. B, (1997), Revue bibliographique des tests de stationnarité ; Institut national de la Recherche scientifique, INRS-Eau, Canda.

Derruau. M, (1967), Précis de géomorphologie. Ed ; Masson, Paris. 415 pages.

Dubief. J, (1952), Le vent et le déplacement du sable au Sahara. Ed ; Inst. Rech. Sah ,Alger ; Tome VIII. pp. 123-163.

Dubief. J, (1953), L'hydrologie superficielle au Sahara.

Editions du C.N.R.S, 622 p.

FURON. R, KILIAN. C, MENCHIKOFF. N, (1935), La géologie du Sahara. Rev. Gén. Sci.116-122.

Gardi. R, (1973), Sahara. Ed: Kummerly et Frey, Paris, 3ème edition. pp. 49-51.

GAUTHIER-PILTERS. H, (1961), Observation sur l'écologie du dromadaire dans le Sahara nord occidental. Mammalia., XXV (2) : 195 - 80.

GAUTHIER-PILTERS. H, (1965), Observation sur l'écologie du dromadaire dans l'ouest du Sahara. Bulletin de l'I.F.A.N. Série A (4) : 1534 - 1608.

Laborde. J.P, (2000), Eléments d'Hydrologie de Surface ; Université de Nice - Sophia Antipolis, Centre National de la Recherche Scientifique.

Le Lubre. M, (1952), Conditions structurales et formes de relief dans le Sahara. Ed ; Inst.

MONOD. T, (1992), Du désert. Sécheresse, 3(1). pp. 7-24.

OMM, (2014), Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques ; Genève.

Ozenda.P, (1991) : Flore du Sahara. (3^{ème} édition, mise à jour et augmentée). Paris, Rech. Saha., Alger, Tome VIII. pp.189 -190.

Skhakhfa. I, (2009), Analyse de l'aléa pluviométrique dans la ville de Annaba ; Badji Mokhtar- Annaba university.

Site internet :

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Pr%C3%A9cipitations>

<http://www.glossaire.eaufrance.fr/fr/glossaire>

http://meteocentre.com/internet/precipitation/formation_precipitation.htm

https://fr.wikipedia.org/wiki/Climat_en_Alg%C3%A9rie

<http://www.carte-du-monde.net>

<http://earthwise.bgs.ac.uk>

Site web : interMET

Site web : Course Hero

Résumé

L'étude des processus pluviométriques dans les régions arides et semi-arides n'est plus à démontrer vu que l'eau y constitue le facteur limitant de premier ordre.

Le but de ce mémoire est d'étude pluviométrique dans les régions du sud et sud-est de l'Algérie. Ce travail est basé sur l'étude des données pluviométriques des stations climatologiques de la région sud Algérien en utilisant les tests statistiques.

Pour traiter notre thème, nous avons analysé les séries des données pluviométriques. Ensuite, nous avons fait un Comblement des lacunes pour les série contenant des lacunes en utilisant trois méthodes différentes, et analyse la stabilité de la pluie et son interruption en utilisant les tests de stationnarité : Tests de tendance, Tests de détection des ruptures.

Mots clés : la pluviométrie, sud et sud-est de l'Algérie, approche statistique, test de tendance, test de détection des ruptures.

Abstract

The study of rainfall processes in arid and semi-arid regions is well established, as water is the major limiting factor.

The purpose of this thesis is to study rainfall in the southern and southeastern regions of Algeria. This work is based on the study of the rainfall data of the climatological stations of the southern region of Algeria using statistical tests.

To treat our theme, we analyzed the series of rainfall data. Then, we made a gap filling for the series containing gaps using three different methods, and analyzed the stability of the rain and its interruption using the stationary tests: Trend tests, Break detection tests.

Key words: rainfall, south and southeast Algeria, statistical approach, trend test, break

ملخص

إن دراسة عمليات هطول الأمطار في المناطق القاحلة وشبه القاحلة راسخة ، حيث أن الماء هو العامل الرئيسي المحدد.

الغرض من هذه الرسالة هو دراسة سقوط الأمطار في المناطق الجنوبية والجنوبية الشرقية من الجزائر. يستند هذا العمل إلى دراسة بيانات هطول الأمطار للمحطات المناخية في المنطقة الجنوبية من الجزائر باستخدام الاختبارات الإحصائية.

لعلاج موضوعنا، قمنا بتحليل سلسلة بيانات هطول الأمطار. بعد ذلك قمنا بعمل فجوة في السلسلة التي تحتوي على ثغرات باستخدام ثلاث طرق مختلفة. وقمنا بتحليل ثبات المطر وانقطاعه باستخدام اختبارات الثبات: اختبارات الاتجاه، اختبارات الكشف عن الانفصال.

الكلمات المفتاحية:

هطول الأمطار، جنوب وجنوب شرق الجزائر، النهج الإحصائي، اختبار الاتجاه، اختبار الكشف عن الكسر.