



HAL
open science

Caractérisation du fonctionnement hydroclimatologique du bassin versant d'Ambouli et impacts du barrage de l'Amitié en République de Djibouti (en milieu semi-aride et volcanique)

Golab Moussa Omar

► To cite this version:

Golab Moussa Omar. Caractérisation du fonctionnement hydroclimatologique du bassin versant d'Ambouli et impacts du barrage de l'Amitié en République de Djibouti (en milieu semi-aride et volcanique). Hydrologie. Université de Montpellier, 2023. Français. ⟨NNT : 2023UMONG130⟩. ⟨tel-04913636⟩

HAL Id: tel-04913636

<https://theses.hal.science/tel-04913636v1>

Submitted on 27 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

En Science de l'Eau

École doctorale GAIA

Unité de recherche HydroSciences Montpellier

Caractérisation du fonctionnement hydroclimatologique du bassin versant d'Ambouli et impacts du barrage de l'Amitié en République de Djibouti (en milieu semi-aride et volcanique)

Présentée par Golab MOUSSA OMAR

Le 12 décembre 2023

Sous la direction de Monsieur Jean-Emmanuel PATUREL
Et Christian SALLES

Devant le jury composé de

Ilias Kacimi, Professeur, Université Mohamed V, Maroc

Pierre Camberlin, Professeur, Université de Bourgogne, France

Mohamed Jalludin, Directeur Général, Centre d'Etudes et de Recherche de Djibouti

Christine Vallet-Coulomb, Maître de Conférences, Université Aix Marseille

Flavie Cernesson, Professeure, AgroParis Tech

Christelle Guilhe-Batiot, Maître de Conférences, Université de Montpellier

Gil Mahé, Directeur de recherche, IRD, France

Frédéric Huneau, Professeur, Université de Corse, France

Président du jury

Rapporteur

Examineur

Examinatrice

Examinatrice

Examinatrice

Invité

Invité

*En mémoire de mon père qui m'a quitté
juste avant la fin de cette aventure. Chaque
mot de cette thèse est imprégné de sa
sagesse et de son encouragement.*

Remerciements

La réalisation de cette thèse a été un voyage enrichissant, semé d'embûches, de découvertes et d'apprentissages. Elle n'aurait jamais vu le jour sans le soutien inconditionnel de nombreuses personnes à qui je tiens à exprimer toute ma gratitude.

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma sincère gratitude à mon directeur de thèse, M. Jean-Emmanuel Paturel. Sa disponibilité sans faille, son expertise et ses encouragements constants ont été un pilier essentiel tout au long de cette recherche. Merci, pour m'avoir guidé avec tant d'ardeur et de dévouement. Je remercie également M. Christian Salles, mon co-directeur de thèse pour son implication, ses précieuses contributions et pour avoir partagé avec moi ses vastes connaissances.

Un remerciement particulier est adressé à M. Gil Mahé, co-encadrant de cette thèse. Sa bienveillance, son soutien inébranlable et ses conseils éclairés ont grandement contribué à la concrétisation de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à M. Mohamed Jalludin, Directeur général du Centre d'Etudes et de Recherches de Djibouti (CERD), pour la confiance qu'il m'a témoignée. Ses précieux conseils et son soutien ont été essentiels pour la réalisation de cette thèse.

Un merci spécial à M. Patrick Lachassagne, Directeur de HydroSciences Montpellier (HSM), pour son accueil chaleureux au sein du laboratoire et pour ses recommandations avisées qui ont enrichi ce travail.

Ma gratitude s'étend également au comité de suivi de thèse pour leurs précieux conseils qui ont orienté cette recherche dans la direction appropriée.

Je remercie les membres du jury de thèse pour avoir accepté de juger ce travail. Leur expertise et leurs retours seront, j'en suis sûr, d'une grande valeur pour ma future carrière.

Ma famille a été la source inépuisable d'amour et de soutien tout au long de ce parcours. Une mention spéciale à ma chère maman, Nafissa Mohamed, pour son amour indéfectible, sa patience et son encouragement constant.

Mes amis ont également joué un rôle crucial en m'apportant leur soutien, en particulier lors des moments les plus éprouvants. Merci pour votre amitié et votre présence constante.

Enfin, je tiens à remercier tous mes collègues de HSM et du CERD. Leur bienveillance, leur camaraderie et leurs encouragements ont créé un environnement propice à la recherche et à l'apprentissage.

À vous tous, merci du fond du cœur.

Résumé

La République de Djibouti, bien que située dans une région principalement aride à semi-aride, est confrontée à des défis importants liés aux inondations. Ces défis ont été accentués ces dernières décennies, probablement en raison des effets du changement climatique. Les événements pluvieux, bien que rares, jouent un rôle crucial en influençant les débits des oueds éphémères et en alimentant les nappes phréatiques. Cependant, ces mêmes précipitations peuvent aussi entraîner des inondations, notamment dans les zones urbaines. La nécessité de comprendre le comportement hydrologique de l'Oued Ambouli est devenue impérative, en particulier à la lumière des inondations catastrophiques des années 2010 et suivantes. Le bassin versant de cet oued, couvrant 794 km², est d'une importance vitale pour la ville de Djibouti, notamment en termes d'approvisionnement en eau potable. Bien que des études hydrogéologiques et géochimiques aient été menées sur cette zone, l'aspect hydrodynamique reste peu étudié et incomplet. La présente recherche a deux objectifs majeurs : d'abord, caractériser le fonctionnement hydrodynamique du bassin versant d'Ambouli en considérant les particularités climatiques et géologiques de la région. Ensuite, évaluer l'impact du "Barrage de l'Amitié", construit en 2020, en tant qu'outil stratégique de prévention des inondations. Malheureusement, l'analyse est compliquée par la rareté des données hydroclimatiques. Pour pallier ces lacunes, des produits d'estimation de pluie alternatifs, tels que les données satellitaires, ont été envisagés. Bien que ces produits soient satisfaisants à des échelles annuelles et mensuelles, ils se révèlent moins fiables à l'échelle journalière, essentielle pour la prévision des crues. Les premières analyses hydroclimatiques révèlent une baisse des précipitations au fil des ans. Plus inquiétant encore, une grande majorité des pluies sont inférieures à 5 mm. Les modèles hydrologiques, tels que HEC-HMS et GR4H, ont été essentiels pour simuler les débits dans le bassin versant. Cependant, ces modèles, bien que prometteurs, nécessitent une validation plus poussée. La mise en place de nouvelles stations de surveillance hydrologique pourrait améliorer la calibration de ces modèles et offrir une meilleure compréhension des dynamiques hydrologiques, renforçant ainsi la capacité de prévision et de gestion des ressources en eau de la région.

Abstract

The Republic of Djibouti, situated predominantly in an arid to semi-arid region, grapples with significant challenges related to flooding. These challenges have intensified in recent decades, likely due to the impacts of climate change. Rainfall events, although infrequent, play a pivotal role in influencing the flow of ephemeral rivers (wadis) and replenishing groundwater reserves. However, these very rainfalls can also lead to flooding, especially in urban areas. The need to understand the hydrological behavior of the Ambouli River has become paramount, especially in light of the catastrophic floods observed in the 2010s and subsequent years. The watershed of this river, spanning 794 km², is of critical importance to the city of Djibouti, particularly in terms of potable water supply. Although hydrogeological and geochemical studies have been conducted in this area, the hydrodynamic aspect remains under-researched and incomplete. The primary objectives of this research are twofold: firstly, to characterize the hydrodynamic functioning of the Ambouli watershed, taking into account the region's climatic and geological peculiarities, and secondly, to assess the impact of the "Friendship Dam," constructed in 2020, as a strategic tool for flood prevention. Unfortunately, the analysis is complicated by the scarcity of hydroclimatic data. To address these gaps, alternative rainfall estimation products, such as satellite data, have been considered. While these products are satisfactory at annual and monthly scales, they prove less reliable at the daily scale, crucial for flood forecasting. Initial hydroclimatic analyses reveal a decline in rainfall over the years, with a concerning majority of the rains being less than 5 mm.. Hydrological models, such as HEC-HMS and GR4H, have been instrumental in simulating flows within the watershed. However, these models, while promising, require more rigorous validation. The establishment of new hydrological monitoring stations could enhance the calibration of these models, providing a deeper understanding of hydrological dynamics, thereby strengthening the forecasting and management capabilities for the region's water resources.

Valorisation des résultats de recherche

Communications

Avril 2021 : Assemblée Générale de l'EGU (European Geosciences Union). Présentation orale (à distance): *How to assess the vulnerability and the risk of flooding of the most important catchment in Republic of Djibouti?* Conférence virtuelle

Novembre 2021 : FRIEND UNESCO : 4ème Conférence Internationale sur « L'Hydrologie Des Grands Fleuves D'Afrique ». Présentation orale : *Caractérisation hydroclimatique, analyse comparative des termes du bilan hydrologique du bassin versant d'Ambouli (République de Djibouti)*, <https://doi.org/10.5194/piahs-98-1-2021>. Cotonou, Benin

Juin 2022 : XIème Assemblée Scientifique de l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques (AISH 2022). Présentation orale : *Comparative study from ground-based rain gauges vs rainfall estimates products at different time steps in the southeast of the Republic of Djibouti*, Montpellier, France

Articles

Golab Moussa Omar, Jean-Emmanuel Paturel, Christian Salles, Gil Mahé, and Mohamed Jalludin. 2021. *Caractérisation hydro-climatique, analyse comparative des termes du bilan hydrologique du bassin versant d'Ambouli (République de Djibouti)*, Proceedings of IAHS, Pre-conference publication, <https://doi.org/10.5194/piahs-384-225-2021>.

Golab Moussa Omar, Jean-Emmanuel Paturel, Christian Salles, Gil Mahé, Mohamed Jalludin, Frédéric Satgé, Mohamed Ismail Nour, and Abdillahi Hassan Hersi. 2022. *Comparative study from ground-based rain gauges vs. rainfall products at different time steps in the southeast of the Republic of Djibouti*, 2022. Proceeding IAHS. En edition

Golab Moussa Omar, Jean-Emmanuel Paturel, Christian Salles, Gil Mahé, Mohamed Jalludin, Frédéric Satgé, and Mohamed Ismail Nour. 2023. "Evaluation of Rainfall Products in Semi-Arid Areas: Application to the Southeast of the Republic of Djibouti and a Focus on the Ambouli Catchment", *Water* 15, no. 12: 2168. <https://doi.org/10.3390/w15122168>

Table des matières

Table des matières	7
Liste des figures	14
Liste des tableaux	17
Introduction générale.....	20
1. Contexte général de la thèse	20
2. Raisonnement scientifique et son évolution.....	20
3. Objectifs de la Recherche	21
4. Approche Méthodologique	21
5. Organisation du document de Thèse.....	22
Chapitre 1 : Contexte et cadre général de la zone d'étude.....	25
1. Contexte général de la République de Djibouti	25
1.1. Localisation géographique.....	25
1.2. Géomorphologie	26
1.3. Contexte géologique	27
1.4. Climatologie	28
1.5. Contexte hydrogéologique.....	29
1.6. Hydrologie et ressources en eau	32
2. Présentation du bassin versant d'Ambouli.....	33
2.1. Localisation du bassin versant d'Ambouli	33
2.1. Géomorphologie	35
2.2. Topographie.....	37
2.3. Géologie.....	39
2.4. Réseau hydrographique	41
2.5. La végétation	41
2.6. L'occupation des sols	42
2.7. Ouvrages hydrauliques dans le bassin versant	42
2.7.1. Le Barrage de l'Amitié à Oueah.....	42
2.7.2. La digue et la « nouvelle » voie ferrée	44
Chapitre 2 : Données de l'étude : Caractéristiques et sources de données de la zone d'étude.....	47
1. Données de précipitation.....	47
1.1. Historique des données relatives aux pluies (pluviométrie et pluviographie)	47
1.2. Inventaire des données de précipitation	49
1.2.1. Données pluviométriques.....	49

1.2.1.1.	Inventaire des données pluviométriques.....	49
1.2.1.2.	Taux de lacune des stations pluviométriques	55
1.2.2.	Données pluviographiques.....	57
1.2.2.1.	Inventaire des données pluviographiques.....	57
1.2.2.2.	Taux de lacunes des stations pluviographiques.....	61
1.3.	Synthèse des données de précipitations	63
1.4.	P-Datasets : Présentation des produits d'estimation de pluie	66
2.	Données hydrométriques.....	69
2.1.	Historique des données hydrométriques	69
2.2.	Inventaire des données hydrométriques.....	70
2.3.	Taux de lacune des stations hydrométriques	71
3.	Données climatologiques	74
3.1.	Historique des données climatologiques.....	74
3.2.	Inventaire des données T°C et ETP	74
3.3.	Taux de lacune des données climatologiques	77
4.	Données hydrogéologiques	79
4.1.	Historique des données hydrogéologiques.....	79
4.2.	Aquifère de la nappe de Djibouti	80
4.3.	Inventaire des stations piézométriques	81
5.	Données cartographiques	85
	Chapitre 3: Méthodologie d'analyse des données	88
1.	Les données climatologiques	88
1.1.	Les méthodes d'analyse des tendances et des ruptures.....	89
1.2.	Les évènements extrêmes	91
1.3.	Les données infrajournalières	93
2.	Les produits d'estimation de pluie.....	96
2.1.	Prétraitement des données.....	96
2.2.	Méthodologie de comparaison.....	97
2.3.	Métriques de validation des données	98
2.3.1.	Métriques quantitatives	98
2.3.2.	Métriques catégorielles.....	99
3.	Analyse comparative des termes du bilan hydrologique du bassin versant d'Ambouli	
	101	
4.	Modélisation bassin amont du Barrage de l'Amitié.....	103
4.1.	Modèle HEC-HMS	103

4.1.1. Présentation du modèle HEC-HMS.....	103
4.1.2. Structure du modèle.....	103
4.2. Modèle GR4H.....	104
Chapitre 4 : Étude de données climatiques.....	107
1. Analyse des données de précipitation	108
1.1. Données de précipitation au pas de temps annuel	109
1.1.1. Analyse des cumuls annuels.....	109
1.1.2. Analyse des indices pluviométriques annuels	113
1.1.3. Tests de corrélation sur le rang et de Pettitt.....	114
1.2. Données de précipitation au pas de temps saisonnier	115
1.2.1. Analyse des cumuls saisonniers	116
1.2.2. Analyse des indices pluviométriques centrés réduits saisonniers.....	124
1.2.3. Contributions saisonnières aux cumuls annuels de précipitations.....	126
1.2.4. Tests de corrélation sur le rang et de Pettitt.....	127
1.3. Données de précipitation au pas de temps mensuel	129
1.3.1. Analyse des cumuls mensuels	129
1.3.2. Contributions mensuelles aux cumuls annuels de précipitations	132
1.3.3. Tests de corrélation sur le rang et de Pettitt.....	133
1.4. Données de précipitation au pas de temps journalier.....	136
1.4.1. Analyse des pluies journalières	136
1.4.2. Analyse de la pluviométrie des stations Ali Sabieh, Hol-Hol, Loyada, Arta, Djibouti aérodrome et Oueah sur la période 2013-2021.....	144
1.5. Données de précipitation aux pas de temps infrajournalières.....	144
1.5.1. Analyse pluviographique de la station PK50	144
1.5.2. Courbes HDF/IDF	148
1.6. Conclusion partielle	154
2. Analyse des données de température	155
2.1. Données de température au pas de temps annuel.....	155
2.2. Données de température au pas de temps saisonnier	157
2.3. Données de température au pas de temps mensuel	161
2.4. Données de température au pas de temps journalier.....	164
2.5. Conclusion partielle	169
3. Conclusion.....	169
Chapitre 5 : Evaluation of rainfall products in semi-arid areas: application to the southeast of the Republic of Djibouti and a focus on the Ambouli Catchment.....	172

Résumé	172
1. Introduction	173
2. Study area and Datasets	176
2.1. Study area	176
2.2. Datasets	177
3. Methodology	181
3.1. Pre-processing (pre-treatment)	181
3.2. Approach	182
3.3. Metric validation	184
4. Results	187
4.1. Annual comparison	188
4.2. Seasonal comparison	191
4.3. Monthly comparison	193
4.4. Daily comparison	195
5. Discussions	199
6. Conclusions	200
References	203
Chapitre 6 : Caractérisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant d'Ambouli	210
1. Analyse comparative des termes du bilan hydrologique du bassin versant d'Ambouli (République de Djibouti)	210
Résumé	210
1. Introduction	212
2. Présentation de la zone d'étude	212
3. Données et méthodes	213
4. Analyse et comparaison des résultats issus des différentes méthodes de calcul de chaque composante du bilan hydrologique	215
5 Conclusion et perspectives	220
References bibliographiques	221
2. Modélisation amont du Barrage de l'Amitié	223
2.1. Présentation des évènements	223
2.2. Modélisation sous HEC-HMS	226
2.2.1. Les fonctions du modèle	226
2.2.2. Calage du modèle	229
2.2.3. Validation du modèle HEC-HMS	230
2.3. Modélisation sous GR4H	230

2.3.1.	Description du modèle GR4H	230
2.3.2.	Fonctionnement du modèle	231
2.3.3.	Calage du modèle	232
2.3.4.	Validation du modèle	233
Chapitre 7 : Le Barrage de l'Amitié		236
1.	Description du Barrage de l'Amitié	236
1.1.	Objectifs / rôle du Barrage de l'Amitié.....	236
1.2.	Caractéristiques de la retenue	237
1.2.1.	Spécifications techniques	237
1.2.2.	Courbe Hauteur-Volume-Surface :	238
1.3.	Les ouvrages hydrauliques du Barrage de l'Amitié.....	239
2.	Analyse des évènements disponibles	244
2.1.	Analyse de l'évènement de 2019	245
2.2.	Analyse de l'évènement de 2020	251
2.3.	Autre évènement	253
2.4.	Reconstitution des infiltrations : Loi en puissance	254
2.5.	L'élaboration du bilan en eau de surface du Barrage de l'Amitié.....	255
2.5.1.	Les éléments du bilan hydrologiques du Barrage de l'Amitié : les apports et les sorties 256	
2.5.2.	L'équation du bilan hydrologique du Barrage de l'Amitié	256
2.5.3.	Le bilan hydrologique du Barrage de l'Amitié.....	257
3.	Proposition des scénarios d'utilisation des eaux du Barrage de l'Amitié	260
3.1.	Construction de réservoirs supplémentaires	260
3.1.1.	Evaluation des sites potentiels.....	261
3.1.2.	Conception et construction des réservoirs.....	262
3.2.	Lâchers réguliers d'eau stockée pour la régulation de crue	263
3.2.1.	Gestion des débits de sortie	264
3.2.2.	Plan de gestion intégrée du bassin versant	264
3.3.	Diverses utilisations du volume d'eau stockée dans la retenue	265
3.3.1.	Irrigation agricole	265
3.3.2.	Elevage et abreuvement du bétail.....	267
3.3.3.	Approvisionnement en eau potable	270
3.3.4.	Recharge des eaux souterraines.....	272
3.4.	Conclusion partielle	274
Conclusion générale et perspectives		275

Références bibliographiques	278
Annexes	288
Annexe Chapitre 4 : Pluviométrie	288
Analyse au pas de temps annuel des stations de la zone d'étude sur la période complète. 288	
Cumuls annuels	288
Indices pluviométriques centrés réduits annuels	289
Analyse au pas de temps saisonnier des stations de la zone d'étude sur période complète 290	
Cumuls saisonniers	290
Indices pluviométriques saisonniers	293
Analyse au pas de temps mensuel des stations de la zone d'étude sur la période complète 294	
Cumuls mensuels.....	294
Analyse au pas de temps journalier des stations de la zone d'étude	296
Station Ali Sabieh, Hol-Hol, Loyada, Arta et Oueah (période de 2013-2021)	296
Station SAP (période de 2008-2013)	299
Analyse détaillée au pas de temps journalier des stations SAP (2008-2013) ; station par stations 302	
Station Agarder.....	302
Station Arta.....	304
Station Boulleh	306
Station Goumbour Alol.....	308
Station Kalaloho	310
Station PK51	312
Station Oueah.....	314
Annexe Chapitre 6/1 : Hydrologie	317
Données disponibles	317
Station Oueah.....	317
Volume d'eau Station Oueah	323
Courbe tarage station Oueah	327
Annexe Chapitre 6/2 : Modélisation hydrologique	328
Evenement du 06-07/05/2008.....	328
GR4H.....	328
HEC-HMS	330
Evenement du 01-06/11/2008.....	332
GR4H.....	332

Liste des figures

Figure 1: Carte de localisation de la République de Djibouti (RDD).....	26
Figure 2: Carte géologique simplifiée de la République de Djibouti (in Jalludin, 1993).....	28
Figure 3: Diagramme ombrothermique de la station Djibouti aéroport sur la période 1961-2021 .	29
Figure 4: Carte simplifiée des principaux aquifères de la République de la Djibouti (in Houmed-Gaba, 2009).....	31
Figure 5: Carte de répartition de la consommation en eau potable de la République de Djibouti (<i>in Houmed-Gaba, 2009</i>)	32
Figure 6: Carte de localisation des cours d'eau et des lacs permanents en République de Djibouti ...	33
Figure 7: Carte de localisation du bassin versant d'Ambouli	34
Figure 8: Carte géomorphologique du bassin versant d'Ambouli (in SAFEGE, 2007) Erreur ! Signet non défini.	
Figure 9: Carte d'élévation du bassin versant <i>d'Ambouli</i>	37
Figure 10: Courbe hypsométrique du bassin versant d'Ambouli	38
Figure 11: Carte géologique du bassin versant d'Ambouli.....	40
Figure 12: Carte du cours d'eau et des affluents principaux du bassin versant d'Ambouli	41
Figure 13: Photographie aérienne du Barrage de l'Amitié à Oueah (Source : Radiotélévision de Djibouti).....	44
Figure 14: Image aérienne de la digue en rive droite de l'oued Ambouli (Source : Google Earth).....	45
Figure 15: Réseau de stations pluviométriques et pluviographiques de la République de Djibouti dans les années 1980.....	48
Figure 16: Réseau de mesures pluviométriques de l'ANM depuis 2013.....	50
Figure 17: Pluviogrammes de la station PK50	57
Figure 18: Pluviogramme déroulé de la station PK50 – pluviographe à siphon	58
Figure 19: Localisation des stations du Système d'Alerte Précoce (SAP).....	59
Figure 20: Frise chronologique des données de précipitations	65
Figure 21: Localisation des stations hydrométriques mise en place par la CHA.....	70
Figure 22: Chronologie des thèses en hydrogéologie et géochimie de la zone d'étude	79
Figure 23: Carte géologique de la zone de la nappe de Djibouti 1/200 000 (Le Gall et al., 2015).....	81
Figure 24: Localisation des forages piézométriques	84
Figure 25: Zoom sur les forages piézométriques de la zone du bassin versant d'Ambouli	85
Figure 26: Localisation des stations des longues séries étudiées (ANM).....	109
Figure 27: Evolution de la pluviométrie annuelle sur différentes fenêtres temporelles - 27a : Djibouti Aéroport et Djibouti Serpent sur 1901-2021 – 27b : Djibouti Aéroport, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Ali Sabieh, Arta et Oueah entre 1947 et 2021	110
Figure 28: Pluviométrie annuelle sur la période commune (1957-1980) aux stations Djibouti Aéroport, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Loyada, Ali Sabieh, Arta et Oueah	111
Figure 29: Distribution des cumuls pluviométriques annuels et statistiques descriptives sur la période commune (1957-1980) aux stations Djibouti Aéroport, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Ali Sabieh, Loyada, Arta et Oueah.....	112
Figure 30: Indices pluviométriques centrés réduits annuels des stations de Djibouti Aéroport et Djibouti Serpent sur la période 1901-2021	113
Figure 31: Indices pluviométriques centrés réduits annuels sur la période commune (1957-1980) aux stations Djibouti Aéroport, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Ali Sabieh, Loyada, Arta et Oueah.....	114
Figure 32: Evolution de la pluviométrie saisonnière sur la période d'observation 1901-2021	117
Figure 33: Evolution de la pluviométrie saisonnière sur la période commune (1957-1980) aux stations Djibouti Aéroport, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Ali Sabieh, Loyada, Arta et Oueah	118

Figure 34: Distribution de la pluviométrie et statistiques descriptives saisonnières sur la période commune (1957-1980) aux stations Djibouti Aéroport, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Ali Sabieh, Loyada, Arta et Oueah.....	121
Figure 35: Indices pluviométriques centrés réduits saisonniers aux stations de Djibouti serpent et Djibouti aéroport sur la période 1901-2020.....	123
Figure 36: Indices pluviométriques centrés réduits saisonniers sur la période commune (1957-1980) aux stations Djibouti Aéroport, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Loyada Ali Sabieh, Arta et Oueah.....	125
Figure 37: Contribution du cumul saisonnier par rapport à la pluviométrie annuelle sur la période commune (1957-1980) aux stations Djibouti Aéroport, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Ali Sabieh, Loyada, Arta et Oueah.....	127
Figure 38: Régime pluviométrique mensuel des deux stations de Djibouti (période 1901-2021)	129
Figure 39: Régime pluviométrique mensuel sur la période commune (1957-1980) aux stations Djibouti Aéroport, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Ali Sabieh, Loyada, Arta et Oueah	130
Figure 40: Distribution de la pluviométrie mensuelle sur la période commune (1957-1980) aux stations Djibouti Aéroport, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Ali Sabieh, Loyada, Arta et Oueah.....	131
Figure 41: Contributions mensuelles aux cumuls annuels de précipitations sur la période commune (1957-1980) aux stations Djibouti Aéroport, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Ali Sabieh, Loyada, Arta et Oueah	133
Figure 42: Nombre de jours de pluie par an (précipitations non nulles)	137
Figure 43: Répartition des cumuls de précipitation journalière (station Djibouti Aéroport 1981-2021).....	139
Figure 44: évolution des indices de précipitation utilisées dans l'analyse des événements climatiques	143
Figure 45: Nombre d'évènements pluvieux par an pour la station PK50 (sur la période 1984-1993) 145	145
Figure 46: Distribution des durées des événements pluvieux de la station PK50 (période 1984-1993)	146
Figure 47: Distribution des cumuls des événements pluvieux de la station PK50 (sur la période 1984-1993).....	147
Figure 48: Cumuls des événements en fonction de leur durée à la station PK50 (période 1984-1993)	148
Figure 49: Ajustements de Montana de la courbe HDF (durée de pluie <1h et >2h) de la station PK50 (période 1984-1993) et quantiles qui ont servi aux ajustements	150
Figure 50: Les ajustements de Montana de la courbe IDF (<1h et >2h) de la station PK50 (période 1984-1993) et quantiles qui ont servi aux ajustements.....	151
Figure 51: Les ajustements de Montana de la courbe HDF (<30mn et >60mn) de la station PK50 (période 1984-1993) et quantiles qui ont servi aux ajustements	153
Figure 52: Les ajustements de Montana de la courbe IDF (<30mn et >60mn) de la station PK50 (période 1984-1993) et quantiles qui ont servi aux ajustements	154
Figure 53: Evolutions annuelles des températures à Djibouti Aéroport au pas de temps annuel (1966-2019)	156
Figure 54: Tendances saisonnières des données de température de la station Djibouti Aéroport... 160	160
Figure 55: Evolution mensuelle des données de température	162
Figure 56: Résultats des traitements de données de température selon l'ETCCDI.	168
Figure 57: Location of the study area and rain gauges a) Territory of the Republic of Djibouti with regionalization of two rainfall zones (EAST and WEST by Assoweh Dabar [1]). b) Focus on the southeast zone with the analysis rain gauges (underlined in cyan color).c) Focus on the Ambouli catchment.....	176

Figure 58: Diagram summarizing the methodology used for this study.....	183
Figure 59: P-dataset metrics for rain gauge stations in the southeast of the Republic of Djibouti, at the annual (left column) and monthly (right column) time steps over the period 1980-1990.....	188
Figure 60: The performance of P datasets in terms of mean annual precipitation compared to the average annual precipitation of the rain gauge stations on 2008-2013.	190
Figure 61: P-dataset metrics for the two study areas, the southeast of the Republic of Djibouti (left column) and the Ambouli catchment (right column), at the seasonal time step.	192
Figure 62: Bassin de l'Oued Ambouli et localisation des stations pluviométriques et limnimétriques	213
Figure 63: Données disponibles sur le bassin versant d'Ambouli. La Pluviométrie (Rouge : infra-journalier , Orange : journalier , Bleu : mensuel) ; la Limnimétrie (Jaune : infra-journalier) ; la Temperature (Vert :Journalier)	214
Figure 64 : Variation des précipitations moyennes mensuelles dans le bassin versant d'Ambouli (2008-2013)	217
Figure 65: Indice pluviométrique pluviométrique de la station Djibouti aéroport (1953-2018)...	218
Figure 66: Evolution de la pluie annuelle de la station Djibouti-Aéroport (1953-2018).....	218
Figure 67: Les événements sélectionnés pour la modélisation hydrologique Erreur ! Signet non défini.	
Figure 68: Schéma conceptuel du modèle GR4H (adapte de Perrin et al., 2003. In Desclaux et al., 2017).....	232
Figure 69: Carte de localisation du barrage de l'Amitié.....	236
Figure 70: Courbe Hauteur-Volume-Surface du barrage de l'amitié (in DSI, 2017)	239
Figure 71: Les ouvrages hydrauliques du barrage de l'amitié (in DSI, 2017)	240
Figure 72: Schéma de l'évacuateur de crue du Barrage de l'Amitié en forme "labyrinthe"	242
Figure 73: Courbe de débit de l'évacuateur de crue du barrage de l'amitié (in DSI,2017).....	244
Figure 74: Courbe du niveau d'eau et du volume d'eau dans le barrage de l'amitié pour l'évènement de 2019.....	245
Figure 75: Courbe du niveau d'eau et du volume d'eau dans le Barrage de l'Amitié pour l'évènement de 30/10 au 21/11/2019	246
Figure 76: Courbe de débit de perte par infiltration et par évaporation au niveau du Barrage de l'Amitié pour l'évènement du 30/10 au 21/11/2019	247
Figure 77: Courbe du niveau d'eau et du volume d'eau dans le Barrage de l'Amitié pour l'évènement de 25/11 au 30/11/2019	248
Figure 78: Courbe de débit de perte par infiltration et par évaporation au niveau du Barrage de l'Amitié pour l'évènement du 25/11 au 30/11/2019	249
Figure 79: Courbe de hauteur d'eau et de la pluviométrie du barrage de l'amitié pour l'évènement de 2019.....	250
Figure 80: Image aérienne du Barrage de l'Amitié lors de l'évènement de 2019, le barrage a retenu 10 millions de m3 d'eau (Source : Radio Télévision de Djibouti)	251
Figure 81: Courbe du niveau d'eau et du volume d'eau dans le Barrage de l'Amitié pour l'évènement de 29/05 au 27/06/2019	252
Figure 82: Courbe de débit de perte par infiltration et par évaporation au niveau du Barrage de l'Amitié pour l'évènement de 2020.....	253
Figure 83: Courbe de débit de perte en fonction de la cote de la retenue du Barrage de l'Amitié ...	255
Figure 84: Courbe de remplissage du barrage de l'amitié lors de l'évènement de 2019	259
Figure 85: Localisation des surfaces potentiellement irrigables (Source : Google Earth).....	267
Figure 86: Historique de l'alimentation en eau potable de la ville de Djibouti.....	271

Liste des tableaux

Tableau 1: Tableau de fréquences et des pourcentages cumulés selon les différentes altitudes.....	38
Tableau 2: Spécifications techniques de la digue et du réservoir du Barrage de l'Amitié.....	43
Tableau 3: Inventaire des données pluviométriques (les stations du Bassin de l'Oued Ambouli sont surlignées en jaune)	51
Tableau 4: Tableau des périodes d'observation des données pluviométriques (les stations du Bassin de l'Oued Ambouli sont surlignées en jaune)	54
Tableau 5: Pourcentage des taux de lacune des données des stations pluviométriques (les stations du Bassin de l'Oued Ambouli sont surlignées en jaune)	56
Tableau 6: Inventaire des données pluviographiques existantes en République de Djibouti (les stations du Bassin de l'Oued Ambouli sont surlignées en jaune)	60
Tableau 7: Pourcentage des taux de lacune des stations pluviographiques	62
Tableau 8 : Période d'observation des données de précipitation selon les différents types de station. PLM : pluviomètres ; PLG : pluviographe ; SAP: Système d'Alerte (les stations du Bassin de l'Oued Ambouli sont surlignées en jaune).....	64
Tableau 9: Inventaire des données hydrométriques. LMM : Limnimètre et LMG : Limnigraphe (les stations du Bassin de l'Oued Ambouli sont surlignées en jaune)	73
Tableau 10: Pourcentage des taux de lacunes des stations hydrométriques (les stations du Bassin de l'Oued Ambouli sont surlignées en jaune)	73
Tableau 11: Inventaire des données climatiques.....	76
Tableau 12: Pourcentage des taux de lacune de stations climatologiques	78
Tableau 13: Inventaire des forages piézométriques	82
Tableau 14: Les métriques utilisés pour la performance des mesures quantitatives.....	99
Tableau 15: Tableau de contingence utilisé pour l'analyse métrique catégorielle des précipitations.....	100
Tableau 16: Liste des métriques utilisées dans les mesures de performance catégorielles.....	100
Tableau 17: Résultats des tests de corrélation sur le rang et de Pettitt au pas de temps annuel.....	115
Tableau 18: Tendances et rupture des données pluviométriques au pas de temps saisonnier	128
Tableau 19: Tendances et rupture des données pluviométriques mensuelles	134
Tableau 20: Statistiques descriptives de la station Djibouti Aéroport (période 1981-2021).....	136
Tableau 21: Tendances et rupture des nombres de jours de pluie annuel et mensuel.....	137
Tableau 22: Liste des 11 indices pluviométriques utilisés dans l'analyse des événements climatiques extrêmes.....	140
Tableau 23: Moyenne de la pluviométrie annuelle sur la période récente 2013-2021 comparée à la période 1957-1980	144
Tableau 24: Quantiles de cumuls de hauteurs pour différentes durées de pluie ajustés par une loi exponentielle de paramètres x_0 et s – Station PK50 (sur la période 1984-1993)	148
Tableau 25: Quantiles d'intensité de pluie pour différentes durées de pluie ajustés par une loi exponentielle de paramètres x_0 et s – Station PK50 sur la période 1984-1993).....	149
Tableau 26: Valeurs des paramètres des courbes IDF/HDF ajustées par une loi de Montana : durée de pluie < 1 heure et > 2 heures - $I = a * t^{(-b)}$ ou $H = a * t^{(1-b)}$	149
Tableau 27: Quantiles de cumuls de hauteurs de pluie pour différentes durées de pluie estimés par la loi de Montana – Station PK50 (sur la période 1984-1993) – pluies de durée < 1 h et > 2 h	150
Tableau 28: Quantiles d'intensité de pluie pour différentes durées de pluie estimés par la loi de Montana – Station PK50 (sur la période 1984-1993) – pluies de durée < 1 h et > 2 h.....	151

Tableau 29: valeurs des paramètres des courbes IDF/HDF ajustées par une loi de Montana : durée de pluie < 30 mn et > 60 mn - $I = a \cdot t^{(-b)}$ ou $H = a \cdot t^{(1-b)}$	152
Tableau 30: Quantiles de cumuls de hauteurs de pluie pour différentes durées de pluie estimés par la loi de Montana – Station PK50 (sur la période 1984-1993) – pluies de durée < 30mn et > 60mn.....	152
Tableau 31: Quantiles d'intensités de pluie pour différentes durées de pluie estimés par la loi de Montana – Station PK50 (sur la période 1984-1993) – pluies de durée < 30mn et > 60mn	153
Tableau 32: Tendances et ruptures des données de température au pas de temps annuel (Djibouti Aéroport 1966-2019).....	156
Tableau 33: Tendances et ruptures des données de température au pas de temps saisonnier (Djibouti Aéroport 1966-2019).....	159
Tableau 34: Résultats des tests de tendance et de rupture sur les températures mensuelles à la station Djibouti aéroport (1966-2019)	163
Tableau 35: : Liste des indices de température utilisés dans l'analyse des événements climatiques extrêmes.....	164
Tableau 36: Main characteristics and references of the P datasets. In the data column, S, R and G stands for the sources of information, respectively Satellite, Reanalysis and Gauge; in the analysis area column, SE correspond to southeast area and AC to Ambouli catchment ; spatial coverage refers to the absolute maximum and minimum latitude and latency refers to the time delay for data availability [5]	178
Tableau 37: Characteristics of the selected rain gauges from the national network (ANM) and the CERD Flood Monitoring and Alert System (RACA) for the periods of study.	181
Tableau 38: Metrics used for quantitative performance measurements	185
Tableau 39: Contingency table used for the categorical metric analysis of rainfall	186
Tableau 40: List of metrics used in categorical performance measurements	186
Tableau 41: Quantitative metrics at different time steps in the southeast of Djibouti: ranking P-Datasets based on KGE with the Top 3 in light grey and bottom 3 in dark grey (including ties).....	193
Tableau 42: Quantitative metrics at different time steps in the Ambouli catchment: ranking P-Datasets based on KGE with the Top 3 in light grey and bottom 3 in dark grey (including ties).....	194
Tableau 43: Categorical metrics at different time steps in the southeast of Djibouti: Ranking P-Datasets based on HSS > 1 mm with the Top 3 in light grey and Bottom 3 in dark grey (including ties).	196
Tableau 44: Categorical metrics at different time steps in the Ambouli Catchment: Ranking P-Datasets based on HSS > 1 mm with the Top 3 in light grey and Bottom 3 in dark grey (including ties).	198
Tableau 45: Tableau comparatif des composantes du bilan hydrologique	216
Tableau 46: Valeur des CN en fonction des types de sol et de l'occupation du sol.....	227
Tableau 47 : Valeurs calées des paramètres du modèle HEC-HMS pour les différents événements pluie-Débit retenus et valeur du coefficient de Nash correspondant. En rouge, les Nash positifs	229
Tableau 48: Processus de validation des différents sous HEC-HMS – ce sont donc bien des coefficients de Nash ? En rouge, les Nash positifs.....	230
Tableau 49: Processus de calage pour les différents événements sous GR4H	233
Tableau 50: Processus de validation des différents sous GR4H.....	234
Tableau 51: Spécifications techniques du Barrage de l'Amitié	237
Tableau 52: Distribution fréquentielle des débits et volumes de crue (BCEOM). Extrait du projet Eau et Energie réalisé par BRL citant une étude d'aménagement de l'Oued menée par BCEOM qui date de plus de 20 ans (en 2003) (tire de sepia conseils,2021)	243
Tableau 53: Les valeurs des apports et des sorties du bilan hydrologique journalier du 25/11/2019.....	258
Tableau 54: Besoins en eau annuels pour différentes cultures en m ³ pour 100 hectares.....	265

Tableau 55: Besoins en eau journaliers des différentes espèces de bétail de la République de Djibouti	268
Tableau 56: Répartition des différents bétails disponibles dans la République de Djibouti en 2004.	269
Tableau 57: Synthèse des besoins en eau des différents bétails dans la zone sud (Alawan Issa, 2012)	270

Introduction générale

1. Contexte général de la thèse

Les régions arides à semi-arides, caractérisées par leur faible pluviométrie et leurs températures élevées, sont confrontées à des défis hydrologiques majeurs. Parmi ces défis, les phénomènes d'inondation sont devenus particulièrement préoccupants ces dernières décennies. Ces événements, autrefois considérés comme rares ou atypiques, ont pris de l'ampleur, causant des dommages matériels significatifs et mettant en danger la vie des populations locales. Cette tendance croissante à des inondations plus fréquentes et plus destructrices est probablement liée aux changements climatiques globaux. Les bouleversements des régimes météorologiques, entraînant des épisodes pluvieux plus intenses dans ces zones, rendent le défi de la gestion des eaux d'autant plus crucial.

La République de Djibouti, située dans la Corne de l'Afrique, est caractérisée par un climat aride avec de rares épisodes pluvieux. Lorsqu'ils surviennent, ces événements pluvieux ont un double impact sur le paysage hydrologique : d'une part, ils alimentent le débit des rivières éphémères, appelées oueds, et contribuent au renouvellement des nappes phréatiques. D'autre part, la soudaineté et l'intensité de ces précipitations peuvent provoquer des inondations urbaines et de surface, exacerbées par la topographie du territoire et la concentration de la population dans des zones urbaines.

Face à l'expansion rapide de la capitale, Djibouti, la gestion des ressources en eau et la prévention des risques d'inondation sont devenues des priorités nationales. Parmi les nombreux bassins versants du pays, l'Oued Ambouli occupe une place prépondérante, tant du point de vue stratégique qu'hydrologique. Sur le plan hydrogéologique et géochimique, l'Oued Ambouli a fait l'objet de nombreuses études, en raison de sa position clé dans le contexte hydrogéologique de la nappe de Djibouti. Cependant, en ce qui concerne l'hydrodynamique du bassin, les recherches sont rares ou fragmentaires, laissant un vide dans la compréhension globale de son comportement.

2. Raisonnement scientifique et son évolution

La République de Djibouti, avec sa topographie et son climat distincts, a été historiquement marquée par des défis hydrologiques importants. Face à une variabilité climatique accrue et à des inondations récentes, l'urgence de comprendre et de gérer efficacement ses ressources en eau est devenue manifeste. Initialement, la thèse visait à effectuer une modélisation pluie-débit basée sur les données existantes, s'appuyant sur le fait que Djibouti avait bénéficié de plusieurs projets d'installation d'équipements hydroclimatiques. Ces installations, fournissant une couverture spatiale significative, semblaient offrir une mine d'informations pour la recherche. De plus, l'établissement de l'Observatoire Régional de Recherche pour l'Environnement et le Climat (ORREC) par le Centre d'Etudes et de Recherches de Djibouti (CERD) promettait d'apporter un éclairage supplémentaire sur les enjeux climatiques de la région.

Cependant, à mesure que la recherche progressait, il est devenu clair que les données disponibles présentaient des défis majeurs. Nombre d'entre elles étaient lacunaires, discontinues et/ou de qualité insatisfaisante. Plusieurs équipements installés avaient cessé de fonctionner, réduisant la couverture des données disponibles. Face à ces défis, l'orientation de la recherche a été adaptée pour explorer les données satellites. Mais ces produits satellites, bien qu'innovants,

n'ont pas été à la hauteur des attentes, nécessitant une réflexion supplémentaire sur les méthodes d'investigation.

La construction du Barrage de l'Amitié a ajouté une nouvelle dimension à cette thèse. Ce barrage, conçu pour prévenir les inondations et soutenir l'agriculture, a été géré par la Direction des Grands Travaux du ministère de l'Agriculture, de l'Eau, de la Pêche et de l'Élevage chargé des Ressources Hydrauliques, en collaboration avec le gouvernement turc. Bien que le CERD n'ait pas été directement impliqué dans la planification ou la mise en œuvre du barrage, l'importance de ce projet pour la région a nécessité une intégration de ces nouvelles informations dans la thèse. L'absence de directives claires concernant l'utilisation du barrage a souligné l'importance d'une recherche approfondie sur ses implications hydrologiques.

La thèse s'est alors concentrée sur deux axes principaux : valoriser le travail initial sur la modélisation hydrologique et approfondir la compréhension du fonctionnement du Barrage de l'Amitié. La première approche a visé à utiliser les données disponibles pour analyser un signal amont pour le barrage, tandis que la seconde a nécessité une recherche documentaire exhaustive, une analyse des données disponibles et une évaluation de son fonctionnement. Les analyses ultérieures ont révélé que le barrage perdait une quantité significative d'eau par infiltration, soulignant l'urgence de valoriser cette ressource. Aussi, la dernière phase de la thèse s'est orientée vers l'élaboration de scénarios pour l'utilisation optimale de l'eau stockée dans le barrage, avec un accent particulier sur la durabilité et le bénéfice pour la région.

3. Objectifs de la Recherche

Caractérisation Hydrodynamique du Bassin Versant d'Ambouli : L'objectif principal est d'analyser le fonctionnement hydrodynamique du bassin versant d'Ambouli, en tenant compte des spécificités régionales. La climatologie de la zone, typiquement aride, combinée à une géologie volcanique, offre un contexte unique qui influence le mouvement et le stockage de l'eau. Cette caractérisation permettra d'établir des relations fondamentales entre les précipitations, les écoulements de surface et les interactions avec le substrat géologique.

Évaluation de l'Impact du Barrage de l'Amitié : Construit en 2020, le Barrage de l'Amitié est une initiative majeure dans la stratégie de prévention des inondations de la République de Djibouti. Il est essentiel d'évaluer son impact sur le régime hydrologique, non seulement en termes de stockage et de libération d'eau, mais aussi concernant ses effets sur les zones en aval et les éventuels changements dans le cycle de l'eau.

4. Approche Méthodologique

Inventaire des données hydroclimatiques : La première étape consiste à rassembler toutes les données hydroclimatiques pertinentes pour la zone d'étude. Cela permet d'avoir une vision complète des variables en jeu et de comprendre les tendances passées et actuelles.

Analyse temporelle de l'évolution hydroclimatique : Après la collecte, une analyse détaillée de ces données est nécessaire pour identifier les tendances, les anomalies et caractériser les événements extrêmes. Cette étape est essentielle pour anticiper les changements futurs et adapter les stratégies de gestion de l'eau.

Bilan hydrologique du bassin versant d'Ambouli : Utilisant les données du CERD pour la période 2008-2013, cette analyse fournit une compréhension détaillée du fonctionnement hydrologique du bassin.

Modélisation hydrologique : L'utilisation d'un modèle hydrologique en amont du barrage permet de valider le dimensionnement du barrage, d'anticiper son comportement face à divers scénarios climatiques et d'évaluer sa capacité à répondre aux besoins de la région.

Évaluation de l'impact du Barrage de l'Amitié : Il est essentiel de comprendre comment le barrage modifie le fonctionnement hydrologique du bassin, notamment en termes de régulation des débits, de prévention des inondations et d'effets sur les régions en aval.

Scénarios d'utilisation des eaux du barrage : Enfin, sur la base des analyses précédentes, plusieurs scénarios sont proposés pour optimiser l'utilisation des eaux stockées dans le barrage, en tenant compte des besoins agricoles, des besoins en eau potable et de la prévention des inondations.

5. Organisation du document de Thèse

Le document débute par une introduction qui pose le contexte général de la recherche, les motivations qui ont conduit à cette étude, et les principales questions qui seront abordées tout au long de la thèse.

Le chapitre 1 établit le contexte géographique, géologique, climatologique et hydrogéologique de la République de Djibouti. Il approfondit ensuite les caractéristiques spécifiques du bassin versant d'Ambouli, notamment sa géomorphologie, topographie, géologie et hydrographie. Des compléments sur la végétation, l'occupation des sols et les ouvrages hydrauliques dans le bassin, dont le Barrage de l'Amitié, sont également fournis.

Le chapitre 2 est consacré à une revue exhaustive des différentes sources de données utilisées dans la thèse. Il décrit l'historique, l'inventaire et les taux de lacune des données hydroclimatiques, hydrométriques, climatologiques et hydrogéologiques.

Dans le chapitre 3, la méthodologie d'analyse des différentes données est détaillée. Le chapitre couvre les techniques utilisées pour analyser les tendances des données, les événements extrêmes et les produits d'estimation de pluie. De plus, il fournit un aperçu des méthodes de calcul des termes du bilan hydrologique du bassin versant d'Ambouli.

Le chapitre 4 est dédié à une exploration approfondie des données climatiques, en se concentrant sur les précipitations et les températures à différentes échelles temporelles. Des tests de tendance et de rupture sont également réalisés pour identifier des changements significatifs dans les séries temporelles.

Dans le chapitre 5, une comparaison approfondie entre les observations directes des stations pluviométriques et les estimations de pluie de produits satellitaires est présentée, mettant en lumière les avantages et les limitations de chaque source de données.

Le chapitre 6 se concentre sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant d'Ambouli, en incluant une analyse détaillée du bilan hydrologique et une modélisation hydrologique pour mieux comprendre les dynamiques de l'eau dans la zone.

Le chapitre 7 se consacre à une étude exhaustive du Barrage de l'Amitié. Il décrit le barrage, ses objectifs, ses caractéristiques et ses ouvrages hydrauliques. De plus, une analyse des événements disponibles est présentée, suivie de propositions pour l'utilisation optimale de l'eau stockée dans le barrage pour divers usages.

En fin de document, une conclusion récapitule les principaux résultats de la thèse, les implications pour la gestion de l'eau en République de Djibouti et suggère des pistes pour de futures recherches.

Chapitre 1 : Contexte et cadre général de la zone d'étude

Chapitre 1 : Contexte et cadre général de la zone d'étude

1. Contexte général de la République de Djibouti

1.1. Localisation géographique

La République de Djibouti est située dans l'est de l'Afrique, dans la région de la corne de l'Afrique (Figure 1). Elle se trouve précisément à la jonction entre le Golfe d'Aden et la mer Rouge, ce qui lui confère une position géographique stratégique. Djibouti est un pays relativement petit, avec une superficie totale de 23 200 km².

Les coordonnées géographiques de Djibouti s'étendent entre les latitudes 10°9' et 12°7'N et les longitudes 41°8' et 43°4'E. Ce positionnement géographique lui permet d'être limitrophe de plusieurs pays voisins. À l'ouest et au sud, Djibouti partage ses frontières avec l'Éthiopie, tandis qu'au sud-est, il est bordé par la Somalie. Au nord, la République de Djibouti est limitrophe de l'Érythrée, et à l'est, elle est séparée du Yémen par la mer Rouge.

En plus de ses frontières terrestres, Djibouti possède une importante façade maritime qui s'étend sur environ 372 km. Cette façade maritime longe la mer Rouge et le Golfe d'Aden, allant du Ras Doumera au nord, jusqu'au village de Loyada au sud. L'une des caractéristiques marquantes de cette façade maritime est le détroit de Bab-el-Mandeb, par lequel transitent de nombreuses routes maritimes internationales reliant la mer Rouge à l'océan Indien.

La localisation géographique de Djibouti revêt une importance majeure dans le contexte de l'hydrologie. Elle influence les régimes de précipitations, les ressources en eau, les écosystèmes aquatiques et les interactions avec les pays voisins. En raison de sa proximité avec la mer Rouge et le Golfe d'Aden, les courants océaniques, les mouvements marins et les phénomènes atmosphériques jouent un rôle déterminant dans le climat et les régimes hydrologiques de la région (Assowe Dabar et al., 2021). De plus, la position géographique de Djibouti à la rencontre de différentes plaques tectoniques rend la région sujette à des activités géologiques et volcaniques, ce qui peut également influencer les ressources en eau et les risques naturels tels que les inondations et les séismes.

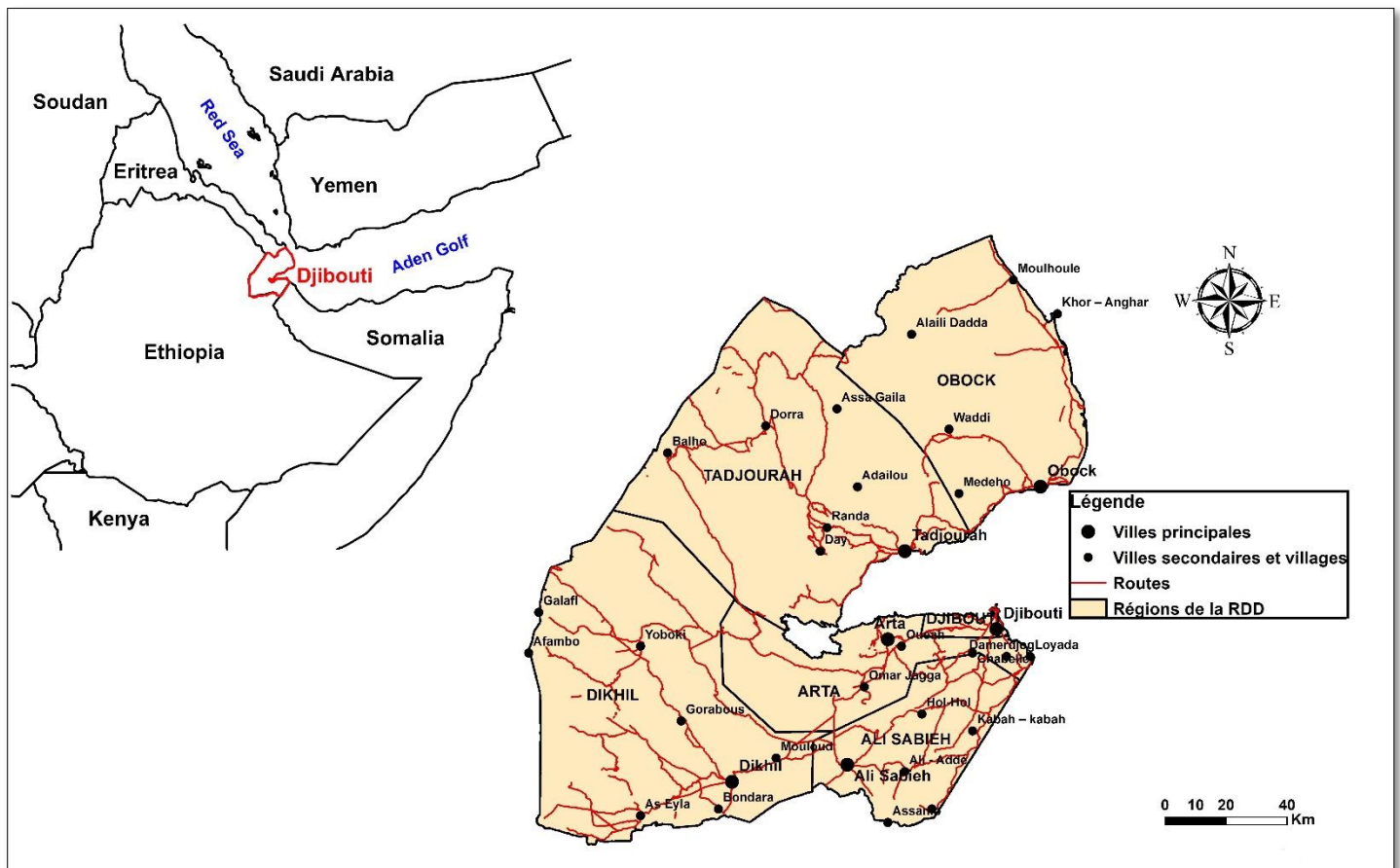


Figure 1: Carte de localisation de la République de Djibouti (RDD)

1.2. Géomorphologie

La République de Djibouti, grâce à sa géologie d'origine volcanique, présente une géomorphologie distinctive caractérisée par un relief très escarpé, composé de massifs, de plateaux et de plaines (Houmed-Gaba, 2009). L'altitude varie de -155 m (en dessous du niveau de la mer) au lac Assal et 2021 m au mont Moussa Ali. Un axe Nord-Sud relie ces deux points et est divisé en deux par le golfe de Tadjourah, dont le fond s'élève progressivement de -1500 m à l'Est, fosse d'Obock, à -200 m à l'Ouest, Goubbet (Houmed-Gaba, 2009).

La géomorphologie de Djibouti se compose de plusieurs entités distinctes (Houmed-Gaba, 2009):

- À l'Est, on trouve de vastes plaines côtières formées principalement de dépôts alluvionnaires, telles que la plaine côtière de Tadjourah, ainsi que des paléorécifs coralliens, comme la plaine côtière d'Obock.
- À l'Ouest, on observe une région fracturée, avec des horsts situés principalement à une altitude supérieure à 1000 m, ainsi que des grabens remplis de sédiments lacustres récents.

Entre ces deux régions, se trouvent des plateaux basaltiques (Dalha, Mak'arrassou) et des massifs rhyolitiques qui s'élèvent souvent à plus de 1000 m (Vellutini et al., 1993). Ces

caractéristiques morphologiques ont été identifiées grâce à la carte géologique de la République de Djibouti (Houmed-Gaba, 2009 ; Vellutini et al., 1993).

La géomorphologie variée de Djibouti a des implications significatives pour l'hydrologie de la région. Les caractéristiques topographiques, telles que les escarpements et les plateaux, influencent le drainage des eaux, les régimes d'écoulement et la formation des cours d'eau. De plus, la présence de plaines côtières et de formations volcaniques peut avoir un impact sur la recharge des aquifères et la disponibilité des ressources en eau.

En conclusion, la géomorphologie de la République de Djibouti est marquée par un relief escarpé composé de massifs, de plateaux et de plaines. Cette configuration géomorphologique unique a des répercussions sur les processus hydrologiques de la région, en influençant le drainage, la formation des cours d'eau et la disponibilité des ressources en eau.

1.3. Contexte géologique

La République de Djibouti se trouve à la convergence de trois grands axes distensifs majeurs, à savoir le Rift continental Est Africain, le Rift océanique de la mer Rouge et le Rift océanique du Golfe d'Aden prolongé par le Golfe de Tadjourah (Barberi et Varet, 1977). Cette position géographique lui confère une histoire géodynamique complexe et unique (Figure 2).

D'un point de vue volcanique, les roches présentes en République de Djibouti sont principalement d'origine basaltique, avec des formations rhyolitiques moins fréquentes (Barberi et Varet, 1977). Les basaltes, qui constituent la majeure partie des formations volcaniques, se sont formés à différentes périodes au cours des derniers 25 à 30 millions d'années, en lien avec les mouvements des plaques tectoniques de la région.

Au début de l'expansion, au Miocène inférieur (13.8 à 23 millions d'années), les premiers mouvements de rupture du massif arabo-nubien ont donné lieu à des éruptions basaltiques, connues sous le nom de basaltes Adoleï (Houmed-Gaba, 2009). Ces basaltes ont recouvert le substratum sédimentaire mésozoïque et sont principalement présents dans la région d'Ali Sabieh. Par la suite, l'expansion s'est poursuivie de manière plus lente, accompagnée par la formation des rhyolites des Mablas, constituées de coulées épaisses et très altérées (Jalludin, 1993). Ces rhyolites se sont formées de manière synchronisée avec l'ouverture du Golfe d'Aden. Une phase d'érosion a ensuite pris place, entraînant la formation de conglomérats et la préservation de certains paléoreliefs (Daoud, 2008).

Durant le Miocène supérieur (5.3 à 13.8 millions d'années), l'activité volcanique a repris avec la mise en place de la série basaltique du Dalha, qui repose en discordance angulaire sur les rhyolites des Mablas. Simultanément, les basaltes Somali se sont déposés dans la partie sud-est du pays (Houmed-Gaba, 2009 ; Barberi et Varet, 1977 ; Arthaud et al., 1980). Entre 3.4 et 1.5 million d'années, les basaltes Stratoïdes et les basaltes du Golfe se sont formés, en relation avec l'ouverture du Golfe de Tadjourah. Les formations basaltiques les plus récentes se trouvent dans les rifts actifs d'Asal, au centre du pays, et de Manda Inakir, au nord-ouest (Audin et al., 1990 ; Daoud, 2008 ; Houmed-Gaba, 2009).

En ce qui concerne les formations sédimentaires, bien moins répandues que les formations volcaniques, elles sont principalement d'âge plio-pléistocène (0.1 à 5.3 millions d'années) à actuel et sont le résultat de processus tectoniques. La sédimentation se retrouve dans les grabens occidentaux, où l'on observe des dépôts lacustres et alluviaux, tels que ceux présents à Gobaad, Hanle et Gaggadé. De plus, les zones côtières du pays présentent des formations sédimentaires, notamment des alluvions associées aux récifs coralliens, le long de la côte nord du Golfe de Tadjoura, entre Obock et Doumeira, ainsi que dans la plaine littorale de Djibouti (Houmed-Gaba, 2009 ; Barberi et Varet, 1977).

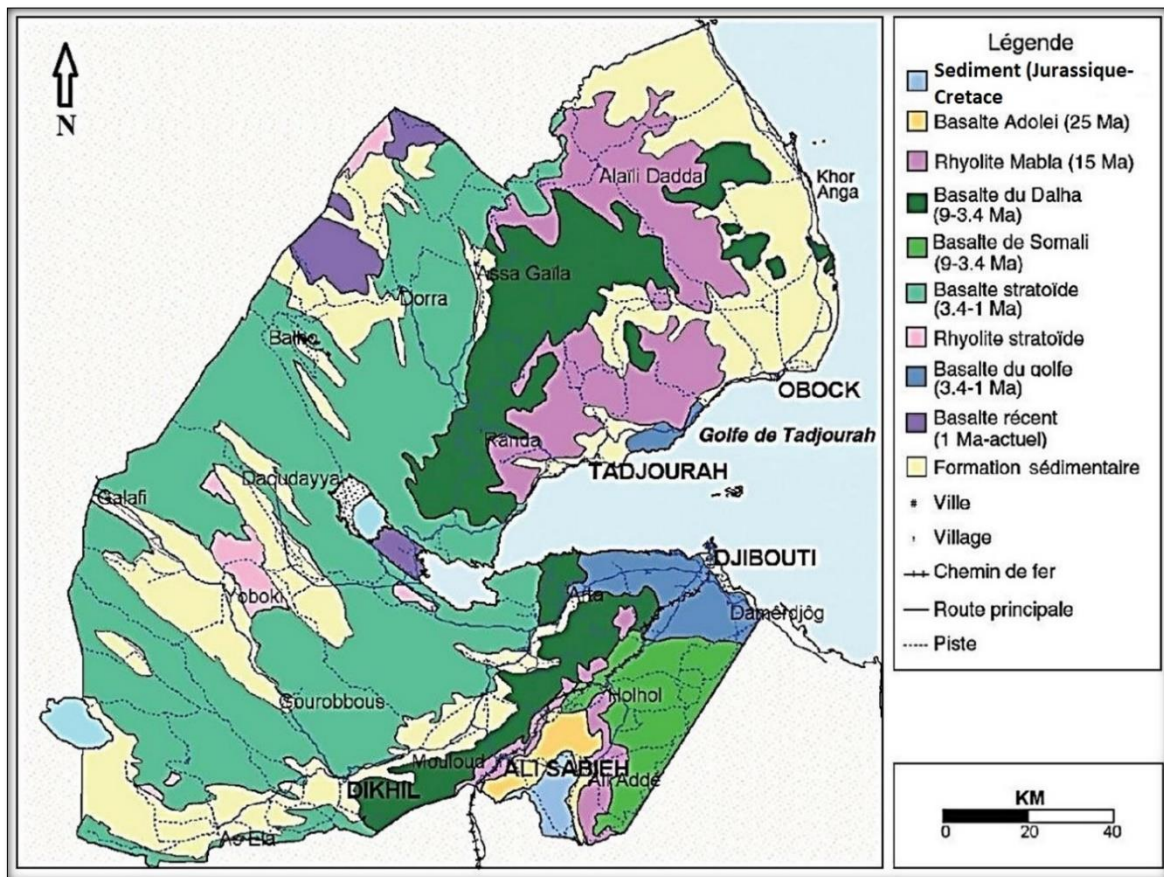


Figure 2: Carte géologique simplifiée de la République de Djibouti (in Jalludin, 1993)

1.4. Climatologie

La République de Djibouti, présente un climat aride caractérisé par des conditions hydroclimatiques particulières. Selon la classification de Köppen, le pays est classé comme ayant un climat aride (BWh). Les principales caractéristiques de ce climat incluent une faiblesse et une irrégularité des précipitations, des températures élevées tout au long de l'année, l'absence de cours d'eau pérennes et une évaporation intense.

Les précipitations en République de Djibouti sont rares et de faible intensité. La moyenne annuelle des précipitations est d'environ 150 mm (Figure 3), mais elles peuvent varier considérablement d'une année à l'autre. Le régime de précipitations est fortement influencé par les systèmes de mousson qui apportent des pluies pendant la saison fraîche d'octobre à mars,

tandis que la saison chaude de juin à septembre est généralement très sèche (CHA, 1982). La distribution spatiale des précipitations est également hétérogène, avec des zones côtières recevant moins de précipitations que les régions montagneuses de l'intérieur du pays (Abdoulkader, 2014).

Les températures en République de Djibouti sont élevées tout au long de l'année en raison de sa localisation près de l'équateur et de son climat aride. Les températures moyennes journalières varient entre 25°C pendant le mois le plus frais (janvier) et 34°C pendant le mois le plus chaud (juillet) (Figure 3). Pendant la période estivale, les températures peuvent atteindre des niveaux extrêmes, dépassant souvent les 40°C (CHA, 1982). La combinaison de températures élevées et de faibles précipitations contribue à une évaporation intense, ce qui affecte le bilan hydrique et la disponibilité des ressources en eau dans le pays (Adam, 1984).

Il est important de comprendre les caractéristiques climatiques de la République de Djibouti dans le contexte de la gestion des ressources en eau et de la planification hydrologique. La rareté des précipitations, les températures élevées et l'évaporation intense posent des défis significatifs pour la gestion durable des ressources en eau dans le pays. Une compréhension approfondie du climat est donc essentielle pour une gestion adaptée et efficace des ressources hydriques de la République de Djibouti.

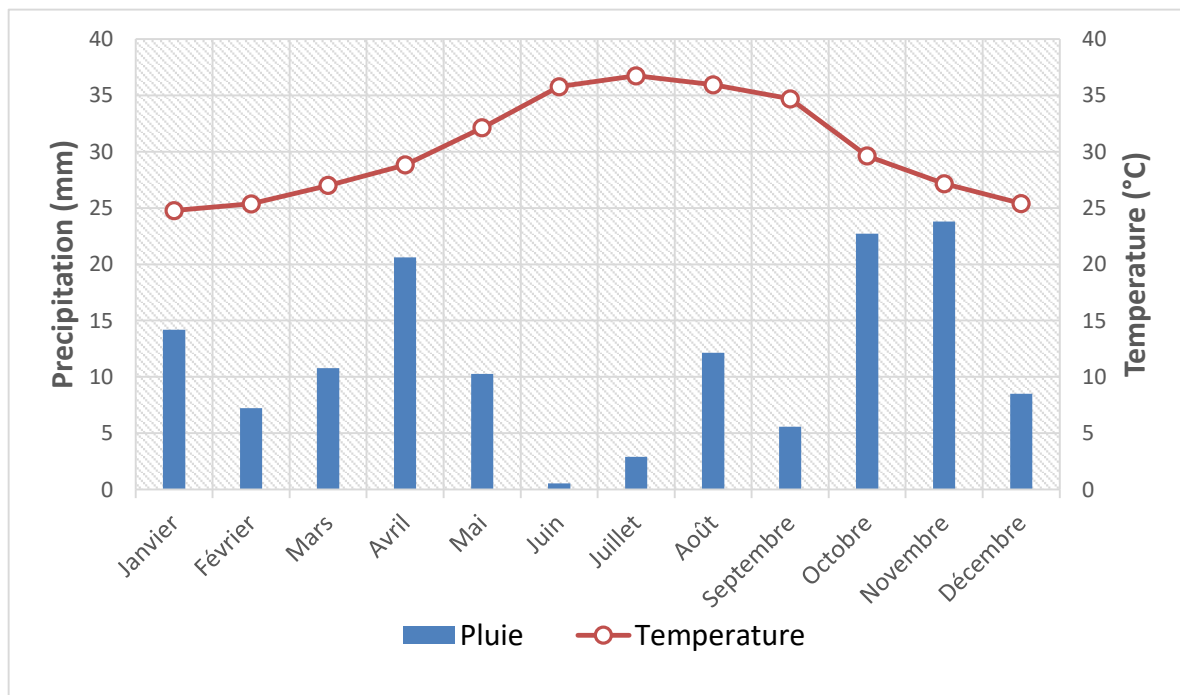


Figure 3: Diagramme ombrothermique de la station Djibouti aérodrome sur la période 1961-2021

1.5. Contexte hydrogéologique

La République de Djibouti présente un contexte hydrogéologique complexe et influencé par ses caractéristiques géologiques et climatiques. L'approvisionnement en eau dans ce pays aride est principalement assuré par les ressources souterraines qui jouent un rôle crucial dans la

satisfaction des besoins en eau potable et en irrigation. Pour comprendre ce contexte hydrogéologique, il est important d'analyser les formations géologiques et les caractéristiques hydrologiques spécifiques de Djibouti.

La géologie de Djibouti est dominée par des formations volcaniques, principalement des basaltes, résultant de l'activité volcanique passée et actuelle dans la région. Ces formations basaltiques présentent une perméabilité relativement élevée, favorisant l'infiltration et le stockage des eaux souterraines (Houmed-Gaba, 2009). Les couches de basalte sont souvent recouvertes par des formations sédimentaires, telles que des dépôts alluvionnaires et des formations coralliennes le long des côtes, qui peuvent constituer des réservoirs d'eau intermittents (Jalludin et Razack, 1994).

La République de Djibouti est également influencée par sa position géographique entre le Rift continental Est Africain et les rifts océaniques de la mer Rouge et du Golfe d'Aden. Cette tectonique active contribue à la présence de failles et de fractures qui peuvent jouer un rôle important dans la circulation des eaux souterraines (Houmed-Gaba, 2009). Ces structures géologiques peuvent servir de voies de drainage et de stockage des eaux souterraines, créant des réservoirs naturels dans le sous-sol de la République de Djibouti.

La disponibilité des ressources en eau souterraine en République de Djibouti est étroitement liée aux précipitations et aux caractéristiques climatiques du pays. Comme mentionné précédemment, La République de Djibouti est caractérisée par un climat aride avec des précipitations annuelles moyennes de l'ordre de 150 mm (CHA, 1982). Les pluies sont généralement rares et irrégulières, ce qui influence directement la recharge des aquifères souterrains.

Le système d'aquifères de la République de Djibouti présente une diversité de formations géologiques qui influencent la disponibilité et l'exploitation des ressources en eau souterraine. En analysant ces aquifères, on peut les subdiviser en différentes parties, en fonction de leur extension et de leurs caractéristiques hydrogéologiques spécifiques (Figure 4).

Tout d'abord, les aquifères des formations volcaniques se distinguent en deux parties distinctes. Les aquifères des formations volcaniques à faible extension, d'une superficie inférieure à 2000 km², sont principalement des aquifères à nappes captives et semi-captives situés dans les parties Nord-Est et Sud-Est du pays (Mohamed, 2012). Ces aquifères volcaniques locaux présentent des épaisseurs généralement supérieures à 200 m (Houmed-Gaba, 2009). Leur recharge provient principalement des lits des oueds, où l'infiltration se produit localement (Jalludin et Razack, 1994). Parmi ces aquifères volcaniques locaux, l'aquifère des basaltes du Golfe et de Somali est le plus intensément exploité, fournissant jusqu'à 36 000 m³/jour d'eau pour la ville de Djibouti (Houmed-Gaba, 2009).

Ensuite, il existe l'aquifère régional, qui s'étend sur l'arrière-pays et se prolonge en Éthiopie au-delà des régions du fleuve Awash (Houmed-Gaba, 2009). Cet aquifère est situé dans les basaltes Stratoïdes qui couvrent plus de 9000 km² du pays (Figure 4). Des études suggèrent que la recharge de cet aquifère provient de l'écoulement souterrain en provenance du fleuve Awash en Éthiopie (Houmed-Gaba et al., 2002).

En ce qui concerne les aquifères sédimentaires, ils se composent également de deux parties distinctes. Les aquifères à nappe inféroflux sont situés dans les formations alluvionnaires des

oueds et sont caractérisés par leur géométrie spécifique liée aux formations sédimentaires holocènes des oueds (Mohamed, 2012). Ces aquifères représentent les nappes de sous-écoulement des cours d'eau superficiels, avec une largeur allant de quelques dizaines à quelques centaines de mètres et une longueur pouvant dépasser plusieurs dizaines de kilomètres. Leur épaisseur reste généralement de l'ordre de quelques dizaines de mètres (Houmed-Gaba, 2009). Ces aquifères sont surexploités dans le milieu rural, fournissant un total de 4,2 millions de m³/an, soit plus de 70% des besoins en eau de la population rurale (Houmed-Gaba, 2009). La recharge prédominante de ces aquifères se produit lors de l'écoulement des oueds, permettant ainsi la recharge des aquifères sédimentaires et volcaniques locaux (Mohamed, 2012).

Enfin, les aquifères des plaines alluviales comprennent les aquifères à nappe libre à semi-captive situés dans les plaines sédimentaires côtières et les bassins de sédimentation (Mohamed, 2012). Leur superficie varie de 40 km² à 1500 km² et leur épaisseur est comprise entre 40 m et 300 m (Abdoulkader, 2014).

La compréhension du système d'aquifères de la République de Djibouti est essentielle pour la gestion durable des ressources en eau souterraine dans ce contexte aride. Des études hydrogéologiques détaillées sont nécessaires pour évaluer la recharge, la capacité et la qualité de ces aquifères, afin de garantir une utilisation efficace et durable de cette ressource précieuse.

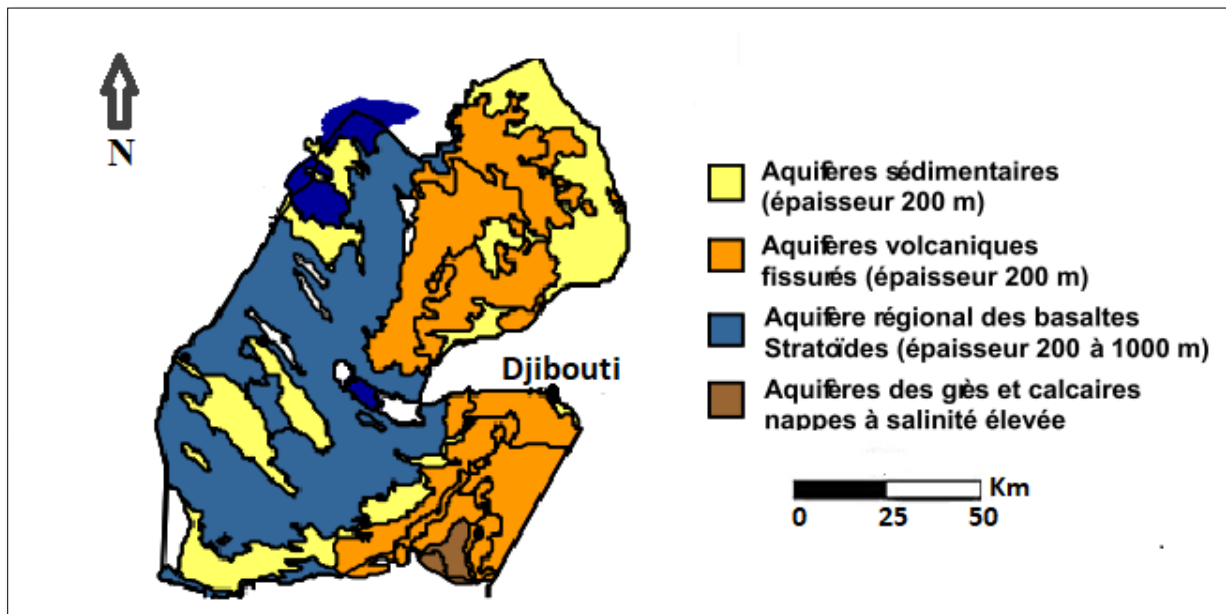


Figure 4: Carte simplifiée des principaux aquifères de la République de la Djibouti (in Houmed-Gaba, 2009)

1.6. Hydrologie et ressources en eau

La République de Djibouti, située dans une région aride, fait face à des défis importants en matière d'hydrologie et de ressources en eau. Le climat sec, caractérisé par une faible pluviométrie et des températures élevées, entraîne une évapotranspiration potentielle supérieure aux précipitations moyennes. Cette situation se traduit par un manque d'eau de surface et une demande croissante en eau conduit la République de Djibouti, tout comme d'autres pays, à se tourner vers une exploitation, souvent excessive, des nappes phréatiques.

Au cours de la seconde moitié du XXe siècle, l'extraction des eaux souterraines dans le monde a considérablement augmenté, représentant actuellement un tiers de la consommation mondiale en eau douce (Essink, 2001). Cette exploitation des eaux souterraines dépasse souvent le taux de renouvellement naturel, entraînant une baisse des niveaux d'eau dans plusieurs régions du monde (Moustadraf et al., 2008 ; ; Hiroshiro et al., 2006 ; Sethi et al., 2006 ; Zhang et al., 2004 ; Sadeg et Karahanoglu, 2001 ; Zhou et al., 2000 ; Houssein et Jalludin, 1996).

Dans la République de Djibouti, en raison de l'absence d'eau de surface, la recherche s'est concentrée sur les eaux des nappes souterraines. Les principales villes de l'intérieur du pays, ainsi que la capitale, pompent leur eau à partir des nappes phréatiques grâce à des forages (Kadar, 2019). Dans les zones rurales, l'eau est collectée à partir de puits de grand diamètre et de faible profondeur, généralement situés le long des lits des oueds (Mohamed, 2012). Cependant, la répartition des forages n'est pas uniforme pour l'ensemble des aquifères exploités. Elle dépend des besoins et de leur proximité avec les grandes agglomérations (Figure 5).

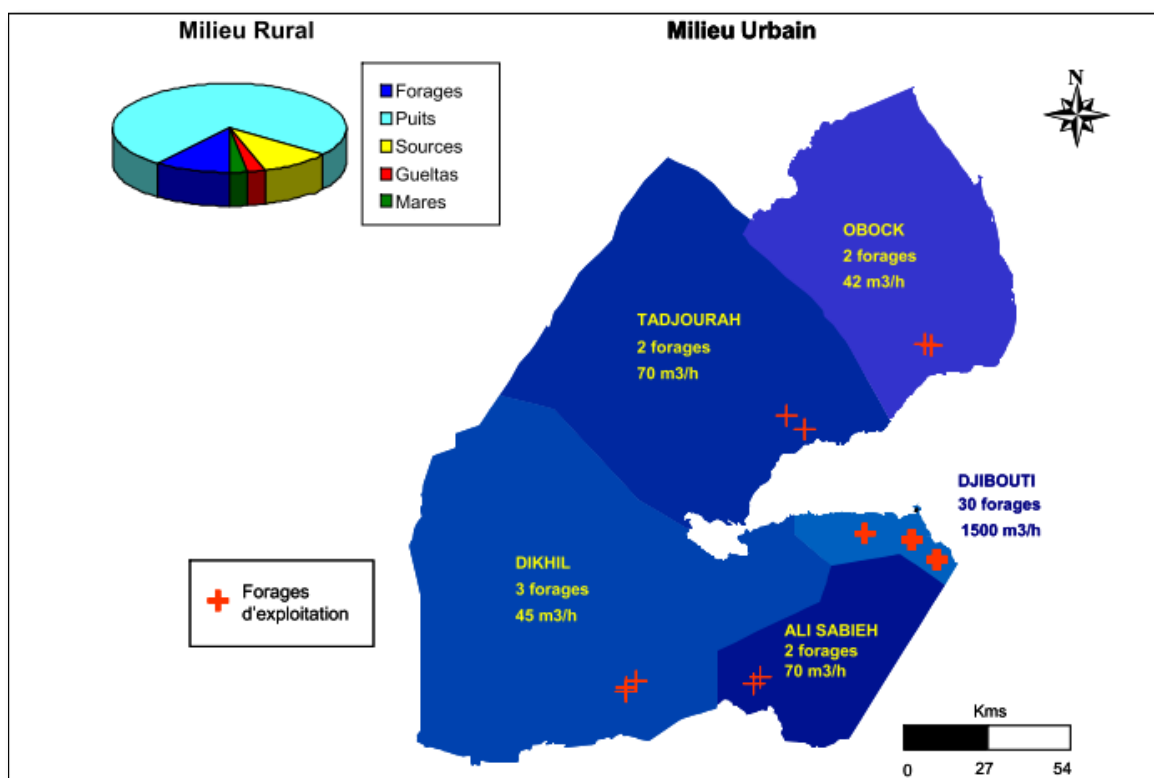


Figure 5: Carte de répartition de la consommation en eau potable de la République de Djibouti (in Houmed-Gaba, 2009)

En raison du climat aride, le territoire de la République de Djibouti ne compte aucun cours d'eau permanent, à l'exception des lacs. Les eaux de surface ne sont utilisées que de manière temporaire lors des périodes de pluie et de manière ponctuelle pour répondre aux besoins en eau pastorale (Figure 6). Ainsi, la principale source d'eau permanente provient des nappes souterraines. La recharge de ces nappes se produit principalement lors des crues des oueds, qui inondent les formations superficielles et recouvrent le fond des vallées.

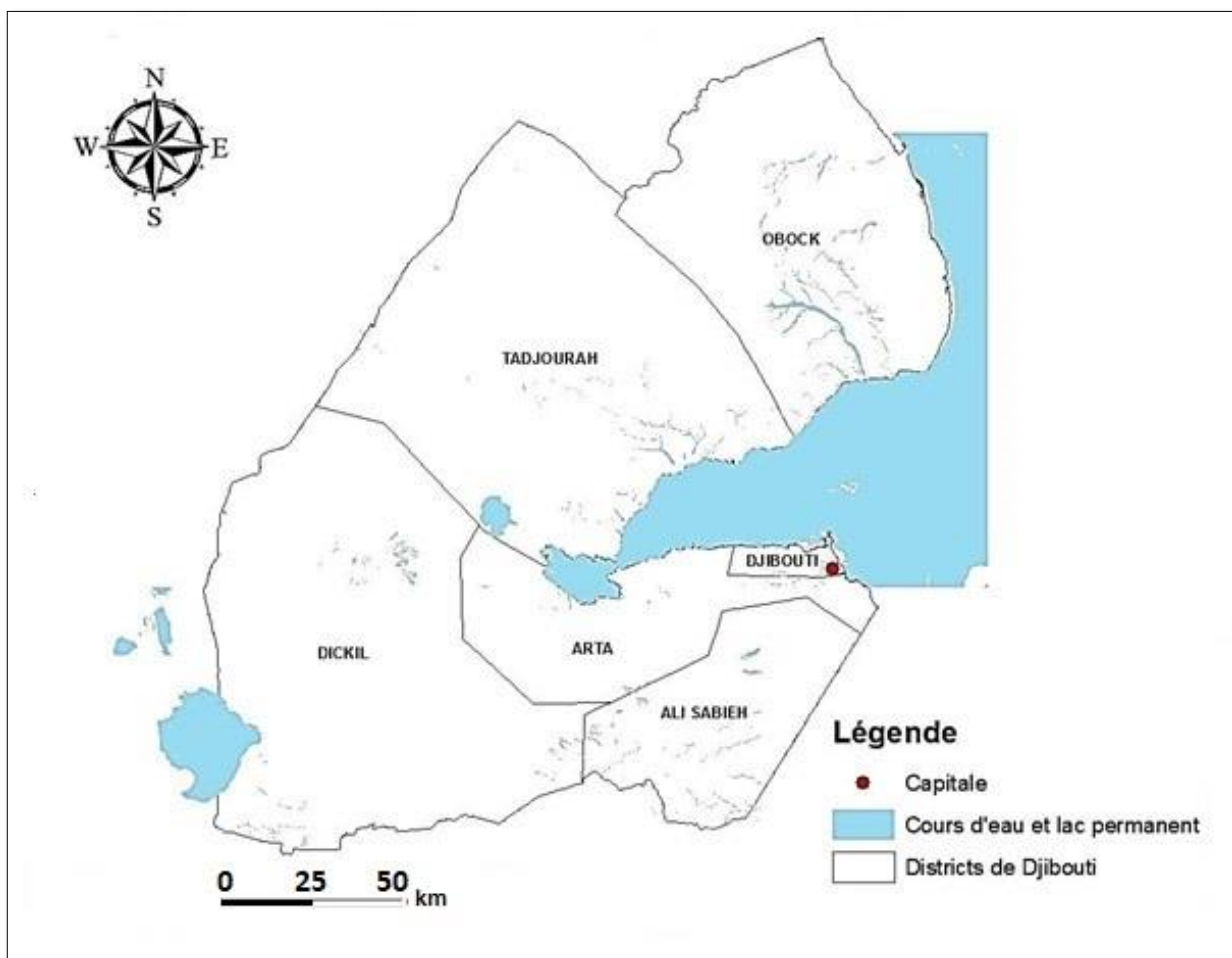


Figure 6: Carte de localisation des cours d'eau et des lacs permanents en République de Djibouti

2. Présentation du bassin versant d'Ambouli

2.1. Localisation du bassin versant d'Ambouli

Le bassin versant d'Ambouli est un bassin exoréique situé au sud est du pays avec une superficie de 794 km², il est le plus grand bassin versant dans le district de Djibouti. Le bassin versant de l'Oued Ambouli revêt une importance particulière en République de Djibouti, malgré sa superficie relativement réduite, représentant moins de 3,5% de la superficie totale du pays (Figure 7). Cette unité hydrographique présente deux caractéristiques physiques étroitement liées à l'activité du pays, en particulier au développement de sa capitale.

Tout d'abord, le delta de l'Oued Ambouli dans l'océan Indien forme un vaste cône aplati prolongé par une presqu'île corallienne, sur laquelle est implantée la ville de Djibouti. La présence d'une ressource en eau abondante dans les terrasses alluvionnaires le long des derniers kilomètres du fleuve, avant son embouchure, est l'une des principales raisons de l'installation et du développement de la ville et du port depuis plus d'un siècle. Cependant, cet aspect bénéfique présente des revers, notamment le risque d'inondations lors des crues, qui sont rares mais très violentes et de plus en plus dommageables à mesure que les infrastructures urbaines se densifient et prennent de la valeur. Au cours des dernières décennies, plusieurs catastrophes ont eu lieu, entraînant des pertes en vies humaines ainsi que d'importants dégâts matériels et économiques.

En outre, le sous-sol de la partie inférieure du bassin versant est constitué d'un dépôt basaltique "récent" d'épaisseur significative, connu sous le nom de "Basaltes du Golfe de Tadjourah". Ce substrat renferme une nappe d'eau souterraine abondante et de bonne qualité, qui est exploitée depuis plusieurs décennies par de nombreux forages pour fournir la quasi-totalité de l'eau nécessaire à l'alimentation en eau de la ville de Djibouti (plus de 14.5 millions de m³ par an actuellement), avec des besoins croissants et une qualité de l'eau en constante détérioration.

Par ailleurs, de nombreuses activités, tant traditionnelles que nouvelles en expansion rapide, sont exercées de manière plus ou moins intensive dans ce bassin versant, telles que l'élevage

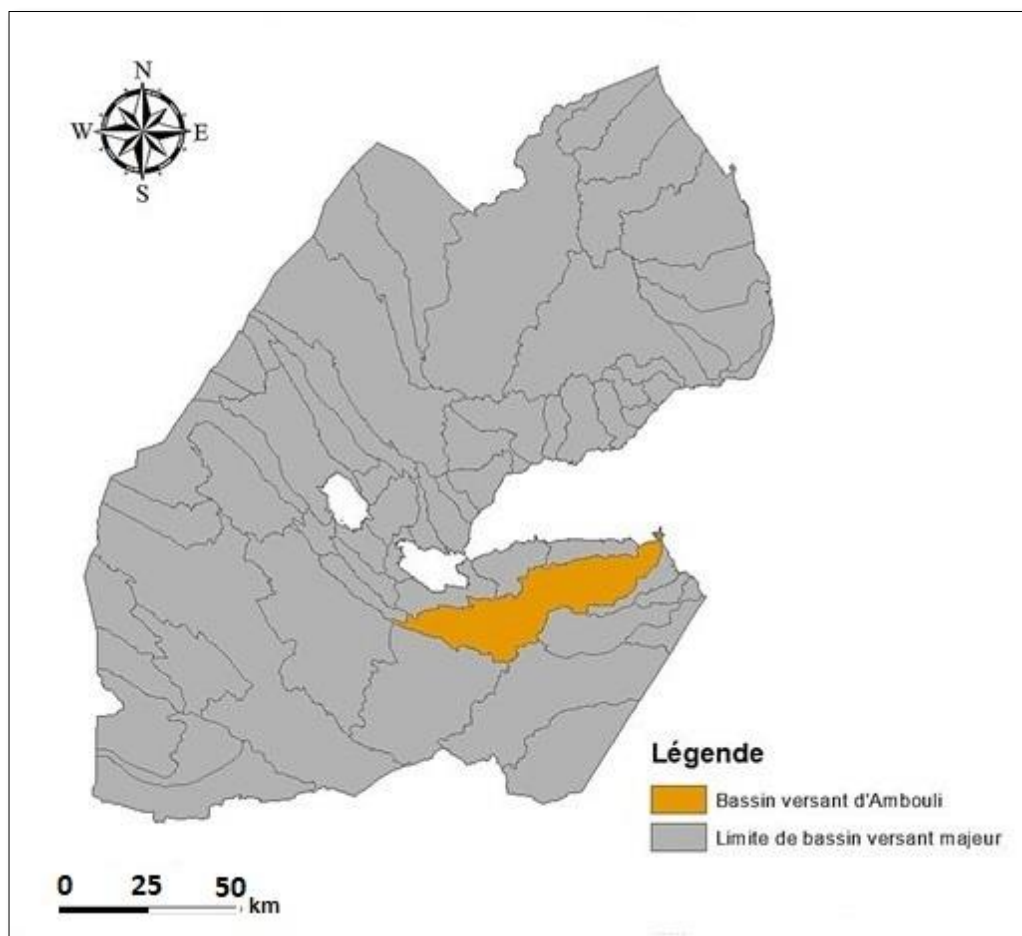


Figure 7: Carte de localisation du bassin versant d'Ambouli

pastoral, l'extraction de matériaux de construction, les transports le long de l'axe routier principal vers l'Éthiopie, ainsi que l'urbanisation et l'agriculture irriguée.

2.1. Géomorphologie

Le bassin versant de l'Oued Ambouli présente une géomorphologie variée et complexe, composée de six ensembles géomorphologiques distincts (SAFEGE, 2007) (Figure 8) :

1. Le haut-bassin s'étend sur l'envers du massif du Bour Ougoul. Bien que cette zone présente les altitudes les plus élevées du bassin, une grande partie de sa surface est constituée de plaines argilo-limoneuses quasi-endoréiques ou à écoulements lents. Du point de vue hydrologique, cette zone présente une aptitude au ruissellement intense moins marquée que les autres parties du bassin.
2. Les ravins descendant du massif d'Arta en rive gauche jouent un rôle hydrologique relativement limité dans la genèse des crues en raison de l'extension réduite de leurs sous-bassins, bien que l'érosion et les transports solides y soient parmi les plus importants du bassin en raison des fortes pentes et de la fragilité des terrains.
3. Le massif central (Bour Ougoul) est composé d'une dorsale de plateaux orientée Sud-Ouest - Nord-Est, avec des vallées périphériques à profil transversal en V assez évasé. Les altitudes varient de 600 à 900 m sur la partie sommitale et d'environ 150 m au débouché sur le piémont.
4. Les pénéplaines alluvionnaires se trouvent sur le piémont du massif central et forment des zones de divagation et d'épandage des oueds, tels que Boulleh et Kalaloho. Bien que la pente longitudinale des oueds reste relativement forte, ce qui limite les capacités de stockage. Des digues de faible hauteur sont présentes.
5. Les plateaux et les canyons des épandages basaltiques du Golfe de Tadjourah sont des éléments caractéristiques du paysage du bassin versant d'Ambouli. Les plateaux sont structurés par des couches de basalte noir-violacé, tandis que les vallées présentent une forme en U avec une largeur de 100 à 200 m et une profondeur de 20 à 50 m. Les sols d'altération des basaltes sont des argiles rouges. Les lits mineurs des oueds contiennent des alluvions grossières telles que des sables, des galets roulés et des "boulders".
6. Enfin, le delta terminal de l'Oued Ambouli forme un cône très aplati d'alluvions grossières d'environ 6 à 8 km de longueur, avec son sommet situé au barrage de Nagad. Ce delta marque la limite aval du bassin versant et constitue l'exutoire.

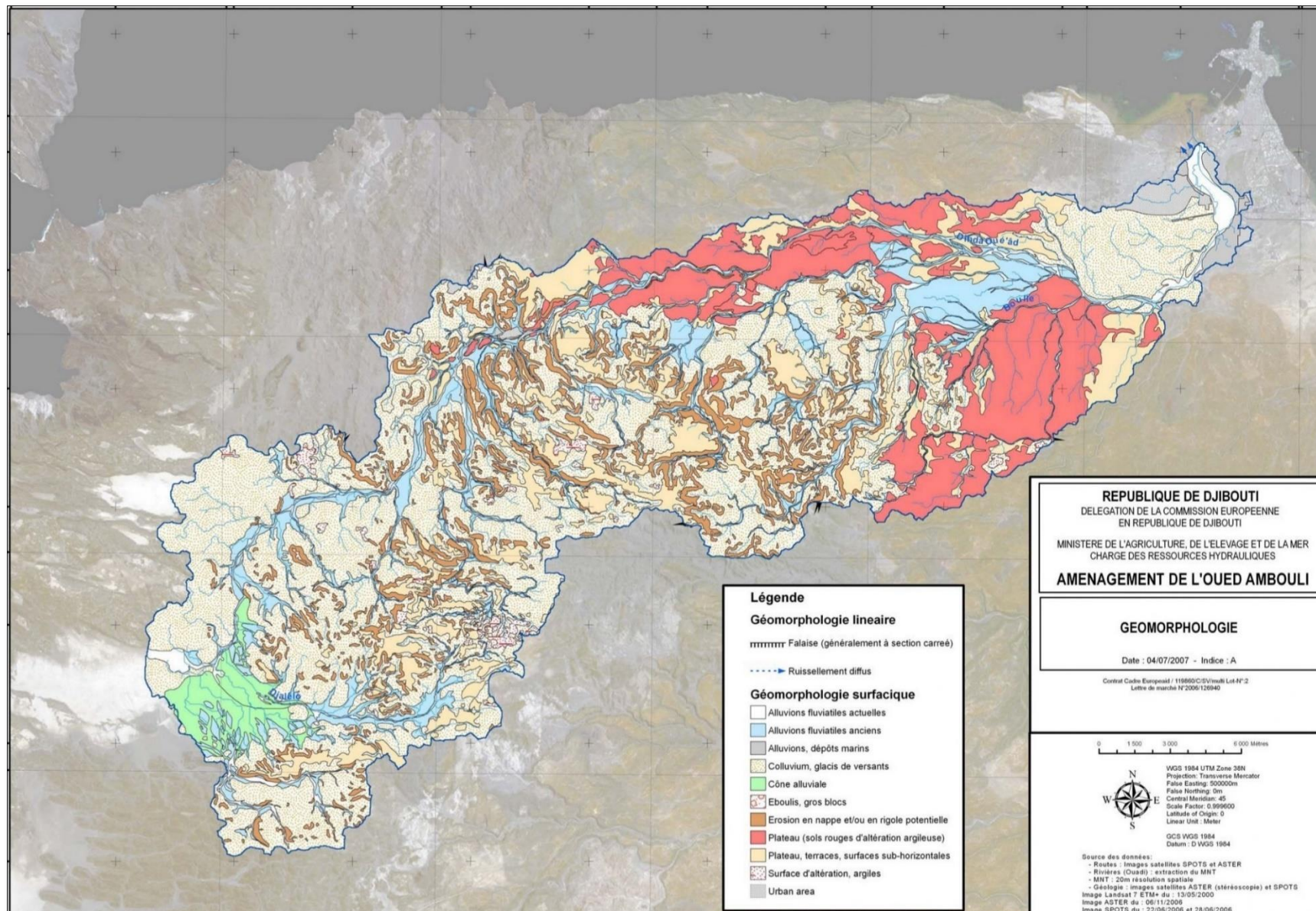


Figure 8: Carte géomorphologique du bassin versant d'Ambouli (in SAFEGE, 2007)

2.2. Topographie

Le relief du bassin est accidenté, avec des altitudes s'échelonnant de 600 à 900 m sur les points culminants du Massif central jusqu'au niveau de la mer à Djibouti (Figure 9). Dans l'ensemble, les pentes sont raides, aussi bien sur les versants que le long des principaux cours d'eau, bien qu'il y ait quelques secteurs où cela est moins prononcé. Ces caractéristiques topographiques jouent un rôle essentiel dans la genèse et l'écoulement des crues, en influençant l'aptitude au ruissellement et/ou à l'infiltration des précipitations sur les versants et la vitesse de propagation des ondes de crue dans les oueds

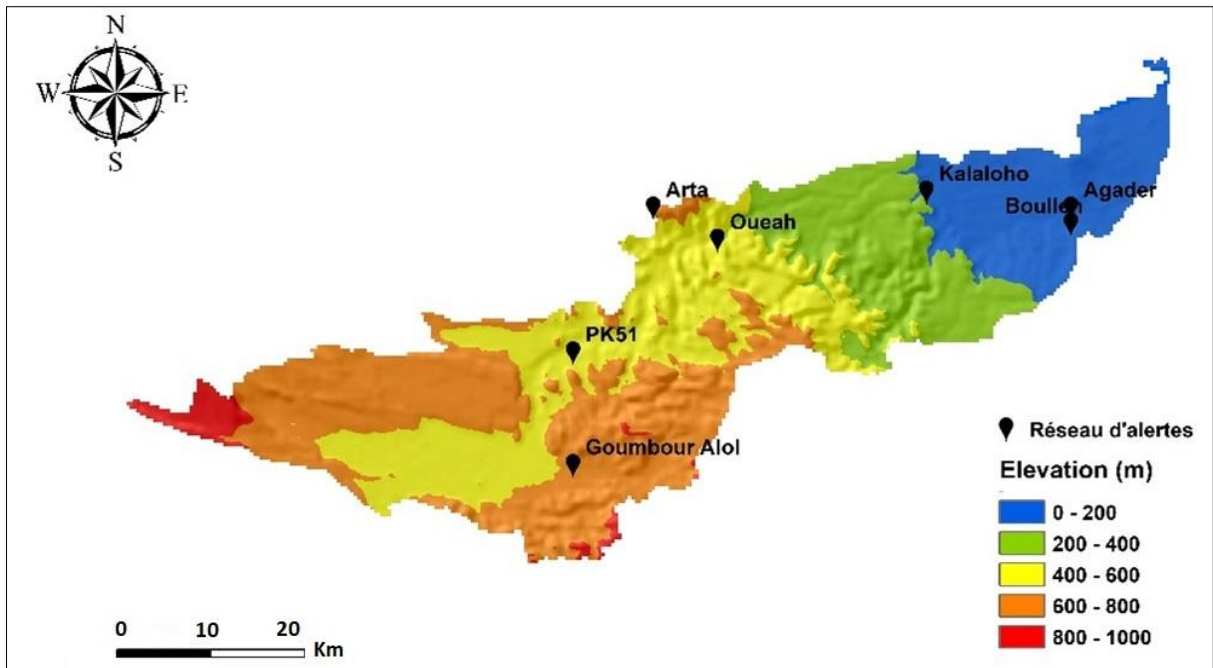


Figure 8: Carte d'élévation du bassin versant d'Ambouli

La topographie du bassin versant d'Ambouli peut être analysée en utilisant la courbe hypsométrique, qui représente la distribution de la surface du bassin en fonction de l'altitude (Figure 10). La courbe hypsométrique permet d'observer les variations altitudinales et d'identifier les caractéristiques morphologiques du bassin.

D'après le tableau de répartition de la surface par tranche d'altitude, il est possible d'établir la courbe hypsométrique du bassin versant d'Ambouli (Tableau 1). Le tableau révèle que les altitudes s'étendent de 0 à environ 1000 mètres, avec 5 classes d'altitude distinctes. Les superficies cumulées et les pourcentages cumulés correspondants à chaque altitude sont calculés à partir de ces données.

Tableau 1: Tableau de fréquences et des pourcentages cumulés selon les différentes altitudes

Classe d'altitudes (m)	Surface (km ²)	Pourcentage de la surface (%)	Surface cumulée	Altitude moyenne (m)	Pourcentage de surface cumulée (%)
0 - 200	137,0	17,2	795,0	100,0	100,0
200 - 400	126,0	15,9	658,0	300,0	82,8
400 - 600	223,0	28,1	532,0	500,0	66,9
600 - 800	293,0	36,9	309,0	700,0	38,9
800 - 1000	16,0	2,0	16,0	900,0	2,0
Total	795,0	100,0	0,0		0,0

L'interprétation de la courbe hypsométrique du bassin versant d'Ambouli peut être faite par la méthode A.N Strahler (1952). Dans le cas du bassin versant d'Ambouli, la courbe hypsométrique, indique un bassin d'âge mature avec un certain degré d'érosion. Cela implique que le relief du bassin a été modifié au fil du temps par des processus d'érosion, façonnant ainsi la topographie actuelle. Il convient de noter que des recherches supplémentaires spécifiques à la région du bassin versant d'Ambouli pourraient fournir des informations plus détaillées sur la topographie spécifique du site.

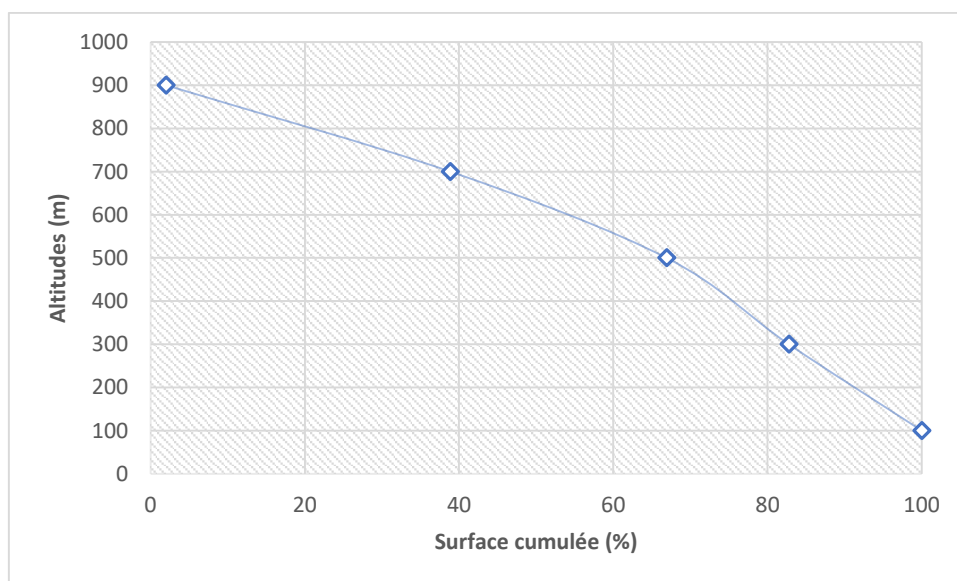


Figure 9: Courbe hypsométrique du bassin versant d'Ambouli

2.3. Géologie

La géologie du bassin versant d'Ambouli présente une certaine complexité mais il est possible de la schématiser. Les formations volcaniques constituent la majeure partie du substratum du bassin et sont principalement composées de basaltes d'origine relativement récente, datant du Tertiaire moyen au début du Quaternaire. Différentes unités de basaltes peuvent être identifiées dans le bassin, chacune ayant ses propres caractéristiques pétrographiques, stratigraphiques et chronologiques. Ces formations se sont déposées sous forme de coulées et d'épandages tabulaires, avec des épaisseurs variant de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres, voire plusieurs centaines de mètres pour l'ensemble d'une série.

Les basaltes du Golfe, également appelés basaltes initiaux, sont présents dans toute la partie orientale du bassin versant et dans la vallée de l'Oued Oueah à l'est du méridien 42°50'. Ces basaltes sont souvent associés à des argiles rouges d'altération et sont intercalés avec des dépôts alluvionnaires récents le long des cours d'eau et sur le piémont du massif de Bour Ougoul. Cette formation géologique revêt une importance capitale dans la planification des aménagements hydrauliques du bassin en raison de ses caractéristiques hydrogéologiques favorables à l'infiltration des eaux de surface. De plus, elle abrite des nappes d'eau souterraine exploitables à des profondeurs modérées, constituant ainsi une ressource en eau essentielle pour l'alimentation en eau potable de la ville de Djibouti (Jalludin, 1993).

La série stratoïde de l'Afar, principalement composée de basaltes, se trouve sur les sommets du massif du Bour Ougoul, sous forme de nombreuses buttes-témoins dispersées dans tout le bassin supérieur et intermédiaire de l'Oued Ambouli, ainsi que sur les flancs du massif d'Arta et la bordure ouest du bassin (Figure 11).

La série basaltique somalienne est présente sur une petite partie des bassins des oueds Boulleh et Kalaloho, avec une extension limitée à quelques dizaines de kilomètres carrés au maximum, notamment dans la pointe nord-est et les bordures est et sud-ouest du massif du Bour Ougoul.

La série du Dalha, principalement constituée de basaltes avec quelques petits massifs de roches acides associées (trachytes, rhyolites), forme le substratum de la majeure partie du haut bassin de l'Oued Oueah et d'une grande partie des bassins des affluents de la rive droite dans la zone intermédiaire, ainsi que des petits sous-bassins de la rive gauche sur les flancs du massif d'Arta à l'ouest du méridien du village de Oueah.

Enfin, la série rhyolitique des Mablal, présente au sommet et en bordure nord du massif du Bour Ougoul, notamment en tête des sous-bassins centraux comme Boulleh, est composée principalement de rhyolites associées à des roches acides.

En ce qui concerne les formations sédimentaires, les récentes alluvions fluviales très grossières, comprenant des boules de basalte de taille décimétrique à métrique, des galets roulés, des graviers et du sable, occupent principalement les lits mineurs des cours d'eau. Cependant, elles représentent seulement une proportion limitée de la superficie totale du bassin versant, soit environ 4 à 5 % au maximum. Ces alluvions semblent généralement peu épaisses, avec une épaisseur moyenne inférieure à 5 m, à l'exception du cours aval de l'Oued Ambouli et de certains points spécifiques. Bien que ces formations sédimentaires puissent stocker une quantité d'eau considérable, de l'ordre de quelques centaines de milliers à un million de mètres

cubes pour l'ensemble du bassin versant, elles représentent une faible proportion du bilan hydropluviométrique des crues, soit quelques pourcents seulement (Ayele, 2007).

En outre, deux autres types de formations superficielles jouent un rôle géomorphologique particulier dans le bassin versant de l'Oued Ambouli. Il s'agit des plaines d'épandage et des cônes de déjection des piémonts. Au niveau du haut bassin, une partie de la dépression du Petit Bara et la vallée à fond plat où l'Oued Oueah prend sa source, sont caractérisées par un terrain pratiquement horizontal, avec un sol sablo-limoneux ou argileux sur plusieurs mètres d'épaisseur et une végétation principalement herbacée. Cette zone couvre environ 3,5 % du bassin total. Quant aux plaines d'épandage et aux cônes de déjection à la confluence des principaux affluents de l'Oued Ambouli sur le piémont nord-est du massif montagneux, elles occupent une superficie relativement restreinte de quelques kilomètres carrés seulement (environ 1 % de la superficie totale du bassin). Cependant, elles jouent un rôle hydraulique important pendant les crues, pouvant être amplifiées et contrôlées grâce à des barrages de faible hauteur. Les profils longitudinaux des cours d'eau, avec des gradients hydrauliques et des vitesses d'écoulement relativement élevés, expliquent la nature hétérogranulaire des dépôts alluvionnaires, qui sont généralement grossiers, voire conglomératiques (Ayele, 2007).

Les sols argileux rouges résultant de l'altération des basaltes initiaux sont présents dans de nombreux endroits des plateaux basaltiques, notamment au nord de l'Oued Oueah et sur la rive droite de l'Oued Ambouli entre Chabelley et Nagad. Bien qu'ils soient pratiquement imperméables, ces sols sont très sensibles à l'érosion météorique. Ils constituent la principale source de matériaux en suspension transportés par les crues de l'Oued Ambouli dans sa partie médiane et aval. Des mesures effectuées lors du pic de crue de décembre 2006 à Nagad et à Douda ont révélé une charge d'environ 3 kg/m^3 de matériaux en suspension. Ces sols argileux rouges sont également les seules terres cultivables du bassin, en particulier lorsqu'il y a de l'eau disponible pour l'irrigation, en plus des limons des terrasses alluviales (SAFEGE, 2007)

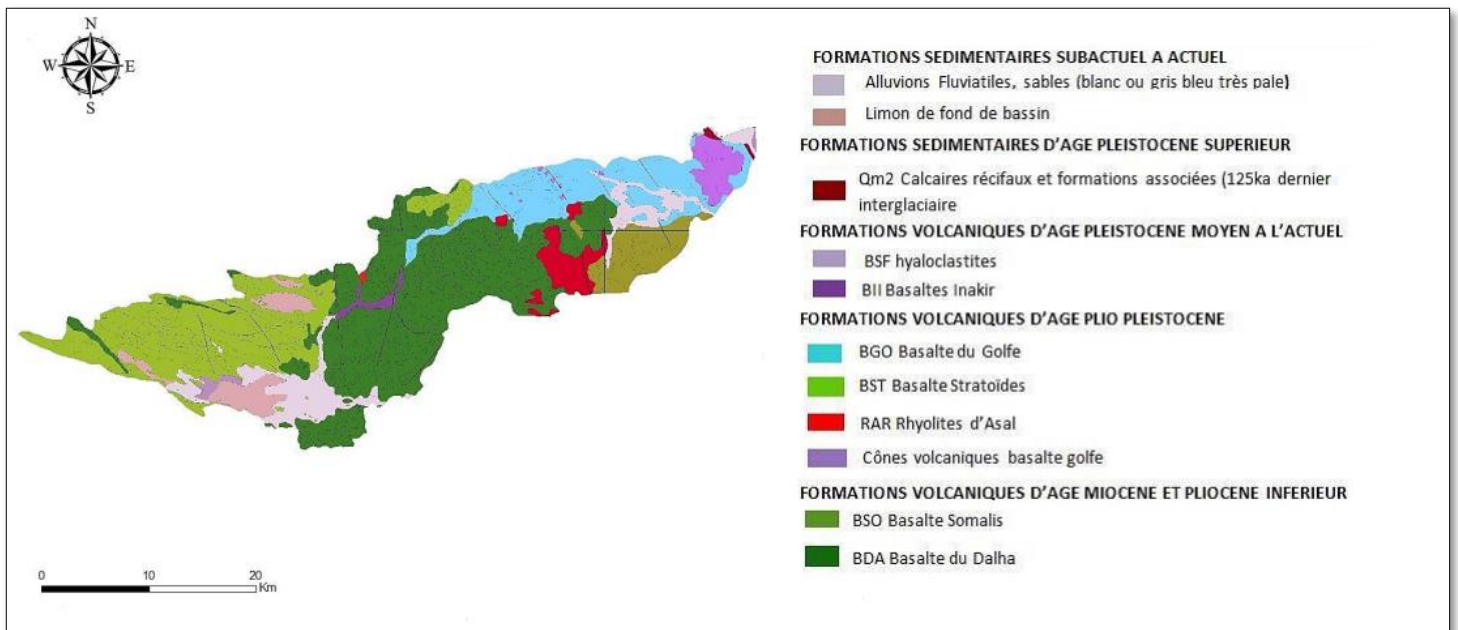


Figure 10: Carte géologique du bassin versant d'Ambouli

2.4. Réseau hydrographique

Le bassin versant d'Ambouli est caractérisé par un réseau hydrographique bien développé. Le cours d'eau principal, l'Oued Ambouli, également connu sous le nom d'Oued Oueah sur la majeure partie de son cours amont, ceinture le bassin versant sur son pourtour ouest et nord, s'étendant sur environ 60 km de longueur. Les principaux affluents de l'Oued Oueah confluent en rive droite et drainent une proportion significative (31,3 %) de la superficie totale du bassin versant (SAFEGE, 2007).

Ces affluents comprennent, de l'aval vers l'amont, l'Oued Chabelley (au confluent), l'Oued Bouleleh, l'Oued Kalaloho et l'Oued Langobalé (Figure 12). Tous ces cours d'eau rejoignent l'Oued Oueah à moins de 23 km en amont du delta terminal, situé à Nagad (SAFEGE, 2007). Dans les zones intermédiaires et amont du bassin versant, plusieurs sous-bassins tributaires d'une superficie comprise entre 20 et 50 km², se jettent également sur la rive droite de l'Oued Oueah. Toutefois, ces sous-bassins sont soumis à un régime de pluies différent de celui de la partie aval du bassin, car ils reçoivent des précipitations continentales plutôt que des précipitations océaniques. En revanche, du côté gauche de l'Oued Oueah, l'hydrographie est morcelée en de nombreux petits sous-bassins de taille réduite, atteignant au maximum quelques kilomètres carrés, qui sont drainés par des ravins très pentus.

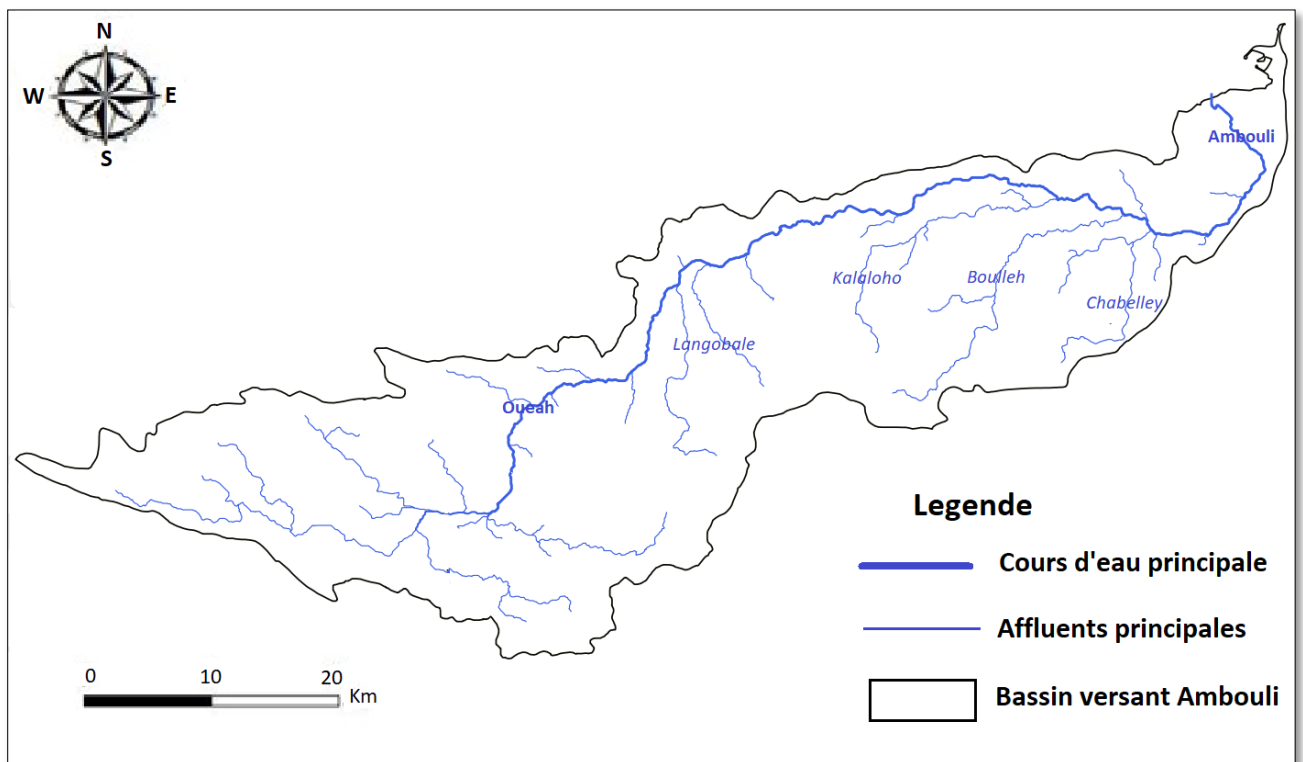


Figure 11: Carte du cours d'eau et des affluents principaux du bassin versant d'Ambouli

2.5. La végétation

Le bassin versant d'Ambouli abrite une flore relativement abondante et diversifiée, en particulier dans le massif du Bour Ougoul, tant sur les versants que dans les vallées. Cependant,

la végétation est nettement moins présente sur les plaines et les plateaux périphériques tels que le Petit Bara, les zones d'épandage, la bordure nord et la partie aval du bassin (SAFEGE, 2007). La végétation prédominante est constituée d'arbres, notamment de différentes espèces d'acacias, qui revêtent une importance vitale pour les nomades en tant que source de nourriture pour les animaux, de bois de chauffage et de construction (Malow, 2018).

Malgré l'exploitation parfois excessive de cette végétation, les arbres parviennent à se développer relativement bien, atteignant plusieurs mètres de hauteur, et leur densité est optimale compte tenu de la nature très pauvre du sol et de la faiblesse des précipitations. Toutefois, l'effet de ces arbres, ainsi que de la végétation herbacée qui se développe de manière épisodique après les pluies, sur l'évapotranspiration et le bilan hydrique est assez faible, voire négligeable, en particulier pendant les averses de crues qui sont souvent violentes.

La conservation de l'environnement, notamment en renforçant les actions coordonnées de défense et de restauration des sols, revêt une grande importance pour garantir la durabilité des réservoirs construits dans la zone du bassin versant d'Ambouli,

2.6. L'occupation des sols

Dans le cadre de cette étude du bassin versant d'Ambouli, il est essentiel de prendre en compte les différentes occupations du territoire par les activités humaines. Ces occupations comprennent :

- Les zones d'implantations humaines permanentes telles que les villages, les cultures et les infrastructures routières. Leur importance reste relativement limitée, avec seulement quelques milliers de personnes sédentaires ou semi-sédentaires, principalement concentrées dans quelques villages tels que Oueah, occupant au maximum quelques centaines d'hectares, soit moins de 1% de la superficie totale du bassin (Malow, 2018).
- Les terrains de parcours utilisés par les populations nomades et les zones d'extraction de matériaux alluvionnaires destinés à la construction. Les pâturages traditionnels couvrent pratiquement l'ensemble du bassin versant, mais avec une faible densité de population nomade, comptant au total, selon les saisons, entre 2 000 et 3 000 éleveurs nomades au maximum. Les zones d'extraction de matériaux alluvionnaires se trouvent dans la plaine d'épandage du Kalaloho, près du pk20, ainsi que dans le lit de nombreux oueds à travers tout le bassin, sous forme de petits gisements exploités de manière artisanale et plus ou moins régulière. Les grandes entreprises de terrassement et de génie civil exploitent également des gisements de matériaux, notamment pour le concassage, à moins de 20 km de Djibouti, dans le lit de l'Oued Oueah et de l'Oued Ambouli.

2.7. Ouvrages hydrauliques dans le bassin versant

2.7.1. Le Barrage de l'Amitié à Oueah

Le Barrage de l'Amitié, construit avec l'aide de la Turquie, traverse l'oued Oueah. D'une hauteur de 71 m, le barrage a une capacité de 14 millions de m³ (Tableau 2). Construit dans le but de prévenir les inondations et de fournir de l'eau d'irrigation pour l'agriculture, il occupe

45 % de l'ensemble du bassin versant. Lors de l'inondation de 2019, ce barrage, en retenant quelque 10 millions de m³ d'eau, a été jugé efficace pour la lutte contre les inondations (Figure 13). Toutefois, selon les informations du Ministère de l'Agriculture, aucune règle n'a été établie entre les Ministères concernés (Ministère de l'Agriculture et Ministère des Affaires Intérieures) quant à l'utilisation du barrage pour ces deux objectifs que constituent l'usage agricole et la lutte contre les inondations.

Tableau 2: Spécifications techniques de la digue et du réservoir du Barrage de l'Amitié

Rubriques	Spécifications techniques	Remarques
Bassin versant du barrage	270 km ²	Le bassin versant à une superficie totale de 600 km ²
Type de barrage	Barrage en enrochement à noyau central	Matériau du noyau : argile
Altitude de la crête du barrage	338 m	
Altitude des fondations de l'enrochement	300 m	
Altitude des fondations de la digue	267 m	
Hauteur de la digue (surface des fondations)	71.0 m (38.0) m	
Largeur de crête	10.0 m	
Pente de la face en amont	1 : 2.5	
Pente de la face en aval	1 : 2.0	
Niveau d'eau max. du barrage	336.78 m au-dessus du niveau de la mer	
Niveau d'eau min. du barrage	316.00 m	
Capacité totale du réservoir	14 370 000 m ³	
Capacité effective du réservoir	12 060 000 m ³	
Écoulement des crues à l'emplacement du barrage	680 m ³ /sec	période de retour de 100 ans d'après une étude d'un consultant non répertoriée
Débit de conception de l'évacuateur de crues	3 000 m ³ /sec	



Figure 12: Photographie aérienne du Barrage de l'Amitié à Oueah (Source : Radiotélévision de Djibouti)

2.7.2. La digue et la « nouvelle » voie ferrée

A la suite des inondations d'avril 2004, qui a causé 300 décès, détruit 600 maisons et touché 100 000 personnes, la Banque Mondiale a mis en œuvre des mesures de contrôle des inondations sur l'oued Ambouli. L'organisme chef de file était l'ADETIP (Agence Djiboutienne d'Exécution des Travaux d'Intérêt Public) et le coût total du projet s'est élevé à 6,46 millions de dollars US, dont 3,23 millions de dollars US de subventions. Dans le cadre du projet « Flood Emergency Réhabilitation Project (FERP) », une digue de 2 km a été construite sur la rive droite en amont du pont d'Italie et achevée en 2009 (figure 14).

La digue en pierre située en rive droite de l'Oued Ambouli le long de Djibouti Ville en amont de la route d'Ethiopie (construite semble-t-il par l'ex-Ministère des Travaux Publics après sa destruction lors des inondations de 1994) semble aujourd'hui « orpheline » sur le plan institutionnel et aucune surveillance ni aucun entretien ne semblent assurés. En cas de rupture, le risque d'inondation est considérable sur toute la partie ouest et nord de Djibouti Ville, qui sera probablement amplifié par l'effet de vague et l'effet de surprise de la population. Les simulations réalisées dans le cadre du projet PAIR/CARAD ont montré que le risque de surverse apparaissait pour des crues légèrement supérieures à la crue centennale. Néanmoins, cette hypothèse n'est vraie que si l'état de la digue est satisfaisant et qu'il n'y a pas de risque de brèche avant surverse. Or il semblerait que la digue fasse l'objet de dégradations par les populations riveraines. En outre, ce type d'ouvrage se dégrade avec le temps et avec le passage de crues qui sont susceptibles d'affouiller ses fondations.

Il est donc nécessaire de renforcer l'entretien de la digue et du canal fluvial. Il existe également des habitations illégales dans le lit de hautes eaux de la rive gauche en amont du pont d'Italie. Les terres de cette zone restent principalement utilisées à des fins agricoles.

La nouvelle voie ferrée reliant Addis Adebà à Djibouti, récemment construite par la Chine (inauguration le 5 octobre 2016), emprunte le lit de l'oued Ambouli côté Balbala avant de rejoindre le port de Doraleh. L'espace offert aux écoulements de l'oued en cas de crue importante est donc fortement réduit, augmentant la charge hydraulique en rive droite, en particulier sur la digue évoquée précédemment.

Il semblerait que l'impact de la voie ferrée sur le risque inondation n'ait pas été évalué avant sa mise en œuvre.

En résumé, la ville de Djibouti apparaît ainsi protégée « en apparence » de l'Oued Ambouli mais reste exposée en cas d'inefficacité du Barrage de l'Amitié, (selon la configuration de la crue), de défaillance de la digue, ou en cas d'une crue qui dépasserait le niveau de protection de la digue.

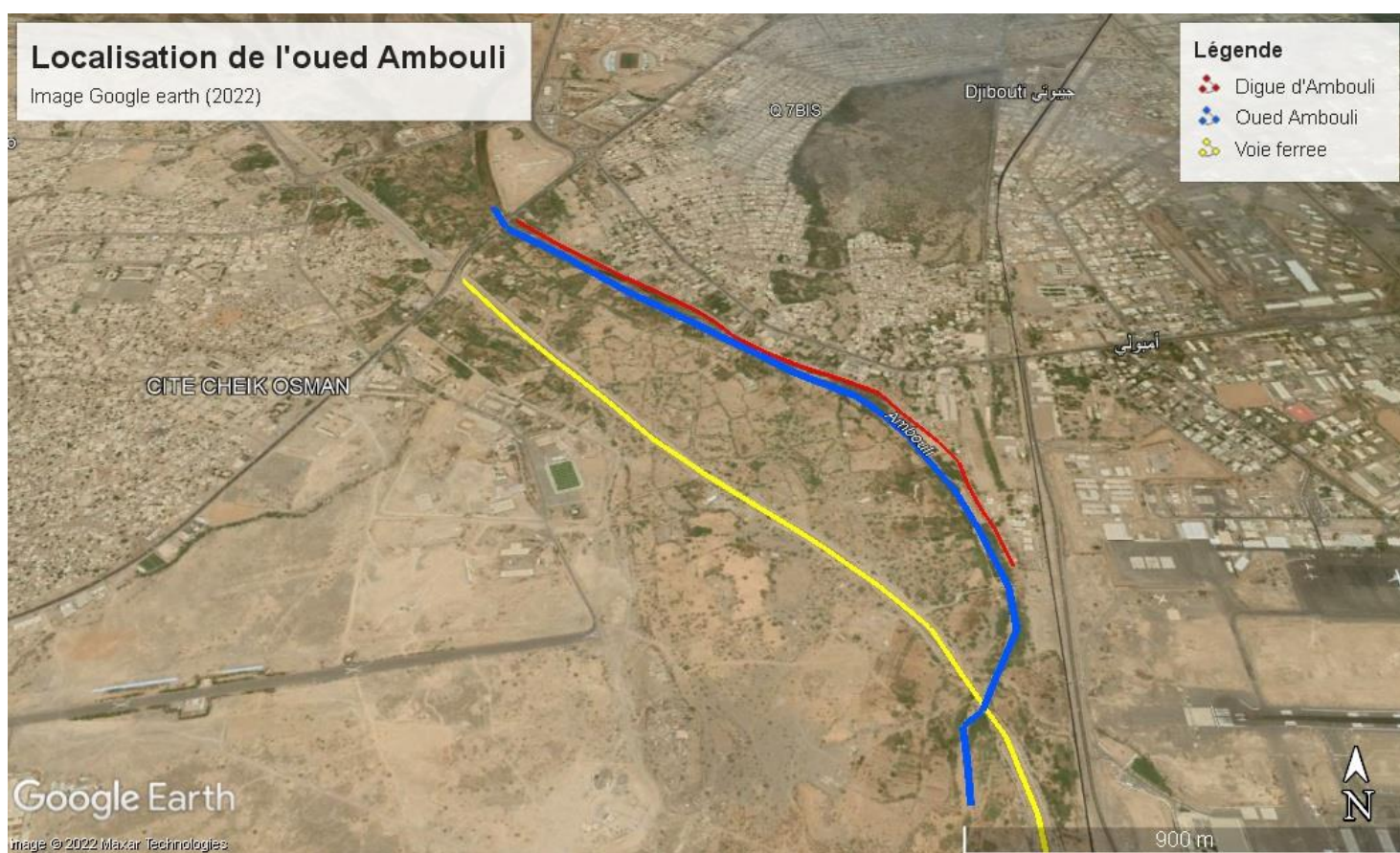


Figure 13: Image aérienne de la digue en rive droite de l'oued Ambouli (Source : Google Earth)

Chapitre 2 : Données de l'étude : Caractéristiques et sources de données de la zone d'étude

Chapitre 2 : Données de l'étude : Caractéristiques et sources de données de la zone d'étude

La quête des données pertinentes constitue l'étape initiale importante, mais délicate, dans la recherche académique, car cette étape montre la complexité et les défis inhérents à l'acquisition de données dans la région d'étude, ici la République de Djibouti. Lors de la recherche initiale de données, de nombreuses difficultés ont rapidement été rencontrées, reflétant la nature complexe du paysage de la collecte de données.

Pour notre travail, nous allons nous appuyer principalement sur des données hydroclimatiques complétées par des données cartographiques.

Parmi ces défis, on note l'historique des stations de mesure qui se révèle souvent labyrinthique, les sources de données très hétérogènes en termes de format et de support, ainsi que les inventaires de données fréquemment incomplets. De plus, la gestion des données est éclatée entre plusieurs entités djiboutiennes, ce qui peut entraîner des complications lors de l'accès et de l'utilisation des informations.

Afin de répondre à ces défis, la méthodologie adoptée dans cette thèse consiste à offrir une vue d'ensemble exhaustive des données disponibles à l'échelle nationale. Cette approche vise à pallier le manque de documentation et de synthèse concernant les données hydroclimatiques de la région. Dans cet esprit, une démarche de recensement et d'inventaire des données au niveau national est entreprise, avec pour objectif de retracer l'évolution historique de ces données, même si leur trajectoire s'est révélée complexe et souvent fragmentée.

Cependant, il convient de préciser que, bien que cet inventaire soit d'une portée nationale, ce travail de recherche se focalisera spécifiquement sur les données relatives au bassin d'Ambouli. Cette approche permettra d'assurer une analyse approfondie et ciblée tout en prenant en compte les contraintes liées à la disponibilité et à la qualité des données. Il est à noter que les stations qui seront utilisées dans la suite de ce travail sont surlignées en jaune dans les différents tableaux des inventaires des données hydroclimatiques.

1. Données de précipitation

1.1. Historique des données relatives aux pluies (pluviométrie et pluviographie)

L'histoire des données pluviométriques à Djibouti remonte au début du XXe siècle, avec la première observation de pluie enregistrée en 1901 à la station Djibouti Serpent, gérée par la Division de la Météorologie Aéronautique, aujourd'hui Agence Nationale de la Météorologie (depuis 2011). Dans les années suivantes, deux nouvelles stations pluviométriques ont été mises en place : Tadjourah en 1936 et Dikhil en 1938 (CHA, 1982). À partir de 1946, de nouvelles stations pluviométriques ont été installées dans tout le pays, portant leur nombre total à 27 en 1980 (Figure 15).

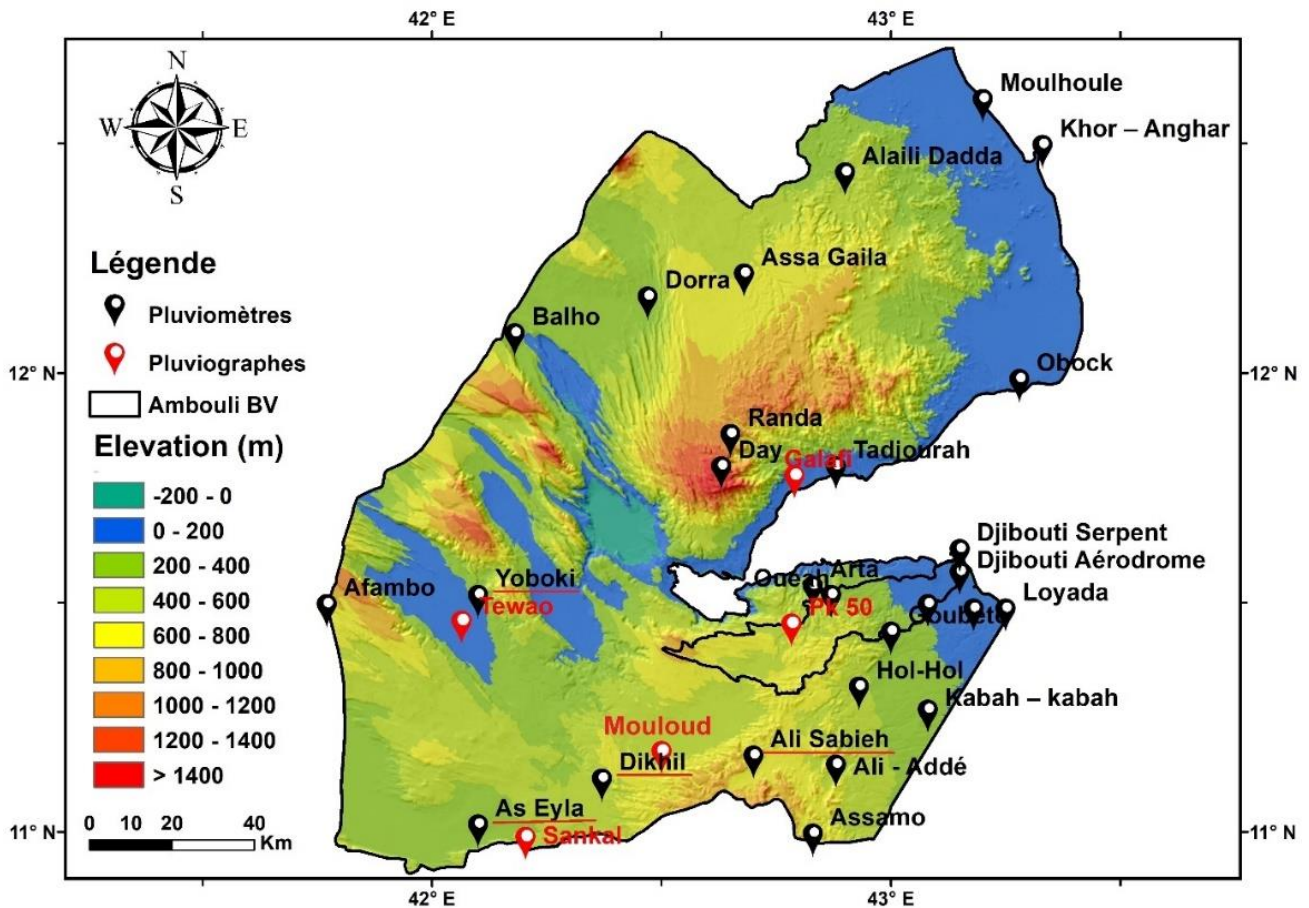


Figure 14: Réseau de stations pluviométriques et pluviographiques de la République de Djibouti dans les années 1980

Après l'indépendance de la République de Djibouti en 1979, un accord a été signé avec la Coopération Hydrogéologique Allemande (CHA) pour mener des études hydrométéorologiques sur le territoire national. Dans le cadre du projet "Inventaire et mise en valeur des ressources en eau de la République de Djibouti", des analyses hydrologiques ont été réalisées en trois phases (CHA, 1982).

La première phase (1979-1980) a consisté à recueillir et évaluer les données hydrométéorologiques existantes jusque-là, et à remettre le réseau existant à niveau et à le compléter par huit autres stations pluviographiques (la station Tewao a été installée plus tardivement en 1984) (Figure 15). La deuxième phase (1980-1981) a été axée sur le contrôle du réseau de mesures pluviométriques, le remplacement des appareils de mesure défectueux, l'examen critique des nouvelles données et leur évaluation provisoire en vue de l'établissement du bilan hydrologique (CHA, 1982). Enfin, la troisième phase (1981-1982) a été consacrée à l'analyse détaillée de toutes les données nouvellement acquises, ainsi que des données antérieures à 1980, afin d'établir des bilans hydrologiques complets, en mettant notamment l'accent sur les quantités d'eau s'infiltrant et contribuant à la recharge de la nappe souterraine (CHA, 1982). Le rapport final de la Coopération Hydrogéologique Allemande contient toutes les informations relatives aux activités et aux résultats des trois phases de ce projet (Adam, 1984).

Par la suite, en 1983, l'Institut Supérieur d'Études et de Recherches Scientifiques et Techniques (ISERST), l'actuel Centre d'Études et de Recherche de Djibouti (CERD en 2002), a assuré le suivi uniquement des données pluviographiques à Djibouti au sein de son équipe du laboratoire d'Hydrogéologie et d'Hydrologie. Entre 1984 et 1991, huit rapports ont été publiés sur les données pluviographiques, témoignant de l'évolution significative du réseau au cours de cette période.

Entre 1991 et 2008, la mesure de données relatives aux précipitations a cessé avec pour seule exception la station de Djibouti Aéroport qui a continué à enregistrer des mesures. En février 2008, un système d'alerte précoce, constitué de stations pluviographiques et destiné à renforcer la surveillance et la prévision des phénomènes météorologiques a été mis en place. Ultérieurement, en 2013, une avancée majeure a été réalisée avec l'inauguration d'un nouveau réseau de mesures pluviométriques orchestré par l'Agence Nationale de la Météorologie, venant renforcer la capacité de suivi et d'analyse des précipitations sur l'ensemble du territoire.

1.2. Inventaire des données de précipitation

1.2.1. Données pluviométriques

1.2.1.1. Inventaire des données pluviométriques

Les premières stations pluviométriques ont été installées dans différents districts de la République de Djibouti, notamment à Tadjourah, Dikhil, etc (Tableau 3). Environ 35% de ces stations ont été mises en route au début des années 60, reflétant un effort de mise en place de réseau hydro-climatique à cette époque. Ces enregistrements ont été interrompus majoritairement en 1991.

Il est donc essentiel de noter qu'une absence de mesures pluviométriques est observée entre 1991 et 2012 (à l'exception de la station Djibouti-aéroport), ce qui constitue un défi pour l'analyse des tendances à long terme et des variations hydroclimatiques sur cette période (Tableau 4).

En effet, en République de Djibouti, la disponibilité des données climatiques est limitée (Assowe et al., 2022). Depuis 2013, deux ans après la création de l'ANM, les précipitations journalières sont enregistrées sur un réseau de 35 stations réparties sur l'ensemble du territoire (Figure 16). Il convient de noter que la couverture du réseau de mesure est plus dense dans la partie sud-est du pays, tandis que le nord-ouest, caractérisé par un relief complexe et accidenté, est moins couvert.

Malheureusement, ces données sont souvent incomplètes et présentent de nombreuses lacunes (Tableau 5). Ainsi, il est crucial de prendre en compte ces lacunes lors de l'analyse des tendances climatiques et de la modélisation hydrologique, afin d'éviter des conclusions erronées ou biaisées.

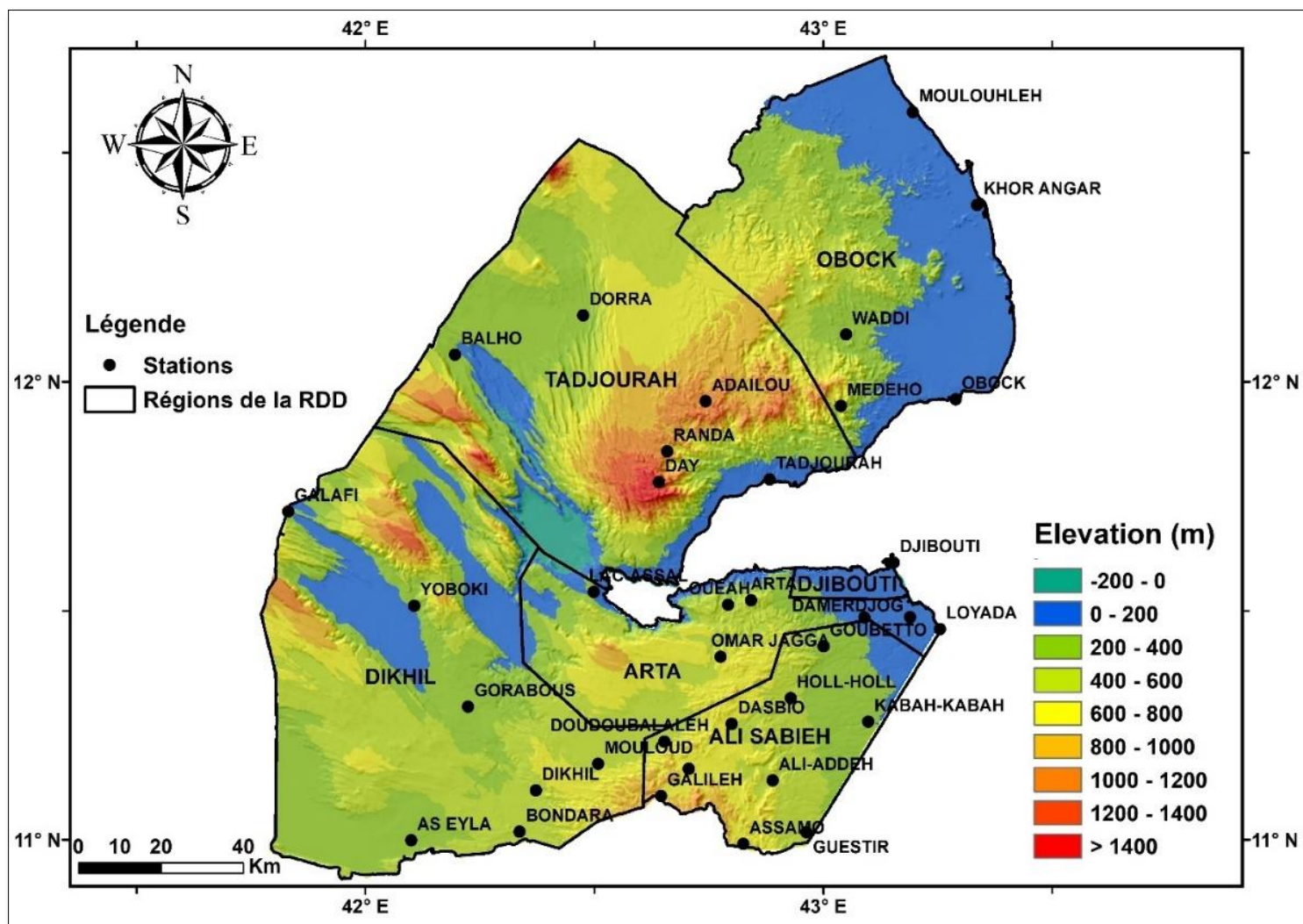


Figure 15: Réseau de mesures pluviométriques de l'ANM depuis 2013

Tableau 3: Inventaire des données pluviométriques (les stations du Bassin de l'Oued Ambouli sont surlignées en jaune)

Station	Latitude	Longitude	Type	Début observation	Fin observation	Pas de temps	Support	Gestionnaire
Afambo	11,48	41,77	PLM	1946	1991	Mensuel	Papier	Agence Météo
Adailou	11,97	42,74	PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Alaili Dadda	12,42	42,9	PLM	1971	1991	Mensuel	Numérisé (1971-1977)	Agence Météo
Ali - Addé	11,13	42,88	PLM	1964	1993	Mensuel	Numérisé (1964 - 1976)	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Ali Sabieh	11,15	42,71	PLM	1946	1990	Mensuel	Numérisé	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Arta	11,52	42,83	PLM	1946	1981	Mensuel	Numérisé	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
As Eyla	11	42,1	PLM	1946	1993	Mensuel	Papier	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Assa Gaila	12,2	42,68	PLM	1971	1991	Mensuel	Numérisé (1972-1977)	Agence Météo
Assamo	10,98	42,83	PLM	1964	1991	Mensuel	Numérisé (1964 - 1977)	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Balho	12,07	42,18	PLM	1956	1991	Mensuel	Numérisé (1956-1977)	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Bondara	11,02	42,33	PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Attar	11,45	43,21	PLM	1993	1995	Mensuel	Papier	Agence Météo
Chabelley	11,48	43,08	PLM	1958	1993	Mensuel	Papier	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Damerdjog	11,47	43,18	PLM	1972	1993	Mensuel	Numérisé (1972-1976)	Agence Météo

Station	Latitude	Longitude	Type	Début observation	Fin observation	Pas de temps	Support	Gestionnaire
Dasbio			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Day	11,78	42,63	PLM	1948	1993	Mensuel	Numérisé (1948-1966)	Agence Météo
Dikhil	11,1	42,37	PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
			PLM	1938	1982	Mensuel	Papier	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Djibouti Aéroport	11,55	43,15	PLM	1953	1981	Mensuel	Numérisé	Agence Météo
			PLM	1981	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Djibouti Ambouli	-	-	PLM	1965	1966	Mensuel	Papier	Agence Météo
Djibouti Salines	-	-	PLM	1950	1954	Mensuel	Papier	Agence Météo
Djibouti Serpent	11,6	43,15	PLM	1901	1982	Mensuel	Numérisé	Agence Météo
Dorra	12,15	42,47	PLM	1948	1990	Mensuel	Numérisé (1948-1977)	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Doudoubalaleh	11,25	42,67	PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Galafi	11,6	41,8	PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Goubeto	11,42	43	PLM	1958	1969	Mensuel	Papier	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Gorabous	11,28	42,22	PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Guestir	11,02	42,96	PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Hol-Hol	11,3	42,93	PLM	1951	1990	Mensuel	Numérisé	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Kabab – kabab	11,25	43,08	PLM	1972	1991	Mensuel	Papier	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Khor – Anghar	12,48	43,33	PLM	1972	1990	Mensuel	Numérisé (1972-1977)	Agence Météo

Station	Latitude	Longitude	Type	Début observation	Fin observation	Pas de temps	Support	Gestionnaire
Lac-Assal			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Loyada	11,47	43,25	PLM	1957	1991	Mensuel	Papier	Agence Météo
Medeho	11,95	43,04	PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Moulhoule	12,58	43,2	PLM	1962	1990	Mensuel	Numérisé (1962-1977)	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Mouloud	11,17	42,5	PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Obock	11,97	43,28	PLM	1947	1978	Mensuel	Papier	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Omar Jagga	11,38	42,76	PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Oueah	11,5	42,87	PLM	1949	1980	Mensuel	Numérisé (1949-1978)	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Randa	11,85	42,65	PLM	1958	1977	Mensuel	Numérisé (1958-1977)	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Tadjourah	11,78	42,88	PLM	1936	1977	Mensuel	Numérisé	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Waddi	12,14	43,01	PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo
Yoboki	11,5	42,1	PLM	1947	1982	Mensuel	Numérisé	Agence Météo
			PLM	2013	2021	Journalier	Numérisé	Agence Météo

1.2.1.2. Taux de lacune des stations pluviométriques

L'analyse du taux de lacunes des stations pluviométriques est essentielle pour évaluer la fiabilité des données disponibles dans le contexte de cette thèse. Toutefois, il est important de noter que le taux de lacunes varie considérablement dans le temps (Tableau 5). Dans les grandes villes (les districts), on observe généralement peu de lacunes dans les données pluviométriques, car ces stations bénéficient d'une meilleure maintenance et d'un accès plus aisé pour les relevés. En revanche, les stations situées dans les zones plus reculées et éloignées présentent généralement un taux de lacunes plus élevé, en raison de difficultés logistiques et d'accessibilité pour la collecte des données. Pour la période 2016-2019, la quasi-totalité des stations présentent un taux de lacunes compris entre 25% et 50%, ce qui peut être dû à des problèmes de relevés, de transmission de données ou de gestion des stations.

Il est important de mentionner que les données non accessibles concernent la période entre 1977 et 1991. Ces données sont archivées mais n'ont pas encore été numérisées par l'ANM.

Il convient de souligner que les données pluviométriques recueillies sont principalement au pas de temps mensuel, sauf pour la station Djibouti Aéroport (entre 1981 et 2021) et pour les données pluviométriques collectées entre 2013 et 2021, qui sont disponibles au pas de temps journalier (Tableau 3)

En conclusion, bien que des efforts aient été déployés pour établir un réseau de stations pluviométriques dans la République de Djibouti, le taux de lacunes reste élevé et variable dans le temps et l'espace. Une attention particulière devrait être accordée à la numérisation des données archivées et à l'amélioration de la collecte et de la gestion des données dans les zones plus reculées pour une meilleure compréhension de l'hydroclimatologie de la République de Djibouti.

1.2.2. Données pluviographiques

1.2.2.1. Inventaire des données pluviographiques

L'établissement de l'inventaire des données pluviographiques revêt une importance capitale en hydroclimatologie, fournissant une base solide pour l'analyse des événements pluvieux dans une région donnée.

En République de Djibouti, les premières stations pluviographiques ont été mises en place grâce à la coopération hydrogéologique allemande (CHA) à partir de 1980, démontrant l'engagement précoce envers la surveillance des événements pluvieux dans le pays. Par la suite, le suivi de ces stations a été pris en charge par l'Institut Supérieur d'Études et de Recherches Scientifiques et Techniques (ISERST). Comme pour les stations pluviométriques, les mesures des stations pluviographiques ont été interrompues en 1991 et 1993 (Tableau 6). Cette période d'interruption qui a duré jusqu'en 2008 représente une lacune importante dans la série de données, limitant ainsi la continuité temporelle des enregistrements et pouvant impacter la précision des analyses hydroclimatiques ultérieures.

Il est à noter que le support de ces données pluviographiques est principalement sous forme papier, ce qui peut poser des défis lors de leur traitement et de leur intégration dans des systèmes modernes de gestion des données (Tableau 6). Cependant, malgré ces contraintes, il est essentiel de “sauver” et de numériser ces données pour garantir leur valeur scientifique et contribuer à la compréhension des variations climatiques et hydrologiques passées dans la région semi-aride de Djibouti. Nous avons ainsi récupéré des pluviogrammes de la station PK50 qui intéresse directement la bassin Ambouli. Les pluviogrammes se présentent sous forme de rouleaux (Figure 17). Une fois déroulé, on peut visualiser des événements pluvieux (Figure 18).



Figure 16: Pluviogrammes de la station PK50

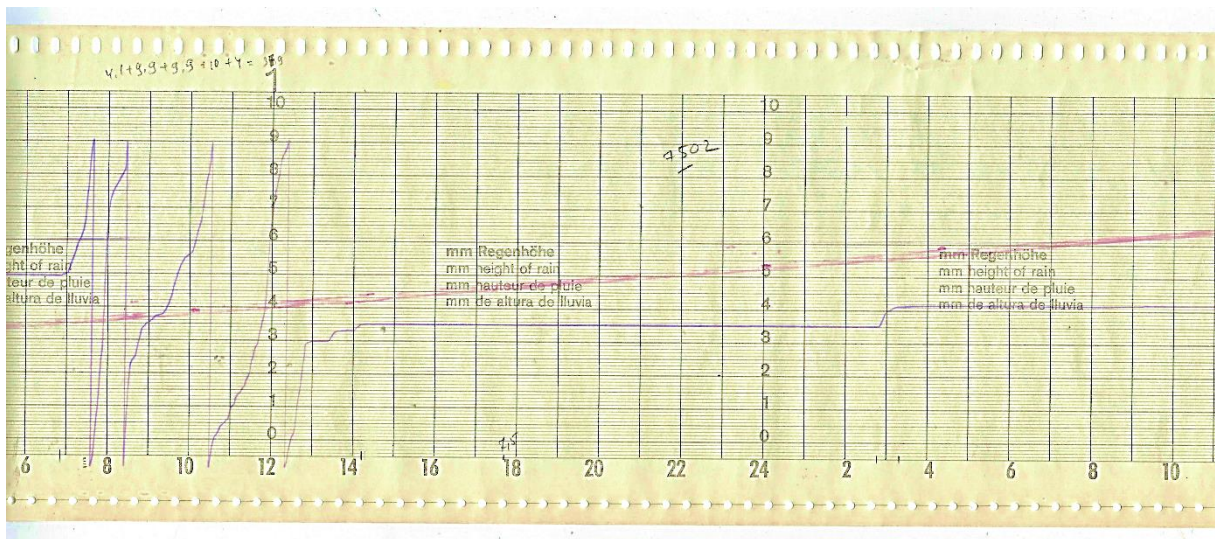


Figure 17: Pluviogramme déroulé de la station PK50 – pluviographe à siphon

La ville de Djibouti a connu des inondations catastrophiques dans la nuit du 13 avril 2004, lors des crues de l'oued Ambouli, qui ont entraîné la perte tragique de 230 vies (Source : La Nation, 15 avril 2004). En réponse à cette situation, le gouvernement djiboutien a pris des mesures pour protéger la ville. Ces mesures comprenaient la mise en place et la consolidation de la digue d'Ambouli, financée par la Banque mondiale en 2008, ainsi que l'installation d'un réseau de Surveillance et d'Alerte de Crue de l'Oued Ambouli (SAP), financé par l'USAID en 2008.

Le réseau de surveillance et d'alerte a été mis en place par des techniciens du Centre d'Études et de Recherches de Djibouti (CERD), avec le soutien d'une équipe de l'USGS de l'Arizona. Ce système a été déployé dans le bassin de l'oued Ambouli entre février et mars 2008. Le laboratoire d'Hydrogéologie et d'Hydrologie du CERD est actuellement responsable de la gestion de ce réseau, qui comprend sept stations pluviographiques au total. Parmi ces stations, trois sont également équipées d'un limnigraphe (Boulleh, Kalaloho et Oueah) (Figure 19).

L'inventaire de ces données pluviographiques permettra de mieux appréhender les caractéristiques spatio-temporelles des précipitations dans le pays, offrant ainsi des informations cruciales pour l'étude des phénomènes hydrologiques et climatiques spécifiques à cette région. Malgré les défis liés aux données au format papier et à l'interruption des mesures, l'utilisation avisée de ces informations contribuera certainement à renforcer la compréhension des variations climatiques locales et à renforcer les connaissances en hydroclimatologie dans la République de Djibouti.

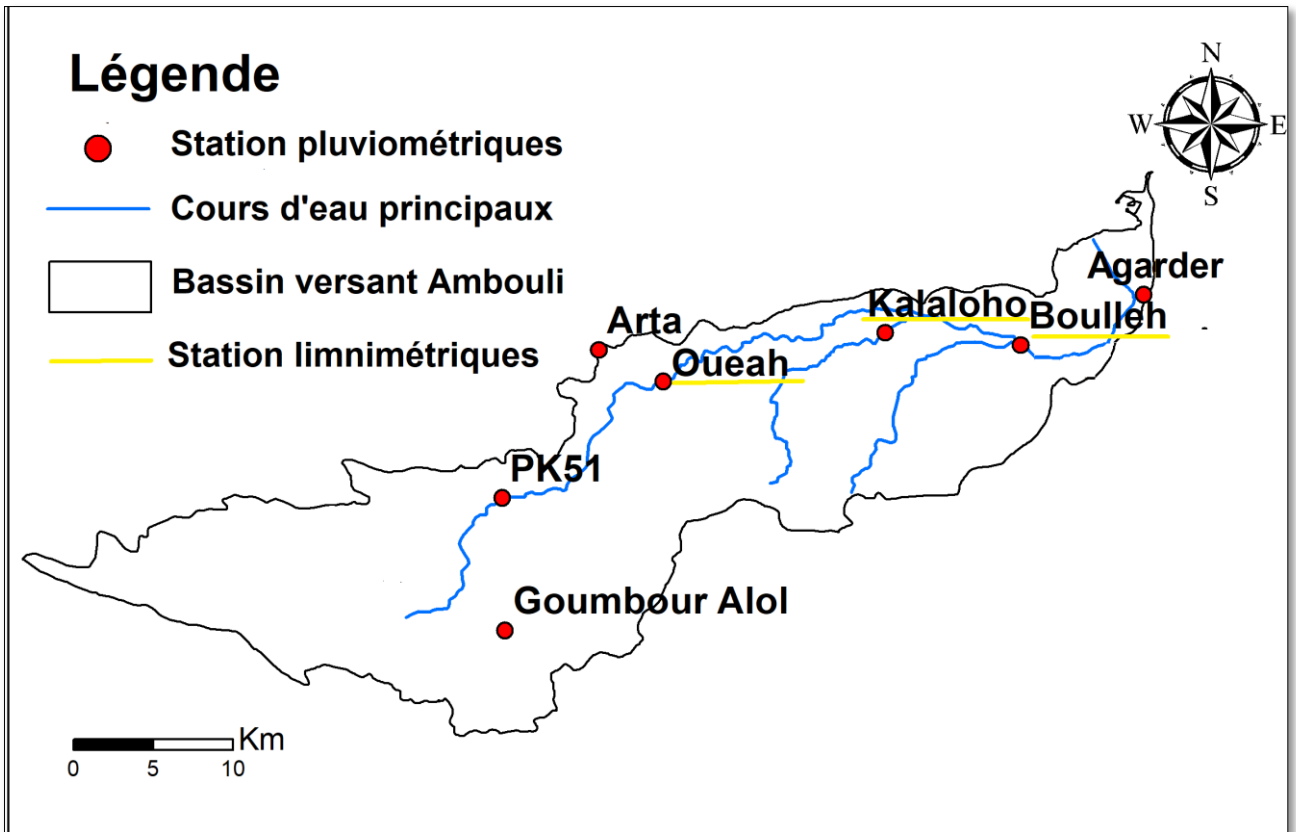


Figure 18: Localisation des stations du Système d'Alerte Précoce (SAP)

Tableau 6: Inventaire des données pluviographiques existantes en République de Djibouti (les stations du Bassin de l'Oued Ambouli sont surlignées en jaune)

Station	Latitude	Longitude	Type	Début observation	Fin observation	Pas de temps	Support	Gestionnaire	SAP
Agarder	11,52	43,09	PLG	2008	2013	Infrajournalier	Numérisé	CERD	Oui
Ali Sabieh	11,15	42,71	PLG	1980	1991	Journalier	Papier	Agence Météo	Non
Arta	11,52	42,83	PLG	2008	2015	Infrajournalier	Numérisé	CERD	Non
As Eyla	11	42,1	PLG	1980	1991	Journalier	Papier	CERD	Non
Bouleh	11,51	43,09	PLG	2008	2021	Infrajournalier	Numérisé	CERD	Oui
Dikhil	11,1	42,37	PLG	1980	1991	Journalier	Papier	Agence Météo	Non
Galafi	11,6	41,8	PLG	1980	1991	Journalier	Papier	CERD	Non
Goumbour alol	11,36	42,78	PLG	2008	2014	Infrajournalier	Numérisé	CERD	Oui
Kalaloho	11,53	43	PLG	2008	2018	Infrajournalier	Numérisé	CERD	Oui
Mouloud	11,16	42,5	PLG	1980	1991	Journalier	Papier	CERD	Non
Oueah	11,5	42,87	PLG	2008	2013	Infrajournalier	Numérisé	CERD	Oui
Pk 50	11,44	42,78	PLG	1980	1993	Infrajournalier	Numérisé (1984-1993)	CERD	Non
PK51	11,43	42,78	PLG	2008	2014	Infrajournalier	Numérisé	CERD	Oui
Sankal	10,97	42,20	PLG	1980	1991	Mensuel	Papier	CERD	Non
Tewao	11,44	42,06	PLG	1984	1991	Journalier	Papier	CERD	Non
Yoboki	11,5	42,1	PLG	1980	1991	Journalier	Papier	CERD	Non

1.2.2.2. Taux de lacunes des stations pluviographiques

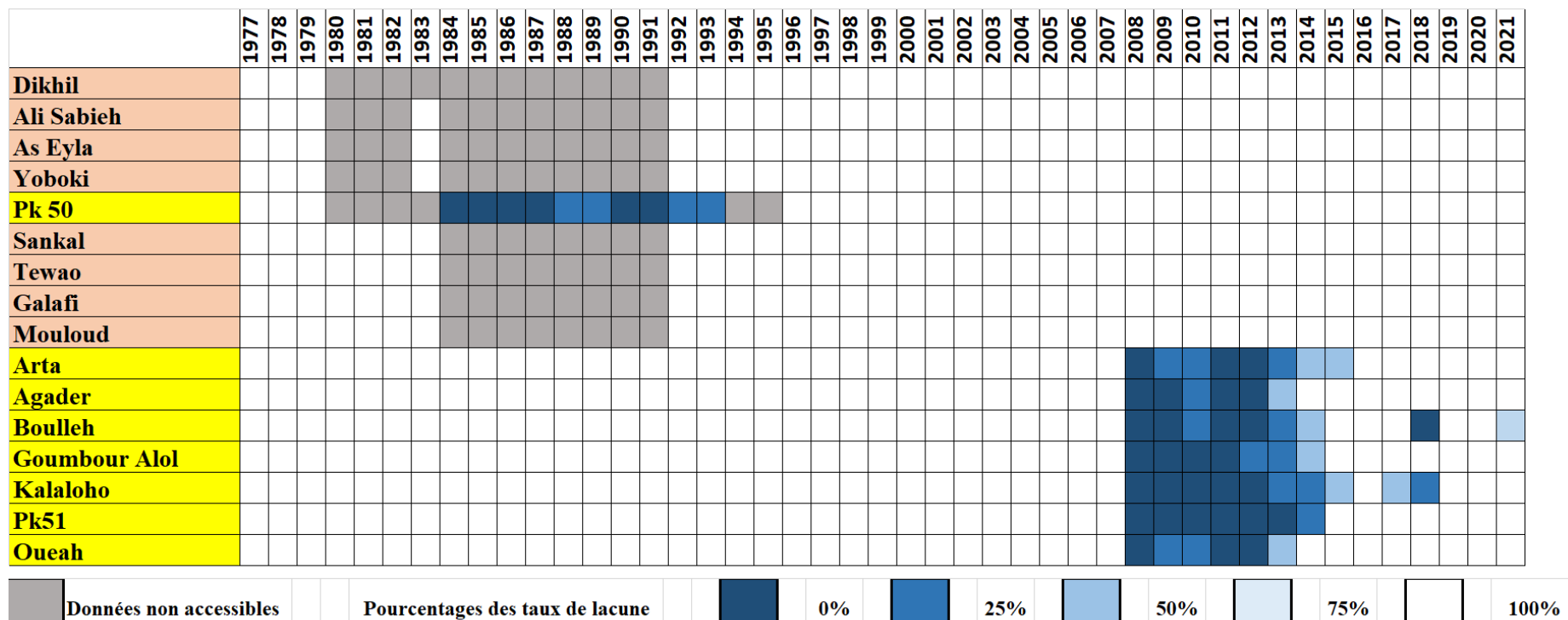
L'exhaustivité et la précision des données pluviographiques sont des éléments fondamentaux pour comprendre les régimes hydroclimatiques d'une région. Toutefois, la disponibilité et la qualité de ces données ne sont pas uniformes et présentent des particularités importantes dans le contexte de cette étude. Environ 50 % des données pluviographiques sont encore enregistrées sous format papier (Tableau 6), ce qui complique leur intégration dans les analyses des données. L'absence de numérisation complète limite la détermination précise du taux de lacunes pour ces stations, créant ainsi un obstacle à leur utilisation exhaustive.

Cependant, parmi ces stations, émerge un exemple notable : la station pluviographique PK50. Grâce à mon initiative et sous ma supervision, un travail de numérisation a été mené pour cette station. En effet, cette station a été numérisée grâce à l'utilisation de l'outil NUNIEAU, permettant ainsi la conversion des données papier en un format électronique exploitable. La station PK50 présente peu de lacunes dans ses données, offrant ainsi une source relativement complète et fiable pour l'analyse des événements pluvieux.

Le réseau des stations du système d'alerte précoce (SAP) présente quant à lui une variabilité temporelle dans les taux de lacunes (Tableau 7). Une période initiale, s'étendant de 2008 à 2013, a témoigné d'un fonctionnement relativement robuste malgré quelques interruptions, principalement en fin d'année 2009. Ces stations du SAP sont uniques en ce qu'elles fournissent des données à un pas de temps infra-journalier, offrant une résolution temporelle améliorée pour analyser en détails les événements pluvieux extrêmes.

Cependant, après 2013, le nombre de stations en fonctionnement a connu un déclin notable, à l'exception des stations de Boulleh et Kalaloho, bien que leur fonctionnement soit intermittent. Cette évolution soulève des questions sur la maintenance et la durabilité du réseau de surveillance climatique. Néanmoins, malgré les contraintes liées aux lacunes de données post-2013, celles disponibles, en particulier celles des stations du SAP, restent essentielles pour explorer les phénomènes hydroclimatiques de la région, en particulier les événements pluvieux extrêmes, et pour orienter les stratégies de gestion des ressources en eau.

Tableau 7: Pourcentage des taux de lacune des stations pluviographiques



1.3.Synthèse des données de précipitations

Nous avons procédé à l'analyse des données relatives à la pluviométrie issue de diverses stations pluviométriques (PLM) et pluviographiques (PLG) situées dans la République de Djibouti (Tableau 8). La figure 20 dresse un inventaire détaillé des stations sélectionnées, en précisant le type de station, la période d'observation, le pas de temps et le taux de lacune associé à chaque série de données.

Les stations pluviométriques, réparties sur plusieurs décennies, offrent un aperçu précieux des conditions climatiques passées. On peut noter que ces stations varient en termes de période d'observation, de résolution temporelle (mensuelle ou journalière) et de taux de lacune, exprimé en pourcentage, qui dépeint la proportion d'absence de données dans la série chronologique. La station d'Ali Sabieh, par exemple, offre des données pluviométriques mensuelles de 1946 à 1982, gérées par l'Agence Météo, avec un taux de lacune de 1.2%. De même, une observation journalière a été effectuée de 2013 à 2021, présentant un taux de lacune de 9.3%. D'autres stations, telles qu'Arta et Djibouti Aéroport, offrent des observations similaires, avec des taux de lacune variant de 0.5% à 17%.

Les stations pluviographiques, quant à elles, apportent un niveau de détail encore plus fin, car elles enregistrent les précipitations à des intervalles infrajournaliers. La variabilité dans la période d'observation et les taux de lacune dans ces stations témoignent des défis liés à la collecte continue de données à haute résolution. Il est à noter que les stations pluviographiques, telles qu'Agardier et Bouleuh, ont des taux de lacune plus élevés, s'étendant de 10.5% à 48.6%.

La considération de ces taux de lacune est cruciale, car elle peut influencer la précision des analyses ultérieures. La diversité des pas de temps allant des observations mensuelles aux observations infrajournalières enrichit l'analyse, offrant une perspective à la fois macroscopique et détaillée de la variabilité pluviométrique dans la région. Ces données serviront de base pour les différentes analyses menées au cours de cette recherche, permettant ainsi une compréhension approfondie de la dynamique hydroclimatologique de la République de Djibouti.

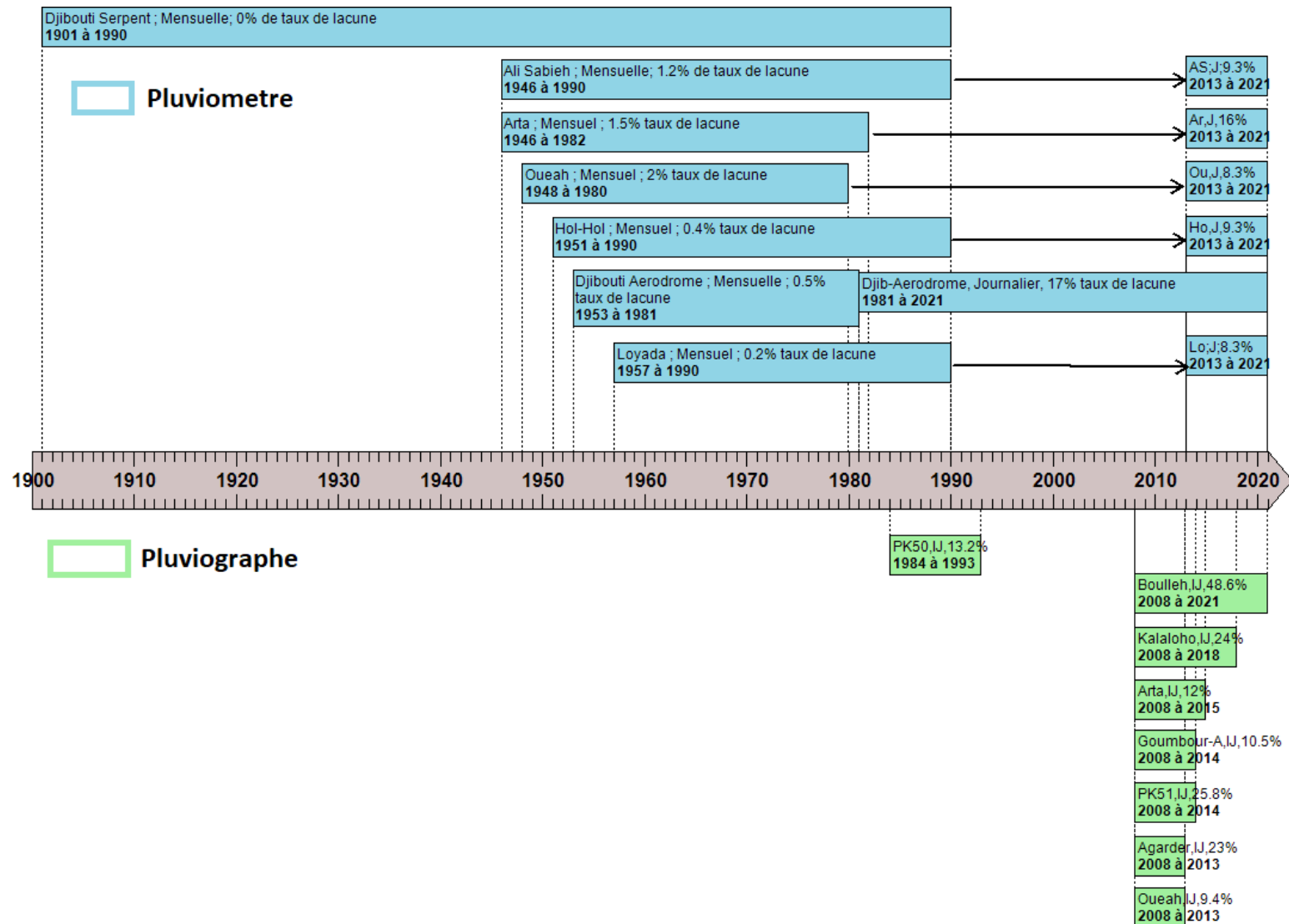


Figure 19: Frise chronologique des données de précipitations

1.4. P-Datasets : Présentation des produits d'estimation de pluie

La section suivante s'inspire en grande partie de la présentation des données abordée dans l'article référencé au chapitre 5 de cette thèse.

Les stations pluviométriques au sol dans de nombreuses régions du monde et dans la plupart des régions d'Afrique notamment la République de Djibouti sont rares et inégalement réparties. Par conséquent, l'analyse utilisant l'observation des pluviomètres est considérablement limitée quand elle repose sur des réseaux de pluviomètres de faible densité ou se limitant à une seule station pluviométrique isolée. Dans ce contexte, les ensembles de données des produits spatialisés de pluie que l'on peut trouver sur Internet à différentes échelles spatiales/temporelles offrent une alternative indispensable (Satgé et al., 2020) pour pallier la faible densité du réseau d'observations dans la zone d'étude.

Dans de nombreuses régions du monde, les ensembles de données satellites ont montré des perspectives prometteuses pour la gestion des ressources en eau en améliorant la compréhension des événements extrêmes (sécheresses, inondations) et de la variabilité pluviométrique spatio-temporelle (Satgé et al., 2020). La sélection des produits à tester a été motivée d'abord par leur disponibilité dans la région d'intérêt et le fait qu'ils sont couramment utilisés dans des études opérationnelles ou de recherche axées sur l'hydrologie ou l'agronomie (Gosset et al., 2013). Les produits avec une résolution temporelle journalière ou infra-journalière sont pris en compte (seul le produit GPCC a une résolution temporelle mensuelle), car ils sont pertinents pour les applications ciblées. Vingt-et-un produits ont été analysés et comparés aux données mesurées par les stations pluviométriques.

Il existe trois types de produits d'estimation des précipitations qui peuvent être définis en fonction des données d'entrée et du processus de récupération des données de précipitations : un premier basé sur des informations spatiales provenant de points de mesure au sol, un deuxième basé sur des données de réanalyse dérivées de modèles physiques et dynamiques, et un troisième basé sur des informations satellitaires utilisant les informations des micro-ondes passives (PMW) et de l'infrarouge (IR) (Satgé et al., 2020). Il convient de mentionner que certains ensembles de données d'estimation des précipitations peuvent combiner plusieurs sources de données provenant de ces trois types afin d'obtenir la meilleure précision possible (Satgé et al., 2020). Ainsi, les produits testés dans cette étude résultent de combinaisons de ces types, deux par deux ou les trois ensembles. Ci-dessous les différents produits utilisés dans le chapitre 5 pour la comparaison entre les stations au sol.

i. Données provenant uniquement des mesures au sol :

Les premiers produits sont basés sur les informations spatiales provenant des pluviomètres disponibles.

- Ce sont les produits CPC (Climate Precipitation Center) et GPCC (Global Precipitation Climatology Center). Le produit CPC dispose de rapports provenant de plus de

30 000 stations collectées auprès de sources multiples, notamment le Système mondial de télécommunications COOP et d'autres agences nationales et internationales (Becker et al., 2013).

- Quant au produit GPCC, il est composé de données de précipitations provenant de plus de 67 000 stations de pluviométrie dans le monde entier, ce qui en fait l'un des ensembles de données de produits d'estimation de pluie basées sur des pluviomètres le plus complet disponible (Becker et al., 2013). Cependant, la plupart des produits mondiaux de précipitations basés sur des données au sol (des pluviomètres) sont très mal documentés en Afrique.

ii. Données provenant des satellites seules / Données provenant des satellites combinés avec des données au sol :

Certains produits satellitaires combinent les informations spatiales des pluviomètres avec les données satellitaires recueillies à l'aide de capteurs à micro-ondes passives (PMW) et de capteurs infrarouges (IR).

- African Rainfall Climatology Version 2 (ARCV2), développé par NOAA CPC. ARC v2 est une version révisée des produits Climate Prediction Center (CPC) et African Rainfall Climatology (ARC), qui fournissent des données de précipitations en Afrique à partir de 1983 (Awange, 2016).
- TAMSAT (Tropical Applications of Meteorology using Satellite data and ground-based observations) est un autre ensemble de données disponible pour évaluer les précipitations dans la zone d'étude. Il a été développé à l'Université de Reading spécifiquement pour l'Afrique continentale avec une résolution spatiale de 0,0375°, ce qui en fait la résolution la plus fine parmi tous les ensembles de données considérés (Pomeon et al., 2017).
- Le produit PERSIANN-CDR développé par le Center for Hydrometeorology and Remote Sensing (CHRS) de l'Université de Californie à Irvine, et le PERSIANN-CCS-CDR sont générés à partir des sorties de cumuls de pluie du modèle PERSIANN-CCS (Sadeghi et al., 2021).
- Pour certains produits satellitaires tels que GSMaP-RT v.6 et TMPA-RT v.7, il existe une version qui a été ajustée avec des pluviomètres (respectivement GSMaP-Adj v.6 et TMPA-Adj v.7).
- Il existe également deux versions du produit satellitaire CMORPH : une version où le biais a été corrigé (CMORPH-CRT v.1) et une version où les données satellitaires ont été fusionnées avec les pluviomètres (CMORPH-BLD v.1).
- Le produit IMERG v.6 combine les données du produit satellitaire TRMM et de la constellation de satellites GPM. Le système est exécuté plusieurs fois pour chaque heure d'observation, donnant d'abord une estimation rapide (IMERG Early Run, IMERG-ER

v.6), puis une estimation plus tardive (IMERG Late Run, IMERG-LR v.6), et enfin une estimation finale (IMERG Final Run, IMERG-FR v.6).

iii. Données de réanalyse / Données de réanalyse-satellite / Données de réanalyse-pluviomètres

Une autre source de données provient des produits satellitaires basés sur des données de réanalyse dérivées de modèles physiques et dynamiques.

- Le produit satellitaire ERA5 offre une résolution spatio-temporelle améliorée par rapport au produit de réanalyse précédemment disponible (ERA-Interim). ERA5 combine de vastes quantités d'observations historiques en estimations mondiales à l'aide de systèmes de modélisation avancés et de systèmes d'assimilation des données.

Il existe également des produits basés sur des données de réanalyse et fusionnés avec des données satellitaires.

- le produit satellitaire CHIRP, développé par le US Geological Survey (USGS) en collaboration avec le Climate Hazards Group de l'Université de Californie (Funk et al., 2015; Katsanos et al., 2016; Petitta et al., 2016; Shiferaw et al., 2018).

Cependant, plusieurs produits basés sur des données de réanalyse sont également fusionnés avec des bases de données de pluviométrie disponibles. Par exemple :

- le système JRA-55 est basé sur le système opérationnel de prévisions mondiales et d'assimilation de données de la JMA (Japan Meteorological Agency) (Dee et al., 2011).
- le produit WFDEI comprend deux ensembles de fichiers de précipitations et d'enneigement générés à l'aide des totaux de précipitations CRU (WFDEI_CRU) ou GPCC (WFDEI_GPCC) (Weedon et al., 2014).
- Il existe également les sources de données EWEMBI qui combinent les données de réanalyse ERA-Interim (ERA-Interim), la méthodologie des données de forçage WATCH appliquée aux données de réanalyse ERA-Interim (WFDEI), les données de forçage earth2Observe (E2OBS) et les données du budget de rayonnement en surface NASA/GEWEX (SRB) (Calton et al., 2016; Stackhouse Jr. et al., 2011).

iv. Satellite-Réanalyse-Pluviomètres :

Dans cette section, nous décrivons des produits d'estimation des précipitations qui combinent des aspects des trois types précédents pour a priori garantir la meilleure précision possible.

- Comme l'ensemble de données CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations) version 2.0, développé par le US Geological Survey (USGS) et le Climate Hazards Group de l'Université de Californie, Santa Barbara (UCSB). En raison de sa haute qualité et de sa résolution spatiale (0,05°), CHIRPS est utilisé pour l'évaluation et la surveillance des événements météorologiques et climatiques extrêmes, ainsi que pour les projections hydrologiques dans les régions éloignées et peu dotées en

données de l'Afrique (Funk et al., 2015; Katsanos et al., 2016; Petitta et al., 2016; Shiferaw et al., 2018).

- Puis également le produit MERRA-2, version 5.12.4 du système d'assimilation des données atmosphériques Goddard Earth Observing System (GEOS).
- Et enfin, les ensembles de données MSWEP v.2, qui utilisent des informations provenant de mesures de pluviomètres, de jeux de données satellitaires de précipitations et d'estimations issues de modèles atmosphériques (Beck et al., 2017). MSWEP v.2 a été validé à l'échelle mondiale en utilisant de nombreuses observations de pluviomètres, montrant qu'il offre des performances nettement meilleures que d'autres ensembles de données largement utilisés basés sur des satellites, des stations au sol ou des réanalyses (Beck et al., 2019).

2. Données hydrométriques

2.1. Historique des données hydrométriques

Les premiers enregistrements des données de débit de la République de Djibouti remontent à 1929, lorsque l'ancienne Régie des Eaux (actuellement l'Office National des Eaux et de l'Assainissement de Djibouti) a effectué la première observation de débit sur l'oued Ambouli à la station Ambouli (Hauquin, 1978). En 1956, la première station hydrométrique a été installée sur l'oued Ambouli, fournissant des observations (discontinue avec des lacunes) de 1956 à 1974, principalement sur les crues de cet oued. Un inventaire complet des données de débit recueillies entre 1956 et 1974 a été réalisé par Hauquin (1978). Ces données ont été présentées dans le rapport sur l'inventaire et la mise en valeur des ressources en eau de la République de Djibouti (CHA, 1982). Cependant, selon le rapport, les données de Hauquin présentent certaines incertitudes en raison du manque de précision sur les méthodes utilisées.

La Coopération Hydrogéologique Allemande (CHA) a joué un rôle important dans l'installation de stations hydrométriques pour mesurer les niveaux d'eau dans différents bassins (Tableau 9). Entre 1978 et 1982, la CHA a installé six stations de jaugeage (à une résolution temporelle basée sur des événements spécifiques) dans les bassins des oueds suivants : Oueah, Ambouli (il est probable – mais non confirmé - que les observations effectuées entre 1956 et 1974 sur l'oued Ambouli l'aient été effectué au même endroit qu'entre 1978 et 1982), Cheiketi, Gami, Degbour et Galafi. Les stations ont été mises en service au printemps 1980 (CHA, 1982) (Figure 21, Tableau 9).

Après le départ de la CHA en 1982, le suivi des stations pluviométriques et hydrométriques a été pris en charge par le l'Institut Supérieur d'Études et de Recherches Scientifiques et Techniques (ISERST), aujourd'hui connu sous le nom du CERD (Centre d'Études et de Recherches de Djibouti), notamment en ce qui concerne la maintenance des stations et l'exploitation des données recueillies. Entre 1983 et 1987, l'équipe du CERD a publié des recueils annuels des observations hydrologiques, présentant les données relatives à chaque événement pluviométrique enregistré dans les régions du pays, où le réseau existant était réparti.

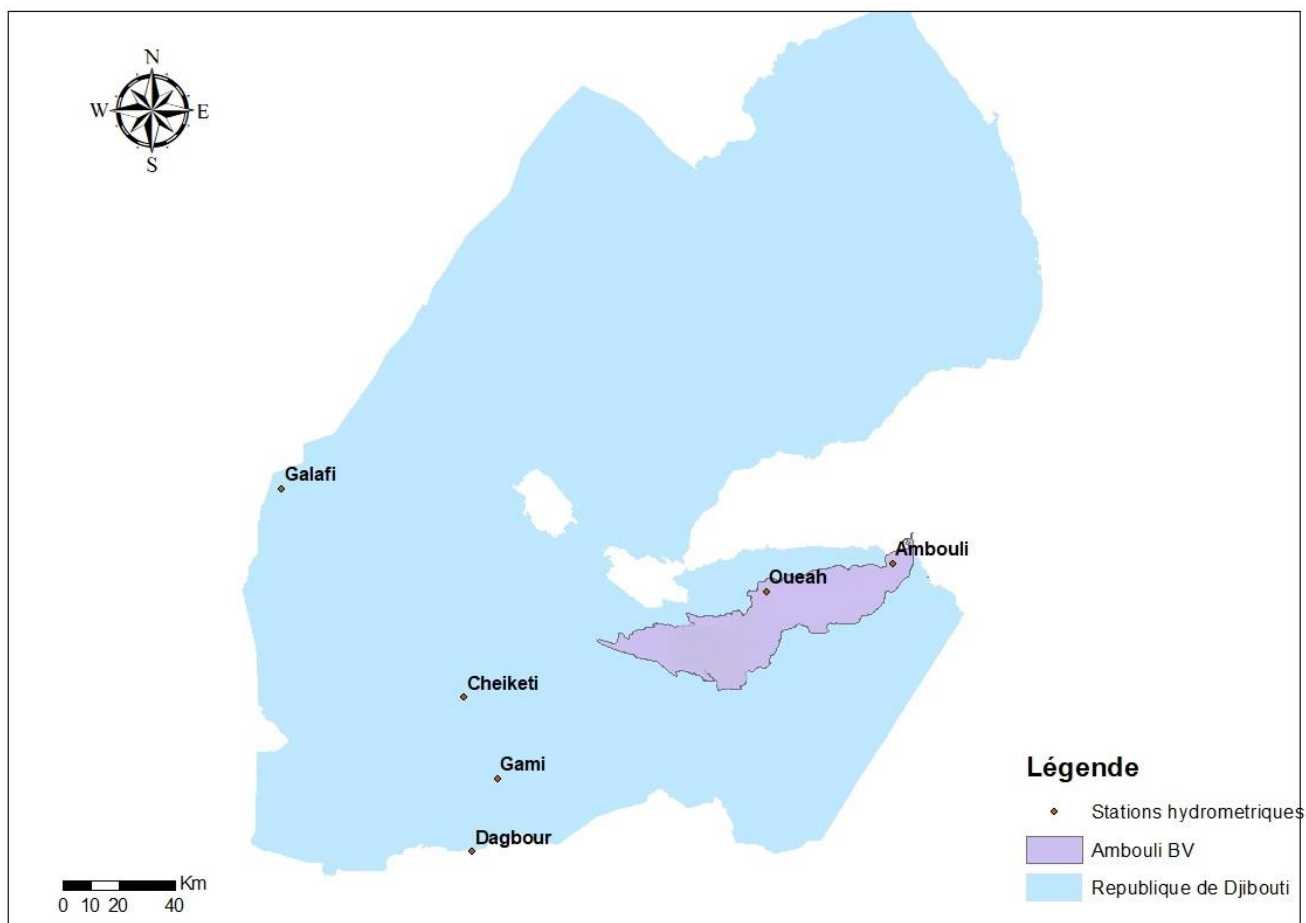


Figure 20: Localisation des stations hydrométriques mise en place par la CHA

2.2. Inventaire des données hydrométriques

Parmi les stations hydrométriques gérées par l'ISERST, deux stations, Ambouli et Oueah, se trouvent dans la zone d'étude (Tableau 9, Figure 21). L'enregistrement automatique des limnigraphes permet une discrétisation du temps jusqu'à une échelle de la minute. Cependant, certaines inexactitudes ou lacunes peuvent être liées aux équipements des stations. Par exemple, le limnigraphe d'Ambouli n'a pas fourni de mesure en avril 1986, alors qu'un écoulement avait réellement eu lieu à cette période. De plus, contrairement à la station Ambouli, à la station Oueah seules les hauteurs d'eau supérieures à 0,15 m sont prises en compte par l'enregistreur (CHA, 1982).

La détermination des vitesses moyennes des écoulements était réalisée soit par intégration graphique, soit par des méthodes arithmétiques à partir des vitesses mesurées à l'aide de flotteurs (CHA, 1982).

Depuis sa mise en service le 7 mai 1980, jusqu'en 1990, la station Ambouli a enregistré 14 crues (Desagher, 1990). A la station Oueah, le limnigraphe installé par la CHA a enregistré 48 crues entre le 21 avril 1980 et le 03 octobre 1990 (Desagher, 1990). Les valeurs mesurées et calculées sont regroupées dans le rapport de Desagher (1990) ; Date et heure DEBUT ; Date et heure FIN ; Temps de montée ; Temps de base ; Lamé d'eau écoulé ; Débit de pointe ; Débit spécifique ; Pluie à l'origine de la crue ; Volume écoulé ; Côte maximale à l'échelle ; Volume infiltré ; Volume évaporé ; Hauteur d'infiltration.

Durant la période entre 1991 et 2008, il n'y a eu aucune mesure hydrologique dans toute la république de Djibouti.

L'inventaire des données limnigraphiques du Centre d'Études et de Recherches de Djibouti (CERD) comprend trois stations équipées de limnigraphes : Bouleleh, Kalaloho et Oueah (localisé au même emplacement que la station Oueah mise en place par la CHA) (Tableau 9). Chaque station est équipée d'un limnigraphe qui permet de mesurer et d'enregistrer les variations du niveau d'eau dans les cours d'eau concernés.

Cependant, il est à noter que seule la station Bouleleh est actuellement opérationnelle. Malheureusement, la station Oueah a été détruite lors d'une forte crue survenue le 25 mars 2013, tandis que la station Kalaloho ne fonctionne plus. Il convient également de souligner que les enregistreurs limnigraphiques ne prennent en compte que les hauteurs d'eau supérieures à 1 m pour les stations Oueah et Kalaloho, et de 0,5 m pour la station Bouleleh. Cela signifie que les variations du niveau d'eau en dessous de ces seuils ne sont pas enregistrées par les limnigraphes. Par conséquent, les données disponibles sont spécifiques aux événements où les niveaux d'eau atteignent ou dépassent ces valeurs.

2.3. Taux de lacune des stations hydrométriques

La disponibilité des données hydrométriques dans la République de Djibouti se révèle être une problématique significative. Les observations hydrométriques sont principalement concentrées dans le bassin versant d'Ambouli, avec une attention particulière portée aux stations Ambouli, située en aval du bassin, et de Oueah, localisée au centre du bassin. En revanche, pour les autres bassins versants, les observations sont rares en raison de leur localisation géographique, ce qui a conduit à un manque de relevés.

Dans le contexte du bassin versant d'Ambouli, les données hydrométriques disponibles présentent un taux de lacune relativement élevé (Tableau 10). Les observations sont discontinues, mettant en évidence des périodes où les relevés ne sont pas disponibles. À titre d'exemple, les stations d'Ambouli et Oueah n'ont pas enregistré d'observations entre 1961 et 1971. Ces observations sont réalisées au pas de temps événementiel, ce qui ajoute à la complexité de la collecte de données continues.

Il est intéressant de noter qu'au sein du bassin versant, il n'y a qu'une seule année où les données hydrométriques ne présentent pas de lacune (en 1981), et cela concerne la station Oueah. Pour toutes les autres stations, la présence de lacunes dans les données est variable, illustrant les défis inhérents à la collecte et à la disponibilité continue des données hydrométriques dans la région.

L'existence de ces lacunes dans les données hydrométriques souligne l'importance de mettre en place des systèmes de collecte de données robustes et continus, en particulier pour les régions où les observations sont rares en raison de contraintes géographiques. Une meilleure surveillance hydrométrique pourrait contribuer à une meilleure compréhension des comportements hydrologiques et faciliter la gestion durable des ressources en eau dans le pays. Il est à noter que les données utilisées dans la suite de ce travail sont celles surlignées en jaune (Tableau 9).

3. Données climatologiques

3.1. Historique des données climatologiques

L'évolution de l'enregistrement des données climatologiques autres que pluviométriques dans la République de Djibouti reflète une histoire progressive qui s'étend sur plus d'un siècle. Le commencement de cette trajectoire remonte à l'année 1901, avec la mise en place de la première station climatologique du pays (une mesure de température), la station Djibouti Serpent. Cette étape marquante a jeté les bases de la surveillance climatique dans le pays.

Au fil des décennies qui ont suivi, une série d'efforts ont été entrepris pour élargir le réseau de stations et couvrir différents districts de Djibouti. Les enregistrements climatologiques ont ainsi progressivement augmenté avec l'installation de stations à Tadjourah, Obock, Dikhil, Ali Sabieh et Arta. Chacune de ces stations a contribué à la compréhension des variations climatiques locales et à créer une image plus complète du climat dans la République de Djibouti.

À ce jour, la République de Djibouti dispose d'une station synoptique majeure, la station "Djibouti Aéroport", située aux coordonnées géographiques 11,55 N de latitude et 43,15 E de longitude, et à une altitude de 13 mètres. Cette station joue un rôle central dans la collecte et l'analyse des données climatiques actuelles.

3.2. Inventaire des données T°C et ETP

Dans la République de Djibouti, toutes les stations de mesures climatologiques étaient opérationnelles jusqu'au fin des années 70, mais malheureusement, elles ont été détruites et mises hors service. Un aperçu de l'état des stations climatologiques existantes à cette époque, mesurant le vent, l'humidité relative, la radiation globale et la température à un pas de temps mensuel, est présenté dans le tableau 11. Cependant, il convient de noter que ces stations ont également subi des actes de pillage et, actuellement, seule la station synoptique de Djibouti aéroport reste fonctionnelle. Les paramètres mesurés à cette station sont :

Température : Mesure de la température maximale journalière, mesure de la température minimale journalière, température maximale absolue, température minimale absolue et mesure de la température à 0h, 3h, 6h, 9h, 12h, 15h, 18h, et 21h

Tension de vapeur : Mesure de la tension de vapeur à 0h, 3h, 6h, 9h, 12h, 15h, 18h et 21h

Humidité : Mesure de l'humidité maximale journalière, mesure de l'humidité minimale journalière et mesure de l'humidité à 0h, 3h, 6h, 9h, 12h, 15h, 18h et 21h

Nébulosité : Détermination journalière de la nébulosité à 0h, 3h, 6h, 9h, 12h, 15h, 18h et 21h

Insolation : Mesure journalière de l'insolation

Evaporation : Mesure journalière de l'évaporation

Pression atmosphérique : Mesure de la pression atmosphérique à 0h, 6h, 12h et 18h au niveau de la station, mesure de la pression minimale du matin, mesure de la pression maximale du matin, mesure de la pression minimale du soir et mesure de la pression maximale du soir

Vent : Mesure de la vitesse du vent à 0h, 3h, 6h, 9h, 12h, 15h, 18h et 21h et vitesse maximale du vent et la direction correspondante.

Entre les années 1991 et 1993, une tentative d'amélioration du réseau de surveillance climatologique a été entreprise, conduisant à l'installation de quatre nouvelles stations climatologiques ainsi qu'à la réparation d'une ancienne station (Dikhil). Cependant, malgré ces initiatives, les défis inhérents à la maintenance et à la protection de ces infrastructures face aux conditions environnementales rigoureuses de la République de Djibouti ont persisté. Ces nouvelles stations, tout comme leurs prédécesseurs, ont également subi des dommages ou ont été détruites au fil du temps. Les facteurs environnementaux, tels que les conditions climatiques extrêmes, les vents forts et les tempêtes de sable, ont souvent rendu difficile la conservation à long terme de ces installations.

Cette étude se focalise spécifiquement sur les données relatives à la température et à l'évaporation. Ces deux paramètres climatiques jouent un rôle central dans la compréhension des variations hydroclimatiques dans la région étudiée. La température, en tant que variable fondamentale, influence les processus d'évaporation, de condensation et de précipitation, ayant un impact significatif sur les régimes hydrologiques locaux. L'évaporation, quant à elle, représente une composante essentielle du cycle hydrologique, influençant directement les bilans d'eau et les disponibilités en ressources hydriques.

En se concentrant sur les données de température, nous sommes en mesure d'analyser les tendances à long terme et les variations saisonnières qui peuvent entraîner des répercussions sur la distribution des précipitations dans la région. Ces variations de température peuvent également influencer la demande en eau, notamment en ce qui concerne l'irrigation agricole et les besoins en eau potable. Par ailleurs, les données d'évaporation complètent cette image en fournissant un aperçu crucial des pertes d'eau dues à l'évaporation atmosphérique, ce qui revêt une importance particulière dans les environnements semi-arides tels que la République de Djibouti.

Les mesures d'évaporation ont été effectuées jusqu'en 1977 dans cinq stations, Djibouti-serpent, Djibouti-aérodrome, Arta, Dikhil et Ali Sabieh (Hauquin, 1978). De plus, entre 1972 à 1974, l'évaporation était également observée aux stations de Hol-Hol, Damerdjog et Oueah (Hauquin, 1978) (Tableau 11). Parmi ces cinq stations, seules trois stations nous intéressent particulièrement, à savoir Djibouti-aérodrome, Djibouti-serpent et Arta, toutes situées dans le bassin versant d'Ambouli. Cependant, il convient de noter que ces données sont relativement anciennes, couvrant la période de 1955 à 1977.

En ce qui concerne les éléments climatiques influençant l'évaporation tels que la température, l'humidité de l'air, la vitesse du vent et la durée d'insolation, ils ont été mesurés dans un nombre limité de stations, soit cinq stations (Djibouti-serpent, Djibouti-aérodrome, Arta, Dikhil et Ali Sabieh) (Hauquin, 1978). Cependant, les relevés de mesures de ces stations sont très incomplets. Ainsi, pour estimer l'évaporation potentielle, on dispose de valeurs mesurées provenant de quelques stations, mais il n'existe aucune mesure directe de l'évaporation réelle à l'aide de lysimètres.

Tableau 11: Inventaire des données climatiques

Station	Latitude	Longitude	Type	Début observation	Fin observation	Pas de temps	Support	Gestionnaire	Remarques
Ali - Addé	11,13	42,88	CLM	1993	1995	Mensuel	Papier	Agence Météo	Endommagée
As Eyla	11	42,1	CLM	1993	1996	Mensuel	Papier	Agence Météo	Détruite et Pillée
Dikhil	11,1	42,37	CLM	1955 1993	1977 1995	Mensuel	Papier	Agence Météo	Détruite et Pillée
Djibouti Aéroport	11,55	43,15	CLM	1955	2019	Journalier	Numérisé	Agence Météo	Fonctionnelle
Dorra	12,15	42,47	CLM	1991	1995	Mensuel	Papier	Agence Météo	Détruite et Pillée
Galafi	11,76	42,79	CLM	1991	1995	Mensuel	Papier	Agence Météo	Détruite et Pillée
Djibouti Serpent	11,6	43,15	CLM	1901	1977	Mensuel	Papier	Agence Météo	
Ali Sabieh	11,15	42,71	CLM	1955	1977	Mensuel	Papier	Agence Météo	
Arta	11,52	42,83	CLM	1955	1977	Mensuel	Papier	Agence Météo	
Damerdjog	11,47	43,18	BEC	1972	1974	Mensuel	Numérisé	Agence Météo	Mesures ETP
Hol-Hol	11,3	42,93	BEC	1972	1974	Mensuel	Numérisé	Agence Météo	Mesures ETP
Oueah	11,5	42,87	BEC	1972	1974	Mensuel	Numérisé	Agence Météo	Mesures ETP

CLM : Station climatologique

BEC : Bac évaporatoire Colorado

3.3. Taux de lacune des données climatologiques

La disponibilité des données climatologiques en République de Djibouti présente une situation contrastée. Parmi les stations climatologiques du pays, une seule se distingue en tant que station synoptique, à savoir la station Djibouti Aéroport, gérée par l'Agence Nationale de la Météorologie (ANM). Les données de cette station ont été numérisées et sont disponibles, offrant un niveau de continuité et de disponibilité remarquablement élevé. En effet, le taux de lacune de cette station est très faible, faisant d'elle la seule source de données climatologiques continue et quasi-exempte de lacunes dans le pays (Tableau 12).

En complément à cette station synoptique, d'autres sources de données climatologiques existent. Trois stations (Hol-Hol, Damerjog et Oueah) ont été observées durant l'étude menée par Hauquin. Ces données ont été collectées sans lacunes majeures, fournissant ainsi des informations précieuses pour des analyses climatologiques.

Cependant, pour la plupart des autres stations climatologiques du pays, les données sont au format papier et archivées auprès de l'ANM. La présence d'une seule station synoptique avec des données climatologiques continue et peu de lacunes souligne l'importance de maintenir et de moderniser les systèmes de collecte de données météorologiques. Une couverture plus étendue et des données de meilleure qualité permettraient une meilleure compréhension des variations climatologiques dans le pays, ainsi qu'une base solide pour les études hydroclimatologiques et la planification de la gestion des ressources en eau. Il est à noter que pour cette étude les données climatologiques de la station Djibouti aéroport seront utilisées pour l'analyse des événements des extrêmes.

4. Données hydrogéologiques

4.1. Historique des données hydrogéologiques

Les études hydrogéologiques menées dans le pays ont suscité un grand intérêt et ont fait l'objet de nombreuses publications, avec pour objectif principal l'alimentation en eau potable de la ville de Djibouti et l'exploitation des eaux souterraines.

Initialement, les études hydrogéologiques se concentraient principalement sur les nappes alluviales présentes dans les graviers et les sédiments marins, avant les travaux d'Archambault en 1956 et de Pouchan en 1961. C'est grâce à Pouchan (1961) qu'il a été démontré l'existence d'un aquifère dans les basaltes du golfe (Bouh, 2006). Par la suite, Pouchan et al (1975) ont mené une étude sur l'origine des eaux souterraines et les relations existantes entre les nappes. De nombreuses études hydrochimiques et analyses isotopiques ont également été réalisées par Hauquin (1978), Fontes et al (1980) et Adam (1984).

Un des plus grands projets hydrogéologiques financé par la République Fédérale d'Allemagne et supervisé par la Coopération Hydrogéologique Allemande (CHA, 1982) a porté sur l'utilisation future des ressources en eaux souterraines. En outre, plusieurs thèses ont été soutenues entre 1988 et 2019, contribuant ainsi à l'avancement des connaissances dans le domaine de l'hydrogéologie (Figure 22).

Ces publications et études hydrogéologiques antérieures fournissent une base solide de données et de connaissances sur les ressources en eaux souterraines dans la région (Figure 22). Cependant, il est important de noter que de nouvelles recherches et études sont nécessaires pour actualiser et compléter ces connaissances, en particulier dans le contexte des besoins en eau potable croissants de la ville de Djibouti et des défis liés à l'exploitation durable des eaux souterraines.

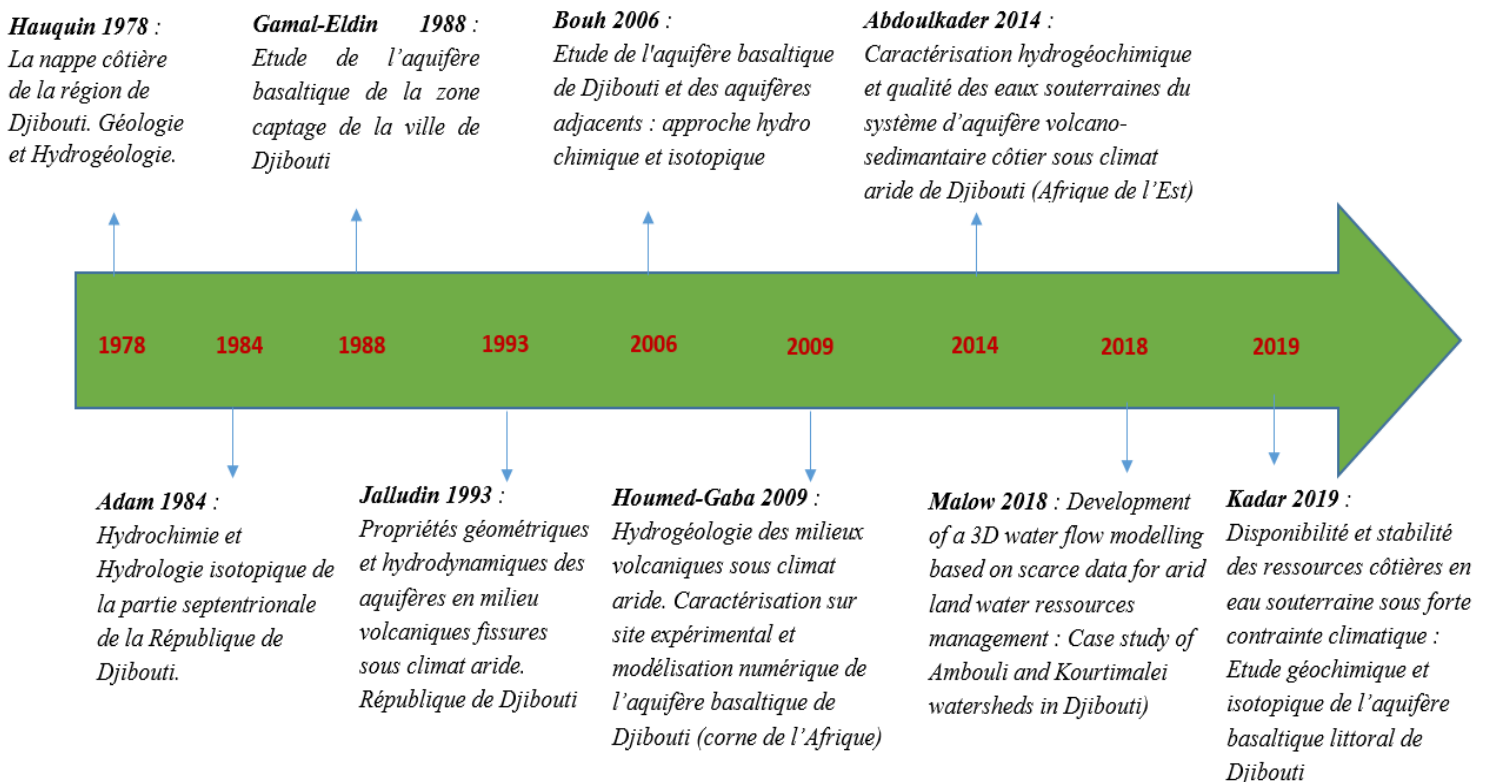


Figure 21: Chronologie des thèses en hydrogéologie et géochimie de la zone d'étude

4.2. Aquifère de la nappe de Djibouti

En raison de la signification capitale de cet aquifère dans le contexte hydrogéologique du pays, la majorité des études et des travaux de recherche s'est concentrée sur l'analyse approfondie et la compréhension des caractéristiques, des comportements et des dynamiques de cet aquifère souterrain. Cet aquifère côtier des basaltes du Golfe, connu sous le nom de « nappe de Djibouti », joue un rôle crucial dans l'alimentation en eau potable de la ville de Djibouti et de son agglomération depuis les années 1960, répondant ainsi aux besoins croissants de près de 65% de la population du pays (Bouh, 2006).

Cet aquifère exploité pour l'alimentation en eau potable de la ville de Djibouti est constitué des basaltes du golfe et des basaltes Somalis (Figure 23). Il s'étend sur une distance d'environ vingt kilomètres du sud à l'ouest de la ville de Djibouti, limité à l'est par le Golfe d'Aden et au nord par le Golfe de Tadjourah. À l'est, l'aquifère est séparé de la mer par la plaine sédimentaire de Djibouti, une bande de sédiments grossiers d'une largeur de 4 à 6 kilomètres (Jalludin, 1993 ; Bouh, 2006).

Le relief de la région se présente sous la forme de panneaux basaltiques qui s'élèvent régulièrement en altitude vers l'amont. Ces plateaux basaltiques, marqués par des processus tectoniques, sont ponctués par des cônes volcaniques alignés le long des fractures (Adam, 1984). Les surfaces des plateaux sont souvent recouvertes par des sols rouges résultant de l'altération (Jalludin et al., 2008). L'ensemble est délimité en amont par les reliefs érodés des massifs du Bour Ougoul, et est traversé par les lits des oueds, créant parfois des canyons escarpés (Bouh, 2006).

L'aquifère basaltique de Djibouti possède en grande partie une transmissivité élevée (débit élevé et faible rabattement). Les débits d'exploitation dépassent généralement 30 m³/h et certains forages donnent plus de 100 m³/h. Le taux de réussite de 50% des forages implantés dans cet aquifère témoigne de sa forte hétérogénéité. Les relations hydrauliques entre les basaltes du Golfe et les basaltes Somali (au Sud) semblent exister au vu de la continuité du gradient hydraulique sur ces différentes formations (Jalludin, 1993 ; Brunke, 1993). Les observations géologiques de terrain et les relevés des logs lithologiques des forages ne montrent pas de couches imperméables séparant les différentes formations (Daoud, 2008). Ces deux unités basaltiques constituent l'aquifère basaltique de Djibouti.

Les basaltes du Golfe, peu affectés par l'altération et l'hydrothermalisme en raison de leur âge jeune, se positionnent sur les deux rives du Golfe de Tadjourah et en particulier dans la région de la ville de Djibouti (Kadar, 2019). Au nord, les basaltes du golfe sont en contact direct avec la mer, l'aquifère du Golfe est donc le seul aquifère qui peut être affecté par l'intrusion d'eau de mer. A l'ouest, l'aquifère est également constitué des alluvions pléistocènes et récentes qui forment une bande de quelques kilomètres de large tout le long du littoral (Jalludin, 1993). Les formations ont été intensément fracturées, permettant à l'aquifère d'acquérir une perméabilité de fissures assimilable à un aquifère poreux (Houmed-Gaba, 2009).

La caractérisation détaillée de l'aquifère de la nappe de Djibouti, y compris sa structure, ses propriétés hydrogéologiques et son comportement face aux variations climatiques, constitue un enjeu majeur pour une gestion durable de cette ressource en eau souterraine vitale pour la région. Des études antérieures ont fourni des informations importantes, mais de nouvelles

recherches et analyses sont nécessaires pour approfondir notre compréhension de cet aquifère et pour élaborer des stratégies efficaces de gestion et de préservation de cette ressource précieuse.

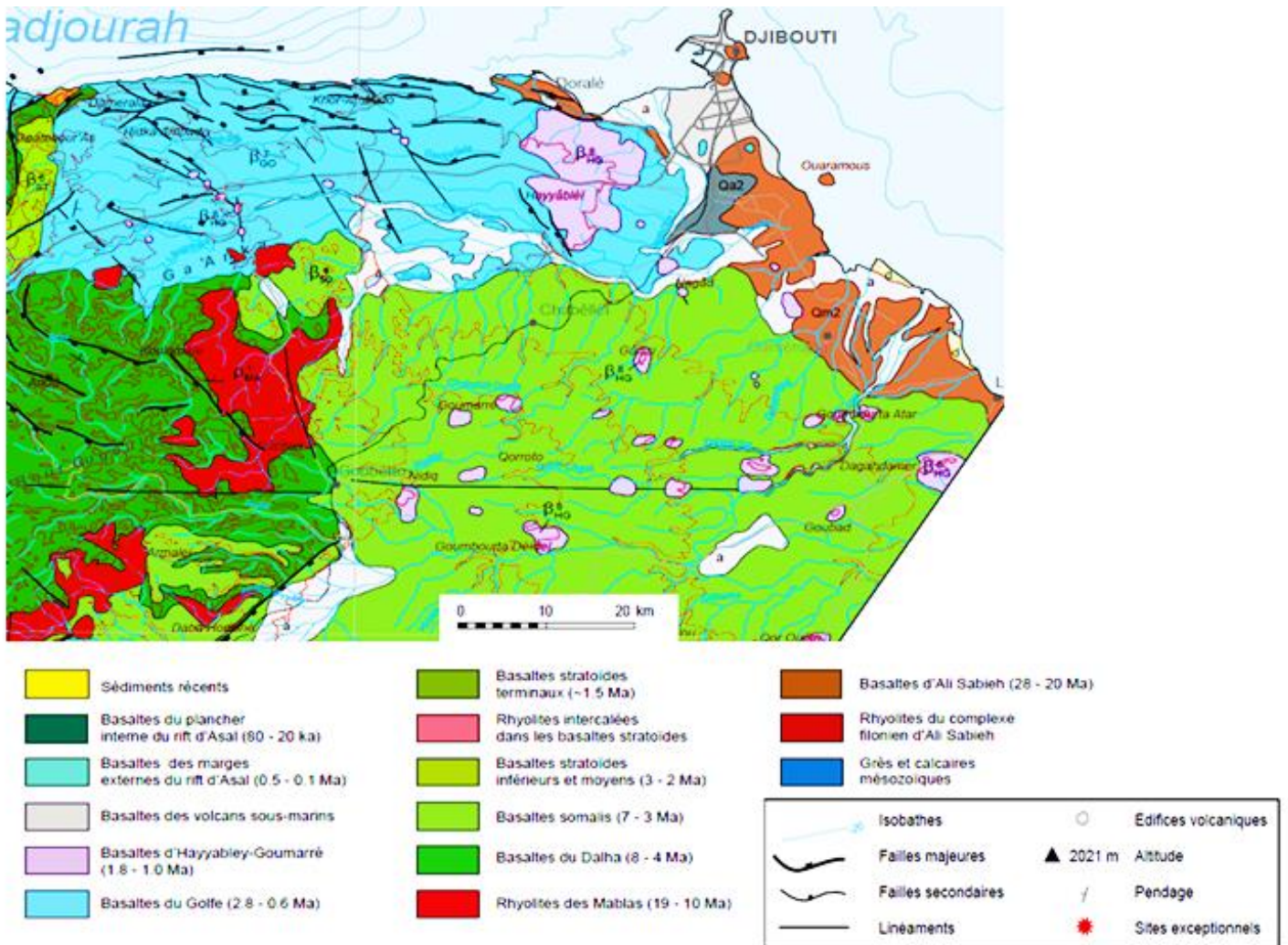


Figure 22: Carte géologique de la zone de la nappe de Djibouti 1/200 000 (Le Gall et al., 2015)

4.3. Inventaire des stations piézométriques

Dans le cadre de l'inventaire des forages où le niveau piézométrique a été mesuré de la région de Djibouti, un total de 30 stations a été recensé (Tableau 13, Figure 24).

Il convient de noter que la plupart de ces stations ne font pas l'objet d'un suivi temporel régulier et présentent des dommages. Une exception notable est la station piézométrique Oueah 4 (Figure 25). Ce suivi plus fréquent (hebdomadaire) permet d'obtenir des données plus détaillées sur les variations des niveaux piézométriques dans cette zone spécifique.

Ces forages recensés sont caractérisés par plusieurs paramètres, tels que le niveau statique de la nappe, la conductivité électrique, la température de l'eau, le taux de chlorure... (Tableau 13).

Ces paramètres sont essentiels pour évaluer la qualité et les propriétés hydrogéologiques des eaux souterraines.

Cependant, il est important de souligner que des efforts supplémentaires sont nécessaires pour assurer un suivi régulier de toutes les stations piézométriques, ainsi que pour évaluer et corriger les dommages éventuels qui pourraient affecter la fiabilité des mesures. Un suivi temporel continu et fiable des niveaux piézométriques est essentiel pour comprendre les variations hydrologiques et évaluer la disponibilité des ressources en eau souterraine dans la région de Djibouti.

Tableau 13: Inventaire des forages

Nom de Forages	Année de Mise en place	Coordonnées		Côte tube (m)	Prof. (m)	N.S (m)	Q (m ³ /h)	N.D (m)	Cond. (µS/cm)	Temp . (°C)	Chlorure (mg/l)	Date de Fin d'observation
		E	N									
REGION DE DJIBOUTI												
Agader*(P1)	1986	294233	1273443	46,33	60,8	44,9	12,4		1350	43,3	434	24/02/1988
Midgaoune1*(P2)	1986	303506	1265236	62,1	84,5	48,25	11,5	73,7	524	38	38	Bouché
Godchabel 1*(P3)	1986	297152	1266792	96,53	121	95,2	4,7	96,1	1572	42,4	563	19/03/1995
Naasley*(P4)	1986	301505	1271873	7,97	33,9	17	15,1	7,17	3230	35,9	1306	Bouché
Atar yer*(P5)	1986	303879	1269355	13,95	45,6	13,1	14,4	14,4	5200	37,6	1908	22/10/1991
Guissi*(P6)	1986	295236	1271053	59,86	90	57,4	10,8	57,5	3780	39,6	571	21/03/1992
Wead*(P7)	1986	291274	1273378	61,89	109	59,3	10,4	61	1070	54,6	1143	27/12/1990
E 20(P9)		300941	1270379	13,45	31	12,47	59	24,5	2780	35,2	842	
E 28(P10)	1988	303906	1267252	27,73	41	27,93	50,4	28,2	4400	37	1823	
Midgaoune2(P11)	1989	303804	1266153	71,47	110	71,01				36,9	206,9	
Godchabel2*(P12)	1989	298929	1269008	48,17	67,5	47,57	12	46,7	1920			Bouché
Moqarrada*(P13)	1992	306045	1264473	51,09	66	49,21			5200	37,7		22/08/1994
Gegada(P14)	1992	296959	1259539	149,15	198	142,3			1381	54	261,3	
Awrofoul*(P15)	1990	287163	1275830	107,23	128	76,4			1230	66,6		20/01/1994
Guedmarré*(P16)	1989	290860	1274049	65,8	100	63,45	17,8	72,2	2220	53,8	526	Bouché
Dey- dey*(P17)	1988	300102	1262928	125,8	153	60,31	6	118				Bouché
E 14(P18)	1974	297997	1274299	13,99	32,7	13,06	16,2	28,7	2820	37,4	769	Bouché
E 29(P19)	1988	302968	1268037	29,8	50	28,82	70	28,9	1021	40,8	478	
E 23*	1978	302855	1268084		40	27,36	60	17,3		40,7		24/02/1988
E 38*	1981	308183	1266945			14,82		15,5	2900	36		21/03/1992

Nom de Forages	Année de Mise en place	Coordonnées		Côte tube (m)	Prof. (m)	N.S (m)	Q (m ³ /h)	N.D (m)	Cond. (µS/cm)	Temp. (°C)	Chlorure (mg/l)	Date de Fin d'observation
		E	N									
Odawwa Yar Rec.(P20)	1994	298330	1258897	133	203	127,3			1013	41,8	178	Bouché
Odawwa Est(P21)	1994	340000	1259050	80	115	63,2	12	63,2	1369	40,1		Bouché
DISTRICTS DE L'INTERIEUR												
Oueah 4*	1976	265779	1272180	416,27	27	11,9	12	2260				Bouché
Dikhil 3*		212108	1228017	474,57	93,7	49,52			1400			Aout-90
PK6-1*	1976	266269	1304909	75	101	68	25	79	1550			oct-91
PK6-2*	1982	265758	1305373	86,82	131	57,44			1400			oct-91
PK6-3*	1985				128	73,93	42	75,5	1281			oct-91
Soublali 2		304783	1332662	85,45	120				2600			oct-91
Mouloud 4*	1982/83				134	64	33		2750			juil-96
* : Forages incluant les mesures du niveau piézométrique												

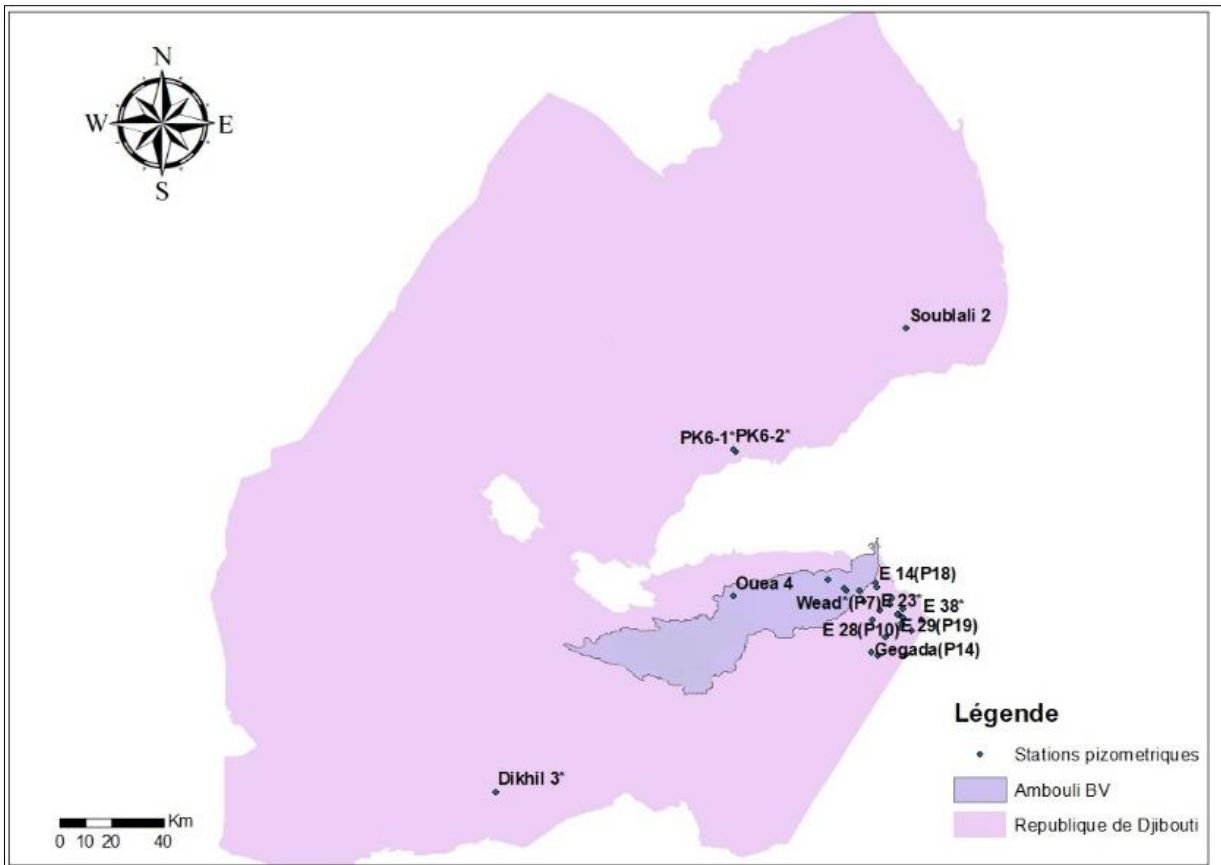


Figure 23: Localisation des forages

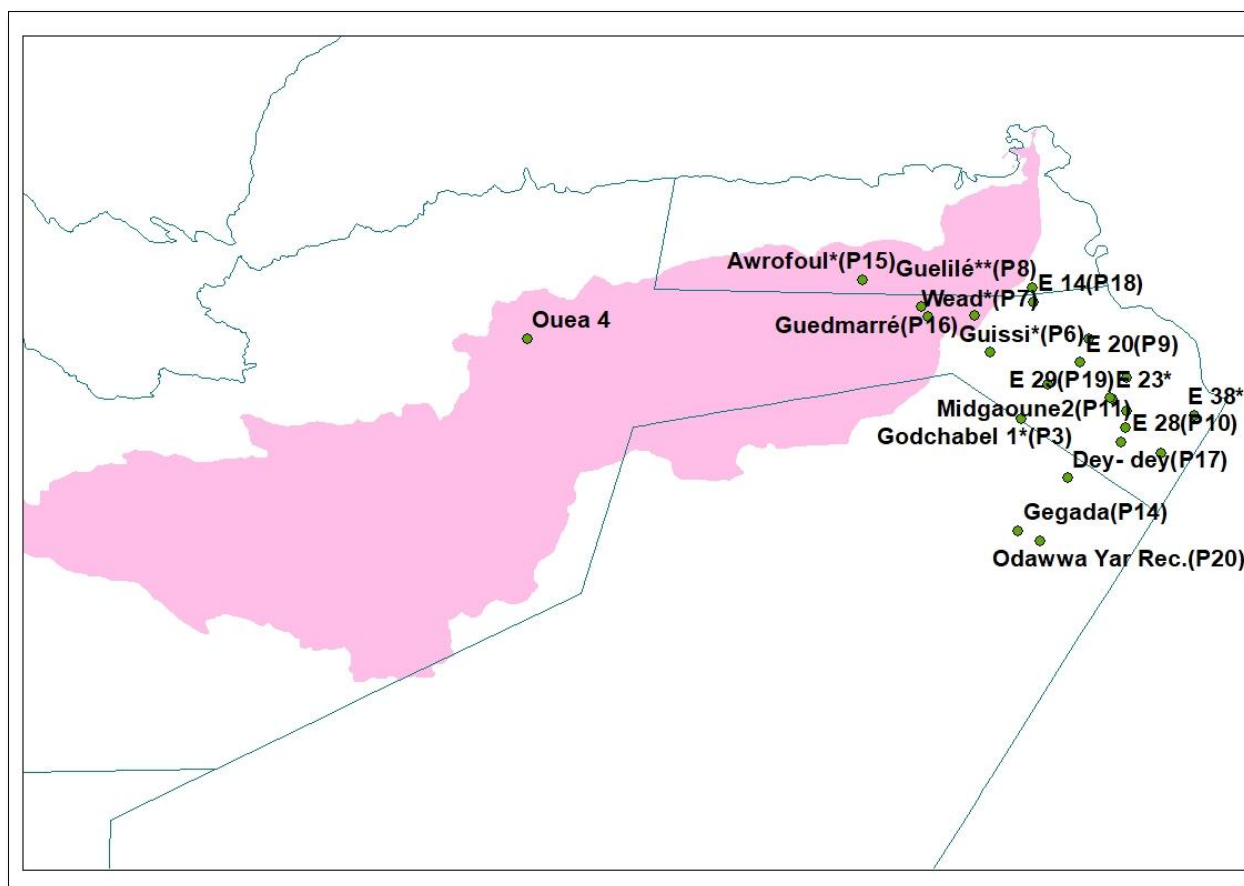


Figure 24: Zoom sur les forages de la zone du bassin versant d'Ambouli

5. Données cartographiques

Dans le cadre de l'inventaire des données cartographiques disponibles pour notre étude, plusieurs cartes topographiques ont été identifiées. Parmi elles, la carte du relief de la République de Djibouti (RDD) à l'échelle du 1/100 000 en 12 feuilles est particulièrement pertinente. Cette carte, publiée par l'IGN (France) en 1955 avec une mise à jour partielle en 1961, présente des courbes de niveau équidistantes de 25 m et une projection UTM (ellipsoïde de Clarke), fuseau n°38. Dans le contexte de notre étude, le bassin versant d'Ambouli est représenté sur 4 feuilles : Djibouti, Tadjoura, Ali Sabieh et Loyada. Cette carte offre une représentation générale fiable du relief obtenu par stéréophotogrammétrie, ainsi qu'une toponymie détaillée.

Une autre carte topographique disponible est la carte générale de la RDD à l'échelle du 1/200 000 en une seule feuille. Publiée en 1992 par l'IGN (France), cette carte a été établie à partir d'une restitution photogrammétrique d'images SPOT de 1988, avec un pré complétement sur le terrain en 1988-89. Les courbes de niveau équidistantes sont de 80 m. Cette carte offre une vision d'ensemble du territoire étudié et permet de situer le bassin versant d'Ambouli.

En ce qui concerne la carte géologique, une carte à l'échelle du 1/200 000 a été publiée par la Commission de la Carte Géologique du Monde. Élaborée par Le Gall et al. (2015), cette carte intègre un fond topographique réalisé par l'IGN France pour le compte du ministère de

l'Enseignement et de la Recherche de la République de Djibouti. Elle permet de mieux comprendre la composition géologique du territoire étudié.

Outre ces cartes topographiques, des cartes thématiques sont également disponibles à l'échelle du 1/200 000, qui peuvent s'avérer utiles pour notre étude. Le service des Systèmes d'Information Géographiques, de la Télédétection et des bases de données du CERD est chargé de constituer une base de données des informations géoréférencées, d'éditer des cartes thématiques nationales, de préparer des atlas thématiques, et d'inventorier toutes les cartes relatives aux données nationales géoréférencées. Parmi les exemples de cartes disponibles, on retrouve la carte des catégories de cultures, la carte des sols appropriés à l'irrigation, la carte de la végétation, la carte des évapotranspirations potentielles, la carte des évapotranspirations réelles, la carte des pluies moyennes annuelles, la carte de la conductivité des eaux souterraines, la carte de la minéralisation totale des eaux souterraines, la carte des teneurs en chlorure des eaux souterraines, la carte du débit annuel des aquifères (m³/an), ainsi que la carte des systèmes d'aquifères. Ces cartes thématiques complètent l'analyse hydrologique et permettent une meilleure compréhension des caractéristiques géographiques et hydrogéologiques du territoire étudié.

Conclusion : Le Chapitre 2 de cette thèse a permis d'établir un état des lieux détaillé des données relatives à la zone d'étude, couvrant des domaines variés tels que la climatologie, l'hydrologie, l'hydrogéologie et la cartographie. À travers les différentes sections, il est clairement apparu que la disponibilité, la continuité et la fiabilité des données présentent des défis majeurs pour cette recherche.

Les données de précipitation, qu'elles soient pluviométriques ou pluviographiques, ont montré des taux de lacune significatifs, illustrant les difficultés rencontrées dans la collecte et la maintenance des instruments de mesure. De même, bien que les données hydrométriques et climatologiques soient essentielles pour comprendre les dynamiques de la zone d'étude, elles souffrent également de lacunes et de discontinuités temporelles.

Le volet hydrogéologique a révélé des informations précieuses sur l'aquifère de la nappe de Djibouti, mais là encore, l'inventaire des stations piézométriques a mis en évidence des manques et des disparités. Enfin, la section consacrée aux données cartographiques a mis en lumière les défis associés à la représentation spatiale de la zone d'étude.

En somme, bien que ce chapitre ait fourni un aperçu approfondi des données disponibles, il a également mis en évidence la nécessité d'aborder ces données avec prudence, compte tenu de leur nature lacunaire et disparate. Ces contraintes doivent être prises en compte dans l'interprétation des résultats et soulignent l'importance d'investissements futurs pour renforcer la collecte et la gestion des données dans la zone d'étude.

Chapitre 3: Méthodologie d'analyse des données

Chapitre 3: Méthodologie d'analyse des données

Ce chapitre est dédié à la méthodologie d'analyse des données hydroclimatiques, un élément essentiel pour décrypter les mécanismes complexes de ce domaine (hydroclimatologie) et tirer des conclusions éclairées. L'analyse rigoureuse de données diverses requiert une approche méthodologique solide afin d'assurer la validité et la fiabilité des résultats obtenus. Ce chapitre expose en détail la méthodologie mise en place pour traiter et interpréter ces données dans le cadre de cette thèse.

Nous débutons par l'examen des données de précipitation et de température, élément fondamental de tout processus hydroclimatologique. Cette section inclut l'application de méthodes pour détecter les tendances et les ruptures dans les séries chronologiques de précipitations et de température. Les événements extrêmes, pour appréhender les phénomènes hydrologiques exceptionnels, sont également minutieusement analysés. De plus, une attention particulière est portée à l'étude des données infrajournalières de précipitations, permettant une compréhension plus approfondie des comportements hydroclimatiques à des échelles temporelles plus fines.

Nous nous penchons ensuite sur les produits d'estimation de la pluie. Une attention particulière est accordée au pré-traitement de ces données, car il garantit la qualité et la cohérence des données utilisées dans l'analyse. La méthodologie de comparaison est ensuite exposée en détail, permettant la confrontation entre diverses sources de données et d'estimations de pluie. Enfin, un examen exhaustif des métriques de validation des données, qu'elles soient quantitatives ou catégorielles, est présenté pour évaluer la performance et la qualité des produits d'estimation.

L'analyse comparative des termes du bilan hydrologique du bassin versant d'Ambouli constitue le segment suivant de ce chapitre. Nous y détaillons les différentes méthodes utilisées pour le calcul des divers termes contribuant à ce bilan, permettant ainsi une compréhension exhaustive des flux hydrologiques au sein du bassin.

Enfin, la partie dédiée à la modélisation du bassin amont du barrage clora ce chapitre. La justification du choix du modèle hydrologique ainsi que sa présentation et son fonctionnement seront abordées de manière à fournir une vision claire et complète de la démarche modélisation adoptée.

1. Les données climatologiques

Les données climatologiques jouent un rôle central dans le domaine de l'hydrologie, étant donné qu'elles constituent le fondement de toute analyse liée au cycle de l'eau et aux variations climatiques. Dans cette thèse, la collecte, le traitement et l'analyse des données climatologiques se révèlent d'une importance primordiale pour tirer des conclusions.

L'analyse des tendances et des ruptures dans ces données constitue une part significative de cette étude. Des méthodes statistiques avancées sont employées pour identifier toute variation significative dans les schémas de précipitations et de température au fil du temps. Ces analyses

permettent de discerner les tendances à court et à long terme ainsi que les éventuelles ruptures, contribuant ainsi à la compréhension des changements climatiques et de leurs impacts sur le cycle de l'eau.

1.1. Les méthodes d'analyse des tendances et des ruptures

L'analyse des tendances et des ruptures dans les séries temporelles de précipitations a été réalisée à l'aide du logiciel Khronostat (<http://www.hydrosociences.org/index.php/2020/09/04/khronostat/>). Ce logiciel constitue une ressource essentielle pour explorer les variations et les changements de comportement des variables hydroclimatiques au fil du temps. Les méthodes de tendances et de ruptures sont des outils puissants pour détecter des modifications significatives dans les séries chronologiques, indiquant ainsi des variations potentiellement importantes dans les phénomènes hydrologiques.

Le logiciel KHRONOSTAT regroupe différents tests statistiques. Ces tests sont spécifiques d'un changement de comportement de la variable dans une série chronologique.

Les tests les plus utilisés, les mieux argumentés dans la littérature et, surtout, les plus robustes ont été choisis.

La première catégorie de test concerne le caractère aléatoire des séries (test de corrélation sur le rang et autocorrélogramme). Ils portent sur la constance de la moyenne de la série tout au long de sa période d'observation. Dans l'hypothèse où la série est déclarée non aléatoire, une seconde catégorie de tests est proposée (test de Pettitt, statistique de Buishand et ellipse de contrôle, procédure bayésienne et procédure de segmentation de Hubert) pour tenter de caractériser la nature « non aléatoire » présente dans la série. Ils sont plus particulièrement adaptés à la détection de ruptures au sein de la série.

Dans cette étude, les tests de corrélation sur le rang et le test de Pettitt ont été privilégiés en raison de leur pertinence et de leur robustesse. Ces méthodes permettent ainsi d'obtenir des informations précieuses sur les variations hydroclimatiques, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des phénomènes en jeu dans le bassin versant étudié.

- **Le test de corrélation sur le rang**

Le test de corrélation sur le rang, également connu sous le nom de test de corrélation de Kendall, est largement utilisé en statistique pour évaluer la relation entre deux variables ordinales. Ce test, développé par Kendall et Stuart (1943), est considéré comme une mesure robuste de la corrélation, car il ne nécessite pas d'hypothèses sur la distribution des données.

Ce test est basé sur le calcul du nombre de paires (X_i, X_j) pour lesquelles $X_j > X_i$, avec $i < j$ et $i = 1$ à $N-1$. Selon Kendall et Stuart (1943), sous l'hypothèse nulle (H_0) de stationnarité de la série, la variable ω , définie comme $\omega = \frac{4P}{N(N-1)} - 1$, suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance égale à $\sigma^2 = \frac{2(2N+5)}{9N(N-1)}$. Cette formulation permet de quantifier la corrélation sur le rang entre les variables étudiées.

Pour un niveau de risque donné, noté α , l'acceptation de l'hypothèse nulle H_0 est définie par l'appartenance de ω à l'intervalle $[- U_{1-\alpha/2} \sigma, U_{1-\alpha/2} \sigma]$, où $U_{1-\alpha/2}$ représente la valeur de la

variable normale standardisée pour une probabilité de non-dépassement de $1-\alpha/2$. Cette approche permet de déterminer si la corrélation sur le rang estimée est statistiquement significative (Lubès-Niel et al., 1998).

L'hypothèse alternative de ce test est formulée en termes de tendance entre les variables. Ainsi, si l'on rejette l'hypothèse nulle, cela suggère qu'il existe une tendance significative entre les rangs des variables, indiquant une relation systématique entre elles (Lubès-Niel et al., 1998).

Selon WMO (1966), le test de corrélation de Kendall est particulièrement adapté pour analyser des données climatiques où les variables peuvent souvent être classées de manière ordonnée, par exemple, en termes de rangs de précipitation ou d'intensité de température. Ce test permet d'évaluer si les classements des deux variables sont concordants (c'est-à-dire qu'ils suivent la même tendance) ou discordants (c'est-à-dire qu'ils divergent). Il fournit une mesure de la corrélation basée sur les paires de données ordinales et est moins sensible aux valeurs aberrantes et aux distributions non normales.

En conclusion, le test de corrélation sur le rang, développé par Kendall et Stuart (1943) et recommandé par des sources telles que WMO (1966) et Olaniran (1991), est une méthode appropriée pour évaluer la relation entre des variables ordinales. Le test de corrélation sur le rang, en utilisant la formule de ω et les intervalles de confiance appropriés, permet d'évaluer la corrélation entre variables ordinales tout en tenant compte de l'hypothèse de stationnarité.

- **Le test de Pettitt**

Le test de Pettitt (1979) est une méthode statistique non paramétrique utilisée pour détecter les ruptures dans les séries temporelles. L'objectif de ce test est de vérifier si une série de variables aléatoires, représentée par X_t pour t allant de 1 à N , contient un point de rupture à un moment donné r , où les observations avant et après r suivent des distributions différentes (Lubès-Niel et al., 1998).

Pettitt (1979) considère une séquence de variables aléatoires X_1, X_2, \dots, X_N . La séquence est censée contenir un point de rupture τ si les X_t , pour $t = 1, \dots, \tau$ ont une distribution commune $F_1(X)$, et les X_t , pour $t = \tau + 1, \dots, N$ ont une distribution commune $F_2(X)$, différente de $F_1(X)$. L'hypothèse nulle de « non-rupture », $H_0 : \tau = N$ contre l'hypothèse alternative de « rupture », $H_1 : 1 < \tau < N$, est testée au moyen d'un test statistique non paramétrique. Aucune condition particulière n'est requise pour les formes fonctionnelles de F_1 et F_2 exceptée la continuité.

Pettitt montre comment une formulation appropriée du test de Mann-Whitney (Lubès-Niel et al., 1998) peut être utilisée pour tester H_0 contre H_1 .

Si $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$ où $\text{sgn}(X) = 1$ si $X > 0$; 0 si $X = 0$ et -1 si $X < 0$, alors, la variable

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

est équivalente à la statistique de Mann-Whitney pour tester l'appartenance des deux échantillons, X_1, \dots, X_t et X_{t+1}, \dots, X_N à la même population.

La statistique $U_{t,N}$ est considérée pour les valeurs de t comprise entre 1 et N . Pour tester H_0 contre H_1 , Pettitt propose d'utiliser la variable

$$K_N = \max|U_{t,N}|$$

En utilisant la théorie des rangs, Pettitt donne la probabilité de dépassement approximative d'une valeur k par :

$$\text{Prob}(K_N > k) \sim 2\exp(-6k^2 / (N^3 + N^2))$$

Pour un risque α de première espèce donné, H_0 est rejetée si cette probabilité est inférieure à α . Dans ce cas, la série présente une rupture au temps $t = \tau$ définissant K_N .

Le test de Pettitt est largement utilisé dans la littérature scientifique. Demarée (1990) a souligné son efficacité pour détecter les ruptures dans les séries climatiques, en particulier pour identifier les changements brusques dans les tendances climatiques. Sutherland et al. (1991) ont également utilisé le test de Pettitt pour étudier les changements dans les précipitations annuelles en Écosse. Vannitsem et Demarée (1994) ont proposé une méthode de « bootstrap » pour estimer les intervalles de confiance autour des points de rupture détectés par le test de Pettitt. Cette approche permet de mieux tenir compte des incertitudes liées à l'estimation des points de rupture (Lubès-Niel et al., 1998).

En résumé, le test de Pettitt est une méthode statistique non paramétrique permettant de détecter les ruptures dans les séries temporelles. En utilisant une formulation adaptée du test de Mann-Whitney, ce test est sensible aux changements de moyenne dans la série. Son application dans les études climatologiques et environnementales a été documentée par plusieurs auteurs, démontrant son utilité pour identifier les changements significatifs dans les séries de données. Il ne nécessite pas de conditions particulières sur les formes fonctionnelles des distributions, à l'exception de la continuité. Les probabilités de dépassement approximatives fournies par Pettitt permettent d'évaluer la significativité des ruptures détectées.

1.2. Les événements extrêmes

L'analyse des événements extrêmes est une étape importante dans la compréhension des variations et des impacts des précipitations dans les milieux semi-arides tels que la République de Djibouti.

Pour l'analyse des événements extrêmes, seront utilisés les indices climatiques proposés par le groupe d'experts sur la détection et les indices des changements climatiques (ETCCDI - http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml), qui fournit une approche standardisée pour évaluer et quantifier différents types d'événements climatiques extrêmes. Ces analyses sont réalisées avec le logiciel RclimDex qui est un logiciel dédié à l'analyse des indices climatiques, en particulier ceux relatifs aux extrêmes climatiques. Développé dans l'environnement R, il est conçu pour faciliter le calcul d'indices basés sur les températures et les précipitations quotidiennes. Ces indices nous permettront d'identifier les périodes de sécheresse, les épisodes de fortes précipitations, les vagues de chaleur, les journées extrêmement chaudes ou froides, et d'autres événements climatiques extrêmes qui peuvent avoir des implications importantes pour les ressources en eau, l'agriculture, et l'environnement dans la région semi-aride de Djibouti. Parmi les 27 indices définis par l'ETCCDI, ci-dessous les indices de température et de précipitations utilisés pour l'analyse des événements extrêmes dans la zone d'étude :

- **Indices liés aux températures :**

- Max Tmax (TXx) : Valeur maximale mensuelle de la température maximale quotidienne.
- Max Tmin (TNx) : Valeur maximale mensuelle de la température minimale quotidienne.
- Min Tmax (TXn) : Valeur minimale mensuelle de la température maximale quotidienne.
- Min Tmin (TNn) : Valeur minimale mensuelle de la température minimale quotidienne.
- Cool nights (TN10p) : Pourcentage de jours où la température minimale est inférieure au 10e percentile.
- Cool days (TX10p) : Pourcentage de jours où la température maximale est inférieure au 10e percentile.
- Warm nights (TN90p) : Pourcentage de jours où la température minimale dépasse le 90e percentile.
- Warm days (TX90p) : Pourcentage de jours où la température maximale dépasse le 90e percentile.
- Warm spell duration indicator (WSDI) : Nombre annuel de périodes d'au moins 6 jours consécutifs où la température maximale dépasse le 90e percentile.
- Cold spell duration indicator (CSDI) : Nombre annuel de périodes d'au moins 6 jours consécutifs où la température minimale est inférieure au 10e percentile.
- Diurnal temperature range (DTR) : Différence mensuelle moyenne entre la température maximale et la température minimale.

- **Indices liés aux précipitations :**

- Max 1-day precipitation amount (RX1day) : Maximum mensuel de la précipitation sur une journée.
- Max 5-day precipitation amount (Rx5day) : Maximum mensuel de la précipitation cumulée sur 5 jours consécutifs.
- Simple daily intensity index (SDII) : Précipitation totale annuelle divisée par le nombre de jours pluvieux (PRCP \geq 1.0 mm) dans l'année.
- Number of heavy precipitation days (R10) : Nombre annuel de jours avec une précipitation d'au moins 10 mm.
- Number of very heavy precipitation days (R20) : Nombre annuel de jours avec une précipitation d'au moins 20 mm.
- Number of days above nn mm (Rnn) : Nombre annuel de jours avec une précipitation d'au moins nn mm, où nn est un seuil défini par l'utilisateur.

- Consecutive dry days (CDD) : Nombre maximum de jours consécutifs sans précipitation ($RR < 1$ mm).
- Consecutive wet days (CWD) : Nombre maximum de jours consécutifs avec précipitation ($RR \geq 1$ mm).
- Very wet days (R95p) : Précipitation annuelle totale lorsque la précipitation dépasse le 95e percentile.
- Extremely wet days (R99p) : Précipitation annuelle totale lorsque la précipitation dépasse le 99e percentile.
- Annual total wet-day precipitation (PRCPTOT) : Total annuel de la précipitation les jours pluvieux ($RR \geq 1$ mm).

Une fois les indices climatiques calculés, l'analyse des événements extrêmes sur la station de Djibouti-Aérodrome sera effectuée. Cela permettra d'identifier les périodes de fortes précipitations, les sécheresses prolongées, les vagues de chaleur et d'autres phénomènes extrêmes qui ont pu affecter la région au cours de la période d'étude. Les tendances temporelles des événements extrêmes seront également évaluées au fil des années (avec les paramètres r^2 , p-value, slope error et slope estimate inclut dans le logiciel RclimDex). Cela permettra de détecter d'éventuelles variations significatives dans la fréquence, l'intensité et la durée des phénomènes climatiques extrêmes, ce qui pourrait être lié aux changements climatiques ou à d'autres facteurs environnementaux. Enfin, les résultats obtenus à partir de l'analyse des événements extrêmes seront interprétés pour mieux comprendre leur impact sur le régime hydrologique de la région semi-aride de la République de Djibouti. Les implications possibles pour les ressources en eau, l'agriculture et les écosystèmes seront discutées, tout en tenant compte du contexte climatique global. Cette interprétation fournira des informations essentielles pour une meilleure compréhension des risques climatiques et une gestion plus durable des ressources en eau et de l'environnement dans cette zone sensible.

1.3. Les données infrajournalières

Au cours de nos recherches de données, nous avons trouvé des rouleaux de pluviogrammes qui permettent si ils sont dépouillés d'avoir des données de pluie à un pas de temps infrajournalier. On peut ainsi se permettre de travailler au niveau de l'événement pluvieux et non pas au niveau du jour pluvieux. Cette notion d'événements pluvieux est intéressante dans le cas qui nous intéresse des risques d'inondations à la suite d'événements pluvieux.

La tâche du dépouillement des pluviogrammes se fait manuellement et est une tâche ardue. Pour nous simplifier la tâche nous avons utilisé un outil qui permet de semi-automatiser l'opération. Cet outil s'appelle NUNIEAU, acronyme de NUMérisation de Niveaux d'EAU en mer ou en rivières. Ce logiciel est gratuit et téléchargeable à l'adresse <https://www.cerema.fr/fr/actualites/logiciel-numerisation-enregistrements-graphiques-niveaux-eau> (consulté le 08/10/2023). Il permet la numérisation de différents types de documents papier. Ce logiciel a été utilisé sur des pluviogrammes au Burkina Faso et en Côte d'Ivoire par HydroSciences Montpellier (Paturel et al., 2023 – encours d'édition). L'utilisation de cet outil permet l'analyse des pluies au pas de temps infrajournalier, pas de temps très utile pour la connaissance et la gestion des événements de crues rapides dans les petits bassins,

notamment urbains. L'accès à ces données, qui reste très limité ouvre des champs d'analyse non seulement disciplinaires mais aussi et surtout inter ou transdisciplinaires.

NUNIEAU a été développé sous environnement MatLab. Son principe est simple : sur une image préalablement numérisée, le logiciel cale l'image dans un repère et récupère le signal enregistré sur le papier, constitué de pixels dont la couleur est comprise dans une plage prédéfinie : une donnée papier est ainsi transformée en une donnée numérique ensuite exploitable.

La qualité des données générées par le logiciel NUNIEAU est dépendante de la qualité des données pluviométriques.

Un des objectifs de nos travaux est d'effectuer une analyse approfondie des données pluviométriques disponibles au pas de temps infrajournalier. Les différentes analyses effectuées sont les suivantes :

1. Analyse des nombres d'événements pluvieux par an : Cette analyse consiste à déterminer le nombre d'événements pluvieux distincts sur une base annuelle dans chaque station du SAP. Un événement pluvieux est défini comme une période où la pluviométrie est supérieure à 1 mm. De plus, cet événement est caractérisé par une période inter-événement, qui est une interruption sans précipitation ; pour notre étude, cette durée a été fixée à 6 heures. Autrement dit, deux périodes de pluie séparées par moins de 6 heures seraient considérées comme un seul et même événement pluvieux. Cette analyse permettra de comprendre la variabilité interannuelle des événements pluvieux et de détecter les années avec des épisodes pluvieux exceptionnels ou des périodes de sécheresse.
2. Analyse des durées des événements : Dans cette analyse, les durées des événements pluvieux seront calculées pour chaque station du SAP. Il sera déterminé la durée totale de chaque événement, c'est-à-dire le temps écoulé entre le début et la fin de l'événement pluvieux. Cette analyse permettra de caractériser la distribution des durées des événements pluvieux dans la zone d'étude et de distinguer les événements courts ou prolongés.
3. Analyse des cumuls des événements : L'analyse des cumuls des événements vise à calculer la quantité totale de précipitations enregistrée pendant chaque événement pluvieux (supérieur à 1 mm) dans les différentes stations du SAP. Cela permettra de mieux comprendre la variabilité spatiale et temporelle des cumuls de précipitations lors des événements pluvieux.
4. Analyse des cumuls en fonction des durées : Cette analyse consiste à établir la relation entre la durée des événements pluvieux et les cumuls de précipitations correspondants. On examinera comment les cumuls de précipitations évoluent en fonction de la durée des événements, ce qui est essentiel pour comprendre les caractéristiques des précipitations dans la zone d'étude.

Pour réaliser ces analyses, les données pluviométriques infrajournalières des stations du SAP seront extraites et prétraitées car il est essentiel de vérifier la qualité des données pour éliminer

les valeurs aberrantes ou manquantes. Les valeurs suspectes peuvent être identifiées en utilisant des tests statistiques ou en comparant les données avec d'autres stations de référence.

Aux stations du SAP, s'est ajoutée la station PK50 (numérisée avec l'outil NUNIEAU). Cette station se distingue comme étant l'une des premières stations à Djibouti à offrir des données infrajournalières, couvrant une période notable de dix ans. Les événements pluvieux seront identifiés en utilisant un seuil de précipitations supérieur à 1mm et par une période d'intervènements de 6h. Ensuite, les calculs des durées, des cumuls, des positions maximales et des hauteurs maximales seront effectués pour chaque événement pluvieux. Les outils statistiques et les logiciels appropriés seront utilisés pour mener à bien ces analyses et interpréter les résultats.

Avec la station PK50, nous entreprendrons une évaluation approfondie des courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) et HDF (Hauteur-Durée-Fréquence). Les courbes IDF caractérisent la relation entre l'intensité d'un événement pluvieux, sa durée et la fréquence à laquelle un tel événement est susceptible de se reproduire. Elles sont essentielles pour la conception et la planification d'infrastructures hydrauliques, assurant ainsi leur résilience face aux événements pluvieux extrêmes. Quant aux courbes HDF, elles se concentrent sur les hauteurs de précipitation associées à ces événements pour différentes durées et fréquences de retour. L'évaluation sera effectuée en suivant la méthodologie préconisée par le Comité Inter-état d'Études Hydrauliques (CIEH - Puech et Chabi-Gonni, 1984), garantissant une approche standardisée et reconnue. Cette méthode a été utilisée pour dépouiller les pluviogrammes de plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest au début des années 1980. Les résultats qui en découlent servent encore de référence pour le dimensionnement de nombreuses infrastructures hydrauliques dans cette région. Nous présentons brièvement la méthodologie expliquée par le CIEH :

“- Nous n'avons enregistré que les événements pluvieux susceptibles de fournir des informations ;

- l'échantillon comprend toutes les valeurs supérieures à un seuil. Le seuil est : pour "n" années d'observations, on retient "m" valeurs avec $m = 3n$;

- l'ajustement des précipitations échantillonnées se fait à l'aide d'une loi exponentielle et de la méthode des moments pour calibrer ses paramètres ;

- les courbes HDF ont été approchées par l'ajustement d'une loi de type "Montana" :

$$H = a * t^{(1-b)} - H \text{ en mm, } t \text{ en mn}$$

avec un ensemble de deux ajustements en fonction de la durée des pluies : $t < 1h$ et $t > 2h$... régime particulier des pluies d'Afrique : pluies généralement à caractère orageux quand elles sont de durée inférieure ou égale à 1h (rarement jusqu'à 2h). Les pluies de durée supérieure à 2h sont pour la plupart des pluies de type « mousson », d'intensité plus faible et provenant d'une origine climatique différente, ce qui explique les deux ensembles de résultats.”

Pour nos besoins d'analyse, des scripts codés en R par HydroSciences Montpellier ont été utilisés pour pouvoir répéter ces différentes étapes de traitement.

2. Les produits d'estimation de pluie

2.1. Prétraitement des données

Afin d'assurer la comparaison entre les ensembles des produits d'estimation de pluie sélectionnés, certaines étapes de prétraitement ont été réalisées dans cette étude.

Tout d'abord, étant donné que les ensembles de données différaient en termes de résolution spatiale, allant de $0,0375^\circ$ pour TAMSAT v.3 à 1° pour GPCC v.7, tous les ensembles de données ont été rééchantillonnés à une résolution spatiale commune de $0,1^\circ$ par $0,1^\circ$. Ce rééchantillonnage a été effectué pour faciliter la comparaison directe et l'analyse entre les ensembles de données.

Pour les ensembles de données de précipitations avec une résolution spatiale supérieure à $0,1^\circ$ (comme PERSIANN-CDR, ERA-5, MERRA-2), un processus de réduction de la résolution a été appliqué pour ajuster leur résolution à $0,1^\circ$. Une interpolation du plus proche voisin a été utilisée pour réduire la résolution de ces ensembles de données, garantissant que les valeurs de l'ensemble de données d'origine étaient préservées sans altération. : L'interpolation du plus proche voisin est une méthode couramment utilisée pour ajuster la résolution spatiale des ensembles de données. L'objectif de cette technique est de remplacer chaque cellule de la nouvelle résolution par la valeur de la cellule la plus proche dans l'ensemble de données d'origine. Par exemple, dans le contexte d'une conversion de résolution d'un jeu de données de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ à une maille de $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$, la méthode d'interpolation par le plus proche voisin privilégie la valeur de la cellule d'origine la plus adjacente pour chaque cellule rééchantillonnée. Cette approche assure la conservation intégrale des valeurs initiales sans aucune modification.

Inversement, pour les ensembles de données de précipitations avec une résolution spatiale inférieure à $0,1^\circ$ (comme CHIRPS, TAMSAT), une procédure d'augmentation de la résolution a été utilisée. Une interpolation bilinéaire a été utilisée dans ce processus d'augmentation de la résolution, qui estime de nouvelles valeurs en fonction des moyennes pondérées des points voisins dans l'ensemble de données d'origine (Beck et al., 2019 ; Satgé et al., 2020). L'interpolation bilinéaire est une méthode plus avancée utilisée pour estimer les valeurs des nouvelles cellules en fonction des valeurs de leurs cellules voisines. Contrairement à l'interpolation du plus proche voisin, qui ne considère que la valeur de la cellule la plus proche, l'interpolation bilinéaire prend en compte les valeurs des quatre cellules voisines les plus proches.

Dans le cas où l'augmentation de la résolution est nécessaire, l'interpolation bilinéaire est mise en œuvre pour estimer les valeurs intermédiaires des nouvelles cellules. Cette méthode attribue des poids aux cellules voisines en fonction de leur distance par rapport à la nouvelle cellule. Les poids sont calculés à l'aide d'une combinaison linéaire des distances entre la nouvelle cellule et les cellules voisines. Ensuite, ces poids sont utilisés pour calculer une valeur intermédiaire pondérée, qui est ensuite assignée à la nouvelle cellule. En employant cette approche, l'interpolation bilinéaire tient compte des variations spatiales entre les cellules voisines, permettant ainsi une interpolation plus précise et une représentation plus fidèle des données.

De plus, il convient de noter que certains des ensembles de données de précipitations sélectionnés fournissaient des données à pas de temps infrajournalier, tandis que d'autres étaient disponibles à pas de temps journalier. Pour obtenir des données homogènes pour l'analyse, les

données infrajournalières ont été agrégées au pas de temps journalier sur toute la période d'étude. Cette agrégation a assuré la cohérence de la résolution temporelle des ensembles de données de précipitations, permettant des comparaisons significatives et cohérentes entre eux.

En mettant en œuvre ces étapes de prétraitement, nous avons cherché à standardiser la résolution spatiale et la granularité temporelle des ensembles de données de précipitations utilisés dans notre étude. Cela a permis des comparaisons robustes et fiables, facilitant une évaluation complète de leurs performances pendant la période d'étude définie.

2.2. Méthodologie de comparaison

Cette étude vise à évaluer les performances de 21 produits d'estimation de pluie à différentes résolutions temporelles, notamment journalières, mensuelles, saisonnières et annuelles. L'évaluation est menée à deux échelles spatiales distinctes et sur deux périodes temporelles : premièrement, dans la zone sud-est de la République de Djibouti (superficie de 5 200 km²) en utilisant 15 ensembles de données de produits d'estimation de pluie pour la période commune de 1980 à 1990, puis dans la zone du bassin versant d'Ambouli (superficie de 794 km²) en utilisant 11 ensembles de données de produits d'estimation de pluie pour la période de 2008 à 2013. La période de comparaison a été choisie pour être commune à tous les ensembles de données de produits d'estimation de pluie et à toutes les données des stations de pluie. Il est à noter qu'il y a 5 ensembles de données de produits d'estimation de pluie utilisés communément aux deux zones d'analyse. Les produits d'estimation de pluie ont été sélectionnés pour la zone sud-est en fonction de leur disponibilité sur la période choisie, tandis que la sélection pour le bassin versant d'Ambouli s'est basée sur leur résolution spatiale, qui devait être inférieure ou égale à 0,1°.

La validation des ensembles de données de précipitations a été effectuée à deux niveaux d'agrégation spatiale :

- L'échelle du point-vers-pixel consiste à comparer les données des pluviomètres provenant des stations avec les valeurs de précipitations interpolées correspondantes.
- L'analyse de validation à l'échelle du bassin versant a été réalisée en comparant les ensembles de données de précipitations agrégées spatialement pour le bassin versant à une interpolation correspondante des précipitations basée sur les mesures de station. L'utilisation de l'unité spatiale du bassin versant s'avère particulièrement pertinente pour caractériser les précipitations, étant donné qu'elle représente l'unité de travail conventionnelle pour les applications hydrologiques. Parallèlement, comme suggéré par Xie et Arkin (1995), l'agrégation à une échelle plus grande améliore la stabilité de l'exercice de validation des précipitations. Pour l'interpolation des précipitations annuelles moyennes à l'échelle du bassin versant, la méthode d'interpolation spatiale par pondération inverse de la distance a été utilisée. Cette technique d'interpolation déterministe locale calcule la valeur d'un point en faisant la moyenne des valeurs des points voisins pondérées par l'inverse de la distance par rapport au point calculé : plus les points sont proches, plus le poids attribué est élevé.

2.3. Métriques de validation des données

Pour évaluer la capacité des produits d'estimation de pluie à évaluer la quantité de précipitations observées, l'analyse des métriques comprend des métriques quantitatives et catégorielles. Bien qu'un large éventail de métriques d'évaluation soit disponible pour évaluer les performances des données (Wang et al., 2003 ; Segele et al., 2008 ; Diro et al., 2009 ; Ayehu et al., 2018), il n'existe pas de métrique unique qui englobe tous les aspects d'intérêt. C'est pourquoi il est utile de considérer plusieurs métriques de performance et de comprendre le type d'informations ou d'indications qu'elles peuvent fournir (Akisanola et al., 2016).

2.3.1. Métriques quantitatives

Trois métriques quantitatives ont été utilisées pour tous les pas de temps (Tableau 1) :

- L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est une mesure fréquemment utilisée de la différence entre deux variables. Elle mesure l'amplitude moyenne des erreurs d'estimation : des valeurs faibles de RMSE indiquent une faible variance dans les ensembles de données de produits d'estimation de pluie. Pour calculer le RMSE, nous avons utilisé la valeur médiane d'un ensemble de données de produits d'estimation de pluie.
- L'erreur de biais moyen (MBE) est utilisée pour estimer le biais moyen dans les ensembles de données de produits d'estimation de pluie et fournit une bonne indication de la surestimation ou de la sous-estimation moyenne des prédictions. Une valeur positive de MBE indique une surestimation. Pour calculer le MBE d'un ensemble de données de produits d'estimation de pluie, nous avons également utilisé la valeur médiane.
- Il existe plusieurs indices utilisés pour évaluer les performances et la fiabilité des ensembles de données de produits d'estimation de pluie au fil du temps. Nous avons utilisé l'efficacité de Kling-Gupta (KGE) car la gestion des ressources en eau nécessite une représentation fiable de la dynamique temporelle des précipitations (mesurée par coefficient de corrélation r) et du volume (mesuré par β et γ , définis ci-dessous) . Cependant, pour cette étude, nous n'analyserons que la valeur du KGE dans sa totalité. Ainsi, la valeur médiane du KGE est utilisée comme critère de fiabilité à l'échelle de la zone d'étude.

Dans le Tableau 1, x correspond aux précipitations observées au niveau des stations et y correspond aux précipitations des ensembles de données de produits d'estimation de pluie. r est le coefficient de corrélation de Pearson :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

et est utilisé pour évaluer l'adéquation des estimations des ensembles de données de produits d'estimation de pluie aux données observées.

$$\beta = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} \quad (2)$$

β est le rapport entre les moyennes des ensembles de données de produits d'estimation de pluie et des données observées.

$$\gamma = \frac{1}{\beta} \times \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \quad (3)$$

γ est le rapport entre les coefficients de variation des ensembles de données de produits d'estimation de pluie et des données observées.

Tableau 14: Les métriques utilisés pour la performance des mesures quantitatives

Métrique	Equation	Valeur optimale
Erreur de biais moyen (MBE)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - y_i$	0
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$	0
Efficacité de Kling Gupta (KGE)	$\frac{1}{\sqrt{(r-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\gamma-1)^2}}$	1

2.3.2. Métriques catégorielles

La performance des ensembles de données de produits d'estimation de pluie a également été analysée à l'aide de métriques catégorielles à l'échelle quotidienne [5]. Cinq indicateurs statistiques basés sur un tableau de contingence (Tableau 2) ont été calculés pour constituer les métriques catégorielles (Tableau 3) :

- La probabilité de détection (POD) indique quelle fraction des événements observés a été correctement estimée.
- Le taux de fausses alarmes (FAR) correspond à la proportion d'événements identifiés par les ensembles de données de produits d'estimation de pluie mais non confirmés par les observations des pluviomètres.
- La précision (A) mesure la proportion de décisions correctes.
- L'erreur (E) mesure la proportion de décisions incorrectes.

- Le score de compétence de Heidke (HSS) évalue la capacité des ensembles de données de produits d'estimation de pluie à détecter les événements de précipitations par rapport à une prédiction aléatoire. Les valeurs de HSS vont de $-\infty$ à 1, avec un score parfait de 1 et des valeurs négatives indiquant qu'une prédiction aléatoire surpasse l'ensemble de données de produits d'estimation de pluie.

La valeur de HSS a été calculée à chaque emplacement de la grille pour observer la fiabilité des ensembles de données de produits d'estimation de pluie dans l'espace.

Tableau 15: Tableau de contingence utilisé pour l'analyse métrique catégorielle des précipitations

		Station pluviométrique	
		Précipitation	Pas de précipitation
Produit d'estimation de pluie	Précipitation	Succès 'a'	Fausses Alarmes 'b'
	Pas de précipitation	Ratés 'c'	Correct Négatives 'd'

Tableau 16: Liste des métriques utilisées dans les mesures de performance catégorielles

Métrique catégorielle	Equation	Valeur optimale
Probabilité de détection (POD)	$\frac{a}{a + c}$	1
Taux de fausses alarmes (FAR)	$\frac{b}{a + b}$	0
Précision (A)	$\frac{a + d}{a + b + c + d}$	1
Erreur (E)	$\frac{b + c}{a + b + c + d}$	0

$$\text{Score de compétence de Heidke (HSS)} = \frac{2 * (a * d - b * c)}{[(a + c) * (c + d) + (a + b) * (b + c)]}$$

3. Analyse comparative des termes du bilan hydrologique du bassin versant d'Ambouli

Le bilan hydrologique est un concept essentiel en hydrologie pour comprendre le cycle de l'eau dans un bassin versant. Il permet d'évaluer les différents flux d'eau entrant et sortant du système hydrologique, ce qui inclut les précipitations, l'évapotranspiration, l'écoulement et l'infiltration. En milieu semi-aride, où l'eau est souvent une ressource limitée et précieuse, l'analyse du bilan hydrologique revêt une importance particulière pour la gestion durable des ressources en eau.

Le bilan hydrologique est généralement formulé selon l'équation suivante :

$$\Delta V = P - ETR - Q - IR \quad (4)$$

Avec :

ΔV : Variation de stock d'eau dans le bassin versant

P : Précipitation

ETR : Évapotranspiration réelle

Q : Écoulement

IR : Infiltration

Dans cette équation, la précipitation (P) représente l'apport en eau sur le bassin versant sous forme de pluie ou de neige. L'évapotranspiration réelle (ETR) quantifie la perte d'eau due à l'évaporation du sol et la transpiration des végétaux. L'écoulement (Q) représente le débit d'eau s'écoulant à travers les cours d'eau ou les rivières, et l'infiltration (IR) correspond à l'eau qui pénètre dans le sol et recharge éventuellement les nappes phréatiques.

En milieu semi-aride, les variations saisonnières et les contrastes climatiques peuvent entraîner des variations significatives dans chaque terme du bilan hydrologique. Par conséquent, il est essentiel de recueillir des données fiables et d'utiliser des méthodes appropriées pour estimer chaque composante du bilan hydrologique afin de mieux comprendre la disponibilité et la distribution de l'eau dans cette région.

En analysant les différentes composantes du bilan hydrologique, on peut mieux appréhender la dynamique de l'eau dans un bassin versant, ce qui permet d'évaluer les risques d'inondations ou de sécheresses, de planifier la gestion des ressources hydriques, et de soutenir la prise de décision pour des mesures d'adaptation face aux changements climatiques dans ces environnements sensibles.

Les différentes méthodes testées pour déterminer les différents termes du bilan hydrologique peut être décrite de la manière suivante :

1. Précipitation (P) :

Méthode arithmétique : Cette méthode consiste à calculer la moyenne arithmétique des données de précipitation disponibles dans les différentes stations pluviométriques du bassin versant. On ajoute simplement les valeurs de précipitation mesurées dans chaque station, puis on divise la somme par le nombre total de stations pour obtenir la précipitation moyenne sur le bassin.

Méthode des isohyètes : Cette méthode repose sur l'interpolation des moyennes de précipitation à partir de courbes isohyètes. Pour la période de 2008 à 2013, les données issues des stations pluviographiques du SAP ont servi à élaborer ces courbes. Les courbes isohyètes sont des lignes qui relient les points de même précipitation sur une carte. On détermine les valeurs de précipitation le long de ces courbes pour les stations pluviométriques disponibles (SAP), puis on calcule la moyenne pondérée en fonction de la superficie de chaque zone délimitée par les courbes isohyètes.

Méthode des polygones de Thiessen : Cette méthode effectue une moyenne pondérée des données de précipitation observées dans les différentes stations pluviométriques du bassin en fonction de leur aire d'influence géométrique. Chaque station pluviométrique est associée à une zone d'influence délimitée par des lignes droites entre les stations voisines. La moyenne des valeurs de précipitation est calculée en pondérant chaque valeur par l'aire de la zone d'influence de la station correspondante.

2. Évapotranspiration potentielle (ETP) :

Formule de Thornthwaite : Cette méthode estime l'évapotranspiration potentielle en utilisant uniquement la température moyenne mensuelle et un indice thermique. La formule prend en compte la variation de l'ETP en fonction des variations saisonnières de la température et de la latitude.

Formule de Turc : La formule de Turc est plus complexe et fait intervenir plusieurs paramètres climatologiques tels que la température, le rayonnement solaire, l'humidité relative, la vitesse du vent et la durée du jour. Elle fournit une estimation plus détaillée de l'ETP en fonction de la disponibilité de données climatiques.

Formule de Penman simplifiée : Cette méthode est une version simplifiée de la formule de Penman qui combine la température, l'humidité relative et la vitesse du vent pour estimer l'ETP. Elle nécessite moins de données que la formule de Turc mais fournit une approximation de l'ETP plus générale.

3. Évapotranspiration réelle (ETR) :

Méthode du bilan de Thornthwaite : Cette méthode calcule l'évapotranspiration réelle mensuelle en utilisant les précipitations moyennes mensuelles, l'évapotranspiration potentielle et la réserve facilement utilisable contenue dans le sol. Elle nécessite également des données sur la réserve en eau du sol et prend en compte les caractéristiques spécifiques du bassin versant.

Méthode de Turc : La méthode de Turc estime l'évapotranspiration réelle en utilisant uniquement deux paramètres climatologiques, la température et la précipitation. Elle fournit une estimation simplifiée de l'ETR en fonction des conditions climatiques.

4. Écoulement (Q) :

L'écoulement est généralement mesuré aux stations hydrologiques spécifiques du bassin versant à l'aide d'instruments tels que des jaugeages. Les débits mesurés à ces stations permettent de quantifier l'écoulement sur le bassin. Par exemple, pour les données de la CHA (1982) et de Gamal-Eldin (1988), l'écoulement est mesuré aux stations d'Ambouli et Oueah, tandis que pour les données du CERD (2008-2013), il est mesuré aux stations de Bouleleh, Kalaloho et Oueah.

5. Infiltration (IR) :

L'infiltration est déduite à partir de la formule du bilan hydrologique, qui soustrait les termes de précipitation, évapotranspiration réelle et écoulement du bilan global. Des études antérieures et des modélisations numériques de l'aquifère peuvent être utilisées pour confirmer les évaluations de l'infiltration obtenues à partir du bilan hydrologique (CHA, 1982 ; Gamal-Eldin, 1988)

En appliquant ces approches méthodologiques, il a été possible de quantifier les divers éléments constitutifs du bilan hydrologique du bassin versant d'Ambouli. Cette démarche a non seulement permis une évaluation précise, mais également une meilleure appréhension de la dynamique hydrique au sein de ce bassin.

4. Modélisation bassin amont du Barrage de l'Amitié

4.1. Modèle HEC-HMS

4.1.1. Présentation du modèle HEC-HMS

Le modèle HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) est un modèle hydrologique déterministe et conceptuel. Ce modèle hydrologique, développé par le Corps des Ingénieurs de l'Armée des États-Unis, est un outil couramment utilisé dans les études hydrologiques pour simuler les processus hydrologiques complexes à l'échelle d'un bassin versant (Scharffenberg et al., 2010). Depuis sa création, il a été largement adopté dans la recherche et la pratique en raison de sa flexibilité, de sa robustesse et de sa capacité à modéliser de nombreux scénarios hydrologiques.

Le modèle peut être utilisé soit sur une base événementielle, soit pour exécuter des simulations en continu sur une longue période grâce à des modules de calculs d'évapotranspiration, d'humidité du sol et d'accumulation/fonte de neige. Il permet de modéliser le processus pluie-débit et de calculer les hydrogrammes de crues pour plusieurs objectifs, comme pour les études de prévisions des écoulements, de drainage urbain, de conception de réservoirs, et de réduction des effets d'inondation. Les hydrogrammes produits par le modèle HEC-HMS peuvent être utilisés directement ou avec d'autres logiciels pour le drainage urbain, la prévision des débits, l'impact de l'urbanisation, la conception des déversoirs de réservoir, la réduction de l'impact des inondations, la régulation des plaines inondables, l'hydrologie des zones humides et l'exploitation des systèmes de ressource en eau.

4.1.2. Structure du modèle

La modélisation sous le modèle HEC-HMS représente une approche essentielle pour analyser le comportement hydrologique complexe du Bassin de l'Amitié de Oueah. Le modèle HEC-HMS offre une méthodologie rigoureuse pour simuler les phénomènes physiques qui interviennent dans le cycle du mouvement de l'eau dans le bassin versant.

Pour appréhender le comportement hydrologique du bassin, le modèle HEC-HMS s'engage dans trois étapes de calcul essentielles, chacune contribuant à la caractérisation détaillée du système hydrique :

1. **Modélisation du Bassin (Basin model) :** La modélisation du bassin versant consiste à faire la schématisation du bassin versant sous le logiciel HEC-HMS. À l'aide des modules « Terrain Data Manager » et « Bassin Model Manager », le Modèle Numérique de Terrain (MNT) du bassin versant est importé sur le logiciel puis un modèle du bassin est créé. GIS, une extension du logiciel ArcGIS intégrée au logiciel HEC-HMS sera utilisée pour la géospécialisation de notre bassin. Cette extension produit un certain nombre d'entrées hydrologiques. Elle assiste l'utilisateur pour l'évaluation des paramètres hydrologiques en fournissant des tables de caractéristiques physiques des cours d'eau et des sous-bassins. Elle permet en outre aux utilisateurs de visualiser l'information spatiale, les caractéristiques du bassin versant, de délimiter les sous-bassins, les ruisseaux, etc. Elle saisit en entrée le MNT du bassin versant. En sortie nous pouvons visualiser l'ensemble des informations sur toutes les caractéristiques du bassin versant, des sous bassins, du réseau hydrographique, etc.
2. **Modélisation de la Météorologie (Meteorological model) :** Dans cette étape, les données météorologiques sont essentielles pour simuler les entrées d'eau dans le bassin versant. Les précipitations, les températures et d'autres variables météorologiques sont intégrées dans le modèle pour évaluer les réponses hydrologiques. Des méthodes sophistiquées d'interpolation spatiale et temporelle sont employées pour extrapoler les données disponibles vers les emplacements et les moments nécessaires. Le module météorologique permet d'affecter une pluie donnée à chaque bassin versant local défini dans le module du bassin hydrographique.
3. **Spécifications Particulières de Contrôle (Control specifications) :** Cette étape vise à incorporer des facteurs spécifiques qui peuvent influencer le comportement hydrologique. Cela inclut les informations sur les ouvrages hydrauliques, les débits entrants et sorties, et d'autres données de contrôle pertinentes. Ces spécifications permettent de reproduire des scénarios d'exploitation et d'intervention, contribuant ainsi à une compréhension plus approfondie des interactions au sein du bassin versant.

En combinant ces trois étapes de calcul, le modèle HEC-HMS offre une vue globale et intégrée du système hydrogéologique dans le bassin de l'Amitié de Oueah. Cette modélisation permet de mieux comprendre et anticiper les réponses hydrologiques aux variations des conditions hydrométéorologiques, ce qui est essentiel pour la gestion rationnelle du barrage et des ressources en eau dans la région.

En somme, la modélisation d'un bassin versant consiste, en premier lieu, en un découpage de celui-ci en plusieurs sous-bassins élémentaires, ensuite, spécifier les méthodes à utiliser pour calculer les différentes composantes : les pertes par (interception, infiltration, stockage ou évaporation), le ruissellement direct, l'écoulement souterrain, et l'écoulement fluvial dans le lit de la rivière.

4.2. Modèle GR4H

Le modèle GR4H, dont l'acronyme signifie "Génie Rural à 4 paramètres Horaire", est une innovation déterministe dans le domaine de la modélisation hydrologique, conçue et

perfectionnée par l'IRSTEA. Ce modèle est une adaptation horaire du célèbre modèle journalier GR4J qui a fait ses preuves en termes de fiabilité et d'efficacité (Mathevet, 2005; Perrin et al., 2003). Sa structure conceptuelle est conçue pour fonctionner sur un pas de temps horaire, permettant ainsi une résolution temporelle plus fine pour des applications nécessitant une précision accrue.

Entrées du modèle : Le modèle GR4H nécessite des données d'entrée dérivées de deux variables hydroclimatiques essentielles pour sa simulation :

1. Les précipitations (P) : Ces données représentent la quantité d'eau tombant sur le bassin versant pendant une période donnée.
2. L'évapotranspiration potentielle (E) : Elle quantifie l'eau évaporée du sol et transpirée par les plantes sous des conditions climatiques données.

Variables d'état : Le modèle s'appuie sur deux variables d'état principales pour représenter la dynamique de l'eau à travers le bassin versant :

1. Le réservoir de production (S) : Il simule la partie des précipitations retenue et stockée dans le sol, contribuant ainsi à l'humidité du sol et à l'évapotranspiration.
2. Le réservoir de routage (R) : Il joue un rôle crucial dans la distribution temporelle de l'eau qui alimente finalement le débit de la rivière, simulant ainsi le processus de ruissellement et d'écoulement vers l'exutoire.

Paramètres du modèle : Le comportement hydrologique du bassin versant, tel que représenté par le modèle GR4H, est influencé par quatre coefficients distincts, qui définissent et paramètrent sa dynamique :

1. La capacité maximale du réservoir de production ($X1$ en mm) : Elle représente la quantité maximale d'eau que le sol peut retenir avant que le ruissellement ne commence.
2. Le coefficient d'échange souterrain ($X2$ en mm/h) : Il régule le transfert d'eau entre les réservoirs, en particulier l'échange entre le stockage du sol et l'écoulement souterrain.
3. La capacité maximale du réservoir de routage ($X3$ en mm) : Elle détermine le volume maximal d'eau que le réservoir de routage peut contenir.
4. Le temps de base de l'hydrogramme unitaire ($X4$ en h) : Ce paramètre influence la vitesse à laquelle l'eau est acheminée vers l'exutoire du bassin versant.

Chapitre 4 : Étude de données climatiques

Chapitre 4 : Étude de données climatiques

L'Afrique de l'Est est un territoire topographiquement complexe, où la caractérisation de la pluviométrie saisonnière régionale reste également contrastée du fait de la relation avec le relief. En effet, en Afrique de l'Est, les effets de versants sont très importants pour expliquer la répartition spatiale des précipitations (Oettli et Camberlin, 2005 ; Oettli, 2008 ; Boyard-Micheau et Camberlin, 2015). Ces effets influencent fortement les cumuls saisonniers ainsi que d'autres caractéristiques pluviométriques comme par exemple les intensités ou la fréquence des jours de pluies (Camberlin et al., 2014 ; Boyard-Micheau et Camberlin, 2015). Les caractéristiques saisonnières comme le cumul ou le nombre de jours de pluies, et les caractéristiques intra-saisonnières telles que la date de démarrage de saisons pluvieuses par exemple, ont une importance considérable dans cette région où l'économie et le bien-être des populations dépend fortement d'une agriculture majoritairement pluviale (Dixon et al., 2001 ; Hickey et al., 2012 ; Boyard-Micheau et Camberlin, 2015). La plupart des environnements de la région sont classés comme arides/semi-arides, et son climat se caractérise par des pluies longues de mars à mai, des pluies d'été de juillet à septembre, et des pluies courtes d'octobre à novembre (Haile et al. 2020 ; PNUD/UNSO, 1997 ; Kate, 2009). Les deux saisons des pluies de la région sont particulièrement courtes, ce qui rend toute modification de leur temporalité très contraignante pour les activités agricoles (Boyard-Micheau et Camberlin, 2015).

L'Afrique de l'est présente une grande variabilité spatiale des précipitations annuelles moyennes (PAM), avec des zones humides ($PAM > 1\ 000\text{ mm}$) dans les hauts plateaux éthiopiens, les hauts plateaux de l'ouest du Kenya, l'Ouganda et le lac Victoria, et des zones sèches ($PAM < 400\text{ mm}$) dans le sud-ouest de l'Égypte, l'ouest du Soudan et le sud du Soudan, sur la côte de la mer Rouge, dans la dépression de l'Afar et le long du golfe d'Aden, dans le nord de la Somalie (Camberlin, 2018). La répartition annuelle des précipitations est principalement contrôlée par la migration saisonnière de la Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT) de part et d'autre de l'équateur (Ogallo, 1985). Elle s'organise annuellement en deux brèves saisons des pluies, les 'long rains' (LR) et les 'shorts rains' (SR) correspondant respectivement au printemps boréal (mars à mai) et à l'automne boréal (octobre à décembre)

Les précipitations et les températures sont les variables climatiques marquantes qui caractérisent le climat. Les travaux sur les changements climatiques mettent en évidence des impacts forts sur ces deux variables. La République de Djibouti présente un climat aride caractérisé par des températures élevées, une faible pluviométrie et la rareté des événements pluvieux.

Nous allons d'abord nous pencher sur une analyse approfondie des précipitations, en explorant les données à diverses échelles temporelles : annuelle, saisonnière, mensuelle et journalière. L'objectif est de saisir la dynamique et les tendances de ces précipitations à travers ces différentes profondeurs temporelles, offrant ainsi une vision complète et nuancée des régimes pluviométriques de la région étudiée. Cette analyse se concentrera principalement sur les stations disposant de longues séries de données, assurant ainsi la robustesse et la fiabilité des

résultats obtenus. Cette démarche permettra non seulement de comprendre les phénomènes pluviométriques passés, mais aussi de fournir des éléments de réflexion pour anticiper et s'adapter aux scénarios futurs. Ces résultats seront complétés par une analyse infra-journalière qui permettra de dévoiler les subtilités des cycles pluviométriques à des échelles temporelles plus courtes.

Nous poursuivrons par l'étude des températures qui est essentielle pour comprendre les variations climatiques et anticiper les potentiels impacts socio-économiques. Les données de température seront abordées également à différents pas de temps : annuel, saisonnier, mensuel et journalier. L'analyse de ces données vise à saisir les fluctuations thermiques.

À travers ce chapitre, nous espérons fournir une analyse exhaustive et rigoureuse des tendances climatiques, et ainsi contribuer à la base de connaissances en climatologie de la République de Djibouti.

Il convient de souligner que cette étude n'a pas pris en compte des mesures hydrologiques, en raison de leur manque de consistance, de leur durée insuffisante et de lacunes significatives dans les données disponibles, limitant ainsi la portée de nos analyses dans ce domaine spécifique.

1. Analyse des données de précipitation

L'étude des précipitations permet de déchiffrer les mécanismes sous-jacents du climat et d'appréhender les variabilités et changements climatiques.

Dans le cadre de cette recherche, nous nous penchons sur une analyse approfondie des précipitations sur la zone sud-est de la République de Djibouti qui englobe le bassin de Ambouli. Comme cela a été vu dans la partie de présentation des données, quelques séries de données de l'ANM sont longues et permettent des traitements statistiques éprouvés. Sept stations pluviométriques ont servi de socle à cette analyse : Ali Sabieh (1947-1990), Djibouti Serpent (1901-1990), Djibouti Aéroport (1953-2021), Hol Hol (1951-1990), Loyada (1957-1990), Arta (1947-1980) et Oueah (1951-1980). Les périodes d'observation de ces stations s'étendent sur plusieurs décennies, offrant ainsi une fenêtre temporelle précieuse pour analyser les tendances et les schémas des précipitations sur une longue durée.

Nous avons fait le choix de porter cette analyse sur deux périodes distinctes : la période complète d'observation consacrée aux deux stations pluviométriques de Djibouti (Djibouti Serpent et Djibouti Aéroport) afin d'établir un historique de l'évolution de la pluviométrie de la République de Djibouti et la période d'observation commune aux stations de la zone afin de pouvoir comparer les évolutions entre les stations et mieux caractériser spatialement l'évolution globale de la pluie sur cette période (Figure 26).

Des analyses propres à chaque station sur des périodes distinctes sont regroupées dans l'Annexe du chapitre 4.

Notre attention se portera sur plusieurs facettes des précipitations à des pas de temps allant de l'annuel au mensuel : les cumuls qui offrent un aperçu des quantités de pluie reçues ; les indices pluviométriques centrés réduits qui permettent de caractériser et de quantifier la variabilité de ces précipitations ; les tendances et les ruptures qui mettent en lumière les évolutions sur le long

terme. Ces analyses s'appuieront sur des données mensuelles. Des analyses au pas de temps journalier concerneront la seule station de Djibouti aérodrome qui a la seule série longue d'observation à ce pas de temps. Cette analyse détaillée des données fournira un cadre solide pour appréhender les dynamiques pluviométriques de la région étudiée.

Lors de notre recherche de données au sein des différents services djiboutiens, nous avons pu identifier quelques données pluviographiques qu'il nous a semblé intéressant de valoriser afin de pouvoir un aperçu sur des événements pluvieux qui peuvent tomber sur le bassin de Ambouli à la station PK50.

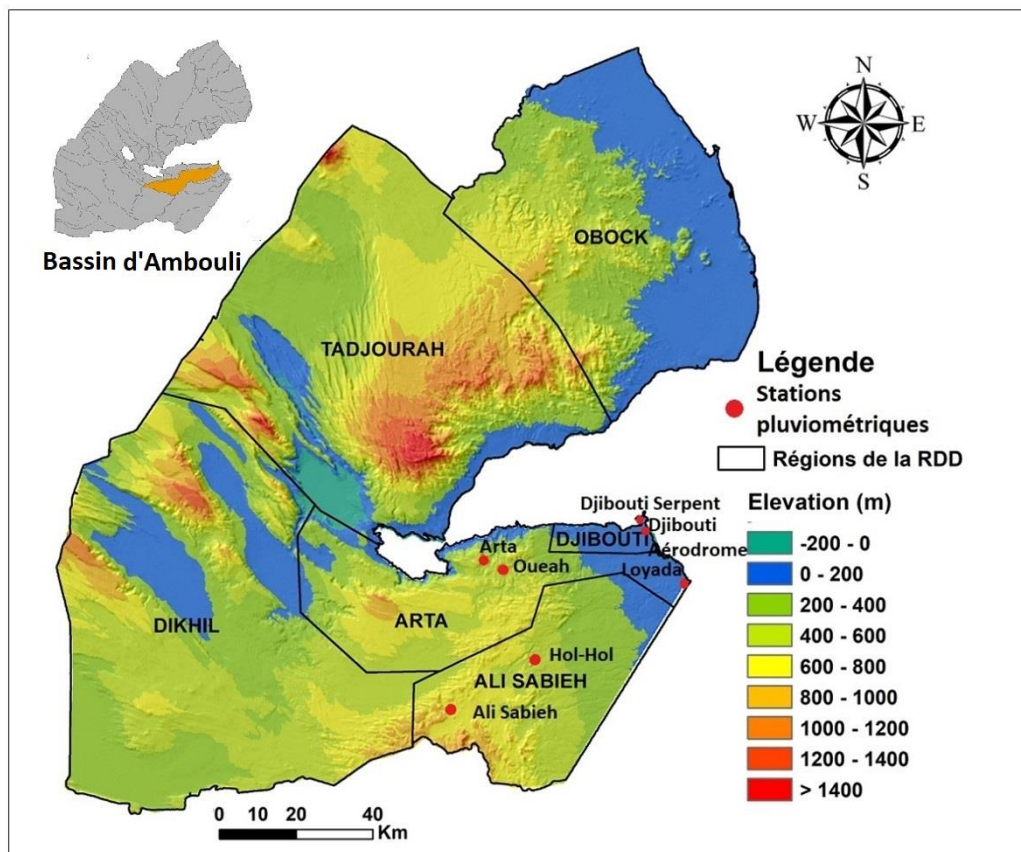


Figure 25: Localisation des stations des longues séries étudiées (ANM)

1.1. Données de précipitation au pas de temps annuel

1.1.1. Analyse des cumuls annuels

Étant donné la forte corrélation observée entre les deux stations de Djibouti, à savoir Djibouti Serpent et Djibouti Aéroport (coefficient de corrélation = 0,91), il est raisonnable de postuler que la divergence des périodes d'étude pour ces stations n'entrave pas la pertinence de l'analyse qui suit.

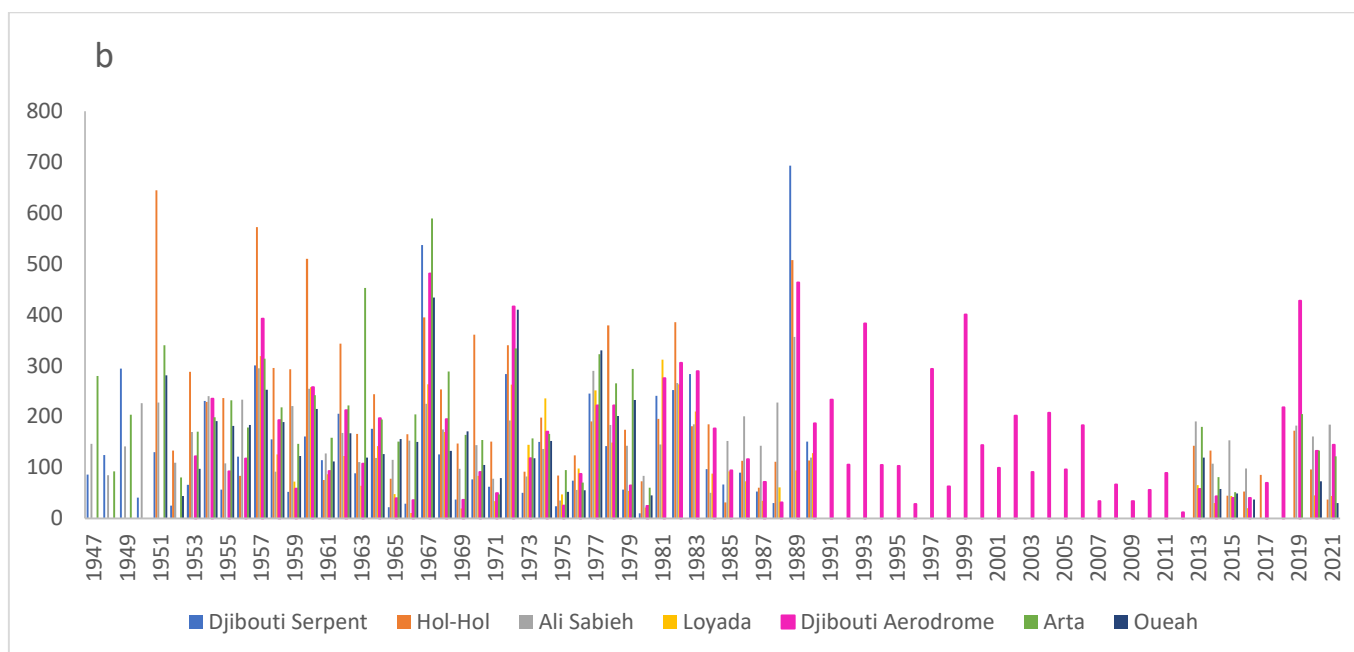
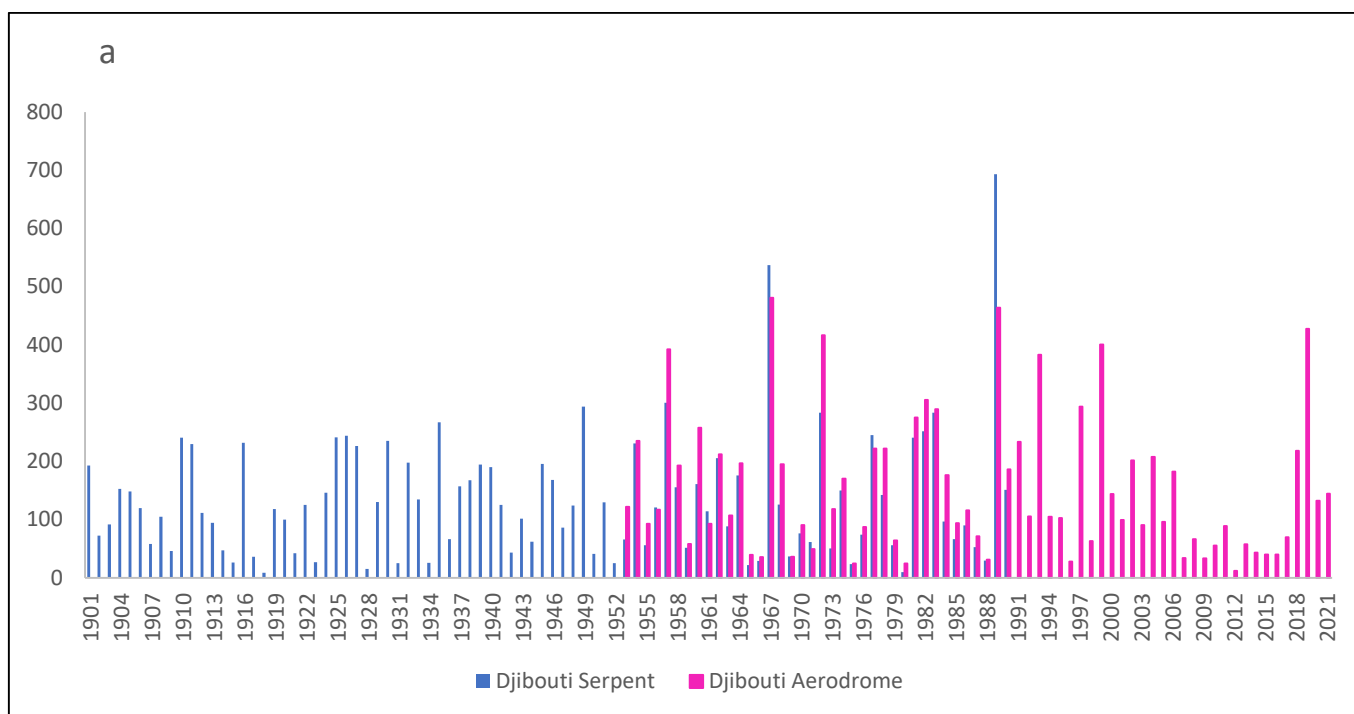


Figure 26: Evolution de la pluviométrie annuelle sur différentes fenêtres temporelles - 27a : Djibouti Aéroport et Djibouti Serpent sur 1901-2021 – 27b : Djibouti Aéroport, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Ali Sabieh, Arta et Oueah entre 1947 et 2021

La Figure 27a présente ainsi les séries chronologiques des deux stations majeures situées à proximité de Djibouti, reconnues pour la complétude de leurs archives. Ces stations offrent une perspective historique précieuse sur les tendances pluviométriques de la région de Djibouti depuis l'aube du XXème siècle, plus précisément à partir de 1901. On observe une variabilité interannuelle significative, témoignant des fluctuations importantes de la pluviométrie au fil des ans. L'analyse plus fine des données révèle que la seconde moitié du XXème siècle a connu

quelques années caractérisées par une pluviométrie sensiblement plus élevée que sur la première moitié.

La Figure 27b illustre la variabilité prononcée de la pluviométrie annuelle des postes de la zone d'étude, mettant en lumière les intrications et les dynamiques complexes qui caractérisent le régime pluviométrique de la zone étudiée sur une fenêtre temporelle plus courte. Ces observations confirment non seulement une variabilité interannuelle marquée, mais également une variabilité spatiale entre les différentes stations, soulignant ainsi la diversité des influences et facteurs à l'œuvre dans cette zone d'étude.

Au cours de la période commune à toutes les stations (1957-1980), une succession d'années sèches et humides s'observe (Figure 28), confirmant la variabilité interannuelle notée précédemment. Un aspect intéressant émerge : les stations de Hol-Hol et de Arta se distinguent par des pics de cumul annuel souvent plus élevés que les autres stations, suggérant une pluviométrie locale plus abondante ou des schémas de précipitations spécifiques.

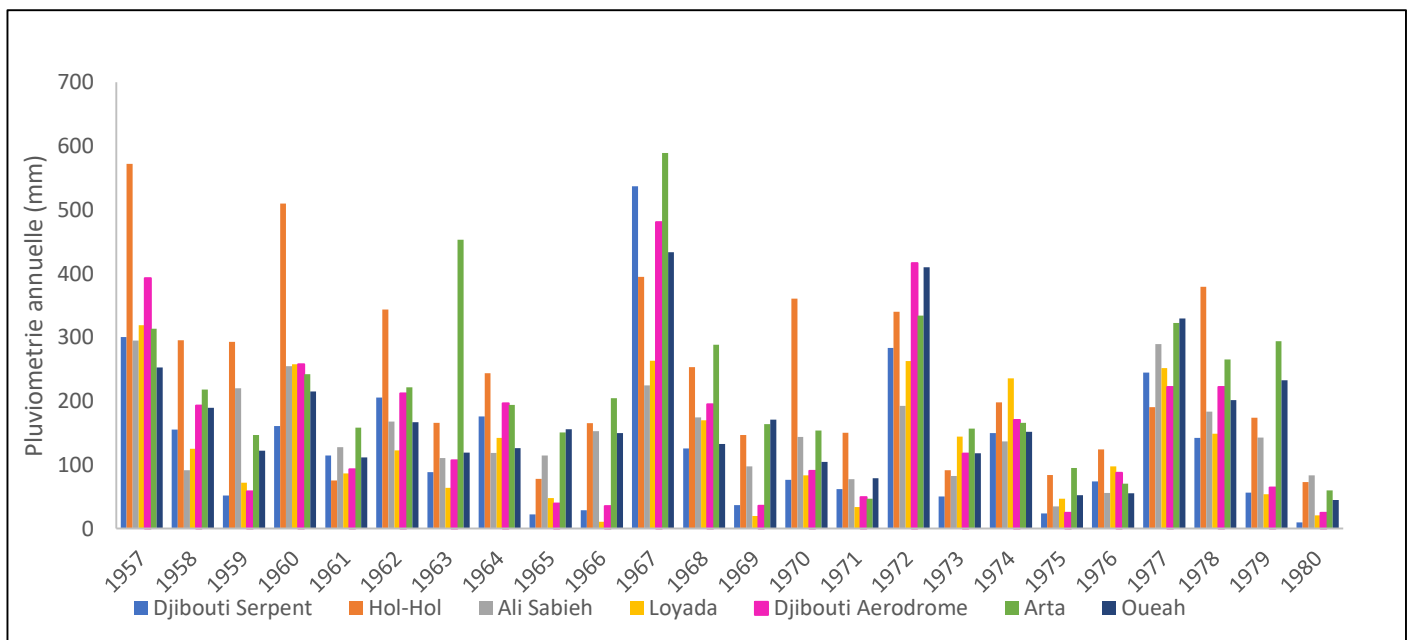


Figure 27: Pluviométrie annuelle sur la période commune (1957-1980) aux stations Djibouti Aéroport, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Loyada, Ali Sabieh, Arta et Oueah

L'étude de la distribution des cumuls annuels de pluie sur la période 1957-1980 confirme encore les variabilités inter-stations et interannuelles (Figure 28). L'analyse des cumuls pluviométriques annuels montre une variabilité tant entre les différentes stations qu'au sein de ces mêmes stations au fil des années.

En ce qui concerne la variabilité entre les stations, Hol-Hol et Arta se distinguent avec des médianes de précipitations plus élevées, indiquant qu'elles reçoivent généralement plus de pluie chaque année par rapport aux autres stations. À l'opposé, Djibouti Serpent, Djibouti aéroport

et Loyada présentent des médianes plus basses, suggérant qu'elles reçoivent moins de précipitations.

Station	Min (mm)	Max (mm)	Médiane (mm)	Moyenne (mm)	Écart type (mm)	Coefficient de variation
Djibouti Serpent	9.5	536.8	101.4	132.26	119.45	0.903
Hol-Hol	72.9	572.1	194.15	237.58	139.16	0.586
Ali Sabieh	34.7	295	139.55	148.84	70.08	0.471
Loyada	10.7	318.8	110.05	128.25	92.2	0.719
Djibouti Aérodrôme	24.5	480.8	112.4	157.74	128.42	0.814
Arta	46.7	589.2	199.15	221.12	124.85	0.565
Oueah	45	433.6	150.8	171.83	101.55	0.591

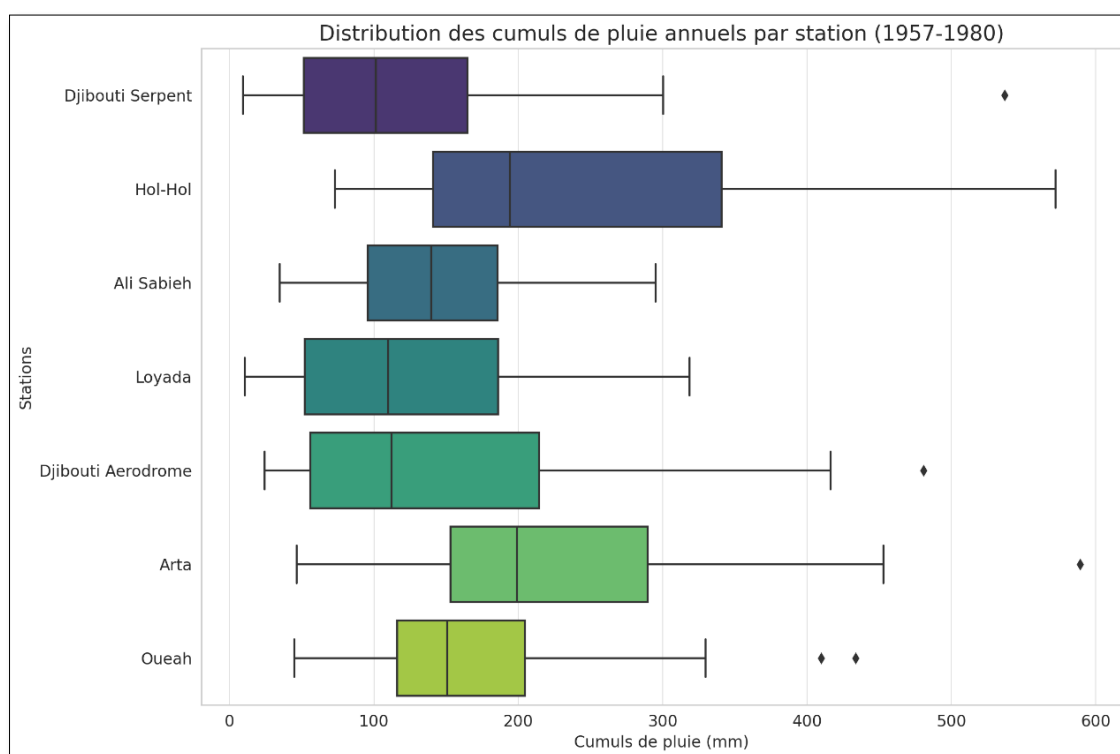


Figure 28: Distribution des cumuls pluviométriques annuels et statistiques descriptives sur la période commune (1957-1980) aux stations Djibouti Aérodrôme, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Ali Sabieh, Loyada, Arta et Oueah

Au sein des stations, la variabilité interannuelle est également notable. Par exemple, Hol-Hol présente un large intervalle interquartile (IQR) (Figure 29). Cela indique une grande variabilité des précipitations d'une année à l'autre, avec des années exceptionnellement humides et d'autres

nettement plus sèches. En revanche, Ali Sabieh présente un IQR plus restreint, suggérant une moindre fluctuation des précipitations d'une année à l'autre.

Des valeurs exceptionnelles (outliers), particulièrement visibles pour des stations comme Djibouti Serpent, Djibouti Aéroport, Arta et Oueah marquent des années atypiques. Ces cumuls annuels pourraient être liés à l'occurrence d'un événement pluvieux extrême survenu au cours de l'année, ce qui est caractéristique des zones arides.

En conclusion, la pluviométrie varie considérablement d'une année à l'autre pour toutes les stations. Cette variabilité pourrait être le reflet de divers facteurs, allant des changements climatiques à l'occurrence d'événements météorologiques isolés, ainsi qu'à d'autres influences environnementales. On constate également que les stations avec les cumuls les plus élevées (Hol-Hol et Arta) sont les stations localisées à des altitudes élevées (entre 470 et 715 m), contrairement aux stations localisées dans la zone du littoral, Djibouti Serpent, Djibouti Aéroport et Loyada dont les altitudes varient entre 4 et 7 m.

1.1.2. Analyse des indices pluviométriques annuels

Les indices pluviométriques centrés réduits examinés pour les deux stations de Djibouti confirment les variations notables de la pluviométrie annuelle au fil des ans (Figure 30).

La variabilité interannuelle des précipitations se caractérise par une alternance d'années pluvieuses et d'années sèches. Une anomalie notable peut être mise en évidence à la station de Djibouti Aéroport ; cette dernière a subi une séquence inhabituellement longue d'années sèches, s'étendant sur une décennie, de 2007 à 2017. En contraste, jusque-là, pour les deux stations Djibouti Serpent et Djibouti aéroport, les séquences d'années qu'elles soient sèches ou humides, ne duraient généralement pas plus de cinq ans.

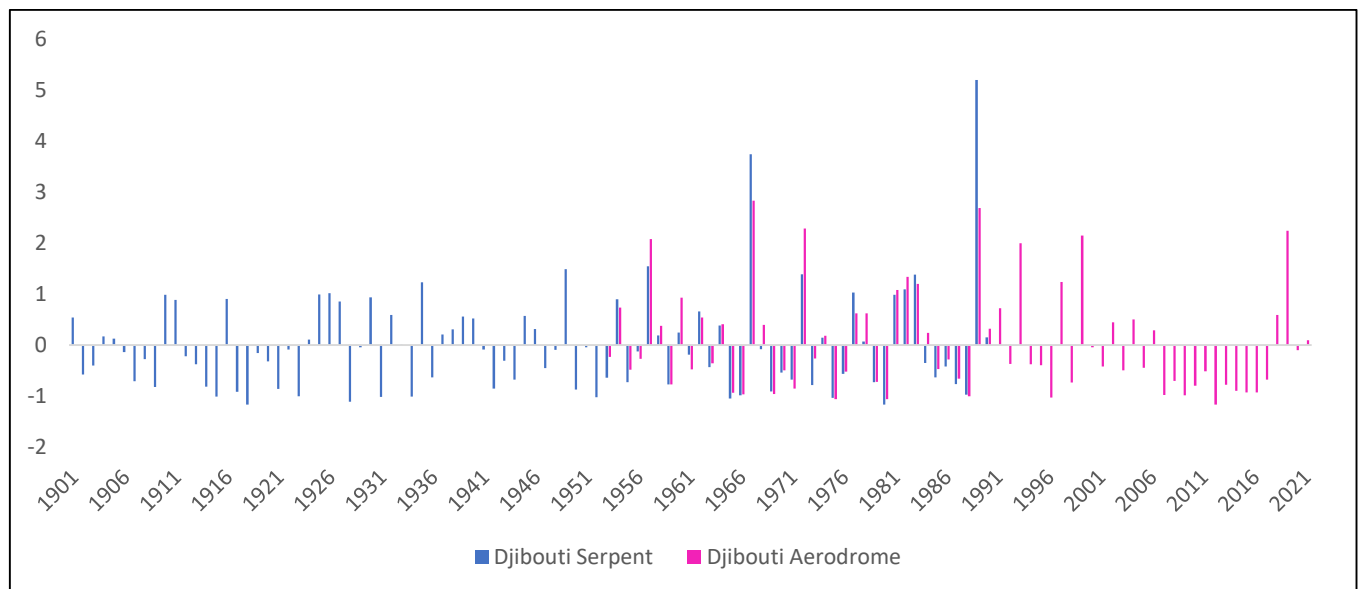


Figure 29: Indices pluviométriques centrés réduits annuels des stations de Djibouti Aéroport et Djibouti Serpent sur la période 1901-2021

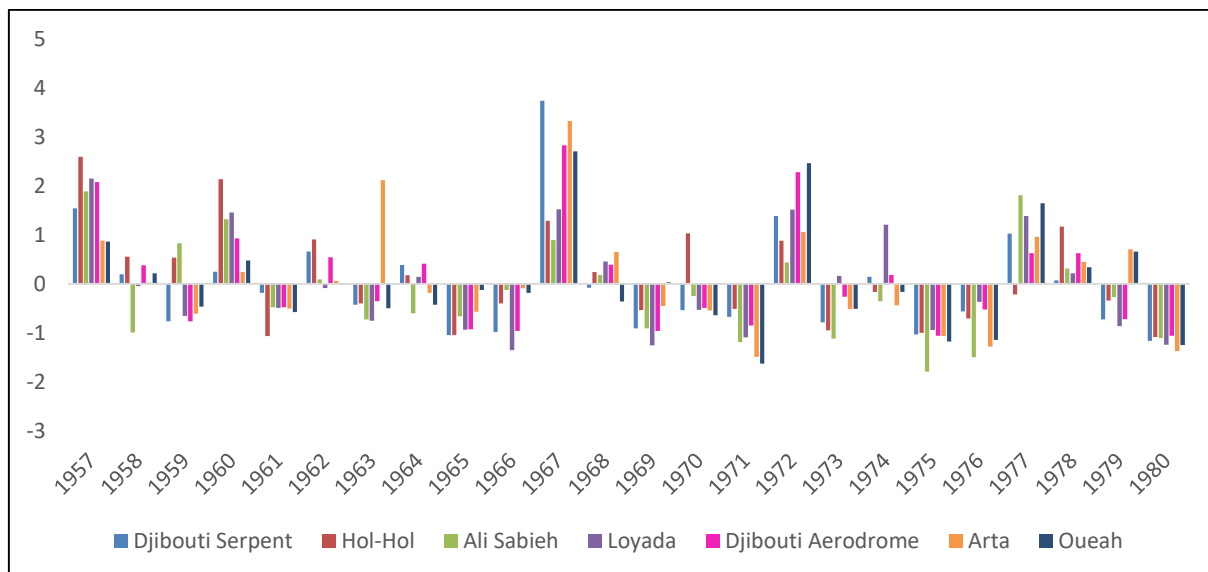


Figure 30: Indices pluviométriques centrés réduits annuels sur la période commune (1957-1980) aux stations Djibouti Aérodrôme, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Ali Sabieh, Loyada, Arta et Oueah

L'analyse des indices pluviométriques centrés réduits de chaque station entre 1957 et 1980, période commune d'observation, révèle une certaine homogénéité spatiale concernant l'évolution des indices pluviométriques (Figure 31). Les stations de la zone d'étude évoluent globalement dans le même sens. L'année 1967 a été l'année la plus pluvieuse ; à un degré moindre les années 1957 et 1972 se démarquent aussi. Les années les plus sèches ont été 1971, 1975 et 1980. On note cependant beaucoup plus d'années en dessous de la moyenne que d'années au-dessus de la moyenne.

Bien que chaque station présente des caractéristiques uniques en termes d'évolutions pluviométriques, une constante demeure : la pluviométrie fluctue considérablement d'une année à l'autre pour toutes les stations. Ces fluctuations peuvent être influencées par une multitude de facteurs, qu'ils soient climatiques, environnementaux (par exemple l'altitude des stations, leur exposition aux vents, l'influence océanique...) ou autres, et soulignent l'importance d'une surveillance continue pour anticiper et répondre aux défis liés à la gestion de l'eau et aux impacts climatiques.

1.1.3. Tests de corrélation sur le rang et de Pettitt

L'analyse des tendances et des ruptures de la pluviométrie annuelle au sein des séries des stations pluviométriques de notre zone d'étude, se basant sur des séries longues, a été réalisée avec une rigueur méthodologique. Les stations examinées, Ali Sabieh, Djibouti Serpent, Djibouti Aérodrôme, Hol-Hol, Loyada, Arta et Oueah, ont fourni des données couvrant des périodes longues et significatives allant des années 1940 aux années 2020.

Rappelons que nous avons employé le test de corrélation sur le rang, une méthode reconnue pour détecter le caractère aléatoire ou non des séries temporelles (« Hypothèse nulle H_0 : série aléatoire »). Dans le cas, d'une série temporelle considérée comme étant non aléatoire, l'étude peut être poussée plus loin afin de préciser le caractère non aléatoire de la série : le test de Pettitt permet d'identifier une potentielle rupture (Hypothèse nulle H_0 : absence de rupture »), une

rupture étant définie par un changement notable au sens du test statistique de la moyenne de la série. Les résultats des tests sont l'acceptation (oui) ou le rejet (non) de l'hypothèse nulle H0.

Les résultats du test de corrélation sur le rang montrent globalement le caractère aléatoire des séries temporelles des stations étudiées (Tableau 17). Seule exception, la station de Hol-Hol où le caractère non aléatoire de la série est détecté au seuil de confiance de 90 et 95% : une tendance à la baisse est observée. Les résultats du test de Pettitt montrent qu'il n'y a aucune rupture détectée quelle que soit la station.

Cela signifie que, sur les périodes considérées, les précipitations annuelles dans la zone d'étude ne présentent pas de tendances systématiques ou de discontinuités notables : aucun changement notable n'a été mis en évidence statistiquement depuis 1901. Cette conclusion, est importante pour notre compréhension de la stabilité des régimes de précipitations dans cette région, malgré la variabilité interannuelle observée.

Tableau 17: Résultats des tests de corrélation sur le rang et de Pettitt au pas de temps annuel

Station	Série étudiée		Corrélation sur le rang (caractère aléatoire)				Test de Pettitt (absence de rupture)		
	début obs.	fin obs.	99%	95%	90%	Variable	99%	95%	90%
Djibouti aerodrome	1951	2020	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui
Ali Sabieh	1947	1990	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui
Arta	1947	1980	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui
Hol-Hol	1951	1990	Oui	Non	Non	-2,027	Oui	Oui	Oui
Loyada	1957	1990	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui
Oueah	1951	1980	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui
Djibouti serpent	1901	1990	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui

1.2. Données de précipitation au pas de temps saisonnier

La République de Djibouti, présente une diversité climatologique remarquable, reflétant la complexité climatique de l'Afrique de l'Est. Les caractéristiques pluviométriques multimodales de ce pays mettent en évidence les interactions entre topographie, circulation atmosphérique et influences océaniques.

Assowe Dabar et al. (2021) proposent un zonage climatique de la république de Djibouti :

- la moitié Est, influencée par des perturbations tropicales venant du nord-ouest de l'océan Indien, reçoit des précipitations principalement entre octobre et mars. Ces épisodes pluvieux, bien que rares, sont souvent associés à des phénomènes météorologiques majeurs, notamment des systèmes dépressionnaires de transition. En hiver, cette région est également touchée par des vagues de froid en provenance de latitudes plus septentrionales, influençant davantage le régime pluviométrique (Beau et al., 1976).
- La moitié Ouest bénéficie d'une grande saison des pluies qui s'étend de juillet à septembre, culminant en août avec des cumuls pouvant atteindre des dizaines de millimètres. Cette

période coïncide avec la saison des grandes pluies dans une grande partie de l'Éthiopie, à l'exception de sa partie sud.

Il est intéressant de noter que, malgré sa proximité avec les hauts plateaux éthiopiens, Djibouti reçoit des précipitations relativement faibles pendant cette saison.

D'après ce zonage, les stations de notre zone d'étude analysées appartiennent à cette zone Est hormis la station d'Ali Sabieh, située dans la partie occidentale. Comme suggéré par Assowe Dabar et al. (2021) qui s'appuie sur d'autres études menées en Afrique de l'Est, le découpage des saisons sur lequel nous allons nous appuyer est : Janvier-Février (JF), Mars-Avril-Mai (MAM), Juin-Juillet-Août-Septembre (JJAS) et Octobre-Novembre-Décembre (OND).

1.2.1. Analyse des cumuls saisonniers

Nous avons analysé les évolutions saisonnières des cumuls de pluie des différentes stations de la zone d'étude (Figure 32,33).

Étant donné les fortes corrélations observées entre les deux stations de Djibouti, à savoir Djibouti Serpent et Djibouti Aéroport pour les différentes saisons de (coefficient de corrélation moyen = 0.92), il est raisonnable de postuler que la divergence des périodes d'étude pour ces stations n'entrave pas la pertinence de l'analyse.

L'analyse des données pluviométriques à l'échelle saisonnière révèle, tout comme à un niveau annuel, une variabilité interannuelle manifeste pour l'ensemble des saisons considérées. Plus spécifiquement, les saisons JF, MAM et OND se distinguent par la présence de pics saisonniers, témoignant de fluctuations marquées des précipitations. Pour la station Djibouti Serpent, une observation attentive révèle que, pour la majorité des années étudiées, ce sont les saisons MAM et OND qui enregistrent les cumuls les plus importants, caractéristiques des régimes pluviométriques de la zone est. Il est à noter que pour les deux stations de Djibouti, la saison JJAS se démarque par sa discrétion pluviométrique : elle représente systématiquement la saison la moins arrosée, avec des cumuls saisonniers nettement inférieurs aux autres périodes (Figure 32).

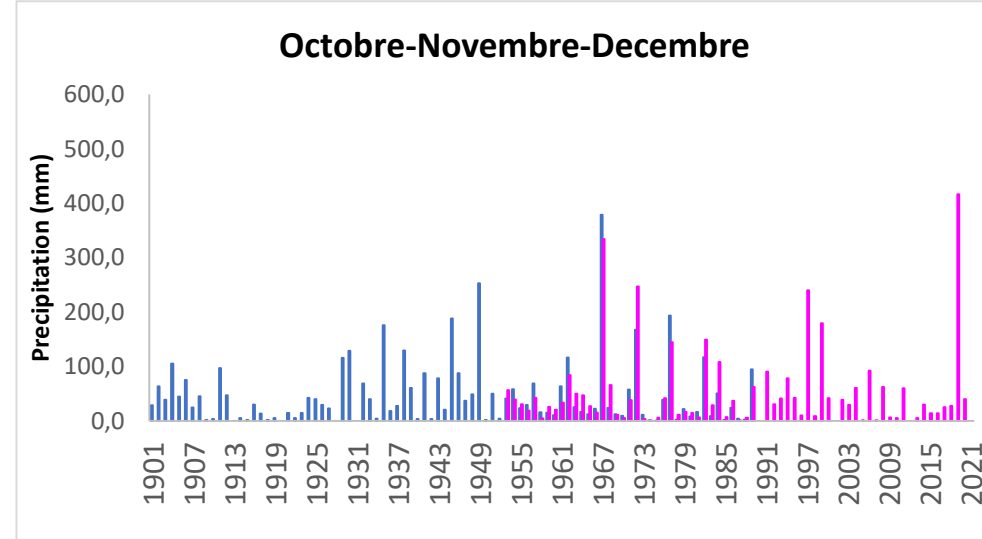
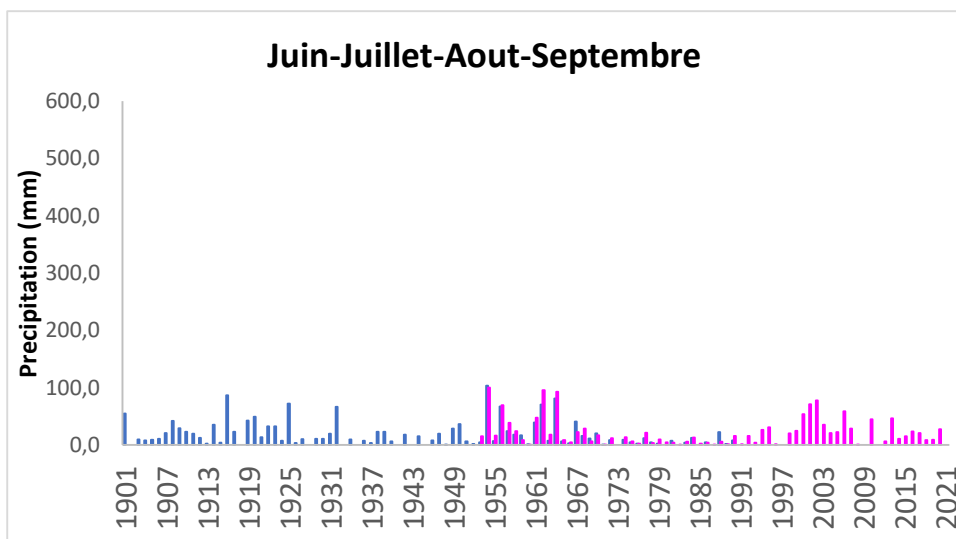
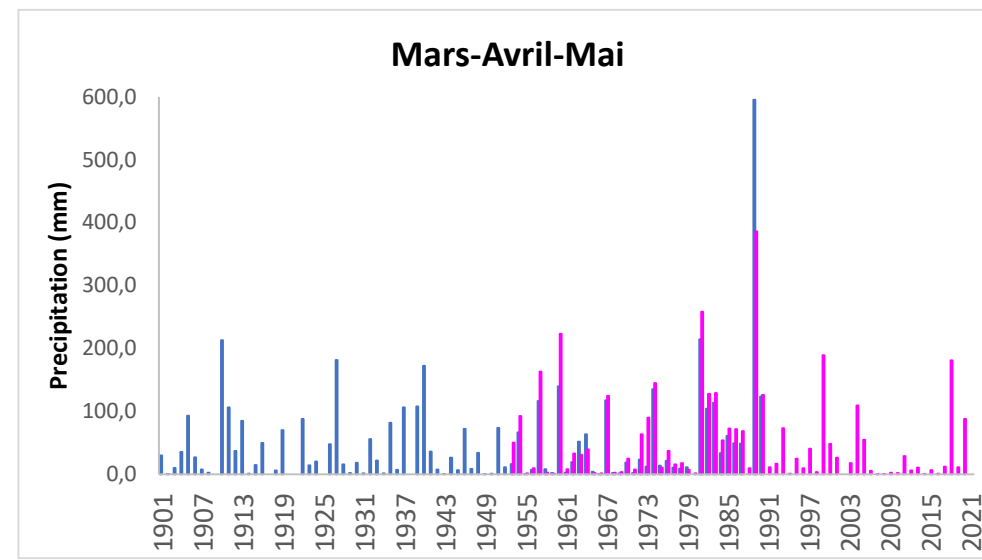
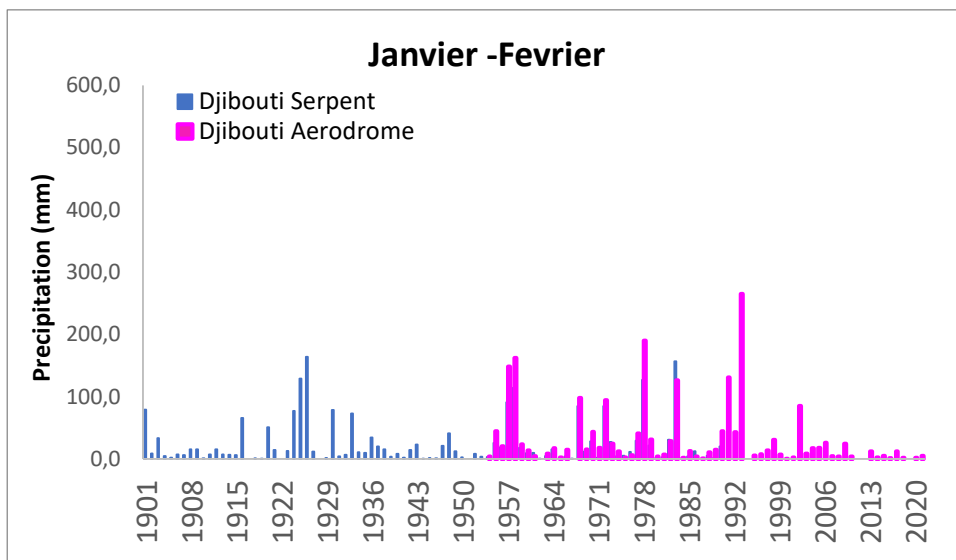


Figure 31: Evolution de la pluviométrie saisonnière sur la période d'observation 1901-2021

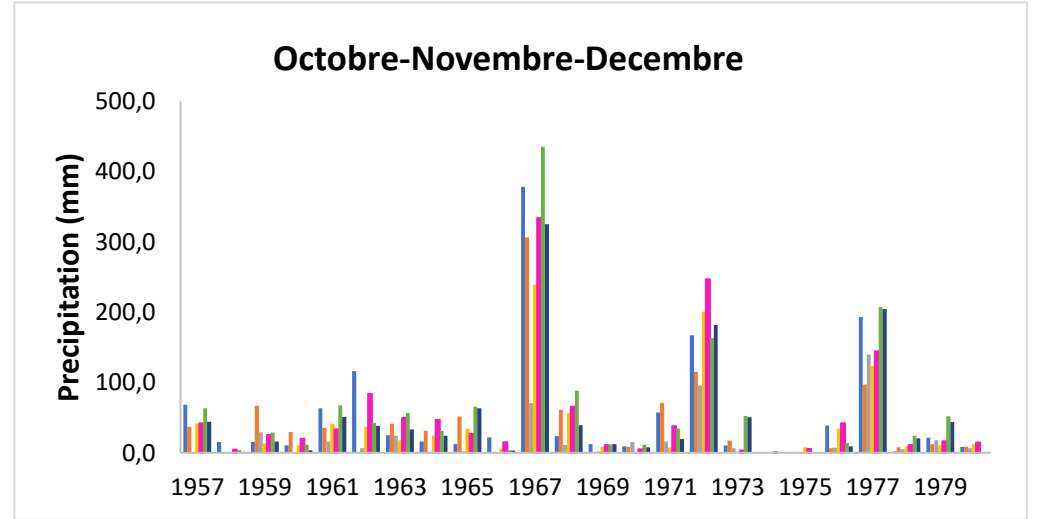
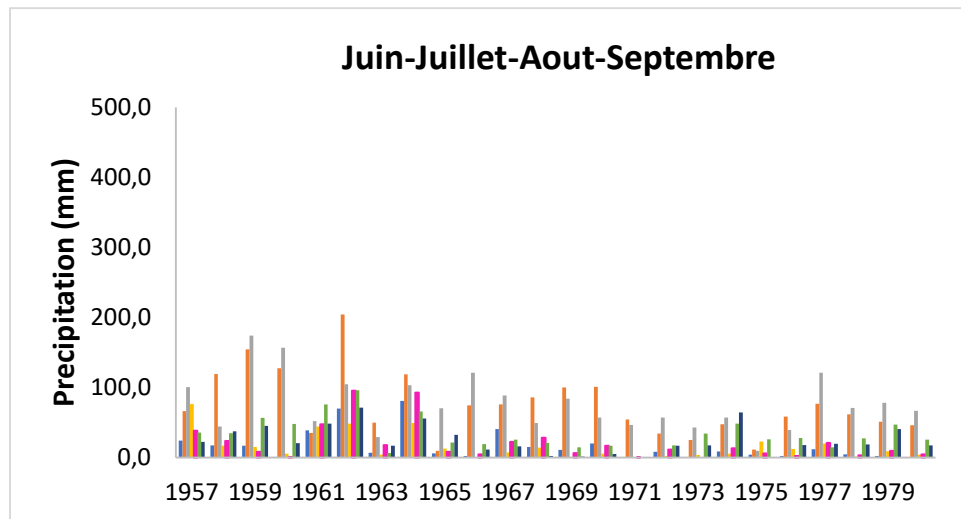
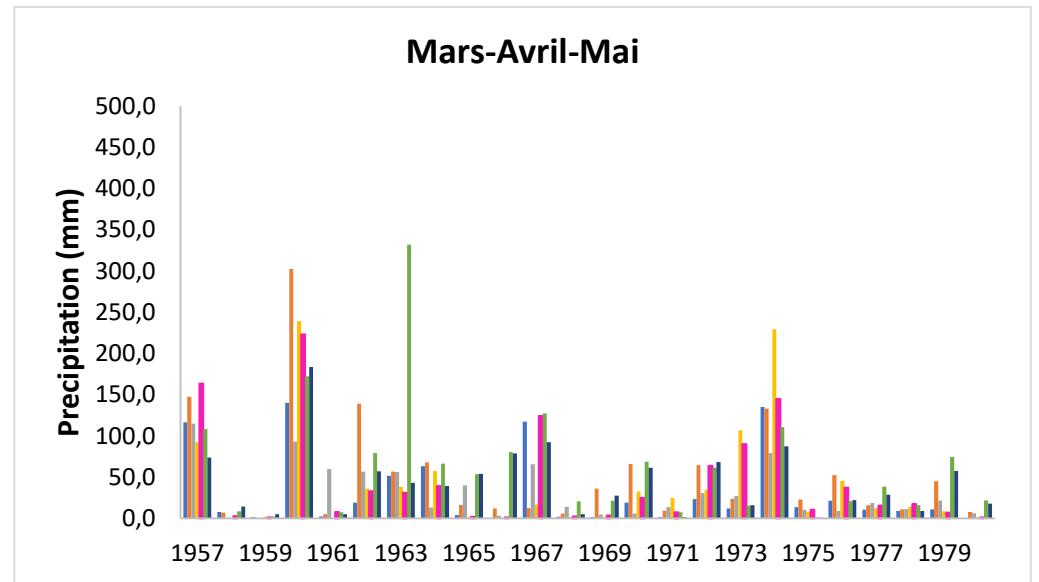
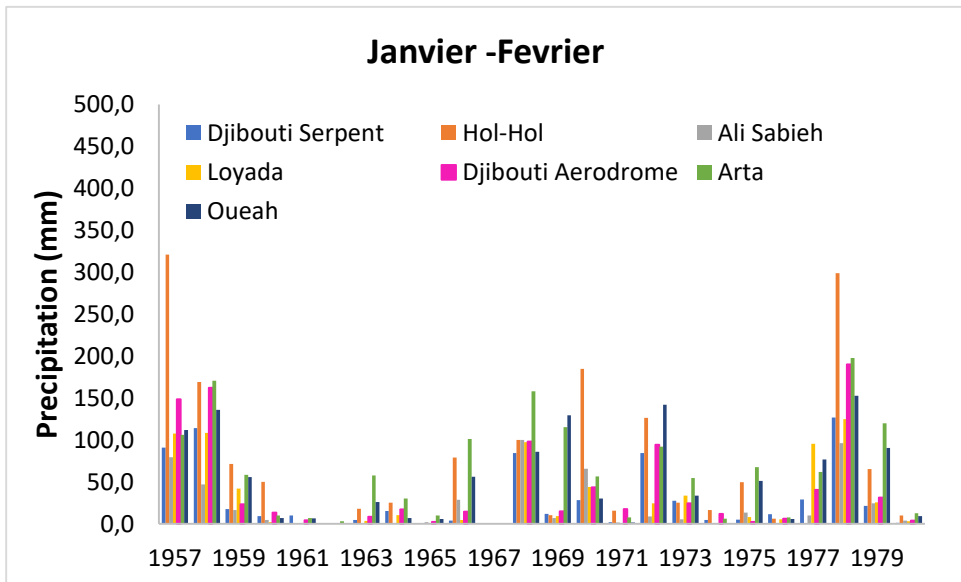


Figure 32: Evolution de la pluviométrie saisonnière sur la période commune (1957-1980) aux stations Djibouti Aérodrôme, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Ali Sabieh, Loyada, Arta et Oueah

L'analyse des cumuls saisonniers de pluie de toutes les stations analysées sur une fenêtre temporelle réduite 1957-1980 (Figure 33) souligne des variabilités distinctes selon les saisons et les stations.

Pour la période JF. Les années 1957 et 1968, en particulier, se distinguent par des cumuls exceptionnellement élevés, indiquant des périodes pluvieuses marquées. La station Hol-Hol se distingue par ses pics pluviométriques remarquables, témoignant d'années à forte précipitation pendant cette période. En comparaison, Djibouti Serpent et Ali Sabieh enregistrent des cumuls plus modérés, tandis qu'Arta, Oueah et Djibouti Aéroport connaissent des événements pluviométriques significatifs à certaines périodes. Une coïncidence des pics pluviométriques sur plusieurs stations aux mêmes années suggère l'occurrence d'événements pluviométriques d'ampleur spatiale.

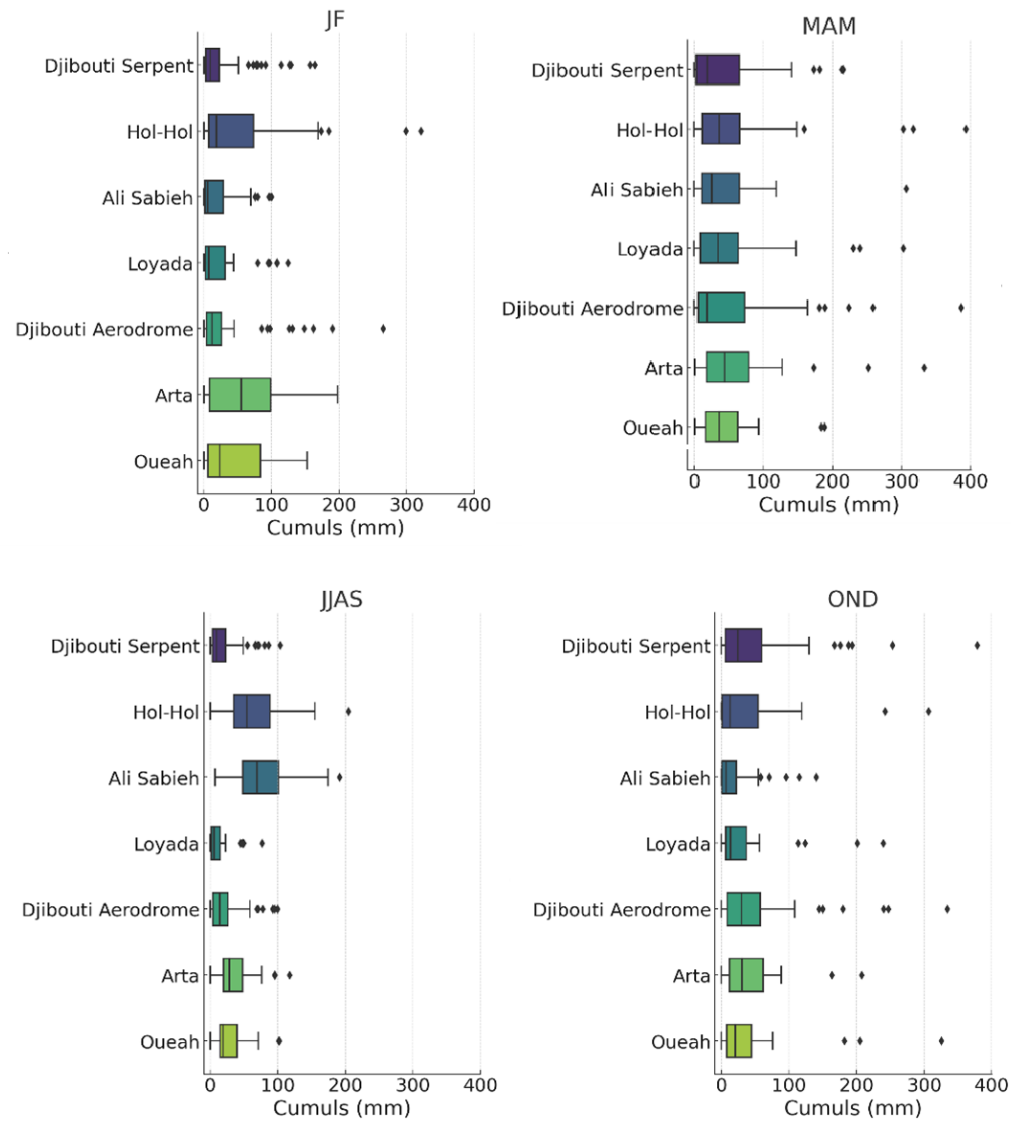
Durant la saison MAM, une variabilité similaire est observée, avec les années 1960 et 1972 se positionnant comme des périodes particulièrement pluvieuses pour une majorité de stations. Hol-Hol, Arta, et Oueah montrent des pics pluviométriques notables, signifiant des années particulièrement pluvieuses. Djibouti Serpent et Ali Sabieh continuent d'afficher des cumuls modestes, tandis que Djibouti Aéroport montre une variabilité plus tempérée. De nouveau, la simultanéité des pics pluviométriques entre différentes stations peut suggérer des phénomènes pluviométriques d'envergure spatiale.

La saison JJAS présente une dynamique quelque peu différente. Si la variabilité demeure, les cumuls enregistrés sont typiquement plus faibles comparativement aux autres saisons. Toutefois, certaines années, notamment 1958, 1966 et 1977, rompent cette tendance, affichant des cumuls surprenants pour certaines stations. Les stations Ali Sabieh et Hol-Hol se démarquent par leurs cumuls pluviométriques élevés car ces deux stations sont localisées respectivement dans la zone ouest et dans la frontière zone ouest et est. Par ailleurs, Djibouti Serpent, Djibouti Aéroport, et Loyada affichent des cumuls généralement inférieurs aux autres stations, ceci est caractéristique de la zone climatique est. Arta et Oueah montrent, quant à elles, une variabilité modérée, ponctuée des mois pluvieux notables.

Quant à la période OND, elle témoigne d'une variabilité prononcée dans les cumuls de pluie, avec une emphase sur les années 1967, 1972 et 1977 comme étant particulièrement humides pour plusieurs des stations étudiées. Il est à noter que la station Arta présente une variabilité interannuelle marquée avec plusieurs pics de précipitations. Djibouti Aéroport montre également des variations significatives, tandis que Oueah révèle une hausse des cumuls pluviométriques. Par contraste, Ali Sabieh, Loyada, et Hol-Hol se caractérisent par des cumuls plus faibles, bien que ponctués des mois pluvieux occasionnels. Cette hétérogénéité des tendances pluviométriques pendant la saison OND souligne les particularités microclimatiques de chaque site d'observation.

Bien que chaque station manifeste sa propre dynamique annuelle, il est notable que certaines années, à savoir 1967, 1972 et 1977, se distinguent transversalement comme des périodes pluvieuses. Ces évolutions pluviométriques saisonnières, tout en révélant des phénomènes pluviométriques régionaux, soulignent également l'importance des microclimats locaux dans la modulation de la pluviométrie.

Distribution des cumuls saisonniers pour différentes stations



JF	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart type	Coefficient de variation
Djibouti Serpent	0.0	126.8	11.65	29.39	39.00	1.327
Hol-Hol	0.0	321.1	25.30	68.50	91.24	1.332
Ali Sabieh	0.0	100.0	6.20	21.56	31.73	1.472
Loyada	0.0	124.7	8.70	31.35	41.89	1.337
Djibouti Aéroport	0.0	190.1	16.25	40.60	55.42	1.365
Arta	0.6	197.8	57.15	63.08	58.36	0.925
Oueah	0.0	152.7	32.10	50.92	52.12	1.024

MAM	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart type	Coefficient de variation
Djibouti Serpent	0.0	140.0	11.40	32.62	46.04	1.411
Hol-Hol	0.0	302.5	23.15	52.46	68.81	1.312
Ali Sabieh	0.0	114.9	16.20	31.40	32.12	1.023
Loyada	0.0	239.2	15.20	41.75	65.86	1.577
Djibouti Aéroport	1.0	223.2	16.55	43.95	60.88	1.385
Arta	1.0	332.1	46.10	63.20	72.96	1.155
Oueah	0.7	183.6	33.90	43.75	41.70	0.953

JJAS	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart type	Coefficient de variation
Djibouti Serpent	0.0	80.7	8.50	16.39	21.33	1.302
Hol-Hol	9.8	204.5	64.05	74.61	46.14	0.618
Ali Sabieh	9.8	174.3	68.60	76.08	39.56	0.520
Loyada	0.2	76.4	8.15	15.93	19.51	1.225
Djibouti Aéroport	0.0	95.4	10.40	20.10	25.77	1.282
Arta	0.0	95.9	26.90	33.65	22.65	0.673
Oueah	0.0	71.2	18.40	24.97	20.27	0.812

OND	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart type	Coefficient de variation
Djibouti Serpent	0.6	378.6	18.95	53.87	85.93	1.595
Hol-Hol	0.0	306.5	23.80	42.01	65.01	1.548
Ali Sabieh	0.0	139.9	6.70	19.80	34.36	1.736
Loyada	0.0	239.4	13.15	39.23	61.96	1.580
Djibouti Aéroport	0.2	334.2	26.30	53.71	80.60	1.501
Arta	0.0	435.5	32.95	61.32	94.33	1.538
Oueah	0.0	325.3	22.55	49.86	78.16	1.568

Figure 33: Distribution de la pluviométrie et statistiques descriptives saisonnières sur la période commune (1957-1980) aux stations Djibouti Aéroport, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Ali Sabieh, Loyada, Arta et Oueah

L'analyse de la distribution des cumuls de pluie saisonniers dévoile des évolutions et des variabilités spécifiques selon les saisons et les stations considérées (Figure 34).

Pour la période JF, une dispersion notable des cumuls est observée à travers les différentes stations. La station Djibouti Serpent, par exemple, affiche une concentration plus resserrée des cumuls, suggérant une relative constance dans la pluviométrie pendant cette période. À l'opposé, la station Hol-Hol présente une dispersion marquée, témoignant d'une variabilité pluviométrique accrue.

Au cours de la saison MAM, la variabilité des cumuls demeure une caractéristique dominante pour une majorité des stations. C'est le cas des stations Arta et Hol-Hol, qui exposent des étendues élargies de cumuls, reflétant des périodes d'humidité fluctuantes.

Pour la saison JJAS, bien que la tendance générale soit une variabilité moindre comparée aux autres saisons, certaines stations, telles qu'Ali Sabieh, démontrent néanmoins une dispersion significative des cumuls, indiquant une hétérogénéité des précipitations même pendant cette période.

Enfin, la période OND) se caractérise par une variabilité modérée des cumuls pour l'ensemble des stations, mettant en évidence une certaine stabilité pluviométrique durant cette saison.

Il est intéressant de noter l'existence de nombreux cumuls saisonniers exceptionnels (outliers) durant les différentes saisons et plus particulièrement pendant la saison OND mais il n'est pas rare d'observer des outliers au cours des autres saisons pour toutes les stations. Cela suggère bien que la pluviométrie, même si elle obéit à des schémas prédéfinis, peut être très aléatoire au sein de ces saisons.

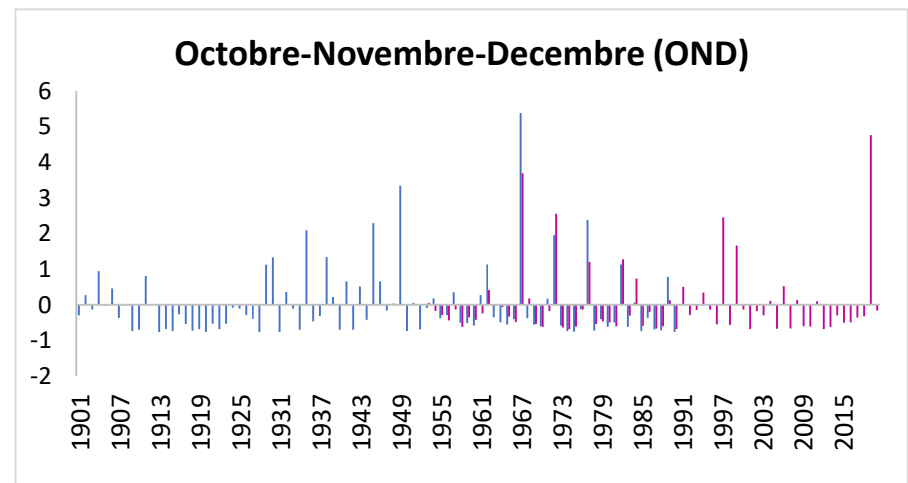
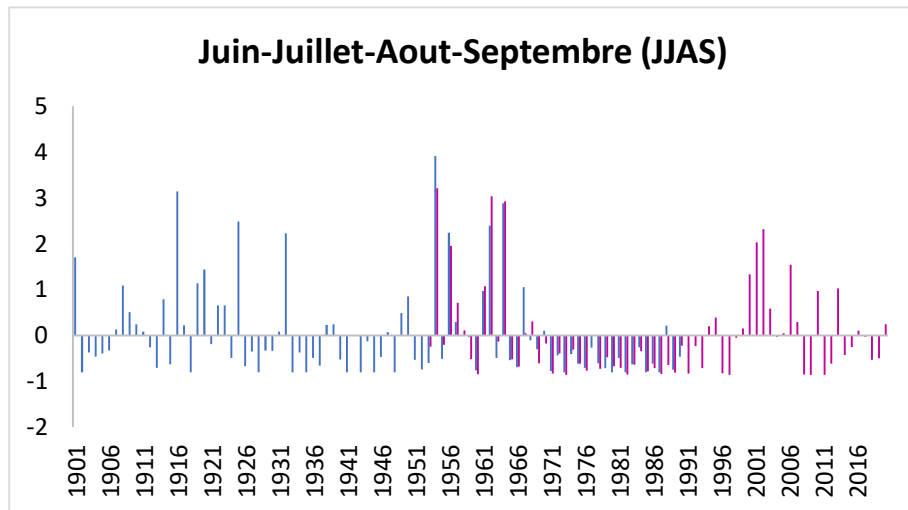
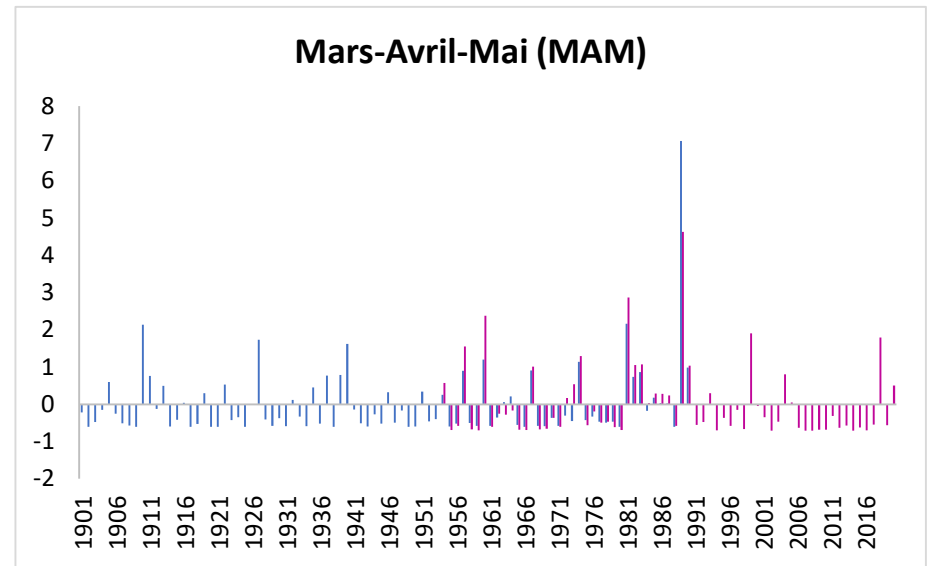
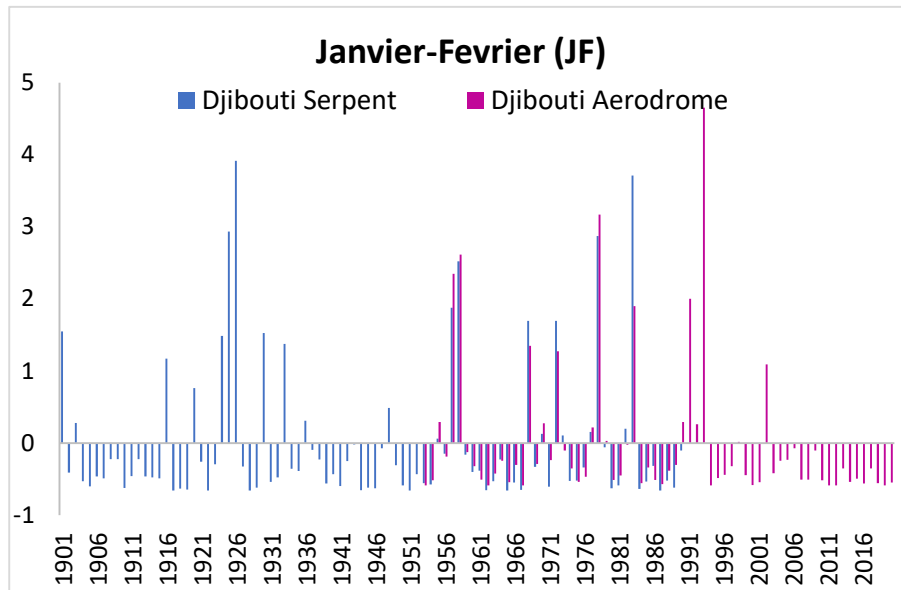


Figure 34: Indices pluviométriques centrés réduits saisonniers aux stations de Djibouti serpent et Djibouti aéroport sur la période 1901-2020

1.2.2. Analyse des indices pluviométriques centrés réduits saisonniers

La figure 35 illustre les indices pluviométriques centrés réduits saisonniers sur l'intégralité de la période d'observation des deux stations de Djibouti, Serpent et Aéroport. Une première observation générale révèle une variabilité des indices au fil des années, indépendamment de la saison considérée. Cette variabilité intrinsèque suggère que Djibouti est soumise à des fluctuations notables en termes de précipitations. De plus, on distingue clairement des périodes caractérisées par de faibles indices, qui correspondent à des périodes sèches, entrecoupées par des périodes d'indices élevés, traduisant des périodes humides.

Pour la saison JF, les deux stations manifestent des pics d'indices ponctuels, témoignant de saisons particulièrement pluvieuses. Ces variations pourraient être attribuables à des événements climatiques spécifiques ou à des cycles interannuels.

Djibouti Serpent, en particulier, présente des maxima remarquables lors de certaines années pour la saison MAM. Cette variabilité pourrait être influencée par des phénomènes climatiques d'envergure régionale ou globale.

Lors de la saison JJAS, nous observons des indices majoritairement négatifs qui suggère des périodes sèches répétitives durant cette saison.

Enfin, pour la saison OND, la station Djibouti Aéroport, montre des variations considérables avec des pics d'indices lors de certaines années. La compréhension de ces fluctuations est cruciale, notamment pour la gestion des ressources hydriques, un enjeu majeur dans les zones où l'eau est une ressource limitée.

À travers les différentes saisons, il est évident que les indices pluviométriques centrés réduits varient considérablement d'une année à l'autre, reflétant la variabilité intrinsèque des précipitations dans la région. Il convient également de souligner que pour la station Djibouti Aéroport, nous observons une période d'environ une dizaine d'années (entre 2007-2017) où nous avons des indices pluviométriques saisonniers négatifs pour la quasi-totalité des saisons ceci confirme les observations réalisées au pas de temps annuel sur cette séquence sèche d'environ 10 ans.

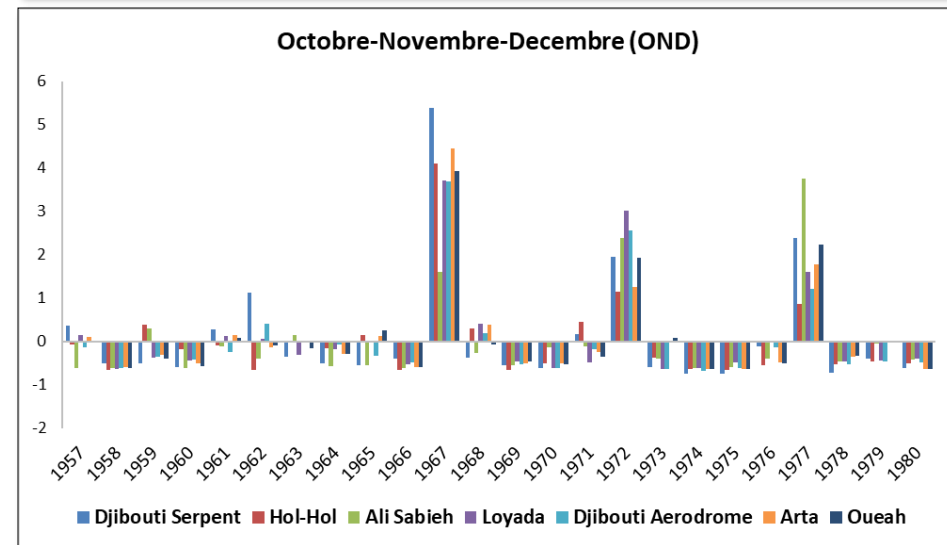
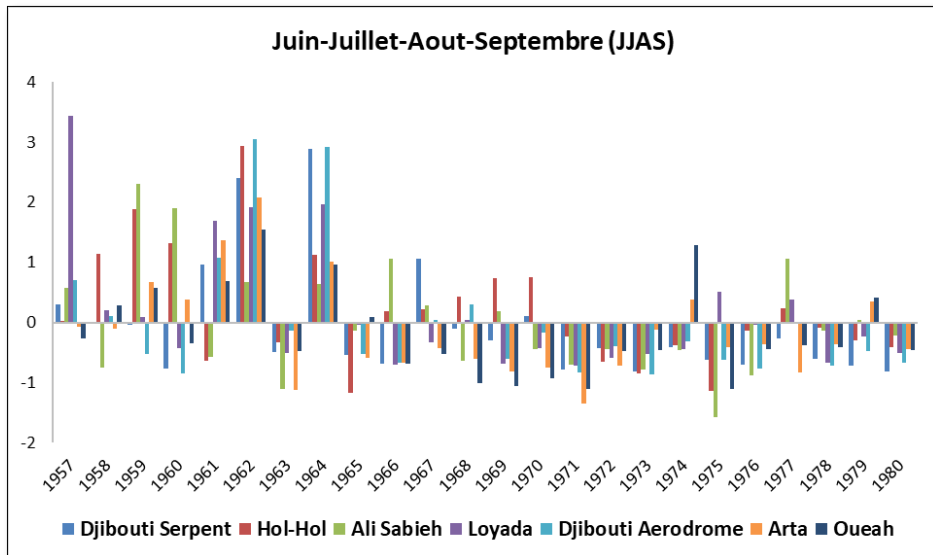
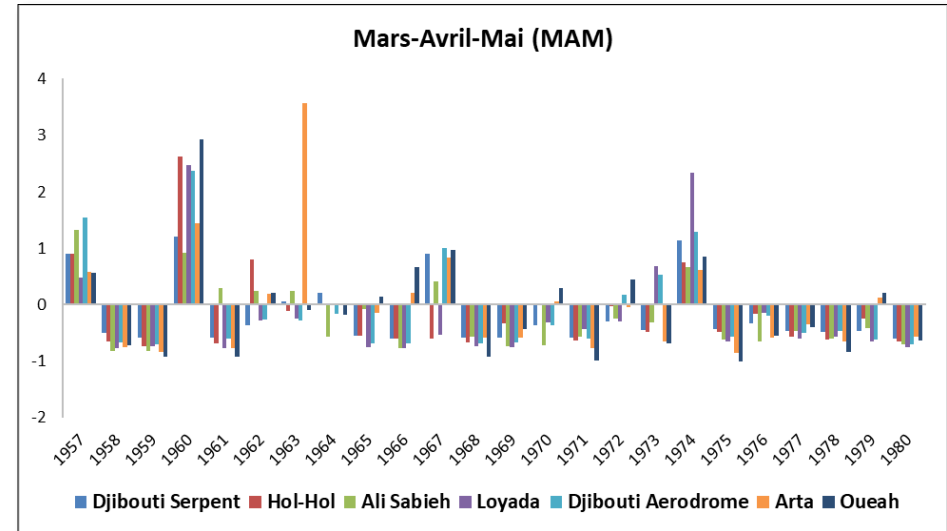
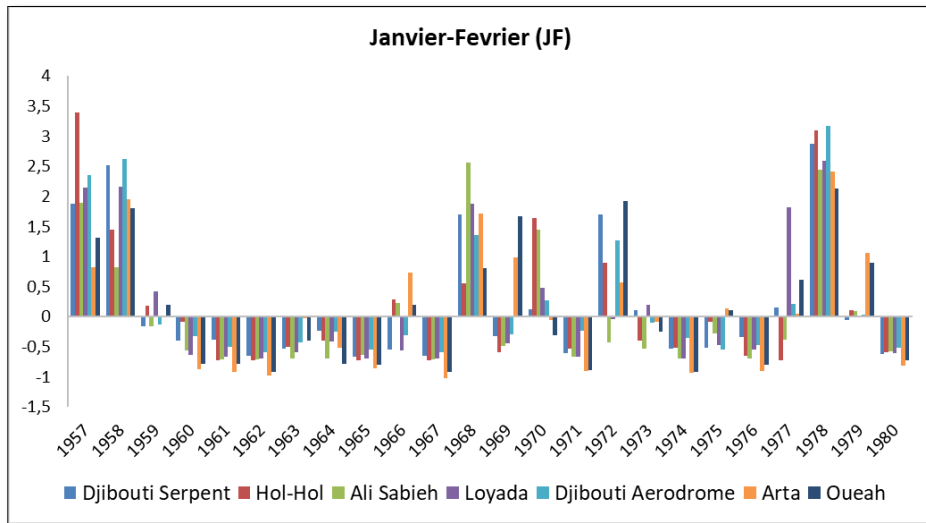


Figure 35: Indices pluviométriques centrés réduits saisonniers sur la période commune (1957-1980) aux stations Djibouti Aéroport, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Loyada Ali Sabieh, Arta et Oueah

La figure 36 montre l'évolution des indices pluviométriques centrés réduits saisonniers au cours de la période commune de 1957 à 1980 pour les stations de la zone d'étude. Une constante sur l'ensemble de cette période, indépendamment de la saison, est la manifeste variabilité des indices.

Concernant la saison JF, certaines années, à l'instar de 1957 et 1967, se distinguent par des indices positifs accrus pour plusieurs stations, suggérant des saisons marquées par d'abondantes précipitations. À l'opposé, des années telles que 1976 et 1980 présentent des indices négatifs prononcés, reflétant des saisons nettement plus sèches.

Pour la saison MAM, la période 1957-1980 a été marquée par une succession de période sèche représenté par des valeurs d'indices pluviométriques négatives. Seules les années 1960 et 1974 présente des valeurs d'indices pluviométriques élevés suggérant des périodes assez humides.

En ce qui concerne la saison JJAS, durant la période 1957-1980, plusieurs années ont été caractérisées par des niveaux de précipitations élevés, ceci correspond au début de cette période entre 1957 et 1963, tandis que d'autres se sont démarquées par leur sécheresse (entre 1965-1980).

Pour la saison OND, sur la période 1957-1980, 3 années sont excédentaires (indice pluviométriques élevée : 1967, 1972 et 1977), alors que toutes les autres années sont légèrement déficitaires cette saison a connu des années d'abondantes précipitations alternant avec des années de sécheresse, une tendance observée pour l'ensemble des saisons analysées.

La période 1957-1980 a été marquée par des variations des indices pluviométriques pour toutes les saisons. Bien que certaines évolutions puissent être identifiées, la variabilité intrinsèque des précipitations dans la région est clairement mise en évidence. Cette variabilité a des implications potentielles pour la gestion des ressources en eau, l'agriculture et d'autres domaines. Une analyse plus approfondie des facteurs influençant cette variabilité pourrait fournir des informations supplémentaires pour une meilleure gestion et planification.

1.2.3. Contributions saisonnières aux cumuls annuels de précipitations

L'analyse des contributions saisonnières aux cumuls annuels de précipitations révèle une dynamique complexe, spécifique à chaque station (Figure 37). Pour la station Djibouti Serpent, les saisons MAM et OND se distinguent nettement, fournissant chacune approximativement un tiers des précipitations annuelles. Au contraire, à Hol-Hol, bien que la saison MAM prédomine légèrement sur la saison JJAS, cette dernière est talonnée de près par la saison JF, laissant à la saison OND la contribution la moins significative.

La particularité d'Ali Sabieh est notable, avec la saison JJAS contribuant presque à la moitié des précipitations annuelles, ce qui s'aligne avec sa localisation dans la zone climatique Ouest. Loyada, quant à elle, voit une prédominance de la saison MAM, suivie dans l'ordre par OND, JF et JJAS ce qui décrit parfaitement les caractéristiques climatiques de la zone est. Djibouti Aéroport et Djibouti Serpent présentent une dichotomie presque équilibrée entre les saisons OND et MAM, avec JF et JJAS en retrait, ce qui également caractéristiques de la zone climatique est. À Arta, bien que MAM soit la saison la plus pluvieuse, JF et OND n'en demeurent pas moins des contributeurs essentiels, laissant JJAS en position moindre. Enfin, Oueah affiche une contribution saisonnière relativement uniforme, avec toutefois une légère dominance de la saison MAM, ceci n'étant pas représentative des deux zones climatiques.

Concernant la station Hol-Hol, on observe un certain équilibre des pourcentages entre les saisons MAM et JJAS, cette caractérisation atypique de cette est station est due à sa localisation (limite entre la zone est ou ouest)

Ces observations illustrent une variabilité intra-station des contributions saisonnières à la pluviométrie annuelle. Si certaines stations, comme Ali Sabieh, montrent une tendance clairement marquée vers une saison, d'autres, à l'instar de Oueah, manifestent une distribution plus homogène des précipitations au fil des saisons. Il est à noter que plusieurs stations pluviométriques, bien que situées dans une même zone climatique (zone est), présentent des pourcentages de précipitations différents. Cette variabilité peut être substantiellement influencée par un ou deux événements météorologiques majeurs survenus au cours d'une année donnée.

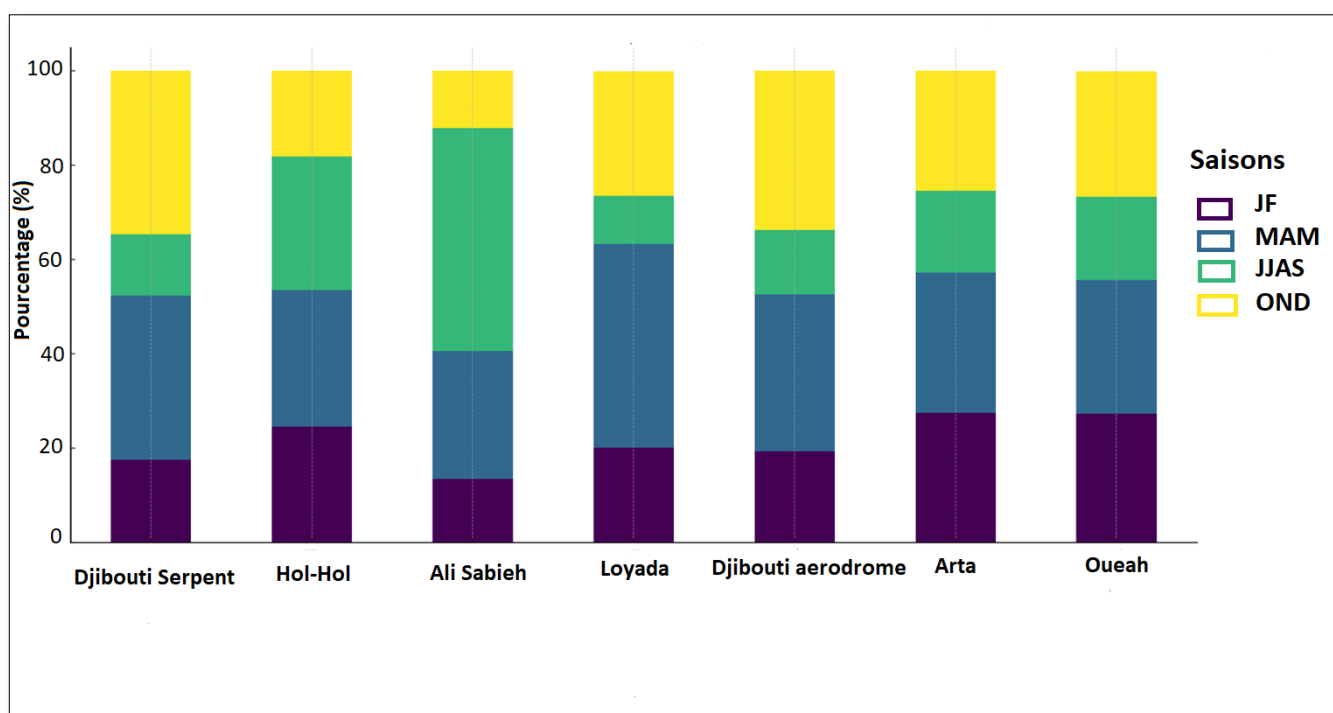


Figure 36: Contribution du cumul saisonnier par rapport à la pluviométrie annuelle sur la période commune (1957-1980) aux stations Djibouti Aéroport, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Ali Sabieh, Loyada, Arta et Oueah

1.2.4. Tests de corrélation sur le rang et de Pettitt

L'analyse des séries chronologiques de précipitations à travers les tests de tendance et de rupture offre des perspectives précieuses sur les dynamiques pluviométriques de la zone d'étude (Tableau 18). Ces analyses soulignent la variabilité marquée des précipitations inter-saisonnières et interannuelles à travers les stations. C'est principalement la saison JJAS qui montre un caractère non aléatoire des séries pluviométriques. Cela se traduit d'ailleurs par des ruptures sur cette même saison JJAS.

Pour Djibouti aéroport, la rupture se situe en 1993, hors de la période commune à toute les stations. Sur la période commune d'observation 1957-1980, les ruptures se manifestent au cours de la décennie 60 et au début de la décennie 1970.

Tableau 18: Tendance et rupture des données pluviométriques au pas de temps saisonnier

Station		Série étudiée		Corrélation sur le rang (caractère aléatoire)				Test de Pettitt (absence de rupture)				
Nom de station	Saison	Début obs.	Fin obs.	99%	95%	90%	Variable	99%	95%	90%	Date	P-value
Djibouti Aéroport	JF	1951	2020	Oui	Oui	Non	-1,719	Oui	Oui	Non	1993	8,00E-02
Djibouti Aéroport	MAM	1951	2020	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Djibouti Aéroport	JJAS	1951	2020	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Djibouti Aéroport	OND	1951	2020	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Ali Sabieh	JF	1947	1990	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Ali Sabieh	MAM	1947	1990	Oui	Non	Non	2,0431	Oui	Oui	Oui		
Ali Sabieh	JJAS	1947	1990	Oui	Non	Non	-2,084	Oui	Oui	Non	1967	8,29E-02
Ali Sabieh	OND	1947	1990	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Arta	JF	1947	1980	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Arta	MAM	1947	1980	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Arta	JJAS	1947	1980	Oui	Oui	Oui		Oui	Non	Non	1962	2,31E-02
Arta	OND	1947	1980	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Hol-Hol	JF	1951	1990	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Hol-Hol	MAM	1951	1990	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Hol-Hol	JJAS	1951	1990	Non	Non	Non	-3,449	Non	Non	Non	1971	5,73E-03
Hol-Hol	OND	1951	1990	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Loyada	JF	1957	1990	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Loyada	MAM	1957	1990	Oui	Oui	Non	1,8827	Oui	Oui	Oui		
Loyada	JJAS	1957	1990	Non	Non	Non	-2,772	Oui	Non	Non	1965	4,71E-02
Loyada	OND	1957	1990	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Oueah	JF	1951	1980	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Oueah	MAM	1951	1980	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Oueah	JJAS	1951	1980	Oui	Oui	Oui		Oui	Non	Non	1965	2,78E-02
Oueah	OND	1951	1980	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Djibouti serpent	JF	1901	1990	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Djibouti serpent	MAM	1901	1990	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Djibouti serpent	JJAS	1901	1990	Oui	Non	Non	-2,283	Oui	Non	Non	1970	2,91E-02
Djibouti serpent	OND	1901	1990	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		

Les résultats montrent peu de modifications au sein des séries de cumuls saisonniers sauf durant la période JJAS avec des séries non aléatoires avec une tendance à la baisse ou marquées par des ruptures. Ces changements ne sont cependant pas très marqués sauf aux stations de Hol-Hol et Loyada. Aux stations de Ali Sabieh et de Loyada, on observe durant la période MAM

une tendance à l'augmentation du cumul saisonnier. A Djibouti aérodrome, c'est la période JF qui voit le cumul saisonnier augmenter.

1.3. Données de précipitation au pas de temps mensuel

1.3.1. Analyse des cumuls mensuels

Constatant une corrélation notable entre les deux stations principales de Djibouti au pas de temps mensuel (coefficient de corrélation moyen de 0,88) comme pour les pas de temps précédents, nous conforte dans l'idée que les différences dans les périodes d'étude entre elles n'affectent pas de manière significative la pertinence de notre évaluation.

L'analyse de la répartition des cumuls pluviométriques mensuels met en lumière plusieurs aspects clés de la dynamique des précipitations dans la région de Djibouti (figure 38 et figure 39).

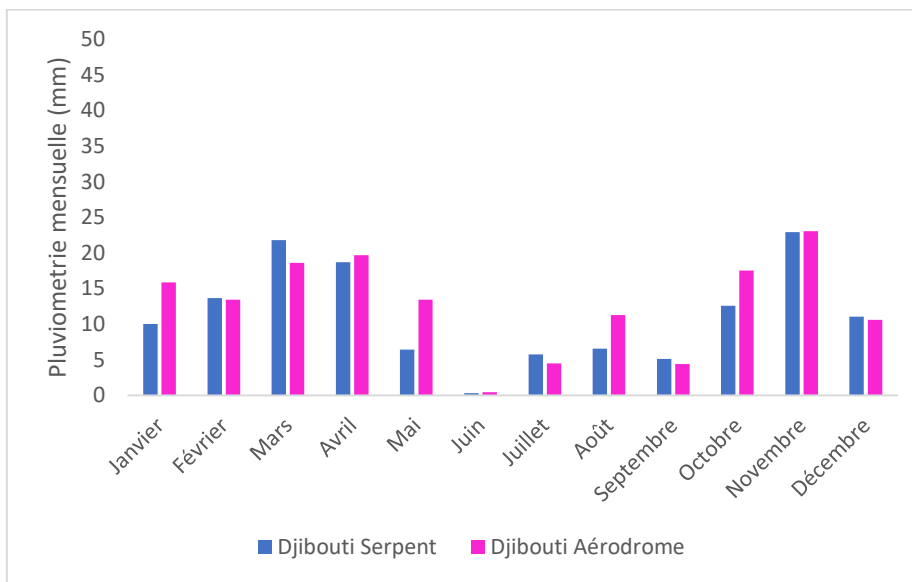
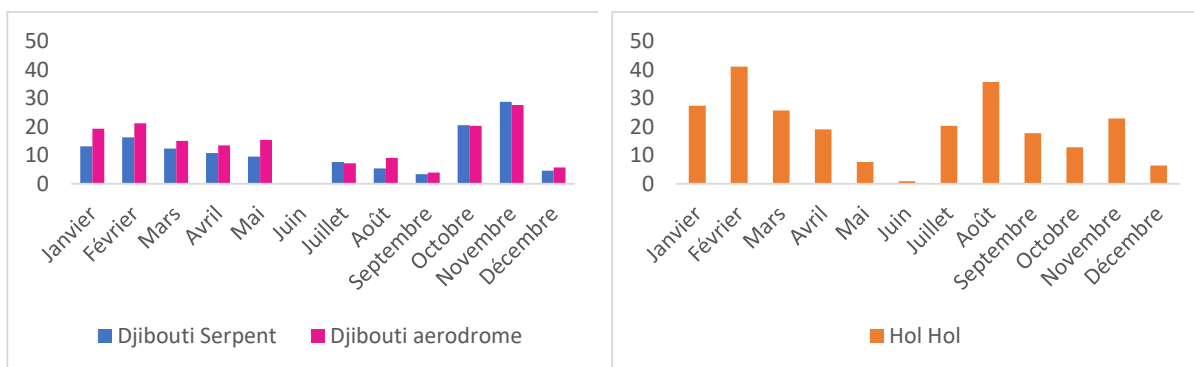


Figure 37: Régime pluviométrique mensuel des deux stations de Djibouti (période 1901-2021)

L'examen des séries temporelles des précipitations à l'échelle mensuelle met en lumière une répartition des pluies au sein de l'année pas aussi marquée que Assowe Dabar et al. (2021) nous le suggérait. On peut distinguer un mois sec en juin, à la rigueur une période JJAS sèche, mais les autres mois sont pluvieux avec un maximum en avril-mai et en novembre.



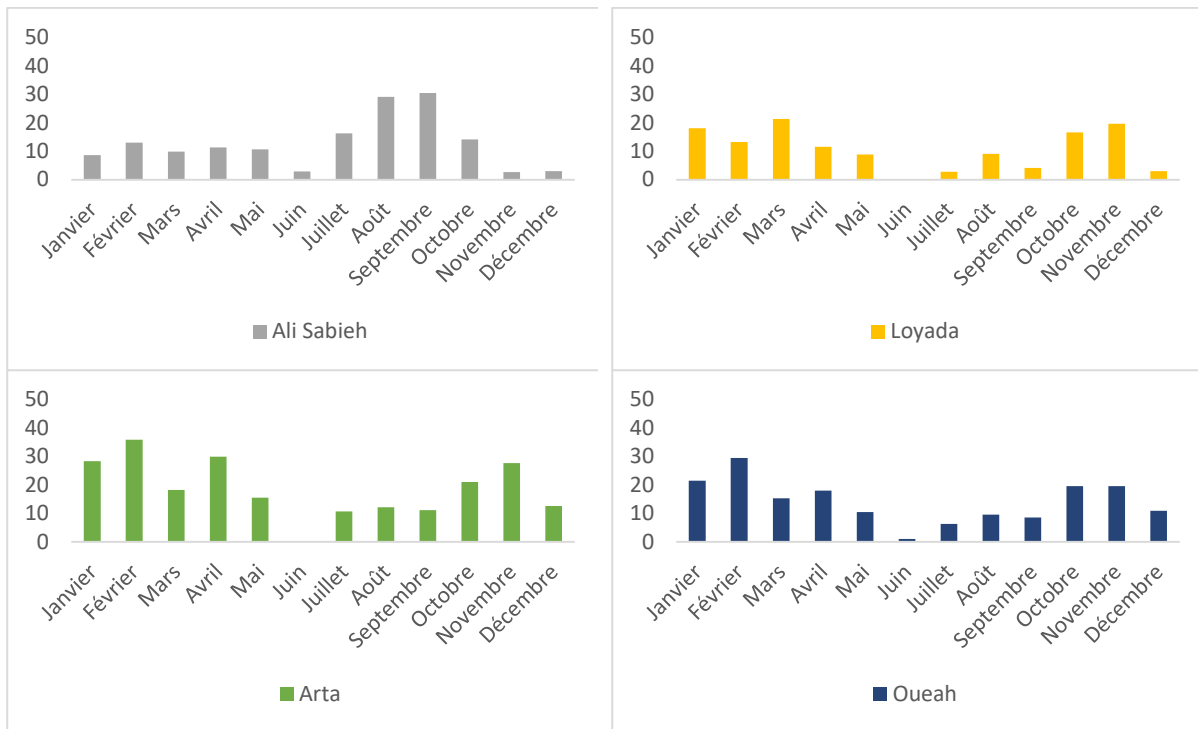


Figure 38: Régime pluviométrique mensuel sur la période commune (1957-1980) aux stations Djibouti Aéroport, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Ali Sabieh, Loyada, Arta et Oueah

La figure 39 regroupe toutes les stations de la zone d'étude sur une fenêtre temporelle commune 1957-1980. Il se confirme que le mois de juin est sans pluie ou presque sur toutes les stations. Le régime mensuel pluviométrique des 7 stations est identique avec, selon les stations, des mois secs ou humides plus marqués. On observe deux saisons sèches (centrées autour de juin et de décembre) et deux saisons humides (janvier-février-mars et août-septembre-octobre-novembre). En général la première saison est plus pluvieuse sauf pour les deux stations de Djibouti et Ali Sabieh.

Si on compare le régime pluviométrique mensuel des deux stations de Djibouti sur les deux périodes d'analyse effectuée (figure 38 et figure 39), les cumuls des deux saisons des pluies semblent équivalents sur la fenêtre temporelle 1901-2021 alors qu'un déséquilibre en faveur de la seconde saison des pluies s'observe sur la fenêtre temporelle 1957-1980.

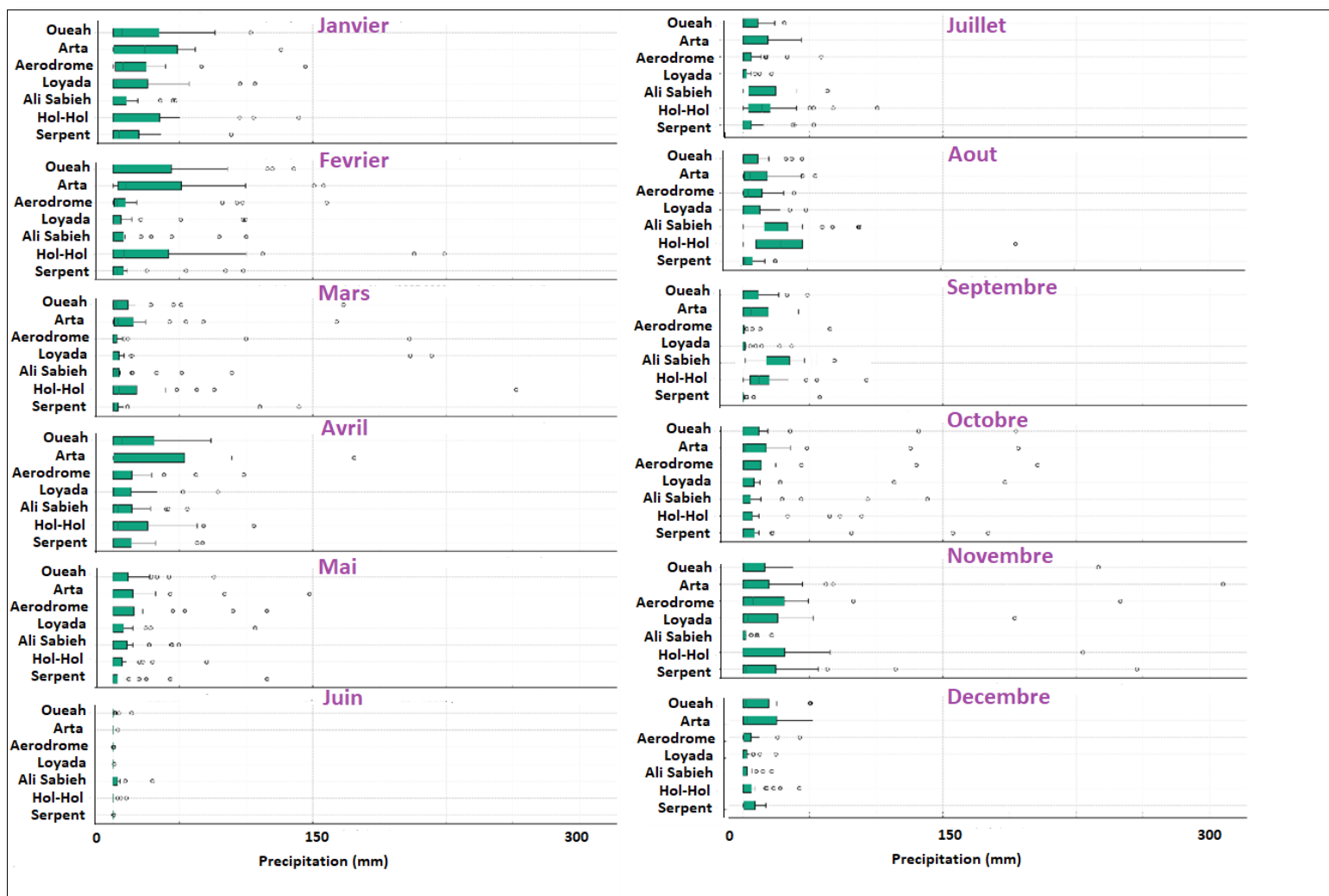


Figure 39: Distribution de la pluviométrie mensuelle sur la période commune (1957-1980) aux stations Djibouti Aéroport, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Ali Sabieh, Loyada, Arta et Oueah

Premièrement, la variabilité interannuelle des précipitations mensuelles est particulièrement frappante. Cette variabilité est manifeste à travers la dispersion des données observées dans les boxplots, notamment pour des mois tels qu'avril ou novembre, où l'amplitude des données révèle des écarts notables des cumuls pluviométriques d'une année à l'autre (Figure 40).

Deuxièmement, en ce qui concerne la saisonnalité des précipitations, mars, avril et novembre se distinguent comme mois particulièrement arrosés dans la majorité des stations, caractérisés par des médianes élevées et une dispersion significative des données. À l'opposé, juin, juillet et décembre sont marqués par des médianes inférieures, illustrant leur nature généralement plus sèche.

Troisièmement, la présence d'outliers, notamment en avril, suggère l'existence d'années exceptionnelles où les précipitations dévient significativement de la norme mensuelle, soit par excès, soit par défaut.

Quatrièmement, en effectuant une analyse comparative entre les différentes stations, des nuances saisonnières émergent. Par exemple, la station d'Ali Sabieh montre une prédominance pluviométrique en août et septembre, alors que pour la station de Djibouti Serpent, janvier et novembre ressortent comme des mois particulièrement humides.

Les mois transitionnels entre saisons sèches et humides, tels qu'avril, peuvent être particulièrement variables. Les outliers observés pourraient être le reflet d'événements météorologiques exceptionnels, tels que les phénomènes El Niño ou La Niña, influençant les schémas pluviométriques à une échelle globale. Finalement, bien que les tendances générales soient similaires d'une station à l'autre, des spécificités locales, potentiellement liées à des facteurs géographiques ou microclimatiques, modulent ces tendances, soulignant l'importance d'une approche nuancée et détaillée dans l'analyse pluviométrique de la zone d'étude.

1.3.2. Contributions mensuelles aux cumuls annuels de précipitations

L'examen du diagramme relatif des contributions mensuelles aux cumuls annuels de précipitations offre des insights précieux concernant les dynamiques pluviométriques de la région étudiée sur la période commune d'observation 1957-1980 (Figure 41).

Premièrement, en matière de distribution des précipitations, le graphique décrit de manière détaillée la dispersion des précipitations sur l'ensemble de l'année pour chaque station.

Deuxièmement, l'analyse inter-stations révèle des disparités notables quant à la distribution mensuelle des précipitations. Par exemple, le mois de mars se démarque par des précipitations plus conséquentes pour certaines stations, telles que Djibouti Serpent, par rapport à d'autres.

Troisièmement, la saisonnalité intrinsèque des précipitations transparaît clairement à travers le diagramme. Les mois tels que mars et novembre se caractérisent par des pourcentages accentués, suggérant une humidité accrue durant ces périodes. En contraste, les mois estivaux, notamment juin et juillet, exhibent des pourcentages moindres, indiquant une tendance plus aride.

Globalement, ce diagramme constitue un outil précieux permettant d'appréhender les fluctuations mensuelles des précipitations sur la période étudiée. Il facilite également la juxtaposition de la contribution mensuelle relative aux précipitations annuelles pour chaque station.

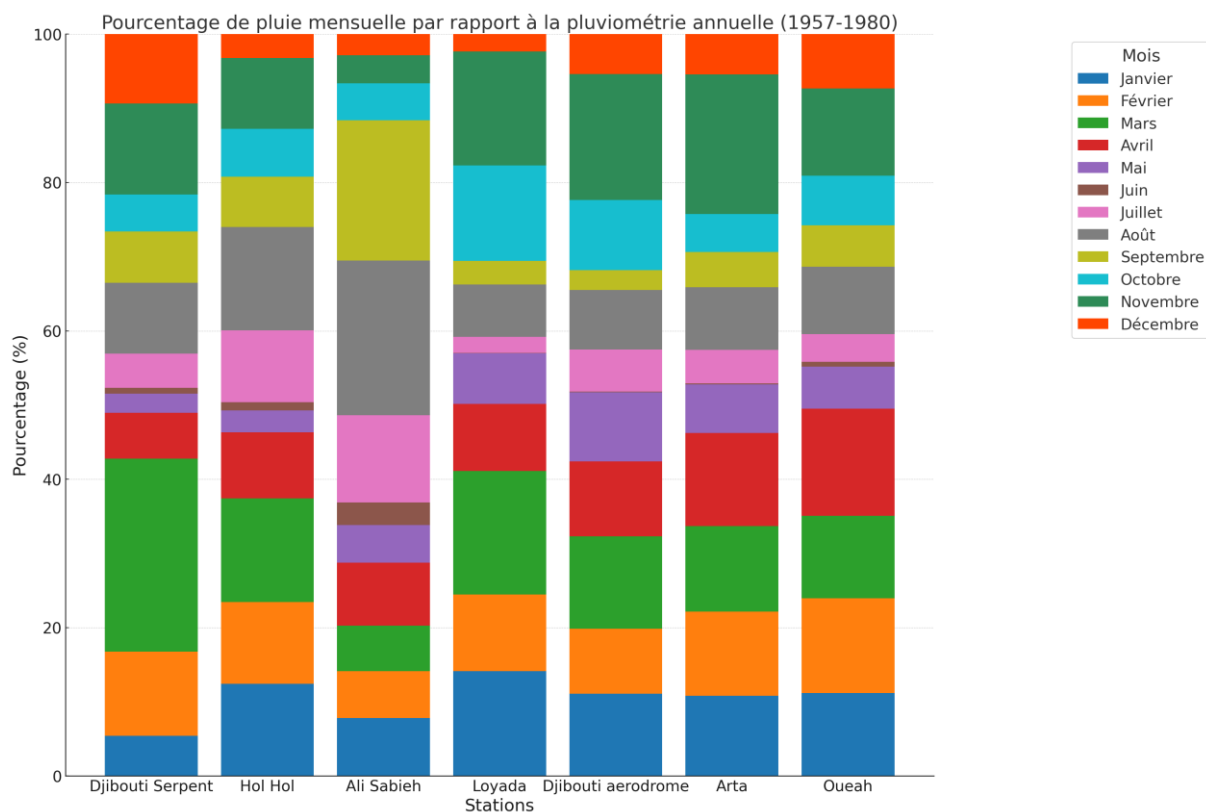


Figure 40: Contributions mensuelles aux cumuls annuels de précipitations sur la période commune (1957-1980) aux stations Djibouti Aéroport, Djibouti Serpent, Hol-Hol, Ali Sabieh, Loyada, Arta et Oueah

1.3.3. Tests de corrélation sur le rang et de Pettitt

L'exploration des séries temporelles de données pluviométriques au pas de temps mensuel a révélé des caractéristiques essentielles des régimes de précipitations et de leur dynamique au fil du temps (Tableau 19).

C'est surtout les mois de mai et juin, voire de septembre et octobre que les changements les plus notables s'observent : curieusement, les séries mensuelles auraient tendance à augmenter alors que les périodes saisonnières avaient plutôt tendance à diminuer. Cela tend à prouver que les mois, tous comme les saisons et les années peuvent être influencés par un ou deux événements pluvieux « exceptionnels » survenus au long de l'année et ce, d'autant plus que les événements pluvieux sont rares au cours de l'année. Les ruptures se concentrent plutôt vers la fin de la décennie 60 ou au début de la décennie 70. Ce résultat s'observe également en Afrique de l'Ouest mais de façon plus marquée.

Tableau 19: Tendance et rupture des données pluviométriques mensuelles

Station	Corrélation sur le rang (caractère aléatoire)				Test de Pettitt (absence de rupture)				
	99%	95%	90%	Variable	99%	95%	90%	Date	P-value
Djibouti Aéroport									
Janvier	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Non	2009	8,35E-02
Février	Oui	Oui	Oui		Non	Non	Non	1993	5,65E-03
Mars	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Avril	Oui	Oui	Oui	-	Oui	Non	Non	1993	1,18E-02
Mai	Non	Non	Non	3,49	Oui	Oui	Oui		
Juin	Non	Non	Non	7,51	Oui	Oui	Oui		
Juillet	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Non	1978	8,35E-02
Août	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Septembre	Non	Non	Non	4,48	Oui	Oui	Oui		
Octobre	Oui	Non	Non	2,11	Oui	Oui	Oui		
Novembre	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Décembre	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Ali Sabieh									
Janvier	Oui	Oui	Non	1,82	Oui	Oui	Oui		
Février	Oui	Non	Non	1,96	Oui	Oui	Oui		
Mars	Oui	Non	Non	2,51	Oui	Oui	Oui		
Avril	Non	Non	Non	2,67	Oui	Oui	Oui		
Mai	Non	Non	Non	2,75	Oui	Oui	Non	1972	7,81E-02
Juin	Oui	Oui	Non	1,66	Oui	Oui	Oui		
Juillet	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Août	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Septembre	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Octobre	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Novembre	Non	Non	Non	3,18	Oui	Oui	Oui		
Décembre	Non	Non	Non	3,16	Oui	Oui	Oui		
Arta									
Janvier	Oui	Oui	Non	1,82	Oui	Oui	Oui		
Février	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Mars	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Avril	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Mai	Non	Non	Non	3,59	Oui	Oui	Oui		
Juin	Non	Non	Non	5,89	Oui	Oui	Oui		
Juillet	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Août	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Non	1959	6,95E-02
Septembre	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Octobre	Non	Non	Non	2,97	Oui	Oui	Oui		
Novembre	Oui	Oui	Oui		Oui	Non	Non	1969	3,88E-02
Décembre	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Hol Hol									
Janvier	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Février	Oui	Oui	Non	1,75	Oui	Oui	Oui		
Mars	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		

Station	Corrélation sur le rang (caractère aléatoire)				Test de Pettitt (absence de rupture)				
	99%	95%	90%	Variable	99%	95%	90%	Date	P-value
Avril	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Mai	Non	Non	Non	4,40	Oui	Oui	Oui		
Juin	Non	Non	Non	6,06	Oui	Oui	Oui		
Juillet	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Non	1970	9,67E-02
Août	Oui	Non	Non	-2,35	Oui	Oui	Oui		
Septembre	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Octobre	Non	Non	Non	3,10	Oui	Oui	Oui		
Novembre	Oui	Oui	Oui		Oui	Non	Non	1968	1,46E-02
Décembre	Oui	Non	Non	2,07	Oui	Oui	Oui		
Loyada									
Janvier	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Février	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Mars	Oui	Non	Non	2,45	Oui	Oui	Oui		
Avril	Oui	Non	Non	2,27	Oui	Oui	Oui		
Mai	Non	Non	Non	3,63	Oui	Oui	Oui		
Juin	Non	Non	Non	7,40	Oui	Oui	Oui		
Juillet	Oui	Non	Non	2,21	Oui	Oui	Oui		
Août	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Non	1965	6,21E-02
Septembre	Oui	Non	Non	2,42	Oui	Oui	Oui		
Octobre	Non	Non	Non	2,71	Oui	Oui	Oui		
Novembre	Oui	Oui	Oui		Oui	Non	Non	1969	3,71E-02
Décembre	Oui	Non	Non	2,27	Oui	Oui	Oui		
Oueah									
Janvier	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Février	Oui	Non	Non	2,12	Oui	Oui	Oui		
Mars	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Avril	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Non	1967	7,73E-02
Mai	Non	Non	Non	3,94	Oui	Oui	Oui		
Juin	Non	Non	Non	3,98	Oui	Oui	Oui		
Juillet	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Août	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Septembre	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Non	1964	7,33E-02
Octobre	Non	Non	Non	3,44	Oui	Oui	Oui		
Novembre	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Non	1969	9,52E-02
Décembre	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Djibouti Serpent									
Janvier	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Février	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Mars	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Avril	Non	Non	Non	2,91	Oui	Oui	Oui		
Mai	Non	Non	Non	6,73	Oui	Oui	Oui		
Juin	Non	Non	Non	11,91	Oui	Oui	Oui		
Juillet	Non	Non	Non	2,99	Oui	Oui	Oui		
Août	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Septembre	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Octobre	Non	Non	Non	4,51	Oui	Oui	Oui		

Station	Corrélation sur le rang (caractère aléatoire)				Test de Pettitt (absence de rupture)				
	99%	95%	90%	Variable	99%	95%	90%	Date	P-value
Novembre	Oui	Oui	Non	1,79	Oui	Oui	Oui		
Décembre	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		

1.4. Données de précipitation au pas de temps journalier

Les premières données journalières de précipitation ne sont disponibles que depuis 1981 à la station Djibouti Aéroport. Il a fallu attendre 2013 pour avoir des mesures journalières à d'autres stations du réseau de l'ANM. Entre temps, le réseau SAP a été mis en place avec des données infrajournalières cependant les stations n'ont fonctionné qu'entre 2008 et 2013.

Nos analyses statistiques vont donc exclusivement se porter sur la station Djibouti Aéroport.

1.4.1. Analyse des pluies journalières

La station Djibouti Aéroport est la seule station à fournir des données journalières sur une série longue pour la période 1981-2021

L'analyse des précipitations journalières au cours de la période étudiée a permis de dégager plusieurs indicateurs statistiques essentiels, offrant un éclairage sur la dynamique pluviométrique sur la station en espérant qu'elle soit représentative d'un espace plus grand. Sur un total de 41 années, 835 jours ont enregistré des précipitations (précipitation non nulles), ce qui équivaut à un peu plus de deux années cumulées de pluie, ce qui correspond aussi à une moyenne de l'ordre de 20 jours de pluie par an. Ces observations suggèrent une sporadicité des jours de pluie caractéristique du régime aride de cette station.

En termes de cumul, la moyenne des précipitations journalières s'établit à 6.84 mm (Tableau 20). Toutefois, il convient de noter la grande variabilité des précipitations, comme le démontre un écart type conséquent de 17.11 mm. Cette large dispersion des données met en exergue la variabilité intrinsèque des événements pluvieux, allant de faibles averses à des pluies exceptionnelles et ce, tout au long de l'année.

La médiane des précipitations journalières se situe à 1.4 mm, révélant que la moitié des jours de pluie a enregistré des précipitations inférieures à cette valeur. Cet indicateur suggère une prévalence de jours avec des précipitations faibles.

Néanmoins, le pic des précipitations, atteignant 181.6 mm en une seule journée, témoigne de la potentialité d'événements pluvieux très forts.

Tableau 20: Statistiques descriptives de la station Djibouti Aéroport (période 1981-2021)

Variable	Valeurs
Moyenne (mm)	6.84
Médiane (mm)	1.40
Écart-type (mm)	17.10
Minimum (mm)	0.01
Maximum (mm)	181.60
Nbre de jour de pluie par an (jours)	20.3

Dans l'ensemble, ces statistiques descriptives illustrent non seulement la variabilité des précipitations journalières, mais aussi la dualité entre des épisodes pluvieux réguliers de faible cumul et des événements sporadiques mais fortement pluvieux. Ces observations sont cruciales pour comprendre les régimes pluviométriques locaux et peuvent avoir des implications significatives pour la gestion des ressources hydriques et la préparation aux événements extrêmes.

Nombre de jours de pluie

L'examen du nombre annuel de jours de pluie pour la période 1981-2021 offre une perspective temporelle de la variabilité pluviométrique (Figure 42). Le graphique montre une hétérogénéité interannuelle notable : certaines années ont connu une faible fréquence de jours pluvieux, avec moins de 20 jours enregistrant des précipitations, voire moins de 10 jours de pluie, tandis que d'autres années ont vu ce nombre presque doubler, approchant les 40 jours. Cette fluctuation interannuelle souligne des implications majeures pour la gestion de l'eau, l'agriculture, et la planification urbaine.

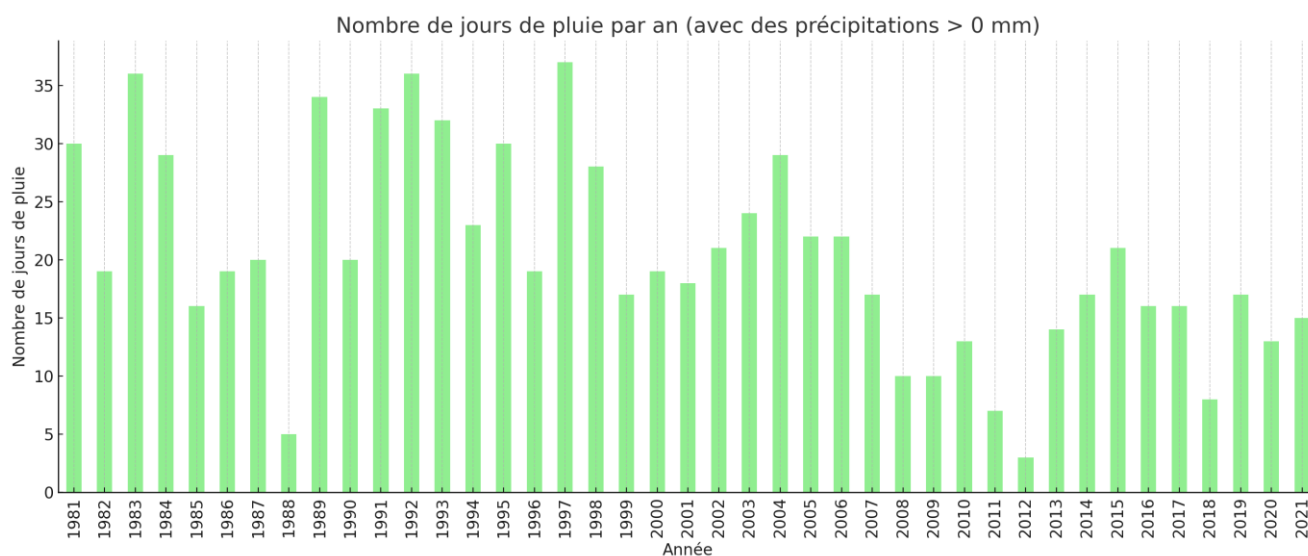


Figure 41: Nombre de jours de pluie par an (précipitations non nulles)

Entre 1981 et 2021, le nombre de jours de pluie annuel a diminué de façon significative : une rupture est mise en évidence autour de 2006 par le test de Pettitt (Tableau 21). Au niveau mensuel, des tendances s'observent mais qui ne correspondent pas à des modifications brutales (ruptures). Ces tendances seraient plutôt à la hausse sur les mois de mai, juin, juillet, septembre et décembre et plutôt à la baisse au mois de mars.

Tableau 21: Tendence et rupture des nombres de jours de pluie annuel et mensuel

Période	Corrélation sur le rang (caractère aléatoire)				Test de Pettitt (absence de rupture)				
	99%	95%	90%	Variable	99%	95%	90%	Date	P-value
Janvier	Oui	Oui	Oui		Oui	Non	Non	2009	2.71E-02
Février	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui	1996	
Mars	Non	Non	Non	-2.58335	Non	Non	Non	1999	1.36E-04

Période	Corrélation sur le rang (caractère aléatoire)				Test de Pettitt (absence de rupture)				
	99%	95%	90%	Variable	99%	95%	90%	Date	P-value
Avril	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui	2007	
Mai	Non	Non	Non	3.50436	Oui	Oui	Oui	2014	
Juin	Non	Non	Non	6.51452	Oui	Oui	Oui	2002	
Juillet	Non	Non	Non	2.80798	Oui	Oui	Oui	1999	
Août	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui	1997	
Septembre	Non	Non	Non	3.07755	Oui	Oui	Oui	2017	
Octobre	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui	2008	
Novembre	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui	2000	
Décembre	Oui	Oui	Non	1.70725	Oui	Oui	Oui	1988	
Annuel	Non	Non	Non	-3.45944	Non	Non	Non	2006	1.71E-04

Répartition des cumuls de précipitation journalière

L'exploration de la distribution des précipitations journalières lors des jours de pluie révèle plusieurs tendances intrinsèques à la dynamique pluviométrique de la région étudiée (Figure 43). Premièrement, une prédominance marquée de jours avec des précipitations légères, où les cumuls sont majoritairement inférieurs à 5 mm. Cette observation est congruente avec les caractéristiques climatiques de nombreuses régions arides ou semi-arides.

Deuxièmement, à mesure que le cumul des précipitations s'accroît, on note une décroissance progressive du nombre de jours qui enregistrent de tels événements. Cette tendance décroissante souligne la rareté des jours avec des précipitations plus marquées, reflétant la nature sporadique de ces épisodes plus intenses.

Enfin, bien que rares, il existe quelques jours caractérisés par des précipitations extrêmement intenses, avec un pic remarquable à 181.6 mm en une seule journée, ce qui est supérieur au cumul annuel moyen de la station de Djibouti aéroport ! Bien que rares, ces événements d'un cumul exceptionnel peuvent donc entraîner des répercussions significatives sur le cumul mensuel donc saisonnier, donc annuel.

Bien évidemment, de tels événements ont un impact non négligeable sur le milieu environnant et nécessitent une attention particulière dans le cadre de la gestion hydroclimatiques.

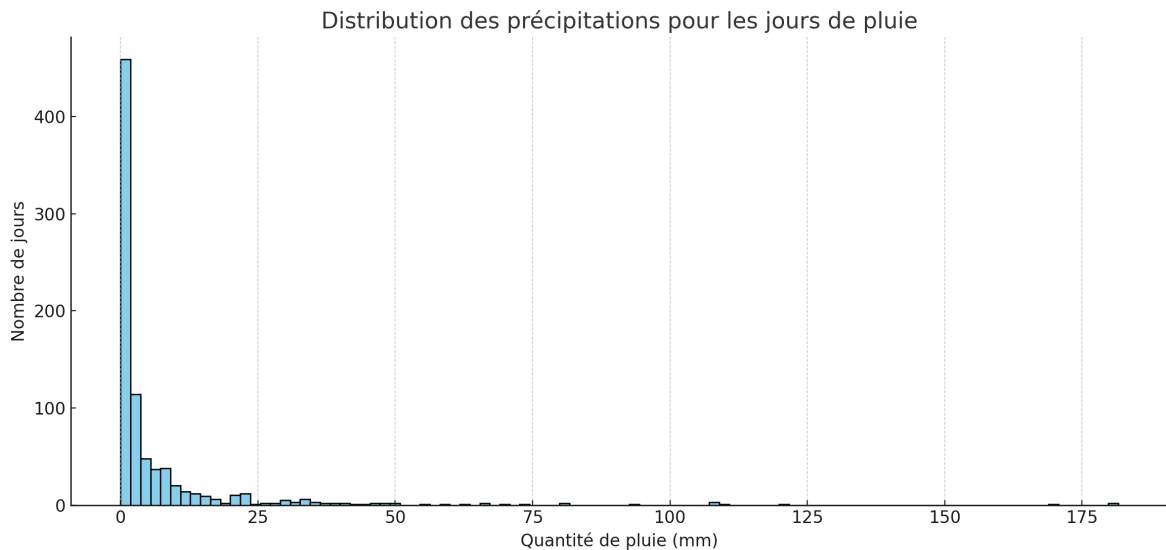


Figure 42: Répartition des cumuls de précipitation journalière (station Djibouti Aéroport 1981-2021)

Analyse des événements extrêmes à la station Djibouti Aéroport : « indices ETCCDI »

L'analyse des phénomènes hydroclimatiques extrêmes requiert souvent des outils méthodologiques robustes et pertinents pour une caractérisation précise des variabilités et tendances des précipitations. Parmi ces outils, les indices de précipitation de l'ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices - <https://www.wcrp-climate.org/etccdi>) se démarquent comme étant particulièrement adaptés à cette tâche (Tableau 22). Développés conjointement par plusieurs experts internationaux, ces indices offrent une approche standardisée pour quantifier et interpréter les changements dans les régimes de précipitations à différentes échelles temporelles et spatiales.

L'utilisation des indices de l'ETCCDI répond à plusieurs objectifs cruciaux en hydroclimatologie. Premièrement, ils permettent de décrire de manière synthétique des propriétés essentielles des précipitations, telles que leur intensité, fréquence, durée ou régularité. Cette capacité de synthèse facilite grandement la comparaison entre différentes régions ou périodes, tout en mettant en évidence des caractéristiques spécifiques à chaque contexte étudié.

Deuxièmement, en raison de leur conception standardisée, ces indices sont particulièrement propices aux études multi-sites ou multi-périodes, offrant ainsi une homogénéité dans l'analyse des données. Cela est d'autant plus précieux dans le contexte actuel de changement climatique, où la nécessité de suivre les évolutions des régimes pluviométriques à grande échelle est primordiale.

Enfin, en caractérisant des aspects tels que l'extrémité ou la persistance des événements pluvieux, ils apportent des informations cruciales pour la compréhension des risques associés, tels que les sécheresses ou les inondations. Ces informations sont essentielles pour la prise de décision dans des domaines tels que la gestion de l'eau, l'agriculture, ou la planification urbaine.

Pour offrir une visibilité claire sur les indices utilisés dans le cadre de cette étude, nous avons dressé un tableau récapitulatif ci-dessous. Ce tableau liste l'ensemble des indices sélectionnés, fournissant ainsi un aperçu direct et structuré des outils mobilisés pour notre analyse. Il sert de référence tout au long de ce travail, permettant aux lecteurs de comprendre facilement les paramètres étudiés et les méthodes employées pour caractériser les précipitations.

Tableau 22: Liste des 11 indices pluviométriques utilisés dans l'analyse des événements climatiques extrêmes

Acronyme	Nom de l'indice	Définition	Unité
PRCPTOT	Précipitation totale annuelle	Somme des précipitations quotidiennes sur une année	mm
SDII	Intensité moyenne d'un jour de pluie (> 1 mm)	Somme des précipitations des jours où la précipitation > 1mm divisé par le nombre de ces jours	mm/jour
R1mm	Nombre de jours de pluie > 1mm	Nombre de jours où la précipitation > 1mm	Jours
R10mm	Nombre de jours de pluie > 10mm	Nombre de jours où la précipitation > 10mm	Jours
R20mm	Nombre de jours de pluie > 20mm	Nombre de jours où la précipitation > 20mm	Jours
RX1day	Précipitation maximale en 1 jour	Maximum des précipitations quotidiennes sur une année	mm
RX5day	Précipitation maximale en 5 jours consécutifs	Maximum des précipitations sur 5 jours consécutifs sur une année	mm
CWD	Plus grand nombre de jours consécutifs de pluie (> 1mm)	Plus longue période avec précipitation quotidienne \geq 1mm	Jours
CDD	Plus grand nombre de jours consécutifs sans pluie (< 1mm)	Plus longue période avec précipitation quotidienne < 1mm	Jours
R95pTOT	Somme des jours de pluie très humides	Somme des précipitations des jours où la précipitation est supérieure au 95ème percentile	mm
R99pTOT	Somme des jours de pluie extrêmement humides	Somme des précipitations des jours où la précipitation est supérieure au 99ème percentile	mm

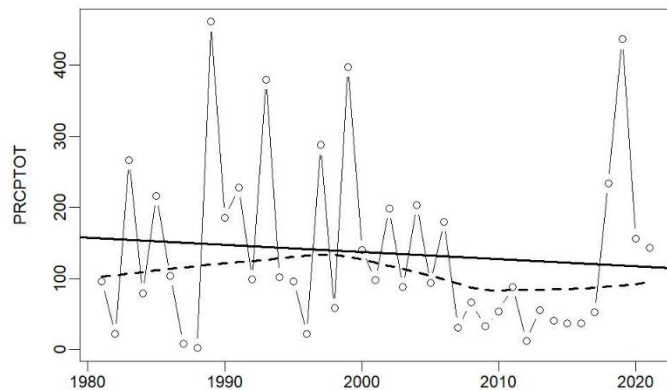
Dans le cadre d'une étude approfondie des régimes de précipitations, l'application des indices de précipitation de l'ETCCDI offre une perspective détaillée et nuancée des variations et tendances climatiques. Il est important de noter que tous ces indices de précipitation présentent des tendances statistiquement non significatives. Voici une synthèse des observations basées sur ces indices (Figure 44) :

- Hormis les indices CWD et R1 mm, aucun indice ne montre une tendance statistiquement significative : le nombre de jours consécutifs humides aurait diminué ; le nombre de jours

de pluie > 1 mm aurait diminué, ce que nous avons déjà observé sur le nombre de jours non pluvieux.

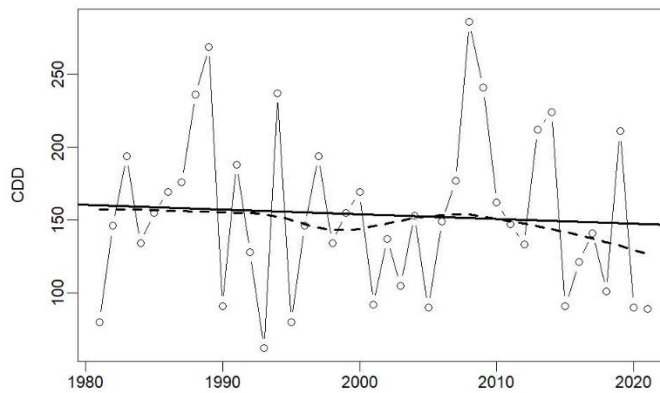
- Pour les autres indices, sur les 10-15 dernières années, les courbes montrent que l'année très pluvieuse de 2019 « attire » les tendances et fausse peut-être les analyses qui peuvent être faites. Assowe Dabar et al. (2022) qualifient ces 10-15 dernières années de plutôt très sèches.

PRCPTOT djibaero



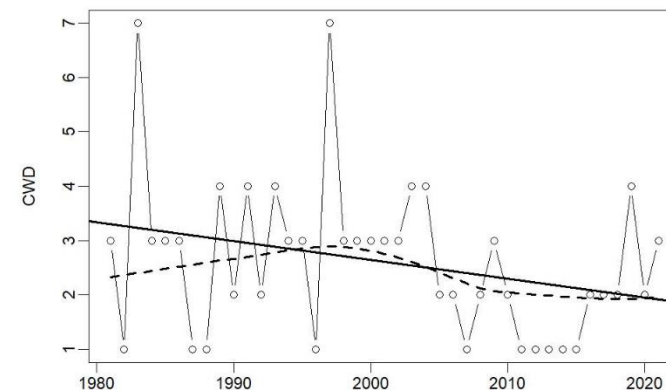
Year
R2= 1 p-value= 0.539 Slope estimate= -0.99 Slope error= 1.598

CDD djibaero



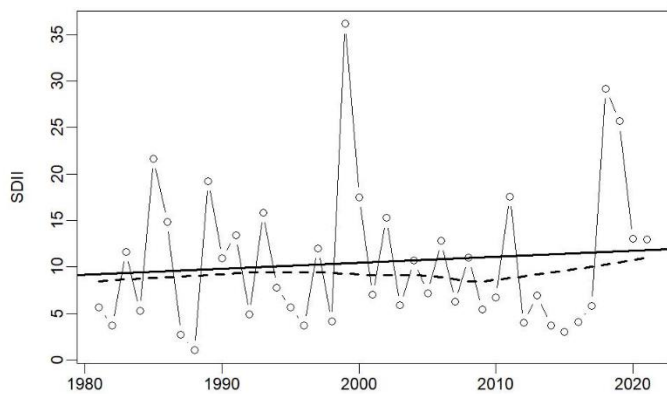
Year
R2= 0.5 p-value= 0.66 Slope estimate= -0.326 Slope error= 0.736

CWD djibaero



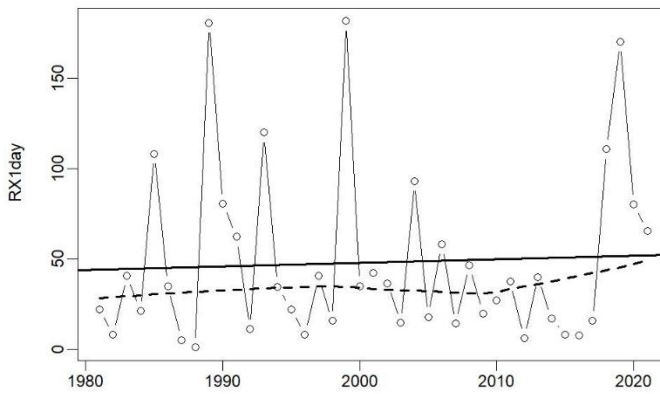
Year
R2= 8.3 p-value= 0.068 Slope estimate= -0.034 Slope error= 0.018

SDII djibaero



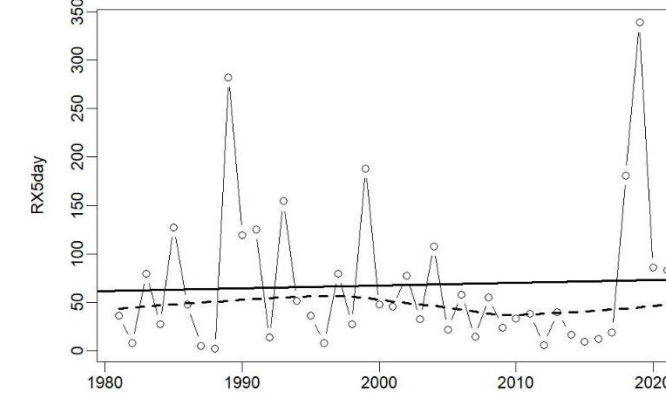
Year
R2= 1 p-value= 0.535 Slope estimate= 0.064 Slope error= 0.102

RX1day djibaero



Year
R2= 0.2 p-value= 0.759 Slope estimate= 0.197 Slope error= 0.64

RX5day djibaero



Year
R2= 0.2 p-value= 0.771 Slope estimate= 0.288 Slope error= 0.985

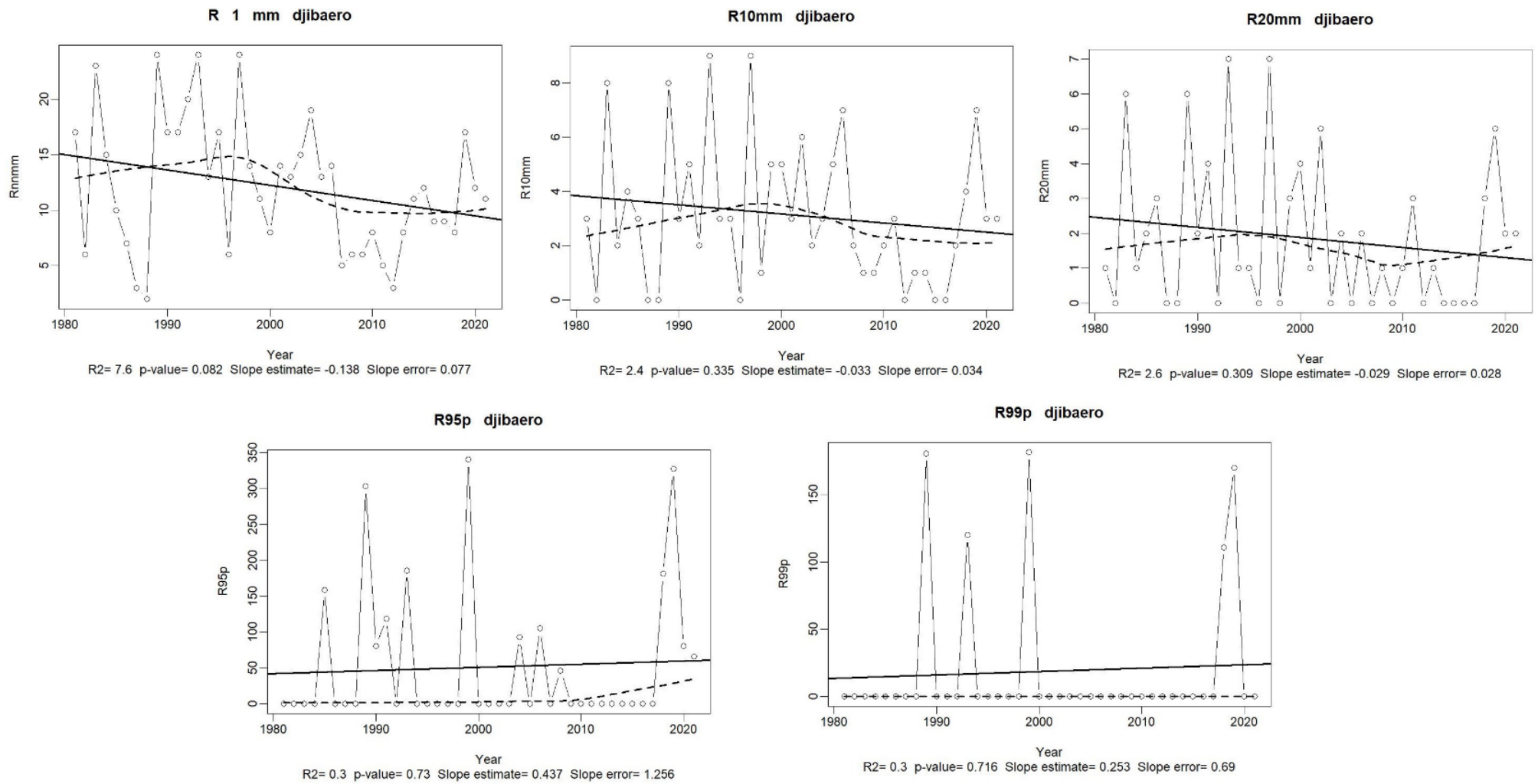


Figure 43: évolution des indices de précipitation utilisées dans l'analyse des événements climatiques

1.4.2. Analyse de la pluviométrie des stations Ali Sabieh, Hol-Hol, Loyada, Arta, Djibouti aéroport et Oueah sur la période 2013-2021

Tableau 23: Moyenne de la pluviométrie annuelle sur la période récente 2013-2021 comparée à la période 1957-1980

Période / station	Ali Sabieh	Hol-Hol	Arta	Oueah	Loyada	Djibouti aéroport
Moyenne 2013-2021 (mm)	127.8	84.8	99.7	44.26	28.7	134.1
Moyenne 1957-1980 (mm)	148.8	237.6	221.1	171.8	128.3	157.7

Sur la période 2013-2021, la pluviométrie moyenne annuelle est bien plus faible que sur la période historique 1957-1980, période commune d'observation des stations de notre zone d'étude (Tableau 23). Cette analyse met en évidence une tendance générale à la baisse des précipitations dans cette région sur les dernières décennies. Cependant, il est essentiel de noter que les causes de ces changements peuvent être multiples, allant des variations naturelles à long terme du climat aux impacts potentiels du changement climatique anthropique.

1.5. Données de précipitation aux pas de temps infrajournalières

Les études basées sur des données journalières, mensuelles ou annuelles fournissent des informations importantes sur les tendances générales et les variations saisonnières, l'analyse infra-journalière permet de dévoiler les subtilités des cycles pluviométriques à des échelles temporelles plus courtes. Ces nuances, souvent occultées dans les analyses à plus grande échelle, peuvent être déterminantes pour comprendre des phénomènes tels que les averses intenses, les orages soudains et d'autres événements météorologiques de courte durée, mais à fort impact. Dans un contexte de changement climatique, où la fréquence et l'intensité de tels événements peuvent être modifiées, une étude rigoureuse des données infrajournalières est non seulement pertinente, mais aussi essentielle pour anticiper et mitiger les risques associés. Cette section se consacrera donc à l'examen approfondi et à l'interprétation des données de précipitations infrajournalières, en cherchant à établir des liens avec les tendances climatiques régionales et globales.

1.5.1. Analyse pluviographique de la station PK50

Nombre d'évènement pluvieux

Les données pluviographiques nous permettent de travailler au niveau de l'évènement pluvieux. Un évènement pluvieux se définit par un certain nombre de caractéristiques. Pour notre part, nous avons choisi un cumul supérieur à 1 mm et une durée entre évènement pluvieux de 6 heures au cours de laquelle le cumul pluviométrique ne doit pas dépasser 1 mm.

La figure 45 montre l'évolution de nombre d'évènements pluvieux entre 1984 et 1993. On constate une certaine variabilité interannuelle de ce nombre d'évènements avec un minimum

en 1988 (1 événement avec moins de 25% de lacunes durant cette année) et un maximum l'année suivante en 1989 (17 événements avec aussi moins de 25% de lacunes durant cette année). Malheureusement aucune mesure au seau ou donnée pluviométrique à un poste voisin ne peut confirmer le bon fonctionnement du pluviographe.

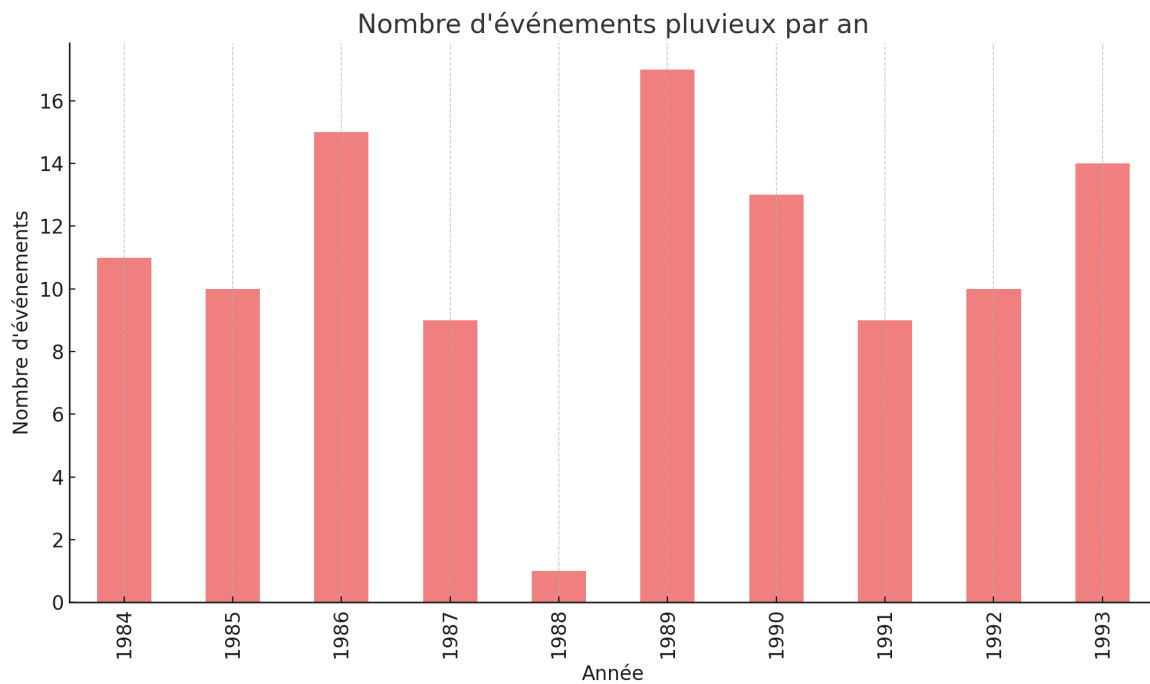


Figure 44: Nombre d'évènements pluvieux par an pour la station PK50 (sur la période 1984-1993)

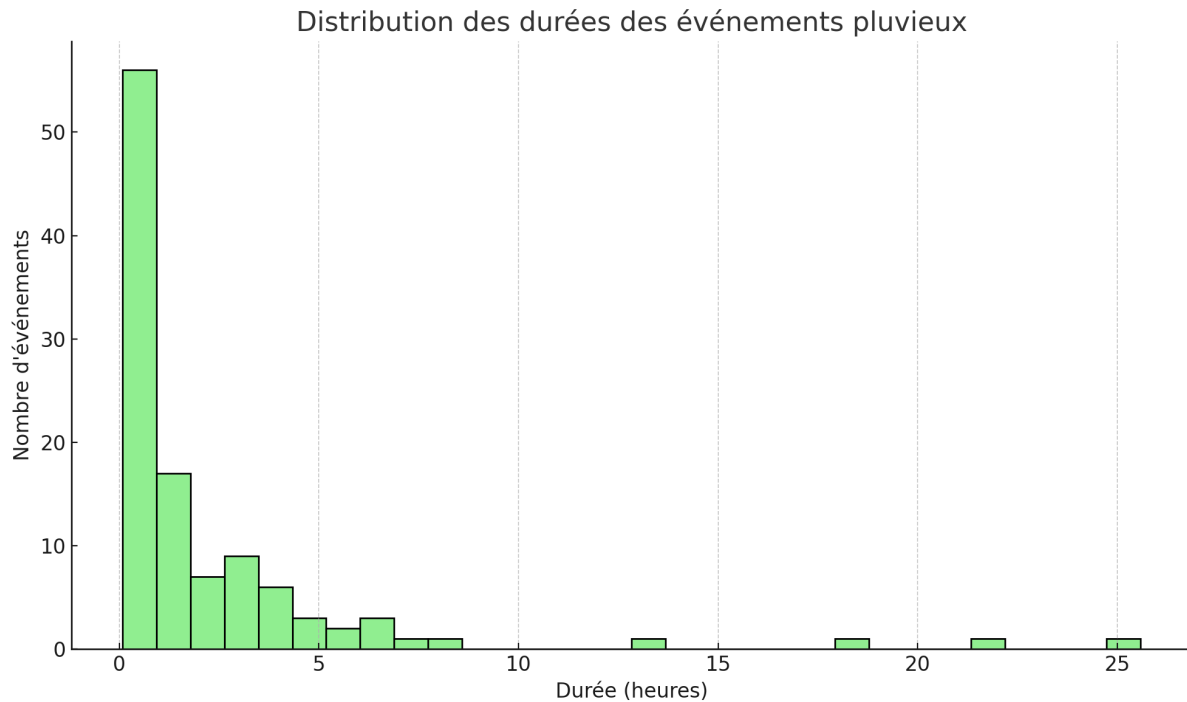


Figure 45: Distribution des durées des événements pluvieux de la station PK50 (période 1984-1993)

La figure 46 illustre la distribution des durées des événements pluvieux. Une grande majorité des événements a une durée inférieure à 1-2 heures, indiquant que la plupart des épisodes pluvieux sont de courte durée. Cependant, il existe quelques événements qui durent plus longtemps, s'étendant jusqu'à 20 heures ou plus. Cette observation suggère que bien que la plupart des événements pluvieux soient de brèves averses, il existe également des épisodes pluvieux plus prolongés, qui peuvent être un signe d'une origine météorologique très différente et qui avoir des implications significatives en termes d'accumulation d'eau et de gestion des ressources hydriques.

Analyse des cumuls des événements

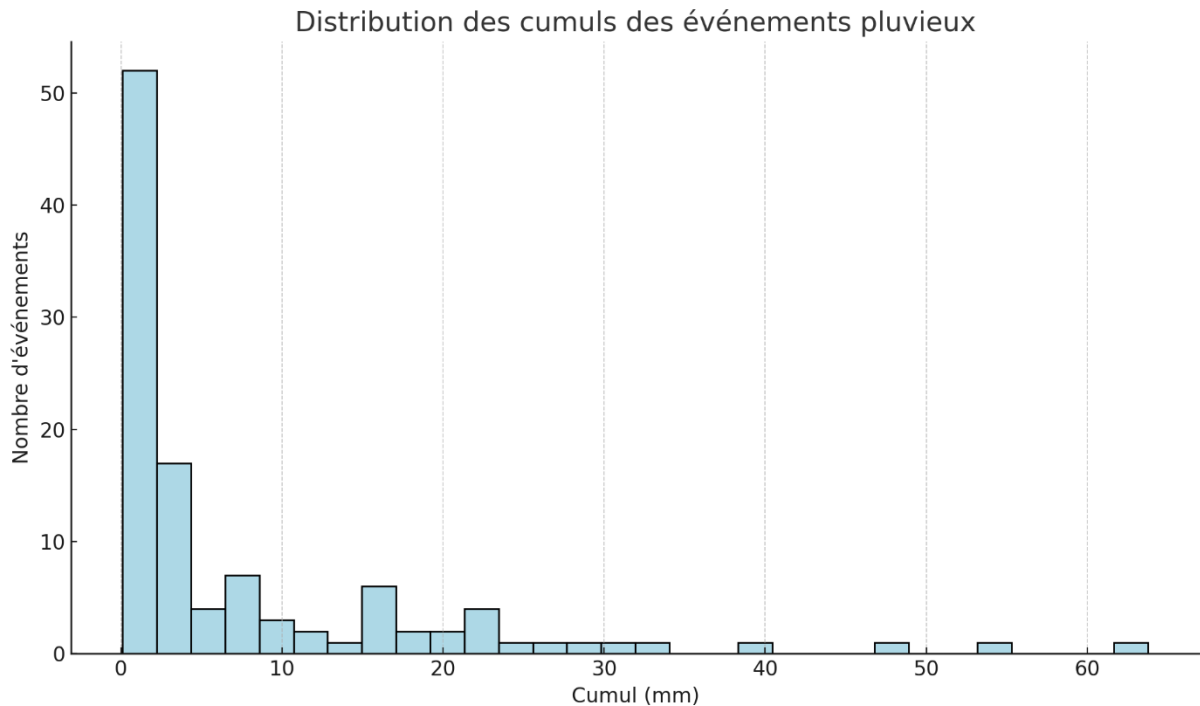


Figure 46: Distribution des cumuls des événements pluvieux de la station PK50 (sur la période 1984-1993)

La figure 47 montre que la majorité des événements pluvieux ont des cumuls de précipitations inférieurs à 5 mm. Il existe quelques événements bien moins fréquents avec des cumuls de précipitations plus élevés, atteignant jusqu'à plus de 60 mm.

Analyse des cumuls en fonction des durées

La figure 48 illustre comment les cumuls de précipitations évoluent en fonction de la durée des événements. Il n'y a pas une relation linéaire directe entre les 2 variables, ce qui implique que les dynamiques des pluies peuvent être très différentes d'un événement pluvieux à un autre : l'événement le plus pluvieux a duré 6-7 heures et a cumulé plus de 60 mm de pluie : l'événement le plus long, environ 25 heures, n'a cumulé que 12-13 mm de pluie.

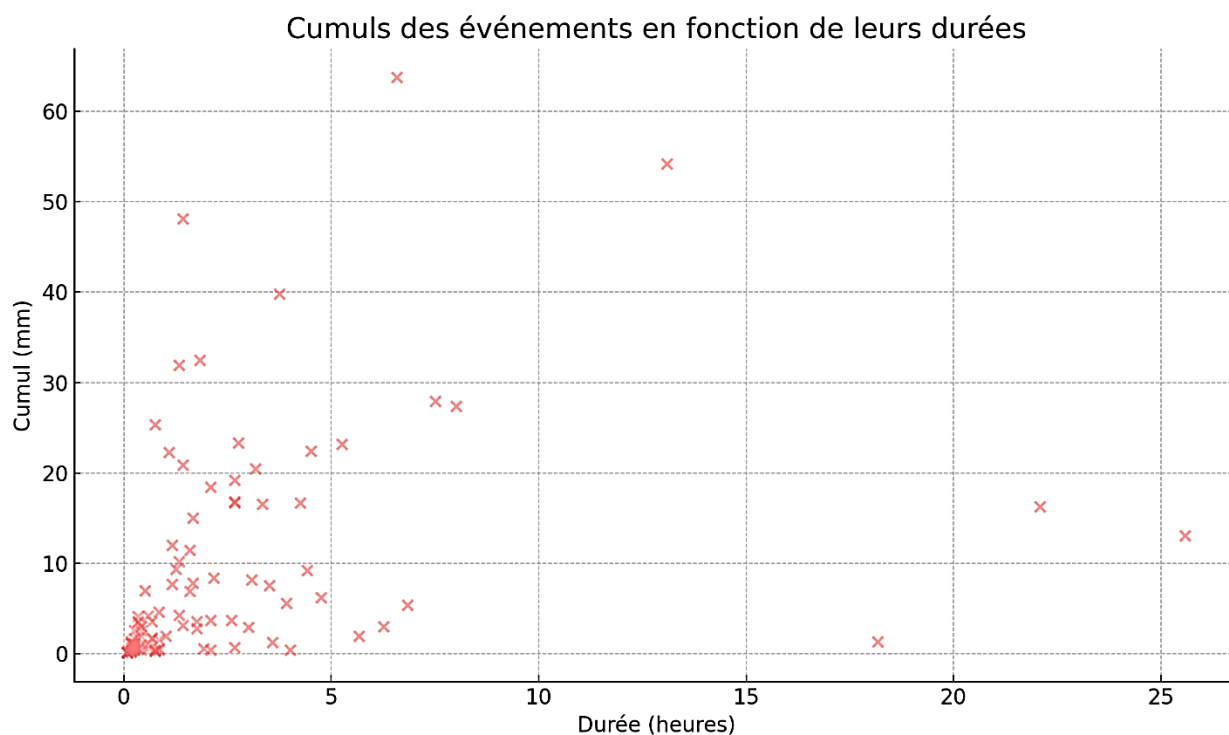


Figure 47: Cumuls des événements en fonction de leur durée à la station PK50 (période 1984-1993)

1.5.2. Courbes HDF/IDF

Le nombre d'années disponibles étant faible (# 10 ans), avec également des lacunes, les résultats sont donc donnés ici plus à titre informatif qu'autre chose: l'OMM fixe une période d'analyse d'au moins 30 ans pour que les résultats soient significatifs et « normés ».

Ces résultats permettent cependant d'avoir un ordre de grandeur des valeurs de hauteur/intensité qu'il faudrait utiliser pour des dimensionnements d'infrastructures hydrauliques dans la région de la station PK50. Pour tout autres régions de la République de Djibouti, il faudrait dépouiller les autres pluviogrammes et mener la même étude et, si possible, sur un temps long.

Quantiles de hauteurs/intensité de pluies sur différentes durées de pluie

Des ajustements des quantiles des hauteurs/Intensités de pluie pour différentes durées de pluie ont été calculés en s'appuyant sur une distribution exponentielle (tableau 24 et tableau 25). Rappelons que la méthode utilisée est celle du CIEH (1984) qui effectue ces ajustements sur un nombre d'événements pluvieux égal au triple d'années d'observations.

Tableau 24: Quantiles de cumuls de hauteurs pour différentes durées de pluie ajustés par une loi exponentielle de paramètres x_0 et s – Station PK50 (sur la période 1984-1993)

Durée Pluie (mn)	Par x_0	Par s	Hauteur_QA_1an (mm)	Hauteur_QA_2ans (mm)	Hauteur_QA_5ans (mm)	Hauteur_QA_10ans (mm)
5	4.32	2.60	4.3	6.1	8.5	10.3
10	7.23	4.39	7.2	10.3	14.3	17.3
15	9.81	5.91	9.8	13.9	19.3	23.4
30	13.72	7.98	13.7	19.2	26.6	32.1

45	16.31	9.05	16.3	22.6	30.9	37.2
60	17.84	9.22	17.8	24.2	32.7	39.1
90	19.20	9.47	19.2	25.8	34.4	41.0
120	20.04	9.67	20.0	26.7	35.6	42.3
240	21.86	10.13	21.9	28.9	38.2	45.2
360	23.46	12.76	23.5	32.3	44.0	52.8
720	24.17	13.36	24.2	33.4	45.7	54.9
1440	24.42	13.39	24.4	33.7	46.0	55.2

Tableau 25: Quantiles d'intensité de pluie pour différentes durées de pluie ajustés par une loi exponentielle de paramètres x_0 et s – Station PK50 sur la période 1984-1993)

Durée Pluie (mn)	Par x_0	Par s	Intensité_QA_ 1an (mm/h)	Intensité_QA_ 2ans (mm/h)	Intensité_QA_ 5 ans (mm/h)	Intensité_QA_ 10ans (mm/h)
5	4.32	2.60	51.8	73.5	102.0	123.7
10	7.23	4.39	43.4	61.7	85.8	104.1
15	9.81	5.91	39.3	55.6	77.3	93.7
30	13.72	7.98	27.4	38.5	53.1	64.2
45	16.31	9.05	21.7	30.1	41.2	49.5
60	17.84	9.22	17.8	24.2	32.7	39.1
90	19.20	9.47	12.8	17.2	23.0	27.3
120	20.04	9.67	10.0	13.4	17.8	21.1
240	21.86	10.13	5.5	7.2	9.5	11.3
360	23.46	12.76	3.9	5.4	7.3	8.8
720	24.17	13.36	2.0	2.8	3.8	4.6
1440	24.42	13.39	1.0	1.4	1.9	2.3

Ajustements courbes hauteur/Intensité – Durée – Fréquence (HDF/IDF)

Poursuivant la méthode proposée par le CIEH (Puech et Chabi-Gonni, 1984), des ajustements de Montana sur les quantiles calculés plus haut ont été effectués (Tableau 26). Ces calculs ont été réalisés en faisant une distinction entre événements de moins de 1 heure et de plus de 2 heures (figures 49, 50 et tableaux 27, 28).

Tableau 26: Valeurs des paramètres des courbes IDF/HDF ajustées par une loi de Montana : durée de pluie < 1 heure et > 2 heures - $I = a*t^{(-b)}$ ou $H = a*t^{(1-b)}$

Période de retour	a	b	R² ajustement Montana
< 1 heure			
1 ans	1.91	0.43	0.98
2 ans	2.80	0.45	0.97
5 ans	3.98	0.46	0.97
10 ans	4.88	0.47	0.97
> 2 heures			

1 ans	14.07	0.92	0.87
2 ans	17.21	0.90	0.86
5 ans	21.51	0.89	0.84
10 ans	24.81	0.88	0.83

Tableau 27: Quantiles de cumuls de hauteurs de pluie pour différentes durées de pluie estimés par la loi de Montana – Station PK50 (sur la période 1984-1993) – pluies de durée < 1h et > 2h

Durée Pluie (mn)	Montana_1an (mm)	Montana_2ans (mm)	Montana_5ans (mm)	Montana_10ans (mm)
5	4.7	6.8	9.5	11.5
10	7.0	9.9	13.8	16.7
15	8.8	12.4	17.1	20.7
30	13.1	18.2	24.9	30.0
45	16.4	22.7	31.0	37.3
60	19.3	26.6	36.2	43.5
90				
120	20.6	27.4	36.4	43.2
240	21.8	29.3	39.3	46.9
360	22.5	30.5	41.1	49.1
720	23.8	32.6	44.4	53.2
1440	25.2	34.9	47.9	57.7

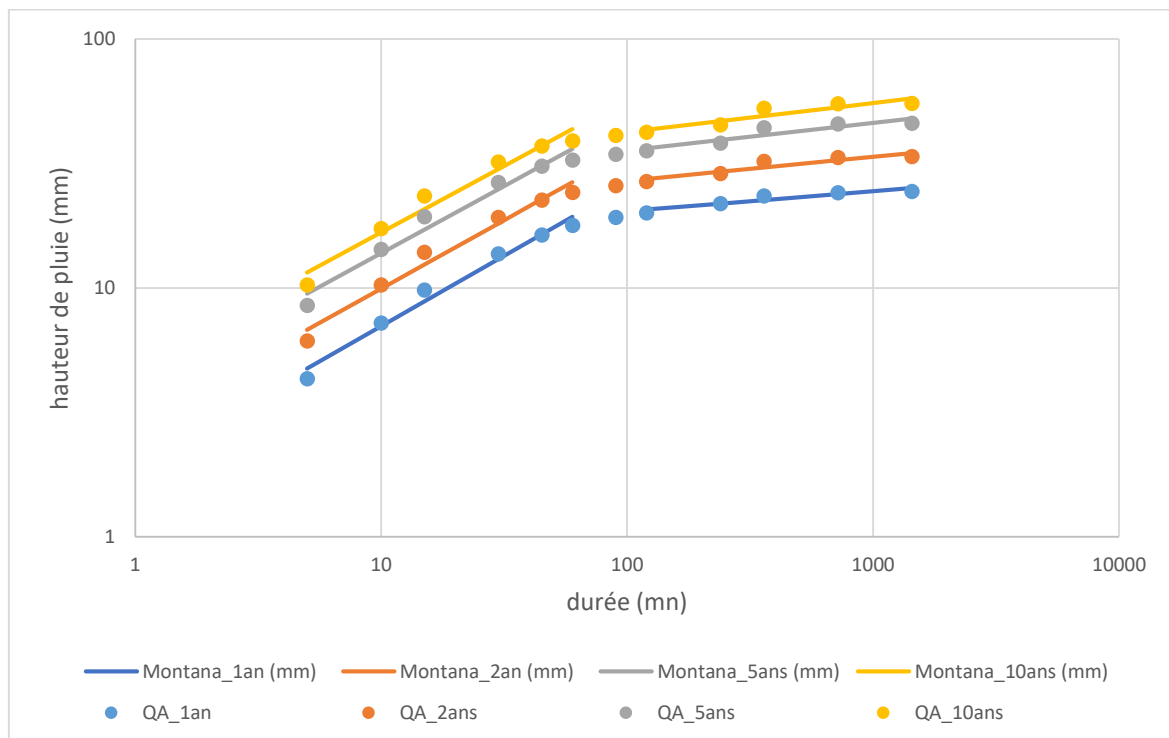


Figure 48: Ajustements de Montana de la courbe HDF (durée de pluie <1h et >2h) de la station PK50 (période 1984-1993) et quantiles qui ont servi aux ajustements

Tableau 28: Quantiles d'intensité de pluie pour différentes durées de pluie estimés par la loi de Montana – Station PK50 (sur la période 1984-1993) – pluies de durée < 1h et > 2h

Durée Pluie (mn)	Montana_1an (mm/h)	Montana_2ans (mm/h)	Montana_5ans (mm/h)	Montana_10ans (mm/h)
5	56.8	81.4	113.8	138.3
10	42.1	59.6	82.7	100.2
15	35.3	49.6	68.6	82.9
30	26.1	36.3	49.8	60.0
45	21.9	30.3	41.3	49.7
60	19.3	26.6	36.2	43.5
90				
120	10.3	13.7	18.2	21.6
240	5.5	7.3	9.8	11.7
360	3.8	5.1	6.9	8.2
720	2.0	2.7	3.7	4.4
1440	1.0	1.5	2.0	2.4

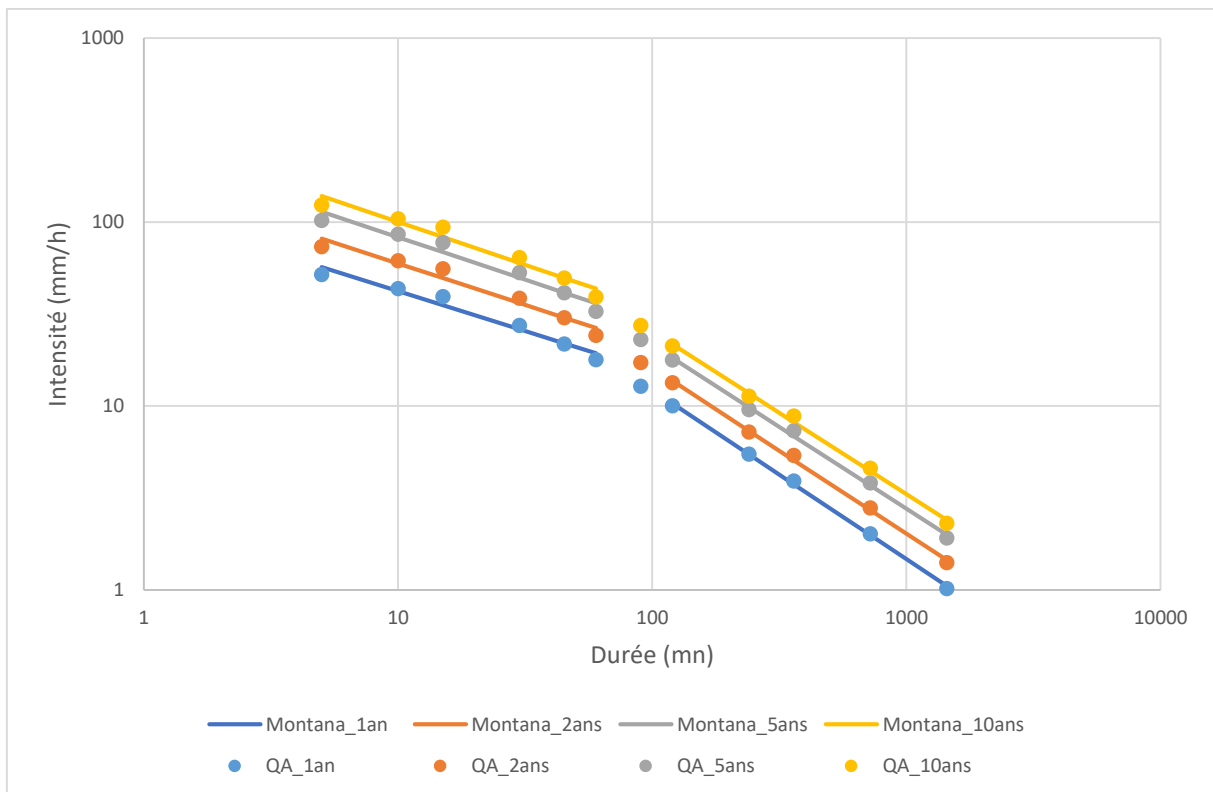


Figure 49: Les ajustements de Montana de la courbe IDF (<1h et >2h) de la station PK50 (période 1984-1993) et quantiles qui ont servi aux ajustements

Nous observons deux faisceaux de droites sensiblement parallèles (les paramètres b sont très proches quelle que soit la période de retour). Pour ce qui est de la zone de raccordement pour

ces faisceaux de droite, elle est variable en fonction de la période de retour et des ajustements faits ; les utilisateurs devront « interpoler par eux-mêmes les valeurs qui les intéressent.

Le découpage proposé par le CIEH (> 1 heure et > 2 heures) à partir d'observations faites sur l'Afrique de l'Ouest ne nous satisfait pas vraiment et nous proposons un autre découpage : un premier ajustement pour des durées de pluie < 30 mn et un second ajustement des pluies pour des durées de pluie > 60 mn (figures 51, 52 et tableaux 30, 31).

Tableau 29: valeurs des paramètres des courbes IDF/HDF ajustées par une loi de Montana :
durée de pluie < 30 mn et > 60 mn - $I = a \cdot t^{(-b)}$ ou $H = a \cdot t^{(1-b)}$

Période de retour	a	b	R ² ajustement Montana
< 30 min			
1 ans	1,58	0,36	0,99
2 ans	2,27	0,36	0,99
5 ans	3,17	0,36	0,98
10 ans	3,86	0,36	0,98
> 60 min			
1 ans	13,73	0,92	0,93
2 ans	17,33	0,90	0,91
5 ans	22,16	0,90	0,90
10 ans	25,84	0,89	0,89

Tableau 30: Quantiles de cumuls de hauteurs de pluie pour différentes durées de pluie estimés par la loi de Montana – Station PK50 (sur la période 1984-1993) – pluies de durée < 30mn et > 60mn

Durée Pluie (mn)	Montana_1an (mm)	Montana_2ans (mm)	Montana_5ans (mm)	Montana_10ans (mm)
5	4.5	6.4	8.9	10.8
10	7.1	10.0	13.9	16.8
15	9.2	13.0	18.0	21.8
30	14.4	20.3	28.1	33.9
45				
60	19.4	25.7	34.1	40.5
90	20.0	26.7	35.5	42.4
120	20.5	27.4	36.6	43.8
240	21.8	29.3	39.4	47.2
360	22.5	30.5	41.1	49.4
720	23.9	32.6	44.2	53.3
1440	25.3	34.8	47.6	57.5

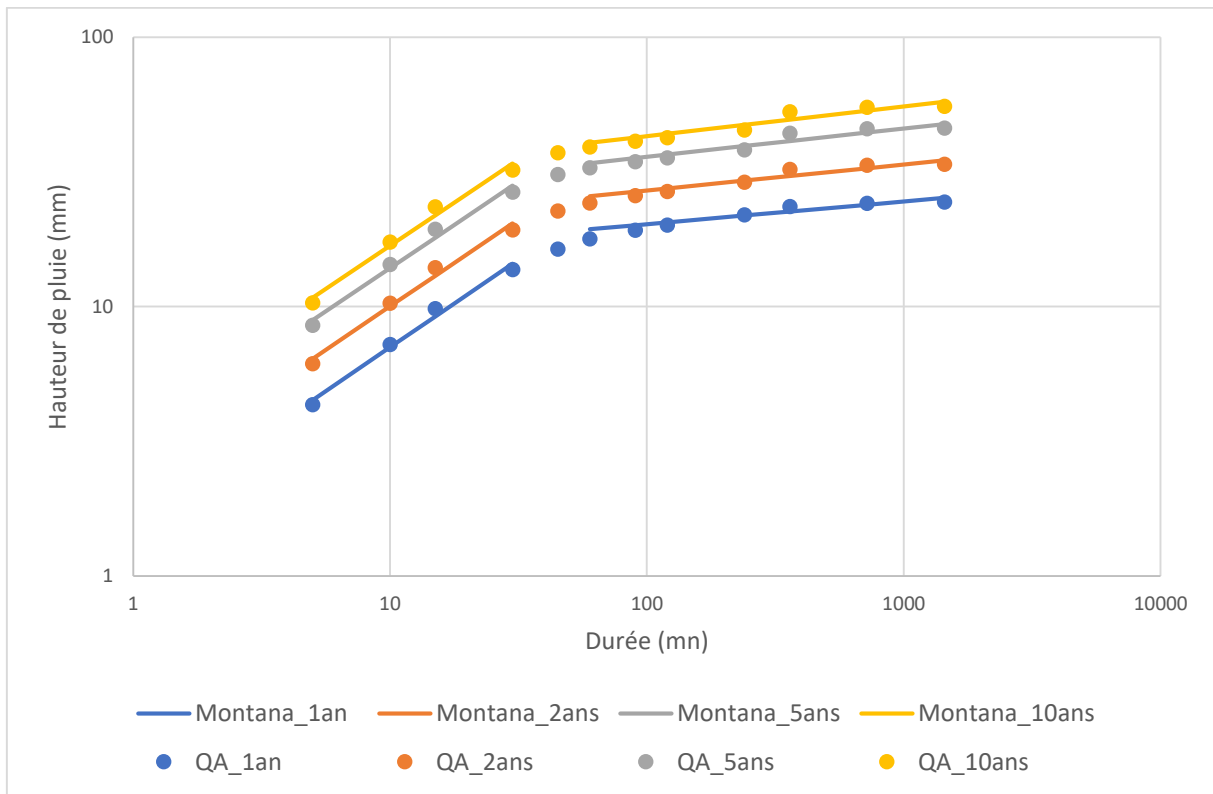


Figure 50: Les ajustements de Montana de la courbe HDF (<30mn et >60mn) de la station PK50 (période 1984-1993) et quantiles qui ont servi aux ajustements

Tableau 31: Quantiles d'intensités de pluie pour différentes durées de pluie estimés par la loi de Montana – Station PK50 (sur la période 1984-1993) – pluies de durée < 30mn et > 60mn

Durée Pluie (mn)	Montana_1an (mm/h)	Montana_2ans (mm/h)	Montana_5ans (mm/h)	Montana_10ans (mm/h)
5	54.0	76.8	106.8	129.5
10	42.3	60.0	83.3	100.9
15	36.7	52.0	72.0	87.1
30	28.8	40.6	56.1	67.8
45				
60	19.4	25.7	34.1	40.5
90	13.4	17.8	23.7	28.3
120	10.3	13.7	18.3	21.9
240	5.4	7.3	9.9	11.8
360	3.8	5.1	6.9	8.2
720	2.0	2.7	3.7	4.4
1440	1.1	1.5	2.0	2.4

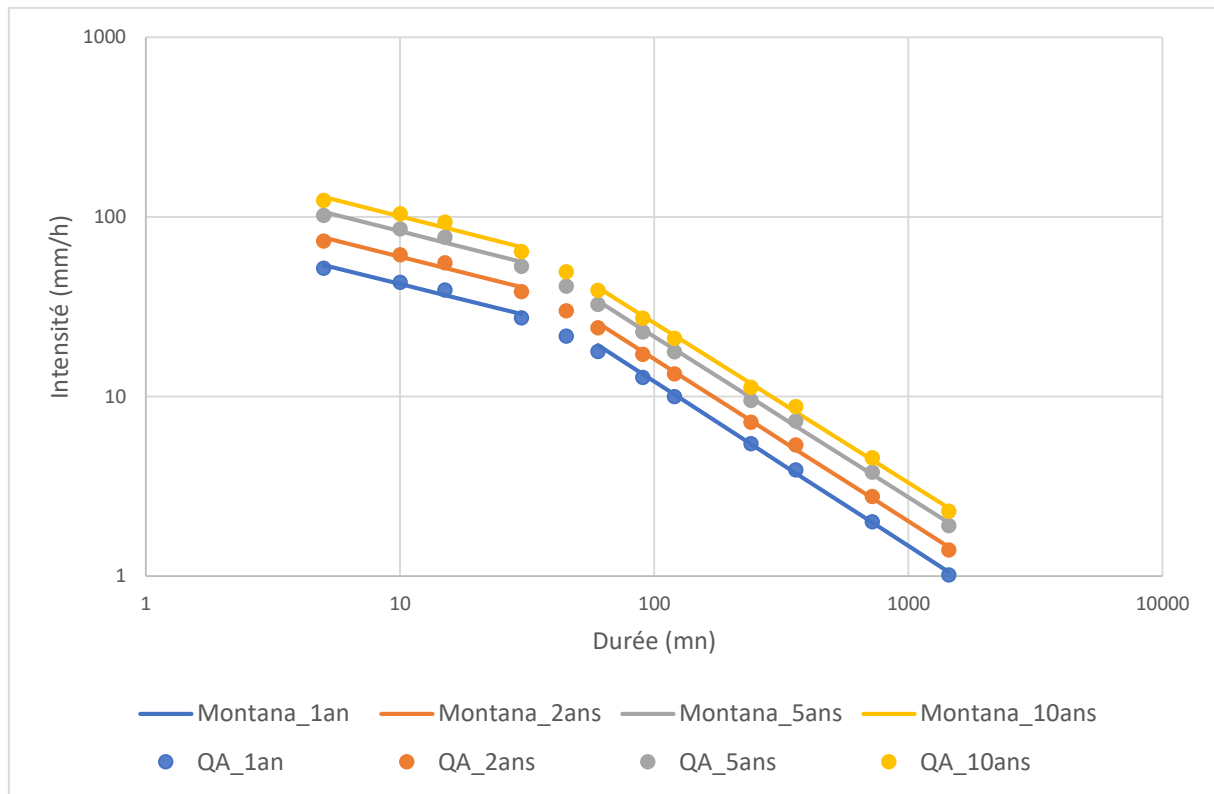


Figure 51: Les ajustements de Montana de la courbe IDF (<30mn et >60mn) de la station PK50 (période 1984-1993) et quantiles qui ont servi aux ajustements

L'interpolation au sein de la zone de raccordement nous semble plus aisé.

1.6. Conclusion partielle

Au terme de l'analyse des données de précipitation pour la zone étudiée, plusieurs conclusions majeures émergent. Le climat aride de la région se caractérise par des épisodes pluvieux rares, se traduisant par une pluviométrie annuelle relativement faible. L'examen des séries temporelles a révélé d'importantes lacunes dans les données, rendant ainsi difficile toute analyse objective et exhaustive. Néanmoins, il est impératif de s'appuyer sur les informations disponibles, tout en tenant compte de leurs limites. Une variabilité interannuelle notable a été observée, qui pourrait être attribuée à un ou deux événements spécifiques. Sur le territoire étudié, aucune particularité locale n'a été décelée en termes de distribution pluviométrique, suggérant une cohérence régionale des événements pluvieux. De plus, aucune tendance ou rupture nette n'a été identifiée au sein des stations ; et si de telles tendances étaient présentes, elles pourraient être influencées par des événements isolés. En se concentrant sur les jours pluvieux extrêmes, définis selon les critères de l'ETCCDI, on observe peu de caractéristiques notables, bien que le nombre de jours consécutifs humides semble avoir diminué, tout comme le nombre de jours présentant des précipitations supérieures à 1 mm. L'examen des données infrajournalières met en évidence une prédominance d'événements pluvieux de courte durée avec une pluviométrie limitée, bien qu'il existe également des épisodes extrêmes. Enfin, une tentative a été faite pour établir des courbes IDF/HDF. Cependant, il est crucial de souligner que ces courbes sont purement indicatives, car elles n'ont pas été élaborées selon des normes strictes et reconnues.

2. Analyse des données de température

L'étude des températures est essentielle pour comprendre les variations climatiques et anticiper les potentiels impacts socio-économiques. La seule station où des mesures de température sont effectuées est la station de Djibouti-Aérodrome : T_{min}, T_{max} et T_{mean}. Les premières mesures remontent à 1966. Nous allons analyser les variations de température sur une période de 55 ans, 1966-2020.

2.1. Données de température au pas de temps annuel

La figure 53 montre l'évolution annuelle des températures à Djibouti pour la période de 1966 à 2020.

1. **T_{min} (Température minimale)**: La courbe bleue représente les températures minimales enregistrées chaque année. On observe une tendance générale à la hausse, bien qu'il y ait eu quelques variations. Cela signifie que la température la plus basse de la journée a généralement augmenté au fil des années. Généralement, c'est la T°C mesurée au moment où le soleil commence à poindre à son lever, la fin de la nuit.
2. **T_{max} (Température maximale)**: La courbe orange représente les températures maximales. Comme pour les températures minimales, nous observons également une tendance à la hausse. Les températures diurnes ou les températures les plus élevées de la journée ont également connu une augmentation générale, bien que, là encore, des variations annuelles soient présentes. Généralement, c'est une T°C mesurée dans la journée quand le soleil est à son zénith.
3. **T_{mean} (Température moyenne)**: La courbe grise montre la température moyenne annuelle. Comme attendu puisque T_{min} et T_{max} augmentent, elle suit une tendance similaire à celle des températures minimales et maximales, avec une augmentation générale au fil des années.

Djibouti semble donc avoir connu une augmentation générale des températures au cours des dernières décennies, ce qui est en accord avec les tendances mondiales de réchauffement climatique. La variabilité interannuelle est plus forte sur les T_{min} et diminue vers les T_{max}.

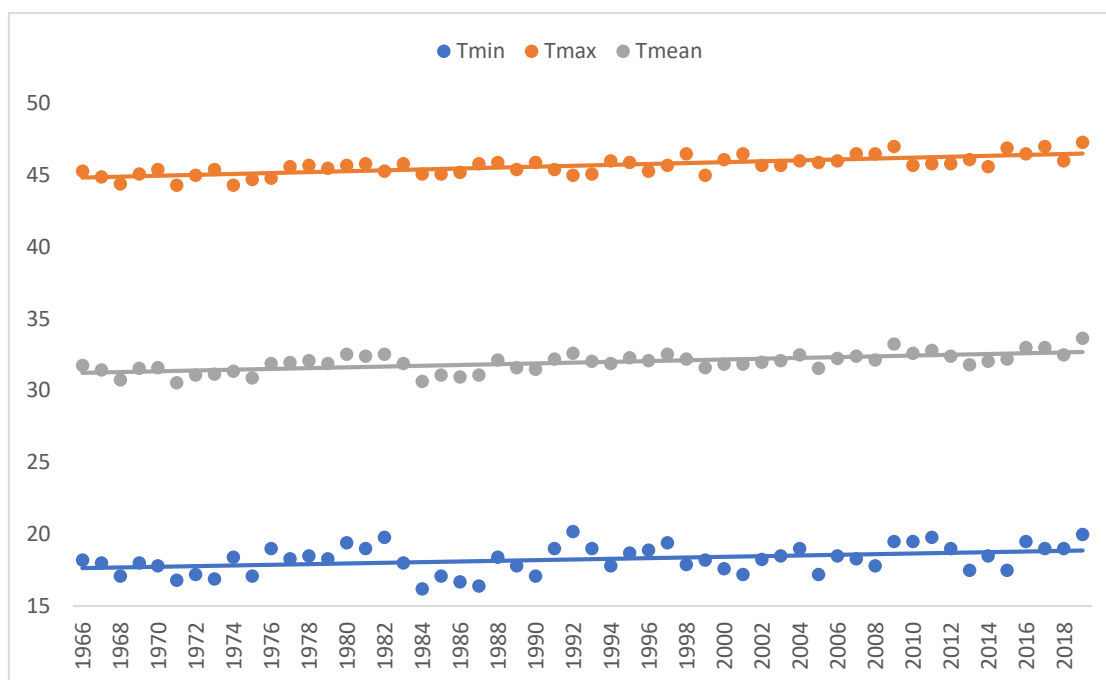


Figure 52: Evolutions annuelles des températures à Djibouti Aéroport au pas de temps annuel (1966-2019)

Pour garantir ces tendances, nous avons jugé essentiel d'entreprendre une analyse objective (Tableau 32). Dans ce contexte, des tests de corrélation sur le rang et de Pettitt ont été appliqués à ces séries de données de température. Ces tests, offrent une évaluation statistiquement significative des changements potentiels, permettant ainsi de distinguer entre les variations naturelles et les tendances significatives.

Tableau 32: Tendances et ruptures des données de température au pas de temps annuel (Djibouti Aéroport 1966-2019)

Station Djibouti Aéroport	Corrélation sur le rang (caractère aléatoire)				Test de Pettitt (absence de rupture)				
	99%	95%	90%	Variable	99%	95%	90%	Date	P-value
Tmax	Non	Non	Non	6,39	Non	Non	Non	1993	7,79E-06
Tmean	Non	Non	Non	5,38	Non	Non	Non	1990	1,80E-04
Tmin	Non	Non	Non	3,29	Oui	Non	Non	1990	1,99E-02

Les tests de corrélation sur le rang et de Pettitt confirment donc bien les observations faites sur la figure 53. Nous observons des tendances pour les trois variables (Tmax, Tmean et Tmin) et des ruptures sont observées en 1990 et 1993. Nous avons calculé les taux annuels d'accroissement pour Tmin, Tmax et Tmean sur la période 1966-2019 à Djibouti aéroport :

1. **Tmin** : Augmente d'environ 0.023°C par an.
2. **Tmax** : Augmente d'environ 0.031 °C par an.
3. **Tmean** : Augmente d'environ 0.027°C par an.

Ces augmentations sont légères puisque sur 10 ans, l'augmentation est de l'ordre de 0.2 à 0.3°C et sur 100 ans de 2 à 3°C.

Il est intéressant de noter que comparativement à la région sahélienne de l'Afrique de l'Ouest dans un contexte climatique assez proche de ce que l'on peut observer à Djibouti, c'est la Tmax de la journée qui augmente le plus alors qu'au Sahel, c'est la Tmin qui augmente le plus. L'écart de température entre les Tmin et les Tmax augmentera d'environ 1°C sur 100 ans. L'augmentation des températures peut avoir des implications dans de nombreux domaines, tels que l'agriculture (par exemple, les périodes de croissance des cultures peuvent être affectées), la santé publique (par exemple, augmentation des maladies liées à la chaleur), la biodiversité (par exemple, modification des habitats naturels) et d'autres aspects socio-économiques.

La tendance à la hausse des températures à Djibouti reflète les préoccupations mondiales concernant le changement climatique. Ces observations peuvent servir de base pour des études plus approfondies sur l'impact du réchauffement climatique dans la région.

2.2. Données de température au pas de temps saisonnier

- **Analyse des températures pour la saison Janvier-Février (JF):**

1. Tmax : La température maximale pendant la saison de Janvier-Février semble montrer une certaine variabilité interannuelle. Bien qu'il n'y ait une tendance à la hausse sur l'ensemble de la période, il est important de noter quelques années particulières où la température maximale a augmenté de 0.88°C (entre 1987-1988). Ces pics pourraient être associés à des événements climatiques particuliers ou à des anomalies de température spécifiques à ces années.

2. Tmean : La température moyenne suit une trajectoire similaire à celle de la température maximale, avec une variabilité interannuelle. Cependant, la magnitude des variations est légèrement atténuée par rapport à la température maximale, ce qui est attendu puisque la température moyenne est une moyenne des températures sur l'ensemble de la journée.

3. Température Minimale (Tmin) : La température minimale montre également une variabilité d'année en année. On observe également des années où la température minimale est particulièrement élevée, coïncidant avec les années où la température maximale est également élevée. Cela suggère que ces années particulières pourraient avoir été plus chaudes en général.

La saison Janvier-Février, qui correspond à l'hiver dans l'hémisphère nord, montre une variabilité interannuelle notable à Djibouti Aéroport (Figure 54). Bien que Djibouti ait un climat désertique chaud, ces variations saisonnières peuvent avoir des implications importantes pour l'écosystème local, la disponibilité de l'eau et les activités humaines. Il serait également pertinent d'examiner si ces variations sont liées à des phénomènes climatiques plus larges, tels que El Niño ou La Niña, qui peuvent avoir des effets sur les températures et les précipitations à l'échelle régionale.

- **Analyse des températures pour la saison Mars-Avril-Mai (MAM):**

La saison Mars-Avril-Mai (MAM) est une période transitionnelle entre la période fraîche et chaude. Lors de cette période, on s'attend à une augmentation progressive des températures à mesure que l'on se rapproche de l'été.

1. Tmax : La température maximale moyenne donne une indication de la chaleur que l'on peut s'attendre à ressentir pendant les heures les plus chaudes de la journée. Nous observons une température maximale élevée qui indique des jours particulièrement chauds pendant cette saison. On observe également des pics notables comme entre 1989 et 1990 (on note une augmentation de 2.46°C)

2. Tmean: Comme pour la saison précédente, la température moyenne suit une tendance similaire aux Tmax et Tmin (une tendance à la hausse). Il est important de souligner que le Tmean est une mesure plus équilibrée car elle prend en compte les températures pendant la journée et la nuit.

3. Tmin: La température minimale suit également une tendance à la hausse et indique une variabilité comme pour la saison précédente.

- **Analyse des températures pour la saison Juin-Juillet-Août-Septembre (JJAS):**

1. Température Maximale (Tmax):

La température maximale pendant la saison JJAS semble montrer une tendance à la hausse au fil des ans. Les pics de température observés indiquent des étés potentiellement plus chauds pendant certaines années.

2. Température Moyenne (Tmean):

La température moyenne pendant cette saison semble également suivre une tendance similaire à celle de la température maximale, avec une légère augmentation au fil des ans.

3. Température Minimale (Tmin):

Les températures minimales montrent également une tendance à la hausse, bien que la progression ne soit pas aussi prononcée que pour les températures maximales. Cela suggère que les nuits pendant cette saison deviennent progressivement plus chaudes.

- **Analyse des températures pour la saison Octobre-Novembre-Décembre (OND):**

1. Température Maximale (Tmax) pour OND:

La température maximale pendant la saison OND semble suivre une tendance assez stable au fil des ans, avec des variations mineures. Cependant, il y a quelques années où l'on observe des pics, indiquant des températures exceptionnellement élevées.

2. Température Moyenne (Tmean) pour OND:

La température moyenne pendant cette saison semble également suivre une tendance stable, avec des variations mineures d'une année à l'autre.

3. Température Minimale (Tmin) pour OND:

Les températures minimales montrent également une tendance à la hausse, avec des variations d'une année à l'autre

Comme pour le pas de temps annuel, on observe généralement une tendance à la hausse pour toutes les saisons. Pour valider statistiquement ces tendances, nous allons procéder à des tests de tendances et de rupture.

Tableau 33: Tendances et rupture des données de température au pas de temps saisonnier (Djibouti Aéroport 1966-2019)

Station Djibouti Aéroport		Corrélation sur le rang (caractère aléatoire)				Test de Pettitt (absence de rupture)				
Variable	Saison	99%	95%	90%	Variable	99%	95%	90%	Date	P-value
Tmax	JF	Non	Non	Non	2,63	Non	Non	Non	1987	4,74E-03
Tmean	JF	Non	Non	Non	3,93	Non	Non	Non	1987	8,96E-04
Tmin	JF	Non	Non	Non	3,57	Oui	Non	Non	1987	2,39E-02
Tmax	MAM	Oui	Non	Non	2,57	Non	Non	Non	1995	3,95E-03
Tmean	MAM	Non	Non	Non	3,19	Non	Non	Non	1995	4,33E-03
Tmin	MAM	Oui	Oui	Non	1,77	Oui	Oui	Oui		
Tmax	JJAS	Non	Non	Non	6,39	Non	Non	Non	1993	7,79E-06
Tmean	JJAS	Non	Non	Non	4,75	Non	Non	Non	2004	3,18E-03
Tmin	JJAS	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		
Tmax	OND	Non	Non	Non	3,83	Non	Non	Non	1987	5,53E-04
Tmean	OND	Non	Non	Non	6,83	Non	Non	Non	1991	3,01E-07
Tmin	OND	Non	Non	Non	3,53	Non	Non	Non	1999	8,51E-03

Les tests de corrélation sur le rang et de Pettitt montrent que toutes les saisons sont touchées par cette augmentation de température (Tableau 33). Les températures minimales sont les moins impactées. Les dates de rupture sont plus étalées dans le temps, entre 1987 et 2004 mais centrées sur 1987-1995.

La période la plus chaude est JJAS qui correspond globalement à une période sèche à la station Djibouti aéroport. La période la plus froide est JF.

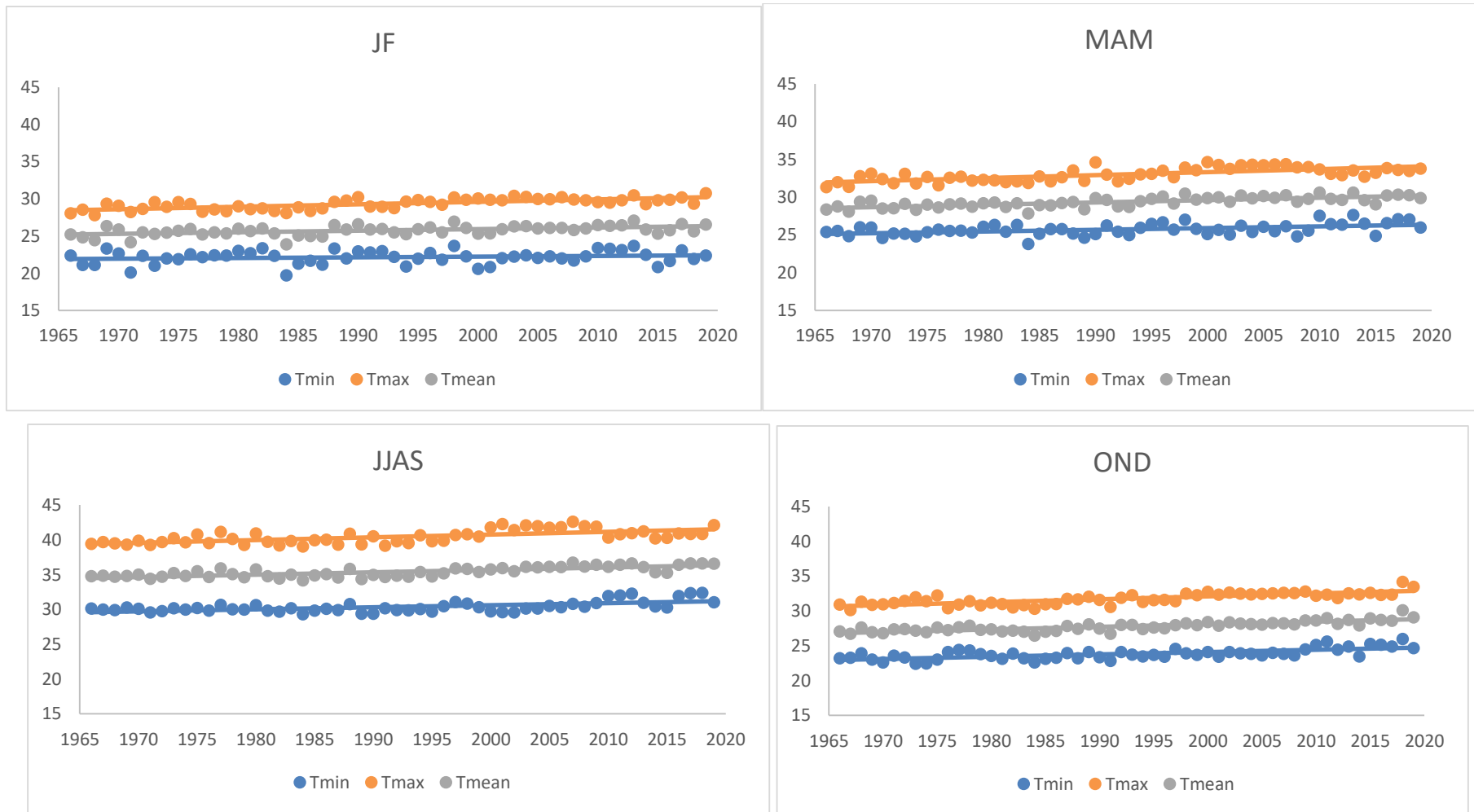


Figure 53: Tendence saisonnière des données de température de la station Djibouti Aéroport

2.3. Données de température au pas de temps mensuel

Les températures mensuelles à Djibouti fournissent des informations précieuses sur le climat local et ses variations (Figure 55). L'analyse de ces données sur une période prolongée offre un aperçu des tendances climatiques et des défis potentiels auxquels la région pourrait être confrontée à l'avenir. Une inspection initiale des données montre des variations mensuelles et annuelles. Les températures moyennes oscillent avec des pics pendant les mois d'été et des creux pendant les mois d'hiver.

La figure 55 montre clairement une variabilité mensuelle des températures, avec des périodes plus chaudes et plus froides se succédant au cours de l'année. Cette variation est typique des climats où les saisons influencent les températures. Les températures semblent montrer une légère tendance à la hausse au fil des années, en particulier pour les températures maximales. Cela pourrait indiquer un réchauffement climatique local, en accord avec les tendances mondiales. La différence entre les températures maximales et minimales semble relativement constante, indiquant que la variation diurne n'a pas changé de manière significative au fil des ans.

L'analyse des températures mensuelles à Djibouti fournit des indications sur les tendances climatiques locales. Une augmentation continue des températures pourrait avoir des implications significatives pour l'environnement, la société et l'économie de la région.

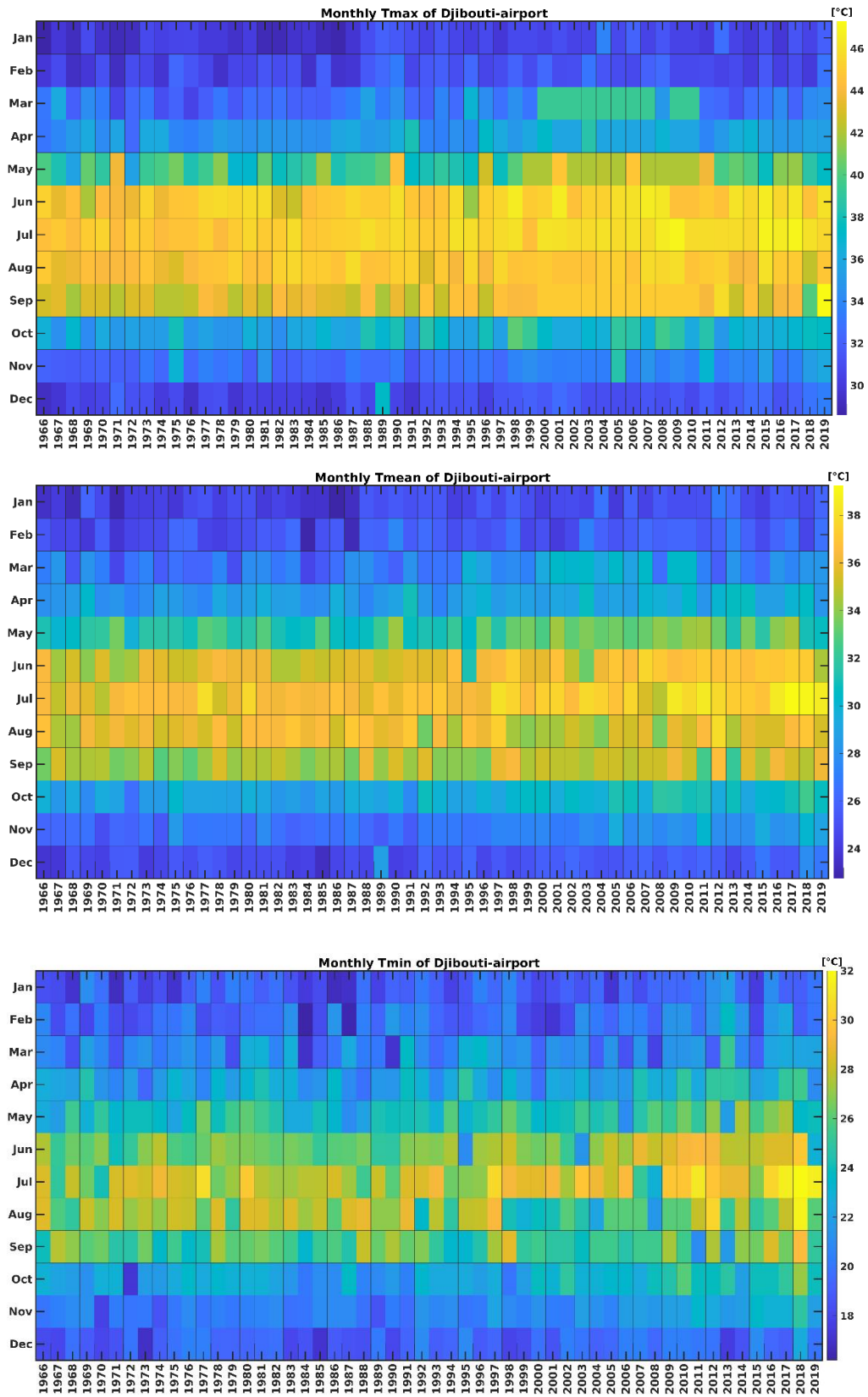


Figure 54: Evolution mensuelle des données de température

Tableau 34: Résultats des tests de tendance et de rupture sur les températures mensuelles à la station Djibouti aérodrome (1966-2019)

Variable	Mois	Corrélation sur le rang (caractère aléatoire)				test de Pettitt (absence de rupture)				
		99%	95%	90%	Variable	99%	95%	90%	Date	P-value
Tmax	Janv.	Non	Non	Non	3.6929	Non	Non	Non	1987	3.11E-05
Tmax	Fév.	Oui	Non	Non	2.08145	Oui	Non	Non	1987	1.94E-02
Tmax	Mars	Non	Non	Non	3.54369	Non	Non	Non	1994	1.38E-03
Tmax	Avril	Non	Non	Non	2.91702	Non	Non	Non	1995	5.18E-03
Tmax	Mai	Non	Non	Non	2.6186	Non	Non	Non	1995	3.28E-03
Tmax	Juin	Non	Non	Non	3.88687	Non	Non	Non	1995	8.51E-03
Tmax	Juil.	Non	Non	Non	6.48309	Non	Non	Non	1993	1.64E-06
Tmax	Août	Non	Non	Non	3.02146	Oui	Non	Non	1981	2.65E-02
Tmax	Sept.	Non	Non	Non	5.00593	Non	Non	Non	1991	8.41E-05
Tmax	Oct.	Non	Non	Non	3.87195	Non	Non	Non	1987	6.14E-04
Tmax	Nov.	Non	Non	Non	5.69229	Non	Non	Non	1997	6.01E-06
Tmax	Déc.	Non	Non	Non	4.87164	Non	Non	Non	1991	1.33E-04
Tmean	Janv.	Non	Non	Non	3.84211	Non	Non	Non	1987	4.47E-04
Tmean	Fév.	Non	Non	Non	3.29004	Oui	Non	Non	1987	1.53E-02
Tmean	Mars	Non	Non	Non	3.52877	Non	Non	Non	1994	3.74E-04
Tmean	Avril	Non	Non	Non	3.93163	Non	Non	Non	1994	2.99E-03
Tmean	Mai	Non	Non	Non	3.73766	Non	Non	Non	1995	2.51E-04
Tmean	Juin	Non	Non	Non	4.97609	Non	Non	Non	1995	1.44E-04
Tmean	Juil.	Non	Non	Non	5.00593	Non	Non	Non	1996	1.61E-04
Tmean	Août	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Non	1997	8.60E-02
Tmean	Sept.	Non	Non	Non	3.18559	Non	Non	Non	1996	8.76E-03
Tmean	Oct.	Non	Non	Non	5.54308	Non	Non	Non	1991	4.04E-06
Tmean	Nov.	Non	Non	Non	6.76658	Non	Non	Non	1996	4.22E-07
Tmean	Déc.	Non	Non	Non	4.63291	Non	Non	Non	1991	2.70E-04
Tmin	Janv.	Oui	Non	Non	2.55892	Oui	Oui	Oui		1.76E-01
Tmin	Fév.	Non	Non	Non	2.66336	Oui	Non	Non	2002	4.66E-02
Tmin	Mars	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		5.04E-01
Tmin	Avril	Oui	Non	Non	2.23066	Oui	Oui	Non	2006	8.42E-02
Tmin	Mai	Non	Non	Non	3.17067	Oui	Non	Non	1993	4.44E-02
Tmin	Juin	Non	Non	Non	4.25989	Non	Non	Non	2003	2.25E-04
Tmin	Juil.	Non	Non	Non	3.57353	Non	Non	Non	1996	3.95E-03
Tmin	Août	Oui	Oui	Oui		Oui	Non	Non	1997	1.49E-02
Tmin	Sept.	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		7.40E-01
Tmin	Oct.	Non	Non	Non	4.45386	Non	Non	Non	1999	9.66E-06
Tmin	Nov.	Non	Non	Non	5.84149	Non	Non	Non	1996	5.27E-06
Tmin	Déc.	Non	Non	Non	2.79765	Oui	Non	Non	2001	4.77E-02

Les tests de corrélation sur le rang et de Pettitt montrent que tous les mois sont touchés par cette augmentation de température (Tableau 34). Les températures minimales sont les moins

marquées. Les dates de rupture sont plus étalées dans le temps, entre 1981 et 2006 mais centrées sur la première moitié de la décennie 1990.

Le mois le plus chaud à la station Djibouti aérodrome est juillet avec une température maximale diurne atteignant 46°C cette dernière décennie (T°C nocturne # 28°C). Le mois le plus froid est le mois de janvier où la température nocturne atteint les 20°C (T°C diurne # 30°C). L'écart maximal de T°C s'observe en juillet, environ 18°C.

2.4. Données de température au pas de temps journalier

Les indices de température de l'ETCCDI fournissent des informations importantes sur les événements extrêmes de température, qu'il s'agisse de journées exceptionnellement chaudes ou froides, de vagues de chaleur prolongées, ou de variations saisonnières (Tableau 35).

Tableau 35: : Liste des indices de température utilisés dans l'analyse des évènements climatiques extrêmes

Acronyme	Nom de l'indice	Définition	Unité
FD20	Nombre annuel de jours «froids »	Jours où la température minimale quotidienne < 20°C	jours
ID30	Nombre annuel de jours de température moyenne	Jours où la température maximale quotidienne < 30°C	jours
SU40	Nombre annuel de jours très chauds	Jours où la température maximale quotidienne > 40°C	jours
SU45	Nombre annuel de jours extrêmement chauds	Jours où la température maximale quotidienne > 45°C	jours
Tmaxmean	Moyenne mensuelle des températures maximales	Moyenne des températures maximales quotidiennes pour chaque mois	°C
Tminmean	Moyenne mensuelle des températures minimales	Moyenne des températures minimales quotidiennes pour chaque mois	°C
TXx	Max Tmax	Valeur maximale de la température maximale quotidienne	°C
TNx	Max Tmin	Valeur maximale de la température minimale quotidienne	°C
TXn	Min Tmax	Valeur minimale de la température maximale quotidienne	°C
TNn	Min Tmin	Valeur minimale de la température minimale quotidienne	°C
TN10P	Nuits « froides »	Pourcentage de jours où la température minimale est inférieure au 10e percentile	%
TX10P	Jours « froids »	Pourcentage de jours où la température maximale est inférieure au 10e percentile	%
TN90P	Nuits « chaudes »	Pourcentage de jours où la température minimale dépasse le 90e percentile	%
TX90P	Jours « chauds »	Pourcentage de jours où la température maximale dépasse le 90e percentile	%
WSDI	Indicateur de durée des périodes de chaleur	Nombre annuel de périodes d'au moins 6 jours consécutifs où la température maximale dépasse le 90e percentile	jours

CSDI	Indicateur de durée des périodes de fraîcheur	Nombre de jours où la température minimale est inférieure au 10e percentile	jours
DTR	Différence moyenne entre la Tmax et la Tmin	Différence mensuelle moyenne entre la température maximale et la température minimale	°C

La figure 56 rend compte des résultats type ETCCDI effectuées sur les données journalières de la station de Djibouti aéroport. Tous les indices montrent des tendances significatives. Tous les résultats confirment un réchauffement des températures et des jours et des nuits de plus en plus chauds. Les séquences chaudes sont de plus en plus nombreuses.

La station Djibouti Aéroport montre, à travers le graphique FD20, une tendance à la diminution du nombre de jours frais (où $T_{max} < 20^{\circ}\text{C}$). Cette observation suggère un réchauffement climatique ou des périodes froides moins intenses. Similairement, l'indice ID30 présente une tendance à la baisse, indiquant que les jours deviennent progressivement plus chauds. L'impact potentiel de cette augmentation de la température maximale pourrait être ressenti dans divers domaines tels que la santé publique, l'agriculture, et la consommation énergétique.

Les indices SU40 et SU45, qui mesurent le nombre de jours très chauds, montrent une augmentation, indiquant que la région connaît de plus en plus de jours de chaleur intense. Cela suggère des étés plus torrides, avec un risque accru de stress thermique et d'effets sur la santé humaine.

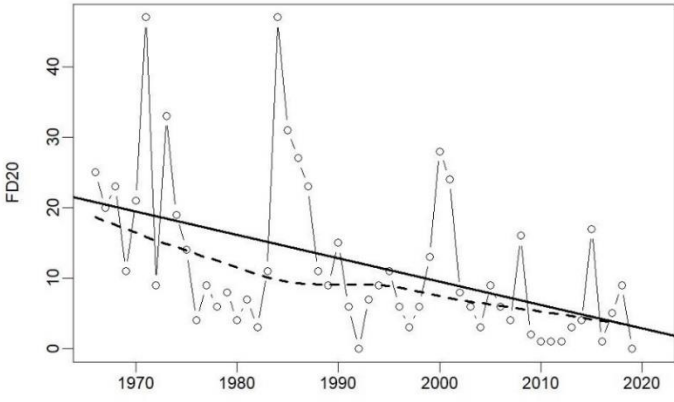
La température maximale moyenne annuelle, représentée par l'indice $T_{maxmean}$, est également en hausse, tout comme la température minimale moyenne annuelle ($T_{minmean}$), indiquant des nuits de plus en plus chaudes. Ces augmentations témoignent d'un réchauffement généralisé de la région.

Les indices TN10P et TX10P, représentant respectivement le pourcentage de jours avec des températures minimales et maximales parmi les 10% les plus basses, montrent une diminution. Cela indique des hivers potentiellement moins rigoureux et une augmentation générale des températures diurnes.

Inversement, les indices TN90P et TX90P, qui mesurent le pourcentage de jours avec des températures minimales et maximales parmi les 10% les plus élevées, sont en augmentation. Ceci suggère des nuits et des jours généralement plus chauds, avec des implications pour la santé et la consommation énergétique.

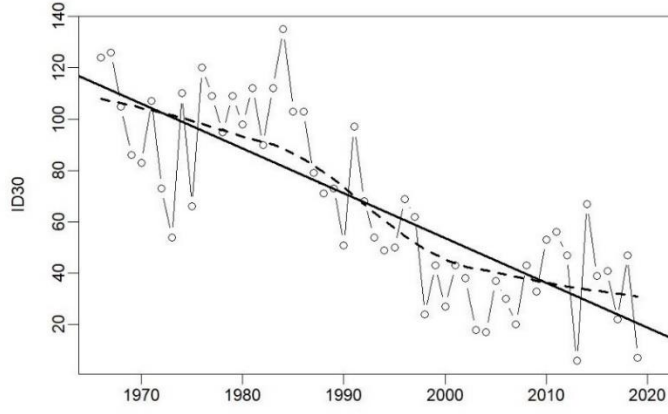
Enfin, l'indice WSDI, qui quantifie le nombre de périodes de chaleur prolongée, montre une augmentation. Cette tendance indique que les vagues de chaleur sont de plus en plus courantes, avec des répercussions sur la santé publique, l'agriculture, et la demande énergétique. En somme, ces indices témoignent des changements climatiques significatifs qui affectent la région étudiée, avec des implications potentiellement majeures sur divers aspects socio-économiques.

FD20 aero_extreme



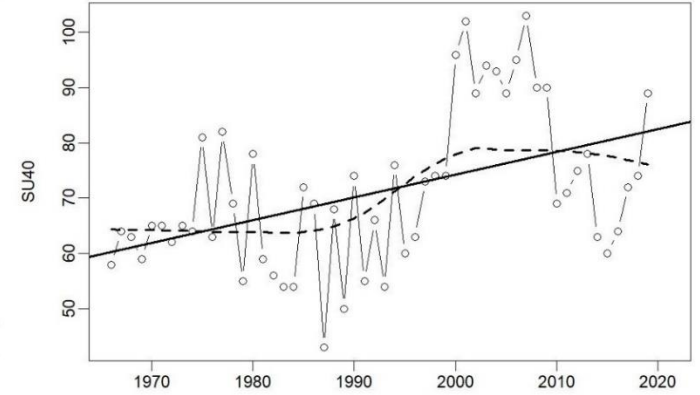
R2= 22.6 p-value= 0 Slope estimate= -0.332 Slope error= 0.085

ID30 aero_extreme



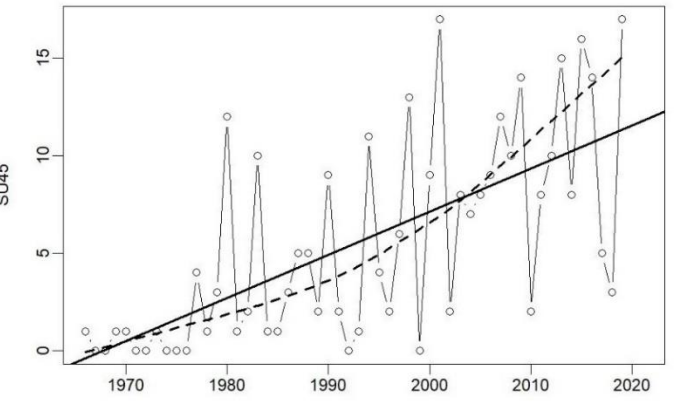
R2= 63.5 p-value= 0 Slope estimate= -1.746 Slope error= 0.184

SU40 aero_extreme



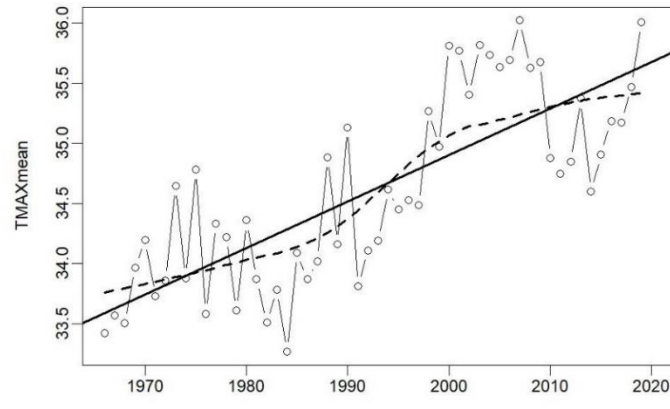
R2= 21.4 p-value= 0 Slope estimate= 0.413 Slope error= 0.11

SU45 aero_extreme



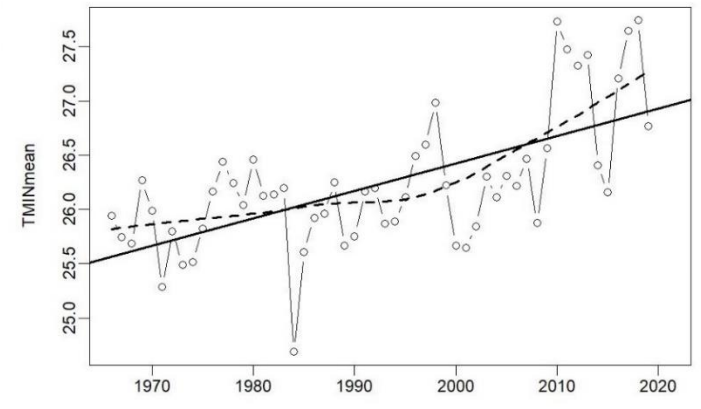
R2= 44 p-value= 0 Slope estimate= 0.221 Slope error= 0.035

TMAXmean aero_extreme



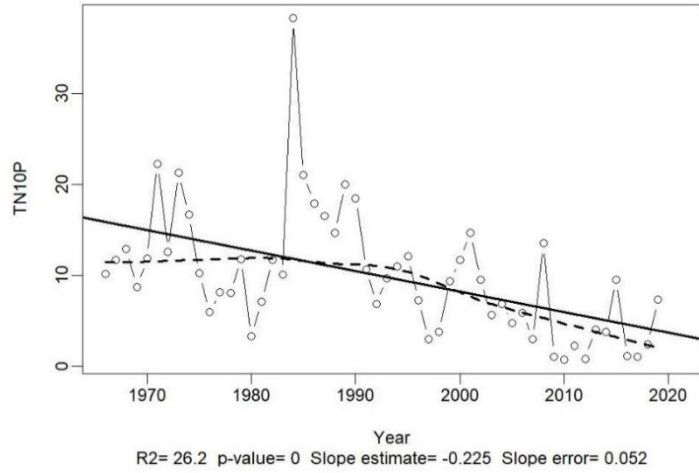
R2= 59.6 p-value= 0 Slope estimate= 0.039 Slope error= 0.004

TMINmean aero_extreme

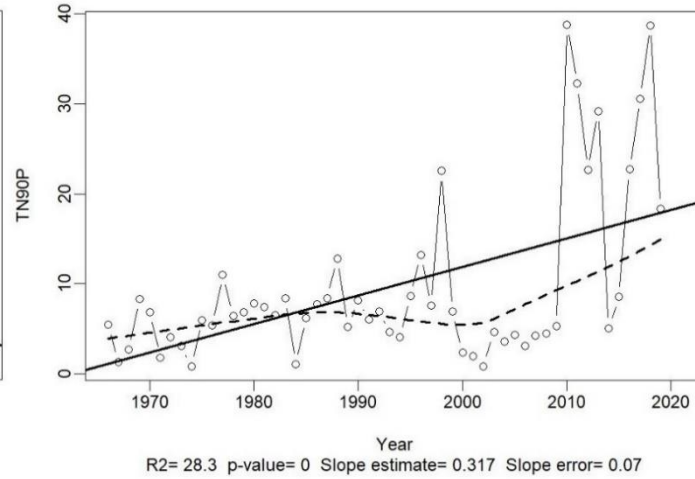


R2= 40.1 p-value= 0 Slope estimate= 0.025 Slope error= 0.004

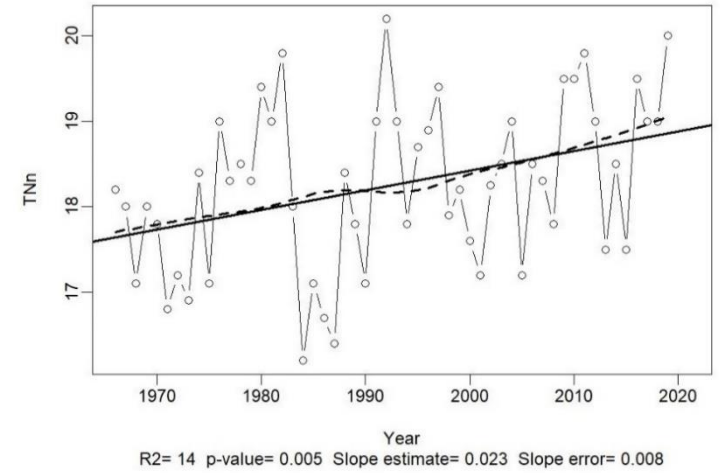
TN10P aero_extreme



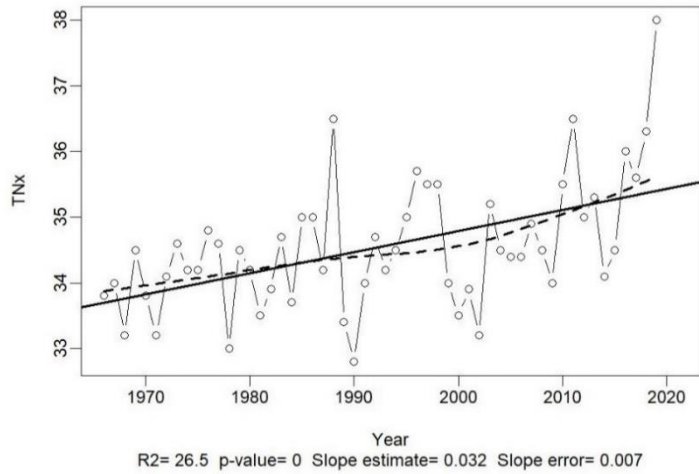
TN90P aero_extreme



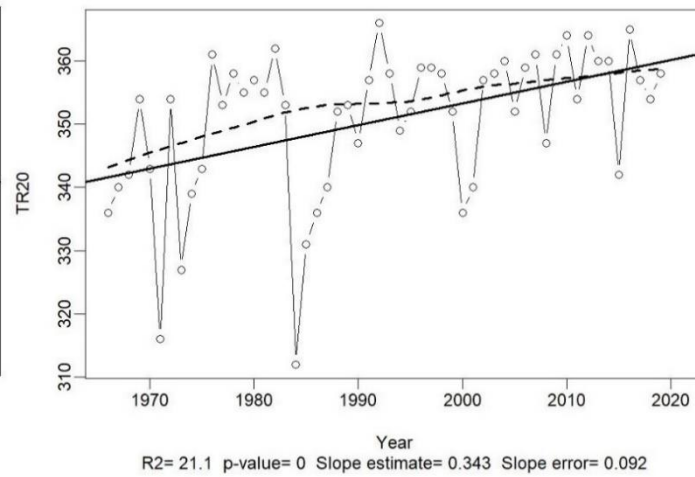
TNN aero_extreme



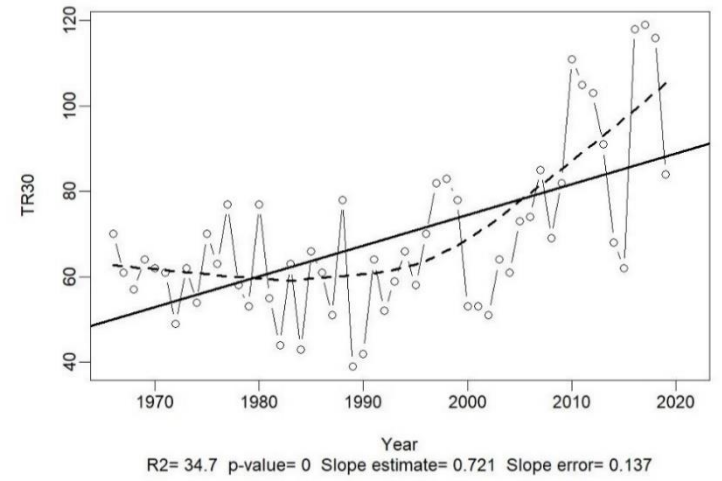
TNx aero_extreme



TR20 aero_extreme



TR30 aero_extreme



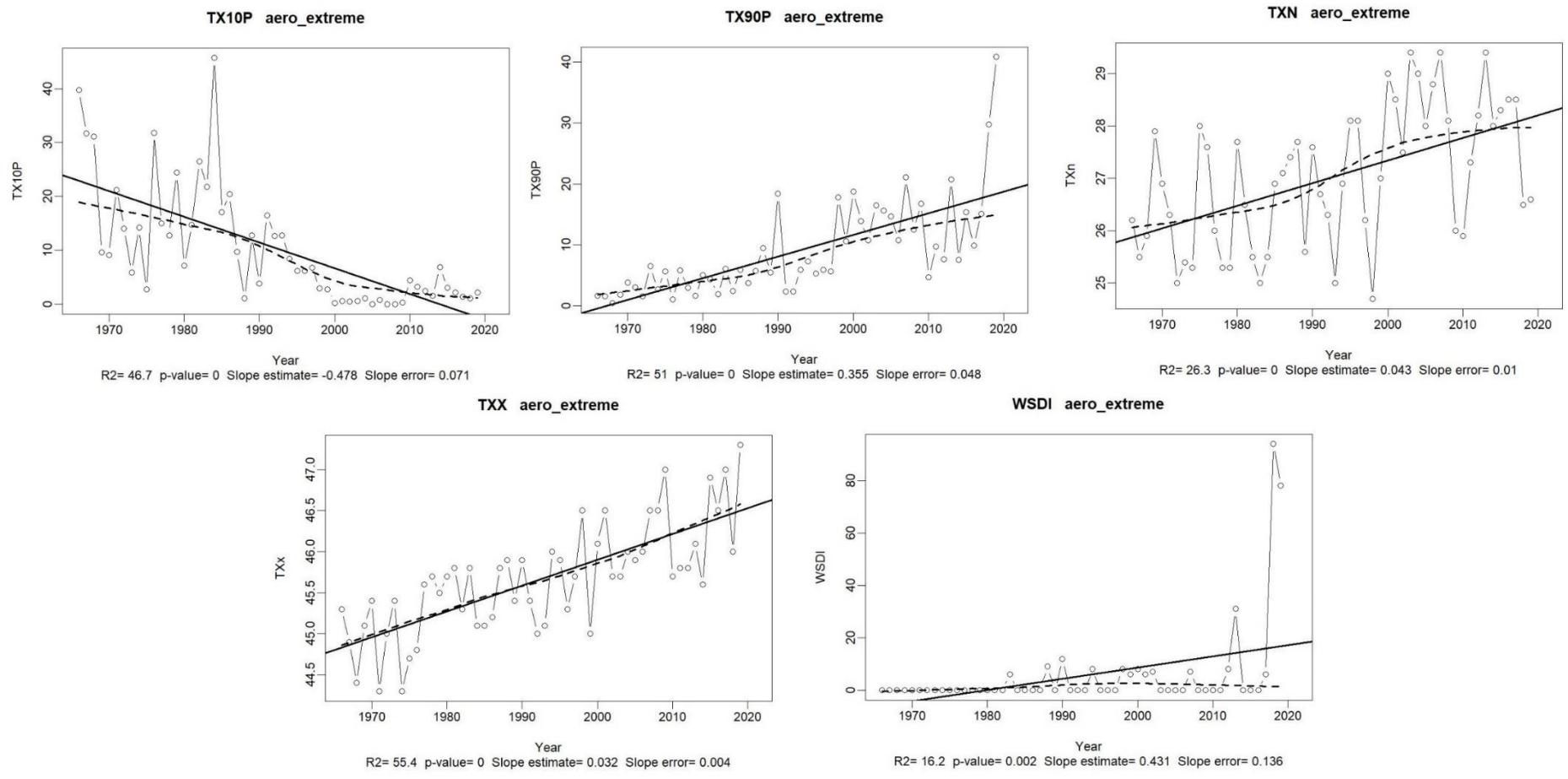


Figure 55: Résultats des traitements de données de température selon l'ETCCDI.

2.5. Conclusion partielle

La caractérisation des données de température dans le contexte d'un climat aride a confirmé les tendances attendues : des températures considérablement élevées, oscillant entre 15°C et 46°C. Toutefois, une mise en garde est nécessaire car ces résultats reposent sur une unique station de mesure. Bien que cette station soit située en aval de notre bassin d'étude, elle ne peut prétendre représenter intégralement les variations thermiques de l'ensemble de la zone. L'analyse a révélé une variabilité interannuelle marquée concernant les températures minimales, tandis que cette variabilité s'avère moindre pour les températures maximales. Des tendances, voire des ruptures nettes, ont été identifiées, principalement centrées sur la première moitié de la décennie 1990, pour l'ensemble des températures enregistrées. Contrairement à ce qui est observé en Afrique de l'Ouest, c'est la température minimale qui présente la moindre variation, tandis que la température maximale fluctue davantage. L'examen des journées avec des températures extrêmes, selon les critères de l'ETCCDI, dévoile des tendances significatives pour tous les indices étudiés. Ces résultats soulignent un réchauffement climatique indéniable, avec des journées et des nuits de plus en plus chaudes. De plus, les épisodes de chaleur se font de plus en plus fréquents, témoignant de l'intensification des phénomènes thermiques extrêmes dans la région.

3. Conclusion

Le chapitre 4 a permis d'élaborer une étude approfondie des dynamiques climatiques à Djibouti en se concentrant principalement sur les précipitations et les températures, pour diverses stations au sein de la zone sud-est de Djibouti. Cependant la faible couverture temporelle et spatiale des données a compliqué cette analyse. A cela se sont ajoutées des lacunes. Il est donc difficile de donner un caractère général à cette étude, même si certaines caractéristiques peuvent se dégager.

La corrélation forte à différents pas de temps entre les stations de Djibouti Serpent et Djibouti Aéroport, a renforcé la robustesse des observations et a permis une compréhension plus nuancée des variations climatiques dans la région sur le long terme. La pluviométrie n'a guère changé entre 1901 et 2020 ; par contre les T°C et plus particulièrement les T°Cmax ont fortement été modifiées aux alentours de la période 1990-1995.

Dans le contexte d'un climat aride, l'analyse des données hydroclimatiques pour la zone d'étude a révélé des tendances distinctes pour les précipitations et les températures. Les précipitations, bien que rares et caractérisées par une faible pluviométrie, présentent des lacunes notables dans les données, rendant l'analyse objective difficile. Malgré cela, la variabilité interannuelle des précipitations semble être fortement influencée par un ou deux événements isolés, sans tendances ou ruptures nettes détectées. En revanche, les données de température, oscillant entre 15°C et 46°C, montrent une variabilité interannuelle prononcée, notamment pour les températures minimales. Les tendances et ruptures observées suggèrent un réchauffement climatique, avec des journées et des nuits de plus en plus chaudes et des épisodes de chaleur de plus en plus fréquents. Ces résultats, bien que basés sur des données limitées, soulignent

l'importance de poursuivre les études hydroclimatiques dans la région pour une meilleure compréhension et gestion des ressources en eau face aux défis climatiques actuels.

De plus, l'étude des indices climatiques a révélé des tendances sous-jacentes, notamment une augmentation des températures et des modifications des régimes pluviométriques, qui pourraient avoir des implications majeures pour la région à l'avenir.

La complexité des résultats obtenus ne saurait être sous-estimée. Elle indique non seulement les défis inhérents à la compréhension des dynamiques climatiques à Djibouti, mais aussi la nécessité d'adopter des méthodologies d'analyse nuancées et rigoureuses. De plus, bien que ces conclusions offrent une perspective précieuse sur les changements climatiques actuels, elles soulignent également les lacunes existantes, notamment les manques de données pour certaines périodes, qui pourraient influencer la robustesse des interprétations.

En somme, ce chapitre éclaire la nécessité d'une exploration continue et d'un suivi des tendances climatiques à Djibouti, tout en appelant à une prise en compte des nuances et des complexités inhérentes à la climatologie régionale lors des décisions de planification et de gestion.

Toutefois, il est crucial de souligner que malgré le niveau de détail avec lequel les précipitations ont été étudiées dans ce chapitre, les séries pluviométriques disponibles demeurent insuffisantes pour s'adonner à une modélisation hydrologique robuste. Cette limitation intrinsèque met en lumière l'importance de rechercher des alternatives ou des compléments aux données traditionnelles. Dans cette optique, le chapitre suivant se consacrera à une étude comparative approfondie entre les stations pluviométriques conventionnelles et les produits d'estimation de pluie (P-datasets). Cette exploration vise non seulement à pallier les lacunes des données traditionnelles, mais aussi à évaluer la pertinence et la fiabilité de ces outils modernes dans le contexte spécifique de Djibouti.

Chapitre 5 : Evaluation of rainfall products in semi-arid areas: application to the southeast of the Republic of Djibouti and a focus on the Ambouli Catchment

Chapitre 5 : Evaluation of rainfall products in semi-arid areas: application to the southeast of the Republic of Djibouti and a focus on the Ambouli Catchment

Résumé

La République de Djibouti est un petit pays situé dans la Corne de l'Afrique et, comme dans la plupart des pays en développement, les pluviomètres sont rares et les données sont limitées. Cette étude vise à rendre compte de la fiabilité des ensembles des produits d'estimations de pluie (P datasets) à travers la République de Djibouti en les comparant directement aux mesures des pluviomètres, allant de l'échelle annuelle à l'échelle journalière. Notre objectif spécifique est d'utiliser ces produits dans le cadre de la modélisation hydrologique à une échelle temporelle journalière. Étant donné la rareté des données disponibles en République de Djibouti, notre étude a été menée sur deux fenêtres temporelles (1980-1990 et 2008-2013) et deux réseaux de pluviomètres avec différentes résolutions spatiales : le sud-est de la République de Djibouti (5000 km²) et le bassin versant d'Ambouli (794 km²), qui draine la ville de Djibouti. La fiabilité de ces produits est analysée à l'aide de métriques quantitatives et catégorielles, exclusivement à une échelle temporelle quotidienne pour ces dernières. Les performances des P datasets diminuent de l'échelle temporelle annuelle à l'échelle quotidienne. Bien que les mêmes produits présentent les meilleures performances à différentes échelles temporelles, la performance de la plupart des produits varie d'une échelle spatiale à l'autre. Nos résultats démontrent l'importance des fenêtres temporelles et spatiales, car les mêmes produits peuvent avoir des performances différentes selon l'échelle. Pour toutes les échelles spatiotemporelles, le produit le plus fiable est MSWEP v.2.2. Ce P dataset est dérivé d'une combinaison de produits satellitaires (plusieurs capteurs tels que l'infrarouge et le micro-onde passif), de produits de réanalyse, et d'observations de pluviomètres. Une forte divergence entre les observations des pluviomètres et les P datasets est révélée selon la métrique catégorielle à une échelle temporelle journalière. L'analyse des événements pluvieux déclenchant un ruissellement, en utilisant un seuil de précipitations de 10 mm, a montré que les produits les plus efficaces étaient incapables de détecter avec précision de tels événements à une échelle journalière, avec une sous-estimation significative des événements pluvieux supérieurs à 10 mm. Aucun de ces produits, même le plus fiable, ne peut être utilisé pour une calibration/validation d'un modèle hydrologique à une échelle temporelle journalière.

Evaluation of rainfall products in semi-arid areas: application to the southeast of the Republic of Djibouti and a focus on the Ambouli Catchment

Golab Moussa Omar,^{1, 2*} Jean-Emmanuel Paturel,¹ Christian Salles,¹ Gil Mahé,¹ Mohamed Jalludin,² Frédéric Satgé,³ Mohamed Ismail Nour⁴

¹ HSM, Univ. Montpellier, CNRS, IRD, IMT Alès, Montpellier, France

² Centre d'Etudes et de Recherches de Djibouti, Institut des Sciences de la Terre, Route de l'aéroport, Djibouti-ville, République de Djibouti

³ UMR228 ESPACE-DEV, Univ. Montpellier, IRD, Univ. Antilles, Univ. Guyane, Univ. La Réunion, Montpellier, France

⁴ Agence Nationale de la Météorologie de Djibouti, Djibouti, République de Djibouti

Keywords: Djibouti, rainfall, precipitation datasets, categorical metrics, quantitative metrics, reliability, rain gauges

1. Introduction

The Horn of Africa is frequently hit by severe extreme events such as droughts and floods, but its climate remains poorly understood. The plains of Somalia and the Republic of Djibouti are arid, and despite their proximity to the equator, are under a low annual rainfall regime, 60-300mm [1]. Indeed, westerly winds lose most of their moisture after crossing the Sahel and Sudan [2] However, this region presents significant spatial and seasonal contrasts, partly due to its highly varied relief [3].

In the Republic of Djibouti, rainfall events are scarce. These events feed the flow of ephemeral rivers (wadi) and contribute to groundwater recharge but also trigger urban and surface flood hazards (the floods of 2004, 2018, 2019...). More generally, variability in rainfall rate, amount, and distribution substantially determines the Earth's ecosystem, water cycle, and climate [4]. Therefore, accurate measurement of rainfall is essential to analyze the spatial and temporal patterns of precipitation at different scales and further to understand the impact of rainfall on agriculture, hydrology, and climate.

Conventionally, the ground rain gauge is the most widely used rainfall measurement instrument. This is the most accurate and reliable approach to point measurement of rainfall. However, rain gauge stations in many parts of the world and in most parts of Africa, including the Republic of Djibouti, are scarce and unequally distributed. Therefore, ground rainfall analysis is subject to high uncertainty when based on networks that have a low rain gauge density or are limited to a few isolated rain gauge stations. In this situation, the spatial representativeness of the measurement is closely related to the coverage of the rain gauges.

In this context, gridded precipitation datasets, hereinafter called P datasets, available on the Internet at different spatial/temporal scales offer a convenient alternative [5]. Such products have blossomed since the 1980s and represent a valuable opportunity because they are usually

time continuous record, they provide a measurement in any portion of space, and they provide coverage with a daily or even hourly time step.

There are three basic P datasets, defined according to the input data and rainfall data retrieval process: those based on spatial information from rain gauges, those based on reanalysis data derived from physical and dynamic models, and those based on satellite information using passive microwave (PMW) and infrared (IR) information. It should be noted that a lot of P datasets combine the 3 types of data sources to obtain a better assessment.

In various global regions, the assessment and utilization of rainfall data pertaining to P-dataset have emerged as crucial components in facilitating efficient management of water resources and comprehending the intricacies of extreme occurrences and spatiotemporal fluctuations in precipitation patterns. To illustrate, in East Asia, a study conducted by Peña-Arancibia et al. [6] entailed an assessment of the precision of precipitation estimations in reanalyses, satellite-derived datasets, and an ensemble methodology. The outcomes of their investigation underscored the considerable potential inherent in these datasets, thereby enhancing our comprehension of precipitation patterns and their variability within the region. In a similar vein, Ceccherini [7] investigated the deployment of high-resolution precipitation datasets based on rainfall derived from satellites, the enhanced vegetation index, and digital elevation models in South America and West Africa. The findings from this research project substantiated the efficacy of these datasets in capturing the nuanced spatiotemporal variations in precipitation and furnishing invaluable insights for hydrological applications in their respective geographical domains. In the West African context, Satge et al. [5] carried out an evaluation of 23 gridded precipitation datasets. This particular study involved a comparative analysis of the performance exhibited by these datasets in encapsulating precipitation characteristics throughout the region. The results revealed marked divergences in the effectiveness of various datasets, thereby underscoring the criticality of meticulous selection and evaluation processes when employing P datasets for hydroclimatic analyses in West Africa. Moreover, Gosset et al. [8] scrutinized several rainfall products utilized for hydrological applications across West Africa. Their investigation specifically concentrated on assessing the performance of these datasets by leveraging two extensively calibrated gauge networks. The findings accentuated the disparities in accuracy and dependability observed among the assessed datasets, thereby underscoring the exigency for a meticulous approach encompassing the selection and evaluation of P datasets for hydrological modeling and water management applications within the region.

In East Africa, where data scarcity is a challenge, the application of precipitation estimation products (P datasets) has gained significant attention. Studies conducted in this region have highlighted the importance of using P datasets to complement rain gauge measurements [9,10,11]. These P datasets offer a valuable alternative, especially in catchments with a limited number of gauges. Satellite-based measurements provide extensive coverage over large areas, enabling the estimation of rainfall in regions where ground-based observations are sparse. The evaluation and comparison of satellite-based rainfall products have been conducted in various East African river basins, such as the Sio-Malaba-Malakisi river basin [11] and the upper Blue

Nile basin in Ethiopia [12]. These studies emphasize the need for reliable P datasets to support hydrological modeling and water allocation studies in data-scarce regions. Additionally, the evaluation of specific satellite-based systems, such as the PERSIANN system [13], and the integration of soil moisture measurements for near real-time rainfall estimation [10], have contributed to advancing our understanding of precipitation dynamics in East Africa.. Except for large-scale studies that consider the whole of East Africa, there have been very few reports on the spatiotemporal variability of rainfall in the Republic of Djibouti [1,14] .

Assowe Dabar [1] provides a description of the spatial and temporal rainfall variability in Djibouti by analyzing monthly and annual rainfall data recorded at 14 stations. Firstly, a regionalization by a Principal Component Analysis is performed in terms of spatial distribution of rainfall, and two zones of seven stations each are identified, located in the west (inland region) and the east (coastal region) of Djibouti, respectively. Secondly, the performance of four gridded datasets of satellite rainfall estimates and of the ERA5 reanalysis data is evaluated on the base of the regionalization in these two zones and at Djibouti-Aerodrome, the longest meteorological record in Djibouti. They conclude that Satellite-based rainfall products with high resolutions and ERA5 reanalysis offer insightful information on the rainfall variations at the spatial scale of Djibouti country.

In semi-arid regions, understanding the relationship between rainfall and runoff is crucial, given the potentially devastating impacts of flash floods in these areas. This importance is further magnified in volcanic environments, where the presence of bare surface volcanic soils can exacerbate the effects of flash floods. However, evaluating precipitation estimation products in such environments remains limited, and there is a scarcity of studies specifically addressing their performance in semi-arid regions.

One challenge in these regions is the scarcity of rainfall events, which translates to a limited number of streamflow events that can trigger significant runoff. Consequently, it becomes essential to accurately identify and monitor these rare events to better manage water resources and mitigate the risks associated with flash floods. However, due to the unique characteristics of semi-arid and steep relief regions, the existing precipitation estimation products may exhibit varying degrees of performance.

Notably, studies have shown that the performance of precipitation datasets can be less satisfactory at the daily timescale where the variability and intensity of rainfall events can pose additional challenges [15]. The constraints associated with the accurate depiction of these events can be attributed to the spatiotemporal resolution limitations of the datasets or the intricacies involved in capturing the dynamics of rainfall in semi-arid environments

In this study, we aimed to identify the most representative P datasets for hydrological modelling and their usefulness for a specified study area including the Ambouli catchment (794 km²) where pluviometric data are scarce. At the scale of this catchment, some hydrological data have been acquired in the past, but there are no concomitant pluviometric information which does not allow to implement an hydrological model at a daily time step. So, this evaluation will be

2.1.1. Southeast of the Republic of Djibouti

Assowe Dabar [1] regionalized the climate of the Republic of Djibouti on the basis of an analysis of precipitation and obtained two clusters, EAST and WEST (Figure 53a). The EAST zone concentrates most of the population and economic exchanges between Djibouti and its neighboring countries (Figure 53b). Therefore, our study focuses on the southeast part of the country, near Djibouti. Southeast area is about 5000 km². Its proximity to the Red Sea and Gulf of Aden drives most of the rainfall variability [1].

In the EAST zone, as in most of East Africa, it rains mainly in March-May (MAM) and October-December (OND). There are several hypotheses on the origin of these rains. During the transitional months (January and February), it is thought that these rains are associated with rare occurrences of tropical disturbances from the northwestern Indian Ocean, and in the winter, it is thought that they come from higher altitudes [1,17]

2.1.2. Catchment of the Ambouli Wadi

Inside the southeast region, we focus on the catchment of the Ambouli wadi, which is one of the country's largest catchments (794 km²) and is of major importance (Figure 53c). The Ambouli aquifer is the main source of drinking water for the city of Djibouti.

Despite the importance of the catchment for the development of Djibouti City, it has been the subject of only a few scientific studies. Moreover, the increase in the population has been accompanied by a greater sprawl of Djibouti City [18]. Urbanization leads to greater sealing of the catchment, which modifies the quality of water seeping into the aquifer and affects aquifer storage, but above all increases the frequency and magnitude of floods. Seyoum [19] have shown these effects in various East African countries such as Kenya and Ethiopia. The frequency of extreme flood events in Djibouti City has been increasing over the last two decades. The events of the years 2004, 2013, and 2018 were responsible for much economic and human damage [14,20].

2.2. Datasets

2.2.1. Rainfall Estimate Products (P Datasets)

The P-dataset products were selected based on their availability in the two study areas and their relevance for operational research focusing on hydrology and/or agronomy [8]. To be relevant for the target application, products need a daily or sub-daily temporal resolution. Table 1 describes the 21 products. It should be noted, however, that the GPCC product has a monthly temporal resolution. Among the 21 products analyzed and compared to the rain gauge data, there are 15 long-term P datasets with more than 30 years of continuous observations and 5 P datasets spanning more than 15 years. For the southeast, the analysis is carried out on 15 long-term P datasets, and for the Ambouli catchment, 11 P datasets (Table 36).

Tableau 36: Main characteristics and references of the P datasets. In the data column, S, R and G stands for the sources of information, respectively Satellite, Reanalysis and Gauge; in the analysis area column, SE correspond to southeast area and AC to Ambouli catchment ; spatial coverage refers to the absolute maximum and minimum latitude and latency refers to the time delay for data availability [5] .

Acronym	Full Name	Data	Analysis area	Temporal Coverage	Temporal Resolution	Spatial Coverage	Spatial Resolution	Latency	Reference
CPC v.1	Climate Prediction Center v.1	G	SE	1979-present	Daily	Global	0.5°	1 day	[21,22]
GPCC v.7	Global Precipitation Climatology Center	G	SE	1901-2013	Monthly	Global	1°	Irregular	[23,24]
ERA5	European Center for Medium-range Weather Forecast Re-Analysis v.5	R	SE	1979-present	3h	60°	0.75°	3 months	[25]
GSMaP-RT v.6	GSMaP standard v.6	S	AC	2000-present	Hourly	60°	0.1°	3 days	[26]
ARC-2	African Rainfall Climatology v.2	S,G	SE/AC	1983-present	Daily	Africa	0.1°	2 days	[27]
GSMaP-Adj v.6	Global Satellite Mapping of Precipitation Adjusted v.6	S,G	AC	2000-present	Hourly	60°	0.1°	3 days	[28]
IMERG-ER v.6	Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM-Early Run	S,G	AC	2000-present	30 min	60°	0.1°	4 hours	[29]
IMERG-FR v.6	IMERG- Final Run	S,G	AC	2000-2021	30 min	60°	0.1°	3.5 months	[29]
IMERG-LR v6	IMERG- Late Run	S,G	AC	2000-present	30 min	60°	0.1°	12 hours	[29]
PERSIANN-CDR	Precipitation Estimates from Remotely Sensed Information using Artificial Neural	S,G	SE	1983-2016	Daily	60°	0.25°	6 months	[30]
PERSIANN-CCS-CDR	PERSIANN-Cloud Classification System-CDR	S,G	AC	1983-present	3h	60°	0.04°	6 months	[31]
TAMSATv.3	Tropical Applications of Meteorology using Satellite and ground-based observations	S,G	SE/AC	1983-present	Daily	Africa	0.0375°	3 days	[32]
CHIRP v.2	Climate Hazards group InfraRed	S,R	SE/AC	1981-present	Daily	50°	0.05°	2 days	[33]
EWEMBI	Earth2Observe, WFDEI and ERA-Interim data Merged and Bias-corrected for ISIMIP	R,G	SE	1979-2010	Daily	Global	0.5°	Stopped	[34]
JRA-55 Adj	Japanese 55-years Re Analysis Adjusted	R,G	SE	1959-2012	3h	Global	0.56°	Stopped	[35]
WFDEI CRU	WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim	R,G	SE	1979-2016	Daily	Land	0.5°	Stopped	[36]
WFDEI GPCC	WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim	R,G	SE	1979-2016	Daily	Land	0.5°	Stopped	[37]
CHIRPS v.2	CHIRP with station v.2	S,R,G	SE/AC	1981-present	Daily	50°	0.05°	1 month	[33]
MERRA-2 PT	Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications v.2	S,R,G	SE	1980-present	Hourly	Global	0.5°	2 months	[37]
MERRA-2 PTC	Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications v.2	S,R,G	SE	1980-present	Hourly	Global	0.5°	2 months	[37]
MSWEP v.2.2	Multi-Source Weighted Ensemble Precipitation	S,R,G	SE/AC	1979-present	3h	Global	0.1°	Several months	[38]

2.2.2. Rain gauges of the National Meteorological Agency

At this scale, we will be working at monthly to annual time steps, except for Djibouti-Aerodrome where we will also be working at the daily time step. There are 14 rain gauge stations located in the southeast of the Republic of Djibouti managed by the Agence Nationale de la Météorologie de Djibouti (ANM). However, the main weakness of the rain data available from this network is the gaps in the time series. Based on the criteria of having more than 10 months of data per year, a total of 5 rain gauges were selected for analysis, namely Djibouti-Serpent, Djibouti-Aerodrome, Ali-Sabieh, Hol-Hol, and Loyada (Figure 53b). These are tipping-bucket rain gauge. For the comparison with the 15 P datasets, the common period of analysis will be 1980-1990. At the daily time step only the Djibouti Aerodrome rain gauge is available for the southeast for the period of analysis (1981-2010).

2.2.3. Rain gauges of the Early Warning System

Following the catastrophic floods in Djibouti City in 1994 and 2004, the government of the Republic of Djibouti has set up protective measures. These measures included the installation of the USAID-funded Wadi Ambouli Flood Monitoring and Alert System (RACA). This system was installed in the Ambouli catchment between February and March 2008. The hydrogeology and hydrology laboratory of the CERD (Centre d'Etudes et de Recherches de Djibouti) managed this network of 7 rain gauge stations (Figure 53c) until 2015. These are tipping bucket rain gauges. For some of them, rainfall is measured at a sub-daily time step with no long periods of missing data (less than ten days per month and less than four months per year missing). For the comparison with the 11 P datasets, the common period is 2008-2013

2.2.4. Selected rain gauges and common periods of study

The two study areas mentioned above, the southeast of the Republic of Djibouti and the Ambouli catchment, are covered by respectively the ANM and the RACA network. The datasets are available for different periods and are analyzed at different time steps (Table 37 and Figure 57).

Tableau 37: Characteristics of the selected rain gauges from the national network (ANM) and the CERD Flood Monitoring and Alert System (RACA) for the periods of study.

	Rain Gauges	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Elevation (m)	Observation Periods	Available time step	Data availability on common period 1980-1990 (%)	Data Availability on common period 2008-2013 (%)	Annual rainfall (mm)
ANM network	Ali-Sabieh	11.155	42.706	715	1947/1990	Monthly	98.86 %	-	175.2
	Djibouti-Aerodrome	11.550	43.150	8	1951/2021	Monthly	97.55 %	-	184.9
					1981/2021	Daily	97.84 %*	-	
	Djibouti-Serpent	11.600	43.150	3	1901/1990	Monthly	99.46 %	-	178.6
	Hol-Hol	11.309	42.928	470	1951/1990	Monthly	98.76 %	-	177.8
Loyada	11.460	43.254	3	1951/1990	Monthly	97.84 %	-	125.1	
RACA network	Agarder	11.564	43.127	6	2008/2013	Daily	-	72.35 %	75.8
	Arta	11.52	42.83	705	2008/2015	Daily	-	91.98 %	98.5
	Boulleh	11.51	43.09	250	2008/2014	Daily	-	94.78 %	80.4
	Goumbour Alol	11.36	42.78	770	2008/2015	Daily	-	94.56 %	108.7
	Kalaloho	11.53	43	198	2008/2015	Daily	-	92.34 %	88.4
	Oueah	11.5	42.87	415	2008/2014	Daily	-	93.28 %	85.3
	PK51	11.43	42.78	560	2008/2014	Daily	-	88.32 %	90.6

* For Djibouti Aerodrome rain gauge the percentage of data available at daily time step is computed on the common period with the P datasets of 1981-2010

3. Methodology

3.1. Pre-processing (pre-treatment)

In order to ensure comparability among the selected P datasets, certain preprocessing steps were performed in this study. Firstly, since the datasets differed in spatial resolution, ranging from 0.0375° for TAMSAT v.3 to 1° for GPCC v.7, all datasets were resampled to a common spatial

resolution of 0.1° by 0.1° . This resampling was implemented to facilitate straightforward comparison and analysis across the datasets.

For P datasets with a spatial resolution greater than 0.1° (such as PERSIANN-CDR, ERA-5, MERRA-2), a downscaling process was applied to adjust their resolution to 0.1° . Nearest neighbor interpolation was employed to downscale these datasets, ensuring that the values from the original dataset were preserved without alteration.

Conversely, for P datasets with a spatial resolution less than 0.1° (such as CHIRPS, TAMSAT), an upscaling procedure was employed to increase their resolution to 0.1° . Bilinear interpolation was utilized in this upscaling process, which estimates new values based on weighted averages of the neighboring points in the original dataset [5,38].

Furthermore, it is worth noting that some of the selected P datasets provided data at the sub-daily time step, while others were available at the daily time step. To obtain homogenous data for analysis, the sub-daily data was aggregated to the daily time step over the entire study period. This aggregation ensured consistency in the temporal resolution of the P datasets, allowing for meaningful and consistent comparisons among them.

By implementing these preprocessing steps, we aimed to standardize the spatial resolution and temporal granularity of the P datasets used in our study. This allowed for more robust and reliable comparisons, facilitating a comprehensive assessment of their performance within the defined study period.

These preprocessing steps were undertaken to ensure the compatibility of the datasets and to create a consistent framework for subsequent analysis. It is important to acknowledge and account for such data preprocessing techniques to enhance the validity and reliability of the research outcomes.

3.2. Approach

This study assesses the performance of 21 P datasets at different temporal resolutions including daily, monthly, seasonal, and annual time scales as summarized in Figure 58. The evaluation is conducted on two distinct spatial scales and over two time periods: first, the southeast zone of the Republic of Djibouti using 15 long-term P datasets for the common period of 1980-1990, and the Ambouli catchment area using 11 P datasets for the period of 2008-2013. The prerequisite for the choice of comparison period was that the period be common to all the P datasets and all the rain gauge data. It is worth noting that the 5 P datasets used in both analysis areas bring the total number of P datasets to 21. The choice of P datasets for the southeast zone was based on their availability over the selected period, while the selection for the Ambouli catchment was based on their spatial resolution, which needed to be less than or equal to 0.1° .

The validation of the P datasets was carried out on two spatially aggregated levels: point-to-pixel and catchment scale. The point-to-pixel scale is a pairwise comparison of the rain gauge data from the ground station with the corresponding gridded precipitation value.

The catchment-scale validation analysis was performed by comparing spatially aggregated P datasets for the catchment to a corresponding interpolated rainfall based on the ground reference rainfall. The catchment spatial unit is particularly relevant for characterizing rainfall because it represents the conventional working unit for hydrological applications. At the same time, and as suggested by Xie and Arkin [39], aggregation on a larger scale enhances the stability of the precipitation validation exercise. For the interpolation of the mean annual rainfall at the catchment scale, we used the Inverse Distance Weighting [40] spatial interpolation method. This is a local deterministic interpolation technique that calculates the value of a point by averaging the values of the neighboring points weighted by the inverse of the distance to the calculated point: the closer the points, the greater the weight assigned.

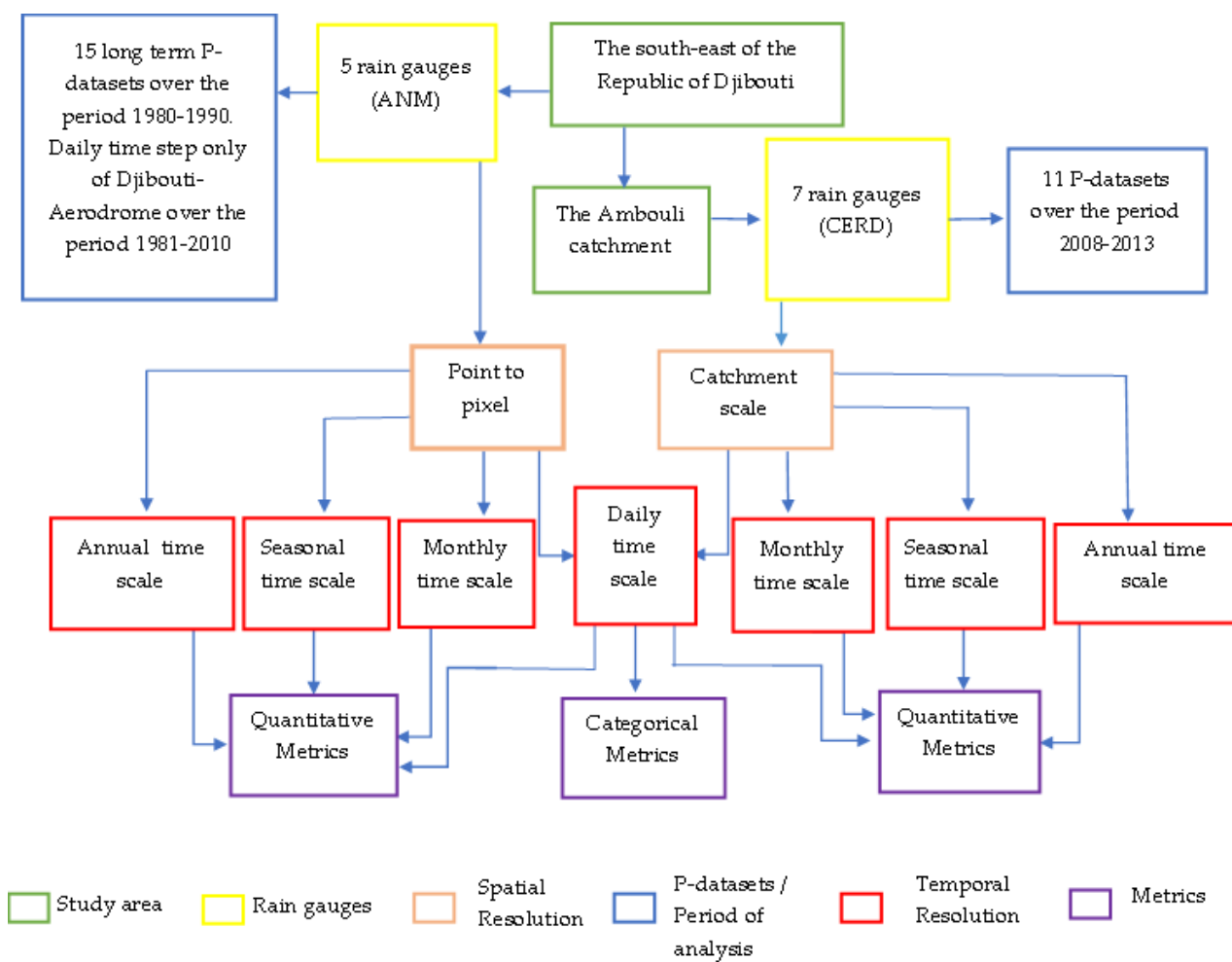


Figure 57: Diagram summarizing the methodology used for this study.

3.3. Metric validation

To assess the ability of P datasets to estimate the amount of ground reference rainfall, the metric analysis includes detailed quantitative and categorical metrics. Although a wide range of evaluation metrics are available to assess data performance [4,41,42,43], there is no single metric that encapsulates all the aspects of interest. For this reason, it is useful to consider several performance metrics and understand the type of information or insight they might provide [44].

3.3.1. Quantitative metrics

Three quantitative metrics were used for all the time steps (Table 3):

The Root Mean Square Error (RMSE) is a frequently used measurement of the difference between two variables. It measures the average magnitude of the estimation errors: low RMSE values indicate a low variance in the P datasets. To calculate the RMSE, we used the median value of a P dataset.

The Mean Bias Error (MBE) is used to estimate the average bias in the P datasets and provides a good indication of the mean under- or overestimation of the predictions. A positive value of MBE means an overestimation. To calculate the MBE of a P dataset, we used the median value.

There are several indices used to evaluate the performance and reliability of P datasets over time. We used the Kling-Gupta Efficiency (KGE) because water resource management requires reliable representation of precipitation temporal dynamics (measured by r) and volume (measured by β and γ) [5]. However, for this study we will only analyze the value of the KGE in its totality. Thus, the median value of the KGE is used as a reliability criterion at the scale of the study area.

In Table 38, x corresponds to the ground reference rainfall and y corresponds to the rainfall of the P datasets.

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{(\sigma_x \times \sigma_y)} \quad (1)$$

r is the Pearson correlation coefficient and is used to evaluate the goodness of fit of the P-dataset estimations to the observed data.

$$\beta = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} \quad (2)$$

β is the ratio between the averages of the P datasets and of the observed data.

$$\gamma = \frac{1}{\beta} \times \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \quad (3)$$

γ is the ratio between the coefficients of variation of the P datasets and of the observed data.

Tableau 38: Metrics used for quantitative performance measurements

Metric	Equation	Perfect Value
Mean Bias Error (MBE)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - y_i$	0
Root Mean Square Error (RMSE)	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$	0
Kling Gupta Efficiency (KGE)	$1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2}$	1

3.3.2. Categorical metrics

The performance of the P datasets was also analyzed using categorical metrics at the daily time step [5]. Five statistical indicators based on a contingency table (Table 39) were computed to constitute the categorical metrics (Table 40):

The probability of detection (POD) indicates what fraction of the observed events was correctly estimated.

The false alarm ratio (FAR) corresponds to the proportion of events identified by the P datasets but not confirmed by gauge observations.

The accuracy measures the proportion of correct decisions.

The error measures the proportion of incorrect decisions.

The Heidke skill score (HSS) evaluates the ability of the P datasets to detect precipitation events in comparison to a random prediction. The HSS values range from $-\infty$ to 1, with a perfect score of 1 and negative values indicating that random prediction outperforms the P dataset.

The HSS value was computed at each grid-cell location to observe P-dataset reliability over space.

Tableau 39: Contingency table used for the categorical metric analysis of rainfall

		Rain gauges	
		Precipitation	No precipitation
P datasets	Precipitation	Hits 'a'	False Alarms 'b'
	No precipitation	Misses 'c'	Correct Negatives 'd'

Tableau 40: List of metrics used in categorical performance measurements

Categorical Metric	Equation	Perfect Value
Probability of detection (POD)	$\frac{a}{a + c}$	1
False alarm ratio (FAR)	$\frac{b}{a + b}$	0
Accuracy	$\frac{a + d}{a + b + c + d}$	1

Error	$\frac{b + c}{a + b + c + d}$	0
Heidke Skill Score (HSS)	$\frac{2 * (a * d - b * c)}{[(a + c) * (c + d) + (a + b) * (b + d)]}$	1

4. Results

The performance of the P datasets was evaluated using the quantitative metrics (i.e. KGE, RMSE and MBE) and categorical metrics (i.e. POD, FAR, Accuracy, Error, and HSS) at the annual, seasonal, monthly, and daily temporal scales.

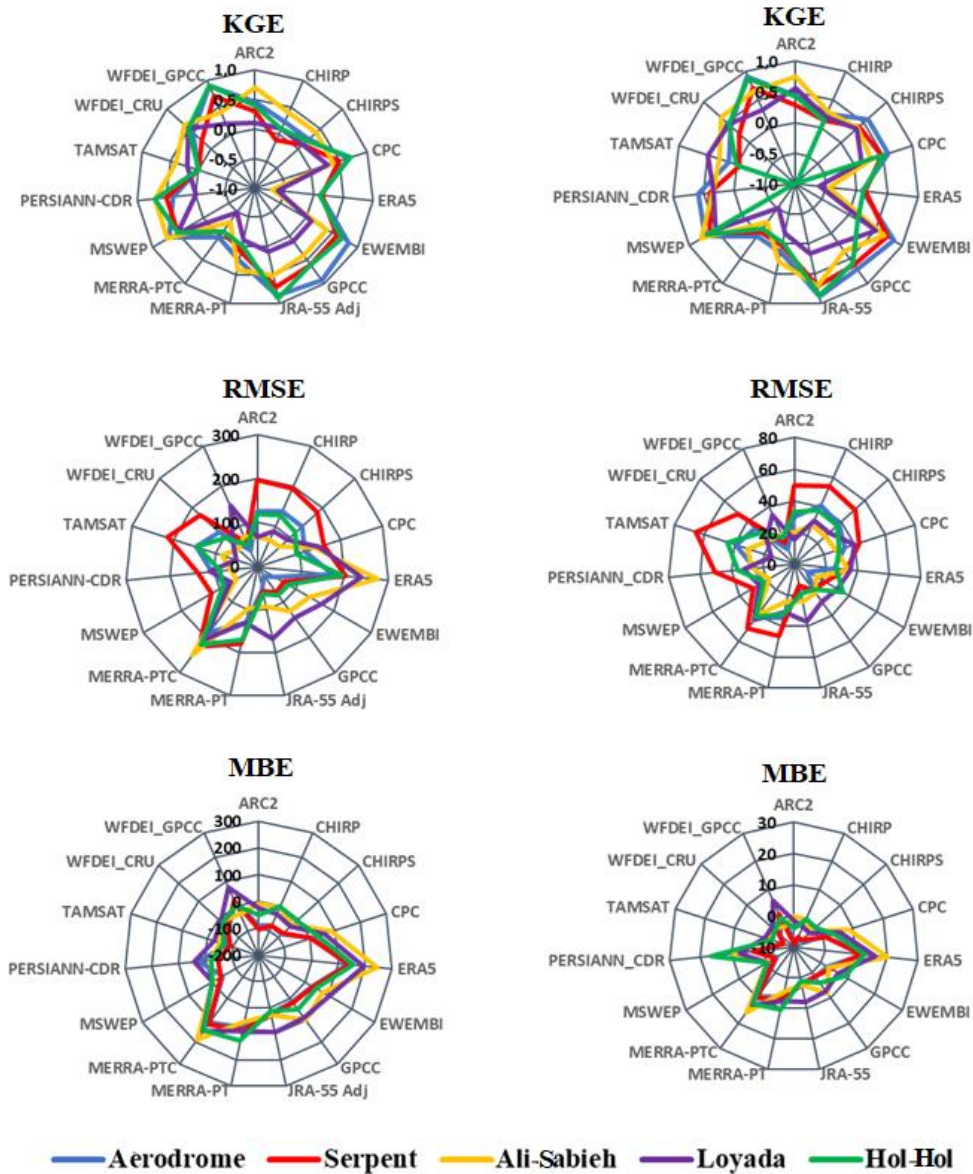


Figure 58: P-dataset metrics for rain gauge stations in the southeast of the Republic of Djibouti, at the annual (left column) and monthly (right column) time steps over the period 1980-1990.

4.1. Annual comparison

4.1.1. Southeast of the Republic of Djibouti (1980-1990 / 15 P datasets)

The KGE values reveal strong agreement with the rain gauge data for some of the P datasets (Figure 59). Eight of the P datasets (CPC, ERA5, EWEMBI, GPCC, JRA-55 Adj, MERRA-2 PT, MERRA-2 PTC and WFDEI-GPCC) overestimated rainfall (positive MBE). Five P datasets have high KGE values: EWEMBI, GPCC, JRA_55 Adj, MSWEP v.2.2 and WFDEI-

GPCC. These five P datasets also have the lowest RMSE values (between 75 and 100 mm per year). Moreover, WFDEI-GPCC is the best among all the P datasets (using the KGE performance criterion), with the most satisfactory values of MBE and RMSE, while MERRA-2 PTC and ERA 5 have the worst performance. It is worth mentioning that the Loyada rainfall station has the lowest values of KGE except for TAMSAT and WFDEI-CRU (Figure 59).

4.1.2. Ambouli Catchment (2008-2013 / 11 P datasets)

The Figure 60 shows the interpolated average annual precipitation of the 11 P datasets compared to the average annual precipitation of the rain gauge stations. We first notice that the general west-east rainfall gradient, which is characterized by a decrease in mean annual rainfall, was captured by most of the analyzed products. IMERG-LR presents the highest annual average (308 mm year^{-1} , with a standard deviation of 25 mm year^{-1}) and GSMaP-Adj the lowest (79 mm year^{-1} , with a standard deviation of 17 mm year^{-1}), which corresponds to a wide range of annual rainfall from 79 to 308 mm. The average annual rainfall according to the rain gauge stations is 90 mm year^{-1} . We have thus identified the 4 P datasets out of the 11 that present the lowest standard deviation in terms of annual mean (ARC2, CHIRPS, GSMaP-Adj and MSWEP v.2.2), with MSWEP v.2.2 the most reliable product compared to the rain gauge stations (with a slight overestimation of the annual rainfall values by 10%). MSWEP v.2.2 product remains effective at both scales. The least performing products are the IMERG products (ER, FR and LR).

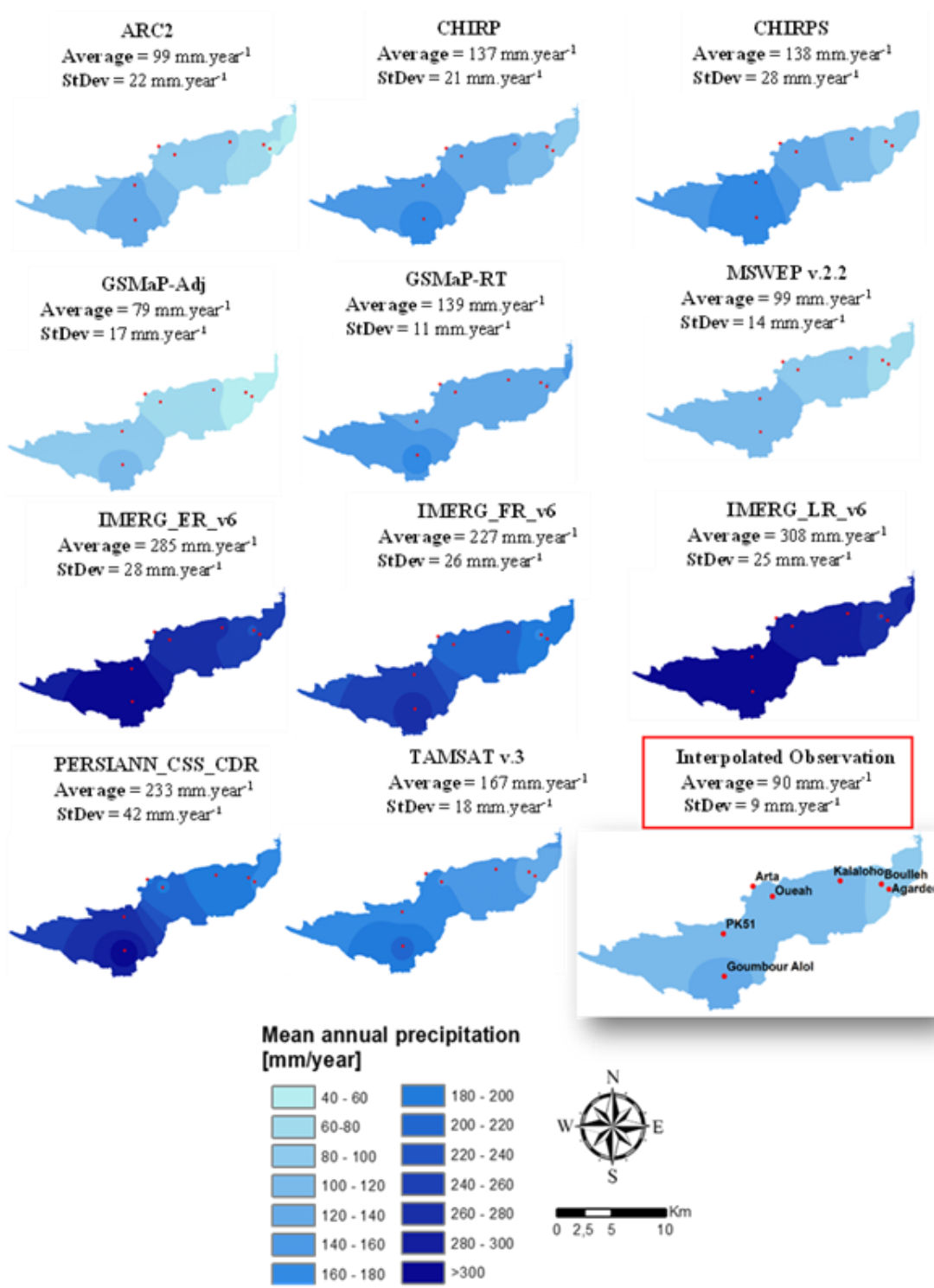


Figure 59: The performance of P datasets in terms of mean annual precipitation compared to the average annual precipitation of the rain gauge stations on 2008-2013.

4.2. Seasonal comparison

4.2.1. Southeast of the Republic of Djibouti (1980-1990 / 15 P datasets)

The climate of the country is characterized by two distinct periods:

a wet period from October to April that is characterized by low but friendly temperatures (between 22 C and 30°C) and a relatively high humidity

a dry period that results in high temperatures (between 30°C and 40°C) and a sandy wind, dry and hot (locally called the Khamsin) which runs from May to September [45] .

Figure 61 presents the metric validation at the seasonal scale. We observe that 80% of the P datasets perform better during the wet season than during the dry season. Like for the annual time step, EWEMBI, GPCC, JRA-55 Adj, MSWEP v.2.2 and WFDEI-GPCC are the best-performing P datasets.

The KGE values of these five P datasets vary considerably, around 0.5 for the wet season and much lower for the dry season. For all the P datasets, the RMSE values for the wet season are on average more than three times higher than for the dry season. The MBE values show that the five P datasets generally overestimate the rainfall (positive MBE values), but we do observe two underestimated values, corresponding to MSWEP v.2.2 (wet season) and WFDEI_GPCC (dry season).

WFDEI-GPCC is the most reliable product at the seasonal scale (wet and dry periods). MERRA-2_PTC is the least accurate product, with high RMSE and MBE values and a KGE value lower than 0.2 (Figure 5).

4.2.2. Ambouli Catchment (2008-2013 / 11 P datasets)

Just like in the seasonal analysis for the southeast of the country, in the Ambouli catchment:

The P datasets mainly overestimate the seasonal rainfall but perform better in the wet season than in the dry season.

CHIRP and CHIRPS perform better in the dry season but have a low KGE value around 0.2.

However, contrary to the above seasonal analysis, the RMSE values for the dry season and for the wet season have an almost identical mean, which means that for this period, we have a rainy season spread over both the wet and dry periods.

We also notice that the best performing products at the seasonal time step are GSMAP-RT and MSWEP v.2.2, which are the same as for the annual time step.

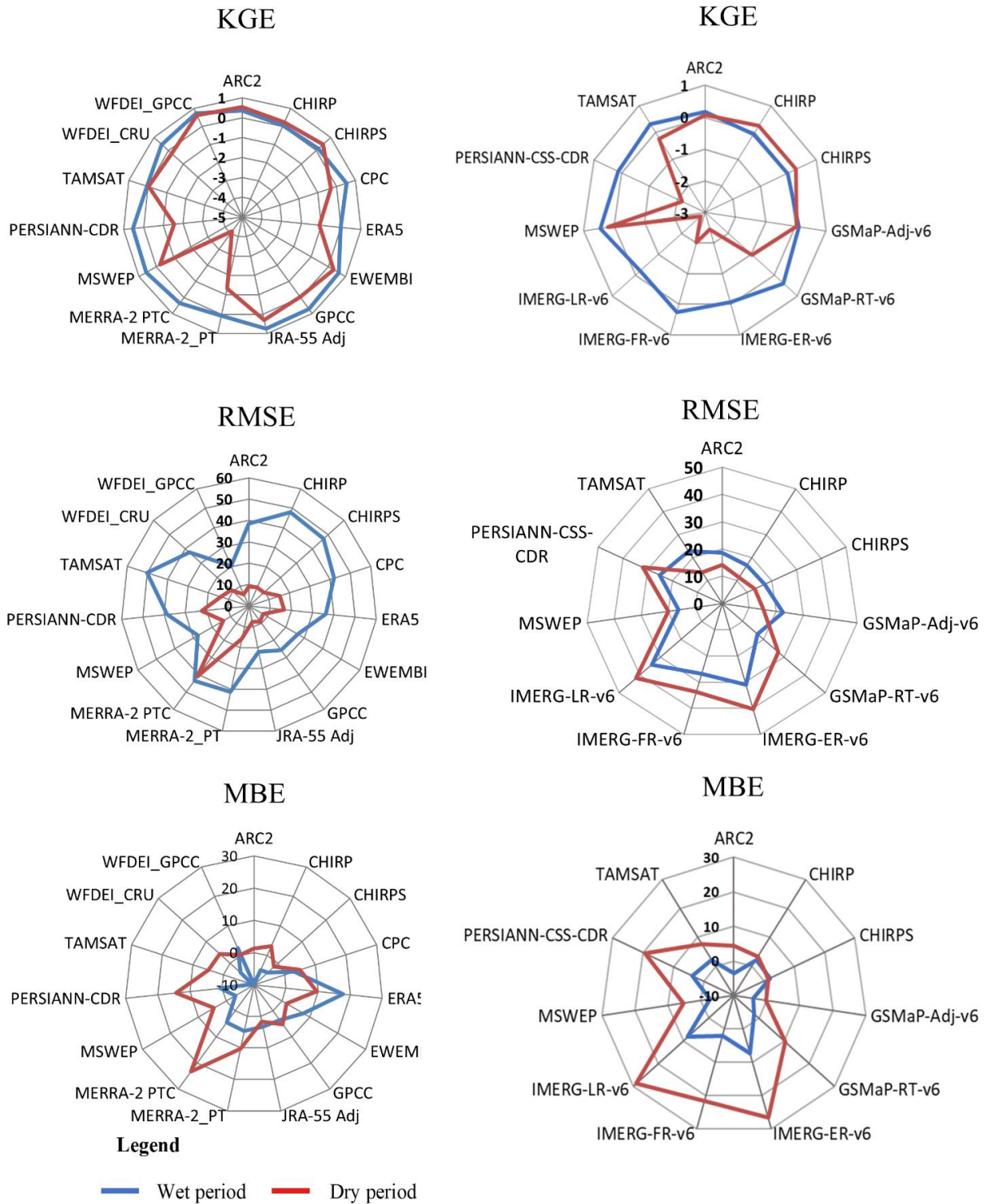


Figure 60: P-dataset metrics for the two study areas, the southeast of the Republic of Djibouti (left column) and the Ambouli catchment (right column), at the seasonal time step.

4.3. Monthly comparison

4.3.1. Southeast of the Republic of Djibouti (1980-1990 / 15 P datasets)

The metrics are listed in Table 41. Strong agreement with the rain-gauge data is observed for some of the P datasets. At the monthly time step, we observe results similar to those obtained at the previous time step (Figure 60):

EWEMBI, GPCC, JRA-55_Adj, MSWEP v.2.2 and WFDEI_GPCC, the five most reliable P datasets at the previous time step, show the best statistical scores at the monthly time step (Figure 60).

WFDEI_GPCC has the best performance (KGE=0.70, RMSE = 19.61 mm month⁻¹ and MBE= 1.27 mm month⁻¹).

MERRA-2 PTC is the least reliable product.

Loyada is the rain gauge station that presents the least satisfactory KGE values.

Tableau 41: Quantitative metrics at different time steps in the southeast of Djibouti: ranking P-Datasets based on KGE with the Top 3 in light grey and bottom 3 in dark grey (including ties).

P datasets	KGE	RMSE (mm)	MBE (mm)	KGE	RMSE (mm)	MBE (mm)	KGE	RMSE (mm)	MBE (mm)
	5 rain gauges in the southeast / 1980-1990			5 rain gauges in the southeast / 1980-1990			Djibouti Aerodrome rain gauge / 1981-2010		
	Annual			Monthly			Daily		
ARC-2	0.39	115.72	-55.9	0.49	29.67	-4.38	-0.02	5.29	-0.05
CHIRP v.2	0.15	123.32	-39.8	0.12	37.84	-3.4	-0.14	3.83	0.05
CHIRPS v.2	0.21	119.3	-48.1	0.2	36.29	-4.01	-0.05	4.51	-0.13
CPC	0.51	129.98	37.96	0.4	34.73	3.88	-0.04	6.26	0.26
ERA5	-0.18	215.88	173.2	-0.14	30.77	14.7	-0.22	4.84	0.42
EWEMBI	0.53	101.12	58.9	0.58	22.85	4.91	0.19	4.32	0.13
GPCC	0.53	90.02	54.34	0.54	20.04	4.67	Not available		
JRA-55 Adj	0.61	88.28	36.98	0.66	21.95	3.08	0.3	5.29	0.11
MERRA-2 PT	0.13	141.32	86.72	0.06	33.81	7.23	-0.31	4.53	0.39

MERRA-2 PTC	-0.19	217.12	143.7	-0.16	43.37	12	-0.2	5.01	0.36
MSWEP v.2.2	0.61	84.4	-18.3	0.66	24.13	-1.52	0.26	4.42	-0.12
PERSIANN- CDR	0.46	99.68	-4.34	0.14	33.99	7.76	0.17	4.71	0.06
TAMSAT	0.12	128	-60.4	0.18	39.2	-3.41	-0.23	5.06	-0.12
WFDEI-CRU	0.44	104.44	-28	0.44	31.33	-2.34	-0.06	4.56	0.01
WFDEI-GPCC	0.62	76.72	15.26	0.7	19.61	1.27	0.26	4.26	0.09

4.3.2. Ambouli Catchment (2008-2013 / 11 P datasets)

Table 42 shows the values obtained for the quantitative metrics at the monthly and daily time steps. MSWEP v.2.2 have the highest KGE (0.32), the lowest RMSE (15.5 mm.month⁻¹) and the lowest MBE (near to 0 mm month⁻¹). This product also has the best performance at the annual and seasonal time steps. On the contrary, the IMERG products (ER, FR and LR) show the least satisfactory results, with a negative KGE value and the highest RMSE and MBE values, like for the previous time step. At the monthly time step, the KGE values obtained for the southeast of the country are higher than those obtained for the Ambouli catchment (0.70 versus 0.35 for the most reliable P datasets).

Only MSWEP v.2.2 remains effective for both spatial resolutions and temporal windows, as well as for the previous time step.

Tableau 42: Quantitative metrics at different time steps in the Ambouli catchment: ranking P-Datasets based on KGE with the Top 3 in light grey and bottom 3 in dark grey (including ties).

P datasets	KGE	RMSE (mm)	MBE (mm)	KGE	RMSE (mm)	MBE (mm)
	Monthly			Daily		
ARC-2	0.17	18.23	0.27	0.06	2.95	0.02
CHIRP v.2	0.04	15.77	2.94	-0.2	2.58	0.09
CHIRPS v.2	0.03	16.33	2.83	0.11	2.61	0.08
GSMaP-Adj v.6	0.12	20.23	1.96	0.06	3.04	0.07
GSMaP-RT v.6	0.23	24.23	3.31	0.19	4.17	0.1

IMERG-ER v.6	-0.94	35.8	15.2	-0.9	4.6	0.48
IMERG-FR v.6	-0.39	27.83	10	-0.3	3.83	0.31
IMERG-LR v6	-1.11	38.64	16.7	-1	4.88	0.53
MSWEP v.2.2	0.32	15.5	0.06	0.35	2.72	0.01
PERSIANN-CCS- CDR	-0.54	30.22	11	-0.3	2.7	0.26
TAMSAT	0.1	19.22	5.27	-0.1	3.17	0.17

4.4. Daily comparison

4.4.1. Southeast of the Republic of Djibouti: Djibouti-Aerodrome rain gauge (1981-2010/ 15 P datasets)

For the daily time step analyses, we use data from the only Djibouti-Aerodrome rain gauge for the period 1981-2010, which is the common period between the station and all the P datasets. The GPCC product is not present in the analysis of the daily time step data because it has a monthly temporal resolution.

The ability of the P datasets to quantify the amount of daily precipitation is relatively low, with most products having negative KGE values (Table 41). Only the most reliable products at the previous time step, EWEMBI, JRA-55_Adj, MSWEP v.2.2, and WFDEI_GPCC, have positive KGE values. With regard to MBE, the values are relatively homogeneous for all the products (from -0.13 mm to 0.42 mm). The low values of MBE and RMSE are due to the low number of rainy days (i.e. with a rainfall of $> 1 \text{ mm day}^{-1}$).

Table 43 shows the results of the POD, FAR, Accuracy, Error and HSS metrics. Some values such as POD, Accuracy and Error give "relatively good" values but are in fact largely skewed due to the very few rain events observed. For the POD, the P datasets MERRA-2 (PT and PTC) and ERA5 (the worst performing products at the previous time steps) detect almost no rainy days, which explains the almost good POD values for these products. EWEMBI, JRA-55 Adj, and WFDEI-GPCC provide a satisfactory POD of > 0.7 . For the FAR, we observe relatively high values for the products (FAR > 0.9 except for CHIRPS, which presents a FAR of 0.75). For the Accuracy and Error, the results are moderately satisfactory for most of the products; however, like for the FAR values, the CHIRPS product has the best Accuracy and Error. Indeed, compared to rainfall data, these products detect events rather well when they occur (POD and accuracy) but they detect much more events than in reality (FAR and Error). Compared to the other products, MSWEP has however a poor POD.

The HSS values for all the products are very low (almost zero). The highest HSS score was obtained by CHIRPS (HSS = 0.19). Given the number of non-rainy days, it seems necessary to set a threshold value (rainfall threshold). Thus, several threshold values ranging from 1 mm to

50 mm were applied to the products for the calculation of HSS [5], and the maximum HSS was obtained with a threshold value of 1 mm. After applying the threshold value of 1 mm, we observe that the HSS values are higher, this probably shows that there are more detected rainfall < 1mm and the products with the best performance are the same as at the annual and monthly time steps (EWEMBI, JRA-55 Adj, MSWEP v.2.2 and WFDEI-GPCC), as well as CHIRPS. Therefore, the optimum of the "threshold HSS" is HSS > 1 mm, which probably shows that there is limited concomitance between the P-datasets and the observed data for the extreme rainfall events (this analysis is more detailed in the next paragraph).

With an average annual rainfall of 150 mm at the Djibouti Aerodrome station, the average number of rainy days is 12 days (higher than 1 mm). However, the most efficient products at daily time step, MSWEP, CHIRPS, and JRA-55 give an average of 16, 21, and 24 rainy days respectively (for rainfall higher than 1 mm). In contrast, the other products provide results with an average of more than 40 days (with a maximum of rainy days for the MERRA-2 product with 86 rainy days on average).

To complement this analysis, we also investigated the ability of these P-datasets to detect rainfall events triggering runoff. For this purpose, a threshold of rainfall greater than 10 mm (which corresponds to an average of 3 events per year) was used. The percentage of concomitant rainfall days was calculated for each P dataset, with values ranging from 44% for MSWEP to 80% for EWEMBI for the efficient products.

After obtaining the concomitant day values, we analyzed the concomitance of the rainfall values and observed that, on average, 95% of rainfall events higher than 10 mm are significantly underestimated by the P datasets. There was no concomitance observed between the P datasets and extreme rainfall values (greater than 50 mm). These results highlight the limitations of these P-datasets for rainfall-runoff modeling at a daily time step and underscore the need for further research to develop more accurate and reliable rainfall datasets for high flood forecasting in semi-arid regions.

Tableau 43: Categorical metrics at different time steps in the southeast of Djibouti: Ranking P-Datasets based on HSS > 1 mm with the Top 3 in light grey and Bottom 3 in dark grey (including ties).

P-Datasets	POD (optimum =1)	FAR (optimum = 0)	Accuracy (optimum = 1)	Error (optimum = 0)	HSS (optimum = 1)	HSS daily rainfall > 1mm (optimum = 1)
ARC-2	0.06	0.93	0.88	0.12	10 ⁻⁴	0.08
CHIRP v.2	0.83	0.92	0.33	0.67	0.02	0.12

CHIRPS v.2	0.24	0.75	0.9	0.1	0.19	0.21
CPC	0.45	0.89	0.71	0.29	0.07	0.14
ERA5	0.95	0.92	0.26	0.74	0.03	0.13
EWEMBI	0.76	0.9	0.53	0.47	0.07	0.19
JRA-55 Adj	0.72	0.9	0.53	0.47	0.06	0.19
MERRA-2 PT	1	0.93	0.07	0.93	10 ⁻⁶	0.12
MERRA-2 PTC	0.9	0.93	0.24	0.76	0.01	0.11
MSWEP v.2.2	0.29	0.9	0.78	0.22	0.11	0.20
PERSIANN-CDR	0.38	0.9	0.74	0.26	0.06	0.16
TAMSAT	0.1	0.92	0.86	0.14	0.01	0.04
WFDEI-CRU	0.71	0.9	0.54	0.46	0.06	0.16
WFDEI-GPCC	0.74	0.9	0.55	0.45	0.07	0.19

4.4.2. Ambouli Catchment (2008-2013 / 11 P datasets)

Similarly to the daily analysis in the southeast, the ability of the P datasets to quantify the amount of daily precipitation is relatively low. In terms of the KGE values (Table 42), only GSMaP-RT and MSWEP v.2.2 (the best-performing P datasets at the previous time steps) present values greater than 0.3. These values are homogenous with those obtained at the previous time step. The RMSE and MBE values of these two products are satisfactory, with an MBE close to 0 mm and an RMSE close to 2 mm.

To complement the analysis of the quantitative metrics, we analyzed the selected categorical metrics (Table 44):

The POD and FAR values are mainly high because a mean of 11 rainy days was recorded per year at the Ambouli catchment (these results are in agreement with the results obtained in the southeast of Djibouti), and rainfall estimation products in general overestimate the number of rainfall event in an arid environment, which results in FAR values close to 1 (optimum 0).

The Accuracy and Error values for the P datasets (other than the CHIRP product) are respectively on average close to 0.9 and 0.1. These values are satisfactory.

It is the HSS that allows us to quantify the reliability of the P datasets in reproducing daily rainfall. We note that the values of HSS without a threshold value are almost zero, while the values of HSS with a threshold at 1 mm are higher (for some products values close to 0.3), which agrees with the study conducted by Satge [5] and the point-to-pixel analysis (southeast of the Republic of Djibouti). The highest scores in terms of HSS, with a threshold of > 1 mm, were obtained by GSMaP-RT, MSWEP v.2.2 and CHIRPS. Therefore, the results obtained in the Ambouli catchment, are similar to those obtained in the southeast zone

Tableau 44: Categorical metrics at different time steps in the Ambouli Catchment: Ranking P-Datasets based on HSS > 1 mm with the Top 3 in light grey and Bottom 3 in dark grey (including ties).

P datasets	POD (optimum =1)	FAR (optimum = 0)	Accuracy (optimum = 1)	Error (optimum = 0)	HSS (optimum = 1)	HSS daily rainfall > 1mm (optimum = 1)
ARC-2	0.32	0.77	0.93	0.07	0.23	0.21
CHIRP v.2	0.9	0.96	0.27	0.73	0.01	0.16
CHIRPS v.2	0.44	0.78	0.92	0.08	0.26	0.25
GSMaP-Adj v.6	0.38	0.84	0.91	0.09	0.18	0.22
GSMaP-RT v.6	0.5	0.77	0.92	0.08	0.28	0.34
IMERG-ER v.6	0.54	0.87	0.85	0.15	0.16	0.23
IMERG-FR v.6	0.57	0.86	0.85	0.15	0.18	0.21
IMERG-LR v6	0.56	0.86	0.85	0.15	0.17	0.24
MSWEP v.2.2	0.58	0.88	0.82	0.18	0.24	0.30
PERSIANN-CCS-CDR	0.41	0.81	0.91	0.09	0.21	0.22
TAMSAT	0.51	0.85	0.88	0.12	0.19	0.21

5. Discussions

In recent years, the use of P datasets has been increasing in areas with a low rainfall network density due to the ease of access to data and the spatial coverage of these products.

In this study, some P datasets provide good performance at all time steps. For the southeast of the Republic of Djibouti, three out of five of the best-performing products (EWEMBI, JRA-55 Adj and WFDEI-GPCC) are reanalysis products that are merged with gauge-based information. For the Ambouli catchment, the best-performing P datasets are satellite-based products that are merged with gauge-based information (except for GSMaP-RT, which is a pure satellite product). Thus, the best-performing products are those that integrate rain gauge information into their algorithm, which confirms the previous results obtained in Africa [8,46,47] and other regions of the world [38,48,49].

For this study, CHIRPS performs better than CHIRP at all time steps. However, GSMaP-RT outperformed its adjusted version, GSMaP-Adj, at the monthly and daily time steps. This result is consistent with previous observations over the CONUS (CONtiguous US), [5,38] and illustrates the potential limit of P-dataset algorithms to consider the best gauge data. GSMaP-RT v.6 is the only P dataset with no gauge-based information that ranks in the top two monthly and daily at the catchment scale. Therefore, GSMaP-Adj v.6 should be highly effective if it used gauge-based information in the optimal form [5] .

Only MSWEP v.2.2 P is reliable at all time steps and for both time periods considered. The strong performance of MSWEP v.2.2 might be due to the integration of daily gauge observations for the calibration of rainfall estimates [11,33,38] . In comparison to the rain gauge of Djibouti-Aerodrome, this product underestimates heavy rainfall and overestimates light rainfall, but still manages to detect the rainy days. CHIRPS is among the best products at the daily time step over the two periods of the study. These results agree with several comparative studies from the East African region [50] . However, for most of the P datasets, there is a degradation in the performance from the annual to the lower time steps.

It is advisable to be attentive to the P-dataset version. Our results show that MSWEP v2.2 has a better performance in terms of rainfall data accuracy. This best identified product MSWEP v2.2 has a newer version, MSWEP v2.8. One could have expected performance increasing with version. But, when analyzing the rainfall distribution, MSWEP v2.2 shows a better fit to the observed data than MSWEP v2.8 [51]. In addition, we find that MSWEP v2.2 provides more consistent data for semi-arid areas exhibiting low rainfall, in contrast to MSWEP v2.8 which shows inconsistencies in these areas. MSWEP v2.2 outperforms the new MSWEP v2.8 version for estimating rainfall data in semi-arid regions. These results highlight the importance of continuous evaluation of rainfall data models to assess their performance and accuracy.

According to Satge [5] and Omenge [11], products dedicated to the African continent (TAMSAT and ARC-2) do not always perform well. For the southeast of the Republic of Djibouti, our results confirm this low performance (KGE and HSS) over the years 1980-1990. However, ARC2 is in the top three over the period 2008-2013 at the catchment scale at the

annual and monthly time steps and gives satisfactory results at the daily time step (ranked 4/11 in terms of performance). Therefore, as for most P datasets, the use of a new rainfall estimation algorithm may be advantageous, but it may not be the case depending on each model. It would be recommendable to select a set of fairly well performing models (and not only just the best one), and test the performance of the last two versions of the same models, in order to span the possible optimal point of representativeness of rainfall products. This method should be continued in the future on the region for assessing the progress of models in representing the rainfall variability.

This study focused on long-term P datasets, but also on more recent P datasets (created in the 2000s) at the catchment scale. More recent products perform better than those incorporating historical data into their database (except for MSWEP v.2.2), which is probably due to the fact that the most recent products integrate new innovations (high-definition satellite images, new passive microwave sensors) into their algorithm.

6. Conclusions

Our objective was to determine the best performing rainfall estimation products in the study area for use in supplementing the limited data available for use in hydrologic modeling. To achieve this objective, we compared the performance of different rainfall estimation products using two types of metrics: quantitative (KGE, RMSE and MBE) and categorical metrics (POD, FAR, Accuracy and error). The quantitative metrics measured the accuracy of rainfall estimation in terms of numerical values. The categorical metrics, on the other hand, were used to evaluate the ability of the rainfall estimation products to correctly detect rainfall events. The use of categorical metrics was particularly important in our study, as it allowed us to better evaluate the ability of the different rainfall estimation products to reproduce the temporal variability of rainfall. We compare P datasets to rain-gauge data at two spatial resolutions (southeast of the Republic of Djibouti and the Ambouli catchment) over two temporal windows (1980-1990 / 2008-2013).

For the southeast of the Republic of Djibouti, at the point-to-pixel scale, five P datasets present high KGE values at the annual and monthly time steps: EWEMBI, GPCC, JRA-55 Adj, MSWEP v.2.2 and WFDEI-GPCC. At the seasonal time step, all the P datasets reproduce the seasonality relatively well but overestimate the precipitation amounts. At the daily time step, the five best products in terms of KGE and HSS are CHIRPS, EWEMBI, JRA-55 Adj, MSWEP V.2.2 and WFDEI-GPCC. The least effective products are the MERRA-2 products (PT and PTC) and the IMERG products (ER, FRand LR).

At the scale of the Ambouli catchment, the best products are: At annual and seasonal time scales, in terms of average annual rainfall over the catchment: MSWEP v.2.2, GSMaP-Adj, ARC2, and GSMaP-RT. At monthly time scale, in terms of KGE value: MSWEP v.2.2, GSMaP-RT, ARC2 and GSMaP-Adj. At daily time scale, in terms of the metrics used (KGE and HSS): MSWEP v.2.2, GSMaP-RT, and CHIRPS.

Despite a sparse rainfall measurement network and often discontinuous data, some observations emerge from the analyses. As with the study conducted by Babaousimail in 2019[15], the results of our study corroborate the observation that the performance of P datasets tends to deteriorate as the time scale decreases from annual to daily. . The performance of most of the products also differs from one spatial scale to another.

In our study, we also considered the impact of climate change by examining two distinct measurement periods, 1980-1990 and 2008-2013. These periods contained data availability allow also to capture temporal dynamics and assess changes in precipitation patterns resulting from climate change. The decreasing trend in average annual precipitation observed during both periods may reflect the influence of climate change on the hydroclimatic conditions. Our findings demonstrate the relevance of considering different temporal and spatial windows and illustrates that a given P dataset performs differently according to the spatiotemporal scales.

Strong discrepancies between rain gauge observations and P datasets are illustrated. However, MSWEP v.2.2, GSMaP-RT and CHIRPS products can be used to indicate an order of magnitude of rainfall in the southeast area of Ambouli, especially if we consider long inter-annual series. MSWEP v2.2 outperforms the new MSWEP v2.8 version for estimating rainfall data in semi-arid regions. These results highlight the importance of continuous evaluation of rainfall data models to assess their performance and accuracy.

Nevertheless, even the most effective products are not suitable for flood forecasting using rainfall-runoff models at the daily time step in our study area. This is supported by our analysis of categorical metrics and the concomitant rainfall days. While some products, such as CHIRPS and MSWEP v2.2, showed better performance in terms of overall rainfall detection and days of concomitant rainfall, they still fell short in accurately predicting extreme rainfall triggering floods.

While the performance of some of the P-datasets is acceptable at the monthly and annual time steps, the poor performance at the daily time step is a major limitation for our study. In the specific context of our study and within our study area this finding highlights the need for developing more accurate and reliable P-datasets that can capture the spatiotemporal variability of daily rainfall in the region and especially the highest events. In addition, further research is needed to investigate the factors that influence the performance of P-datasets in the region, such as the impact of topography, land cover and land use.

Overall, our study provides important insights into the limitations of P-datasets for flood forecasting in the Ambouli catchment and underscores the need for continued efforts to improve the accuracy of rainfall data for hydrological applications. In conclusion, while P-datasets are useful tools for studying precipitation patterns and trends, they should be used with caution for flood forecasting in semi-arid regions. First and foremost the data specific to the study region (such as rainfall, river flow, topography, land use ...) and then more sophisticated modeling approaches (advanced hydrological models, data assimilation techniques, remote sensing data,

machine learning algorithms, or ensemble modeling approaches...) are helpful for accurate and reliable flood prediction in these vulnerable regions.

References

1. Assowe Dabar O, Camberlin P, Pohl B, Mohamed Waberi M, Osman Awaleh M, Silah-Eddine S. Spatial and temporal variability of rainfall over the Republic of Djibouti from 1946 to 2017. *Int J Climatol*, 2021,41, pp. 2729–2748. <https://doi.org/10.1002/joc.6986>
2. Djama, M. Trajectoire du pouvoir en pays somali. In: *Cahiers d'études africaines*. La Corne dans tous ses États, 1997, 37(146), pp. 403-428. <https://doi.org/10.3406/cea.1997.3520>
3. Camberlin., P. Les précipitations dans la Corne orientale de l'Afrique: Climatologie, variabilité et connexions avec quelques indicateurs oceano-atmosphériques. PhD Thesis. Université de Bourgogne, Dijon, France, 1994
4. Ayehu G.T., Tadesse T, Gessesse B, Dinku T. Validation of new satellite rainfall products over the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Atmos. Meas. Tech*, 2018, 11, pp. 1921–1936, <https://doi.org/10.5194/amt-11-1921-2018>
5. Satge, F., Defrance, D., Sultan, B., Bonnet, M-P., Seyler, F., Rouché, N., Pierron F., Paturel, J-E. Evaluation of 23 gridded precipitation datasets across West Africa, *J.Hydrol*, 2020, 581,124412. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124412>.
6. Jorge L. Peña-Arancibia, Albert I. J. M. van Dijk, Luigi J. Renzullo, and Mark Mulligan. Evaluation of Precipitation Estimation Accuracy in Reanalyses, Satellite Products, and an Ensemble Method for Regions in Australia and South and East Asia. *J. Hydromet*, 2013, 10, pp. 1323–1333. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0132.1>
7. Ceccherini, G., Amezttoy I. , Hernández, C.P.R. and Moreno C.C. High-resolution precipitation datasets in South America and West Africa based on satellite-derived rainfall, enhanced vegetation index and digital elevation model. *Remote Sens*, 2015, 7, pp. 6454–6488: <https://doi.org/10.3390/rs70506454>.
8. Gosset, M., Viarre, J., Quantin, G., Alcoba, M. Evaluation of several rainfall products used for hydrological applications over West Africa using two high-resolution gauge networks. *Q. J. R. Meteorol. Soc*, 2013, 139 (673), pp. 923–940. <https://doi.org/10.1002/qj.2130>.
9. Naschen, K., Diekkrüger, B., Leemhuis, C., Steinbach, S., Seregina, L.S., Thonfeld, F., Van der Linden, R. Hydrological modeling in data-scarce catchments: the Kilombero floodplain in Tanzania. *Water*, 2018, 10, 599pp. <https://doi.org/10.3390/w10050599>.
10. Pellarin, T., Roman-Cascon, C., Baron, C., Bindlish, R., Brocca, L., Camberlin, P., Fernandez-Prieto, D., Kerr, Y.H., et al. The precipitation inferred from soil moisture (PrISM) near real-time rainfall product: evaluation and comparison. *Remote Sens*, 2020 12(3), 481. <https://doi.org/10.3390/rs12030481>.

11. Omonge, P., Feigl, M., Olang, L., Schulz, K., Herrnegger, M. (2022) Evaluation of satellite precipitation products for water allocation studies in the Sio-Malaba-Malakisi river basin of East Africa. *J. Hydro.: Reg. Stud.*, 2022, 39, pp. 2214-5818. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100983>
12. Lakew, H.B., Moges, S.A., Asfaw, D.H. Hydrological performance evaluation of multiple satellite precipitation products in the upper Blue Nile basin. Ethiopia. *J. Hydro.: Reg. Stud.*, 2020, 27, 100664. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100664>.
13. Sorooshian, S., Hsu, K.L., Gao, X., Gupta, H.V., Imam, B., Braithwaite, D. Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2000, 81(9), pp. 2035–2046. <https://doi.org/10.1175/1520-0477>
14. Ozer, P. and Mahamoud, A. Recent extreme precipitation and temperature changes in Djibouti City (1966–2011). *Journal of Climatology*, 2013, pp 1–8. <https://doi.org/10.1155/2013/928501>
15. Hassen Babaousmail, Rongtao Hou, Brian Ayugi and Gnim Tchelim Gnitou Evaluation of satellite-based precipitation estimates over Algeria during 1998–2016. *J of Atmos and Sol-Ter Phys*, 2019, 195, 105139. doi: 10.1016/j.jastp.2019.105139.
16. Daher Aden, A. The making of hazard : of a social-environmental explanation of vulnerability to drought in Djibouti, Phd Thesis, King's College London, London, England, 2014
17. Beau, A., Bourhis, E. and Berges, R. Aperçu de climatologie dynamique du Territoire Français des Afars et des Issas. *La Météorologie*, 1976, 6, 63–68.
18. Nour Ayeh M. La ville de Djibouti entre intégration aux enjeux mondiaux et fragmentation urbaine. *Territoire en mouvement Revue de géographie et aménagement*, 2015, 27-28, pp. 19, <https://doi.org/10.4000/tem.3183>
19. Seyoum WM, Milewski AM, Durham MC. (2015) Understanding the relative impacts of natural processes and human activities on the hydrology of the Central Rift Valley lakes, East Africa, *Hydrological Processes*, 2015, 29, pp. 4312–4324. <https://doi.org/10.1002/hyp.10490>
20. Nour Ayeh, M. La dynamique des températures et ses risques pour les populations de Djibouti dans le contexte du réchauffement global, NAAJ, 2019,
21. Xie, P., Yatagai, A., Chen, M., Hayasaka, T., Fukushima, Y., Liu, C., Yang, S. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia. *J. Hydrometeorol.*, 2007, pp. 607–626. <https://doi.org/10.1175/JHM583.1>

22. Chen, M., Shi, W., Xie, P., Silva, V.B.S., Kousky, V.E., Higgins, R.W., Janowiak, J.E. Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation. *J. Geophys. Res.*, 2008, 113, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1029/2007JD009132>.
23. Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-christoffer, A., Ziese, M., Rudolf, B. (2014) GPCC 's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. *Theor and App.Climato*, 2014, 1155(1-2), pp. 15–40, <https://doi.org/10.1007/ s00704-013-0860-x>.
24. Becker, A., Finger, P., Rudolf, B., Schamm, K., Schneider, U., Ziese, M., Precipitation, G., Centre, C. and Wetterdienst, D. A description of the global land-surface precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901–present. *Earth Syst. Sci. Data*, 2013, 5, pp. 71–99. <https://doi.org/10.5194/essd-5-71-2013>
25. Dee, D. P. , S. M. Uppalaa, A. J. Simmons ,P.Berrisford ,P.Poli , S. Kobayashi ,U. Andrae, M.A.Balmaseda, G.Balsamo ,P.Bauer, P.Bechtold ,A.C.M.Beljaars ,L. van de Berg, J.Bidlot, N.Bormann, C.Delsol, R.Dragani, M.Fuentes, A.J.Geer, L. Haimberger, S.B.Healy, H.Hersbach, E.V.Holm, L.Isaksen, P.Kallberg, M. Kohler, M. Matricardi, A.P.McNally, B.M.Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K.Park, C. Peubey, P.deRosnay, C.Tavolato, J.-N. Thepaut, F. Vitart. The ERA-Interim Reanalysis: Configuration and Performance of the Data Assimilation System. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137, pp. 553-597. <https://doi.org /10.1002/qj.828>.
26. Yamamoto, M.K., Shige, S. Implementation of an orographic/nonorographic rainfall classification scheme in the GSMaP algorithm for microwave radiometers. *Atmos. Res*, 2014, 163, pp. 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.07.024>.
27. Novella, N.S., Thiaw, W.M. African rainfall climatology version 2 for famine early warning systems. *J. Appl. Meteorol. Climatol*, 2012, 52 (1996), pp. 588–606. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0238.1>.
28. Ushio, T., Sasashige, K., Kubota, T., Shige, S., Okamoto, K., Aonashi, K., Inoue, T., Takahashi, N., Iguchi, T., Kachi, M., Oki, R., Morimoto, T., Kawasaki, Z.-I. A Kalman filter approach to the global satellite mapping of precipitation (GSMaP) from combined passive microwave and infrared radiometric data. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 2009, 87A, pp. 137–151. <https://doi.org/10.2151/jmsj.87A.137>.
29. Huffman, G. J., D. T. Bolvin, D. Braithwaite, K. Hsu, R. Joyce, and P. Xie. NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG). Algorithm Theoretical Basis Doc (ATBD) Version 4: Greenbelt, MD, 2015, 26 pp.
30. Ashouri, H., Hsu, K.L., Sorooshian, S., Braithwaite, D.K., Knapp, K.R., Cecil, L.D., Nelson, B.R., Prat, O.P. PERSIANN-CDR: daily precipitation climate data record from

- multisatellite observations for hydrological and climate studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 96 (1), 2015, pp. 69–83. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00068.1>.
31. Hong, Y., Hsu, K.L., Sorooshian, S., and Gao, X. Precipitation estimation from remotely sensed imagery using an artificial neural network cloud classification system. *J. Appl. Meteor.* 2004, 43(12), 1834-1853. <https://doi.org/10.1175/JAM2173.1>.
 32. Maidment, R.I., Grimes, D., Black, E., Tarnavsky, E., Young, M., Greatrex, H., Allan, R.P., Stein, T., Nkonde, E., Senkunda, S., Misael, E., Alcántara, U. Data Descriptor: a new, long-term daily satellite-based rainfall dataset for operational monitoring in Africa. *Nat. Publ. Gr.* 2017, 4, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.63>.
 33. Funk, C., Verdin, A., Michaelsen, J., Peterson, P., Pedreros, P., Husak, G., A global satellite-assisted precipitation climatology. *Earth Syst. Sci. Data*, 2015, 7, pp. 275–287. <https://doi.org/10.5194/essd-7-275-2015>.
 34. Lange, S. Earth2Observe, WFDEI and ERA-Interim data Merged and Bias-corrected for ISIMIP (EWEMBI) [Data set]. GFZ Data Services, 2019. <https://doi.org/10.5880/pik.2019.004>
 35. Izumi, T., Takikawa, H., Hirabayashi, Y., Hanasaki, N., Nishimori, M., Contributions of different bias-correction methods and reference meteorological forcing data sets to uncertainty in projected temperature and precipitation extremes. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2017, 122 (15), pp. 7800–7819. <https://doi.org/10.1002/2017JD026613>.
 36. Weedon, G. P., G. Balsamo, N. Bellouin, S. Gomes, M. Best, J. and Viterbo, P. (2014) The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data. *Water. Resour. Res.*, 2014, 50. <https://doi.org/10.1002/2014WR015638>.
 37. Gelaro, R., McCarty, W., Suarez, M.J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C.A., Darmenov, A., Bosilovich, M.G., Reichle, R., Wargan, K., Coy, L., Cullather, R., Draper, C., Akella, S., Buchard, V., Conaty, A., Da Silva, A.M., Gu, W., Kim, G.-K., Koster, R., Lucchesi, R., Merkova, D., Nielsen, J.E., Partyka, G., Pawson, S., Putman, W., Rienecker, M., Schubert, S.D., Sienkiewicz, M., Zhao, B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), *Ame. Meteorol. Soc.* 2017, pp. 5419–5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>.
 38. Beck, H.E., Pan, M., Roy, T., Weedon, G.P., Pappenberger, F., Dijk, A.I.J.M., Van, Huffman, G.J., Adler, R.F., Wood, E.F. Daily evaluation of 26 precipitation datasets using Stage-IV gauge-radar data for the CONUS. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, pp. 207–224. <https://doi.org/10.5194/hess-23-207-2019>
 39. Xie, P. and Arkin, P.A. An intercomparison of gauge observations and satellite estimates of monthly precipitation. *J. Appl. Meteor.* 1995, 34, pp. 1143-1160.

40. Lu, G.Y., Wong, D.W. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Comput.Geosci*, 2008, 34(9), pp. 1044–1055. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.010>
41. Wang ,Y., Sen, OL., Wang, B. A highly resolved regional climate model (IPRC-RegCM) and its simulation of the 1998 severe precipitation event over China. Part I: model description and verification of simulation. *J. Clim*, 2003, 16, pp. 1721–1736.
42. Segele, Z.T., Leslie, L.M., Lamb, P.J. Evaluation and adaptation of a regional climate model for the Horn of Africa: rainfall climatology and interannual variability. *Int J Climatol*, 2008. <https://doi.org/1.1002/joc.1681>.
43. Diro, G.T., Grimes, D.I.F., Black E, O’Neill A, Pardo-Iguzquiza E. Evaluation of reanalysis rainfall estimates over Ethiopia.*Int. J Climatol*, 2009, 29, pp. 67–78. <https://doi.org/1.1002/joc.1699>.
44. Akinsanola, A.A., Ogunjobi, K.O., Ajayi, V.O., Adefisan, E.A., Omotosho, J.A., Sanogo, S. Comparison of five gridded precipitation products at climatological scales over West Africa. *Meteorol. Atmos Phys*, 2016, <https://doi.org/10.1007/s00703-016-0493-6>.
45. Houmed-Gaba, A. Hydrogéologie des milieux volcaniques sous climat aride. Caractérisation sur site expérimental et modélisation numérique de l’aquifère basaltique de Djibouti (Corne de l’Afrique), PhD thesis, University of Poitiers, Poitiers, France, 2009, 220 pp.
46. Casse, C., Gosset, M., Peugeot, C., Pedinotti, V., Boone, A., Tanimoun, B.A., Decharme, B. Potential of satellite rainfall products to predict Niger River flood events in Niamey. *Atmos. Res*, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.01.010>.
47. Poméon, T., Jackisch, D., Diekkrüger, B. Evaluating the performance of remotely sensed and reanalysed precipitation data over West Africa using HBV light. *J. Hydrol*, 2017, 547, pp. 222–235. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.055>.
48. Dinku, T., Ceccato, P., Grover-Kopec, E., Lemma, M., Connor, S.J., Ropelewski, C.F. Validation of satellite rainfall products over East Africa’s complex topography. *Int. J. Remote Sens*, 2007, 28 (7), pp. 1503–1526. <https://doi.org/10.1080/01431160600954688>.
49. Satgé, F., Bonnet, M.-P., Gosset, M., Molina, J., Hernan, W., Yuque Lima, Pillco Zolá, R., Timouk, F., Garnier, J. Assessment of satellite rainfall products over the Andean plateau. *Atmos. Res*, 2016, 167, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.07.012>.
50. Gebrechorkos, S.H., Huelsmann, S., Bernhofer, C. Evaluation of Multiple Climate Data Sources for Managing Environmental Resources in East Africa. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 2018, 22, pp. 4547–4564. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4547-2018>.

51. Ageet, S., Fink, A. H., Maranan, M., Diem, J. E., Hartter, J., Ssali, A. L., & Ayabagabo, P. Validation of satellite rainfall estimates over equatorial east Africa. *Journal of Hydrometeorology*, 2022, 23(2), pp. 129–151. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-21-0145.1>

Chapitre 6 : Caractérisation du fonctionnement hydrologi que du bassin versant d'Ambouli

Chapitre 6 : Caractérisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant d'Ambouli

Dans ce chapitre essentiel, nous analysons en profondeur le fonctionnement hydrologique du bassin versant d'Ambouli, situé dans la République de Djibouti, en mettant l'accent sur la compréhension des dynamiques complexes et essentielles pour la gestion des ressources en eau, particulièrement dans le contexte du changement climatique et de la pression anthropique. La première partie se concentre sur l'article "Analyse comparative des termes du bilan hydrologique du bassin versant d'Ambouli", qui examine minutieusement les composants du bilan hydrologique tels que les précipitations, l'évapotranspiration, l'écoulement de surface et les flux souterrains, en utilisant une méthodologie combinant l'analyse de données de terrain et des techniques de télédétection. La seconde partie aborde la modélisation hydrologique du bassin amont du barrage de l'Amitié, utilisant des modèles sophistiqués pour simuler les processus hydrologiques et prédire les réactions du bassin à différents scénarios.

1. Analyse comparative des termes du bilan hydrologique du bassin versant d'Ambouli (République de Djibouti)

Golab Moussa Omar^{1,2*}, Jean-Emmanuel Paturel¹, Christian Salles¹, Gil Mahé¹, Mohamed Jalludin²

¹HSM, Univ Montpellier, CNRS, IRD, Montpellier, France

²Centre d'Etudes et de Recherches de Djibouti, Institut des Sciences de la Terre, Route de l'aéroport, Djibouti-ville, Djibouti

Correspondence to: Golab M. Omar (golabmoussa@gmail.com)

Résumé. Le bassin versant exoréique de l'Oued Ambouli situé au sud-est de la République de Djibouti, s'étend sur plus de 794 km² soit 3.5% de la surface du pays. Il est le plus grand bassin versant du district de Djibouti. Cet oued est soumis à des crues rares et brèves qui causent de lourds dégâts en vie humaine et économiques, qui sont accentués par l'expansion urbaine de la ville de Djibouti. Cette étude vise à calculer les différentes composantes du bilan hydrologique. Sur la période 2008-2013, ce bassin a reçu une pluie moyenne annuelle de 93.6 mm ; l'évapotranspiration réelle (ETR) sur le bassin versant est estimée à 79.6 mm/an soit 85% des précipitations moyennes annuelles ; l'écoulement total approche un volume de 6.5x10⁶ m³/an, soit 3.7 mm/an ; par déduction, selon la formule du bilan hydrologique, nous avons une infiltration totale estimée à 10.3 mm/an. Ces résultats comparés aux résultats obtenus

antérieurement, apparaissent comme très différents (principalement une baisse des valeurs). Les données disponibles sont très fragmentées dans le temps et ne couvrent que des périodes trop courtes pour pouvoir prétendre fournir des valeurs de référence pour un bilan hydrologique et permettre un suivi évolutif de celui-ci.

1. Introduction

La République de Djibouti se caractérise par un climat tropical aride avec des pluies annuelles très irrégulières dans le temps et dans l'espace. La ville de Djibouti s'est développée sur le bassin versant de l'Oued Ambouli. Cet oued est à l'origine de crues rares et brèves avec de lourds dégâts en vie humaine et économiques qui sont accentués par l'expansion urbaine de la ville de Djibouti. Afin de contribuer à la prévention contre les risques d'inondations, qui surviennent de plus en plus fréquemment, et à la protection de la ressource en eau dans le bassin de l'Oued Ambouli, nous avons essayé de rassembler toutes les données et tous les travaux disponibles qui permettent, dans un premier temps, d'établir un bilan hydrologique. Bien que d'une importance stratégique pour la ville de Djibouti, cet oued n'a fait l'objet que de trop rares suivis hydrologiques, sur des périodes très courtes et à des moments très différents de son développement sans qu'un suivi de son évolution ne puisse être établi. Cette étude permet de rassembler l'état (maigre) des connaissances sur les composantes du bilan hydrologique du bassin afin d'essayer d'en faire une synthèse et d'en déduire des pistes de recherche scientifiques et/ou de données.

Nous avons rassemblé et analysé les données climatiques et hydrologiques disponibles auprès du Centre d'Etude et de Recherche de Djibouti sur la période 2008-2013). Ces données ont permis d'établir un "instantané" du bilan hydrologique du bassin qui a, alors été, comparé aux estimations de ce bilan dans les travaux de la Coopération Hydrologique Allemande (CHA, 1982) et de Gamal-Eldin (1988). In fine, ces résultats seront les premiers éléments de guide pour la mise en place d'une stratégie holistique de compréhension du cycle de l'eau, depuis les eaux de surface jusqu'aux eaux souterraines. Ces premiers résultats nous permettront d'orienter la suite de nos travaux.

2. Présentation de la zone d'étude

La République de Djibouti, d'une superficie de 23 000 km², présente un climat tropical aride qui se caractérise par l'irrégularité et la faiblesse des précipitations annuelles, avec des températures élevées durant toute l'année, l'absence de cours d'eau pérenne et une évaporation très intense. La saison fraîche, d'octobre à mars, présente des températures modérées (entre 22°C et 30°C) et une humidité relativement élevée. La saison chaude de juin à septembre est marquée par des températures entre 30°C et 40°C et un vent sableux, sec et chaud (le Khamsin). La période intermédiaire (avril-mai) fait la transition entre saison fraîche et saison chaude.

Le bassin versant exoréique de l'Oued Ambouli, situé au sud-est de la République de Djibouti, s'étend sur plus de 794 km² soit 3.5% de la surface du pays (figure 62). C'est le plus grand bassin versant du district de Djibouti qui accueille les deux tiers de la population de la République de Djibouti (570 000 habitants). Ce bassin versant, de par sa localisation géographique et ses ressources en eau souterraine, est d'une importance majeure pour le développement de la ville de Djibouti. En effet d'une part, le delta de l'oued dans l'Océan Indien constitue un vaste cône aplati prolongé par une presqu'île corallienne sur lequel est implantée la ville de Djibouti (SAFEGE, 2007); d'autre part, le sous-sol de toute la partie aval du bassin versant est constituée d'un épandage basaltique daté fin tertiaire/début quaternaire de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur qui contient une nappe d'eau souterraine abondante et de bonne qualité. Depuis plusieurs décennies, la quasi-totalité de l'eau nécessaire à l'alimentation de la ville de Djibouti est captée dans cet aquifère. A l'heure actuelle, le prélèvement annuel dépasse 13 millions de m³ (Houmed Gaba, 2009). L'augmentation de la p

opulation s'accompagne d'une croissance rapide des besoins qui entraîne une surexploitation et une dégradation de cette ressource.

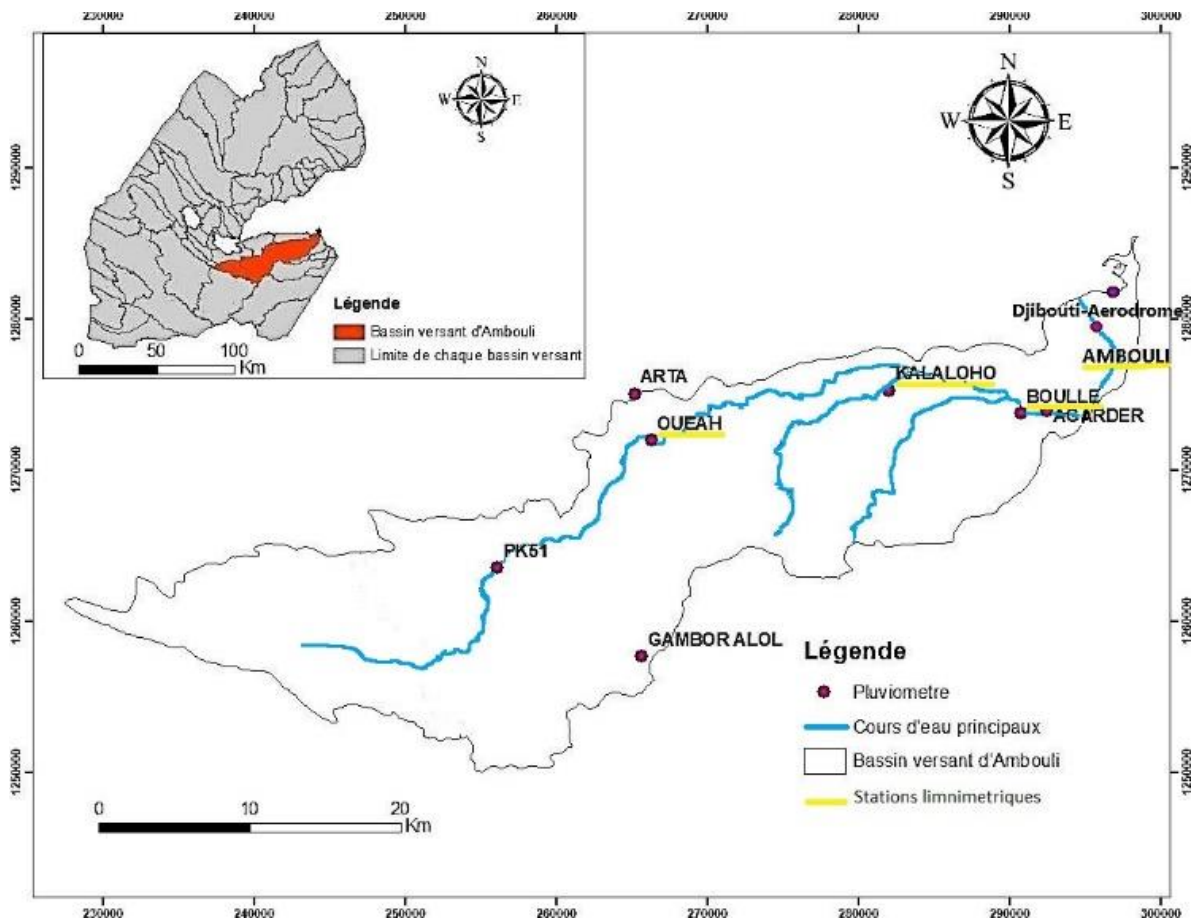


Figure 61: Bassin de l'Oued Ambouli et localisation des stations pluviométriques et limnimétriques

3. Données et méthodes

3.1. Présentation des données

Les données hydrométéorologiques disponibles sur le bassin d'Ambouli sont très disparates dans le temps et dans l'espace (figure 62 et figure 63). L'équipement du bassin s'est fait progressivement avec une interruption des observations sur la période 1990-2008. La plus longue série disponible est la pluviométrie enregistrée à la station météorologique de Djibouti-Aérodrome en continu depuis 1953. C'est à partir de cette station que l'ETP et L'ETR ont été calculées.

Les résultats produits par la CHA ont été obtenus sur la base de données mensuelles des stations limnimétriques d'Ambouli et Oueah et des stations pluviométriques d'Ambouli, Oueah et Arta collectées sur la période 1980 à 1982 (figure 63). Les mesures de débit antérieures à 1980 n'ont pas pu être utilisées car elles sont très incomplètes. Les stations sont installées de manière à ne mesurer que les hauteurs d'eau supérieures à 1 mètre dans le cours d'eau.

Les travaux de Gamal-Eldin (1988) se sont appuyés sur le même réseau d'observation que la CHA, complété par les séries observées sur la période 1983 à 1986.

C'est à partir de 2008, suite aux inondations dévastatrices de 1994 et 2004, que le CERD a renforcé le suivi hydrométéorologique du bassin d'Ambouli. Sur la période 2008-2013, le bassin était équipé de :

- 8 stations pluviométriques avec pour la plupart des données infra journalières (données numérisées).
- 1 station de mesure de la température qui est la station Aéroport (Djibouti-aéroport 1962-2018).
- 3 stations limnimétriques (Boulleh, Kalaloho et Oueah) avec des données infra journalières (données numérisées).

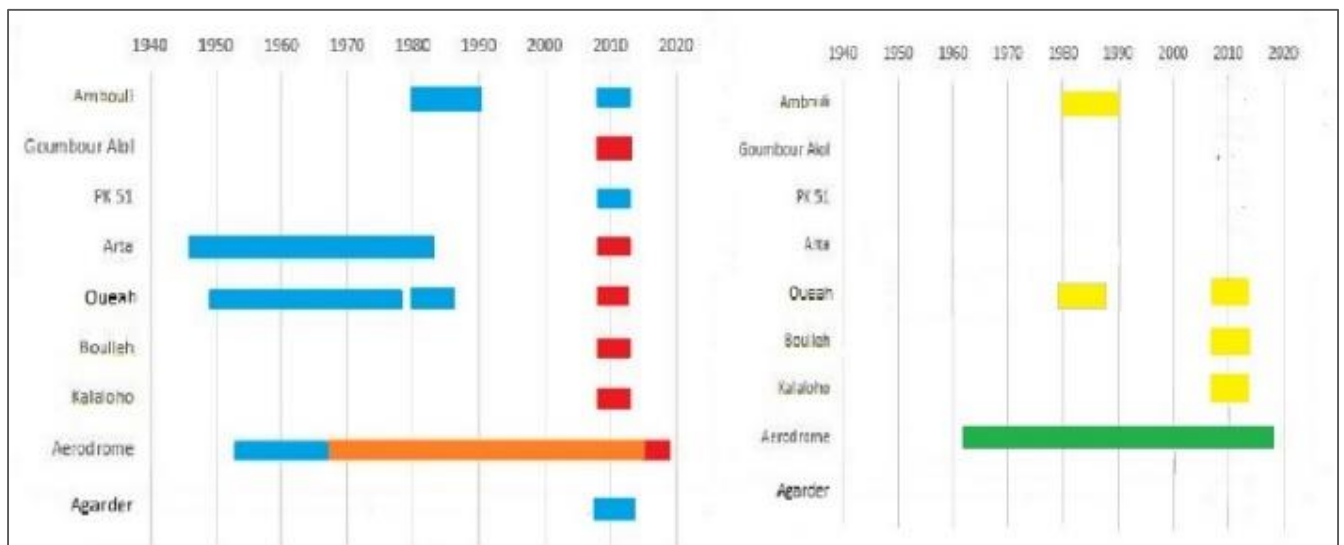


Figure 62: Données disponibles sur le bassin versant d'Ambouli. La Pluviométrie (Rouge : infra-journalier, Orange : journalier, Bleu : mensuel) ; la Limnimétrie (Jaune : infra-journalier) ; la Température (Vert :Journalier)

Les données disponibles pour chacune des études passées (CHA (1982) et Gamal-Eldin (1988)) et présente, sont trop fragmentées dans le temps et ne couvrent que des périodes trop courtes pour pouvoir prétendre fournir des valeurs de référence.

3.2. Méthodes de calcul des termes du bilan hydrologique

Simple opération comptable, le bilan hydrologique vise à établir le bilan hydrique d'une unité hydrologique définie (le bassin versant) pendant une période donnée. Il s'écrit :

$$P = Q + ETR + \Delta R(u+h)$$

La pluie (P) qui tombe sur le bassin versant dans un laps de temps donné soit s'écoule (Q), soit repart dans l'atmosphère par évapotranspiration (ETR), soit participe à la recharge des réserves en eau du sol (Ru) ou du sous-sol (Rh). Les variations de réserve peuvent être négatives et contribuer aux écoulements et/ou à l'évapotranspiration.

Pour déterminer la précipitation moyenne P sur le bassin versant, les trois méthodes d'interpolation les plus courantes sont :

- La méthode arithmétique qui est une méthode simple qui consiste à déterminer les moyennes arithmétiques entre stations.
- la méthode des isohyètes (L'Hôte, 1993), méthode graphique qui se base sur l'interpolation des moyennes de précipitation,
- La méthode des polygones de Thiessen (Schumann, 1998), méthode qui consiste à effectuer la moyenne pondérée des précipitations observées dans les différentes stations pluviométriques du bassin versant en fonction de leur aire d'influence géométrique.

Le concept de l'évapotranspiration potentielle (ETP) a été introduit par Thornthwaite et Penman car l'évapotranspiration réelle est difficile à mesurer à l'échelle d'une parcelle ou d'une région. Pour déterminer l'évapotranspiration potentielle moyenne, les trois méthodes les plus courantes sont :

- La formule de Thornthwaite (Thornthwaite, 1955) qui n'utilise que la température et un indice thermique comme donnée climatique.
- La formule de Turc (Turc, 1961) qui fait intervenir plusieurs paramètres climatologiques (température, rayonnement et humidité).
- La formule de Penman simplifiée (1948).

L'évapotranspiration réelle est en règle générale obtenue grâce à une réduction de l'évapotranspiration potentielle

- Méthode du bilan de Thornthwaite (Thornthwaite, 1955) qui consiste à calculer l'ETR mensuelle à partir des précipitations moyennes mensuelles, l'ETP et la réserve facilement utilisable contenue dans le sol (RFU),
- Méthode de Turc (Turc, 1961) qui n'utilise que deux paramètres climatologiques, la température et la précipitation.

L'écoulement Q est mesuré aux stations hydrologiques d'Ambouli et Oueah (CHA, 1982 et Gamal-Eldin, 1988) et Bouleuh, Kalaloho et Oueah pour le CERD.

L'infiltration ΔR est déduite à partir de la formule du bilan hydrologique et de la connaissance des 3 termes: P, Q et ETR pour la CHA (1982) et Gamal-Eldin (1988). Les travaux de Jalludin (2008) basés sur la modélisation numérique de l'aquifère confirment les évaluations de l'infiltration obtenues par la CHA (1982) et Gamal-Eldin (1988).

4. Analyse et comparaison des résultats issus des différentes méthodes de calcul de chaque composante du bilan hydrologique

Tableau 45: Tableau comparatif des composantes du bilan hydrologique

	Méthode	CHA (1980-1982)	Gamal-Eldin (1982-1986)	CERD (2008-2013)
Précipitation (mm/an)	Arithmétique	176.5	104	91.7
	Thiessen	ND	ND	94.7
	Isohyètes	200.0	ND	94.4
Evapotranspiration (mm/an)	Thorwhtwaite	157	85	80
	Turc	ND	ND	98
Ecoulement (mm/an et %)	Coeff. de ruissellement	11.3 mm/an	5.2 mm/an	3.7 mm/an
		6%	5%	4%
Infiltration (mm/an et %)	Déduite du bilan hydrologique	21.6 mm/an	11.4 mm/an	10.3 mm/an
		11.5%	11%	11%
Station		Ambouli Oueah	Ambouli Oueah	7 stations

*nd : non disponible

4.1 La pluie

La CHA (1982) a utilisé deux méthodes afin de déterminer la précipitation moyenne annuelle, la méthode arithmétique (176.5 mm/an) et la méthode des isohyètes (200 mm/an).

Gamal-Eldin (1988), à partir des stations d'Ambouli, Oueah et Djibouti Aéroport, a obtenu une précipitation moyenne annuelle de 104 mm/an (Tableau 1) en utilisant la méthode arithmétique. L'écart avec le calcul précédent est important.

Sur la période 2008-2013, nous disposons d'observations plus fines et plus complètes sur la pluie (figure 64). Cependant, cette courte période d'observation (2008-2013) ne permet pas une représentativité fiable des moyennes et des extrêmes saisonniers. La pluie moyenne calculée selon les trois méthodes avoisine 94 mm. Elle est légèrement plus faible que la valeur calculée par Gamal-Eldin (1988). Nous constatons que les précipitations moyennes mensuelles des mois de juin et juillet sont très faibles, moins de 5 mm par mois (figure 64), contrairement aux mois de mars, avril et mai qui représentent plus de 55% de la pluviométrie annuelle. Nous remarquons également que pour cinq des huit stations analysées, les valeurs maximales des précipitations moyennes mensuelles sont enregistrées au mois de mars et les valeurs minimales au mois de juin pour les sept stations. Nous remarquons enfin une forte irrégularité spatiale des cumuls mensuels sur le bassin versant (figure 64).

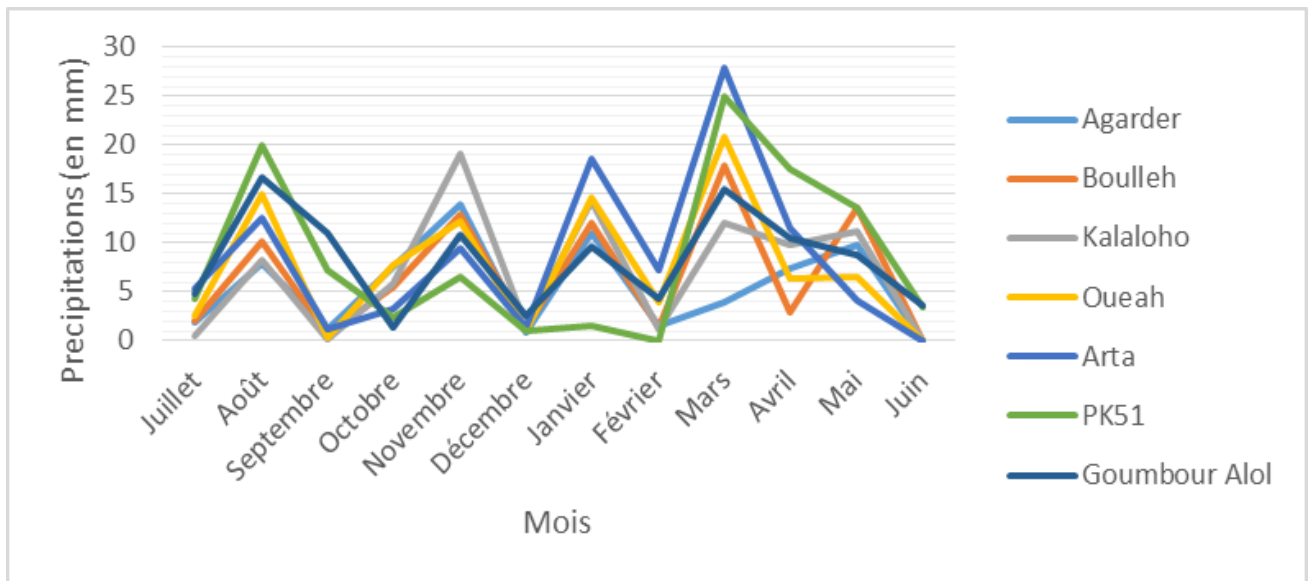


Figure 63 : Variation des précipitations moyennes mensuelles dans le bassin versant d'Ambouli (2008-2013)

Concernant les précipitations annuelles, le maximum est observé à la station de Goumbour Alol (avec 103 mm/an en moyenne sur la période 2008-2013) et le minimum au niveau de la station Djibouti-Aérodrome (avec 55 mm). Cette variation des précipitations dépend fortement de la localisation de la station climatologique : on constate que les précipitations augmentent avec l'altitude au niveau de la zone d'étude.

Concernant l'évolution de la pluviométrie annuelle au niveau de la station Djibouti-Aérodrome (1953-2018), l'analyse de la figure 4a montre une forte variabilité temporelle des données pluviométriques avec un maximum de 500 mm (en 1967) et un minimum de 11 mm (en 1987).

Cette variabilité interannuelle semble être moindre depuis une dizaine d'années avec une valeur de pluie annuelle inférieure à la moyenne annuelle sur la période 1953-2018. Nous constatons également une tendance à la baisse (figure 66) et une période sèche qui commence à partir de 2 007 (figure 65).

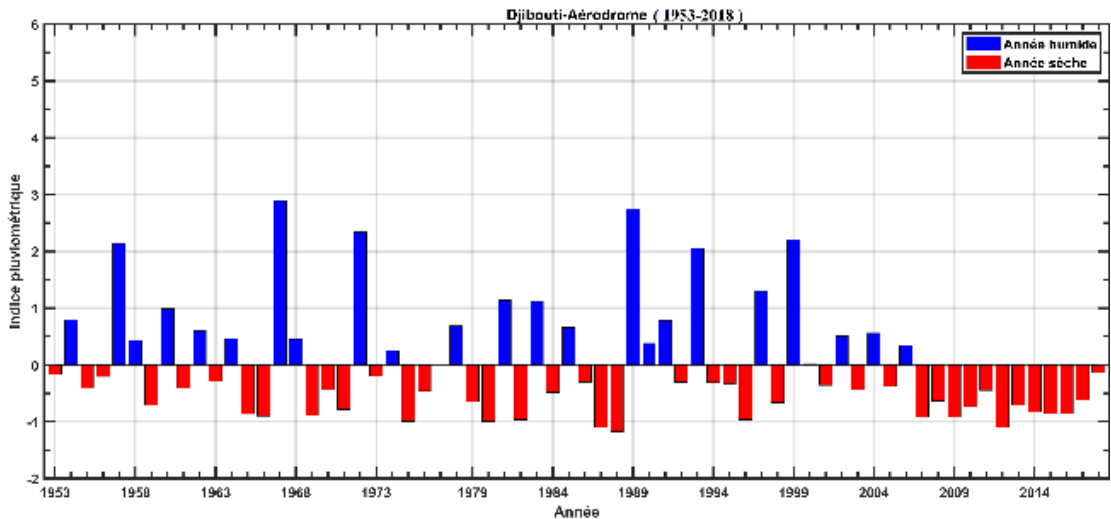


Figure 64: Indice pluviométrique de la station Djibouti aérodrome (1953-2018)

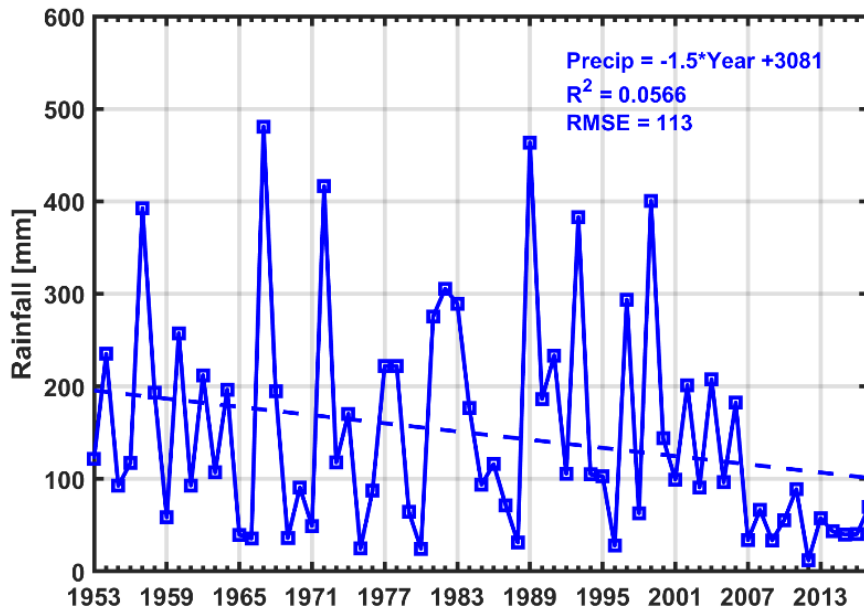


Figure 65: Evolution de la pluie annuelle de la station Djibouti-Aérodrome (1953-2018)

4.2.L'évapotranspiration

La CHA a mesuré l'ETP aux stations de Djibouti Aérodrome et Arta. À la station Arta, l'ETP a été mesurée à l'aide de l'évaporomètre de Piche, alors qu'à la station Djibouti-Aérodrome, elle a été mesurée sur un bac évaporatoire Classe A. Afin de rendre comparable ces données d'ETP, les ingénieurs de la CHA ont établi la relation suivante Eq. (1):

$$E_{\text{pot,BC}} = 0.947E_{\text{pot,piche}} - 0.096 \quad (1)$$

$E_{\text{pot,BC}}$: Evaporation du bac évaporatoire Classe A (mm/j)

$E_{\text{pot,piche}}$: Evaporation mesurée par l'évaporimetre Piche (mm/j)

Après cette conversion des données de l'ETP, la CHA a utilisé la méthode du bilan de Thornthwaite (Thornthwaite, 1955) sur les stations Djibouti Aéroport et Arta pour estimer une ETR moyenne annuelle à 157 mm/an.

Gamal-Eldin (1988) en utilisant la même méthode que la CHA sur la période 1980-1986 a obtenu une ETR moyenne annuelle de 85 mm/an (Tableau 1). L'écart avec le calcul précédent est important en valeur absolue tout comme ce qui avait été observé sur les pluies. En valeur relative, l'écart est négligeable.

L'ETP et l'ETR sont estimées au niveau des stations Djibouti Aéroport et Arta qui toutes deux se trouvent légèrement en bordure de l'oued Ambouli. Les pluies étant très variables sur le bassin (figure 3), on peut s'interroger sur la représentativité de ces données utilisées par ces deux études pour l'élaboration des bilans hydrologiques.

Les données de 2008-2013 donnent une ETR moyenne annuelle de 80 mm/an (Tableau 45) en utilisant la méthode de bilan de Thornthwaite (Thornthwaite, 1955). La méthode de Turc (Turc, 1961) donne une ETR moyenne de 98.5 mm/an. On remarquera que cette valeur moyenne de l'ETR est supérieure à la précipitation moyenne annuelle (93.6 mm). De ce fait cette formule s'avère être inadéquate, en revanche ce résultat permet de constater que la valeur de l'ETR se rapproche beaucoup de celle de la précipitation annuelle moyenne.

Il ressort de cette analyse une grande variabilité de la valeur de l'ETR dans le temps : l'ETP obtenue à Djibouti-Aéroport avec la formule de Penman simplifiée est de 1800 mm/an. Lorsque nous comparons les valeurs calculées avec cette formule à la courbe de l'évaporation mesurée nous constatons que ces valeurs sont proches contrairement aux autres méthodes de calculs. Cette variabilité est principalement due au pas de temps mensuel (dans un climat aride) car il n'y a pas d'adéquation entre le régime des pluies (sur quelques jours de pluie seulement) et l'évapotranspiration car dans un pas de temps mensuel, on sous-estime en général les pluies efficaces.

4.3 Ecoulement

Pour évaluer le ruissellement produit par ce bassin versant, la CHA (1982) et Gamal-Eldin (1988) ont effectué des analyses sur les crues et effectué des calculs de coefficient d'écoulement (ratio entre la quantité d'eau écoulée et la quantité d'eau précipitée pendant une période donnée) sur une moyenne de valeurs événementielles aux stations limnimétriques Ambouli et Oueah. En s'appuyant également sur une étude antérieure (Hauquin 1978), la CHA (1982) a obtenu une valeur de coefficient d'écoulement de 6%. Gamal-Eldin (1988), prenant en considération les études d'Hauquin (1978) et celle de CHA (1982) et les mesures de débits effectuées entre 1980 et 1986, parvient à une valeur de coefficient d'écoulement de 5%. Mais ce coefficient est très influencé par certains facteurs tels que l'imperméabilisation de la surface du sol et la précision des mesures de débit. Nous n'avons tenu compte que des coefficients d'écoulement calculés par la CHA de 1980 à 1982 car ces calculs ne présentaient aucune lacune et avons obtenu une valeur de coefficient de ruissellement de 4%.

Malgré une variabilité temporelle de ces données, ces valeurs de coefficient d'écoulement sur une moyenne de valeurs événementielles sont du même ordre de grandeur.

4.4 Infiltration

La CHA (1982) et Gamal-Eldin (1988) ont déterminé deux types d'infiltration, l'infiltration des eaux pluviales (superficielle) et l'infiltration dans les lits de l'oued. Ne disposant que de peu de données, l'association des deux types d'infiltration en infiltration totale a été nécessaire afin de déterminer le bilan hydrologique. La CHA (1982) et Gamal-Eldin (1988) ont effectué des mesures directes d'infiltration sur le bassin (Ambouli et Oueah) et noté la variabilité de l'ETR d'un mois à un autre, la fissuration du sous-sol et l'hétérogénéité du sol. Le calcul de l'infiltration totale s'est fait par déduction de la formule du bilan hydrologique. Ainsi la CHA (1982) a obtenu une valeur de 21 mm/an et Gamal-Eldin (1988) une valeur de 11.4 mm/an.

Nous avons pris en considération les études antérieures ainsi qu'une estimation de la recharge. Jalludin et al (2008) ont également tenu compte d'une forte incertitude à cause de l'effet du colmatage de la fissuration et de la porosité par les sédiments fins aux cours des périodes où l'eau stagne (Houmed-Gaba, 2009). L'infiltration a alors été estimée à 10.3 mm/an.

Il ressort de l'ensemble de ces travaux sur l'infiltration que la variabilité des données d'infiltration est principalement due à l'hétérogénéité du sol et à la fluctuation de l'ETR d'un mois à l'autre mais d'un point de vue pourcentage ces valeurs restent proches.

5 Conclusion et perspectives

La présente étude essaie d'approcher les termes du bilan hydrologique du bassin versant de l'Oued Ambouli à Djibouti et les compare à des travaux antérieurs (CHA et Gamal-Eldin). Les données disponibles pour chacune des études passées et présente sont trop fragmentées dans le temps et ne couvrent que des périodes trop courtes pour pouvoir prétendre être les valeurs de référence d'un bilan hydrologique. De plus, les caractéristiques statistiques entre les périodes des données montrent des différences importantes dont il va falloir tenir compte en développant une analyse de l'évolution du contexte climatique. Les données disponibles apparaissent insuffisantes en l'état actuel pour avoir une telle vision de cette évolution mais aussi des termes du bilan et il va falloir s'y attacher.

Cependant cette étude fournit quelques éléments de guide de mise en place d'une stratégie holistique de compréhension du cycle de l'eau, depuis les eaux de surface jusqu'aux eaux souterraines. Elle fournit des éléments de connaissance nécessaires pour la protection de la ressource en eau et à la prévention contre les risques d'inondations, qui surviennent de plus en plus fréquemment dans le bassin de l'Oued Ambouli à Djibouti : faiblesse de l'infiltration et forte évapotranspiration de la ressource en eau.

Sur la période 2008-2013, le bassin d'Ambouli a reçu en moyenne une pluie annuelle de 93.6 mm ; l'évapotranspiration réelle (ETR) moyenne sur le bassin versant est estimée à 79.6 mm/an soit 85% des précipitations moyennes annuelles ; l'écoulement moyen annuel approche un volume de 6.5×10^6 m³/an, soit 3.7 mm/an ; par déduction, selon la formule du bilan hydrologique, l'infiltration moyenne annuelle totale est estimée à 10.3 mm/an.

Suite à cette première étude, plusieurs travaux vont être menés afin de mieux approfondir les connaissances concernant le bilan hydrologique de ce bassin versant :

- Recherche de données climatiques alternatives, issues de grilles de données observées ou de produits satellitaires afin de mieux prendre en compte leur variabilité spatiale et temporelle et leur évolution dans le temps.

- Analyse statistique de l'évolution de la pluviométrie et de la température et mise en relation avec la diminution de l'écoulement au sein du bassin versant et l'augmentation constatée des phénomènes d'inondation sur le bassin d'Ambouli.
- Critique, voire reprise, des évaluations antérieures, notamment en travaillant à des pas de temps plus fins (quotidien au lieu de mensuel) et à l'échelle de l'événement : saisie et/ou numérisation de données anciennes
- Analyse de l'évolution de l'emprise urbaine dans la vallée et le delta de l'Oued Ambouli, pour suivre l'évolution de la vulnérabilité aux inondations.
- Mise en place d'un modèle hydrologique (afin de mieux comprendre le processus d'écoulement et les aléas associés) et, si possible, d'un modèle de prévention de crue.
- Mise en place d'un suivi continu et fiable des écoulements à une ou plusieurs stations

References bibliographiques

Camberlin, P. : Les Précipitations dans la Corne orientale de l'Afrique, Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 379 p, 1994.

CHA (Coopération Hydrogéologique Allemande). : Inventaire et mises en valeur des ressources en eau de la République de Djibouti, 4 vol, 1982.

Chiré, A.S. : Le nomade et la ville à Djibouti: Stratégies d'insertion urbaine et production de territoire, Karthala, Paris, 2012.

Djama, M. and Gascon, A. : « La Corne dans tous ses États », *Cahiers d'Études africaines*, XXXVII (2), 146, p. 277-500, 1997.

Gamal-Eldin, H.A. : Etude de l'aquifère basaltique de la zone de captage de la ville de Djibouti, République de Djibouti, Thèse de doctorat, Univ. Albert-Ludwig de Fribourg, Allemagne Fédérale, 159p, 1988.

Hauquin, J.P. : La nappe côtière de la région de Djibouti. Géologie et Hydrogéologie. Thèse de Doctorat. Université de Bordeaux III, 86pp, 1978.

Houmed-Gaba, A. : Hydrogéologie des milieux volcaniques sous climat aride. Caractérisation sur site expérimental et modélisation numérique de l'aquifère basaltique de Djibouti (Corne de l'Afrique), PhD thesis, University of Poitiers, Poitiers, France, pp 220, 2009.

Jalludin, M., Razack, M.: Recharge simulation in stream bed alluviums overlying volcanic aquifer under semi-arid climate, Republic of Djibouti (Horn of Africa), Proceeding, International Symposium SIHD, Djibouti 14-17december, pp 123-128, 2008.

Jensen, M.E. and Haise H.R.: Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, vol. 89, p. 15-41, 1963.

L'hote, Y. : MESURE ET ETUDE DES PRECIPITATIONS EN HYDROLOGIE, Deust - Genie hydro sanitaire et aquacole, Univ Montpellier.38p, 1993.

Penman, H.L. : - *Vegetation and hydrology*. Édit. Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden (Angleterre), communication technique n° 53, 124 p, 1963.

SAFEGE, Consortium STDE. : Projet d'Aménagement Intégré de L'Oued Ambouli. Etude d'identification des ouvrages de rétention des ruissellements et de recharge des nappes sur l'ensemble du bassin versant. Volume I et II, 127p, 2007.

Thornthwaite, C.W.: "The water balance", *Climatology*, 8:1-104, 1955.

Turc, L. : Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise à jour, *Annales Agronomiques*, vol. 12, p. 13-49, 1961.

WMO : *Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration*. Édit. World Meteorological Organization, note technique n° 83, Genève (Suisse), 121 p, 1966.

2. Modélisation amont du Barrage de l'Amitié

La modélisation amont du barrage de l'Amitié de Oueah revêt une importance déterminante dans le processus de gestion des ressources hydriques. Avant d'envisager toute proposition de scénario, il est impératif de disposer d'une estimation précise du volume annuel ruisselé dans le bassin versant afin de formuler des scénarios appropriés pour la gestion du barrage. Cependant, dans notre étude, nous faisons face à un défi majeur : l'absence de données hydrologiques continues et sans lacunes.

La seule station hydrométrique disponible se trouve en amont du barrage, spécifiquement à la station Oueah, située à environ 7 km à vol d'oiseau du barrage. Cette station joue un rôle central dans la collecte de données hydrologiques, bien que les données ne soient pas disponibles en continu et présentent des lacunes. Cette lacune en données hydrologiques complètes et régulières limite considérablement notre capacité à obtenir une vision précise des régimes de ruissellement dans le bassin versant. Les caractéristiques hydrologiques des événements enregistrés au niveau de la station Oueah sont présentées dans l'Annexe 6/1 : Hydrologie.

Face à cette contrainte, la modélisation hydrologique apparaît comme une solution essentielle pour pallier le manque de données. Elle permet d'estimer le volume annuel ruisselé en utilisant des méthodes et des modèles adaptés au contexte du bassin versant en question. Ces modèles intègrent des paramètres hydrologiques tels que les précipitations, l'évapotranspiration, la topographie et les caractéristiques du sol pour simuler les écoulements et les débits d'eau.

L'utilisation d'un modèle hydrologique approprié peut offrir un ordre de grandeur du volume annuel ruisselé, ce qui s'avère essentiel pour guider la gestion du Barrage de l'Amitié de Oueah. Cependant, il est essentiel de noter que toute modélisation comporte une part d'incertitude et que les résultats doivent être interprétés avec prudence. Néanmoins, la modélisation hydrologique demeure un outil précieux pour prendre des décisions éclairées en l'absence de données hydrologiques complètes et fiables, contribuant ainsi à une gestion plus efficace des ressources en eau dans la région du barrage.

2.1. Présentation des événements

L'analyse des données hydrologiques pour la station de Oueah, qui fait partie du réseau de mesure du Système d'Alerte Précoce (SAP), pour la période 2008-2013, a révélé plusieurs enjeux importants. Tout d'abord, il a été constaté que parmi les données disponibles, il y avait une rareté notable d'événements pour lesquels des mesures simultanées de précipitations et de hauteurs d'eau étaient présentes. Cette limitation est principalement attribuée à des lacunes dans les données ou à des dysfonctionnements du matériel de mesure.

Un aspect technique crucial à souligner est que pour cette station en particulier, l'enregistrement des hauteurs d'eau ne commence qu'à partir d'un seuil d'un mètre. En conséquence, tous les écoulements inférieurs à ce seuil ne sont pas documentés. Cette caractéristique peut potentiellement induire une sous-estimation des événements hydrologiques de moindre intensité, rendant l'analyse et la modélisation des petits événements plus délicates.

Face à ces contraintes, une sélection judicieuse d'événements Pluie-Débit a été effectuée. Cinq événements ont été retenus pour l'analyse, principalement en raison de leurs formes d'hydrogrammes simples et clairement discernables, ce qui facilite le processus de calage et de validation des modèles (Figure 67). Nous avons cependant souhaité conserver l'événement de novembre 2008. Cet événement présente une complexité particulière avec plusieurs hydrogrammes, reflétant potentiellement plusieurs périodes de précipitations ou des processus hydrologiques distincts en action. En tenant compte de cette particularité et dans un souci d'efficacité pour le calage du modèle HEC-HMS, cet événement a été scindé en deux événements distincts. Une telle approche vise à simplifier le processus de modélisation et à assurer une représentation plus fidèle des dynamiques hydrologiques pour chaque sous-événement.

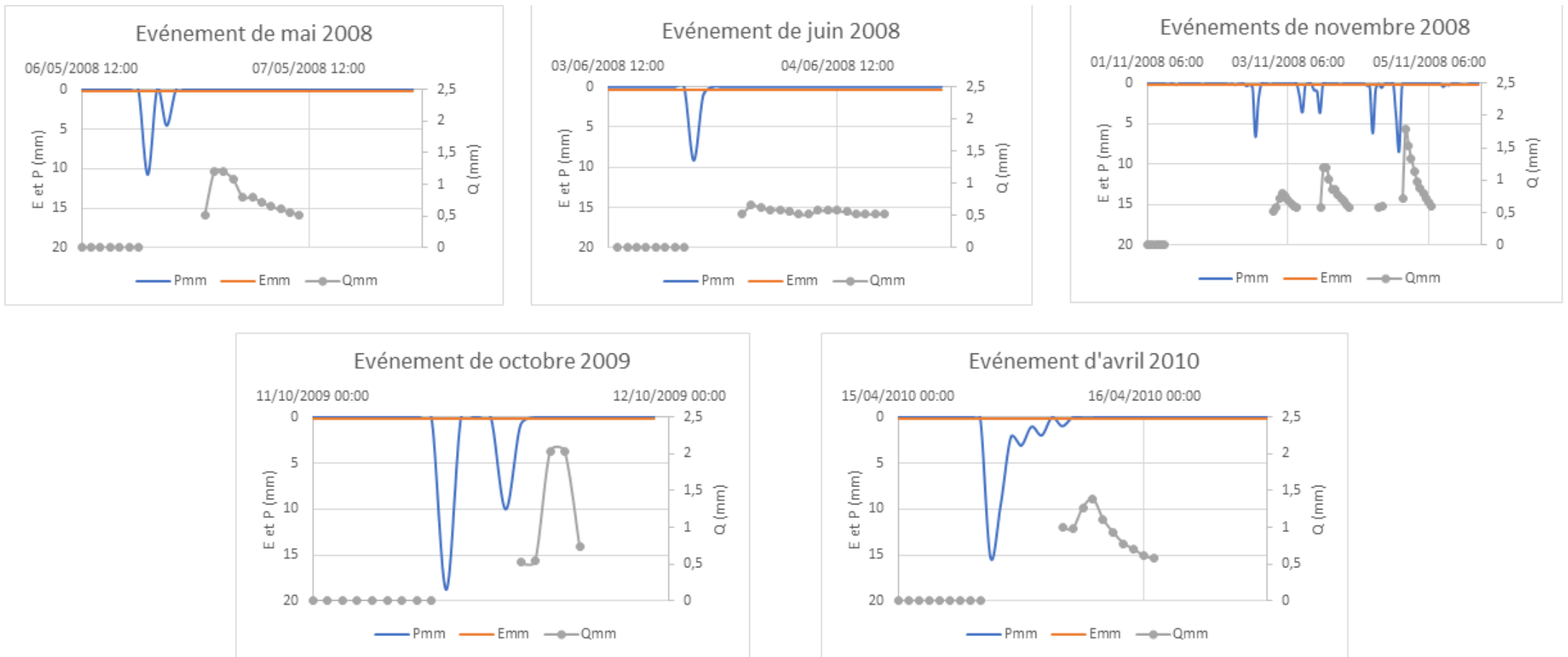


Figure 67 : Les événements sélectionnés pour la modélisation hydrologique

2.2. Modélisation sous HEC-HMS

2.2.1. Les fonctions du modèle

Modélisation des pertes (Fonction de production)

La fonction de production permet de définir la partie de la pluie précipitée (pluie brute) qui va effectivement s'écouler à l'exutoire du bassin versant. Le résultat de cette première transformation est un hyétogramme de pluie nette. Il s'agit d'une grandeur fictive. La pluie nette est calculée par différence entre la pluie brute et les pertes à l'écoulement (évaporation, rétention par la végétation, stockage dans les dépressions, infiltration). La pluie nette est ensuite exprimée sous la forme d'un débit de pluie nette en multipliant l'intensité instantanée de pluie nette par la surface du bassin versant

La quantification précise des écoulements est important pour la modélisation hydrologique, notamment dans des régions telles que celle du Barrage de l'Amitié. Une caractéristique fondamentale de la modélisation hydrologique sous HEC-HMS est l'estimation des pertes, qui englobent les volumes d'eau retenus, infiltrés, ou évaporés pendant leur trajet sur le bassin versant. Ainsi, pour déduire l'écoulement réel, HEC-HMS soustrait ces pertes des précipitations enregistrées (Scharffenberg et al., 2010).

Le bassin versant alimentant le Barrage de l'Amitié présente des zones perméables où l'eau est susceptible de s'infiltrer ou de s'évaporer avant de générer un écoulement. HEC-HMS propose pour ces zones plusieurs modèles descriptifs, tels que le modèle de perte initiale et à taux constant, le modèle à déficit et à taux de perte constant, le modèle basé sur le Curve Number (CN) et le modèle de Green et Ampt. Ces modèles prennent en compte les pertes à chaque intervalle de temps et soustraient ce volume aux précipitations effectives de la même durée. Ce qui reste, c'est l'excès de précipitation, une quantité homogénéisée à travers le bassin versant et qui est censée générer l'écoulement de surface (Chow et al., 1988).

Après une analyse des caractéristiques hydrologiques et pédologiques du bassin versant du Barrage de l'Amitié, ainsi que de la disponibilité et de la fiabilité des données, le choix s'est porté sur le modèle basé sur le Curve Number (CN) pour estimer les pertes. Plusieurs raisons justifient cette décision. D'abord, le CN offre une représentation simplifiée mais efficace des processus complexes d'infiltration en fonction de la couverture du sol, du type de sol et des conditions d'humidité antérieure. De plus, le CN est largement utilisé dans la littérature et a fait ses preuves dans de nombreuses régions du monde, offrant une base solide de comparaison et de validation. Enfin, la disponibilité de vastes tables de valeurs CN pour différentes conditions facilite grandement son application et sa calibration.

SCS Curve Number

La méthode SCS-CN est développée en 1972 par l'USDA Soil Conservation Service (Ponce & Hawkins, 1996), et est décrit dans le Service de conservation des sols Ingénierie nationale Manuel Section 4 : Hydrologie (NEH-4). La fonction de production SCS Curve Number estime l'excès de précipitation, qui contribuera à l'écoulement rapide de crue, comme une fonction des précipitations cumulées, de la couverture et de l'humidité initiale du sol à partir de l'équation suivante :

$$Pe = (P - 0,2S) / (P + 0,8S)$$

Le potentiel de rétention maximum, S, et les caractéristiques du bassin versant sont reliées par l'intermédiaire du numéro de courbe CN (Curve Number) par :

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Avec :

Pe = la précipitation nette (mm) cumulée à l'instant t ;

P = la précipitation brute (mm) cumulée à l'instant t ;

S = le potentiel maximum de rétention, défini par ;

CN = Curve Number

❖ Le Curve Number (CN)

CN est une quantité adimensionnelle qui varie entre 0 et 100 (Mishra et Singh, 2003 ; Neitsch et al., 2011). Il est fonction de la perméabilité / humidité antérieure du sol, et des états de surface. L'aptitude au ruissellement du sol s'accroît avec l'augmentation de la valeur du CN. Ils représentent la corrélation entre des groupes de sols hydrologiques (A à D) et les classes d'utilisation du sol (Tableau 46). Ils ont servi à calculer un indice de ruissellement pour chaque type d'occupation.

Tableau 46: Valeur des CN en fonction des types de sol et de l'occupation du sol

Description	Valeur du groupe hydrologique du sol (Curve Number)				Type d'occupation du sol
	A	B	C	D	
Habitat	77	85	90	92	Logements, routes
Sol nu	39	61	74	80	Espaces, terrains libres
Forêt	30	55	71	78	Forêt
Culture	67	77	83	87	Champs actif
Eau	100	100	100	100	Lagune, rivière

Fonction de transfert

La modélisation des écoulements hydrologiques à travers un bassin versant nécessite une représentation précise non seulement des pertes, mais aussi des transformations dynamiques que subit le débit en se propageant depuis les zones de génération vers l'exutoire. Dans ce contexte, la fonction de transfert, intégrée au sein du logiciel HEC-HMS, joue un rôle déterminant. La fonction de transfert s'articule autour de la conversion de l'hydrogramme de pluie nette (excès de précipitation) en un hydrogramme de débit à l'exutoire du bassin versant.

Cette transformation est fondamentalement conservatrice, ce qui signifie que le volume total d'eau représenté dans l'hydrogramme de pluie nette est préservé dans l'hydrogramme à l'exutoire (Franzini et al., 1979).

Le passage de l'eau à travers le bassin versant, en particulier dans une région complexe comme celle du Barrage de l'Amitié, peut induire des altérations majeures de la forme de l'onde de débit. Ces modifications peuvent être attribuées à une myriade de facteurs, notamment la topographie, la géomorphologie, la taille du bassin, la distribution des sols et leur capacité d'infiltration, ainsi que les interactions oued-bassin versant. La fonction de transfert, dans sa conceptualisation, tente d'encapsuler l'ensemble de ces interactions et processus pour modéliser fidèlement la transformation de l'hydrogramme de pluie nette en un hydrogramme de débit (Chow et al., 1988). Il convient de noter que, bien que cette fonction soit un élément clé de la modélisation hydrologique, elle repose sur des simplifications nécessaires pour rendre le problème traitable et fournir des résultats en temps opportun, tout en conservant une représentation suffisamment fidèle des processus réels.

En effet, le modèle HEC-HMS se rapporte à ce processus comme une transformation de l'excès de précipitation pour chacun des sous-bassins versants en un écoulement à son exutoire, et il emploie deux options pour calculer le volume de ce ruissellement :

- Un modèle empirique : dont le but est d'établir un lien causal entre le ruissellement et l'excès de précipitation sans considérations détaillées des processus internes.
- Un modèle conceptuel : c'est le modèle de l'onde cinématique de l'écoulement de surface qui représente, le mieux possible, les mécanismes physiques régissant le mouvement de l'excès de précipitation sur la surface et dans les petits canaux du bassin versant.

Dans le cadre de cette étude, nous avons opté pour l'emploi de la fonction de transfert « Clark Unit Hydrograph » afin de modéliser la transformation hydrologique. La fonction de transfert Clark Unit Hydrograph (Clark UH) décrit la translation de l'écoulement à travers le bassin. Le volume de l'hydrogramme écoulé n'est pas affecté par cette fonction, seul la forme de l'hydrogramme l'est. Cette transformation est pilotée par un hydrogramme unitaire (UH) qui représente la forme de la réponse en débit du bassin à une pluie unitaire. Dans le modèle de Clark, il est possible de paramétrer la forme de l'UH pour que le modèle représente au mieux les observations. Le paramétrage se fait via « Temps de concentration (TC) » et via « Coefficient de stockage (R) ». « Tc » est le temps de concentration du bassin, et « R » traduit la diffusion lors du transfert. L'atténuation du débit par rapport au volume précipité est dû aux forces de friction et aux effets de stockage du bassin, et est représenté par la relation suivante :

$$S = R \times Q$$

Avec :

S= Stockage du bassin versant

R= Coefficient de stockage

Q= débit à l'exutoire

Ce paramètre peut être calibré, soit à partir de jeux d'observations (pluie, débit) pour différentes crues, soit à partir de la reconstitution manuelle de l'UH à partir de la topographie du bassin versant.

2.2.2. Calage du modèle

Dans le cadre de la modélisation hydrologique du Barrage de l'Amitié de Oueah, une démarche structurée a été suivie, impliquant diverses phases, depuis l'introduction des données jusqu'à l'extraction des résultats. L'étape initiale a consisté à introduire les données pertinentes dans les trois compartiments de modélisation du système. Cette opération est essentielle pour garantir que le modèle possède toutes les informations nécessaires pour effectuer un calage précis. L'exécution de cette modélisation est orchestrée par le gestionnaire d'exécution, accessible depuis l'écran « Basin Model ». Lorsque le modèle est prêt pour le calage, un « Run » est sélectionné, lançant ainsi le processus d'exécution.

À l'issue de cette exécution, les résultats de ce calage sont rendus accessibles depuis l'écran modèle de bassin. Parmi les formes de visualisation proposées, le tableau de synthèse, ou "Calibration Summary", se distingue par sa capacité à fournir des détails sur les paramètres statistiques (RMSE, Nash, Bias et R^2).

Ce processus de calage, recherche la meilleure combinaison de paramètres, tels que le Curve Number, le temps de concentration, et le coefficient de stockage, pour reproduire fidèlement les dynamiques du système étudié (Tableau 47). Les critères de réussite de cette procédure de calage se définissent par la restitution fidèle de la forme générale de l'hydrogramme observé, la concordance des débits de pointe observés et simulés

Tableau 47 : Processus de calage des différents événements avec HEC-HMS. En rouge les coefficients de Nash positifs.

Événements Pluie-Débit	Curve Number	Imperméabilité (%)	Temps de concentration (Heure)	Coef de stockage (Heure)	NASH
6-7/05/2008	95	90	6,8	8	0,97
3-4/06/2008	85	90	5	20	-9,067
1-3/11/2008	93	92	11,19	6	0,8
3-5/11/2208	85	90	2	6,5	0,3
11/10/2009	80	90	4	8	-0,87
15-16/04/2010	85	80	9	5	0,84

Le modèle HEC-HMS nécessite des paramètres tels que le Curve Number (CN), le pourcentage d'imperméabilité, le temps de concentration et le coefficient de stockage pour reproduire les écoulements en réponse aux précipitations (Tableau 47). Le critère de performance NASH est également présenté pour chaque événement afin d'évaluer la qualité du calage.

Le tableau montre que bien que le modèle HEC-HMS ait été calibré avec succès pour certains événements (comme ceux des 6-7/05/2008 et 1-3/11/2008 avec des NASH proches de 1), il présente des difficultés pour d'autres événements. Les variations des paramètres de calage entre les différents événements soulignent la complexité du bassin versant de Oueah et la nécessité d'une approche adaptative pour la modélisation hydrologique.

2.2.3. Validation du modèle HEC-HMS

La validation d'un modèle, essentielle pour confirmer sa pertinence et son applicabilité à des situations réelles, est une étape cruciale dans toute étude hydrologique (Tableau 48). Dans le cadre de cette recherche, le modèle HEC-HMS a été soumis à un processus rigoureux de validation. Adoptant une méthodologie dite de "validation croisée", chaque événement a été simulé en utilisant les paramètres de calage dérivés des autres événements. Cette approche, bien qu'exigeante, garantit une évaluation robuste du modèle en vérifiant sa capacité à simuler correctement un événement donné en se basant sur les informations issues d'autres événements. Toutefois, nos résultats ont révélé que seuls quelques événements ont obtenu un coefficient de Nash satisfaisant. Cette observation suggère une certaine limitation dans la capacité du modèle à reproduire fidèlement les dynamiques hydrologiques pour l'ensemble des événements étudiés. En conséquence, avec la présente configuration et les données disponibles pour ces six événements, le modèle HEC-HMS ne peut être pleinement validé pour notre zone d'étude. Une telle conclusion souligne la nécessité d'une exploration plus approfondie des paramètres ou d'une révision de la structure du modèle pour améliorer sa performance.

Tableau 48: Processus de validation des différents événements avec HEC-HMS. En rouge les coefficients de Nash positifs.

	6-7/05/2008	3-4/06/2008	1-3/11/2008	3-5/11/2208	11/10/2009	15-16/04/2010
6-7/05/2008		-1,369	0,001	0,019	0,626	0,75
3-4/06/2008	-62,263		-22,744	-55,317	-53,999	-56,797
1-3/11/2008	-4,224	-22,407		-16,022	-9,969	-5,091
3-5/11/2208	-0,747	-1,67	-1,057		-0,084	-0,07
11/10/2009	-0,51	0,044	0,029	-1,855		-0,87
15-16/04/2010	0,6	-1,428	-0,085	-0,097	0,43	

2.3. Modélisation sous GR4H

2.3.1. Description du modèle GR4H

Ce modèle utilise en entrée les données issues de deux variables que sont :

- les précipitations (P),
- l'évapotranspiration potentielle (E).
- Les deux variables d'états sont :
- le réservoir de production (S), c'est à dire la partie des précipitations qui va être stockée dans le sol,
- le réservoir de routage (R), qui permet de répartir temporellement la quantité d'eau participant au débit de la rivière.

Quatre coefficients sont utilisés pour paramétrer le comportement du milieu :

- La capacité maximale du réservoir de production (x1),
- Le coefficient d'échange souterrain (x2),
- La capacité maximale de R (x3),
- Le temps de base de l'hydrogramme unitaire (x4).

2.3.2. Fonctionnement du modèle

Une fois les variables P et E fournies au modèle, la pluie nette (Pn) et l'évapotranspiration nette (En) sont calculées comme suit :

$$\text{Si } P > E, Pn = P - E, En = 0$$

$$\text{Si } P < E, Pn = 0, En = E - P$$

Pn va se diviser en deux parties. La première, Ps, sera stockée dans le réservoir de production alors que la seconde ira directement alimenter la partie routage du modèle. La quantité Ps est proportionnelle au remplissage du réservoir S. Si le réservoir est vide, quasi-totalité de Pn alimentera ce réservoir alors qu'à l'inverse, lorsqu'il est plein, Pn sera redirigé directement vers la partie routage. Le réservoir de stockage se vide selon deux processus. Lorsque l'évapotranspiration nette est supérieure à 0, de l'eau est directement prise de ce réservoir. Par ailleurs, le réservoir de stockage se vide par percolation dans la partie routage du modèle. Dans les deux cas, la quantité d'eau qui quitte S est proportionnelle à la quantité d'eau contenue dans S et au taux de remplissage de ce réservoir. L'eau qui arrive dans la partie routage, Pr, est divisée en deux. 90% de Pr vont être routés vers un hydrogramme unitaire UH1 puis vers le réservoir de routage R, et les 10% restant vont être dirigés vers un second hydrogramme unitaire UH2, deux fois plus long que le premier. UH1 et UH2 permettent de simuler le temps de montée, c'est à dire l'écart entre un événement pluvieux et le pic de débit résultant. Une fonction F(x2) contrôle les échanges souterrains entre le bassin versant étudié et les bassins voisins. Le débit final est obtenu à partir des écoulements issus de R et de UH2, soumis à F(x2) (Perrin et al., 2003; Mathevet, 2005 ; Desclaux et al., 2017)

- Les valeurs de X1, X2, X3, et X4 varient considérablement d'un événement à l'autre, reflétant la diversité des conditions hydrologiques rencontrées lors de ces événements.

Globalement, il semble que le modèle GR4H ait bien performé pour la majorité des événements, à l'exception de celui de juin 2008

Tableau 49: Processus du calage pour les différents événements avec GR4H. En rouge les coefficients de Nash positifs.

Evènements	X1	X2	X3	X4	NASH
6-7/05/2008	3,992	0,593	15,545	7,207	0,9462
3-4/06/2008	0,004	13,951	21807,45	9,94	-1,19
1-6/11/2008	0,01	0,024	0,174	13,638	0,8244
11/10/2009	0,1	-3,249	16,093	8,001	0,9
15-16/04/2010	2,12	-0,75	44,064	7,393	0,96

2.3.4. Validation du modèle

La validation d'un modèle hydrologique, comme le modèle GR4H, est une étape essentielle après le calage. Elle permet d'évaluer la capacité du modèle à reproduire des événements qui n'ont pas été utilisés lors de la phase de calage. L'une des méthodologies courantes pour la validation est la validation croisée, où les paramètres obtenus du calage sur un événement sont utilisés pour simuler un autre événement, et ainsi de suite. L'efficacité de la simulation est souvent évaluée à l'aide du coefficient de Nash-Sutcliffe (NASH).

En analysant le tableau, nous pouvons déduire ce qui suit :

- Pour l'événement du 6-7/05/2008, les meilleurs paramètres proviennent de l'événement du 1-6/11/2008 avec un NASH de 0,2. Tous les autres ensembles de paramètres donnent des NASH négatifs, indiquant une performance médiocre.
- Pour l'événement du 3-4/06/2008, tous les ensembles de paramètres testés donnent des NASH négatifs. Cela suggère que le modèle, quel que soit l'ensemble de paramètres utilisé, ne peut pas bien reproduire cet événement.
- L'événement du 1-6/11/2008 a un NASH le plus élevé de 0,322 lorsque les paramètres du 6-7/05/2008 sont utilisés.
- Pour l'événement du 11/10/2009, l'ensemble de paramètres du 1-6/11/2008 donne le meilleur NASH de 0,1.
- Enfin, pour l'événement du 15-16/04/2010, tous les ensembles de paramètres testés ont produit des NASH négatifs, avec le moins mauvais résultant de l'utilisation des paramètres du 11/10/2009.

En synthèse, la validation croisée du modèle GR4H sur ces événements montre une performance variable (principalement NASH négatif). Certains événements, comme ceux de juin 2008 et d'avril 2010, présentent des difficultés particulières pour le modèle, quelle que soit la combinaison de paramètres utilisée.

Tableau 50: Processus de validation des différents événements avec GR4H. En rouge les coefficients de Nash positifs.

	6-7/05/2008	3-4/06/2008	1-6/11/2008	11/10/2009	15-16/04/2010
6-7/05/2008		-0,97	0,2	-0,38	-1,08
3-4/06/2008	-0,484		-0,6	-2,77	-3,061
1-6/11/2008	0,322	-0,65		-0,29	-0,3
11/10/2009	-1,166	-0,245	0,1		0,22
15-16/04/2010	-8,07	-0,6	-5,01	-0,58	

Au cours de cette thèse, une attention particulière a été portée à la modélisation hydrologique en amont de Oueah, une zone cruciale pour notre étude. Cependant, les défis rencontrés ont été nombreux. Tout d'abord, nous n'avons disposé que de quelques événements et débits pour la calibration et la validation de nos modèles, ce qui a réduit la portée de nos analyses. De plus, la difficulté s'est amplifiée en raison de l'absence de mesures des hauteurs, et donc des débits, en dessous de 1 mètre, créant ainsi un vide dans la représentation hydrologique de la zone. La représentation graphique des calages et simulations des deux événements pour les deux modèles est présentée dans l'Annexe 6/2 : Modélisation hydrologique.

Concernant les outils de modélisation utilisés, HEC-HMS a présenté des défis particuliers. Il a été ardu de caler ce modèle sur les événements disponibles, et malheureusement, les résultats de la validation n'ont pas été satisfaisants. D'autre part, bien que le modèle GR4H ait montré un calage plutôt convaincant, sa validation s'est avérée moins probante que celle de HEC-HMS.

Pour affiner davantage nos modèles et obtenir des prédictions plus précises, il est impératif de disposer de données supplémentaires. Notamment, des informations plus complètes sur les précipitations en amont, étant donné l'absence de poste pluviométrique dans cette zone, sont essentielles. De plus, la prise en compte des données de débit entre 0 et 1 mètre serait d'une grande aide pour améliorer la représentativité de nos modèles. En somme, bien que des progrès aient été réalisés, des efforts supplémentaires sont nécessaires pour une modélisation hydrologique robuste et fiable de la zone en amont de Oueah.

Chapitre 7 : Le Barrage de l'Amitié

Chapitre 7 : Le Barrage de l'Amitié

Le Barrage de l'Amitié, situé à 25 km en amont de la ville de Djibouti, constitue l'une des principales infrastructures de lutte contre les crues de l'oued Ambouli (Figure 69). Construit avec l'assistance de la Turquie et achevé en 2019, le barrage traverse l'oued et présente une hauteur de 71 mètres, offrant ainsi une capacité de stockage de 14 millions de mètres cubes d'eau. Les objectifs principaux de sa construction sont de prévenir les inondations récurrentes dans la région et de fournir une ressource en eau supplémentaire pour l'irrigation des terres agricoles avoisinantes.

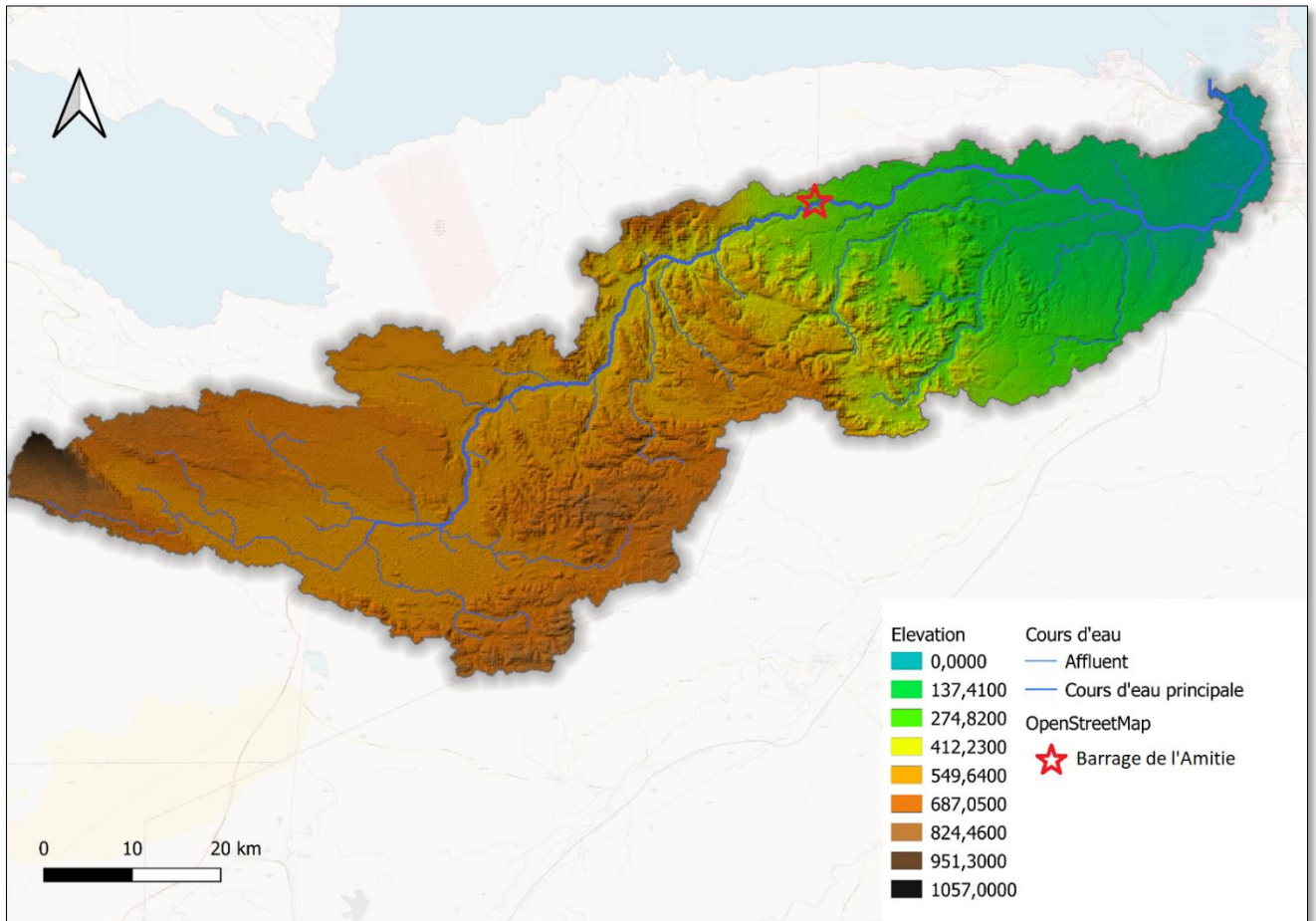


Figure 67: Carte de localisation du barrage de l'Amitié

1. Description du Barrage de l'Amitié

1.1. Objectifs / rôle du Barrage de l'Amitié

À la suite des graves inondations de 2004 qui ont affecté la ville de Djibouti, une digue en rive droite (en aval de l'oued Ambouli), a été construite en 2008 pour répondre à ce problème. Cependant, face à la persistance des inondations, le Barrage de l'Amitié a été érigé dans le but de renforcer davantage les capacités de prévention et de gestion des crues dans la région. Ce barrage contrôle une superficie représentant environ 65 % de l'ensemble du bassin versant de l'oued Ambouli, offrant ainsi une rétention importante des eaux de crue.

Toutefois, malgré l'efficacité démontrée du barrage dans la lutte contre les inondations (2019, 2020 et 2023), des questions demeurent quant à son exploitation. Selon les informations du

Ministère de l’Agriculture, il n'existe actuellement aucune règle établie entre les ministères concernés (Ministère de l’Agriculture et Ministère des Affaires Intérieures) pour définir clairement les modalités d'utilisation du barrage, que ce soit à des fins agricoles ou pour la gestion des crues.

L'objectif premier du barrage est de lutter contre les inondations, un enjeu majeur pour la sécurité et la préservation de la ville de Djibouti en aval du barrage. Toutefois, en parallèle de cette fonction primordiale, le barrage présente un potentiel considérable pour soutenir l'irrigation agricole, un élément clé pour le développement agricole de la région. Cependant, l'absence de règles de gestion clairement définies pourrait compromettre ces deux objectifs. Assurer une utilisation équilibrée et durable du barrage nécessite donc l'établissement de mesures de gestion adéquates. Il est impératif que les différentes parties prenantes s'engagent dans une gestion concertée pour maximiser les bénéfices du barrage, tout en préservant ses fonctions essentielles.

1.2. Caractéristiques de la retenue

1.2.1. Spécifications techniques

Les principales spécifications techniques du Barrage de l’Amitié sont regroupées dans le tableau 51.

Tableau 51: Spécifications techniques du Barrage de l’Amitié

Rubriques	Spécifications techniques
Bassin versant du barrage	490 km ²
Type de barrage	Barrage en enrochement à noyau central en argile
Altitude de la crête du barrage	338 m
Altitude des fondations de l’enrochement	300 m
Altitude des fondations de la digue	267 m
Hauteur de la digue (Hauteur des fondations)	71.0 m (38.0 m)
Largeur de crête	10.0 m
Pente de la face en amont	1 : 2.5
Pente de la face en aval	1 : 2.0
Niveau d’eau max. du barrage	336.78 m
Niveau d’eau min. du barrage	316.00 m
Capacité totale du réservoir	14 370 000 m ³
Capacité effective du réservoir	12 060 000 m ³

Ecoulement des crues à l'emplacement du barrage	680 m ³ /sec
Débit de conception de l'évacuateur de crues	3 000 m ³ /sec

1.2.2. Courbe Hauteur-Volume-Surface :

Les courbes hauteur-volume-surface du Barrage de l'Amitié constituent un outil essentiel pour comprendre les caractéristiques physiques de la retenue d'eau formée par cet ouvrage. Ces courbes sont établies à partir de mesures de nivellement topographique réalisées par la Direction des travaux hydrauliques de Turquie (DSİ, 2017). Elles reflètent les variations de la hauteur d'eau, du volume d'eau stocké et de la surface occupée par la retenue en fonction du niveau de remplissage de l'ouvrage (Figure 70).

Ces courbes caractéristiques de la retenue offrent un aperçu précieux des différents volumes d'eau stockés et des surfaces couvertes pour chaque niveau d'eau de la retenue. La cote de la retenue normale est établie à 334,4 mètres au-dessus du niveau de la mer, correspondant à une surface d'environ 1 km² et représentant une capacité de stockage de 12 060 000 m³ d'eau. En revanche, au niveau des plus hautes eaux, avec une cote de 336,5 mètres et une surface proche de 1,2 km², la capacité de stockage maximale de la retenue atteint 14 370 000 m³ d'eau. Ces données montrent l'importance de la capacité de stockage du barrage pour atténuer les effets des crues et fournir une réserve d'eau utile pour différents usages, tels que l'irrigation agricole.

Enfin, les courbes hauteur-volume-surface permettent également d'identifier le niveau d'eau minimum du barrage, fixé à 316,00 mètres au-dessus du niveau de la mer, avec une surface d'environ 0,3 km². Ces informations sont fondamentales pour évaluer la capacité de rétention de la retenue en période de sécheresse et pour planifier la gestion optimale des ressources en eau dans la région. La connaissance précise de ces courbes est primordiale pour assurer une gestion durable et efficace de la retenue et de ses usages multiples.

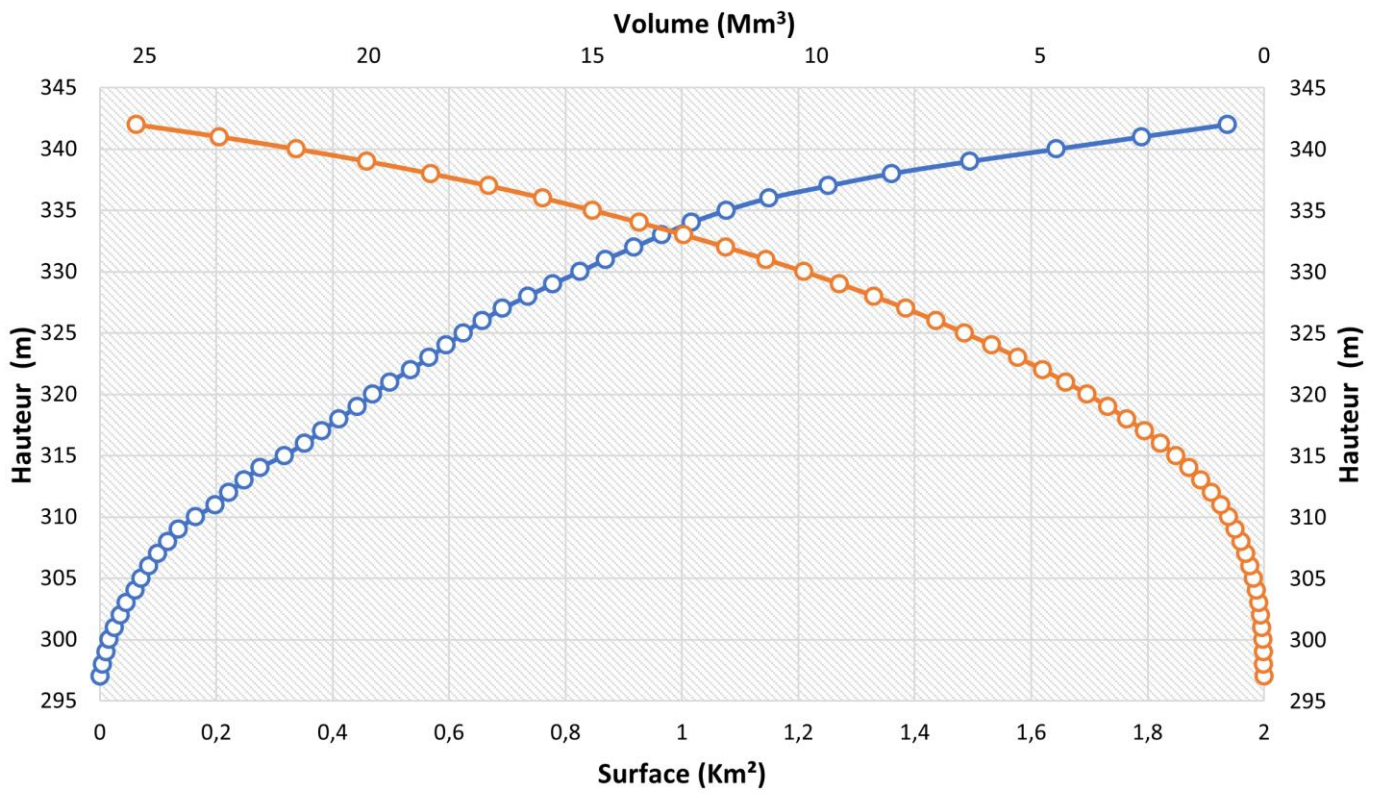
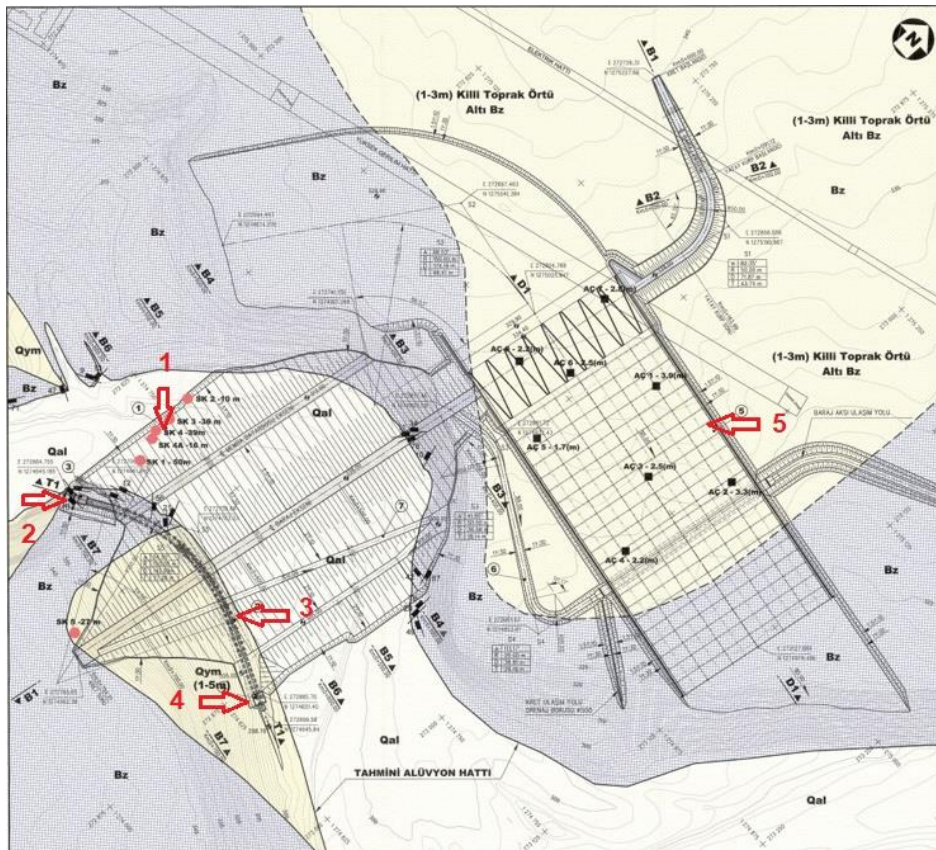


Figure 68: Courbe Hauteur-Volume-Surface du barrage de l'amitié (in DSI, 2017)

1.3. Les ouvrages hydrauliques du Barrage de l'Amitié



- Légende**
- 1 : La digue
 - 2: Canal de distribution
 - 3: Conduite de dérivation
 - 4: Chambre de vannes
 - 5: Déversoir

Figure 69: Les ouvrages hydrauliques du barrage de l'amitié (in DSI, 2017)

Au sein du contexte hydrologique du Barrage de l'Amitié, les ouvrages hydrauliques jouent un rôle prépondérant dans la gestion et le contrôle des flux d'eau. Ces ouvrages sont conçus pour répondre aux besoins variés de la région, allant de la régulation des débits à la fourniture d'eau pour l'irrigation et la réduction des risques d'inondations (Figure 71). Parmi les ouvrages clés qui constituent le barrage, on peut citer :

- La digue principale

La digue du Barrage de l'Amitié est un barrage en enrochement à noyau central, conçu pour assurer la gestion des crues et la régulation des eaux dans la région. La crête du barrage est située à une altitude de 338 mètres au-dessus du niveau de la mer, tandis que les fondations de l'enrochement se trouvent à une altitude de 300 mètres au-dessus du niveau de la mer. Quant aux fondations de la digue proprement dite, elles sont établies à une altitude de 267 mètres au-dessus du niveau de la mer.

La hauteur totale de la digue est de 71.0 mètres, faisant d'elle une structure imposante qui permet une capacité de stockage importante, atteignant les 14 millions de mètres cubes d'eau. La surface des fondations s'étend sur une zone de 38.0 mètres, fournissant ainsi une base solide et stable pour la digue.

La crête de la digue mesure 10.0 mètres de largeur, offrant un espace adéquat pour les opérations de surveillance et de gestion. La face en amont de la digue présente une pente de 1:2.5, permettant une meilleure absorption des impacts des crues et favorisant une rétention

efficace des eaux. De même, la face en aval de la digue affiche une pente de 1:2.0, assurant une évacuation contrôlée des eaux excédentaires.

- La conduite de dérivation

La conduite de dérivation du Barrage de l'Amitié joue un rôle important dans la gestion et le contrôle du débit des eaux stockées dans le barrage. Elle est définie comme un canal ou une tuyauterie conçue pour acheminer une partie du débit d'eau depuis le barrage vers un point d'exutoire ou d'utilisation spécifique, afin de prévenir les risques d'inondation et de permettre une utilisation maîtrisée des ressources hydriques.

Cette conduite de dérivation est située sur la rive droite du barrage et est conçue pour traiter un débit de conception de 71,45 m³/s. Elle est composée d'un diamètre intérieur de 3 mètres, ce qui permet de transporter un volume significatif d'eau tout en garantissant un écoulement régulier et contrôlé.

L'élévation du fond de l'admission est fixée à 302 mètres, tandis que l'élévation du fond de l'exutoire est légèrement inférieure, mesurée à 299,5 mètres. Cette différence d'élévation assure un flux contrôlé et guidé des eaux vers leur destination finale.

La longueur totale de cette conduite de dérivation est de 234,6 mètres, fournissant ainsi une distance adéquate pour acheminer efficacement le débit désiré. L'élévation de la crête du batardeau en amont de la conduite est évaluée à 313 mètres, garantissant une pression et une vitesse appropriées pour un transfert optimal des eaux.

Cependant, bien que les spécifications de cette conduite soient présentes dans le rapport fourni par la société de construction, il est essentiel de noter qu'elle n'a pas encore été mise en service lors d'événements de crues. L'opérationnalité de cette conduite pendant les crues pourrait jouer un rôle décisif dans la gestion des risques liés aux inondations et permettre une exploitation optimale des ressources hydriques.

- La chambre des vannes

La chambre de vannes du Barrage de l'Amitié joue un rôle important dans la régulation du débit d'eau stockée dans le barrage. Elle est définie comme un compartiment ou une salle de contrôle spécialement conçue pour abriter les vannes et les dispositifs de régulation du débit d'eau du barrage. La chambre de vannes est située à un emplacement stratégique du barrage, permettant un accès facile et sécurisé pour les opérations de contrôle et de maintenance.

La conception de la chambre de vannes du Barrage de l'Amitié est optimisée pour fournir un environnement contrôlé permettant d'ajuster précisément le débit des eaux stockées dans le barrage selon les besoins et les exigences. Elle abrite généralement un ensemble de vannes, de dispositifs d'ouverture/fermeture et de systèmes de contrôle, permettant aux gestionnaires de réguler le flux d'eau sorties du barrage.

Les spécifications techniques de la chambre de vannes du Barrage de l'Amitié comprennent les dimensions, la profondeur et les caractéristiques des vannes utilisées pour ajuster le débit. Ces vannes sont généralement construites en matériaux résistants à l'eau et à la corrosion pour assurer leur durabilité et leur efficacité dans des conditions environnementales variables.

Cependant, les spécifications techniques de la chambre de vannes ne sont pas indiquées dans le rapport de la DSI (2017).

En plus de jouer un rôle essentiel dans la gestion du débit d'eau, la chambre de vannes est généralement équipée de dispositifs de sécurité pour prévenir les risques liés aux crues soudaines ou aux conditions météorologiques extrêmes. Des dispositifs d'alerte et de surveillance peuvent être installés pour surveiller en temps réel les conditions hydrométéorologiques et prendre des mesures préventives en cas de besoin.

- Evacuateur des crues (déversoir)

L'évacuateur de crue du Barrage de l'Amitié est une composante de la structure conçue pour gérer les débits d'eau excessifs pendant les périodes de crue. Il est spécifiquement conçu pour libérer en toute sécurité une grande quantité d'eau lorsque le niveau du réservoir dépasse un seuil critique afin de protéger la stabilité du barrage. Il est situé sur la rive gauche du barrage, et son seuil est en forme "labyrinthe", ce qui permet une meilleure dissipation de l'énergie de l'eau pour éviter l'érosion excessive (Figure 72).

La conception de l'évacuateur de crue comprend huit baies, ce qui permet une meilleure gestion du débit d'eau évacué. La tête d'eau, c'est-à-dire la différence d'altitude entre le niveau de l'eau du réservoir et le seuil de l'évacuateur, est de 2,5 mètres. L'élévation du seuil est fixée à 334,4 mètres au-dessus du niveau de la mer, et sa largeur est de 144 mètres.

Pour assurer une efficacité optimale de l'évacuateur de crue, un canal d'approche a été aménagé avec une altitude de 329,9 mètres et une largeur de 144 mètres, permettant une bonne convergence de l'écoulement d'eau vers l'évacuateur. La longueur du canal d'approche est de 290 mètres, assurant ainsi un bon alignement et une vitesse d'écoulement adaptée.

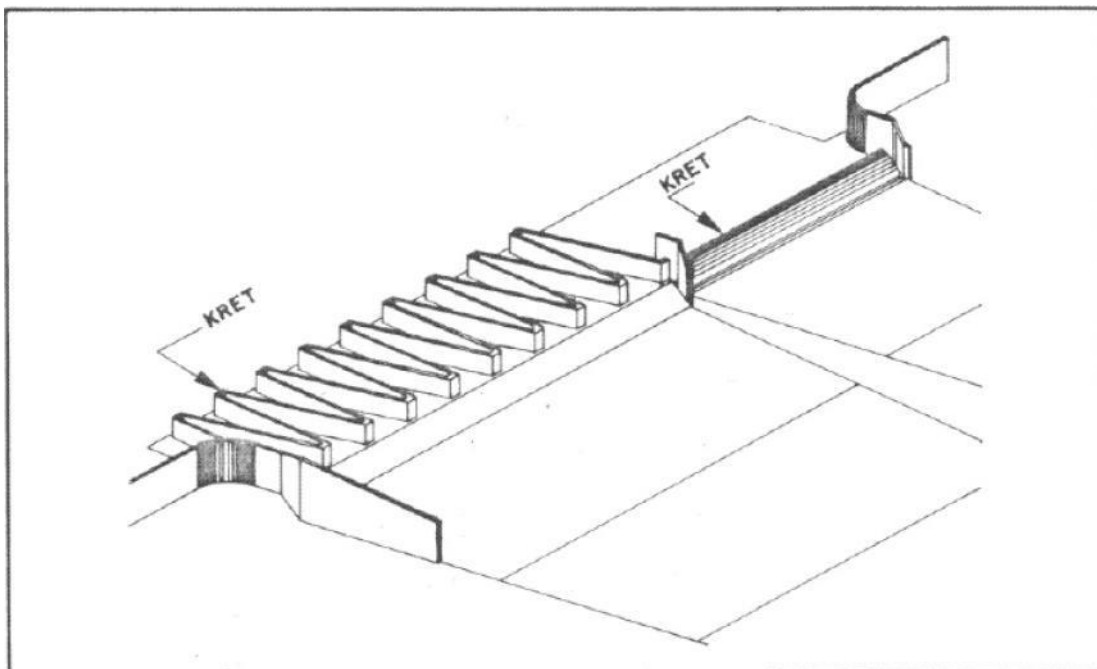


Figure 70: Schéma de l'évacuateur de crue du Barrage de l'Amitié en forme "labyrinthe"

Selon la DSI, le barrage intercepte 65% du bassin versant de l'Oued Ambouli, le volume de la crue centennale serait de l'ordre de 8 Mm³, de la crue millénaire de l'ordre de 11,4 Mm³ (selon

la formule de Myer) (Tableau 52). Le tableau 52 est extrait de Sepia Conseil (2021) qui cite sans plus de précision le projet Eau et Energie réalisé par BRL qui évoque une étude d'aménagement de l'Oued menée par BCEOM datant de plus de 20 ans (en 2003). Par extrapolation simple, une crue de période de retour 2000 ans apporterait au barrage un volume proche de 12.5 à 13 Mm³. La capacité du barrage permettrait donc (s'il est vide au début de l'épisode) de contenir une crue bi-millénaire (2000 ans). L'évacuateur de crue du barrage peut évacuer jusqu'à 3 000m³/s. Cette approche assure une marge de sécurité suffisante pour faire face à des conditions hydroclimatiques extrêmes et garantir l'efficacité de l'évacuateur de crue dans la gestion des crues potentiellement dévastatrices.

Tableau 52: Distribution fréquentielle des débits et volumes de crue (BCEOM). Extrait du projet Eau et Energie réalisé par BRL citant une étude d'aménagement de l'Oued menée par BCEOM qui date de plus de 20 ans (en 2003) (tiré de Sepia conseils, 2021)

Période de retour (ans)	Débit de pointe (m ³ /s)	Volume (Mm ³)
2	430	3,9
5	870	7,1
10	1160	9,1
20	1440	11,1
30	1600	12,2
50	1800	13,6
100	2080	15,5
1000	2970	21,9

L'élévation de la crête du seuil du déversoir est de 334.40 mètres au-dessus du niveau de la mer, tandis que l'élévation de la prise d'eau du déversoir est de 316.00 mètres (Figure 73). Le talweg, qui représente la ligne la plus basse du lit du cours d'eau, a une élévation de 300,00 mètres. Le rapport de hauteur de refoulement est calculé comme étant $(334.40-316.00) / (334.40-300.00) = 53.50 \%$, ce qui indique une importante capacité du déversoir à refouler les eaux excédentaires.

Le volume d'eau stocké au niveau du seuil de l'évacuateur de crues est évalué à 14 367 hm³ lorsque l'élévation atteint 334,40 mètres. Par ailleurs, le volume d'eau stocké au niveau de la prise d'eau du déversoir est estimé à 1 675 hm³ lorsque l'élévation atteint 316,00 mètres. Ce ratio du volume déchargé, calculé comme $(14,367 - 2,305) / (14,367 - 0,000) = 83,96\%$, met en évidence la capacité de décharge du déversoir lorsque le niveau du réservoir est supérieur au seuil.

Le débit du déversoir varie en fonction de l'élévation de l'eau. Lorsque l'élévation atteint son niveau maximal de 336,5 mètres, le débit est de 15,57 m³/s. À l'élévation normale de 334,4 mètres, le débit est de 15,09 m³/s, et lorsque l'élévation atteint son niveau minimal de 316 mètres, le débit est de 9,44 m³/s.

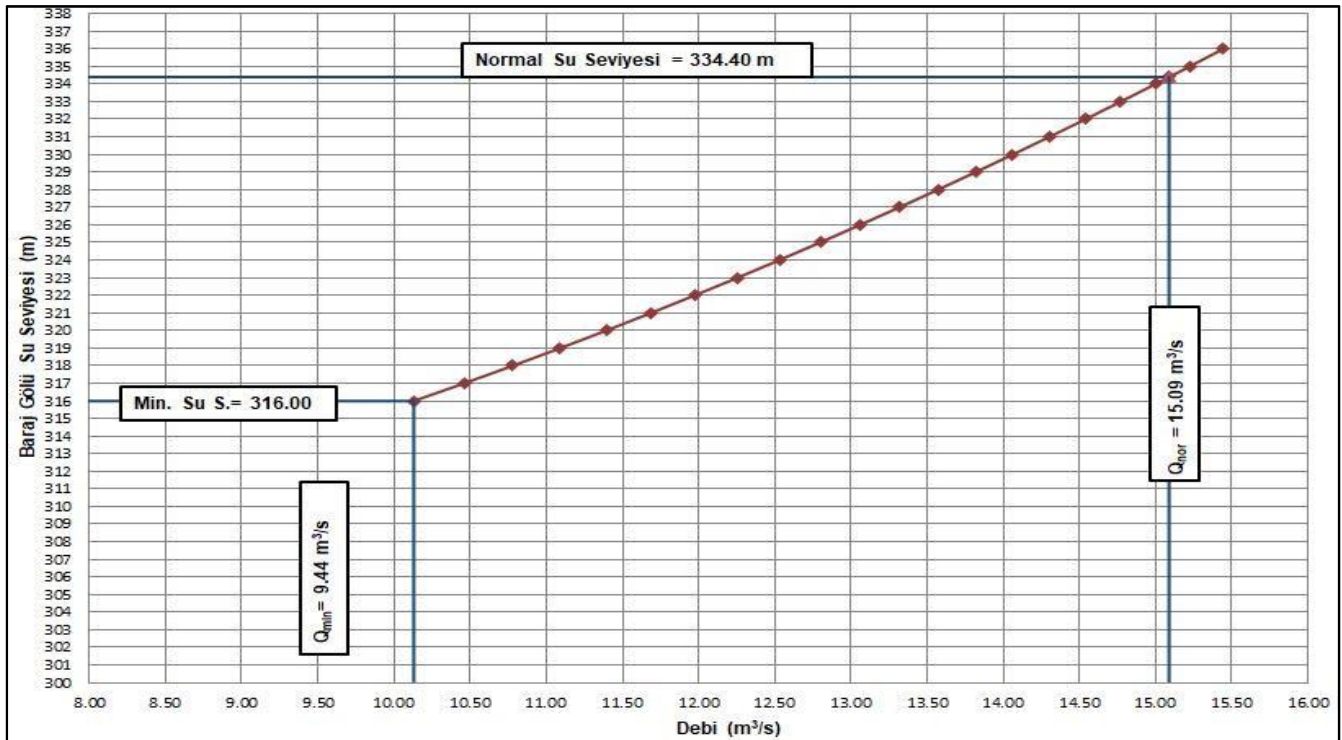


Figure 71: Courbe de débit de l'évacuateur de crue du barrage de l'amitié (in DSI,2017)

2. Analyse des événements disponibles

L'étude des événements enregistrés au niveau du Barrage de l'Amitié revêt une importance cruciale pour la gestion de cet ouvrage hydraulique. Ainsi, des données recueillies par la Direction des Grands Projets, chargée de la gestion du barrage au sein du ministère de l'Agriculture et de l'Élevage ont été collectées lors de deux événements distincts en 2019 et 2020.

Les données récoltées sont : l'heure de la mesure ; le niveau d'eau du réservoir ; et la perte d'eau mesurée en aval pour évaluer le débit d'eau s'écoulant en aval du barrage. Cependant, aucune perte d'eau significative n'a été mesurée pour ces deux événements.

Les calculs de dérives constituent une analyse approfondie des variations du réservoir au fil du temps. Ils incluent le volume total du réservoir en mètres cubes, le temps écoulé entre chaque mesure en heures, et les variations du volume d'eau entre deux relevés successifs. Ces variations sont mesurées pour évaluer l'augmentation ou la diminution du volume d'eau sur une base quotidienne (m³/jour) et par seconde (m³/s). Ces informations sont essentielles pour établir les fluctuations du niveau d'eau du barrage dans des intervalles de temps spécifiques et permettent de mieux comprendre les dynamiques hydrologiques qui peuvent affecter la capacité de stockage du réservoir.

En outre, la quantité d'eau entrant dans le réservoir depuis l'amont est également enregistrée. Cette donnée est importante pour évaluer l'apport en eau provenant des bassins versants alimentant le barrage et pour comprendre l'impact des apports de l'oued sur le niveau d'eau du réservoir.

L'ensemble de ces données est essentiel pour la gestion opérationnelle du Barrage de l'Amitié. L'analyse des événements mesurés permet de prendre des décisions éclairées concernant le débit d'eau régulé, la prévention des inondations, la fourniture d'eau pour l'irrigation agricole, et contribue à une meilleure compréhension des interactions entre le barrage et son environnement hydrologique. Ces informations sont fondamentales pour assurer une gestion durable et efficace de la ressource en eau et optimiser son utilisation dans la région concernée.

2.1. Analyse de l'évènement de 2019

L'analyse et la caractérisation des événements mesurés au niveau du Barrage de l'Amitié en 2019 offrent un aperçu du comportement hydrologique de la retenue et des éléments qui influencent les variations du niveau d'eau. L'évènement de 2019 se divise en deux sous-événements distincts, caractérisés par une période sans apport significatif en eau (Figure 74).

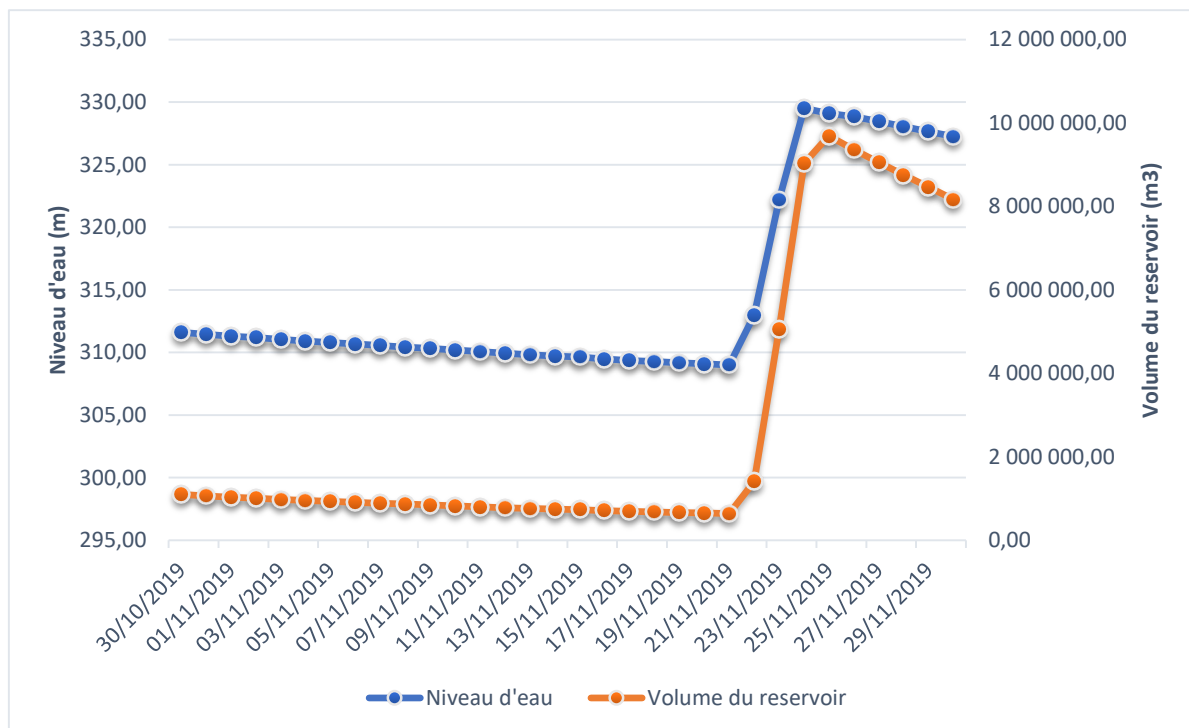


Figure 72: Courbe du niveau d'eau et du volume d'eau dans le barrage de l'amitié pour l'évènement de 2019

- **Le premier sous-événement**

Le premier sous-événement, couvrant la période du 30 octobre au 21 novembre 2019, suscite un intérêt particulier en raison de son début imprécis (Figure 75). Des informations récupérées des réseaux sociaux (page officielle du ministère de l'Économie et des Finances), datant du 30 septembre 2019, ont suggéré que la retenue du barrage avait atteint un niveau de 5 millions de

m³ à cette date. Toutefois, malgré ces indications, il n'a pas été possible de confirmer la date précise du début de l'événement. Les données pluviométriques provenant du réseau national géré par l'ANM n'ont pas révélé d'événements pluvieux pendant les jours précédents cette période dans les stations environnantes.

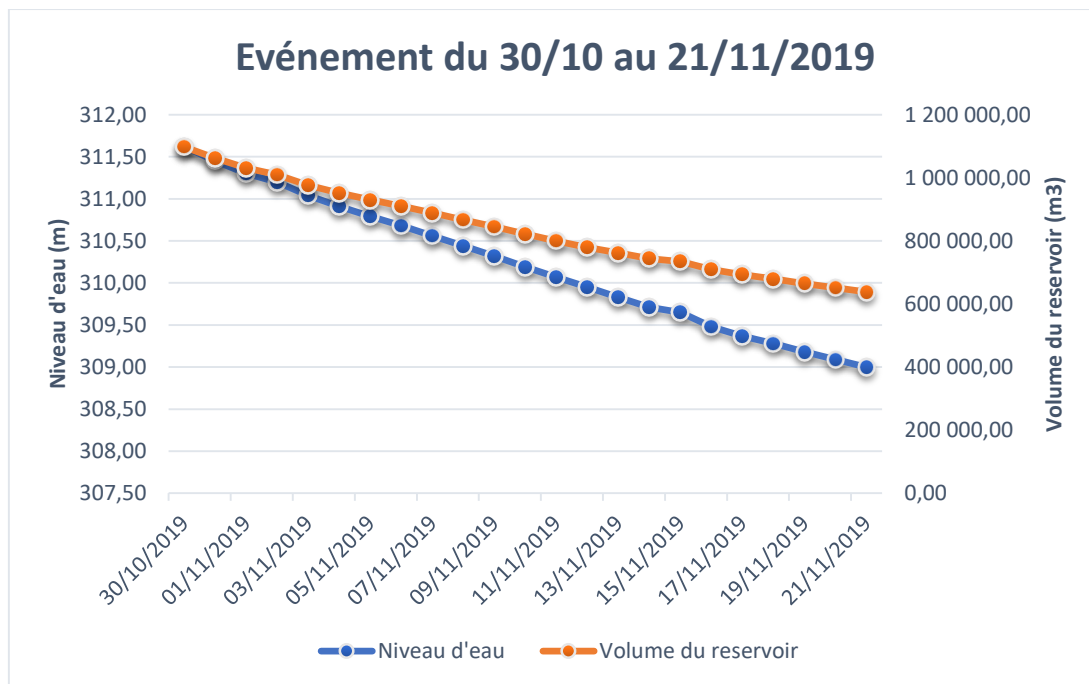


Figure 73: Courbe du niveau d'eau et du volume d'eau dans le Barrage de l'Amitié pour l'évènement de 30/10 au 21/11/2019

Pour mieux cerner cet événement, une analyse approfondie des pertes en eau a été entreprise, en considérant les pertes par évaporation et infiltration. Les débits de pertes journaliers ont oscillé entre environ 40 000 m³/j (au début, avec un niveau du réservoir à 311,62 m) et environ 12000 m³/j (avec un niveau de réservoir à 309 m) (figure 76). Il convient de noter que pour la date du 1er novembre, la valeur du débit de perte est inférieure à celle du jour suivant, une différence qui s'explique par le fait que la mesure n'a pas été réalisée sur un intervalle standard de 24 heures (Figure 7).

Les données d'évaporation ont été extrapolées à partir de mesures réalisées sur une période de 20 ans à la station Djibouti Aéroport, à l'aide d'un bac évaporatoire de type Classe A. La valeur moyenne obtenue s'élève à 5 mm/j, correspondant aux moyennes régionales sahéliennes (Pouyaud, 1986). Ceci équivaut à environ 4% du débit de perte journalier, ce qui montre que plus de 96% des débits de pertes journaliers sont à attribuer à l'infiltration. Il est à noter qu'aucune fuite d'eau n'a été constaté et qu'aucun lâcher d'eau n'a été effectué pendant cette période.

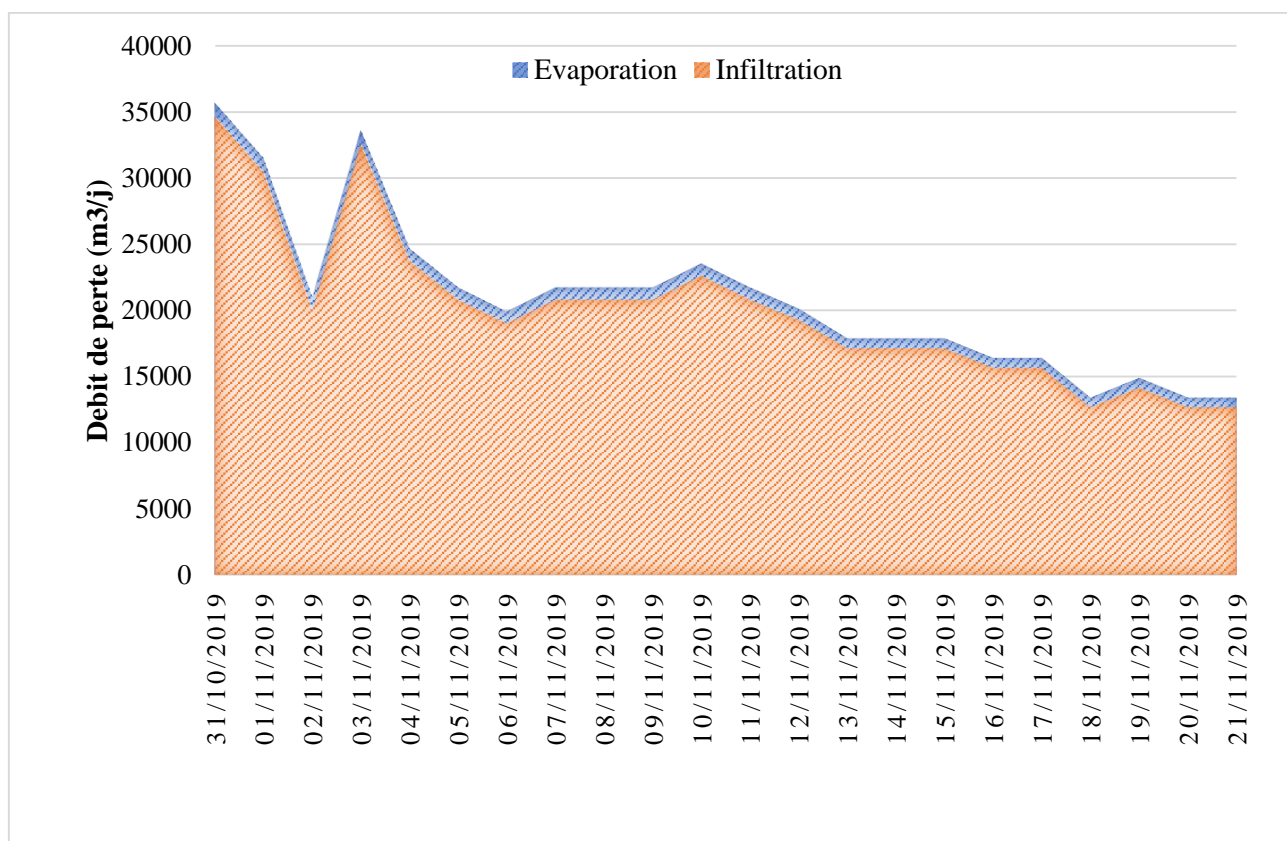


Figure 74: Courbe de débit de perte par infiltration et par évaporation au niveau du Barrage de l'Amitié pour l'évènement du 30/10 au 21/11/2019

- **Le second sous-événement**

Le second sous-événement, entre le 25 et le 30 novembre 2019, offre une perspective différente grâce aux données pluviométriques disponibles. Avec un cumul d'environ 300 mm à Djibouti Ville sur trois jours, équivalente à deux ans de précipitations moyennes, et des pluies fortes à Arta, avec un cumul de 100 mm sur la même période, cet événement a eu un impact significatif. Les mesures ont révélé une hauteur maximale de la retenue à 329.5 m, correspondant à un volume de 9.8 millions de m³.

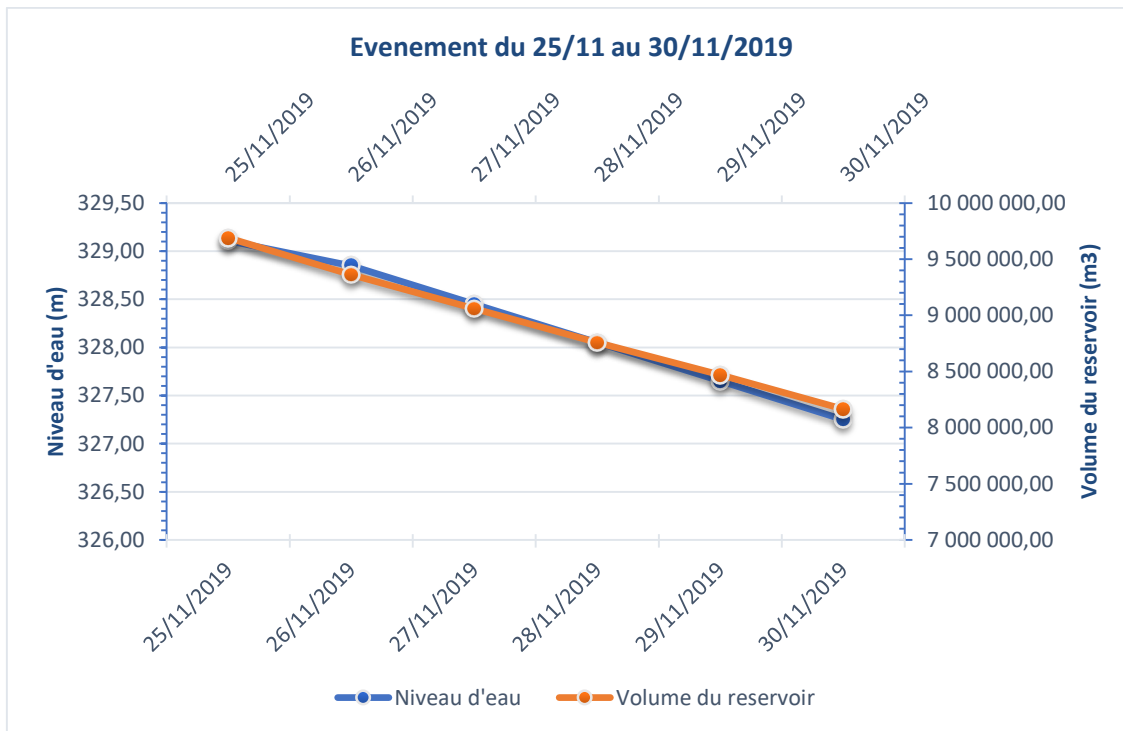


Figure 75: Courbe du niveau d'eau et du volume d'eau dans le Barrage de l'Amitié pour l'évènement de 25/11 au 30/11/2019

La valeur du débit de perte journalier dans la zone étudiée est remarquablement élevée, s'élevant à une moyenne de 305 000 m³/j. Cette spécificité s'explique principalement par les caractéristiques géologiques de la zone, notamment la prédominance de la fracturation. L'analyse des composantes de ces pertes a révélé que l'évaporation ne contribue qu'à hauteur de 4%, tandis que 96% est due à l'infiltration. Il est également à noter qu'aucune fuite ni lâcher d'eau n'a été observé lors de cet épisode hydrologique.

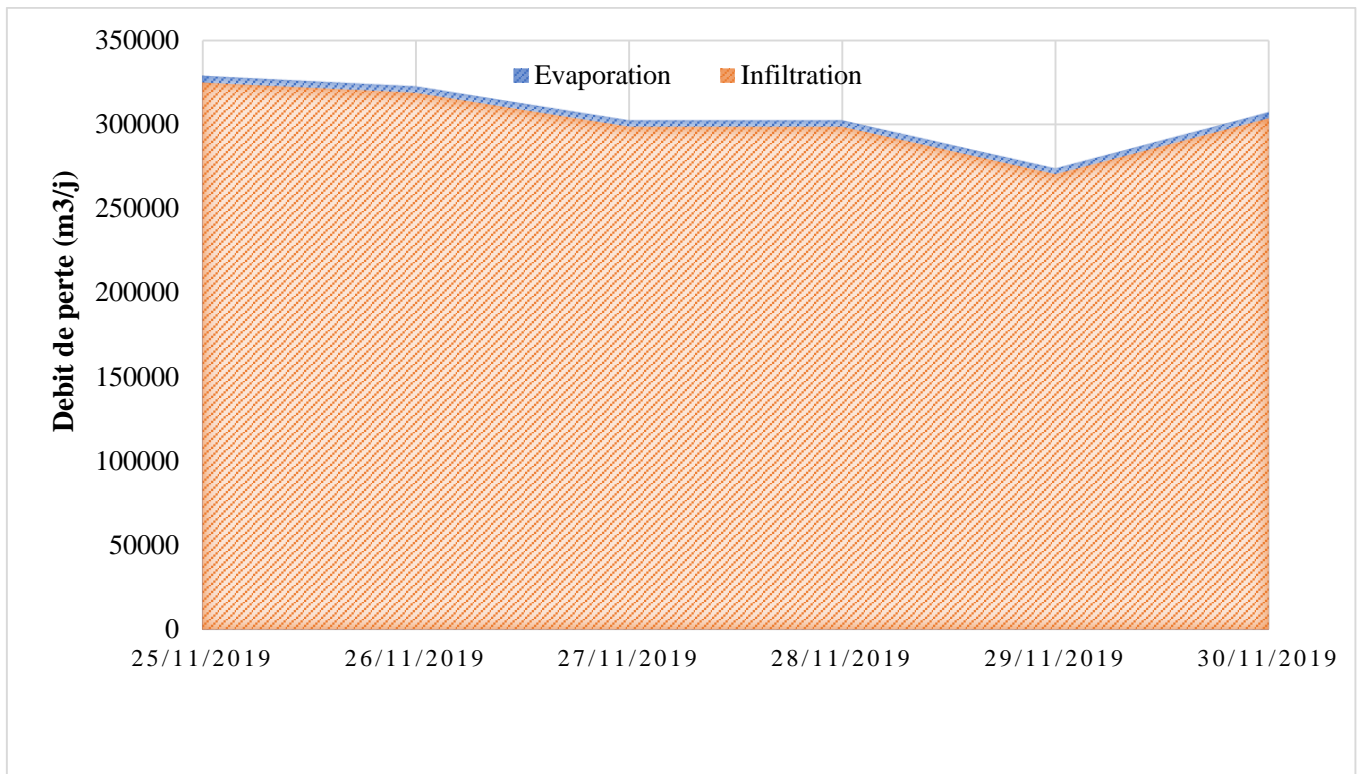


Figure 76: Courbe de débit de perte par infiltration et par évaporation au niveau du Barrage de l'Amitié pour l'évènement du 25/11 au 30/11/2019

L'évènement de 2019 a revêtu une importance majeure, car il a été le seul moment où le remplissage du barrage a été mesuré, du 22 au 24 novembre 2019. Les données recueillies par les stations situées à proximité du barrage, notamment Arta et Oueah, attestent que les précipitations enregistrées dans ces zones ont été les principaux facteurs contributifs à cet épisode hydrologique (Figure 79). Ces observations précises et les analyses approfondies apportent une contribution essentielle à la compréhension des processus hydrologiques qui gouvernent la retenue du Barrage de l'Amitié. Ces connaissances sont indispensables pour une gestion optimale du barrage.

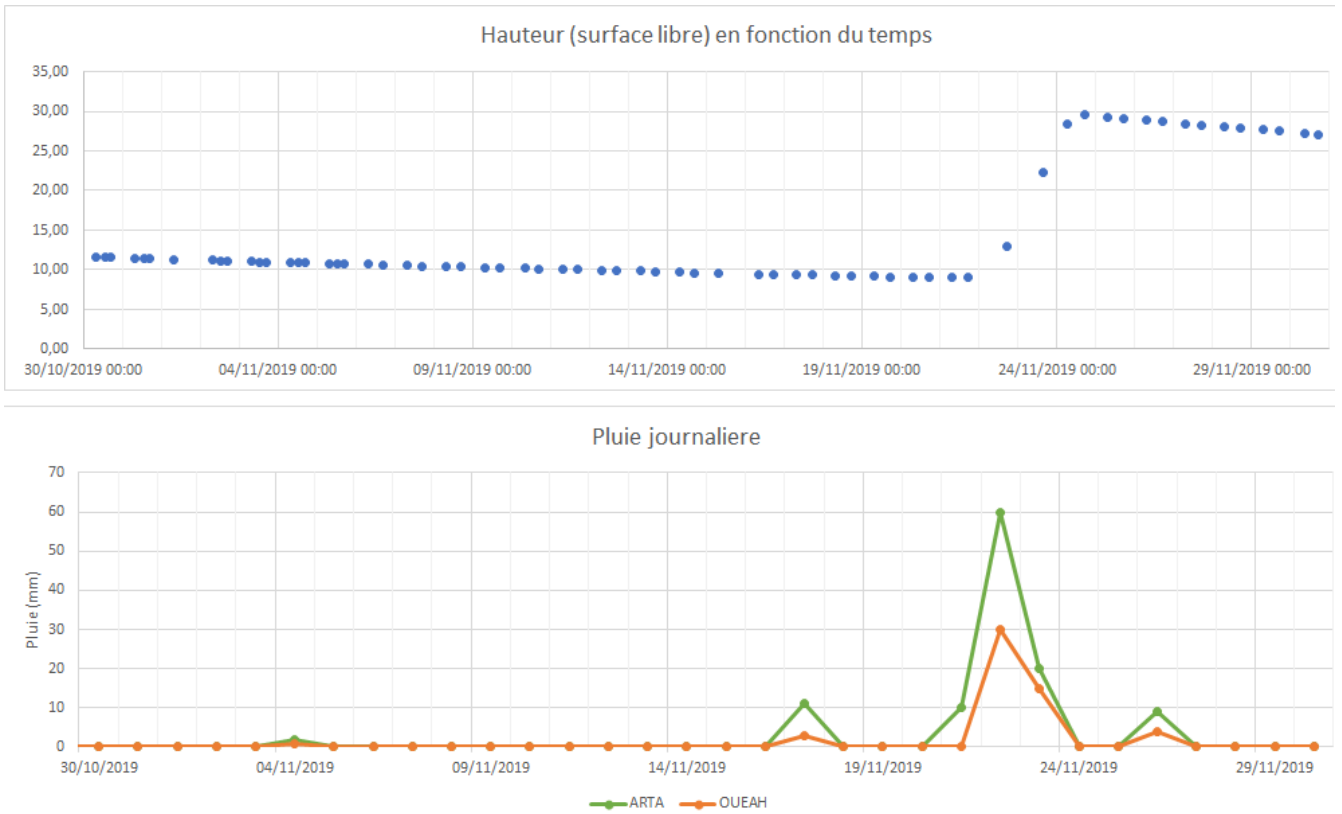


Figure 77: Courbe de hauteur d'eau et de la pluviométrie du barrage de l'amitié pour l'évènement de 2019



Figure 78: Image aérienne du Barrage de l'Amitié lors de l'évènement de 2019, le barrage a retenu 10 millions de m³ d'eau (Source : Radio Télévision de Djibouti)

2.2. Analyse de l'évènement de 2020

L'année 2020 a apporté son lot d'évènements hydrologiques significatifs au Barrage de l'Amitié, marquée par une période sans apport notable en eau. Les mesures pour cette période ont été réalisées par les agents de la Direction des Grands Projets du ministère de l'Agriculture, s'étendant du 29 mai au 27 juin 2020 (Figure 81). Cependant, il convient de noter que les données de mesures présentent des lacunes, notamment entre le 6 juin et le 9 juin 2020, ainsi que du 13 juin jusqu'au 27 juin 2020. Malgré ces intervalles de temps où les mesures ne sont pas disponibles, une évaluation approfondie des pertes en eau a été entreprise en tenant compte des données disponibles.

Tout comme l'évènement de 2019, le début de cet évènement en 2020 demeure imprécis. Cependant, des indicateurs laissent penser que cet évènement pourrait avoir débuté entre le 20 et le 21 avril 2020, coïncidant avec des phénomènes climatiques extrêmes qui ont touché le pays. À titre d'exemple, Djibouti aéroport a enregistré 80 mm de précipitations, Chabelley 100 mm, et Djibouti Ville a été gravement touchée avec 110 000 personnes impactées et 8 décès rapportés.

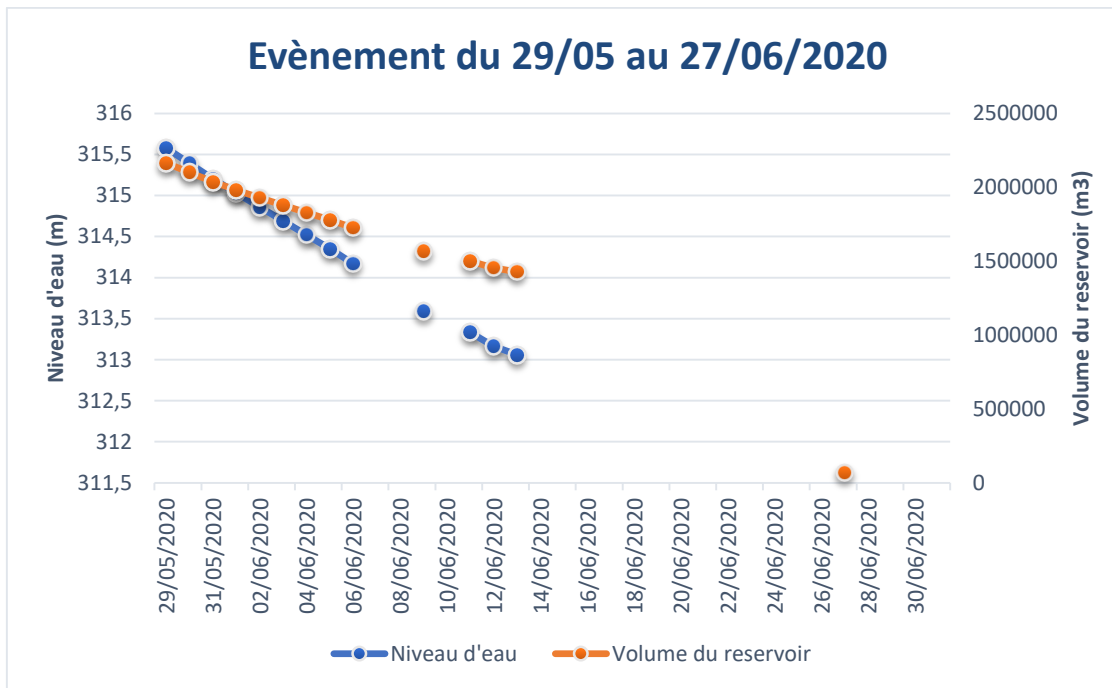


Figure 79: Courbe du niveau d'eau et du volume d'eau dans le Barrage de l'Amitié pour l'évènement de 29/05 au 27/06/2019

Une analyse approfondie des pertes en eau a été entreprise pour cette période spécifique, avec pour objectif d'évaluer précisément les mécanismes de perte, à la fois par évaporation et par infiltration. Les débits de pertes journaliers, reflétant la quantité d'eau perdue chaque jour, ont présenté des variations significatives au cours de cette période. Au début de la période, lorsque le niveau du réservoir était à 315.39 m, les débits de pertes journaliers étaient estimés à environ 63 650 m³/j (Figure 81). Cependant, à mesure que le niveau du réservoir diminuait jusqu'à atteindre 313.06 m, les débits de pertes journaliers ont également diminué pour atteindre environ 26 200 m³/j. La moyenne des débits de pertes journaliers au cours de cette période a été évaluée à environ 50 000 m³/j.

Les mesures d'évaporation ont été obtenues en extrapolant les données collectées à la station Djibouti Aéroport, où un bac évaporatoire de type Classe A a été utilisé pour évaluer la quantité d'eau perdue par évaporation. Pour le mois de mai, caractérisé comme l'une des périodes les plus chaudes à Djibouti, une valeur moyenne d'évaporation de 10 mm/j a été déterminée. Cette estimation correspond à un taux moyen d'évaporation de 6% pour cette période spécifique supérieur par rapport à l'évènement de novembre 2019. Par conséquent, plus de 94% des débits de pertes journaliers ont été attribués à l'infiltration.

Pour cet évènement les mesures de débit de perte ont été mesurées en continu sur la période du 30/05 au 06/06/2020. Il est également important de noter que pendant cette période, aucune fuite ni aucun lâcher d'eau n'ont été observés. Cela suggère que les pertes enregistrées étaient principalement dues à l'infiltration dans le sol environnant, étant donné l'absence d'autres mécanismes de perte significatifs. Cette analyse détaillée des pertes en eau fournit un aperçu essentiel des processus hydrologiques à l'œuvre dans la retenue du Barrage de l'Amitié pendant cette période sans apport en eau, contribuant ainsi à une meilleure compréhension de la gestion et de l'utilisation de cette ressource vitale dans la région.

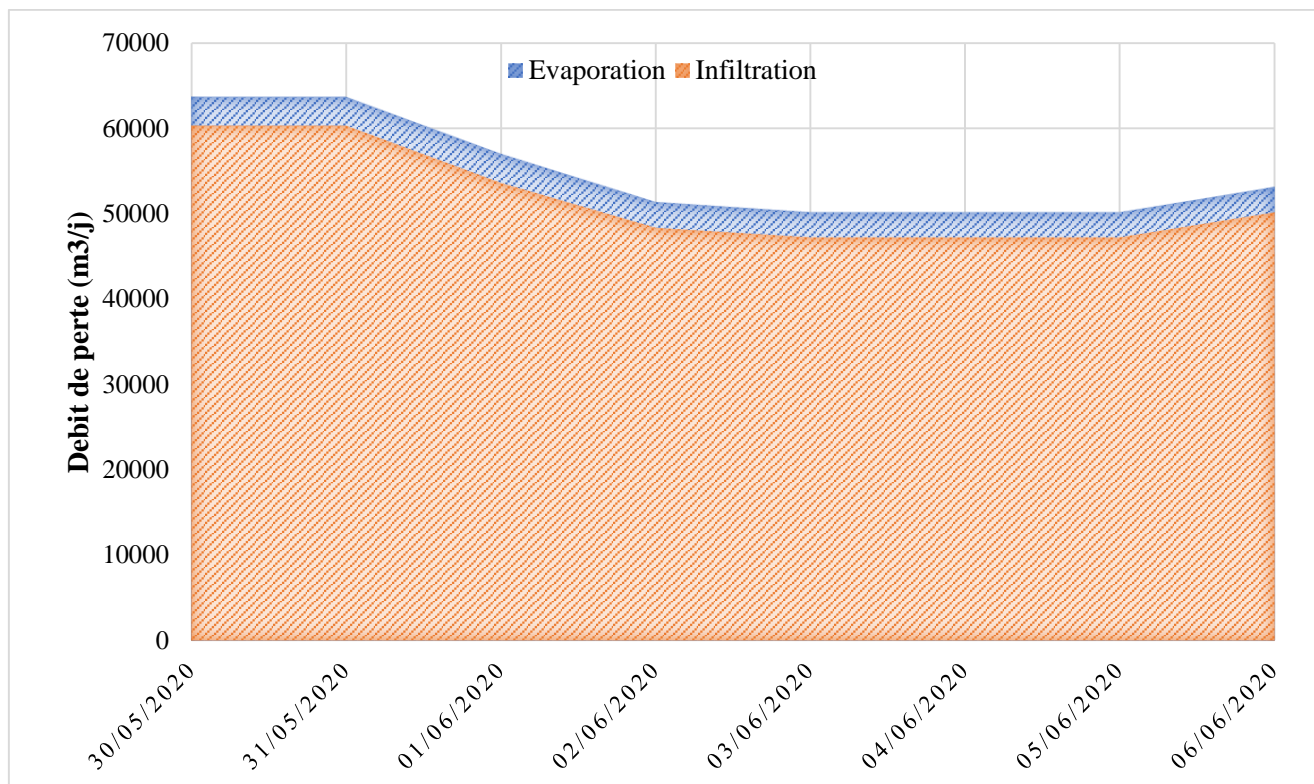


Figure 80: Courbe de débit de perte par infiltration et par évaporation au niveau du Barrage de l'Amitié pour l'évènement de 2020

L'évènement de 2020 a ainsi mis en lumière l'impact considérable des phénomènes climatiques extrêmes sur le Barrage de l'Amitié. Les analyses des pertes en eau fournissent des perspectives essentielles pour comprendre l'hydrologie de la retenue et la gestion durable de cette ressource dans le pays.

2.3. Autre évènement

L'année 2023 a marqué un évènement majeur dans l'histoire du Barrage de l'Amitié, avec l'atteinte de son niveau de contenance d'eau maximum de 14 millions de m³ le 1er janvier. Cet évènement a été précédé par une série de fortes précipitations survenues dans les jours précédents. Les relevés pluviométriques indiquent des cumuls exceptionnels dans la région, avec des enregistrements tels que 160 mm à Djibouti en 24 heures, 100 mm en quelques heures à l'amont du bassin versant Ambouli au Petit Bara, 190 mm en quelques heures à Arta et 192 mm à Oueah. Cependant, malgré ces évènements pluvieux intenses, il est important de souligner qu'aucune mesure de pluie n'a été effectuée au niveau du barrage pour évaluer l'impact précis sur son niveau d'eau.

Cette période a été d'une grande importance pour la compréhension des capacités de remplissage du barrage. En effet, l'observation de ces cumuls de précipitations exceptionnelles a permis de mettre en évidence les scénarios potentiels de remplissage du barrage dans des conditions hydrologiques extrêmes. Les données pluviométriques recueillies ont montré que des évènements intenses de pluie étaient capables de recharger considérablement la retenue en un laps de temps relativement court, conduisant à l'atteinte de sa capacité de stockage maximale.

L'absence de mesures spécifiques au niveau du barrage pendant cet évènement souligne également l'importance de disposer de systèmes de surveillance et de mesure en temps réel pour

mieux comprendre et gérer les variations rapides du niveau d'eau dans le réservoir. Les données pluviométriques fournies par les différentes stations proches du bassin versant ont été essentielles pour contextualiser cet événement et en tirer des enseignements pour une meilleure gestion future de la retenue. Cette réalisation en 2023 ouvre de nouvelles perspectives pour la gestion opérationnelle du Barrage de l'Amitié et met en lumière la nécessité continue de surveiller et de comprendre les interactions complexes entre les précipitations, l'infiltration et le niveau de la retenue.

2.4. Reconstitution des infiltrations : Loi en puissance

La caractérisation et la reconstitution des infiltrations au Barrage de l'Amitié revêtent une importance primordiale dans la compréhension des pertes hydriques et des interactions complexes entre le niveau d'eau dans la retenue et les taux d'infiltration. Les pertes par infiltration et les fuites sont étroitement liées au niveau de stockage d'eau dans le barrage, ce qui rend essentiel l'établissement d'une relation mathématique entre ces paramètres pour mieux appréhender ces phénomènes.

La quantification du volume infiltré est intrinsèquement liée à la charge hydraulique et, par extension, à la cote du niveau d'eau dans la retenue. Cette relation fondamentale entre le volume infiltré et la cote de la retenue a été établie à partir des mesures réalisées lors des événements de 2019 et 2020, spécifiquement durant les périodes sans apports en eau. La figure 83 représentant cette relation permet de prévoir les infiltrations en fonction du volume d'eau contenu dans la retenue. Par exemple, à une cote de retenue de 15 mètres, correspondant à un volume estimé à 2 millions de m³, l'infiltration est évaluée à environ 660 litres par seconde, soit environ 60 000 m³ par jour.

Toutefois, il convient de noter que ce modèle de reconstitution des infiltrations présente des limites. Il ne peut être utilisé pour des prévisions d'infiltration lorsque le niveau d'eau dans le barrage dépasse 329.5 mètres. Pour surmonter cette limite et obtenir une meilleure approximation, les hydrogéologues ont développé une relation empirique de type loi de puissance, exprimée comme

$$V_i = c + aH^b \quad (\text{éq. 1})$$

où V_i représente le volume infiltré et H la cote de la retenue (Pabiot, 1999). En utilisant les paramètres $c=0$, $a=0.4838$ et $b=2.662$, cette loi de puissance démontre une excellente capacité de reconstitution des volumes infiltrés en fonction des volumes d'eau stockés, avec un coefficient de détermination (R^2) atteignant 0.9995 (Figure 83).

Cette approche analytique offre une base solide pour évaluer et anticiper les pertes par infiltration au Barrage de l'Amitié, permettant ainsi une meilleure gestion des ressources hydriques dans cette région. La modélisation de ces interactions complexes entre les niveaux d'eau et les taux d'infiltration contribue à une meilleure prise de décision en matière de gestion des ressources en eau et à la planification durable de l'utilisation de cette précieuse réserve hydrique.

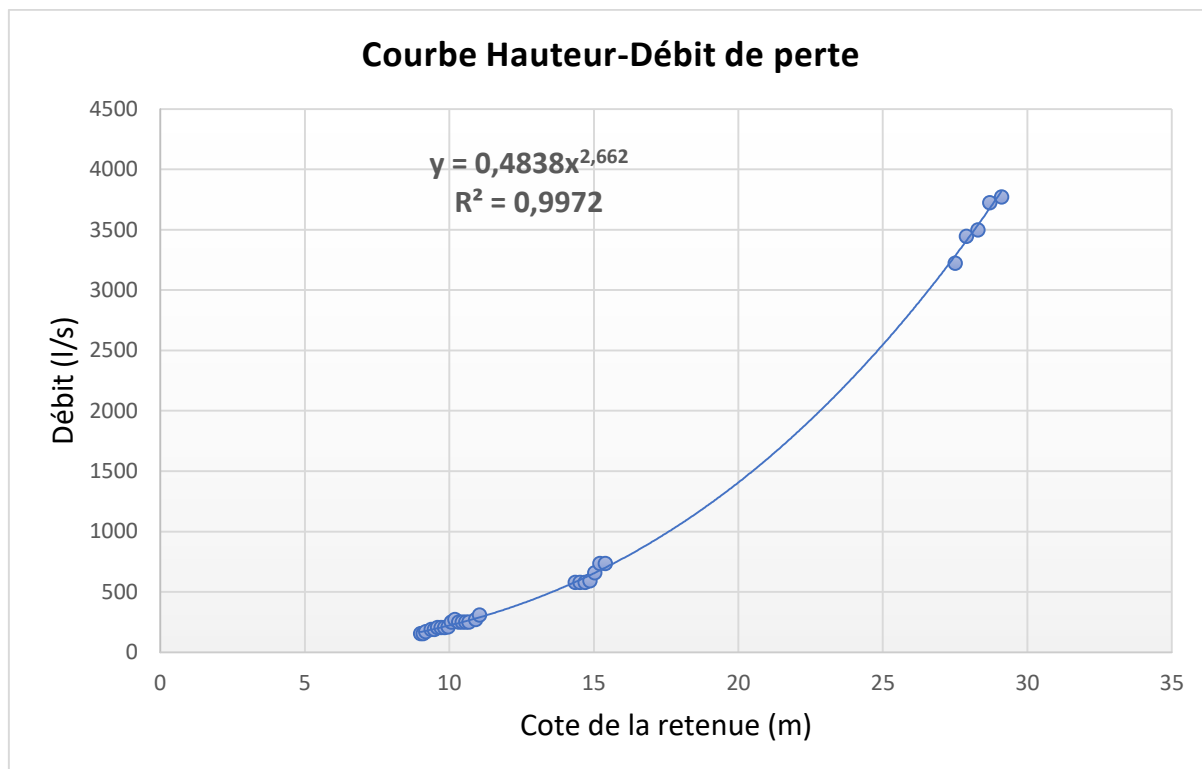


Figure 81: Courbe de débit de perte en fonction de la cote de la retenue du Barrage de l'Amitié

2.5. L'élaboration du bilan en eau de surface du Barrage de l'Amitié

L'élaboration du bilan en eau de surface au niveau du Barrage de l'Amitié constitue une étape importante dans la compréhension globale de la dynamique hydrologique de cette retenue. Après avoir précédemment modélisé l'infiltration au sein du barrage en utilisant l'équation (1), il est maintenant impératif de réaliser une analyse approfondie en vue de déterminer le dernier paramètre encore inconnu, à savoir le débit naturel de l'oued. Cette démarche consiste à établir le bilan de la retenue en examinant de manière méthodique tous les éléments qui interviennent dans ce système complexe.

À partir de l'équation obtenue, il sera possible de quantifier les apports journaliers au barrage. Pour cela, une démarche rigoureuse sera entreprise pour reconstituer les apports en eau provenant de l'oued, en se basant sur les données disponibles pour l'événement hydrologique de 2019. Cette phase de reconstitution des apports naturels joue un rôle essentiel dans l'analyse, car elle permet de disposer d'une base solide de référence pour évaluer la contribution réelle de l'oued au réservoir.

Une fois les apports de l'oued correctement évalués et reconstitués, une étape de synthèse et d'inventaire sera entreprise pour récapituler l'ensemble des éléments intervenant dans le bilan en eau de surface de ce barrage. Cela englobera non seulement les apports naturels, mais aussi les pertes par évaporation et par les infiltrations. Cette approche globale permettra d'obtenir une vision complète des échanges d'eau au sein de la retenue et de mieux appréhender les mécanismes qui régissent son fonctionnement hydraulique.

2.5.1. Les éléments du bilan hydrologiques du Barrage de l'Amitié : les apports et les sorties

La description et la caractérisation des éléments du bilan hydrologique du Barrage de l'Amitié constituent une étape essentielle dans la compréhension de la dynamique hydrique de cette retenue. Un bilan hydrique, en tant que concept fondamental de l'hydrologie, requiert la connaissance approfondie de ses deux principaux composants : les entrées (inputs) et les sorties (outputs). Dans le contexte d'un système formé par une retenue d'eau, les entrées se matérialisent par les apports qui affluent vers la retenue, tandis que les sorties englobent les diverses pertes et utilisations de cette ressource.

La relation entre les entrées et les sorties d'un système hydrologique est généralement déterminée par le mode de gestion appliqué. Ainsi, différentes méthodes de gestion de réservoirs ont été élaborées pour réguler ces flux. Pour notre part, nous nous attacherons à établir l'équation du bilan spécifique au Barrage de l'Amitié.

Les éléments du bilan hydrologique d'une retenue, tels que définis par l'ORSTOM en 1996, comprennent premièrement les apports, ou entrées, qui sont classifiés en trois catégories principales. Les apports provenant du bassin versant par l'intermédiaire de l'écoulement de l'oued (V_e) résultent des précipitations qui se déversent sur les versants du bassin et convergent vers la retenue via le réseau de drainage. Les apports souterrains (V_{ec}) proviennent éventuellement de nappes souterraines en interaction avec la retenue. Les apports issus des précipitations (V_p) directes tombant sur la surface de la retenue sont évalués en multipliant la hauteur d'eau journalière précipitée par la surface correspondante de la retenue pour la même journée. Cependant, il est à noter que, mis à part les apports directs des précipitations sur la retenue (V_p), les autres catégories d'apports ne sont pas mesurées, du fait de l'absence de stations de mesures hydrométriques fonctionnelles à l'entrée du barrage pendant cette période.

En ce qui concerne les sorties d'une retenue, elles peuvent être classées en plusieurs catégories distinctes. Les pertes dues à l'évaporation (V_{ev}) sont obtenues par calcul à partir de l'évaporation journalière et de la surface de la retenue pour le même jour. Les déversements d'eau (V_d) surviennent par le biais de l'évacuateur de crues pendant les périodes de crues exceptionnelles, et le volume déversé est évalué en fonction des caractéristiques de cet équipement. Les sorties par la vanne de vidange (V_{vi}) sont mises en œuvre pour contrer le phénomène d'envasement en permettant une vidange de fond, cependant, aucune vidange n'a été réalisée au niveau du Barrage de l'Amitié. Les pertes d'eau dues à l'infiltration (V_{inf}) sont influencées par la cote du réservoir selon la loi de Darcy, avec une observation marquante de l'importance de ce phénomène sur le Barrage de l'Amitié. Enfin, les sorties d'eau pour divers usages (V_u) sont déterminées en fonction des objectifs pour lesquels le barrage a été érigé, tels que l'irrigation, l'alimentation en eau potable, la recharge des nappes, la production d'énergie électrique, et autres. Toutefois, pour le Barrage de l'Amitié, les usages principaux n'ont pas encore été définis de manière exhaustive.

2.5.2. L'équation du bilan hydrologique du Barrage de l'Amitié

L'équation fondamentale du bilan hydrologique du Barrage de l'Amitié constitue un élément clé pour appréhender les flux hydriques qui interagissent au sein de cette retenue. Cette équation découle du principe fondamental de conservation des volumes d'eau sur un intervalle de temps donné (t) et se formule comme suit :

Apports - Sorties = Variation de stock (éq. 2).

En substituant les termes "apports" et "sorties" par les éléments spécifiques définis dans la description précédente, nous obtenons une représentation plus spécifique de cette équation, à savoir :

$$(Ve + Vecs + Vp) - (Vev + Vd + Vvi + Vinf + Vu) = \Delta V \quad (\text{éq.3}),$$

où ΔV représente la variation du volume de la retenue entre l'état initial et final pendant l'intervalle de temps t.

Dans le contexte du Barrage de l'Amitié, où les apports souterrains (Vecs), le déversement (Vd), la vidange (Vvi) et les usages (Vu) sont considérés comme nuls, l'équation (3) se simplifie davantage pour prendre la forme suivante :

$$(Ve + Vp) - (Vev + Vinf) = \Delta V \quad (\text{éq. 4}).$$

Cette équation réduite met en évidence l'importance des apports en provenance du bassin versant (Ve) ainsi que des précipitations directes sur la retenue (Vp), tout en prenant en compte les pertes dues à l'évaporation (Vev) et à l'infiltration (Vinf).

L'équation (4) permet également de dériver une expression pour l'écoulement naturel de l'oued à l'entrée de la retenue (Ve) :

$$Ve = \Delta V - Vp + (Vev + Vinf) \quad (\text{éq. 5}).$$

Cette formulation souligne la manière dont l'écoulement naturel est influencé par la variation du volume de la retenue, les précipitations directes et les pertes dues à l'évaporation et à l'infiltration. Cette équation constitue un outil analytique essentiel pour quantifier et comprendre les flux d'eau à l'intérieur de la retenue du Barrage de l'Amitié, contribuant ainsi à une évaluation précise des ressources hydriques et à une gestion efficace de cette infrastructure.

2.5.3. Le bilan hydrologique du Barrage de l'Amitié

Après avoir minutieusement identifié et caractérisé les différents éléments qui contribuent au bilan hydrologique du Barrage de l'Amitié, il s'avère maintenant important d'examiner de près la répartition de chacun de ces éléments au sein du bilan, spécifiquement pour l'événement étudié. Au 25 novembre 2019, le bilan journalier de la ressource en eau du Barrage de l'Amitié se définit comme dans l'équation (5) :

$$Ve = \Delta V - Vp + (Vev + Vinf)$$

Selon les données présentées dans le Tableau 53, les valeurs des différents paramètres ont été établies. La fluctuation du stock hydrique se chiffre à 9 250 400 m³. Cette quantité a été déduite en effectuant la différence entre le volume initial (mesuré avant tout apport significatif d'eau) et le volume final, représentant la mesure effectuée le dernier jour de contribution en eau, comme illustré à la Figure 84. De ce fait, le volume écoulé en amont du bassin versant du Barrage de l'Amitié, noté Ve, s'élève à 9 521 850 m³.

Tableau 53: Les valeurs des apports et des sorties du bilan hydrologique journalier du 25/11/2019

Les apports	Quantité (m³)	Pourcentage (%)	Les sorties	Quantité (m³)	Pourcentage (%)
Les pluies	60 000	0,6	L'évaporation	5500	1,7
Les crues	9 521 850	99,4	Les infiltrations	325 950	98,3
Totaux	9 581 850	100	Totaux	331450	100

Les apports au barrage sont principalement constitués des crues, représentant 99,4% du total, avec un volume de 9 521 850 m³. Une contribution marginale provient des pluies directement tombées sur la retenue, totalisant 60 000 m³, soit 0,6% du bilan. D'un autre côté, les sorties du barrage se subdivisent en évaporation et infiltrations. L'évaporation s'élève à 5 500 m³, équivalent à 1,7% des sorties. Les infiltrations, quant à elles, dominent les sorties avec une valeur de 325 950 m³, représentant 98,3% du total.

Cette analyse met en évidence l'importance majeure des crues comme principale contribution aux apports du Barrage de l'Amitié, illustrant la prépondérance des facteurs climatiques et hydrologiques dans le contexte étudié. Quant aux infiltrations, elles demeurent une composante significative des sorties, soulignant la nécessité de considérer l'interaction entre les différents éléments du bilan pour une gestion optimale de cette ressource en eau. L'analyse de ces données offre des perspectives pour la gestion et la conservation des ressources en eau du Barrage de l'Amitié, contribuant ainsi à la compréhension globale de son comportement hydrologique dans le contexte hydro climatique de la région.

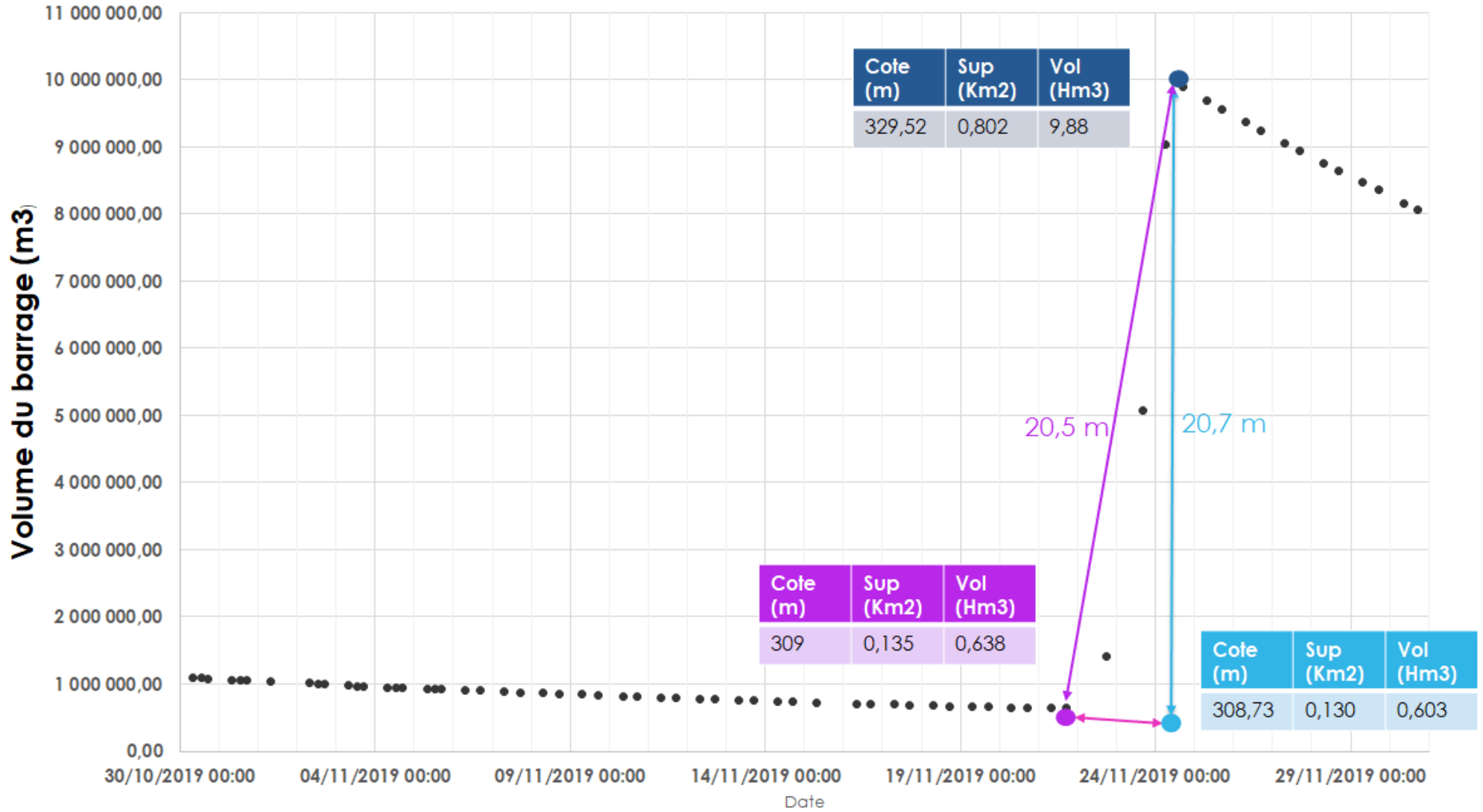


Figure 82: Courbe de remplissage du barrage de l'amitié lors de l'évènement de 2019

3. Proposition des scénarios d'utilisation des eaux du Barrage de l'Amitié

Dans le cadre de cette étude doctorale, l'élaboration de scénarios potentiels pour l'utilisation des eaux stockées au niveau du Barrage de l'Amitié s'avère d'une grande importance. Ce barrage, érigé à 25 km en amont de la ville de Djibouti, a été conçu à des fins de gestion des crues et le stockage d'une ressource en eau dédiée à l'irrigation des terres agricoles environnantes. Actuellement, les modalités d'exploitation de cette réserve hydrique demeurent en suspens, d'après les informations fournies par le Ministère de l'Agriculture.

Ce réservoir, qui couvre environ 65% du bassin versant, exerce un contrôle précieux sur les crues en aval du barrage, bien qu'il n'ait pas d'impact sur les crues des affluents. Lorsque des prévisions indiquent l'occurrence de crues majeures, il est impératif de libérer de l'eau par la digue du barrage afin de préserver la capacité de rétention du réservoir. Cependant, ce déversement peut engendrer des inondations en aval. Par conséquent, une gestion minutieuse du déversement, la surveillance attentive de la rivière en aval et une coordination précise sont nécessaires pour atténuer ces risques.

Par ailleurs, lorsqu'il s'agit d'utiliser l'eau stockée à des fins d'irrigation, la possibilité de réduire rapidement le niveau d'eau dans le réservoir pour minimiser les impacts des inondations peut se révéler complexe. Cela exige une harmonisation précise de l'exploitation du barrage pour les besoins d'irrigation tout en restant vigilant quant aux éventuelles situations d'inondation. Ainsi, l'anticipation et l'adaptation de ces circonstances deviennent primordiales dans la gestion opérationnelle du barrage.

Ces considérations soulignent la nécessité impérieuse d'établir rapidement des directives claires et concises pour l'exploitation du Barrage de l'Amitié. Par conséquent, cette partie de la thèse abordera diverses propositions d'utilisation des eaux stockées dans le barrage. L'objectif est d'éclairer la voie vers des stratégies de gestion optimales, tenant compte à la fois des impératifs d'irrigation et des préoccupations liées aux crues, tout en garantissant une gestion durable et équilibrée de cette précieuse ressource en eau.

3.1. Construction de réservoirs supplémentaires

L'introduction de réservoirs supplémentaires au sein de l'infrastructure du Barrage de l'Amitié constitue une étape importante dans la recherche d'une gestion optimisée des ressources hydriques. Avant de considérer toute proposition de scénarios d'utilisation des eaux stockées, il apparaît impératif de mettre en place des ouvrages hydrauliques, notamment des réservoirs, pour faciliter le stockage efficace des précieuses ressources en eau.

La nécessité de recourir à des réservoirs découle du fait que la majorité des méthodes de gestion des retenues dépendent de la capacité de stockage des eaux. Dans le contexte du Barrage de l'Amitié, où les taux d'infiltration sont extrêmement élevés, la construction de réservoirs se

révèle d'une importance capitale pour préserver au maximum la ressource en eau stockée dans le barrage pour des utilisations ultérieures à l'aval. Ces structures hydrauliques offrent la possibilité de conserver les précipitations et les apports hydriques, réduisant ainsi les pertes dues à l'infiltration excessive.

Actuellement, la mise en œuvre de cette stratégie a pris forme avec la construction de quatre réservoirs de 20 000 m³ chacun, situés à PK23. Ce regroupement de réservoirs représente une capacité totale de 80 000 m³, équivalant à deux fois la consommation quotidienne estimée de la ville de Djibouti, laquelle s'élève à 40 000 m³ par jour. Cette réalisation concrète démontre l'engagement envers une gestion proactive des ressources hydriques, visant à répondre aux besoins croissants en eau tout en minimisant les pertes dues aux taux élevés d'infiltration.

La construction de réservoirs supplémentaires présente une solution stratégique pour améliorer la capacité de stockage du barrage, contribuant ainsi à la régulation des flux hydriques et à la réduction des risques d'infiltration excessive. Toutefois, cette initiative doit être abordée avec une planification rigoureuse, en tenant compte des aspects techniques, environnementaux et financiers.

3.1.1. Evaluation des sites potentiels

L'évaluation des sites potentiels en vue de la construction de réservoirs additionnels au niveau du Barrage de l'Amitié représente une étape importante dans la planification d'une gestion hydrique durable. Cette démarche rigoureuse se décline en plusieurs étapes fondamentales, chacune contribuant à la sélection éclairée des emplacements les plus appropriés pour ces infrastructures hydrauliques essentielles.

La première étape consiste en une évaluation approfondie des sites potentiels, réalisée à travers une étude de faisabilité. Cette analyse préliminaire s'attache à identifier les sites potentiels pour accueillir les réservoirs envisagés. Elle prend en compte la quantification des ressources en eau qui pourraient être capturées, tout en intégrant des paramètres environnementaux et géologiques. Cette évaluation multidisciplinaire permet de déterminer les sites présentant les conditions optimales pour accueillir ces réservoirs complémentaires, en cohérence avec les objectifs de gestion établis.

Les coûts associés à cette phase sont variés et englobent les dépenses liées aux études de faisabilité, aux études techniques et environnementales, ainsi qu'aux coûts de construction proprement dits. Ces coûts initiaux sont susceptibles de varier en fonction de la taille, de la complexité et de l'emplacement choisi pour les nouveaux réservoirs. Ils constituent néanmoins un investissement essentiel pour une planification solide et bien informée.

Les avantages inhérents à la construction de réservoirs additionnels sont significatifs. En augmentant la capacité de stockage des eaux, ces réservoirs fournissent une réserve d'eau supplémentaire, permettant ainsi de répondre aux besoins en eau potable ou en irrigation agricole et de réduire les risques d'inondations en aval. Cette augmentation de la capacité de stockage peut également contribuer à atténuer les fluctuations saisonnières et climatiques, offrant une plus grande flexibilité dans la gestion des ressources hydriques.

Cependant, la construction de nouveaux réservoirs ne se fait pas sans inconvénients potentiels. Ces projets d'envergure requièrent des investissements substantiels et peuvent entraîner des impacts environnementaux, notamment la submersion de terres et la modification des

écosystèmes locaux. Pour minimiser ces impacts, une évaluation approfondie des conséquences environnementales et sociales est impérative, et des mesures d'atténuation adéquates doivent être envisagées.

3.1.2. Conception et construction des réservoirs

L'étape de conception et de construction des réservoirs supplémentaires au niveau du Barrage de l'Amitié constitue une avancée significative dans la mise en œuvre d'une gestion hydrique résiliente. Cette étape, souvent considérée comme le cœur du processus, englobe une série d'activités techniques et stratégiques visant à concrétiser les bénéfices anticipés de ces infrastructures.

Une fois les sites idoines sélectionnés à l'issue de l'évaluation préliminaire, la conception des réservoirs supplémentaires entre en jeu. Cette phase englobe des études détaillées qui évaluent minutieusement les aspects techniques essentiels. Des facteurs clés tels que la taille et la capacité de stockage des réservoirs, la méthode de confinement et l'étanchéité des sols sont rigoureusement examinés. Cette démarche de conception intègre également des éléments économiques, en estimant les coûts liés à la construction, à l'exploitation et à la maintenance des réservoirs. Ces évaluations financières prennent en compte les spécificités du site, les caractéristiques géologiques et hydrologiques, ainsi que les matériaux requis pour garantir la durabilité et la fonctionnalité des infrastructures. A titre indicatif, la construction d'un réservoir de 40 m³ dans la région d'Obock revient à environ 15 500 euros

Les coûts inhérents à cette étape sont intrinsèquement liés aux caractéristiques des réservoirs à construire. Ils englobent la gamme complète des dépenses, des coûts de construction aux coûts opérationnels et d'entretien. La variabilité des coûts dépend du nombre de réservoirs supplémentaires envisagés, de leur dimension, de leur conception et des matériaux utilisés. Cette phase nécessite des investissements substantiels, mais les avantages attendus justifient ces dépenses.

Les avantages de la conception et de la construction de réservoirs supplémentaires sont notables. Ces infrastructures permettent une gestion plus efficace et proactive des ressources en eau en augmentant la capacité de stockage. Elles offrent une flexibilité accrue pour répondre aux besoins en eau potable, en atténuant les effets des variations saisonnières des précipitations et en fournissant des réserves stratégiques pour faire face aux aléas climatiques.

Cependant, cette démarche n'est pas sans défis. La construction de réservoirs supplémentaires exige une planification pour assurer la sécurité, la durabilité et l'efficacité des infrastructures. Une évaluation approfondie des sites potentiels, des considérations environnementales et sociales, ainsi que des impacts locaux, est nécessaire pour une mise en œuvre réussie. Les coûts élevés associés à la construction et à la gestion de ces infrastructures doivent également être soigneusement pesés par rapport aux avantages attendus.

En somme, la conception et la construction de réservoirs supplémentaires au Barrage de l'Amitié représente une étape majeure vers l'optimisation de l'utilisation des ressources en eau du barrage, dans un contexte particulier puisque la totalité des réserves en eau du barrage est perdue par infiltration en moins de 2 mois. Il faut donc planifier l'utilisation de l'eau stockée en tenant compte de cette contrainte majeure. Cette démarche allie expertise technique,

considérations économiques et environnementales, et engagements sociaux pour garantir la pérennité et la résilience des systèmes hydriques de la région.

3.2. Lâchers réguliers d'eau stockée pour la régulation de crue

Dans le cadre de la gestion hydrologique du Barrage de l'Amitié, l'opération judicieuse de lâchers réguliers des eaux stockées se présente comme un élément central de l'optimisation de cette ressource hydrique. Les lâchers réguliers représentent une composante essentielle du cycle hydrologique contrôlé qui régit le fonctionnement de ce barrage. Cette stratégie opérationnelle vise à maintenir un équilibre délicat entre la rétention d'eau pour des usages spécifiques, tels que l'irrigation agricole, et la prévention des risques d'inondations en aval.

Les lâchers réguliers sont soigneusement planifiés et exécutés en fonction d'une série de paramètres hydroclimatiques et opérationnels. Ces paramètres incluent notamment les prévisions météorologiques, les niveaux d'eau actuels dans le barrage, les débits de l'oued en aval et les besoins en eau pour différents usages. La fréquence et le volume des lâchers sont ajustés en fonction de ces éléments pour atteindre un équilibre optimal entre la préservation de la capacité de stockage du réservoir et la prévention des inondations potentielles.

Un autre aspect essentiel des lâchers réguliers est leur contribution à la gestion des variations saisonnières des précipitations et des débits. Au fil des saisons, les conditions hydrologiques évoluent, avec des périodes de pluies abondantes suivies de périodes plus sèches. Les lâchers réguliers permettent d'atténuer les fluctuations extrêmes du niveau de l'eau dans le réservoir, contribuant ainsi à maintenir une stabilité hydrologique à long terme.

Il convient de souligner que les lâchers réguliers ne sont pas uniquement dictés par des considérations hydrologiques. Ils sont également étroitement liés aux objectifs sociaux, économiques et environnementaux du barrage. Par exemple, les lâchers peuvent être programmés pour soutenir l'irrigation des terres agricoles pendant les saisons de croissance des cultures, assurant ainsi une utilisation optimale des ressources en eau pour la production alimentaire. De même, la gestion des lâchers peut également avoir des implications pour la biodiversité et les écosystèmes en aval du barrage, nécessitant une approche holistique de la gestion. Une approche potentielle pour maximiser l'utilisation de ces lâchers serait également la construction d'un petit canal d'irrigation qui partirait du barrage et descendrait le long de la vallée. Cette infrastructure permettrait aux utilisateurs tout au long de la vallée de prélever de l'eau en fonction de leurs besoins, ce qui pourrait avoir des avantages significatifs sur plusieurs fronts.

La contrainte majeure de cette technique seule est que du fait de l'infiltration de l'eau dans le fond du barrage, l'eau peut n'être disponible que moins de 2 mois pour l'irrigation en aval à partir de lâchers depuis le réservoir principal, sans recharge additionnel provenant d'un événement pluvieux significatif entre temps. Cela réduit l'efficacité et la durabilité du dispositif, qui devrait être pensé pour être soutenu par des réservoirs de stockage intermédiaire en aval du barrage, pour couvrir les périodes sans eau dans la retenue.

3.2.1. Gestion des débits de sortie

La gestion des débits de sortie constitue un volet stratégique et préventif visant à atténuer les risques d'inondations associés au Barrage de l'Amitié. Ce scénario, fondé sur des données historiques des débits entrants dans le barrage, repose sur la mise en œuvre d'un système de régulation des débits de sortie. Cette approche permet de prendre en compte les prévisions météorologiques et les conditions hydrologiques actuelles, afin d'ajuster les débits de libération en fonction de manière à maintenir les niveaux d'eau dans le réservoir à des niveaux gérables.

L'essence même de ce scénario réside dans sa capacité à réduire significativement les risques d'inondations en aval. En adaptant les débits de sortie selon les variations saisonnières et les fluctuations des précipitations, il contribue à prévenir les débordements potentiellement dévastateurs. Les avantages de cette approche sont multiples et cruciaux, notamment la protection des zones habitées et des infrastructures sensibles en aval du barrage.

Cependant, il convient de noter que ce scénario n'est pas exempt de défis. Les compétences techniques requises pour une gestion précise et réactive des débits de sortie sont essentielles pour éviter les inondations tout en répondant aux besoins en eau. La mise en place d'un système de régulation des débits de sortie nécessite des investissements en termes d'équipements de mesure et de contrôle sophistiqués, ainsi que d'études hydrologiques et de modélisations précises pour garantir son efficacité.

Les coûts associés à ce scénario comprennent la conception, l'installation et la maintenance du système de régulation, ainsi que les dépenses liées aux activités de surveillance et d'ajustement des débits de sortie. Néanmoins, ces investissements sont en corrélation avec les avantages à long terme en matière de réduction des risques d'inondations et de préservation des ressources en eau.

Pour que cet objectif soit réalisable, il est nécessaire de disposer d'une meilleure couverture de pluviomètres à transmission automatique de données disposés sur le bassin amont du barrage, de manière à pouvoir alimenter en temps réel un modèle pluie/débit permettant d'anticiper sur la recharge potentielle du barrage, pour décider selon le risque, d'évacuer préventivement une partie de l'eau du barrage, pour lui conserver sa capacité maximale d'amortissement.

Pour cet objectif il est intéressant d'envisager les temps moyens de retour de pluies/crues significatives sur le bassin selon les mois et les saisons, pour fournir aux gestionnaires de la retenue des éléments objectifs de prise de décisions, entre autres pour anticiper au mieux les risques de surplus ou de pénurie d'eau dans la retenue.

3.2.2. Plan de gestion intégrée du bassin versant

Le concept de plan de gestion intégrée des bassins versants émerge comme une approche novatrice et holistique pour atténuer les risques d'inondations associés au Barrage de l'Amitié. Ce scénario repose sur l'élaboration et la mise en œuvre d'un plan stratégique visant à réduire la vulnérabilité du bassin versant environnant, avec pour objectif ultime la diminution des débits de crue et la prévention des débordements.

Au cœur de cette proposition réside la mise en place de mesures multifacettes, dont la conservation des sols, la création d'ouvrages de rétention à petite échelle et la promotion de pratiques agricoles durables. Ces actions ont pour ambition de minimiser le ruissellement des eaux pluviales, régulant ainsi les débits des cours d'eau alimentant le barrage. Cette approche,

axée sur les bassins versants, s'inscrit dans une perspective plus large de gestion environnementale et de préservation des ressources naturelles.

Bien que les avantages de ce scénario soient notables, il est important de considérer les coûts associés à sa mise en œuvre. Les investissements engagés couvrent une gamme d'activités, notamment la mise en place de mesures de conservation des sols, la construction d'infrastructures de rétention et l'éducation environnementale des communautés locales. Cependant, les retombées positives sont significatives : en réduisant le ruissellement des eaux pluviales, ce scénario contribue à la diminution des risques d'inondations en amont du barrage.

Toutefois, la réussite de ce plan de gestion intégrée du bassin versant repose sur une coordination étroite avec les communautés locales (et nomades de la région) et nécessite une sensibilisation et une participation actives. La mise en œuvre de ces mesures requiert des efforts à long terme pour maintenir leur efficacité et garantir la durabilité des résultats obtenus. Cette approche offre également des avantages tangibles pour la conservation des sols et la préservation de l'environnement, contribuant ainsi à une gestion responsable et durable de la ressource hydrique.

3.3. Diverses utilisations du volume d'eau stockée dans la retenue

3.3.1. Irrigation agricole

L'utilisation de l'eau stockée pour l'irrigation agricole au niveau du Barrage de l'Amitié revêt une importance capitale dans les contextes semi-arides et volcaniques caractérisés par une forte infiltration. Ce scénario offre une opportunité significative d'améliorer la productivité agricole dans la région en exploitant judicieusement les réserves d'eau disponibles.

La zone environnante du barrage présente un potentiel agricole notable, avec des cultures variées pouvant inclure des céréales, des fruits, des légumes et des cultures fourragères. L'irrigation agricole peut apporter des avantages substantiels en augmentant la production alimentaire locale et en contribuant à la sécurité alimentaire de la région. Les besoins en eau pour diverses cultures fruitières et légumières ont été étudiés et synthétisés dans le tableau 54. Les valeurs représentent les besoins en eau annuels pour une surface de 100 ha, et elles varient selon les conditions climatiques, le type de sol, et les pratiques agricoles spécifiques (Doorenbos et Pruitt., 1977; Allen et al., 1998; Tognetti et al., 1999). Il est à noter que ces valeurs doivent être adaptées en fonction des conditions locales et des méthodes d'irrigation employées pour maximiser l'efficacité de l'utilisation de l'eau.

Tableau 54: Besoins en eau annuels pour différentes cultures en m³ pour 100 hectares

Culture	Besoin en eau (m ³)	Références bibliographiques
Oignons	350 000 - 550 000	Doorenbos et Pruitt, 1977
Tomates	400 000 - 600 000	Doorenbos et Pruitt, 1977
Aubergines	500 000 - 800 000	Doorenbos et Pruitt, 1977
Poivrons	350 000 - 600 000	Sou et al., 2008
Carottes	400 000 - 600 000	Sou et al., 2008

Laitues	250 000 - 500 000	Sou et al., 2008
Dattes	1 000 000 - 1 200 000	Sabri et al., 2017
Figues	800 000 - 1 000 000	Fereres & Goldhamer., 2003
Grenades	800 000 - 1 000 000	Allen et al., 1998
Citrons	900 000 - 1 200 000	Allen et al., 1998
Oranges	900 000 - 1 200 000	Allen et al., 1998
Olives	800 000 - 1 200 000	Tognetti et al., 1999
Cultures céréalières	450 000 - 650 000	Sander et al., 2004
Cultures fourragères	300 000 - 500 000	Sander et al., 2004

L'évaluation des surfaces potentiellement irrigables a révélé qu'environ 1 600 hectares le long de la vallée du cours d'eau présentent un potentiel d'irrigation significatif ouvrant des perspectives pour une meilleure utilisation des ressources en eau de la région (les zones délimitées en rouge) (Figure 85). Ces terres, si elles sont irriguées, peuvent dynamiser l'agriculture locale, améliorer les rendements, diversifier les cultures et renforcer la sécurité alimentaire, tout en stimulant l'économie par la création d'emplois agricoles. Néanmoins, une mise en valeur efficace nécessite une planification rigoureuse, des études sur les besoins en eau, les méthodes d'irrigation appropriées et les impacts environnementaux. La gestion judicieuse de l'eau est primordiale pour assurer la durabilité. En somme, ces 1 600 hectares offrent une opportunité remarquable pour la région, à condition d'une gestion responsable des ressources en eau.



Figure 83: Localisation des surfaces potentiellement irrigables (Source : Google Earth)

Pour avoir une idée des volumes à mobilisés pour les différents types de culture sur une surface totale de 1 600 hectares nécessiterait des volumes d'eau allant de 4 000 000 m³ pour les cultures comme la laitue à jusqu'à 19 200 000 m³ pour des cultures telles que les dattes, citrons, oranges et olives. Cependant, en fonction des cultures choisies et de leur répartition, il pourrait y avoir des déficits d'eau, en particulier si des cultures à forte demande en eau sont privilégiées. Il sera donc essentiel de planifier judicieusement la sélection des cultures et les rotations, en tenant compte de la capacité du barrage, afin d'assurer une utilisation équilibrée et durable de la ressource en eau.

Cependant, il est important de noter que cette approche peut également entraîner des inconvénients potentiels, tels que l'augmentation de la salinisation des sols due à une utilisation excessive de l'eau et une possible détérioration de la qualité de l'eau dans le barrage.

Dans le contexte spécifique de la zone d'étude, il est important de souligner que la surface d'exploitation agricole est limitée, principalement composée de jardins en aval du bassin versant (environ 30 hectares). Par conséquent, la planification et la gestion prudentes de l'irrigation sont d'autant plus essentielles pour maximiser les avantages tout en minimisant les impacts négatifs.

Le processus d'utilisation de l'eau stockée pour l'irrigation agricole implique plusieurs étapes clés. Tout d'abord, une évaluation approfondie des besoins en eau des cultures à irriguer est entreprise. Cette évaluation préliminaire est suivie de la mesure précise de la quantité d'eau stockée dans le barrage, fournissant ainsi les données nécessaires pour la planification efficace de l'irrigation.

Une fois les besoins en eau évalués et la quantité disponible mesurée, la planification de l'irrigation peut être entreprise. Cette phase inclut la détermination de la fréquence et de la quantité d'eau à appliquer aux cultures, en tenant compte des caractéristiques des sols et des conditions climatiques locales.

L'installation d'un système d'irrigation adapté aux spécificités de la région est une étape importante. Différentes méthodes d'irrigation, telles que l'irrigation goutte à goutte ou par aspersion, peuvent être envisagées en fonction des besoins des cultures et de la disponibilité en eau. Enfin, le suivi et l'entretien réguliers du système d'irrigation sont essentiels pour garantir une utilisation efficace de l'eau et des performances optimales des cultures. La surveillance de la quantité d'eau utilisée, l'évaluation de l'état des cultures et l'ajustement en fonction des conditions changeantes sont des éléments clés de cette étape.

3.3.2. Elevage et abreuvement du bétail

L'utilisation de l'eau stockée pour l'élevage et l'abreuvement du bétail au niveau du Barrage de l'Amitié est une composante majeure de la gestion de l'eau dans les environnements semi-arides de la République de Djibouti. Dans cette région, l'élevage est non seulement une tradition ancestrale mais aussi une activité économique qui occupe une place prépondérante dans les activités de la population rurale.

L'approvisionnement en eau du barrage permet une augmentation substantielle de la production de viande et de lait, contribuant ainsi à la sécurité alimentaire et au bien-être économique des communautés locales. Cependant, ce processus n'est pas sans défis. Les inconvénients

potentiels incluent une contamination de l'eau par les déchets animaux et une pression accrue sur les ressources en eau déjà limitées dans la région.

Le processus d'utilisation de l'eau pour l'élevage et l'abreuvement du bétail dans cette région comprend plusieurs étapes clés :

Évaluation des besoins en eau : Cela implique une analyse minutieuse des besoins en eau pour différents types et tailles de bétail, en tenant compte des conditions climatiques et des besoins spécifiques en eau de chaque espèce.

Mesure de la quantité d'eau disponible dans le barrage : Une surveillance constante du niveau d'eau dans le barrage est nécessaire pour assurer une allocation appropriée de l'eau pour l'élevage, tout en maintenant l'équilibre écologique et les autres usages de l'eau.

Planification de l'abreuvement du bétail : Ceci nécessite une planification détaillée en fonction de la disponibilité de l'eau, des besoins du bétail, et des exigences agricoles, en veillant à une utilisation efficace de l'eau.

Installation du système d'abreuvement : la conception et l'installation d'un système d'abreuvement efficace et durable nécessitent une expertise technique, en tenant compte des besoins spécifiques du bétail et des contraintes environnementales.

Suivi et entretien : Un suivi régulier et un entretien adéquat du système d'abreuvement sont essentiels pour assurer un fonctionnement continu et pour prévenir ou minimiser la contamination potentielle de l'eau.

Les différentes espèces de bétail présentées ci-dessous (Tableau 55) représentent les divers types d'élevage qui existent en République de Djibouti. Chacun a des besoins spécifiques en eau, qui peuvent varier en fonction de divers facteurs tels que la température ambiante, l'activité physique, les saisons, et l'alimentation. La compréhension de ces besoins est cruciale pour la gestion de l'eau dans les zones semi-arides.

Tableau 55: Besoins en eau journaliers des différentes espèces de bétail de la République de Djibouti

Espèce	Besoins en eau journaliers	Facteurs influençant les besoins en eau
Ovins	Environ 4 à 6 litres d'eau par jour	Température, activité physique, saisons (National Research Council, 2007)
Caprins	Environ 4 à 6 litres d'eau par jour	Température, activité physique, saisons (Silanikove, 2000)
Bovins	Environ 30 à 50 litres d'eau par jour	Température, activité physique (comme la lactation), saisons (Beede & Collier, 1986)
Camélins	Environ 30 à 60 litres d'eau par jour	Température, activité physique (comme la marche, la course, ou le travail) (Wilson, 1989)

Volailles	Environ 200 à 250 ml par poule	Température, alimentation, production d'œufs (Leeson & Summers, 2005)
Asins	Environ 10 à 15 litres d'eau par jour	Température, activité physique (comme la marche, la traction, ou le travail), alimentation (Pearson, 1996)

Quelques chiffres nationaux...

Dans le contexte hydroclimatique de la République de Djibouti, l'utilisation de l'eau stockée pour l'élevage et l'abreuvement du bétail au niveau du Barrage de l'Amitié présente une dimension essentielle à la compréhension de la dynamique de l'eau dans la région. L'élevage, principalement extensif, occupe près de deux millions d'hectares dans le pays et s'étend au-delà des frontières, notamment en Somalie et en Éthiopie. Le cheptel Djiboutien est composé majoritairement de petits ruminants et est estimé à plus d'un million de têtes selon le recensement de 1978. Un autre recensement effectué en 2004, à titre indicatif en raison de la récurrence de la sécheresse, à montrer une diminution du cheptel, environ 774 000 têtes de bétail (tableau 56)). L'importance de ce cheptel nécessite une gestion minutieuse de l'eau, notamment en période de sécheresse, où les besoins en eau pour l'abreuvement du bétail deviennent critiques. La stratégie d'utilisation de l'eau au Barrage de l'Amitié pour l'élevage reflète donc une complexité intrinsèque, mêlant à la fois les enjeux économiques, écologiques, et climatiques de la région, et souligne l'importance d'une gestion intégrée et durable des ressources en eau dans ce contexte semi-aride.

Tableau 56: Répartition des différents bétails disponibles dans la République de Djibouti en 2004

Secteur	Ovins	Caprins	Bovins	Camelins	Volailles	Asins	Total
Obock	15284	75144	3799	9743	279	1933	106182
Tadjourah	20053	231027	21085	27429	381	1700	301675
Dikhil	46624	143251	13304	18579	446	1649	223853
Ali-Sabieh	15715	70537	156	10374	275	1651	98708
Arta	3205	18405	600	1317	1789	538	25854
Djibouti-ville	2121	6603	3037	3108	3207	18	18094
Total	103002	544967	41981	70550	6377	7489	774366

L'évaluation des besoins en eau des différentes espèces dans la zone d'influence du barrage a révélé des données pour la gestion des ressources en eau dans la région (Tableau 57). En considérant un rayon de 50 kilomètres autour du barrage, comprenant les districts de Djibouti, Arta, Ali-Sabieh et Dikhil, nous avons calculé un besoin en eau annuel total de 1,4 million de mètres cubes. Il est essentiel de noter que ce besoin en eau annuel représente une fraction relativement faible de la capacité de stockage maximale du barrage. En effet, il équivaut à moins de 10 % de la capacité totale du réservoir. Cette marge de capacité substantielle laisse une marge de manœuvre considérable pour répondre aux besoins en eau futurs et permet également de faire face aux variations interannuelles de précipitations.

Tableau 57: Synthèse des besoins en eau des différents bétails dans la zone sud (Alawan Issa, 2012)

	Ovins	Caprins	Bovins	Camelins	Volailles	Asins	Total
Zone Sud	67665	238796	17097	33378	5717	3856	366509
Besoin en eau par an (litre)	1,23E+08	4,36E+08	2,5E+08	5,48E+08	469508,63	1,8E+07	1,4E+09

3.3.3. Approvisionnement en eau potable

L'histoire de l'alimentation en eau potable de la ville de Djibouti révèle une évolution remarquable au fil des décennies, témoignant de l'adaptation croissante des infrastructures face à une demande en constante augmentation. En 1900, la quantité d'eau fournie était relativement modeste, s'élevant à 36 000 m³ (soit 9.8 litre/jour par personnes). Au cours des dix années suivantes, elle a presque triplé, atteignant 100 000 m³ en 1910. La progression a continué de façon notable, dépassant le million de mètres cubes en 1950 avec 1 053 000 m³ (Figure 16). La décennie 1970 a été marquée par une augmentation spectaculaire, avec une consommation atteignant 4 526 000 m³ en 1970 et culminant à 6 899 000 m³ en 1975. Les années 1980 ont continué sur cette lancée, avec 9 015 500 m³ en 1980, 10 336 000 m³ en 1985, et 11 534 000 m³ en 1990. Enfin, en 2020, la ville de Djibouti a enregistré une consommation de 14 620 000 m³, reflétant l'importance accrue de la gestion de l'eau dans un contexte urbain en expansion et des défis croissants en matière d'approvisionnement en eau potable.

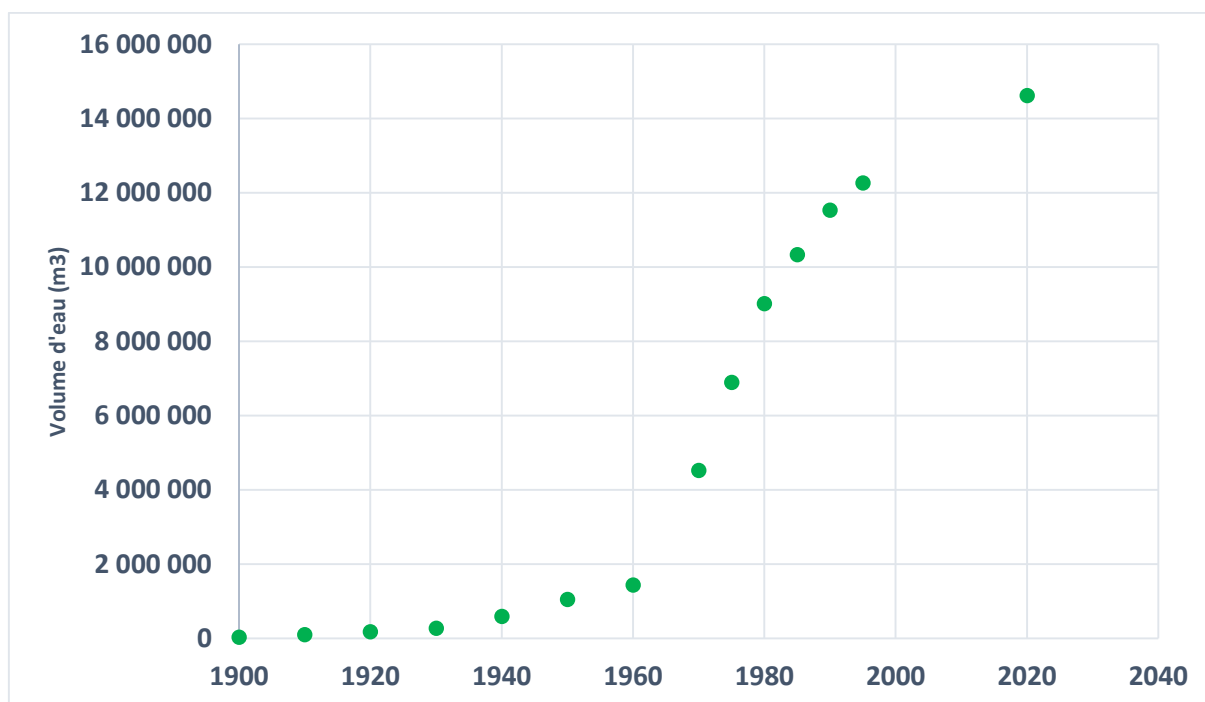


Figure 84: Historique de l'alimentation en eau potable de la ville de Djibouti

L'utilisation de l'eau stockée au niveau du Barrage de l'Amitié pour l'approvisionnement en eau potable à Djibouti-ville représente une solution stratégique dans le contexte semi-aride de la région. Le premier scénario envisagé implique le pompage de l'eau directement du barrage vers une station de traitement située à environ 30 km de distance. Une fois traitée conformément aux normes de qualité requises, l'eau est acheminée pour être utilisée comme eau potable.

Sur le plan économique, à Djibouti-ville, le coût unitaire moyen de l'eau potable s'élève à 100 FDJ (soit approximativement 0,50 euros) par mètre cube. Ce montant englobe non seulement les dépenses initiales consacrées à l'établissement des infrastructures de pompage et de traitement, mais également les frais d'exploitation et de maintenance récurrents, qui peuvent fluctuer en fonction de la capacité du système et de ses caractéristiques techniques. Par ailleurs, il convient de souligner qu'une perte quotidienne approximative de 350 000 m³ est observée lorsque le barrage approche de sa capacité maximale. Cette déperdition représente un manque à gagner de l'ordre de 20 millions de FDJ (environ 100 000 euros), chaque jour. Si on considère le fait que le traitement et l'acheminement jusqu'à la station de traitement des eaux de Djibouti induisent un coût de 10 millions de FDJ (soit 50 000 euros), on voit très vite l'énorme profit que représente cette source d'eau douce pour la ville de Djibouti.

L'avantage principal de ce scénario est l'utilisation d'une ressource en eau déjà disponible, réduisant ainsi la dépendance à l'égard d'autres sources et contribuant potentiellement à la sécurité et à la résilience de l'approvisionnement en eau potable. Toutefois, cette approche présente des inconvénients, notamment les pertes d'eau dues à l'infiltration, qui peuvent diminuer l'efficacité globale de l'approvisionnement. Pour remédier à ce problème, des mesures supplémentaires, telles que l'amélioration des structures de confinement ou l'utilisation de techniques d'étanchéité des sols, doivent être mises en œuvre pour minimiser ces pertes et assurer la durabilité du système. Ce scénario requiert donc une analyse et une gestion soignées

pour équilibrer les avantages et les défis, dans l'optique d'une utilisation responsable et efficace de l'eau dans un environnement où la ressource est précieuse.

Le deuxième scénario relatif à l'utilisation de l'eau stockée au niveau du Barrage de l'Amitié à Djibouti met en avant un modèle de complémentarité avec l'eau potable provenant d'autres sources. Il s'agit ici d'intégrer l'eau du barrage comme une source supplémentaire, en conjonction avec d'autres ressources telles que l'eau du projet d'adduction Djibouto-Éthiopien.

Les coûts associés à ce scénario sont principalement liés à la mise en place et à l'exploitation des infrastructures de stockage et de distribution nécessaires pour harmoniser l'eau du barrage avec les autres sources d'approvisionnement. Ces coûts seraient consacrés à la construction de réservoirs et à la mise en place de canaux ou de pipelines pour distribuer l'eau en fonction des besoins.

L'un des avantages significatifs de ce scénario est qu'il permet une gestion intégrée et flexible des ressources en eau. En combinant différentes sources, il est possible de moduler l'approvisionnement en fonction de la demande, réduisant ainsi les risques de pénurie pendant les périodes de sécheresse ou les fluctuations de la demande. Cette approche contribue également à la sécurité de l'approvisionnement en eau, en diversifiant les sources disponibles.

Toutefois, ce scénario présente des défis, notamment la nécessité d'une planification et d'une coordination efficaces entre les différentes sources d'eau. L'optimisation de l'utilisation des ressources et la minimisation des pertes exigent une gestion soignée et potentiellement des infrastructures de stockage et de distribution supplémentaires. Cela pourrait entraîner des coûts supplémentaires et nécessiter une expertise technique considérable.

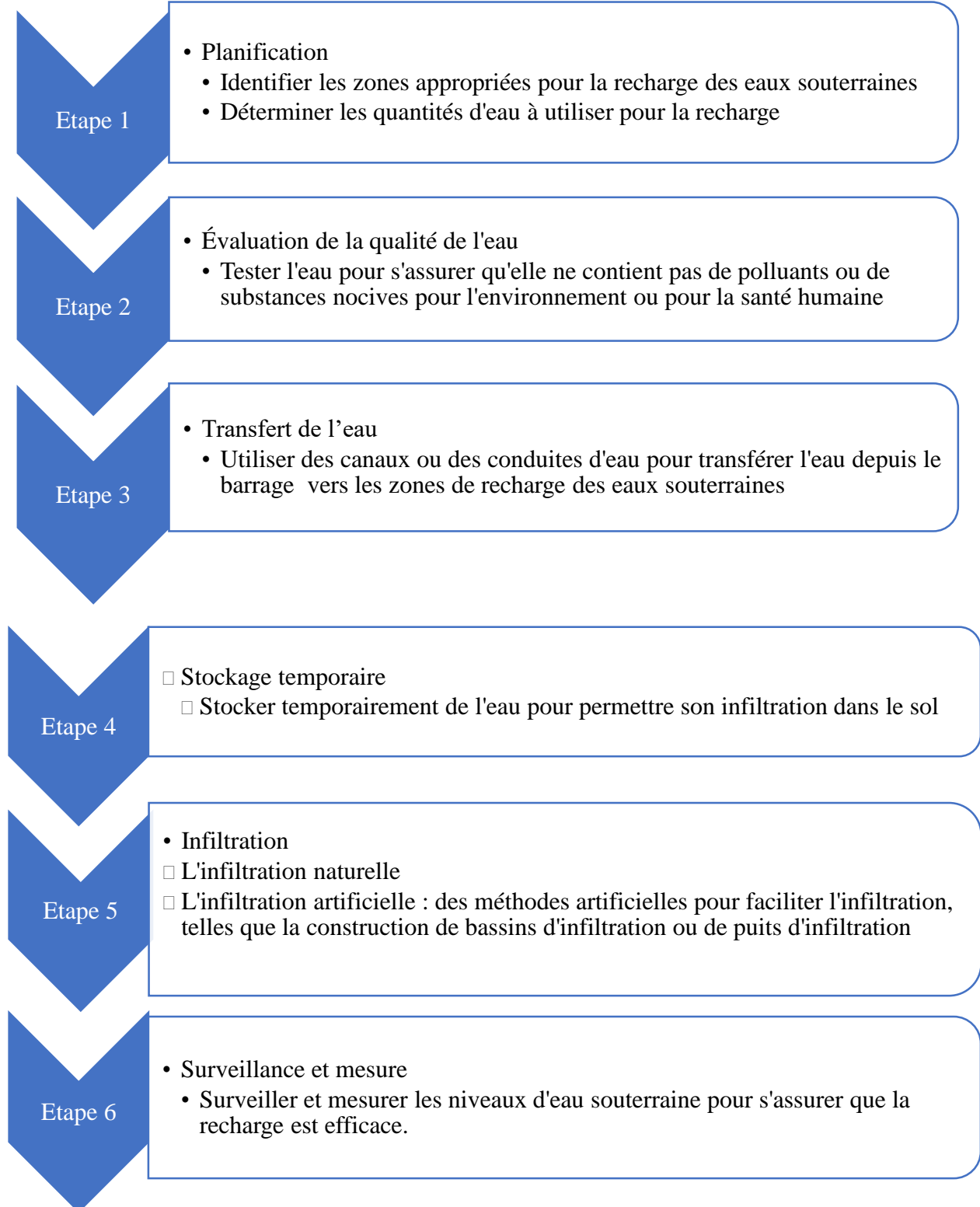
3.3.4. Recharge des eaux souterraines

L'utilisation de l'eau stockée dans le Barrage de l'Amitié pour la recharge des nappes phréatiques, notamment la nappe de Djibouti, constitue une dimension stratégique pour la gestion durable de l'eau dans la région. Cette méthode, qui exige une analyse hydrogéologique et géophysique approfondie, présente plusieurs avantages et caractéristiques notables :

- Premièrement, la recharge des nappes phréatiques à partir de l'eau stockée dans le barrage permet de reconstituer les réserves d'eau souterraine, assurant ainsi un approvisionnement en eau plus durable pour la ville de Djibouti. Cela contribue à une gestion plus équilibrée et résiliente des ressources en eau, en particulier pendant les périodes de sécheresse ou lorsque d'autres sources d'eau sont insuffisantes.
- Deuxièmement, le processus de recharge des eaux souterraines peut contribuer à améliorer la qualité de l'eau. Le filtrage naturel de l'eau à travers le sol peut éliminer les contaminants et améliorer la qualité de l'eau, un élément essentiel pour l'approvisionnement en eau potable.

Cependant, la mise en œuvre de cette stratégie nécessite une étude hydrogéologique et géophysique approfondie de la zone d'étude. Comprendre le processus d'écoulement des eaux souterraines est important pour déterminer les zones de recharge préférentielle et garantir l'efficacité du processus de recharge. Cette analyse devra intégrer une variété de facteurs, y compris la géologie locale, la porosité du sol, la dynamique des eaux souterraines, et les besoins en eau de la région.

Les différentes étapes pour la mise en place de la technique de recharge des eaux souterraines à partir du Barrage de l'Amitié.



3.4. Conclusion partielle

La gestion efficace de l'eau est essentielle pour répondre aux besoins de la ville de Djibouti, notamment en raison de sa dépendance vis-à-vis des ressources en eau douce pour soutenir son développement socio-économique. Les besoins en eau de la ville s'élèvent à près de 14,62 millions de mètres cubes par an, similaire à la capacité maximale du barrage. Cependant, une inquiétude majeure réside dans la perte quotidienne d'environ 350 000 m³ d'eau, lorsque le barrage est près de sa capacité maximale. Cette perte représente un coût financier conséquent, évalué à environ 20 millions de FDJ (soit 100 000 euros) par jour. Tenant compte des coûts induits par le traitement et l'acheminement de l'eau jusqu'à la station de traitement de Djibouti, qui s'élèvent à 10 millions de FDJ (50 000 euros), l'importance économique de cette ressource en eau douce pour la ville devient manifeste.

De plus, le potentiel agricole dans la zone aval du barrage est considérable, avec une surface exploitable de 1600 hectares. Les volumes d'eau nécessaires pour irriguer cette surface varient considérablement selon les types de cultures envisagés, allant de 4 millions de m³ pour des cultures comme la laitue à près de 19,2 millions de m³ pour des cultures fruitières telles que les dattes et les agrumes.

En évaluant les besoins en eau des différentes espèces animales dans la zone d'influence du barrage, des données précieuses ont été obtenues pour la planification de la gestion des ressources en eau. À l'intérieur d'un rayon de 50 kilomètres autour du barrage, englobant plusieurs districts clés, le besoin total en eau est estimé à 1,4 million de mètres cubes par an. Il convient de souligner que ce volume ne représente qu'une fraction de la capacité totale du barrage.

Toutefois, il est crucial de noter que l'eau stockée dans le barrage a une durée d'exploitation limitée. Si elle n'est pas exploitée rapidement, cette ressource est perdue, s'infiltrant dans le sol en environ deux mois lorsque le barrage est à pleine capacité. Dans un contexte où d'énormes investissements ont été réalisés pour la construction du barrage, une telle perte est difficilement justifiable.

La compréhension approfondie de ces grandeurs a permis de mieux cerner la ressource en fonction de ses potentiels usages. Pour l'avenir, il est impératif de poursuivre une surveillance hydrologique régulière, de suivre de près les niveaux d'eau du barrage et de prendre en compte des considérations techniques et environnementales pour assurer une gestion durable de cette ressource essentielle.

Conclusion générale et perspectives

1. Rappel des objectifs

La présente thèse a été entreprise avec des visées clairement définies, centrées sur la compréhension approfondie et la gestion des ressources en eau dans la région d'Ambouli.

Premièrement, elle a cherché à caractériser le fonctionnement hydrodynamique du bassin versant d'Ambouli. Cette démarche a exigé une analyse minutieuse des interactions entre la climatologie et la géologie de la zone, deux éléments clés dans une région marquée par son climat aride et son substrat volcanique. L'objectif était de déceler les mécanismes sous-jacents qui régissent le cycle de l'eau dans ce contexte particulier, et d'en tirer des enseignements pour une gestion optimale des ressources hydriques.

Deuxièmement, la thèse s'est intéressée à l'évaluation de l'impact du "Barrage de l'Amitié", inauguré en 2020. Ce barrage, construit dans le cadre d'une stratégie de prévention contre les inondations, initiée par la République de Djibouti, représente un tournant majeur dans les efforts déployés pour contrecarrer les défis hydrologiques de la République de Djibouti. L'analyse de ses effets sur le bassin versant et sur la dynamique des inondations a été essentielle pour mesurer la pertinence et l'efficacité de cette infrastructure majeure dans la stratégie globale de gestion des ressources en eau.

Ces objectifs, en s'articulant autour de la caractérisation hydrodynamique et de l'évaluation des impacts infrastructurels, ont guidé nos recherches et nos analyses, permettant d'apporter des réponses aux enjeux hydrologiques de la zone d'étude.

Synthèse des résultats obtenus

L'étude hydroclimatique menée sur le bassin versant d'Ambouli a mis en évidence une grande variabilité spatiale et temporelle des données disponibles, traduisant une complexité inhérente à ce type de milieu, notamment en zone aride. La faiblesse des données hydroclimatiques disponibles nous a conduits à explorer des données alternatives, telles que les produits d'estimation de pluie. Bien que ces produits aient montré une certaine fiabilité à des échelles annuelles et mensuelles, leur efficacité diminue sensiblement à l'échelle journalière, échelle cruciale pour des prévisions des crues.

Les analyses tendent vers une diminution de la pluviométrie ces dernières années, confirmant ainsi le caractère de plus en plus aride de la région. Bien que la majorité des précipitations soit de faible intensité, il est crucial de noter qu'aucune tendance ou rupture significative n'a été détectée à des échelles temporelles diverses.

Dans le contexte du bassin d'Ambouli, une approche holistique est primordiale pour appréhender le cycle de l'eau, allant des eaux de surface aux eaux souterraines. Les premières estimations du bilan hydrique montrent une importance prédominante de l'évaporation par rapport aux précipitations reçues.

Le Barrage de l'Amitié, bien que stratégique dans la lutte contre les crues de l'Oued Ambouli, présente des limites. En effet, certaines zones du bassin versant, comme l'Oued Boulleh, ne bénéficient pas de la régulation du barrage. Nos analyses suggèrent que, malgré la présence de ce barrage, des crues majeures pourraient toujours menacer la ville de Djibouti.

La modélisation hydrologique, au cœur de ce travail de recherche, s'est appuyée sur l'utilisation des modèles HEC-HMS et GR4H. Ces modèles, malgré les limites des données disponibles, ont fourni des éléments essentiels à la compréhension des dynamiques hydrologiques du bassin. Toutefois, pour affiner ces modèles et renforcer leur pertinence, l'installation de nouvelles stations de surveillance hydrologique s'avère indispensable. Ces stations permettraient d'enrichir la base de données, d'affiner la calibration des modèles et d'offrir une vision plus complète des processus hydrologiques à l'œuvre.

Pour conclure, bien que des avancées notables aient été réalisées dans cette thèse, la complexité des interactions entre le climat, la géologie et l'hydrodynamique du bassin d'Ambouli nécessite des efforts continus et concertés. La mise en place de stratégies d'observation et de modélisation adaptées est primordiale pour une gestion optimale des ressources en eau de la région.

Limitations de l'Étude

Dans le cadre de cette thèse, plusieurs limitations ont été rencontrées, impactant la portée et la précision de nos résultats. Une des contraintes majeures a résidé dans la qualité et la disponibilité des données hydroclimatiques. Ces données se sont avérées lacunaires, avec des périodes de mesure inégales et des discontinuités temporelles, rendant difficile une analyse continue et homogène.

De plus, les sources d'information se sont révélées complexes à exploiter. La multiplicité des sources, associée à la variabilité de leurs méthodologies de collecte, a introduit une certaine incertitude dans l'interprétation des données. Cette hétérogénéité a nécessité une rigueur accrue dans la sélection des données à intégrer à l'étude, ainsi que dans leur traitement.

Par ailleurs, au cours de la réalisation de cette thèse, l'orientation initialement prévue a dû être réajustée. Cette évolution des objectifs, bien que nécessaire au vu des contraintes rencontrées, a impliqué une révision des méthodologies employées et une reconsidération de certaines hypothèses de travail.

Ces limitations soulignent l'importance d'une démarche adaptative en recherche, mais aussi la nécessité d'approfondir certains points à l'avenir tels que la modélisation hydrologique, lorsque de nouvelles données seront disponibles.

Perspectives : Vers une Gestion Optimale du Bassin Versant d'Ambouli

Face aux défis hydrologiques que pose le bassin versant d'Ambouli, notamment en raison de son faible niveau de suivi, des actions prospectives s'imposent pour assurer une meilleure gestion de ses ressources en eau.

Premièrement, le suivi du bassin doit être renforcé. Pour ce faire, l'installation d'équipements limnimétriques est primordiale. Ces outils permettront de mesurer avec précision les débits au

sein du bassin, notamment en aval. Dans cette même optique, des mesures ponctuelles de jaugeage devront être effectuées régulièrement pour affiner la compréhension des dynamiques hydrauliques locales.

Deuxièmement, une surveillance météorologique accrue est nécessaire. La mise en place de stations météorologiques sur l'ensemble du bassin versant est essentielle. Une attention particulière devra être portée à la zone amont du bassin, spécifiquement dans la région du Petit Bara. Cette surveillance météorologique permettra non seulement de recueillir des données climatiques essentielles à la compréhension des processus hydrologiques, mais aussi de prévoir et anticiper les épisodes pluvieux intenses, souvent générateurs de crues.

Enfin, ces mesures techniques doivent s'inscrire dans une vision plus globale. Il est impératif d'établir une stratégie de gestion durable de l'eau pour le bassin d'Ambouli. Cette stratégie devra prendre en compte tant les besoins actuels que futurs des populations et des écosystèmes, tout en préservant la ressource en eau. Elle devra également s'adapter aux défis posés par les changements climatiques et les évolutions socio-économiques de la région.

En somme, si des avancées notables ont été réalisées dans la compréhension du bassin d'Ambouli, les perspectives évoquées ici tracent la voie d'une gestion plus éclairée et durable de cette ressource essentielle qu'est l'eau.

Références bibliographiques

- Abdoulkader, H-A.. Caractérisation hydrogéochimique et qualité des eaux souterraines du système aquifère volcano-sédimentaires côtier sous climat aride de Djibouti (Afrique de l'Est). 2014Thèse doctorat. Université de Lille 1.200p
- Adam, A. Hydrochimie et hydrologie isotopique de la partie septentrionale de la République de Djibouti. 1984. PhD thesis. University Paris-Sud, Orsay, France.
- Adam, A. Hydrochimie et hydrologie isotopique de la partie septentrionale de la République de Djibouti. 1984. PhD thesis. University Paris-Sud, Orsay, France.
- Ageet, S., Fink, A. H., Maranan, M., Diem, J. E., Hartter, J., Ssali, A. L., & Ayabagabo, P. Validation of satellite rainfall estimates over equatorial east Africa. *Journal of Hydrometeorology*, 2022, 23(2), pp. 129–151. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-21-0145.1>
- Akinsanola, A.A., Ogunjobi, K.O., Ajayi, V.O., Adefisan, E.A., Omotosho, J.A., Sanogo, S. Comparison of five gridded precipitation products at climatological scales over West Africa. *Meteorol. Atmos Phys*, 2016, <https://doi.org/10.1007/s00703-016-0493-6>.
- Alawan Issa, A. Etat des modes de vie des eleveurs face aux changements climatiques à Djibouti. 2012. These de doctorat, Universite Cheikh Anta Diop, Dakar, Senegal
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 301p. Irrigation and Drainage Paper, 56
- Arthaud F., Choukroune P., Robineau B. Tectonique, microtectonique et évolution structurale du golfe de Tadjourah et du Sud de la Dépression Afar (République de Djibouti). 1980. *Bulletin de la Société Géologique de France*, XXII, n° 6, p. 901-908.
- Archambault. Etude hydrogéologique de l'alimentation en eau de Djibouti. 1956. Mission de 9 au 26 février 1956 BCEOM, Paris, 41p
- Ashouri, H., Hsu, K.L., Sorooshian, S., Braithwaite, D.K., Knapp, K.R., Cecil, L.D., Nelson, B.R., Prat, O.P. PERSIANN-CDR: daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 96 (1), 2015, pp. 69–83. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00068.1>.
- Assowe Dabar O, Camberlin P, Pohl B, Mohamed Waberi M, Osman Awaleh M, Silah-Eddine S. Spatial and temporal variability of rainfall over the Republic of Djibouti from 1946 to 2017. *Int J Climatol*, 2021,41, pp. 2729–2748. <https://doi.org/10.1002/joc.6986>
- Atalay Ayele , Eric Jacques, Mohammed Kassim , Tesfaye Kidane , Ahmed Omar , Stephen Tait , Alexandre Necessian , Jean-Bernard de Chabalière, Geoffrey King. The volcano–seismic crisis in Afar, Ethiopia, starting September 2005. 2007. *Earth planet. Sci. Lett.*, 255(1–2), 177–187. [10.1016/j.epsl.2006.12.014](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.12.014)
- Audin J., Vellutini P.J., Coulon C., Piguet P., Vincent J. The 1928-1929 eruption of Kammourta volcano – Evidence of tectono-magmatic activity in the Manda-Inakir rift and comparison with the Asal rift, Afar depression, Republic of Djibouti. 1990. *Bull. Volcanol.*, 52p.

Ayehu G.T., Tadesse T, Gessesse B, Dinku T. Validation of new satellite rainfall products over the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Atmos. Meas. Tech.*, 2018, 11, pp. 1921–1936, <https://doi.org/1.5194/amt-11-1921-2018>.

Barberi F., Varet J. Small scale plate tectonics implication: volcanism of Afar. 1977. *Geol. Soc. of Am. Bull.*, 88, 1251-1266.

Beau, A., Bourhis, E. and Berges, R. Aperçu de climatologie dynamique du Territoire Français des Afars et des Issas. *La Météorologie*, 1976, 6, 63–68.

Beck, H.E., Pan, M., Roy, T., Weedon, G.P., Pappenberger, F., Dijk, A.I.J.M., Van, Huffman, G.J., Adler, R.F., Wood, E.F. Daily evaluation of 26 precipitation datasets using Stage-IV gauge-radar data for the CONUS. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, pp. 207–224. <https://doi.org/10.5194/hess-23-207-2019>

Becker, A., Finger, P., Rudolf, B., Schamm, K., Schneider, U., Ziese, M., Precipitation, G., Centre, C. and Wetterdienst, D. A description of the global land-surface precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901–present. *Earth Syst. Sci. Data*, 2013, 5, pp. 71–99. <https://doi.org/10.5194/essd-5-71-2013>

Beede, D.K. Collier, R.J. Potential Nutritional Strategies for Intensively Managed Cattle during Thermal Stress,. Fevrier 1986. *Journal of Animal Science*, Volume 62, Issue 2, Pages 543–554, <https://doi.org/10.2527/jas1986.622543x>

Bouh H. Etude de l'aquifère basaltique de Djibouti et des aquifères adjacents: Approche hydrochimique et isotopique. 2006. Thèse de Doctorat, 205p. Université de Paris XI, spécialité Science de la Terre.

Brunke H.-P. Modélisation par simulation numérique de l'écoulement des eaux souterraines dans la nappe de Djibouti. 1993. Coopération technique allemande CHA. Projet N°89.2138.9. Rapport 64p.

Camberlin., P. Les précipitations dans la Corne orientale de l'Afrique: Climatologie, variabilité et connexions avec quelques indicateurs oceano-atmosphériques. 1994. PhD Thesis. Université de Bourgogne, Dijon, France.

Casse, C., Gosset, M., Peugeot, C., Pedinotti, V., Boone, A., Tanimoun, B.A., Decharme, B. Potential of satellite rainfall products to predict Niger River flood events in Niamey. *Atmos. Res.*, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.01.010>.

Ceccherini, G., Ameztoy I., Hernández, C.P.R. and Moreno C.C. High-resolution precipitation datasets in South America and West Africa based on satellite-derived rainfall, enhanced vegetation index and digital elevation model. *Remote Sens.*, 2015, 7, pp. 6454–6488: <https://doi.org/10.3390/rs70506454>.

CHA (Coopération Hydrogéologique Allemande). Inventaire et mises en valeur des ressources en eau de la République de Djibouti. 1982. Volume 4.

Chen, M., Shi, W., Xie, P., Silva, V.B.S., Kousky, V.E., Higgins, R.W., Janowiak, J.E. Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation. *J. Geophys. Res.*, 2008, 113, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1029/2007JD009132>.

Chiré, A.S. Le nomade et la ville à Djibouti: Stratégies d'insertion urbaine et production de territoire. 2012. Karthala, Paris, 2012.

Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W. Applied Hydrology. International Edition, McGraw-Hill Book Company,. 1988. New York. USA

Daher Aden, A. The making of hazard : of a social-environmental explanation of vulnerability to drought in Djibouti. 2014. Phd Thesis, King's College London, London, England.

Daoud, M.A. Dynamique du rifting continental de 30 MA à l'actuel dans la partie Sud Est du Triangle Afar : tectonique et magmatisme du rift de Tadjoura et des domaines Danakil et d'Ali Sabieh, République de Djibouti. 2008. PhD thesis. University of Bretagne Occidentale, Brest, France.

Dee, D. P. , S. M. Uppalaa, A. J. Simmons ,P.Berrisford ,P.Poli , S. Kobayashi ,U. Andrae, M.A.Balmaseda, G.Balsamo ,P.Bauer, P.Bechtold ,A.C.M.Beljaars ,L. van de Berg, J.Bidlot, N.Bormann, C.Delsol, R.Dragani, M.Fuentes, A.J.Geer, L. Haimberger, S.B.Healy, H.Hersbach, E.V.Holm, L.Isaksen, P.Kallberg, M. Kohler, M. Matricardi, A.P.McNally, B.M.Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K.Park, C. Peubey, P.deRosnay, C.Tavolato, J.-N. Thepaut, F. Vitart. The ERA-Interim Reanalysis: Configuration and Performance of the Data Assimilation System. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137, pp. 553-597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>.

Demarée G.R. Evidence of abrupt climate change from the rainfall data of a Mauritanian station. 1990. IRM. Série A. N° 124. 68-74.

Desclaux, T. Pishedda, M. Lemonnier, H. Soulard, B. Le Gendre, R. Vers une modélisation déterministe des écoulements de surface en Nouvelle-Calédonie. Implémentation du code GR4H sur quatre bassins versants du Grand Nouméa. 2017. Rapport IFREMER – UR LEADNC. 35 pages. DOI: 10.13155/49969

Dinku, T., Ceccato, P., Grover-Kopec, E., Lemma, M., Connor, S.J., Ropelewski, C.F. Validation of satellite rainfall products over East Africa's complex topography. Int. J. Remote Sens, 2007, 28 (7), pp. 1503–1526. <https://doi.org/10.1080/01431160600954688>.

Diro, G.T., Grimes, D.I.F., Black E, O'Neill A, Pardo-Iguzquiza E. Evaluation of reanalysis rainfall estimates over Ethiopia.Int. J Climatol, 2009, 29, pp. 67–78. <https://doi.org/10.1002/joc.1699>.

Djama, M. Trajectoire du pouvoir en pays somali. In: Cahiers d'études africaines. La Corne dans tous ses États, 1997, 37(146), pp. 403-428. <https://doi.org/10.3406/cea.1997.3520>

Doorenbos, J.; Pruitt, W.O. Crop water requirements. Rome: FAO, 1977. Irrigation and Drainage Paper, 24. 179p

Desagher, E. Modélisation de la recharge de la nappe inféroflux de Oueah sous climat aride ; Relation entre les écoulements de surface et la nappe alluviale sous-jacente (République de Djibouti). 1990. DEA. Université de Neuchatel. Neuchatel. Suisse.

DSI. Ambouli Friendship Final Report (Volume 4), Ministry of Forestry and Irrigations General, Directorate of State Services of Dam Department. 2017. Rapport d'étude. 128p.

Essink, G.O. Improving fresh groundwater supply problems and solutions. *Ocean Coastal Manage.* 2001. 44, pp. 429-449 pp.

Fadoumo Ali Malow. Development of a 3D water flow modelling based on scarce data for arid land water resources management : Case study of Ambouli and Kourtimalei watersheds in Djibouti. 2018. PhD thesis, Tokyo University of Agriculture, Tokyo, Japan. 128 pp.

Fereres, E & Goldhamer, D. Suitability of stem diameter variations and water potential as indicators for irrigation scheduling of almond trees. 2003. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 78:2, 139-144, DOI: 10.1080/14620316.2003.11511596

Fontes J. Ch., Pouchan P., Saliege J.F. et Zuppi G.M. Environmental isotope study of groundwater systems in the Republic of Djibouti. In « Arid Zone Hydrology : Investigations with isotope techniques ». 1980. Proceeding of an Advisory Grpup Meeting, 6-9 nov. 1978, International Atomic Energy Agency, Vienne, pp. 236-262. 409-414.

Funk, C., Verdin, A., Michaelsen, J., Peterson, P., Pedreros, P., Husak, G., A global satellite-assisted precipitation climatology. *Earth Syst. Sci. Data*, 2015, 7, pp. 275–287. <https://doi.org/10.5194/essd-7-275-2015>.

Gamal-Eldin, H.A. Etude de l'aquifère basaltique de la zone de captage de la ville de Djibouti, République de Djibouti. 1988. Thèse de doctorat, Univ. Albert-Ludwig de Fribourg, Allemagne Fédérale, 159p.

Gebrechorkos, S.H., Huelsmann, S., Bernhofer, C. Evaluation of Multiple Climate Data Sources for Managing Environmental Resources in East Africa. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 2018, 22, pp. 4547–4564. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4547-2018>.

Gelaro, R., McCarty, W., Suarez, M.J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C.A., Darmenov, A., Bosilovich, M.G., Reichle, R., Wargan, K., Coy, L., Cullather, R., Draper, C., Akella, S., Buchard, V., Conaty, A., Da Silva, A.M., Gu, W., Kim, G.-K., Koster, R., Lucchesi, R., Merkova, D., Nielsen, J.E., Partyka, G., Pawson, S., Putman, W., Rienecker, M., Schubert, S.D., Sienkiewicz, M., Zhao, B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), *Ame. Meteorol. Soc*, 2017, pp. 5419–5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>.

Gosset, M., Viarre, J., Quantin, G., Alcoba, M. Evaluation of several rainfall products used for hydrological applications over West Africa using two high-resolution gauge networks. *Q. J. R. Meteorol. Soc*, 2013, 139 (673), pp. 923–940. <https://doi.org/10.1002/qj.2130>.

Lubès-Niel, H., J.M. Masson, J.E. Paturel, E. Servat. Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. 1998. *Rev. Sci. Eau*, 11.

Hassen Babaousmail , Rongtao Hou, Brian Ayugi and Gnim Tchalim Gnitou Evaluation of satellite-based precipitation estimates over Algeria during 1998–2016. *J of Atmos and Sol-Ter Phys*, 2019, 195, 105139. doi: 10.1016/j.jastp.2019.105139.

Hauquin, J.P. La nappe côtière de la région de Djibouti. *Géologie et Hydrogéologie*. Thèse de Doctorat. 1978. Université de Bordeaux III, 86pp.

- Hiroshiro Y., Jinno K., Berndtsson R. Hydrochemical properties of a salinity affected coastal aquifer in western Japan. 2006. *Hydrol. Process.*, 20 (6), pp. 1425-1435.
- Hong, Y., Hsu, K.L., Sorooshian, S., and Gao, X. Precipitation estimation from remotely sensed imagery using an artificial neural network cloud classification system. *J. Appl. Meteor*, 2004, 43(12), 1834-1853. <https://doi.org/10.1175/JAM2173.1>.
- Houmed-Gaba, A. Hydrogéologie des milieux volcaniques sous climat aride. Caractérisation sur site expérimental et modélisation numérique de l'aquifère basaltique de Djibouti (Corne de l'Afrique). 2009. PhD thesis, University of Poitiers, Poitiers, France. 220 pp.
- Houssein I., Jalludin M. The salinity of Djibouti's aquifer. 1996. *J. Afric. Earth Sc.* 22 (4), pp.409- 414.
- Huffman, G. J., D. T. Bolvin, D. Braithwaite, K. Hsu, R. Joyce, and P. Xie. NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (I-MERG). Algorithm Theoretical Basis Doc (ATBD) Version 4: Greenbelt, MD, 2015, 26 pp.
- Izumi, T., Takikawa, H., Hirabayashi, Y., Hanasaki, N., Nishimori, M., Contributions of different bias-correction methods and reference meteorological forcing data sets to uncertainty in projected temperature and precipitation extremes. *J. Geophys. Res. Atmos*, 2017, 122 (15), pp. 7800–7819. <https://doi.org/10.1002/2017JD026613>.
- Jalludin, M. Propriétés géométriques et hydrodynamiques des aquifères en milieux volcaniques fissuré sous climat aride : République de Djibouti. 1993. PhD thesis. University of Poitiers, Poitiers, France.
- Jalludin, M., Razack, M. Assessment of hydraulic properties of sedimentary and volcanic aquifer systems under arid conditions in the Republic of Djibouti (Horn of Africa). 2004. *Hydrogeology Journal*, 12, 159-170.
- Jalludin, M., Razack, M. Recharge simulation in stream bed alluviums overlying volcanic aquifer under semi-arid climate, Republic of Djibouti (Horn of Africa). 2008. *Proceeding, International Symposium SIHD, Djibouti 14-17december*, pp 123-128.
- Jensen, M.E. and Haise H.R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. 1963. vol. 89, p. 15-41.
- Jorge L. Peña-Arancibia, Albert I. J. M. van Dijk, Luigi J. Renzullo, and Mark Mulligan. Evaluation of Precipitation Estimation Accuracy in Reanalyses, Satellite Products, and an Ensemble Method for Regions in Australia and South and East Asia. *J. Hydromet*, 2013, 10, pp. 1323–1333. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0132.1>
- Kadar Mohamed Hassan. Disponibilité et stabilité des ressources côtières en eau souterraine sous forte contrainte climatique : Etude géochimique et isotopique de l'aquifère basaltique littoral de Djibouti. 2019. PhD thesis, Université de Corse, Corse, France, 165 pp.
- Kendall S.M., Stuart A. *The Advanced Theory of Statistics*. 1943. Charles Griffin, London, UK. Vol. 1, 2 & 3, 472 p, 723 p, 585 p.
- L'hote, Y. *Mesure et étude des précipitations en hydrologie*. 1993. Deust - Génie hydro sanitaire et aquacole, Univ Montpellier. 38p.

- Lakew, H.B., Moges, S.A., Asfaw, D.H. Hydrological performance evaluation of multiple satellite precipitation products in the upper Blue Nile basin. Ethiopia. *J.Hydro.: Reg.Stud*, 2020, 27, 100664. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100664>.
- Lange, S. Earth2Observe, WFDEI and ERA-Interim data Merged and Bias-corrected for ISIMIP (EWEMBI) [Data set]. GFZ Data Services, 2019. <https://doi.org/10.5880/pik.2019.004>
- Le Gall, B., Daoud, M.A., Maury, R.C., Gasse, F., Rolet, J., Jalludin, M., Caminiti, A.M., Moussa, N. Carte géologique de la République de Djibouti, échelle 1/200 000. 2015. CERD-CGGM
- Leeson, S. and Summers, J.D. *Commercial Poultry Nutrition*. Third Edition. 2005. Nottingham University Press, Nottingham.
- Lu, G.Y., Wong, D.W. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Comput.Geosci*, 2008, 34(9), pp. 1044–1055. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.010>
- Maidment, R.I., Grimes, D., Black, E., Tarnavsky, E., Young, M., Greatrex, H., Allan, R.P., Stein, T., Nkonde, E., Senkunda, S., Misael, E., Alcántara, U. Data Descriptor: a new, long-term daily satellite-based rainfall dataset for operational monitoring in Africa. *Nat. Publ. Gr*, 2017, 4, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.63>.
- Mathevet, T. Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire? Développements empiriques et comparaison de modèle sur un large échantillon de bassins versants. 2005. PhD thesis, L'École Natl. du Génie Rural, des Eaux et des For., Paris.
- Mishra, S.K. and Singh, V.P. *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*. Kluwer Academic Publishers. 2003. Dordrecht. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-0147-1>:
- Mohamed Aboubakar. Caractérisation d'un système aquifère volcanique par approche couplée hydrogéochimique et modélisation numérique. Exemple de l'aquifère des basaltes de Dalha, Sud-Ouest de la République de Djibouti. 2012. PhD thesis, University of Poitiers, Poitiers, France, 239 pp.
- Moustadraf J., Razack M., Sinan M. Evaluation of the climate change impact on the resources of a coastal aquifer using numerical modeling, Chaouia aquifer, Morocco. 2008. *Hydrogeology Journal*, in press (DOI 10.1007/s10040-008-0311-4).
- Naschen, K., Diekkrüger, B., Leemhuis, C., Steinbach, S., Seregina, L.S., Thonfeld, F., Van der Linden, R. Hydrological modeling in data-scarce catchments: the Kilombero floodplain in Tanzania. *Water*, 2018, 10, 599pp. <https://doi.org/10.3390/w10050599>.
- Neitsch, S.L., Williams, J.R., Arnold, J.G. and Kiniry, J.R. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. 2011. Texas Water Resources Institute, College Station.
- Nour Ayeh M. La ville de Djibouti entre intégration aux enjeux mondiaux et fragmentation urbaine. *Territoire en mouvement Revue de géographie et aménagement*, 2015, 27-28, pp. 19, <https://doi.org/10.4000/tem.3183>

- Nour Ayeh, M. La dynamique des températures et ses risques pour les populations de Djibouti dans le contexte du réchauffement global, NAAJ, 2019,
- Novella, N.S., Thiaw, W.M. African rainfall climatology version 2 for famine early warning systems. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 2012, 52 (1996), pp. 588–606. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0238.1>.
- Olaniran O.J. Evidence of climatic change in Nigeria based on annual séries of rainfall of différent daily amounts. 1991. 1919- 1985. *Climatic change*, 19, 319-341.
- Omonge, P., Feigl, M., Olang, L., Schulz, K., Herrnegger, M. (2022) Evaluation of satellite precipitation products for water allocation studies in the Sio-Malaba-Malakisi river basin of East Africa. *J. Hydro.: Reg. Stud.*, 2022, 39, pp. 2214-5818. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100983>
- Ozer, P. and Mahamoud, A. Recent extreme precipitation and temperature changes in Djibouti City (1966–2011). *Journal of Climatology*, 2013, pp 1–8. <https://doi.org/10.1155/2013/928501>
- Pabiot, F. Optimisation de la gestion d'un barrage collinaire en zone semi-aride. 1999 Mémoire de fin d'étude, ENSA de Rennes (France), IRD (France) et IRESA (Tunisie).
- Paturel, J-E. Kouassi A. Akué, F. Kouacou, B. Lohou, F. Pons, F. Dje, K. Coulibaly, N. A gold mine: paper archives stored in national meteorological services - Application to rainfall data in Côte d'Ivoire. 2023 à parasite ds la revue HSI, n° special Special Issue on the informative content of data in hydrology
- Pellarin, T., Roman-Cascon, C., Baron, C., Bindlish, R., Brocca, L., Camberlin, P., Fernandez-Prieto, D., Kerr, Y.H., et al. The precipitation inferred from soil moisture (PrISM) near real-time rainfall product: evaluation and comparison. *Remote Sens.*, 2020 12(3), 481. <https://doi.org/10.3390/rs12030481>.
- Penman, H.L. *Vegetation, and hydrology*. 1963. Édit. Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden (Angleterre), communication technique n° 53, 124 p.
- Perrin, C., C. Michel, and V. Andréassian. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. 2003. *J. Hydrol.*, **279**(1–4), 275–289, doi:10.1016/S0022-1694(03)00225-7.
- Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change-point problem. 1979. *Appl. Statist.*, 28(2), 126-135p.
- Pearson, RA and Ouassat, M, Estimation of the liveweight and body condition of working donkeys in Morocco. 1996. *The Veterinary Record* 138: 229–233. <https://doi.org/10.1136/vr.138.10.229>
- Poméon, T., Jackisch, D., Diekkrüger, B. Evaluating the performance of remotely sensed and reanalysed precipitation data over West Africa using HBV light. *J. Hydrol.*, 2017, 547, pp. 222–235. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.055>.
- Ponce, V. and Hawkins, R. Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*. 1996. 1, 11-19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1996\)1:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1996)1:1(11)).

Pouchan, P. Inventaire des ressources en eau de la Cote Francaise des Somalis. Basse vallee de l'oued Ambouli. Etude des ressources en eau. 1961. Rapport février BCEOM. Regie des eaux de Djibouti. 36p

Pouchan P., Reylé R., Lenoir P. Alimentation en eau de la ville de Djibouti, ressources actuelles et perspectives. 1973. Régie des eaux de Djibouti. 48p

Pouyaud B. Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec : exemple du lac de Bam et de la mare d'Oursi (Burkina Faso), du lac Tchad et d'açudes du Nordeste brésilien. 1986. Paris : ORSTOM, 255 p. (Etudes et Thèses). Th. Sci. Nat., Université de Paris Sud : Orsay. 1985/07/15. ISBN 2-7099-0825-5. ISSN 0767-2888.

Puech, C. & Chabi-Gonni, D. Courbes Hauteur de Pluie-Durée-Fréquence – Afrique de l'Ouest et Centrale pour des pluies de 5 minutes à 24 heures. 1984. CIEH, Ouagadougou.

Sabri Ahmed, Bouaziz Ahmed, Hammani Ali, Kuper Marcel, Douaik Ahmed, Badraoui Mohamed. Évaluation de la qualité des dattes de la variété Majhoul produites sous différents régimes hydriques. 2017. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 5 (2) : 149-153.

Sadeg S.A., Karahanoglu N. Numerical assessment of seawater intrusion in the Tripoli region, Lybia. 2001. *Environ. Geol.*, 40, (9), pp.1151-1168.

SAFEGE, Consortium STDE. Projet d'Aménagement Intégré de L'Oued Ambouli. Etude d'identification des ouvrages de rétention des ruissellements et de recharge des nappes sur l'ensemble du bassin versant. 2007. Volume I et II, 127p.

Sander J. Zwart, Wim G.M. Bastiaanssen. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. 2004. *Agricultural Water Management*. Volume 69, Issue 2, 115-133p.

Satgé, F., Bonnet, M.-P., Gosset, M., Molina, J., Hernan, W., Yuque Lima, Pillco Zolá, R., Timouk, F., Garnier, J. Assessment of satellite rainfall products over the Andean plateau. *Atmos. Res*, 2016, 167, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.07.012>.

Satge, F., Defrance, D., Sultan, B., Bonnet, M-P., Seyler, F., Rouché, N., Pierron F., Paturel, J-E. Evaluation of 23 gridded precipitation datasets across West Africa, *J.Hydrol*, 2020, 581,124412. <https://doi.org/1.1016/j.jhydrol.2019.124412>.

Scharffenberg W, Ely P, Daly S, Fleming M, Pak J. Hydrologic modeling system (hec-hms): physically based simulation components. 2010. In: 2nd Joint federal interagency conf. Las Vegas

Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-christoffer, A., Ziese, M., Rudolf, B. (2014) GPCP's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. *Theor and App.Climato*, 2014, 1155(1-2), pp. 15–40, <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0860-x>.

Segele, Z.T., Leslie, L.M., Lamb, P.J. Evaluation and adaptation of a regional climate model for the Horn of Africa: rainfall climatology and interannual variability. *Int J Climatol*, 2008. <https://doi.org/1.1002/joc.1681>.

SEPIA CONSEIL. Diagnostic et Recommandations pour une gestion intégrée du risque inondation sur l'agglomération de Djibouti. 2021. Rapport finance par AFD. 75p

Sethi L.N., Panda S.N., Nayak M.K. Optimal crop planning and water resources allocation in a coastal groundwater basin, Orissa, India. *Agric. 2006. Water Manage.*, 83, pp. 221-232.

Seyoum WM, Milewski AM, Durham MC. (2015) Understanding the relative impacts of natural processes and human activities on the hydrology of the Central Rift Valley lakes, East Africa, *Hydrological Processes*, 2015, 29, pp. 4312–4324. <https://doi.org/10.1002/hyp.10490>

Silanikove, N. Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. 2000. *Livestock Production Science* 67(1-18). [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(00\)00162-7](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(00)00162-7)

Sorooshian, S., Hsu, K.L., Gao, X., Gupta, H.V., Imam, B., Braithwaite, D. Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2000, 81(9), pp. 2035–2046. <https://doi.org/10.1175/1520-0477>

Sou, M., Yacouba, H. et Mermoud, A., 2008. Valorisation du pouvoir fertilisant des eaux usées en irrigation maraîchère au Burkina Faso. *Science et technique, Science naturelles et agronomie*, 30 (1): 39-52.

Strahler, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology. 1952. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 63(11), 1117–1142.

Sutherland R.A., Bryan R.B., Oostwoud Wijendes D. Analysis of the monthly and annual rainfall climate in a semi-arid environment, Kenya. 1991. *Journal of Arid Environments*, 20,257-275.

Thornthwaite, C.W.; Mather, J.R. The water balance. *Publications in Climatology*. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 1-104p.

Tognetti, R., d'Andria, R., Morelli, G. *et al.* Irrigation effects on daily and seasonal variations of trunk sap flow and leaf water relations in olive trees. 2004. *Plant and Soil* 263, 249–264. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047738.96931.91>

Turc, L. Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise à jour. 1961. *Annales Agronomiques*, vol. 12, p. 13-49.

Ushio, T., Sasashige, K., Kubota, T., Shige, S., Okamoto, K., Aonashi, K., Inoue, T., Takahashi, N., Iguchi, T., Kachi, M., Oki, R., Morimoto, T., Kawasaki, Z.-I. A Kalman filter approach to the global satellite mapping of precipitation (GSMaP) from combined passive microwave and infrared radiometric data. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 2009, 87A, pp. 137–151. <https://doi.org/10.2151/jmsj.87A.137>.

Vannitsem S., Demarée G. Détection et modélisation des sécheresses au Sahel. *Hydrologie Continentale*. 1991. Vol. 6, n° 2,155-171.

Vellutini P., Piguet P., Recroix F., Demange J., Abdallah A. Carte géologique de la république de Djibouti au 1:100 000. 1993. Feuille d'Asal. Ministère français de la coopération et du développement – ISERST Djibouti. Notice, 111 p.

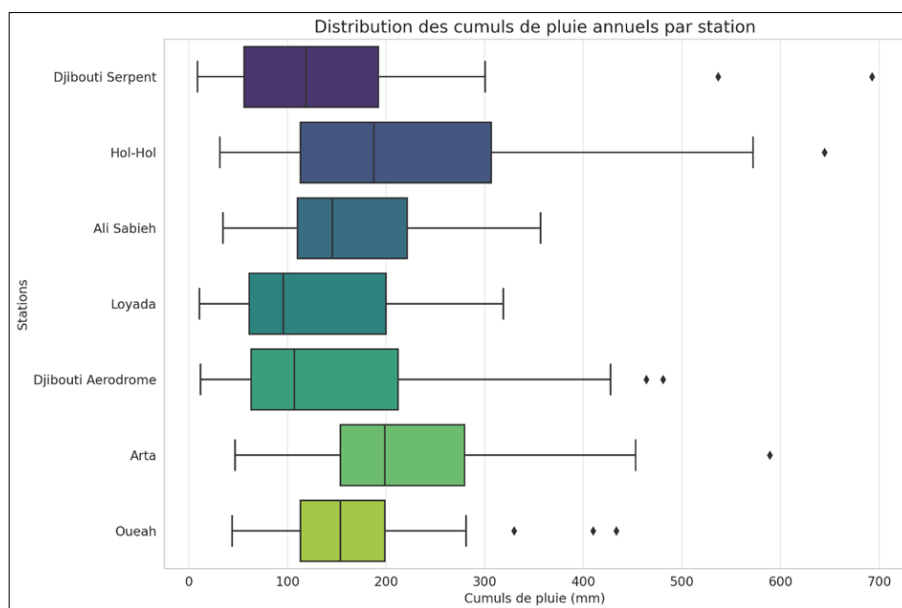
- Wang, Y., Sen, O.L., Wang, B. A highly resolved regional climate model (IPRC-RegCM) and its simulation of the 1998 severe precipitation event over China. Part I: model description and verification of simulation. *J. Clim.*, 2003, 16, pp. 1721–1736.
- Weedon, G. P., G. Balsamo, N. Bellouin, S. Gomes, M. Best, J. and Viterbo, P. 2014. The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data. *Water. Resour. Res.*, 2014, 50. <https://doi.org/10.1002/2014WR015638>.
- Wilson, R.T. Reproductive performance of the camel. 1989. The empirical base. *Revue Elev. Méd. Vét. Pays Trop.* 42(1): 117-125.
- WMO. *Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration*. Édit. World Meteorological Organization note technique n° 83.1966. Genève (Suisse), 121 p.
- Xie, P. and Arkin, P.A. An intercomparison of gauge observations and satellite estimates of monthly precipitation. *J. Appl. Meteor.*, 1995, 34, pp. 1143-1160.
- Xie, P., Yatagai, A., Chen, M., Hayasaka, T., Fukushima, Y., Liu, C., Yang, S. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia. *J. Hydrometeorol.*, 2007, pp. 607–626. <https://doi.org/10.1175/JHM583.1>
- Yamamoto, M.K., Shige, S. Implementation of an orographic/nonorographic rainfall classification scheme in the GSMaP algorithm for microwave radiometers. *Atmos. Res.*, 2014, 163, pp. 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.07.024>.
- Zhang Q., Volker R.E., Lockington D.A. Numerical investigation of seawater intrusion at Goodburrum, Bundaberg, 2004. Queensland, Australia. *Hydrogeol. J.* 12 (6), pp. 674-687
- Zhou X., Chen M., Ju X., Wang J. Numerical simulation of sea water intrusion near Beihai. 2000. China. *Environ. Geol.* 40 (1-2), pp.223-233.

Annexes

Annexe Chapitre 4 : Pluviométrie

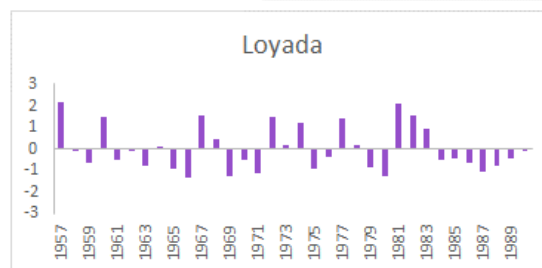
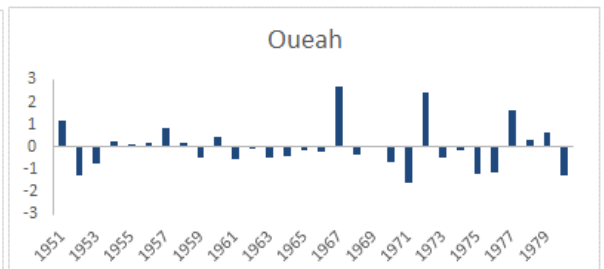
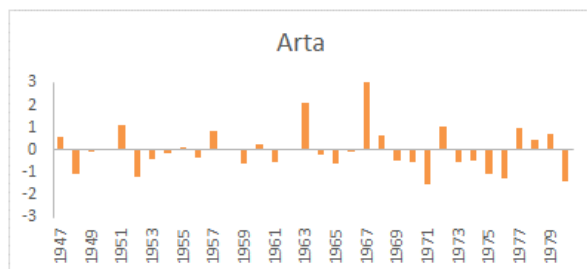
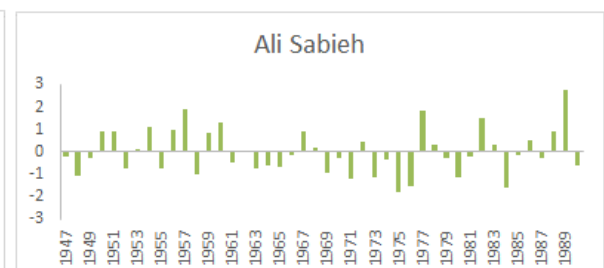
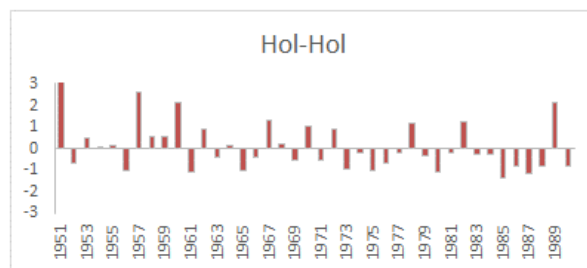
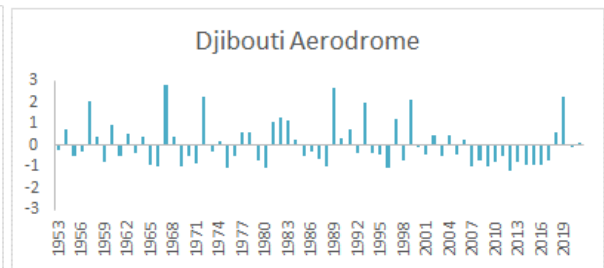
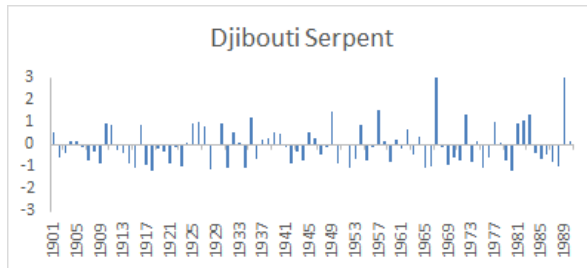
Analyse au pas de temps annuel des stations de la zone d'étude sur la période complète

Cumuls annuels

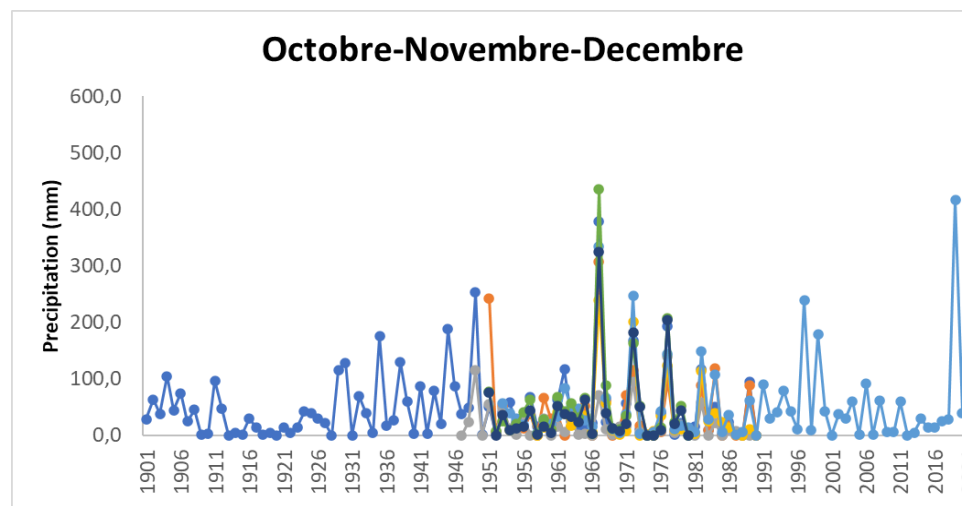
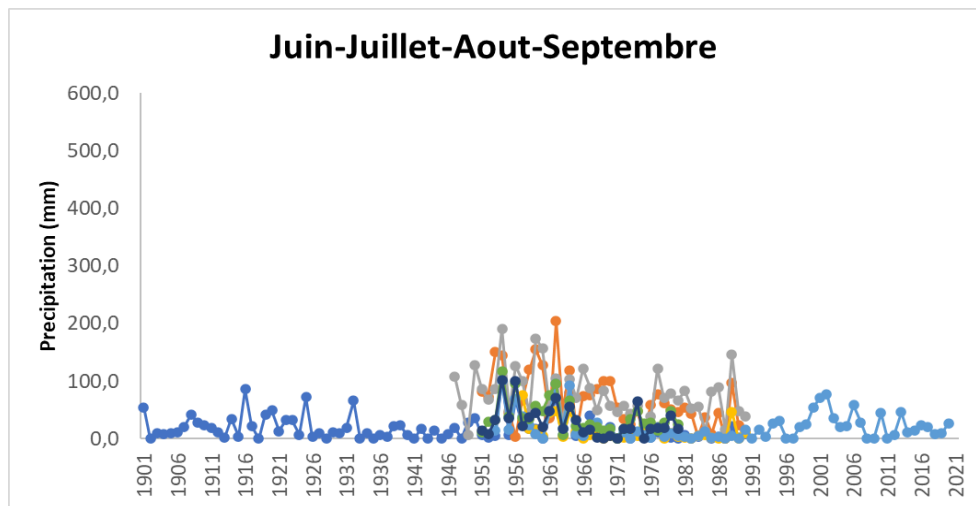
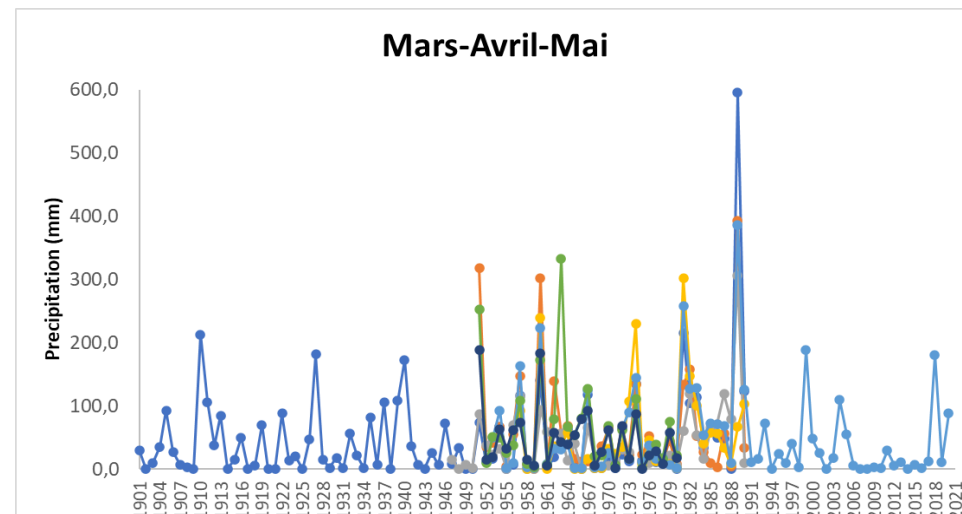
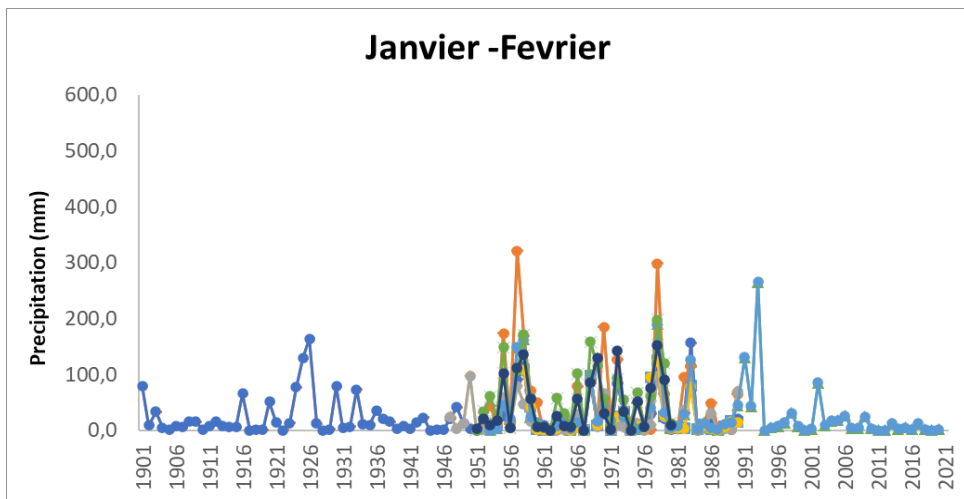


Station	Période d'observation	Min (mm)	Max (mm)	Médiane (mm)	Moyenne (mm)	Écart type (mm)	Coefficient de variation
Djibouti Serpent	1901-1982	8.9	692.9	118.8	134.31	108.06	0.805
Hol-Hol	1951-1990	31.3	644.8	168.9	207.51	146.46	0.706
Ali Sabieh	1946-1990	34.7	356.6	151.95	160.34	67.51	0.421
Loyada	1957-1991	10.7	318.8	87.1	117.01	90.03	0.769
Djibouti Aéroport	1953-2021	11.9	480.8	107.0	153.06	119.12	0.778
Arta	1946-1981	46.7	589.2	179.4	201.32	111.32	0.553
Oueah	1949-1980	30.0	433.6	129.4	151.89	98.04	0.645

Indices pluviométriques centrés réduits annuels



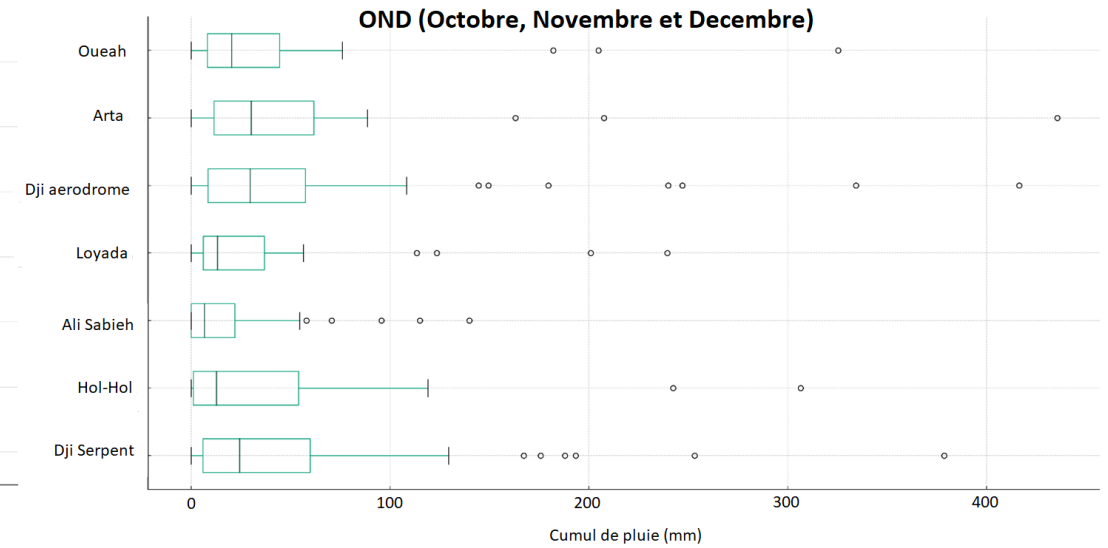
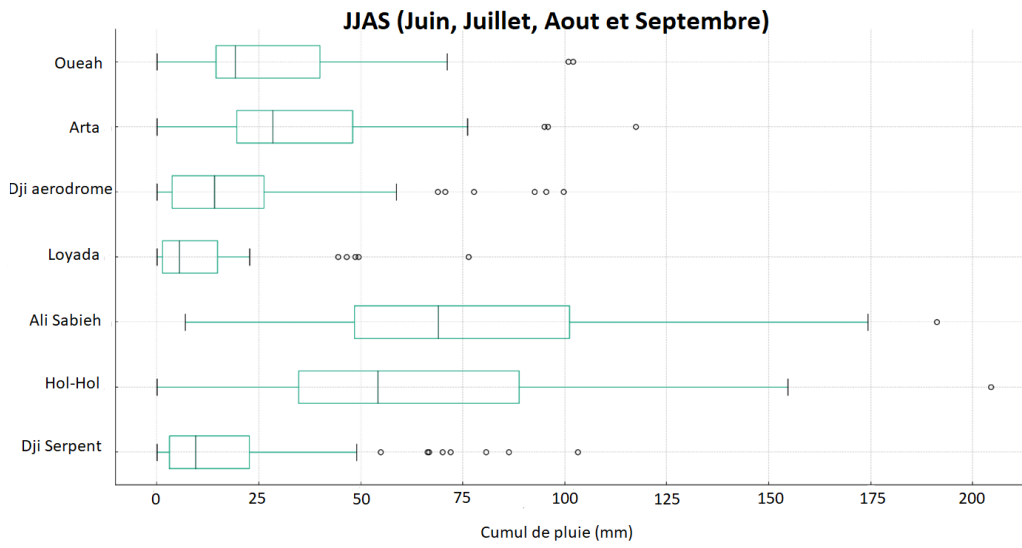
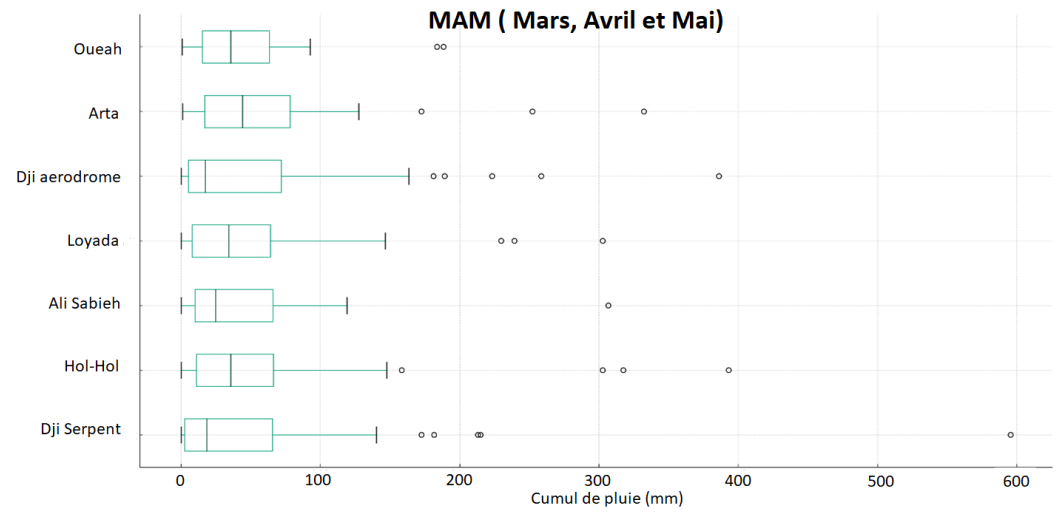
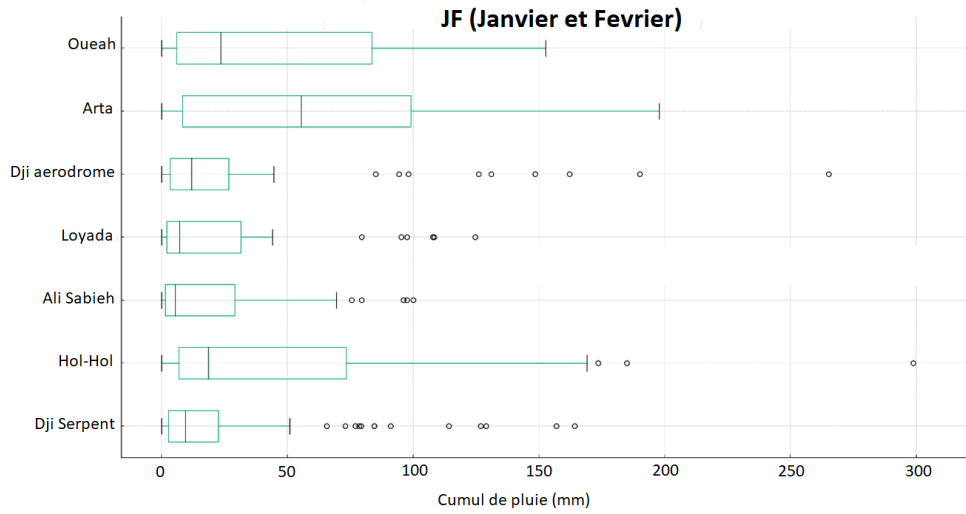
Analyse au pas de temps saisonnier des stations de la zone d'étude sur période complète



Cumuls

—●— Djibouti Serpent —●— Ho-Hol —●— Ali Sabieh —●— Loyada —●— Djibouti Aerodrome —●— Arta —●— Oueah

saisonniers



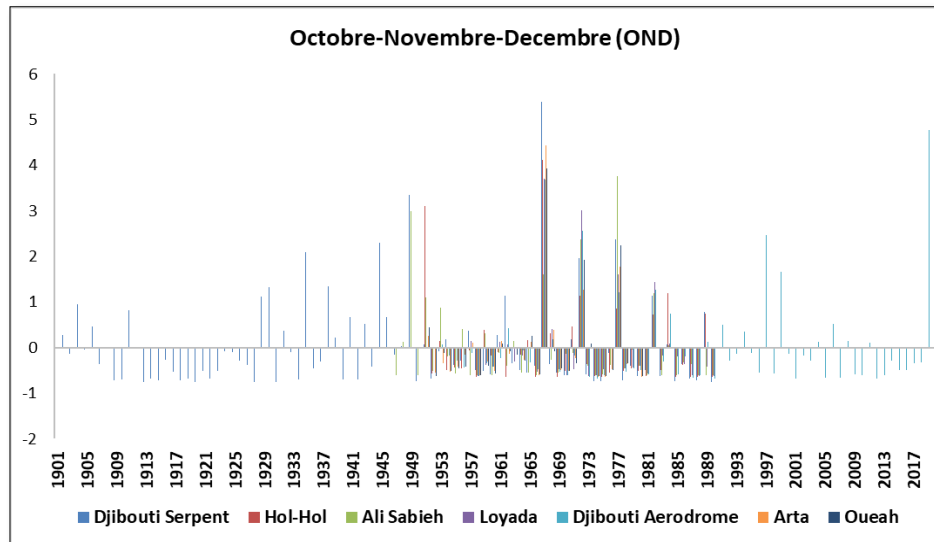
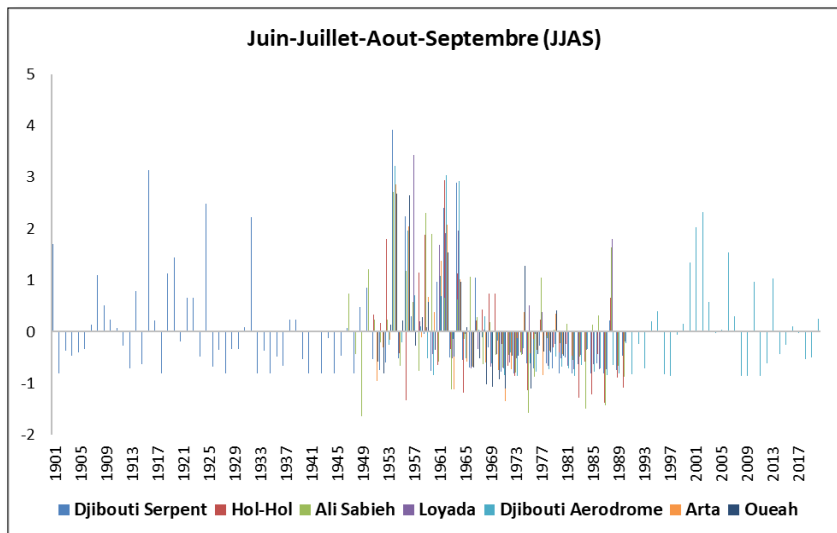
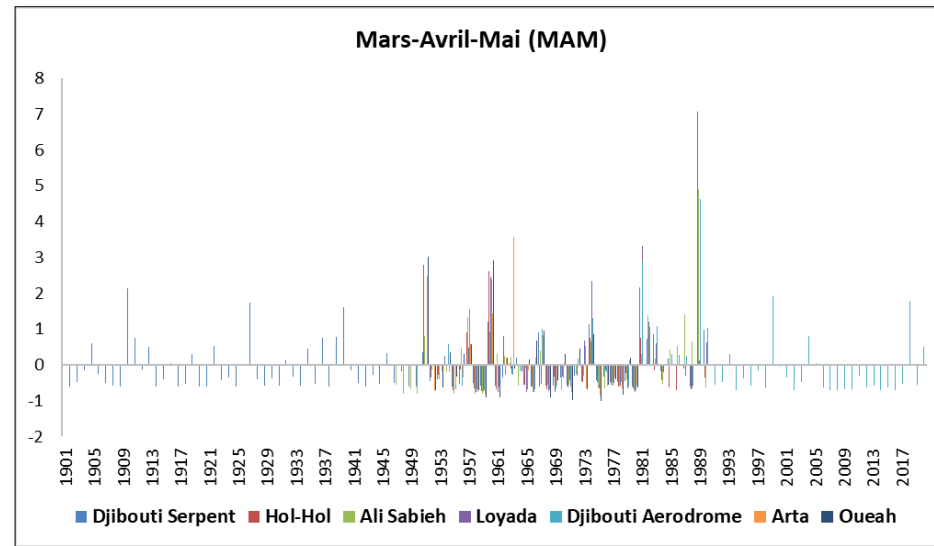
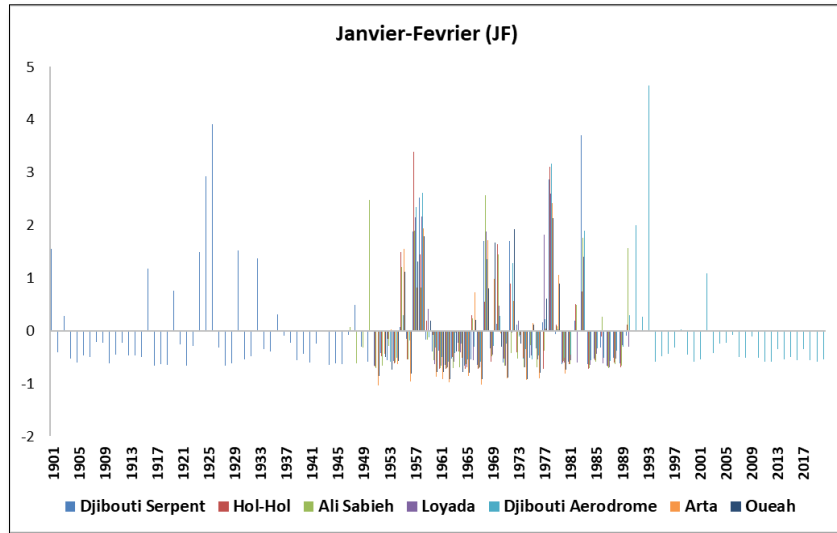
JF	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart type	Coefficient de variation
Djibouti Serpent	0.0	164.2	9.50	23.66	35.92	1.518
Hol-Hol	0.0	321.1	18.65	56.66	78.05	1.378
Ali Sabieh	0.0	100.0	5.40	21.75	30.56	1.405
Loyada	0.0	124.7	7.25	26.17	37.99	1.452
Djibouti Aerodrome	0.0	265.1	11.95	29.81	50.60	1.698
Arta	0.0	197.8	55.50	59.49	57.27	0.963
Oueah	0.0	152.7	23.50	45.98	50.01	1.088

JJAS	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart type	Coefficient de variation
Djibouti Serpent	0.0	103.2	9.50	17.65	21.84	1.238
Hol-Hol	0.0	204.5	54.15	65.41	47.36	0.724
Ali Sabieh	7.0	191.2	68.95	76.34	42.41	0.556
Loyada	0.0	76.4	5.50	13.35	18.36	1.375
Djibouti Aerodrome	0.0	99.7	14.10	21.03	24.45	1.162
Arta	0.0	117.4	28.40	37.73	27.94	0.741
Oueah	0.0	102.0	19.15	29.77	26.94	0.905

MAM	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart type	Coefficient de variation
Djibouti Serpent	0.0	595.4	18.40	46.92	77.59	1.654
Hol-Hol	0.0	393.0	35.45	66.28	89.97	1.357
Ali Sabieh	0.0	306.6	24.75	43.73	53.58	1.225
Loyada	0.0	302.6	34.05	56.37	74.07	1.314
Djibouti Aerodrome	0.0	386.0	17.45	51.34	72.29	1.408
Arta	1.0	332.1	43.90	64.68	75.07	1.161
Oueah	0.7	188.2	35.50	47.65	50.01	0.976

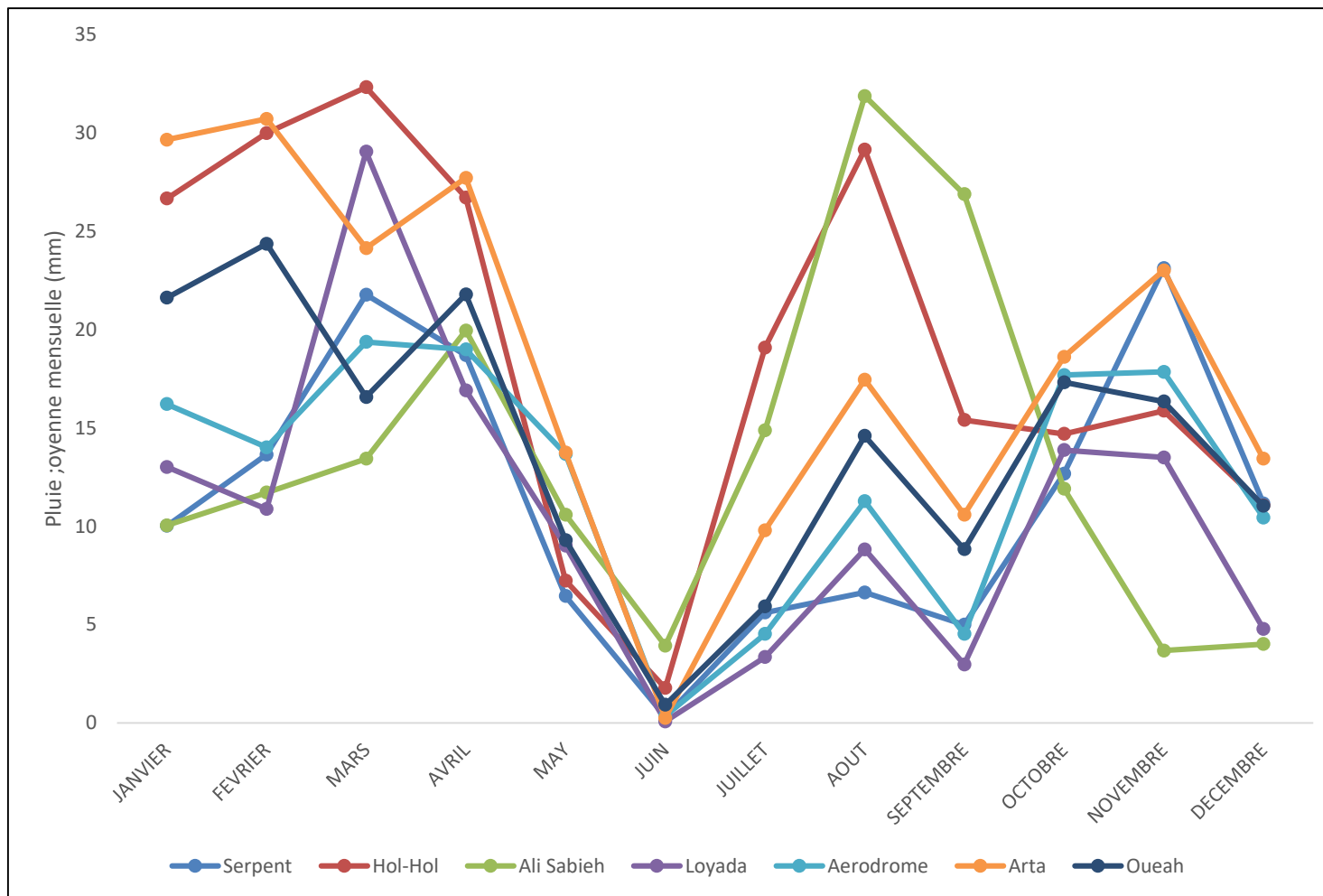
OND	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart type	Coefficient de variation
Djibouti Serpent	0.0	378.6	24.30	46.60	61.66	1.323
Hol-Hol	0.0	306.5	12.65	41.62	64.50	1.550
Ali Sabieh	0.0	139.9	6.70	19.59	31.94	1.631
Loyada	0.0	239.4	13.15	34.47	55.25	1.603
Djibouti Aerodrome	0.0	416.4	29.55	51.95	76.46	1.472
Arta	0.0	435.5	30.15	55.06	85.65	1.555
Oueah	0.0	325.3	20.25	44.82	71.31	1.591

Indices pluviométriques saisonniers



Analyse au pas de temps mensuel des stations de la zone d'étude sur la période complète

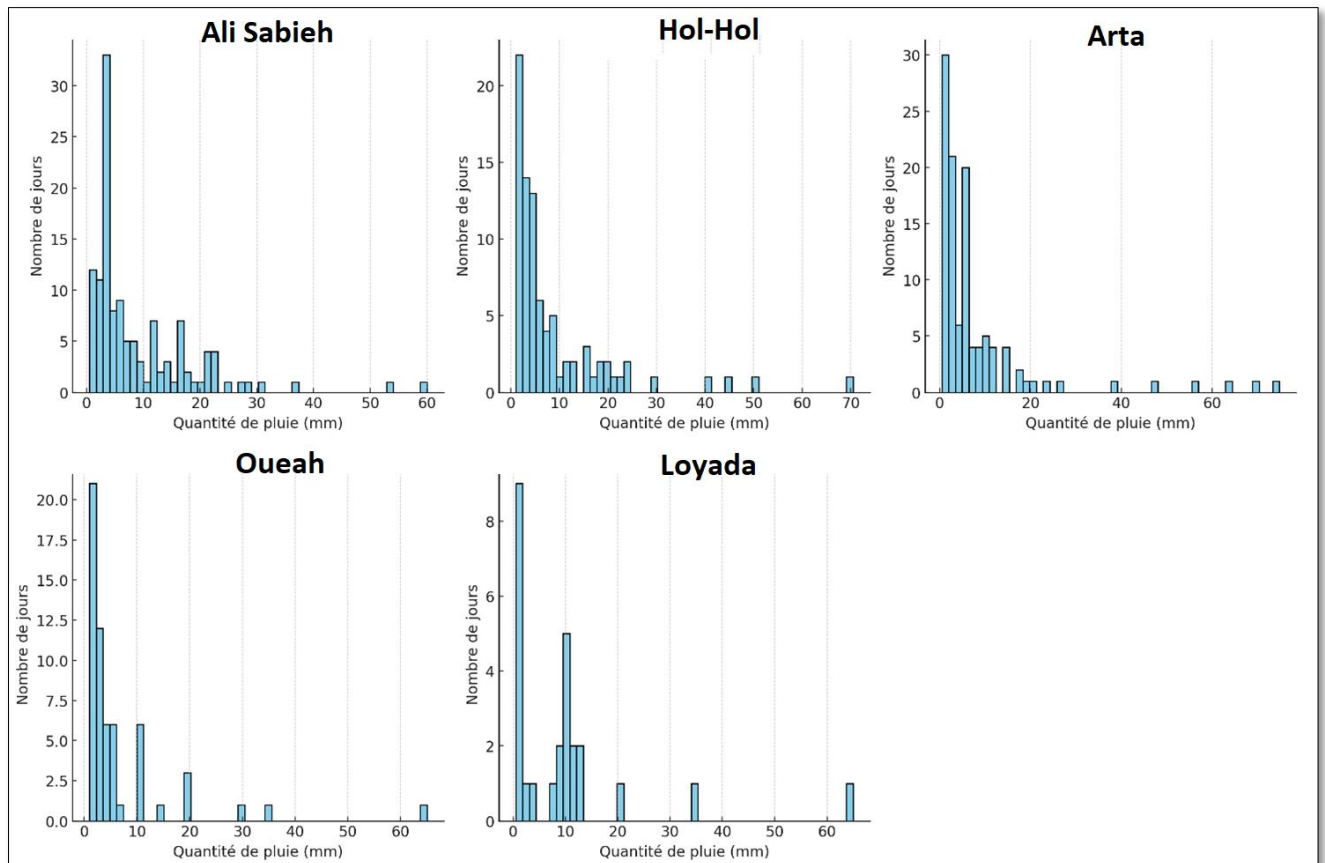
Cumuls mensuels



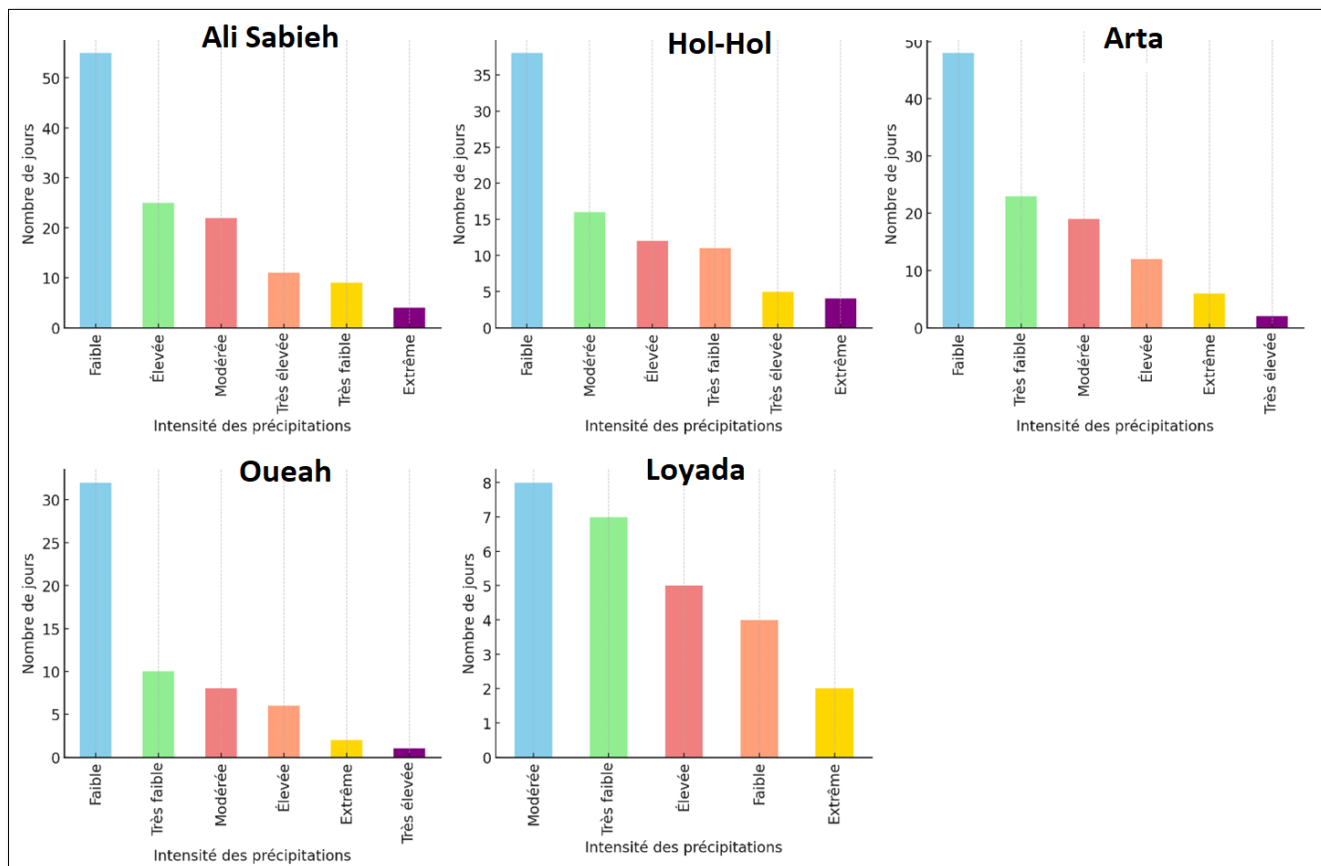


Analyse au pas de temps journalier des stations de la zone d'étude
 Station Ali Sabieh, Hol-Hol, Loyada, Arta et Oueah (période de 2013-2021)

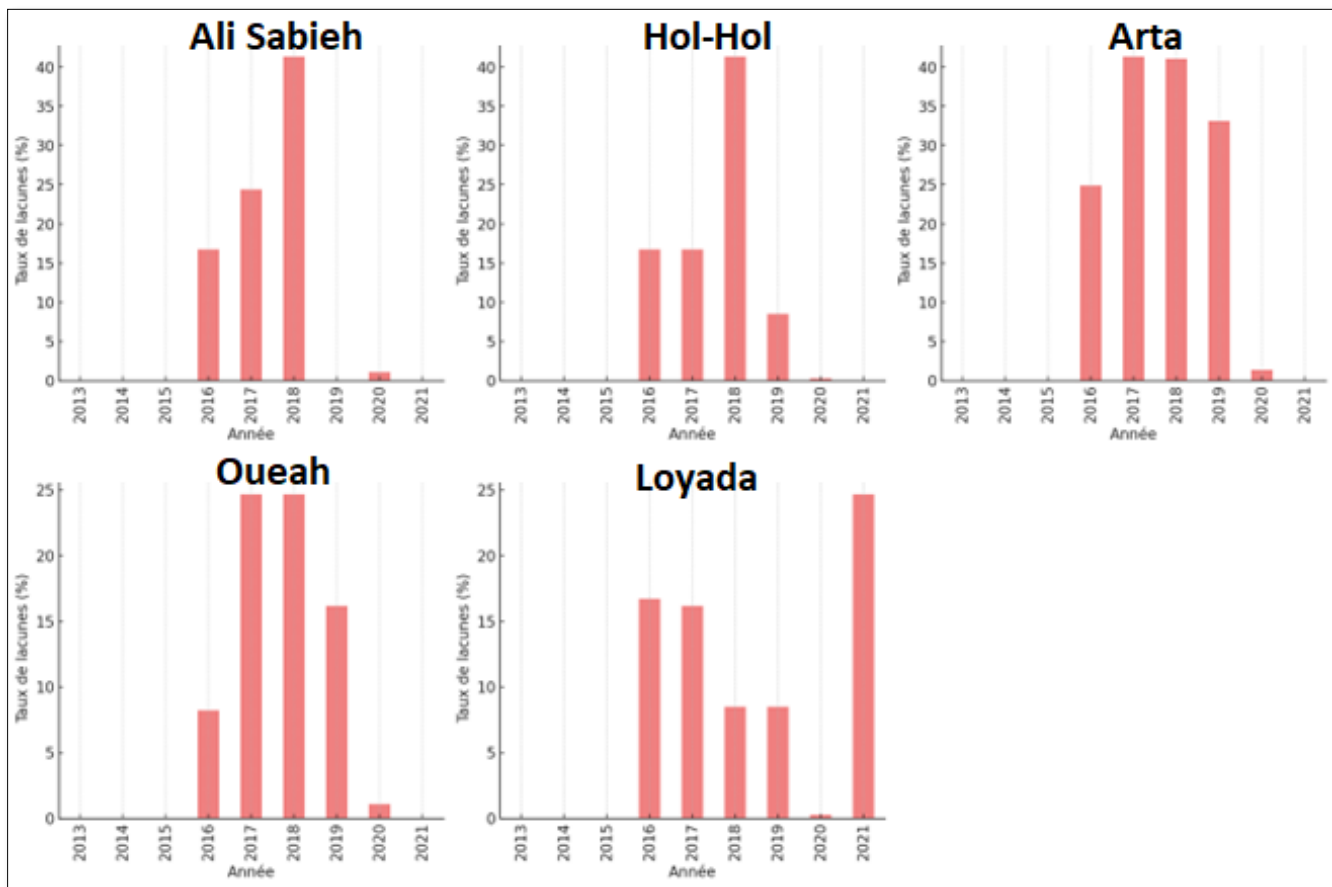
La distribution des pluies journalières



La classification des jours de pluies

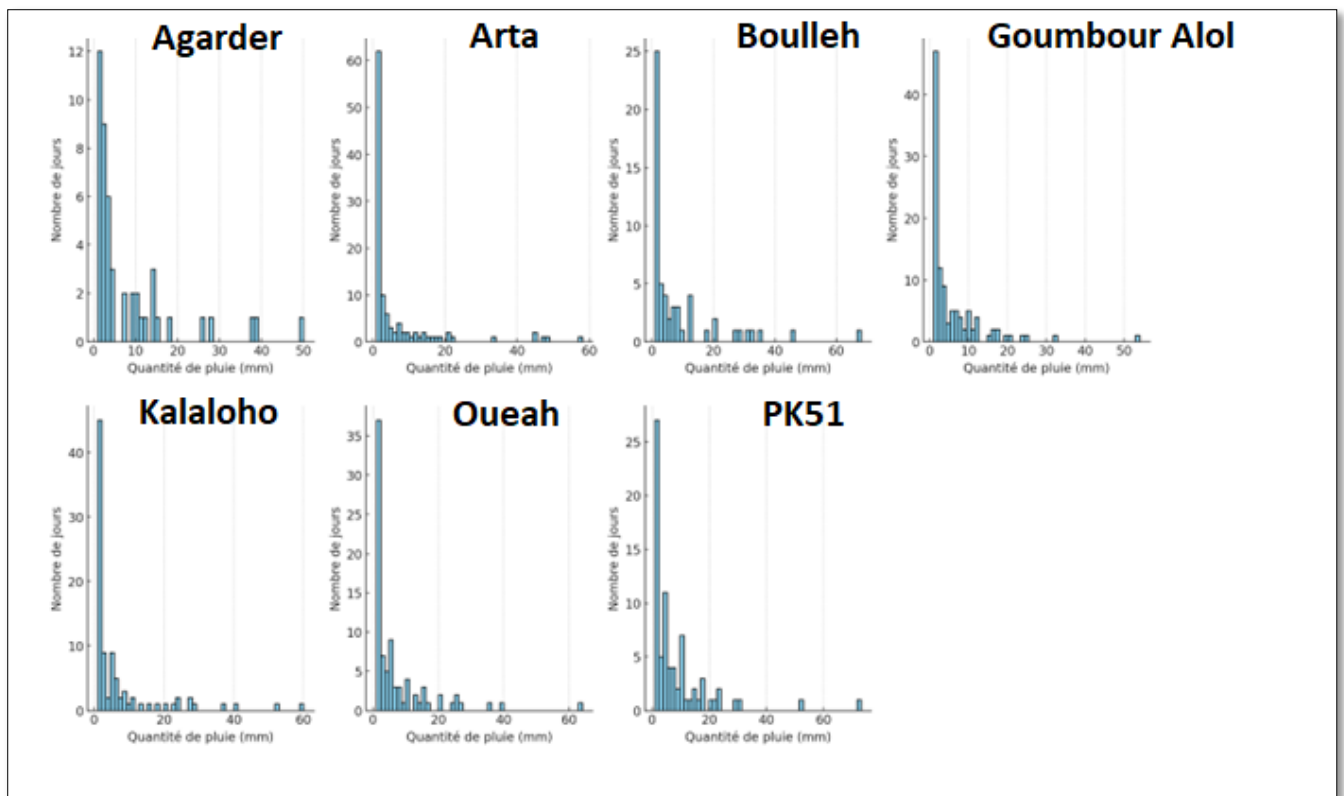


Le taux de lacunes

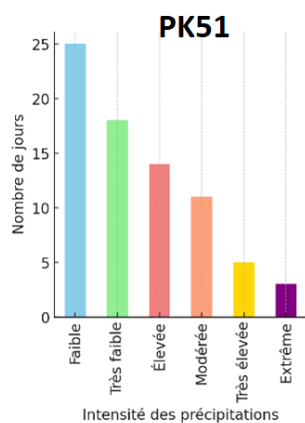
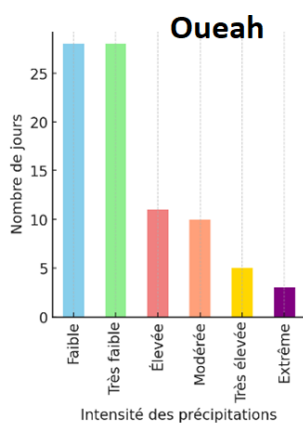
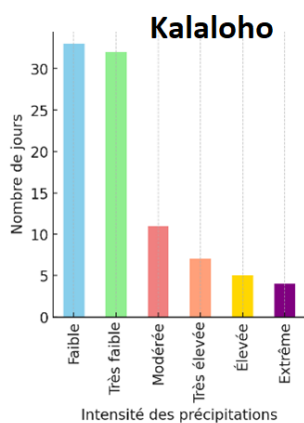
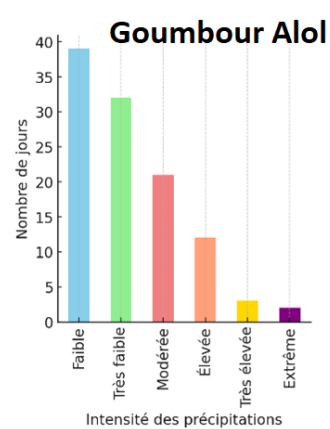
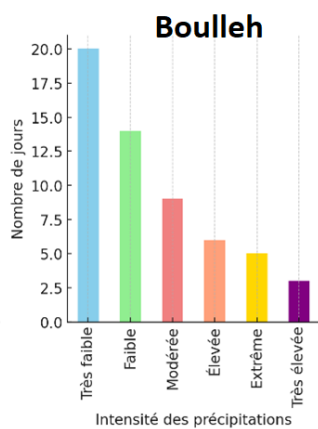
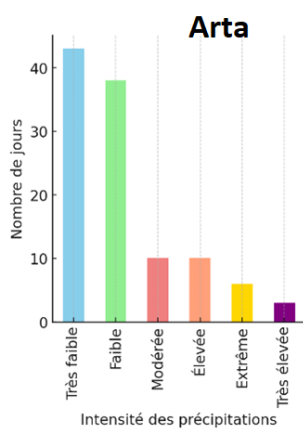
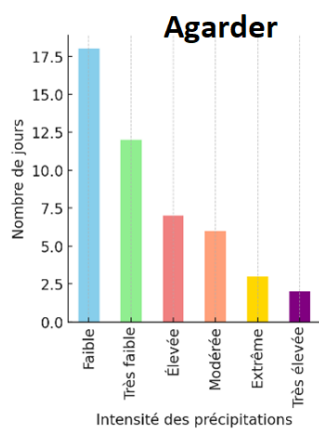


Station SAP (période de 2008-2013)

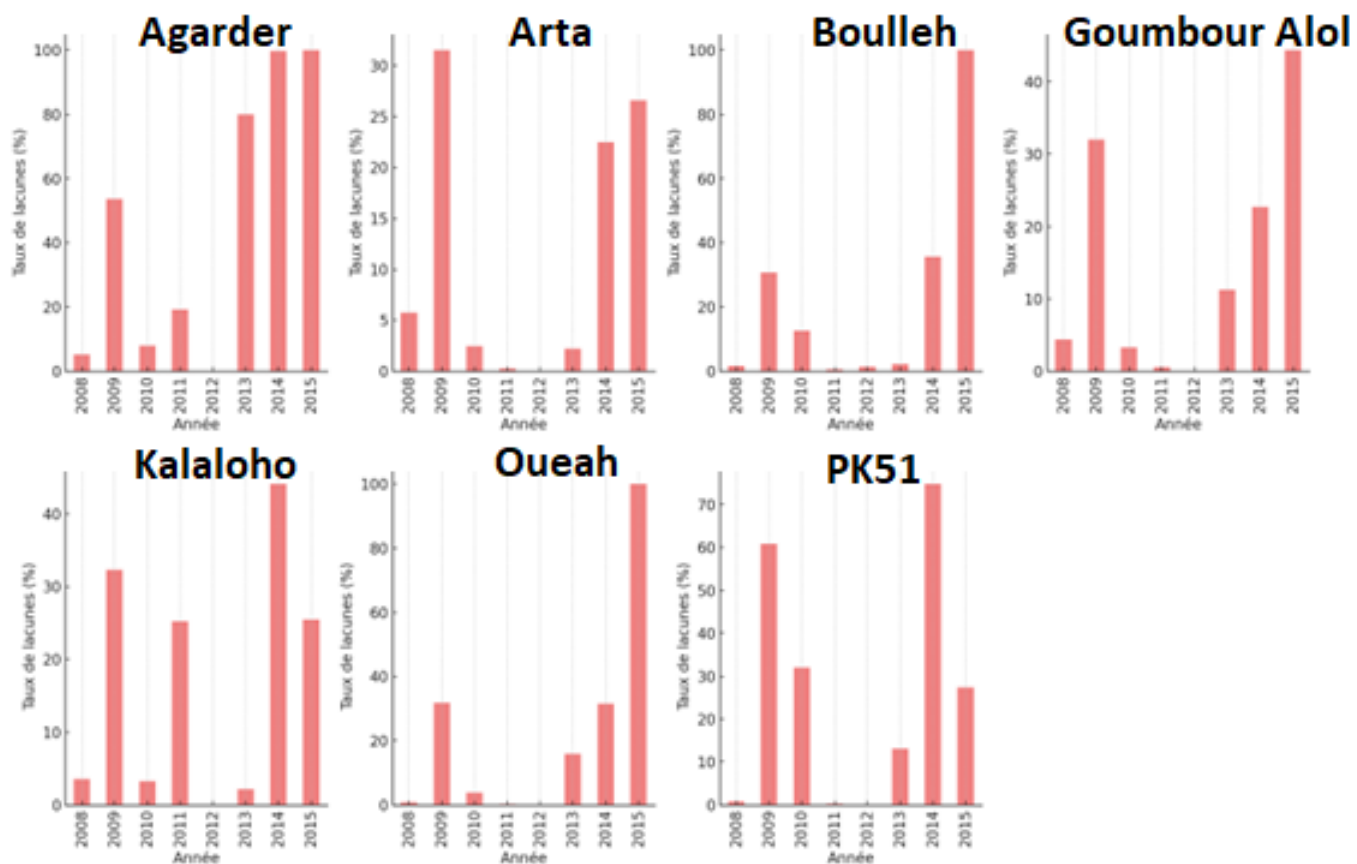
La distribution des pluies journalière



La classification des jours de pluie

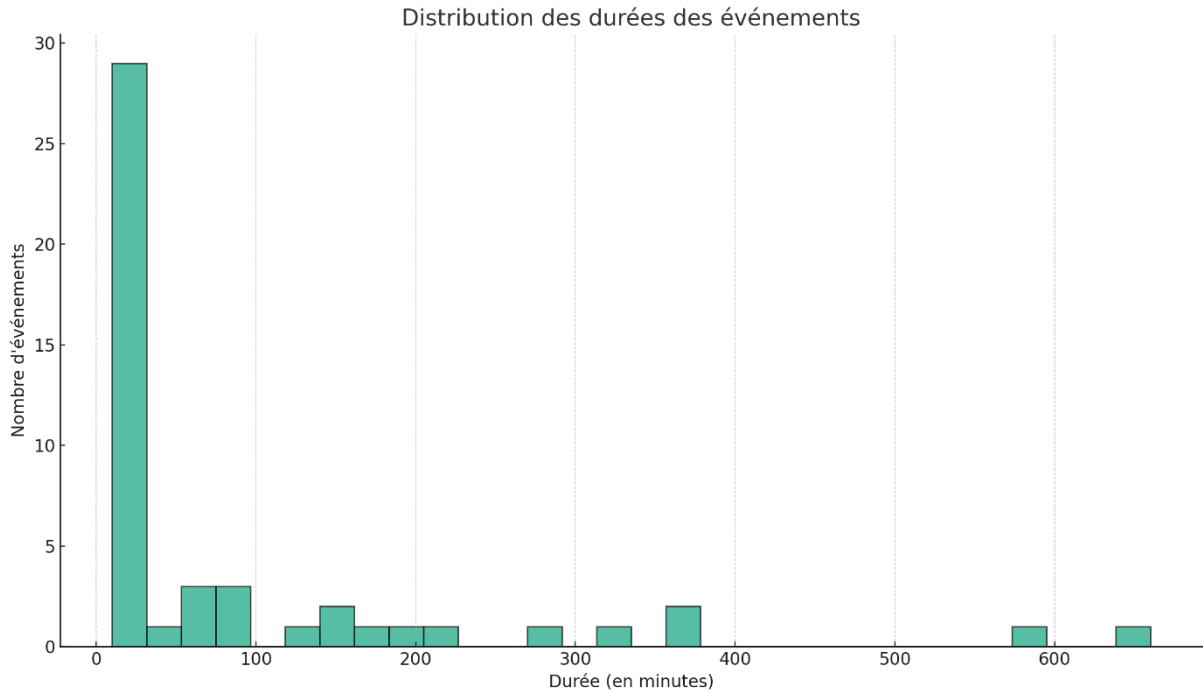
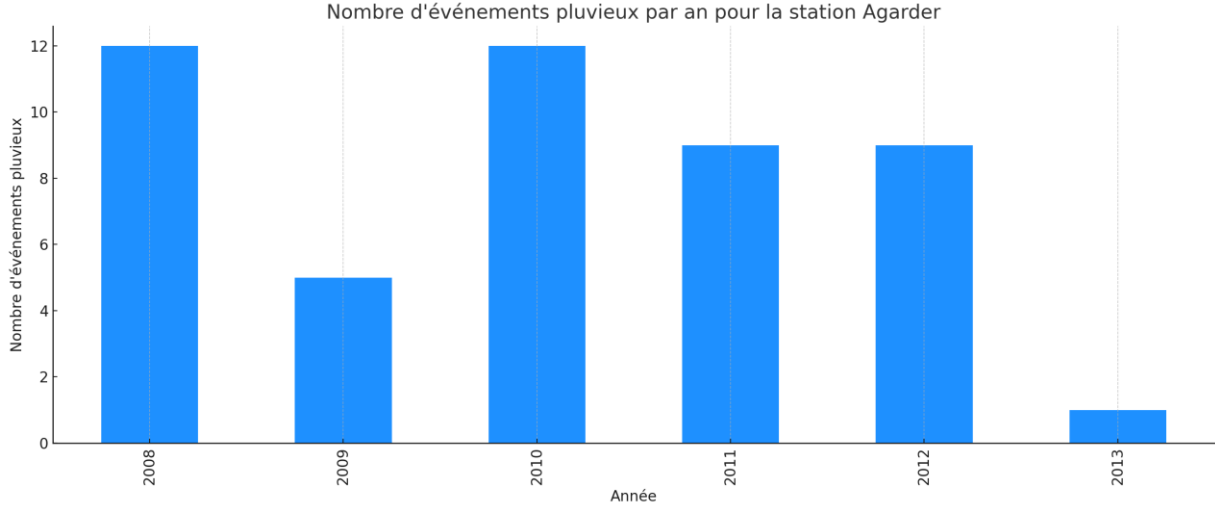


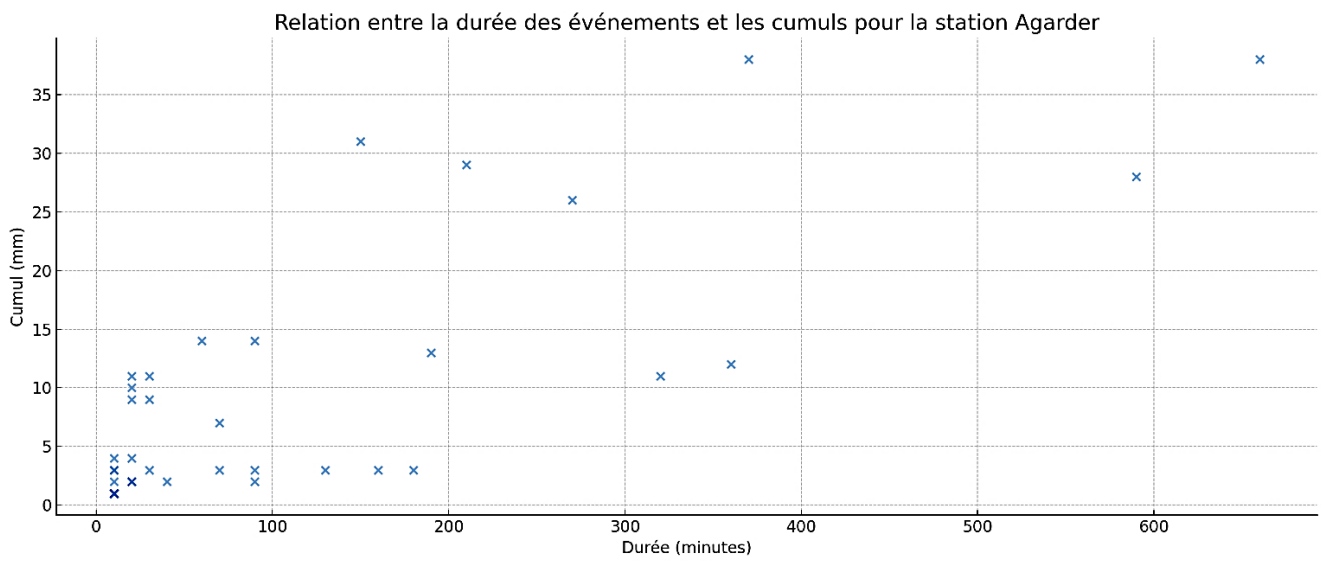
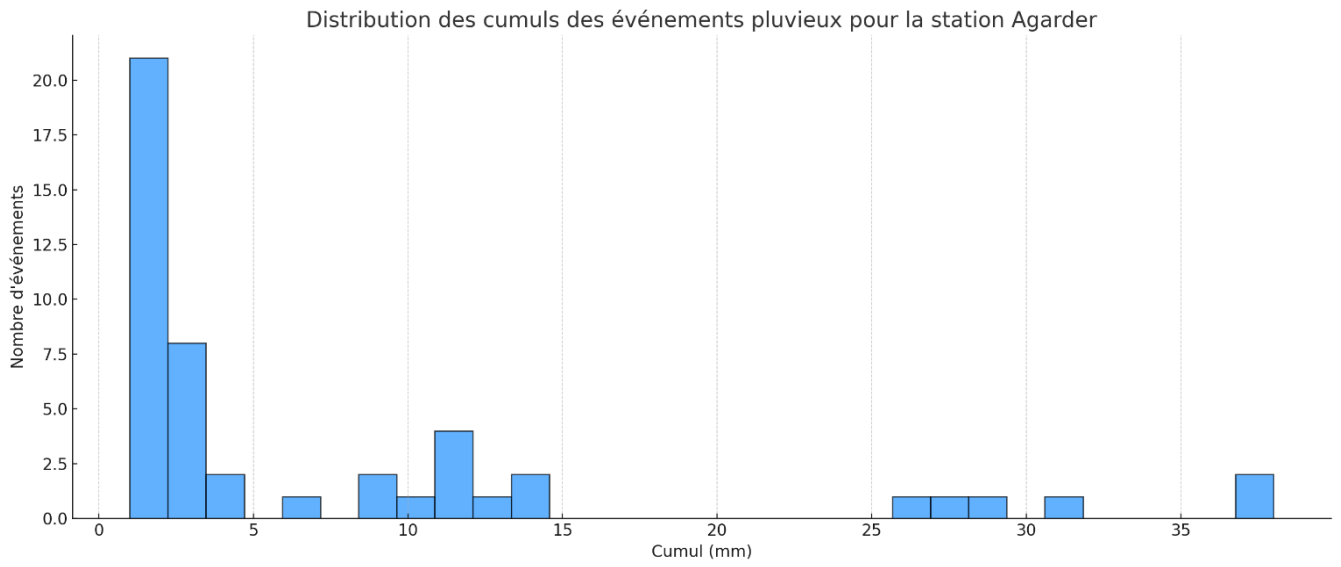
Le taux de lacune



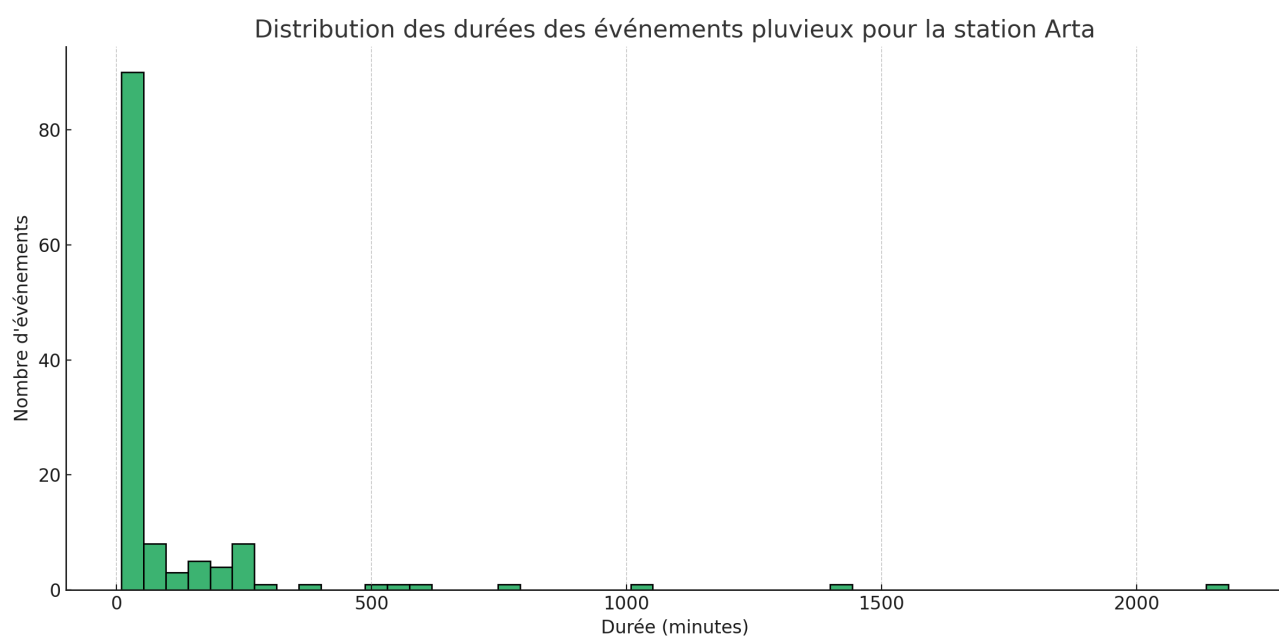
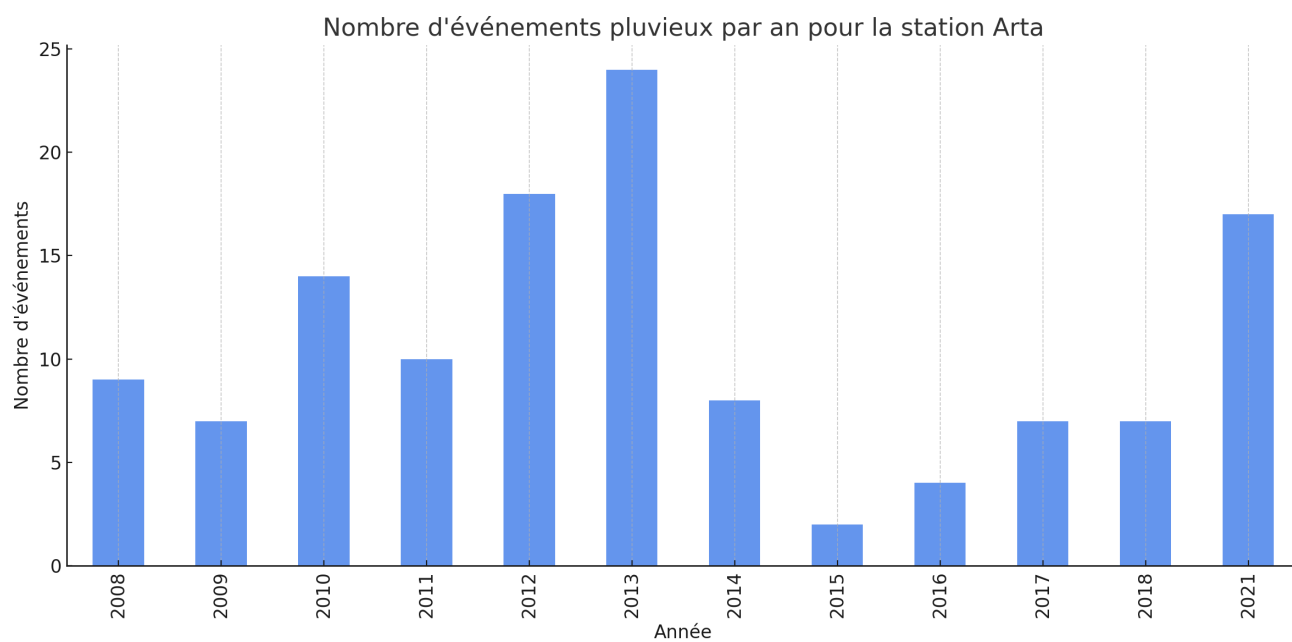
Analyse detaillee au pas de temps journalier des stations SAP (2008-2013) ; station par stations

Station Agarder

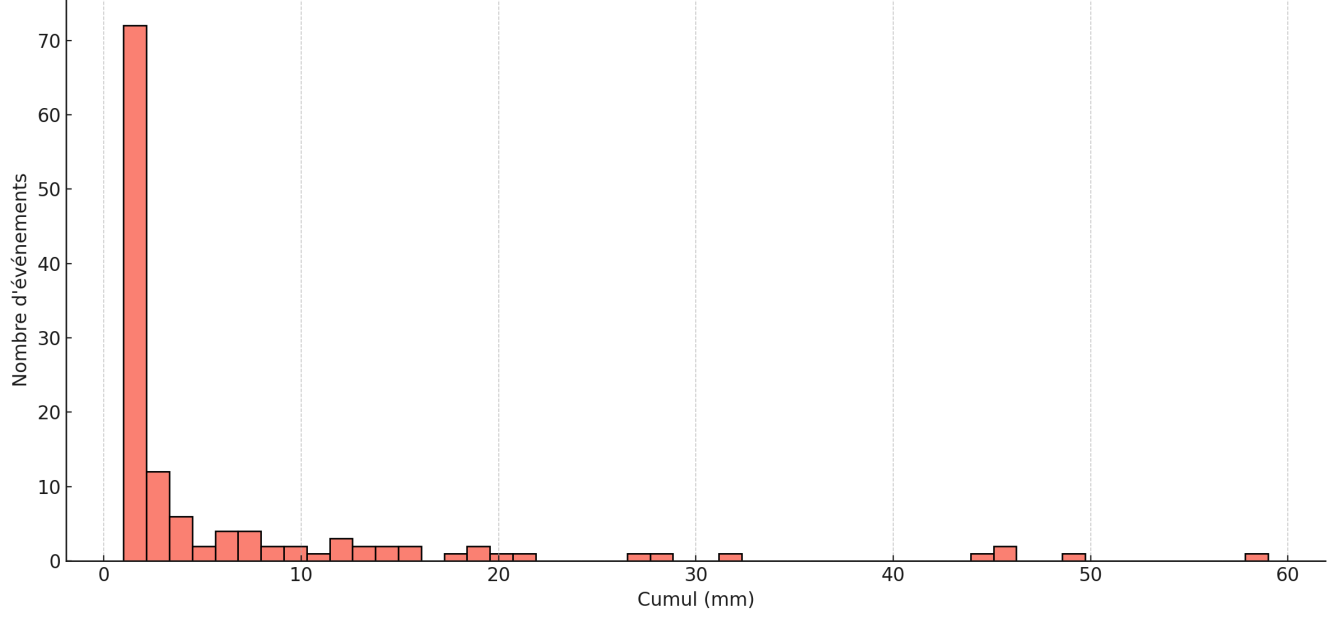




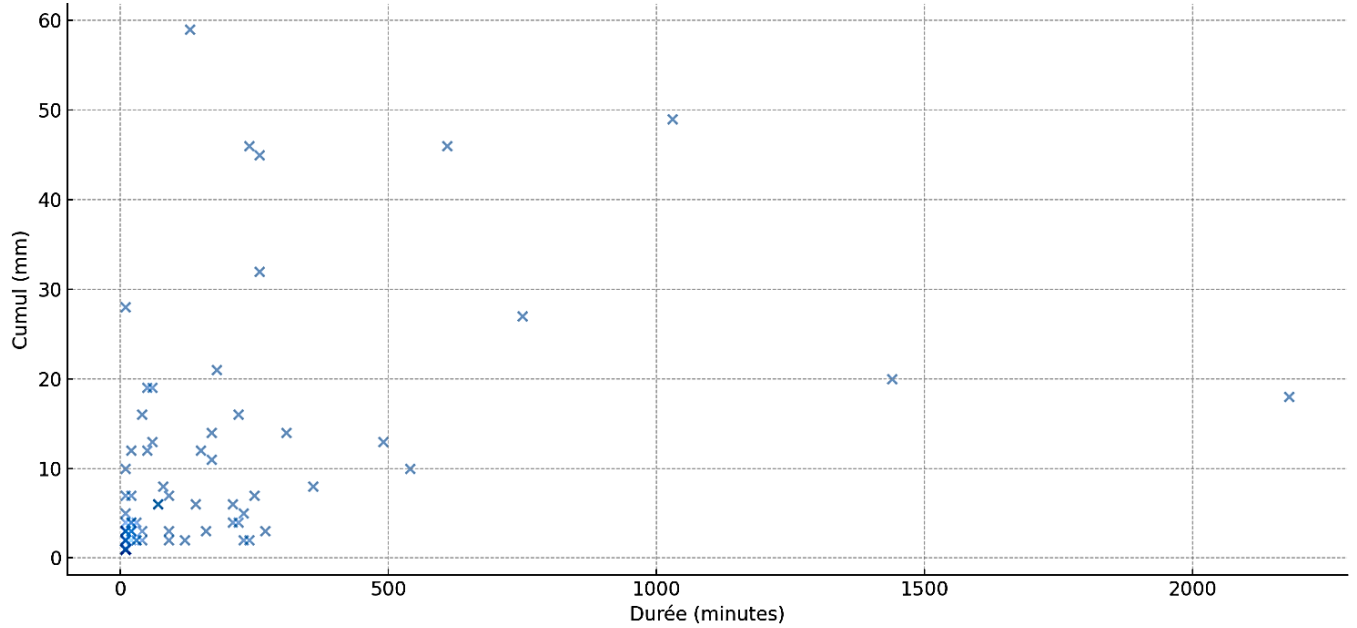
Station Arta



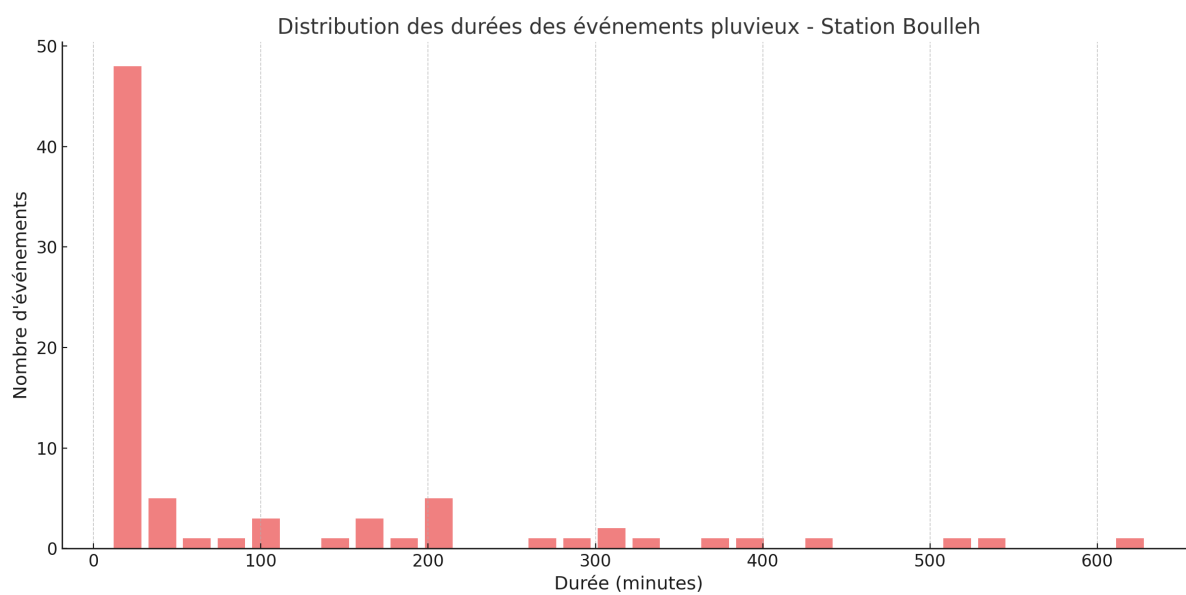
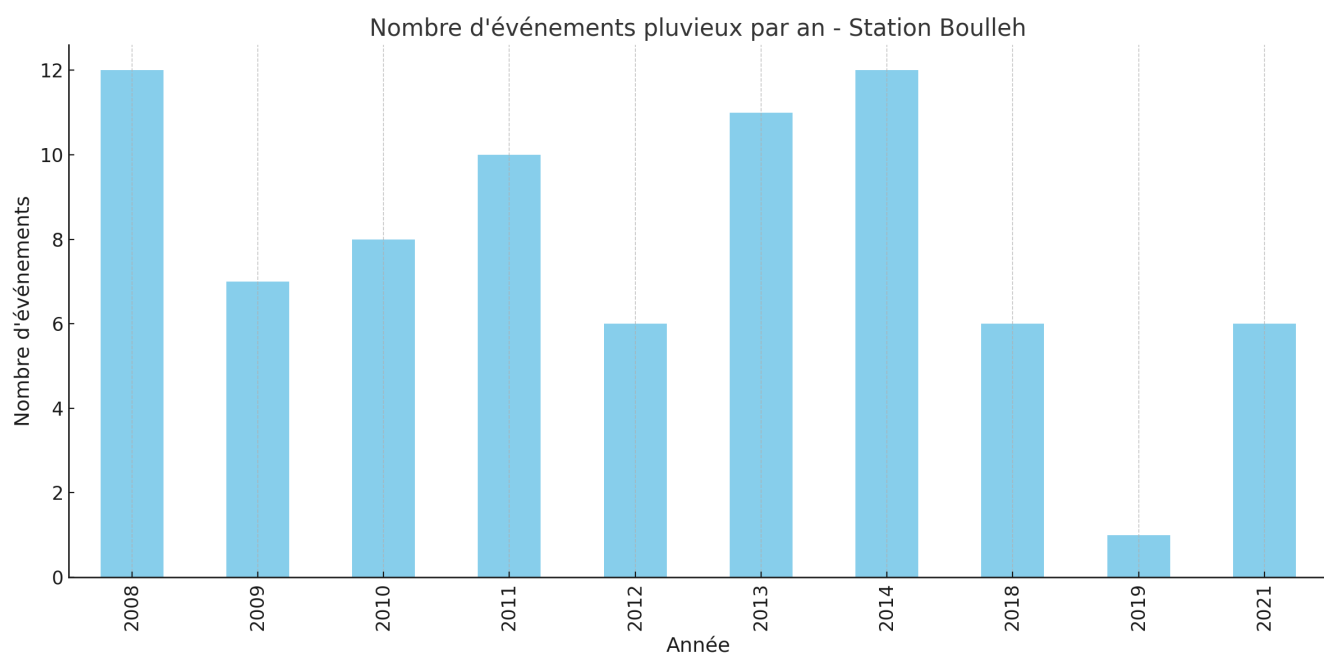
Distribution des cumuls des événements pluvieux pour la station Arta

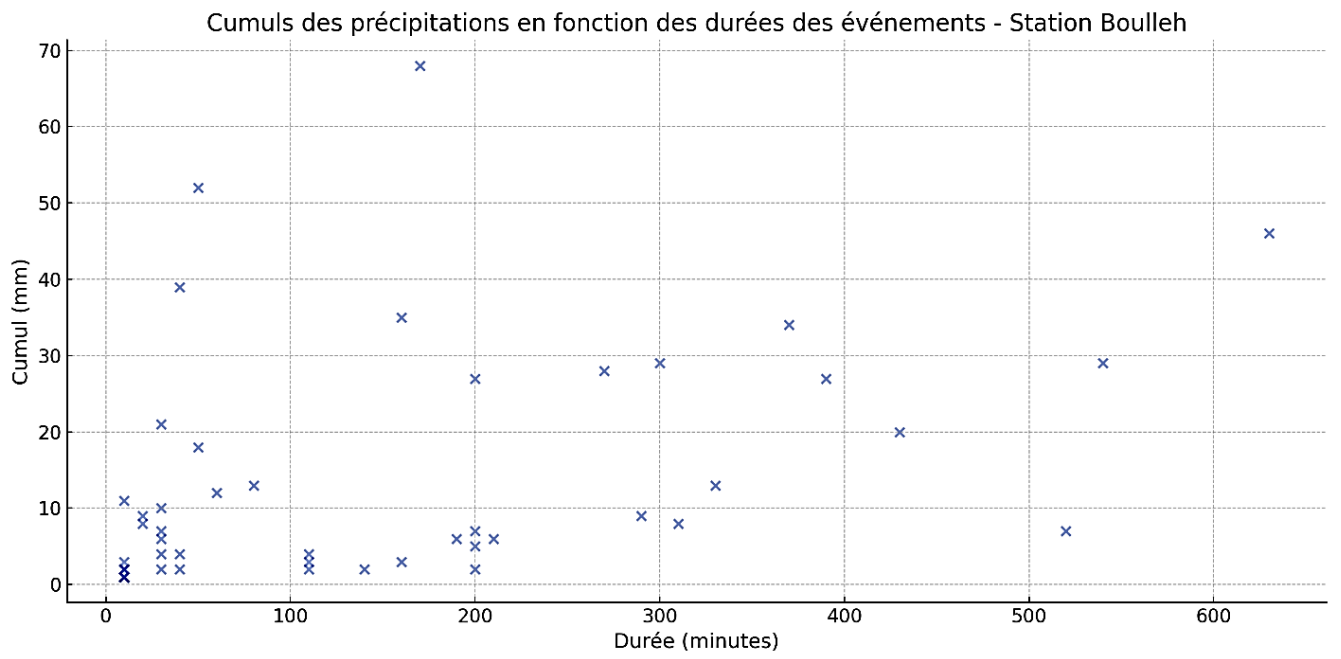
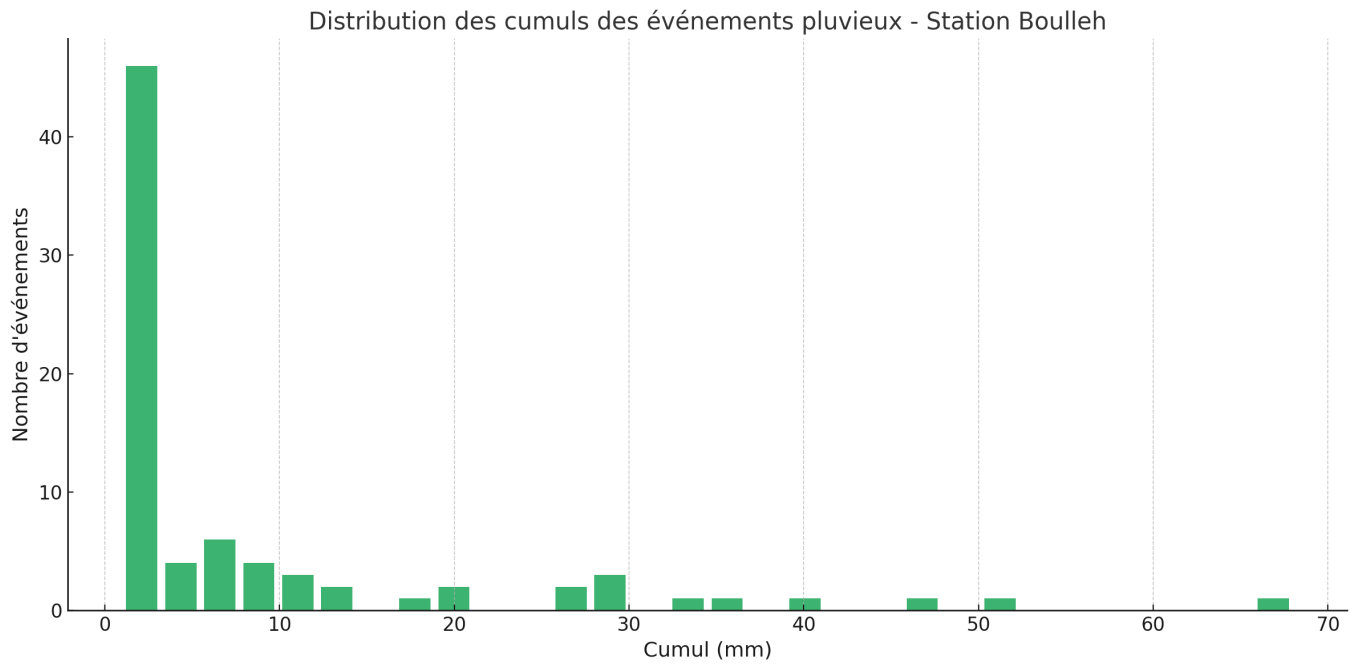


Relation entre la durée et le cumul des événements pluvieux pour la station Arta

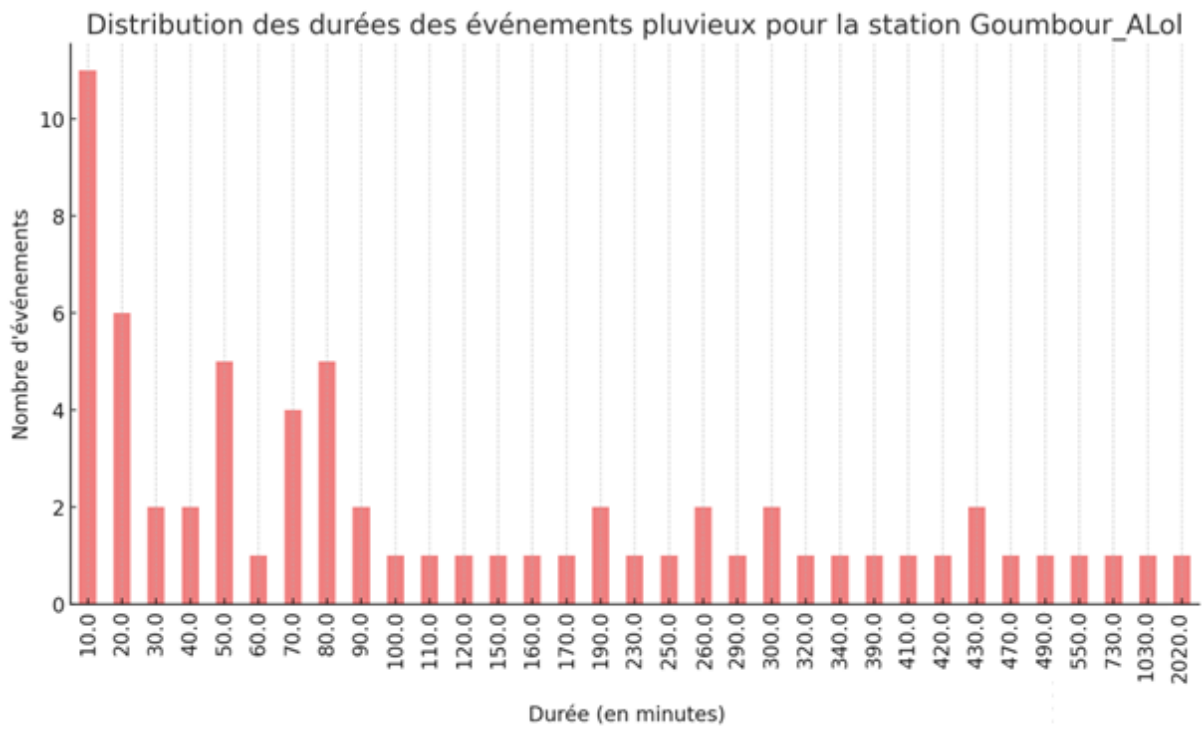
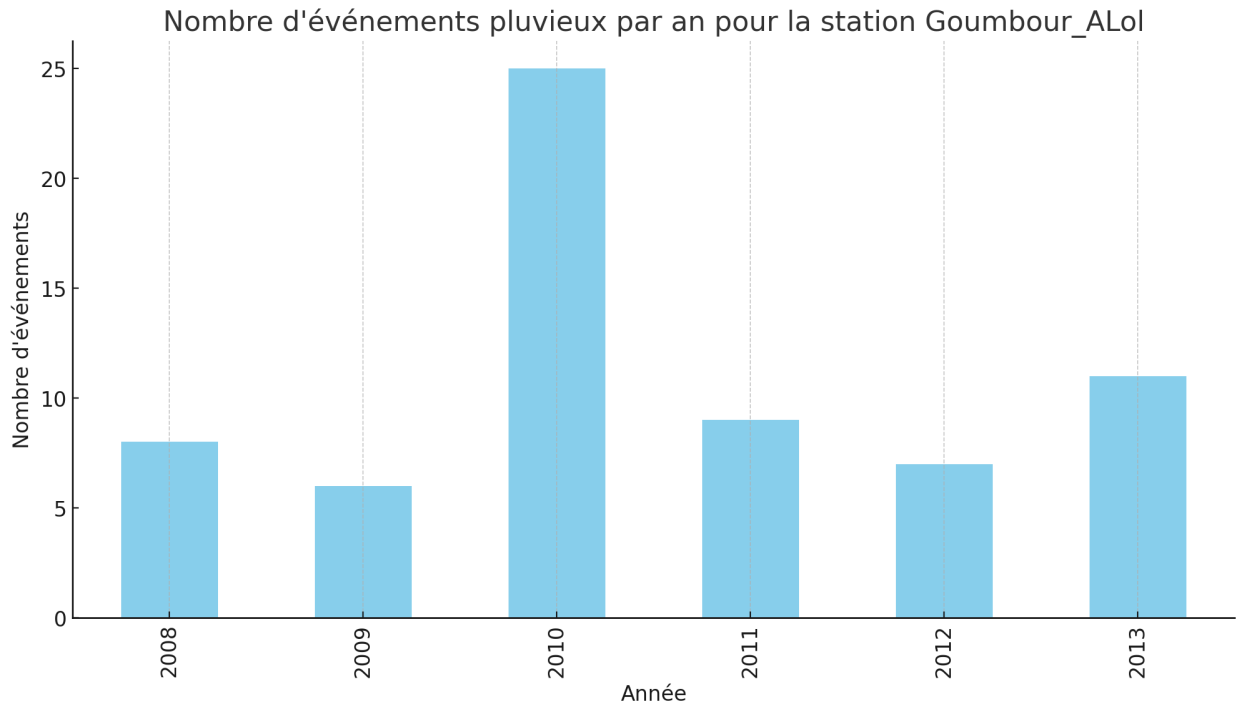


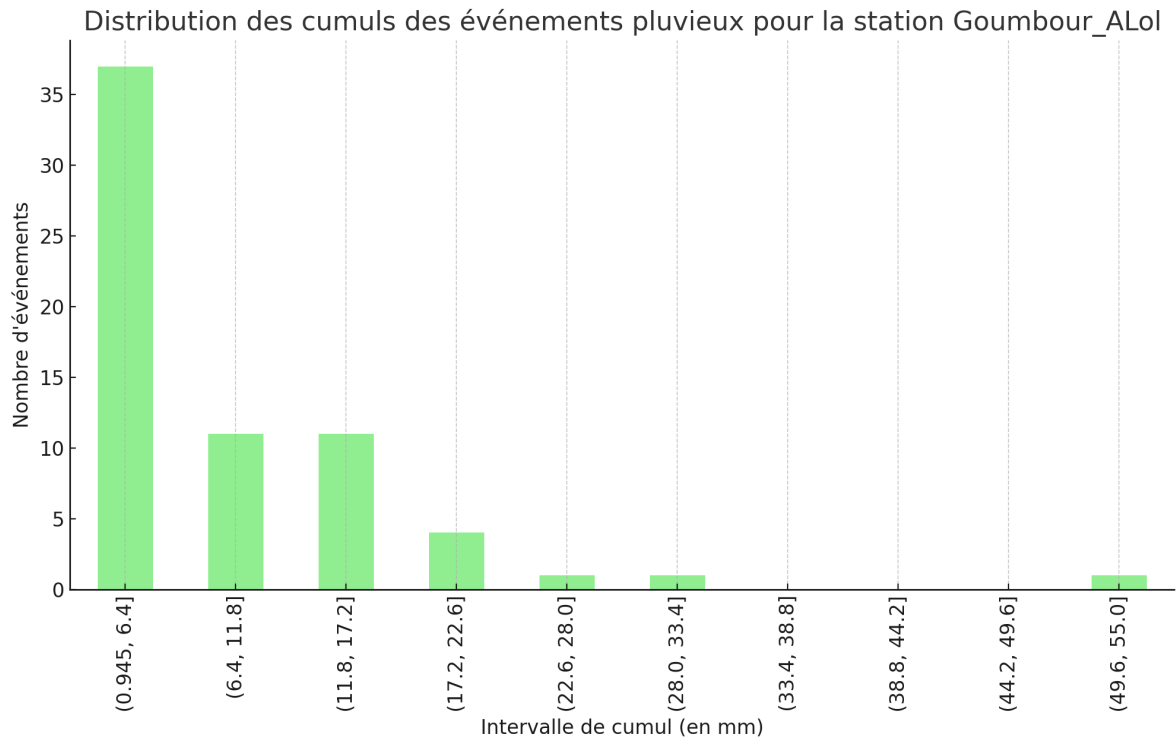
Station Boulelh



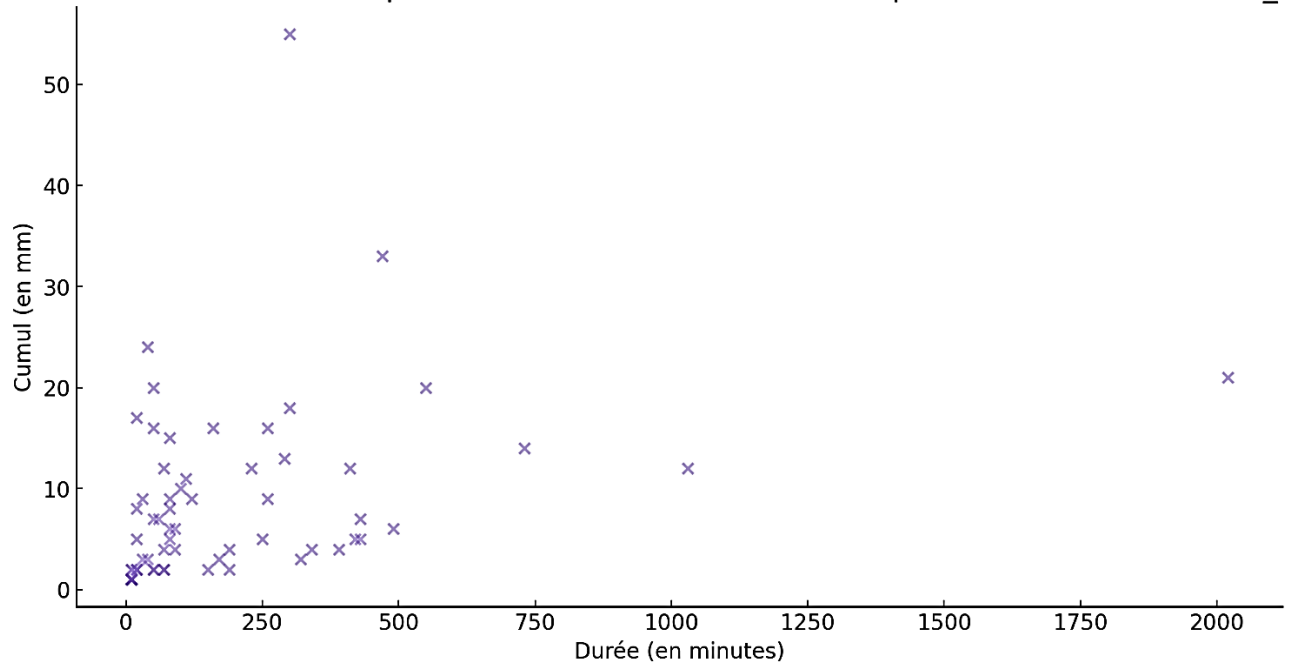


Station Goumbour Alol

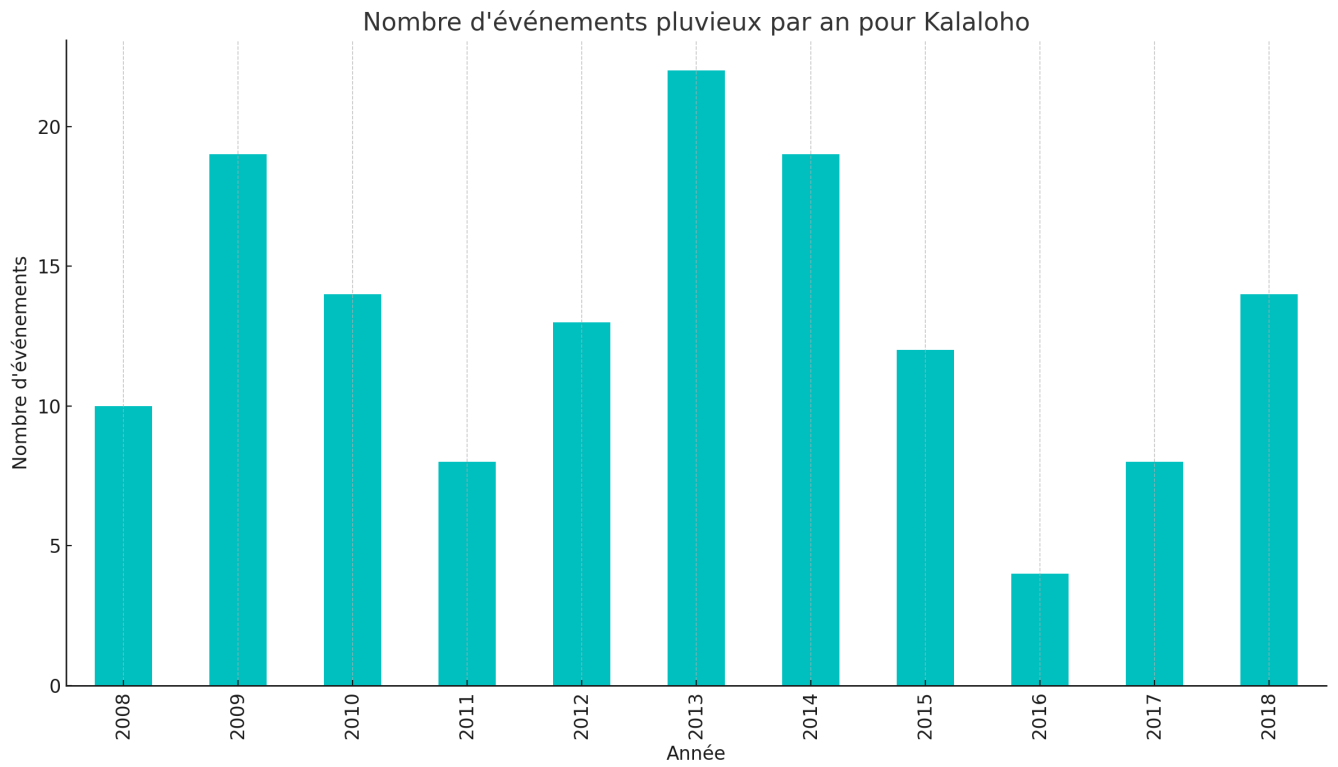


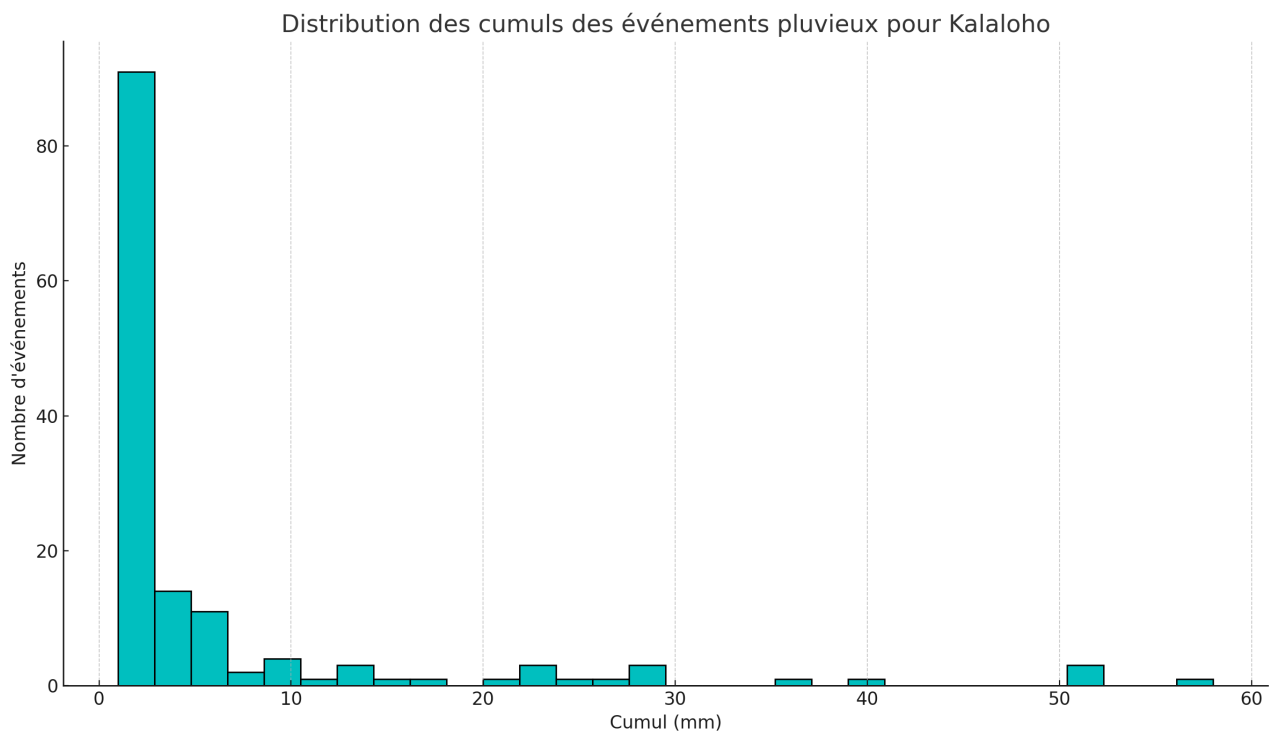
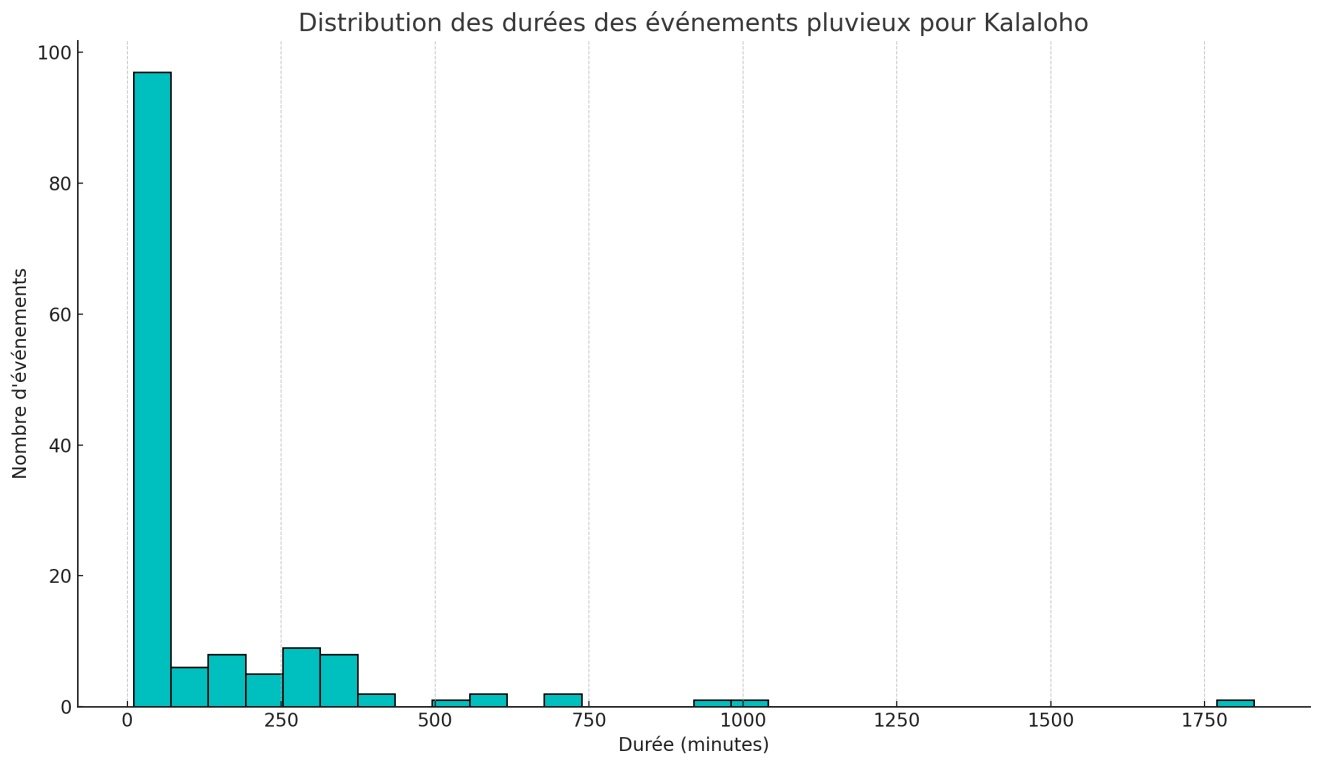


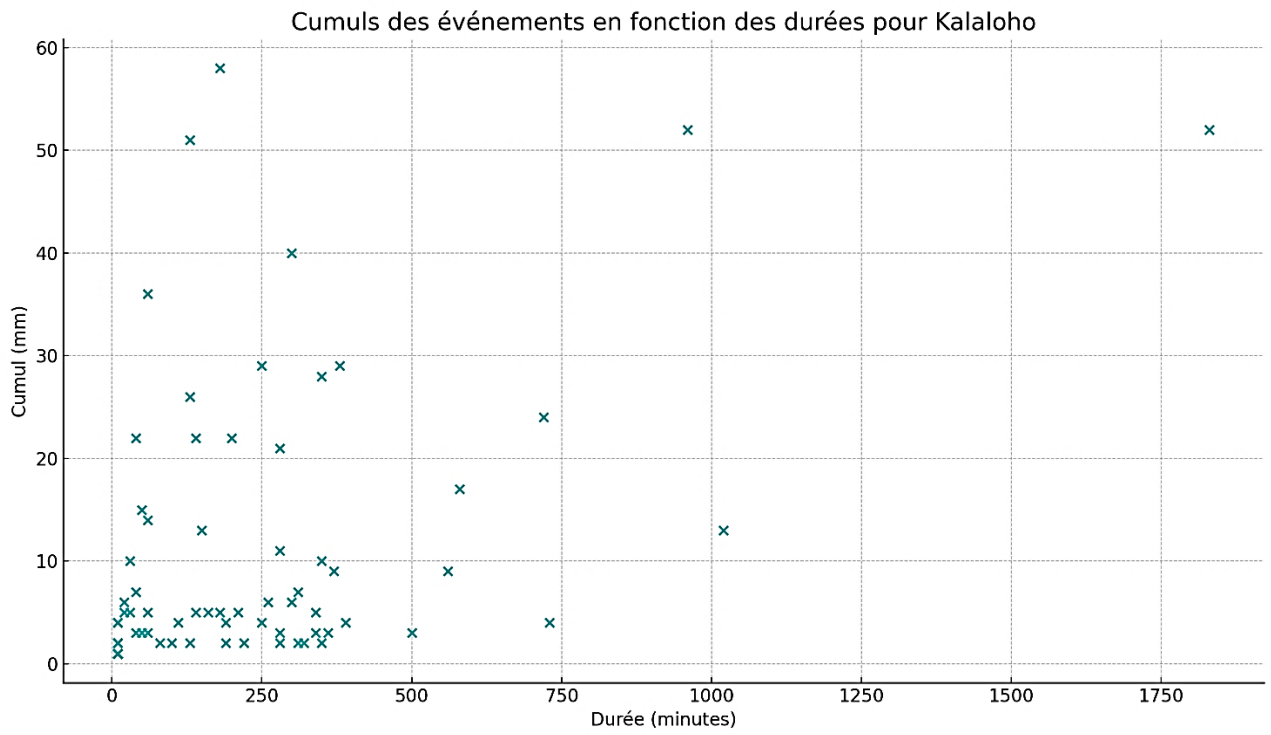
Cumuls des événements pluvieux en fonction de leur durée pour la station Goumbour_ALoI



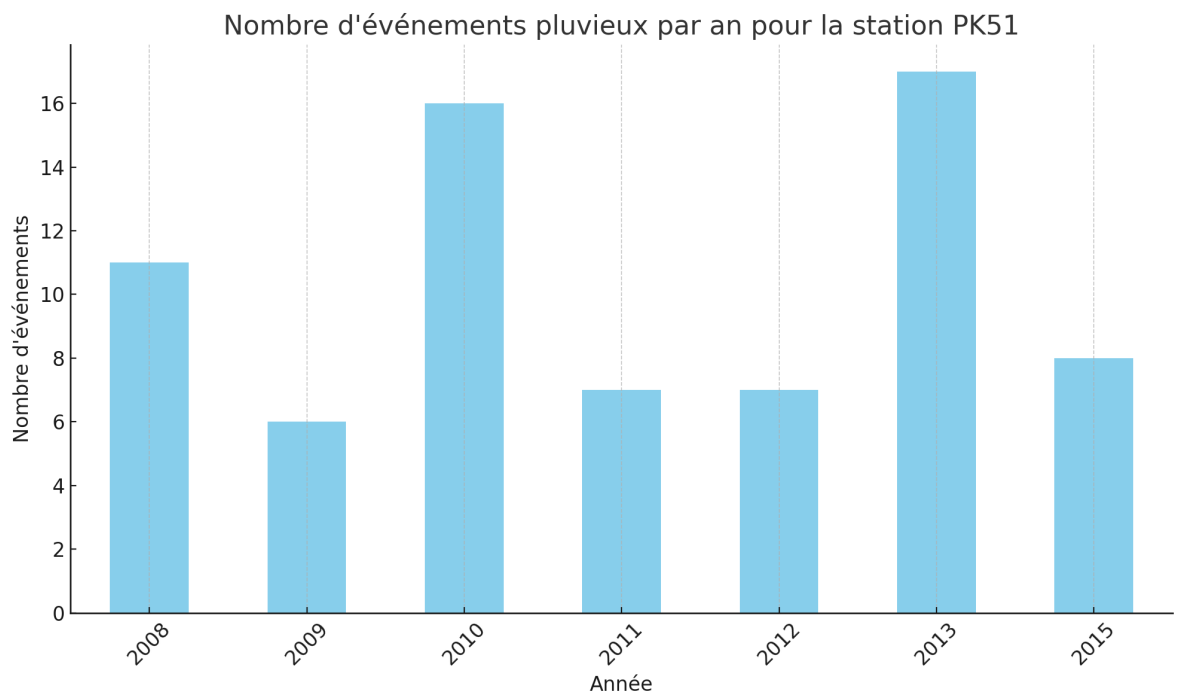
Station Kalaloho



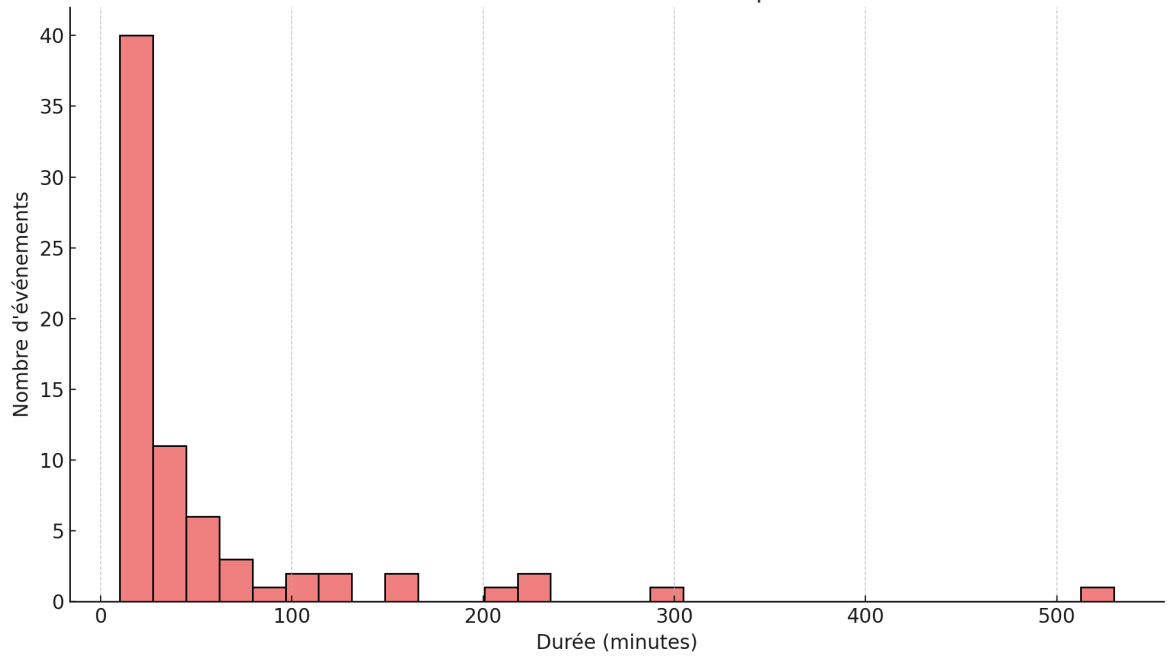




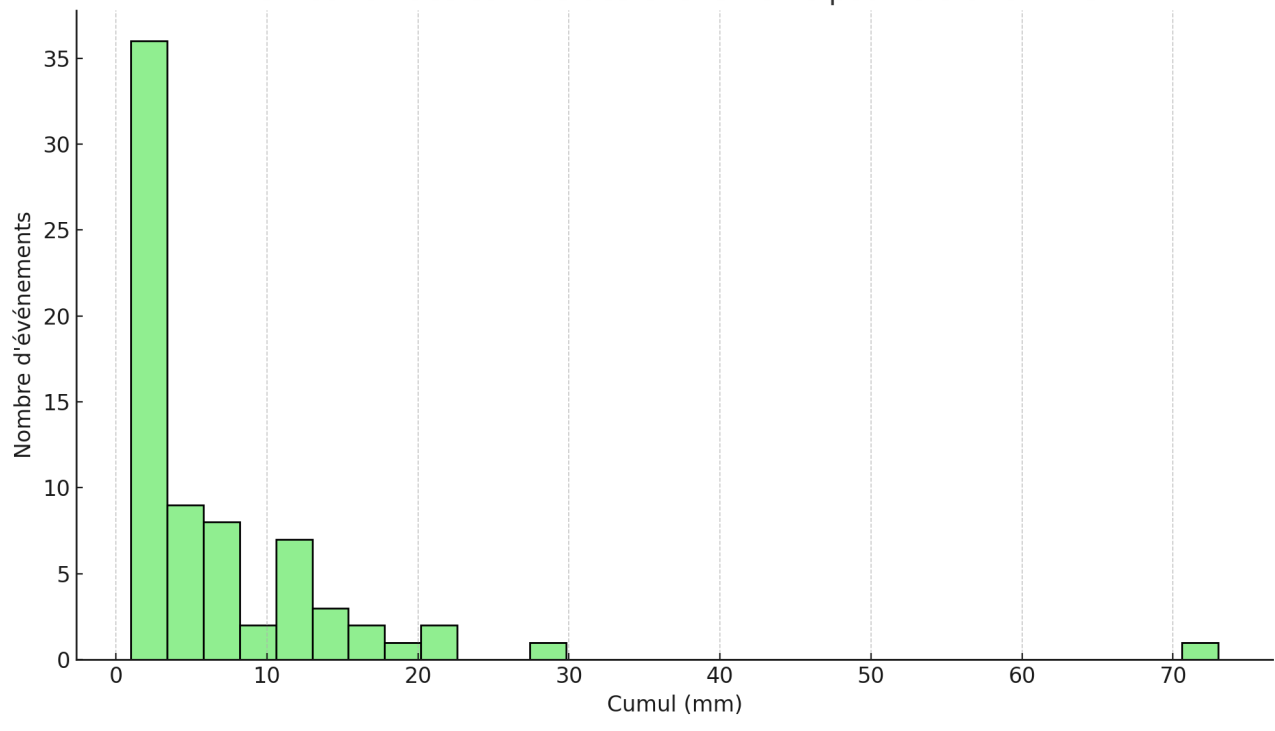
Station PK51

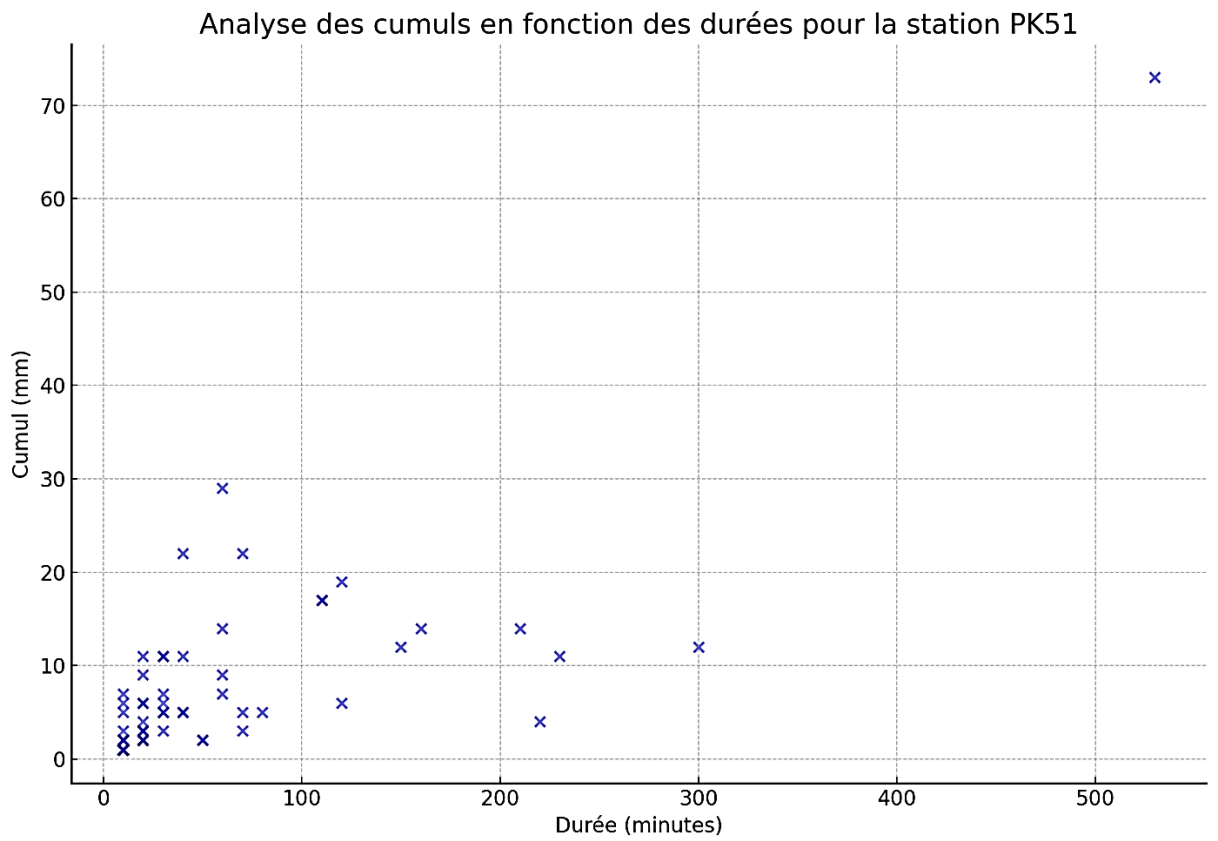


Distribution des durées des événements pour la station PK51

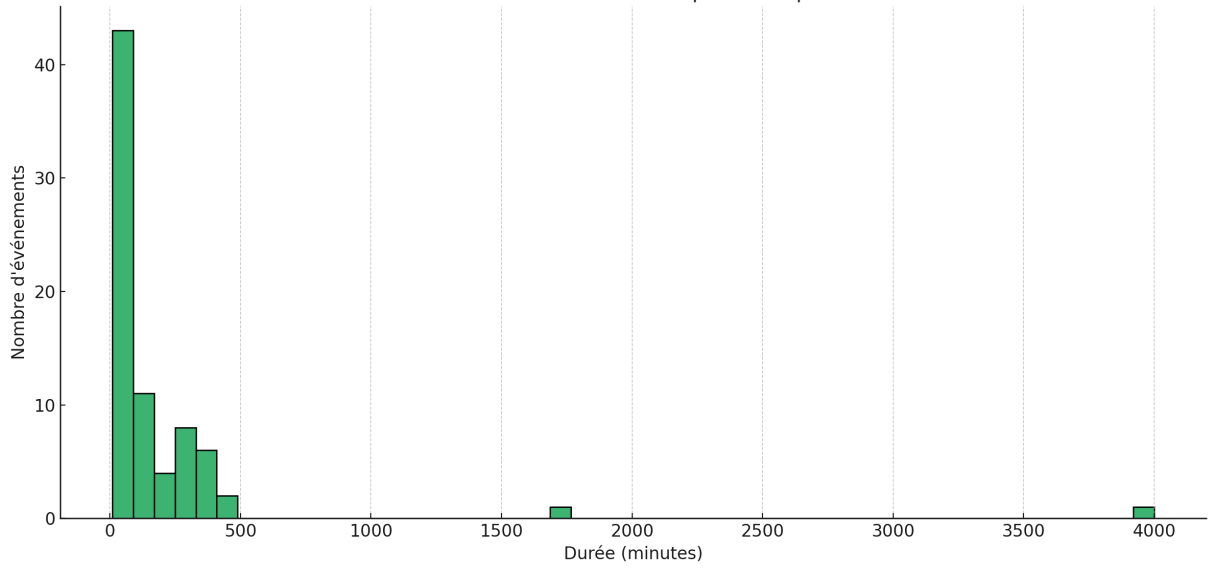


Distribution des cumuls des événements pour la station PK51

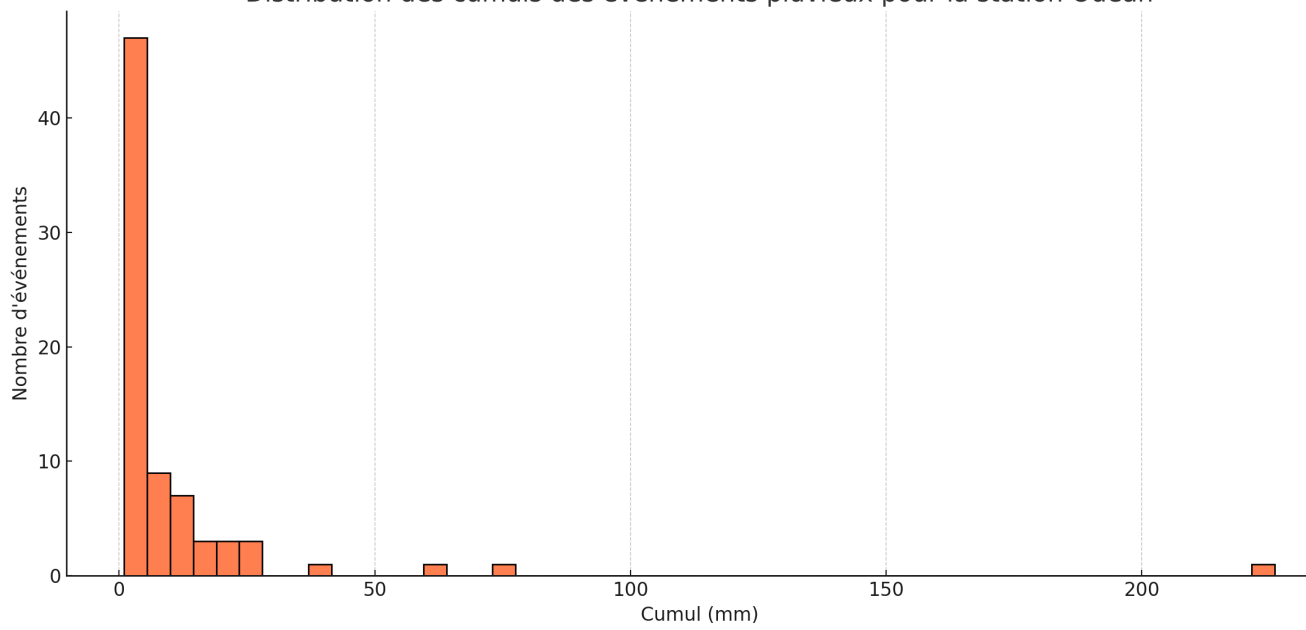


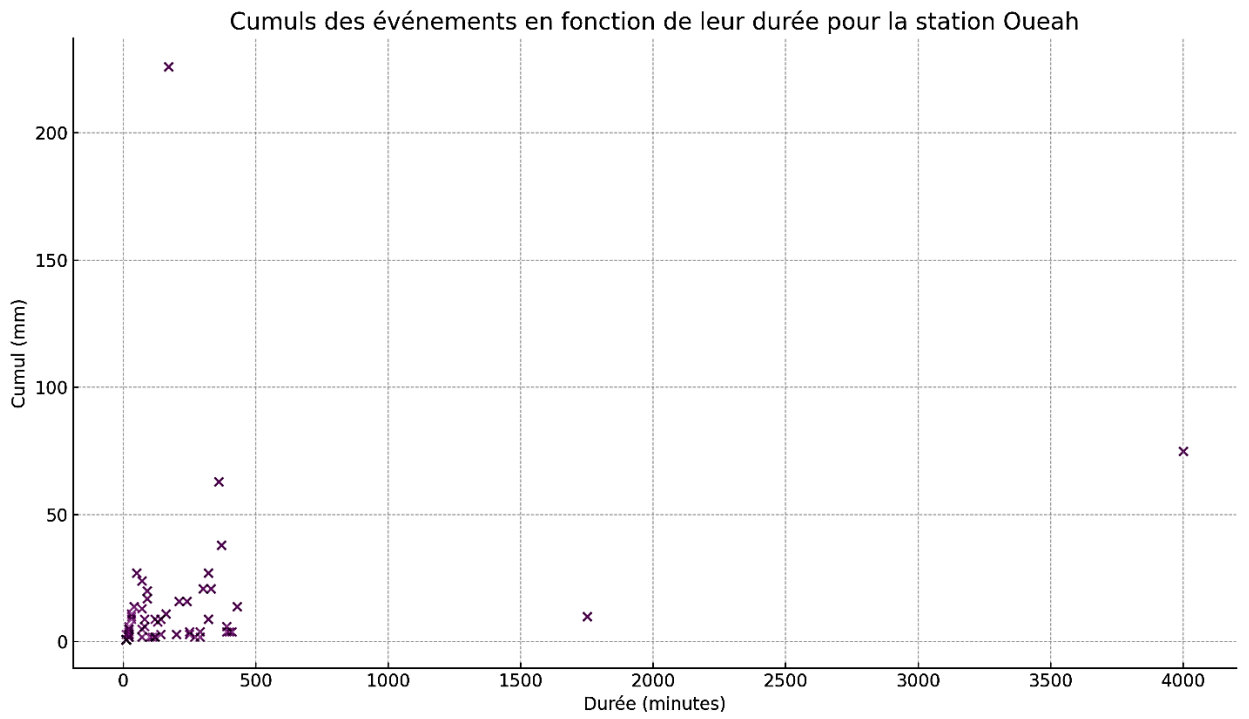


Distribution des durées des événements pluvieux pour la station Oueah



Distribution des cumuls des événements pluvieux pour la station Oueah





Annexe Chapitre 6/1 : Hydrologie

Données disponibles

Station Oueah

Date et heure DEBUT	Date et heure FIN	Temps de montée (min)	Durée de la crue (min)	Débit de pointe (m3/s)	Débit de pointe spécifique (l/s/km2)	Lame d'eau écoulée (mm)	Lame d'eau ruissellée (mm)
Année 1980							
	(incomplète)						
31/05/80 à 23 h 24	03/06/80 à 10 h 01	144	3517	3,30	14	0,36	0,36
10/09/80 à 16 h 59	11/09/80 à 24 h 00	7	1861	34,00	142	0,58	0,56
30/09/80 à 22 h 19	02/10/80 à 07 h 56	42	2017	0,88	4	0,05	0,05
02/10/80 à 21 h 38	03/10/80 à 19 h 58	6	1340	0,64	3	0,03	0,03
Année 1981							
16/03/81 à 08 h 09	17/03/81 à 05 h 19	47	1270	34,00	142	0,71	0,69
18/03/81 à 08 h 22	20/03/81 à 05 h 16	248	2694	69,70	290	3,54	3,49
27/03/81 à 14 h 59	27/03/81 à 21 h 01	13	362	4,60	19	0,11	0,11
28/03/81 à 13 h 17	29/03/81 à 10 h 10	36	1253	88,70	370	2,42	2,37
12/08/81 à 19 h 29	13/08/81 à 20 h 12	43	1337	6,68	28	0,11	0,11
13/09/81 à 07 h 39	13/09/81 à 14 h 41	55	422	7,56	32	0,11	0,11
15/09/81 à 15 h 36	16/09/81 à 03 h 52	19	736	9,16	38	0,23	0,21
17/09/81 à 16 h 54	18/09/81 à 17 h 19	25	542	105,00	438	1,38	1,36
24/09/1981	26/09/1981		3355				
Année 1982							
	(incomplète)						

15/01/82 à 06 h 23	17/01/82 à 23 h 43	43	3920	62,10	259	1,24	1,24
29/03/82 à 04 h 48	30/03/82 à 11 h 31	60	1843	8,00	33	0,19	0,19
31/03/82 à 08 h 05	04/04/82 à 00 h 07	115	5282	102,00	425	11,90	11,90
Année 1983	(incomplète)						
22/04/83 à 17 h 44	24/04/83 à 01 h 18	68	1894	31,30	130	1,27	1,27
18/05/83 à 14 h 44	21/05/83 à 01 h 01	148	3497	17,30	72	2,35	2,35
22/05/83 à 16 h 26	26/05/83 à 04 h 16	8	5027	36,10	150	2,86	2,86
Année 1984	(incomplète)						
11/05/84 à 08 h 34	13/05/84 à 13 h 04	97	3150	111	463	4,41	4,41
17/09/84 à 21 h 29	18/09/84 à 16 h 29	18	1140	91,9	383	2,05	2,02
09/12/84 à 13 h 29	10/12/84 à 02 h 31	211	782	93,5	390	4,9	4,9
Année 1985							
28/04/85 à 10 h 59	30/04/85 à 21 h 01	843	3482	4,90	20	1,69	1,69
05/05/85 à 15 h 29	07/05/85 à 02 h 31	13	2102	93,50	390	2,27	2,27
08/05/85 à 22 h 59	10/05/85 à 22 h 01	13	2822	4,30	18	0,99	0,99
24/05/1985	26/05/1985						
17/09/85 à 13 h 59	24/09/85 à 14 h 31	157	10112	43,70	182	6,74	6,74
		48	4544	43,70	182	4,55	
		12	1426	37,10	155	1,12	
		6	2812	19,40	81	0,96	
Année 1986	(incomplète)						
02/06/86 à 11 h 29	03/06/86 à 17 h 01	48	1772	48,50	202	1,31	1,31
21/08/86 à 11 h 29	23/08/86 à 03 h 31	133	2402	5,20	22	1,03	1,03

Année 1987							
14/03/87 à 04 h 14	14/03/87 à 22 h 46	43	1112	161,00	671	10,55	10,55
09/05/87 à 14 h 14	10/05/87 à 20 h 46	7	1832	74,40	310	2,34	2,34
		7	229	74,40	310	1,12	
		6	1431	27,90	116	1,21	
17/09/87 à 00 h 14	03/10/87 à 10 h 53			8,00	33	2,23	
		7	2372	1,68	7	0,49	
		163	2672	3,34	14	0,78	
		3324	3692	8,00	33	0,96	
Année 1988 (incomplète)							
03/01/88 à 01 h 59	03/01/88 à 10 h 01	13	482	0,36	2	0,03	0,03
21/04/88 à 03 h 19	25/04/88 à 13 h 41	691	6382	5,80	24	2,79	2,79
24/08/88 à 08 h 39	25/08/88 à 12 h 20	96	1661	153,00	638	5,55	5,27
04/09/88 à 09 h 20	04/09/88 à 23 h 51	12	871	2,00	8	0,15	0,15
16/09/88 à 11 h 39	19/09/88 à 07 h 21	70	4062	12,50	52	1,73	1,73
21/09/88 à 19 h 09	25/09/88 à 14 h 21	2168	5472	3,98	17	1,00	1,00
		7	1697	3,00	13	0,30	
		6	3310	3,98	17	0,67	
01/10/88 à 20 h 19	04/10/88 à 22 h 01	13	4422	35,00	146	2,25	2,25
09/10/88 à 11 h 09	11/10/88 à 19 h 21	45	3372	3,00	13	0,83	0,83
Année 1989 (incomplète)							
18/03/89 à 07 h 59	21/03/89 à 05 h 31	76	4172	143,00	596	7,58	7,58
01/04/89 à 06 h 59	06/04/89 à 13 h 29	349	7590	161,00	671	18,93	18,93

25/06/89 à 01 h 29	26/06/89 à 23 h 01	72	2732	11,40	48	1,78	1,78
17/09/89 à 14 h 59	18/09/89 à 18 h 31	7	1652	104,00	433	1,38	1,38
10/12/89 à 13 h 59	12/12/89 à 00 h 08	49	2049	114,00	475	2,00	1,91
		49	757	114,00	475	1,31	1,27
		12	625	42,60	178	0,63	0,58
Année 1990	(incomplète)						
20/01/90 à 10 h 29	21/01/90 à 21 h 54	85	2125	75,90	316	8,33	8,19
07/02/90 à 09 h 29	10/02/90 à 17 h 01	1825	4772	13,60	57	1,94	1,94
19/02/90 à 16 h 59	24/02/90 à 13 h 15	2227	6976	138,00	575	13,34	13,34
		79	1741	45,60	190	5,74	5,52
		6	4755	138,00	575	7,53	7,31
26/09/90 à 15 h 59	29/09/90 à 17 h 31	4	4412	171,00	713	7,58	7,58
30/09/90 à 21 h 59	03/10/90 à 09 h 31	1126	3572	33,00	138	1,46	1,46
Année 2008							
07/05/2008 à 00 h 13	07/05/2008 à 09 h 35	2	562	175,30	390		
10/05/2008 à 23 h 41	10/05/2008 à 00 h 00	3	19	136,30	303		
12/05/2008 à 23 h 46	13/05/2008 à 00 h 30	8	44	138,60	308		
04/06/2008 à 01 h 25	04/06/2008 à 02 h 16	1	51	87,90	195		
10/09/2008 à 23 h 57	11/09/2008 à 02 h 19	5	142	114,70	255		
16/09/2008 à 09 h 36	16/09/2008 à 19 h 19	6	583	104,70	233		
17/09/2008 à 01 h 08	17/09/2008 à 19 h 11	6	510	160,10	356		

26/09/2008 à 00 h 59	26/09/2008 à 10 h 33	72	573	170,15	378		
02/10/2008 à 15 h 07	02/10/2008 à 21 h 47	97	400	95,20	212		
03/10/2008 à 15 h 52	03/10/2008 à 23 h 21	164	448	104,70	233		
05/10/2008 à 15 h 09	05/10/2008 à 23 h 27	216	477	123,01	273		
08/10/2008 à 14 h 37	08/10/2008 à 19 h 14	271	276	580,01	1289		
03/11/2008 à 00 h 01	03/11/2008 à 06 h 34	67	321	104,60	232		
03/11/2008 à 17 h 36	04/11/2008 à 02 h 24	4	528	165,01	367		
04/11/2008 à 19 h 10	05/11/2008 à 05 h 40	70	629	254,00	564		
Année 2009	(incomplète)						
21/01/2009 à 13 h 45	21/01/2009 à 18 h 27	12	282	76,10	169		
26/01/2009 à 06 h 09	26/01/2009 à 19 h 14	4	713	131,80	293		
30/03/2009 à 22 h 41	31/03/2009 à 16 h 25	182	1064	229,06	509		
03/04/2009 à 23 h 26	04/04/2009 à 00 h 06	6	39	112,6	250		
11/10/2009 à 13 h 51	11/10/2009 à 17 h 22	133	210	394,4	876		
Année 2010	(incomplète)						
05/03/2010 à 10 h 00	05/03/2010 à 13 h 18	38	198	402,7	895		
15/04/2010 à 14 h 14	15/04/2010 à 22 h 50	154	516	199,7	444		
21/05/2010 à 11 h 19	21/05/2010 à 13 h 44	167	243	76,1	169		

25/05/2010 à 11 h 12	25/05/2010 à 15 h 54	42	282	77,7	173		
28/05/2010 à 12 h 40	28/05/2010 à 16 h 18	51	217	81,1	180		
03/06/2010 à 12 h 34	03/06/2010 à 17 h 46	118	311	108,6	241		
07/06/2010 à 10 h 35	07/06/2010 à 17 h 37	114	421	112,6	250		
18/06/2010 à 11 h 24	18/06/2010 à 17 h 37	100	372	110,6	246		
20/06/2010 à 10 h 40	20/06/2010 à 17 h 38	130	417	116,7	259		
02/07/2010 à 10 h 23	02/07/2010 à 18 h 30	285	487	138,5	308		
13/08/2010 à 06 h 23	13/08/2010 à 06 h 47	8	40	120,9	269		
Année 2011	(incomplète)						
18/05/2011 à 20 h 18	19/05/2011 à 01 h 39	13	320	235,2	523		
Année 2012	(incomplète)						
30/07/2012 à 10 h 34	30/07/2012 à 17 h 54	317	440	116,7	259		
06/08/2012 à 02 h 19	06/08/2012 à 05 h 49	118	209	214,1	476		

Volume d'eau Station Oueah

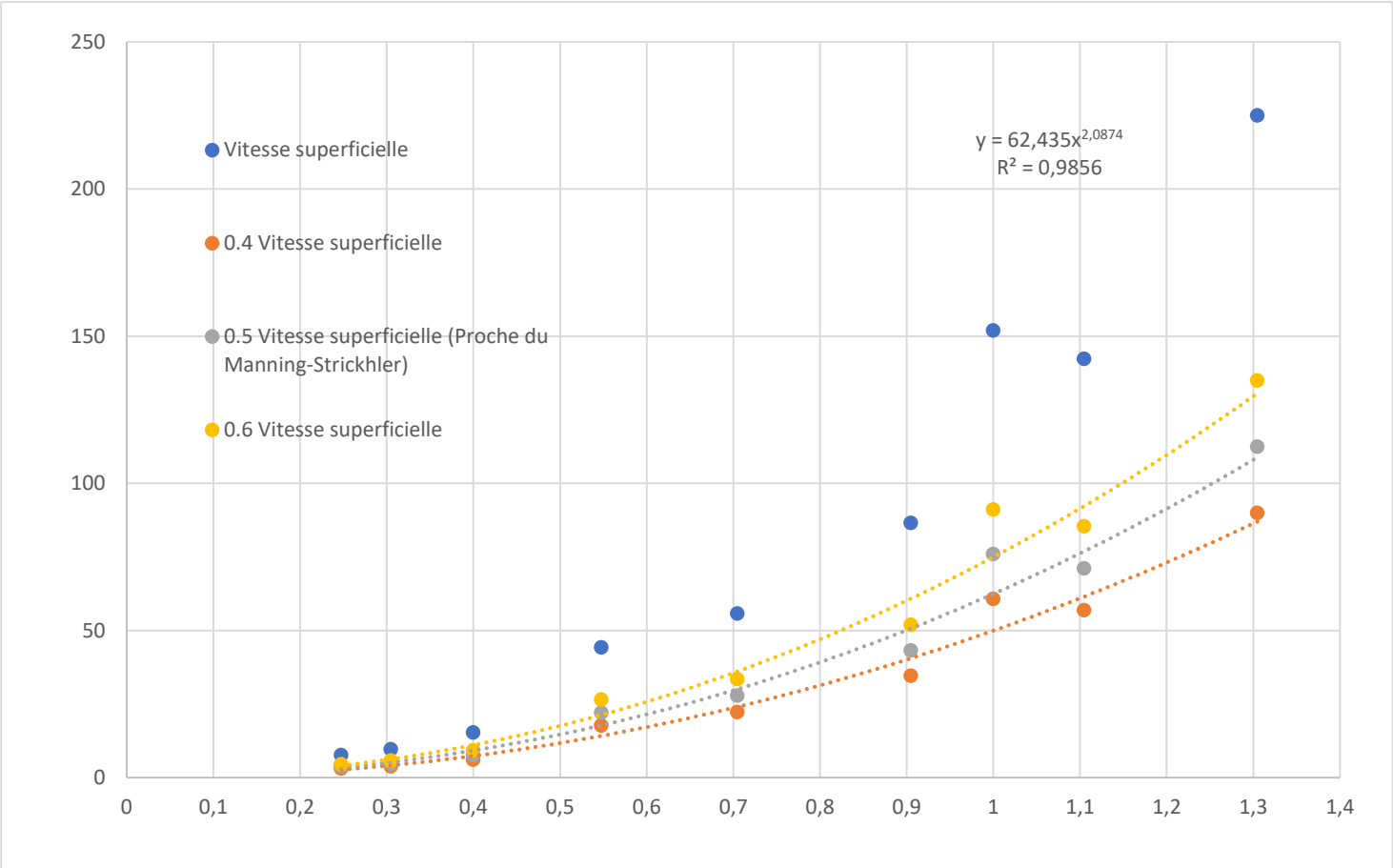
Date et heure DEBUT	Date et heure FIN	Volume écoulé (m3)	Volume évaporé (m3)	Volume infiltré (m3)	Hauteur d'infiltration (mm/j)	Cote maximal à l'échelle (m)
Année 1980		(incomplète)				
31/05/80 à 23 h 24	03/06/80 à 10 h 01	831000	64206	766794	100	0,27
10/09/80 à 16 h 59	11/09/80 à 24 h 00	681000	45900	635100	90	0,76
30/09/80 à 22 h 19	02/10/80 à 07 h 56	287000	19028	267972	60	0,19
02/10/80 à 21 h 38	03/10/80 à 19 h 58	175000	12144	162856	60	0,17
Année 1981		(incomplète)				
16/03/81 à 08 h 09	17/03/81 à 05 h 19	730000	27864	702136	90	0,76
18/03/81 à 08 h 22	20/03/81 à 05 h 16	2290000	40932	2249068	200	1,06
27/03/81 à 14 h 59	27/03/81 à 21 h 01					0,31
28/03/81 à 13 h 17	29/03/81 à 10 h 10	1670000	31104	1638896	190	1,18
12/08/81 à 19 h 29	13/08/81 à 20 h 12	223000	33672	189328	70	0,37
13/09/81 à 07 h 39	13/09/81 à 14 h 41	195000	16932	178068	70	0,39
15/09/81 à 15 h 36	16/09/81 à 03 h 52	657000	50184	606816	80	0,42
17/09/81 à 16 h 54	18/09/81 à 17 h 19	630000	33868	596132	170	1,27
#####	#####	455000	47522	407478	60	
Année 1982		(incomplète)				
15/01/82 à 06 h 23	17/01/82 à 23 h 43	1102000		1102000		1,01
29/03/82 à 04 h 48	30/03/82 à 11 h 31	374000	13932	360068	90	0,40
31/03/82 à 08 h 05	04/04/82 à 00 h 07	5515000	38532	5476468	490	1,26
Année 1983		(incomplète)				
22/04/83 à 17 h 44	24/04/83 à 01 h 18	304000		304000		0,73
18/05/83 à 14 h 44	21/05/83 à 01 h 01	562400	32535	529865	70	0,55
22/05/83 à 16 h 26	26/05/83 à 04 h 16	386400				0,78
Année 1984		(incomplète)				
11/05/84 à 08 h 34	13/05/84 à 13 h 04	1051500	23760	1027740	190	1,31
17/09/84 à 21 h 29	18/09/84 à 16 h 29	515500	14484	501016	231	1,20

09/12/84 à 13 h 29	10/12/84 à 02 h 31	1175000				1,21
Année 1985						
28/04/85 à 10 h 59	30/04/85 à 21 h 01	395000	25410	369590	50	0,32
05/05/85 à 15 h 29	07/05/85 à 02 h 31	545000	19710	525290	110	1,21
08/05/85 à 22 h 59	10/05/85 à 22 h 01	232000	26460	205540	30	0,30
#####	#####	129000		129000		
17/09/85 à 13 h 59	24/09/85 à 14 h 31	1615000	143004	1471996	70	0,85
						0,85
						0,79
						0,58
Année 1986 (incomplète)						
02/06/86 à 11 h 29	03/06/86 à 17 h 01	315000	16605		80	0,90
21/08/86 à 11 h 29	23/08/86 à 03 h 31	247000	61122		37	0,33
Année 1987						
14/03/87 à 04 h 14	14/03/87 à 22 h 46	2516000				1,57
09/05/87 à 14 h 14	10/05/87 à 20 h 46	563000				1,09
						1,09
						0,69
17/09/87 à 00 h 14	03/10/87 à 10 h 53	512000				0,40
						0,22
						0,27
						0,40
Année 1988 (incomplète)						
03/01/88 à 01 h 59	03/01/88 à 10 h 01					0,14
21/04/88 à 03 h 19	25/04/88 à 13 h 41	669500				0,35
24/08/88 à 08 h 39	25/08/88 à 12 h 20	1875100				1,53
04/09/88 à 09 h 20	04/09/88 à 23 h 51	152400				0,23
16/09/88 à 11 h 39	19/09/88 à 07 h 21	416000				0,48
21/09/88 à 19 h 09	25/09/88 à 14 h 21	240900				0,29
						0,26
						0,29
01/10/88 à 20 h 19	04/10/88 à 22 h 01	538700				0,77
09/10/88 à 11 h 09	11/10/88 à 19 h 21	198300				0,26
Année 1989 (incomplète)						

18/03/89 à 07 h 59	21/03/89 à 05 h 31	1820000				1,48
01/04/89 à 06 h 59	06/04/89 à 13 h 29	5227000				1,57
25/06/89 à 01 h 29	26/06/89 à 23 h 01	424000				0,46
17/09/89 à 14 h 59	18/09/89 à 18 h 31	327000				1,27
10/12/89 à 13 h 59	12/12/89 à 00 h 08	518000				1,33
						1,33
						0,84
Année 1990	(incomplète)					
20/01/90 à 10 h 29	21/01/90 à 21 h 54	1494700				1,10
07/02/90 à 09 h 29	10/02/90 à 17 h 01	465700				0,50
19/02/90 à 16 h 59	24/02/90 à 13 h 15	3203900				1,46
						0,87
						1,46
26/09/90 à 15 h 59	29/09/90 à 17 h 31	1843800				>1,60
30/09/90 à 21 h 59	03/10/90 à 09 h 31	332600				0,75
Année 2008						
07/05/2008 à 00 h 13	07/05/2008 à 09 h 35	3618093				1,56
10/05/2008 à 23 h 41	10/05/2008 à 00 h 00	144969				1,40
12/05/2008 à 23 h 46	13/05/2008 à 00 h 30	267936				1,41
04/06/2008 à 01 h 25	04/06/2008 à 02 h 16	259614				1,16
10/09/2008 à 23 h 57	11/09/2008 à 02 h 19	814628				1,30
16/09/2008 à 09 h 36	16/09/2008 à 19 h 19	2869335				1,25
17/09/2008 à 01 h 08	17/09/2008 à 19 h 11	3170926				1,50
26/09/2008 à 00 h 59	26/09/2008 à 10 h 33	4071070				1,54
02/10/2008 à 15 h 07	02/10/2008 à 21 h 47	1879054				1,20
03/10/2008 à 15 h 52	03/10/2008 à 23 h 21	2259671				1,20
05/10/2008 à 15 h 09	05/10/2008 à 23 h 27	829733				1,34
08/10/2008 à 14 h 37	08/10/2008 à 19 h 14	1550192				2,61
03/11/2008 à 00 h 01	03/11/2008 à 06 h 34	2113376				1,25

03/11/2008 à 17 h 36	04/11/2008 à 02 h 24	3414119				1,52
04/11/2008 à 19 h 10	05/11/2008 à 05 h 40	4948783				1,83
Année 2009	(incomplète)					
21/01/2009 à 13 h 45	21/01/2009 à 18 h 27	1250940				1,09
26/01/2009 à 06 h 09	26/01/2009 à 19 h 14	4279753				1,38
30/03/2009 à 22 h 41	31/03/2009 à 16 h 25	9076477				1,75
03/04/2009 à 23 h 26	04/04/2009 à 00 h 06	256823				1,29
11/10/2009 à 13 h 51	11/10/2009 à 17 h 22	2101632				2,21
Année 2010	(incomplète)					
05/03/2010 à 10 h 00	05/03/2010 à 13 h 18	2208516				2,23
15/04/2010 à 14 h 14	15/04/2010 à 22 h 50	3899736				1,65
21/05/2010 à 11 h 19	21/05/2010 à 13 h 44	1045615				
25/05/2010 à 11 h 12	25/05/2010 à 15 h 54	1226012				1,11
28/05/2010 à 12 h 40	28/05/2010 à 16 h 18	1009943				1,12
03/06/2010 à 12 h 34	03/06/2010 à 17 h 46	1791090				1,27
07/06/2010 à 10 h 35	07/06/2010 à 17 h 37	2255851				1,29
18/06/2010 à 11 h 24	18/06/2010 à 17 h 37	2075884				1,28
20/06/2010 à 10 h 40	20/06/2010 à 17 h 38	2731453				1,31
02/07/2010 à 10 h 23	02/07/2010 à 18 h 30	3318958				1,41
13/08/2010 à 06 h 23	13/08/2010 à 06 h 47	268145				1,33
Année 2011	(incomplète)					
18/05/2011 à 20 h 18	19/05/2011 à 01 h 39	2600078				1,77
Année 2012	(incomplète)					
30/07/2012 à 10 h 34	30/07/2012 à 17 h 54	3078675				1,29
06/08/2012 à 02 h 19	06/08/2012 à 05 h 49	1797402				1,7

Courbe tarage station Oueah

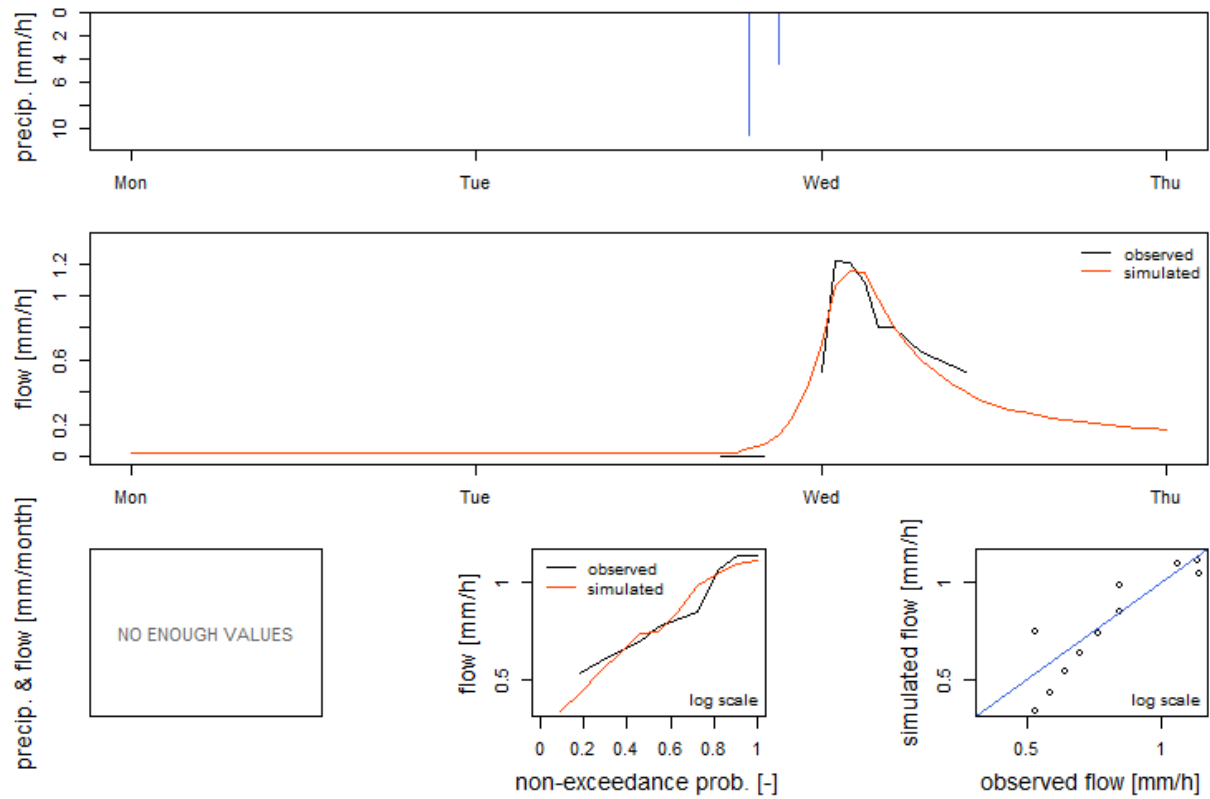


Annexe Chapitre 6/2 : Modélisation hydrologique

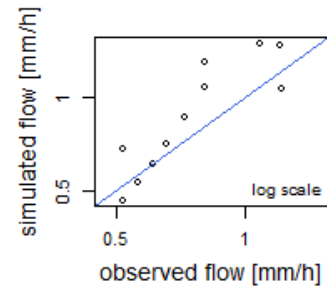
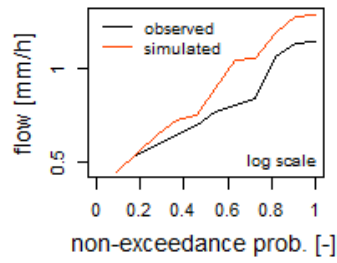
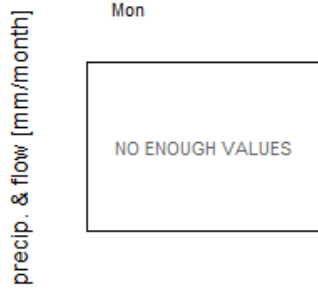
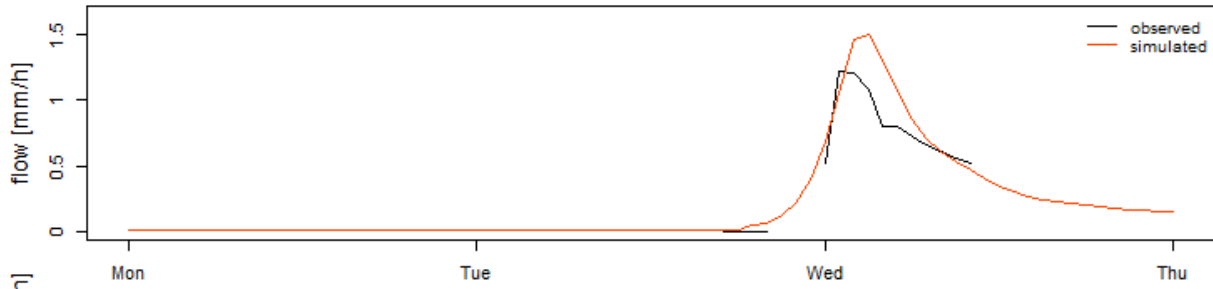
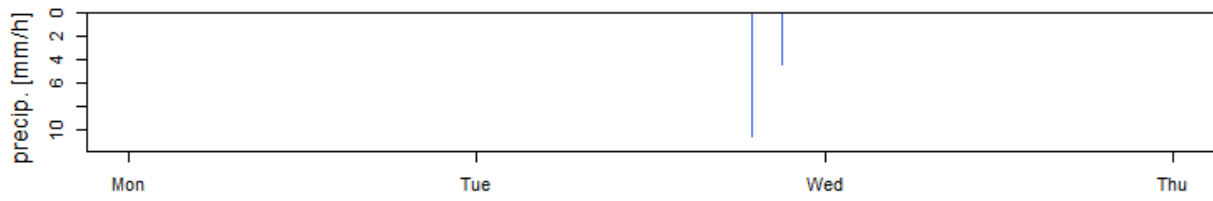
Evenement du 06-07/05/2008

GR4H

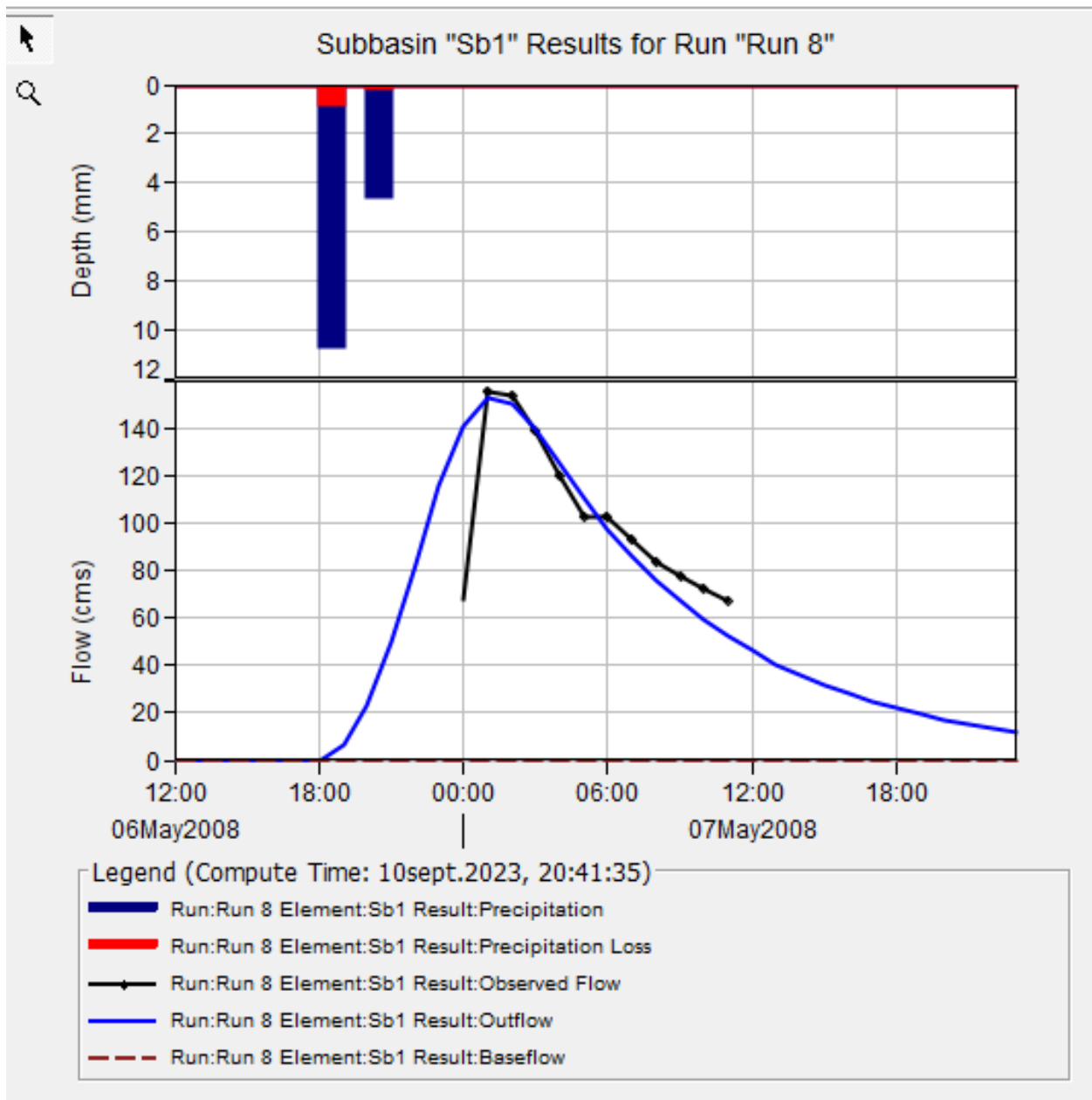
Calage



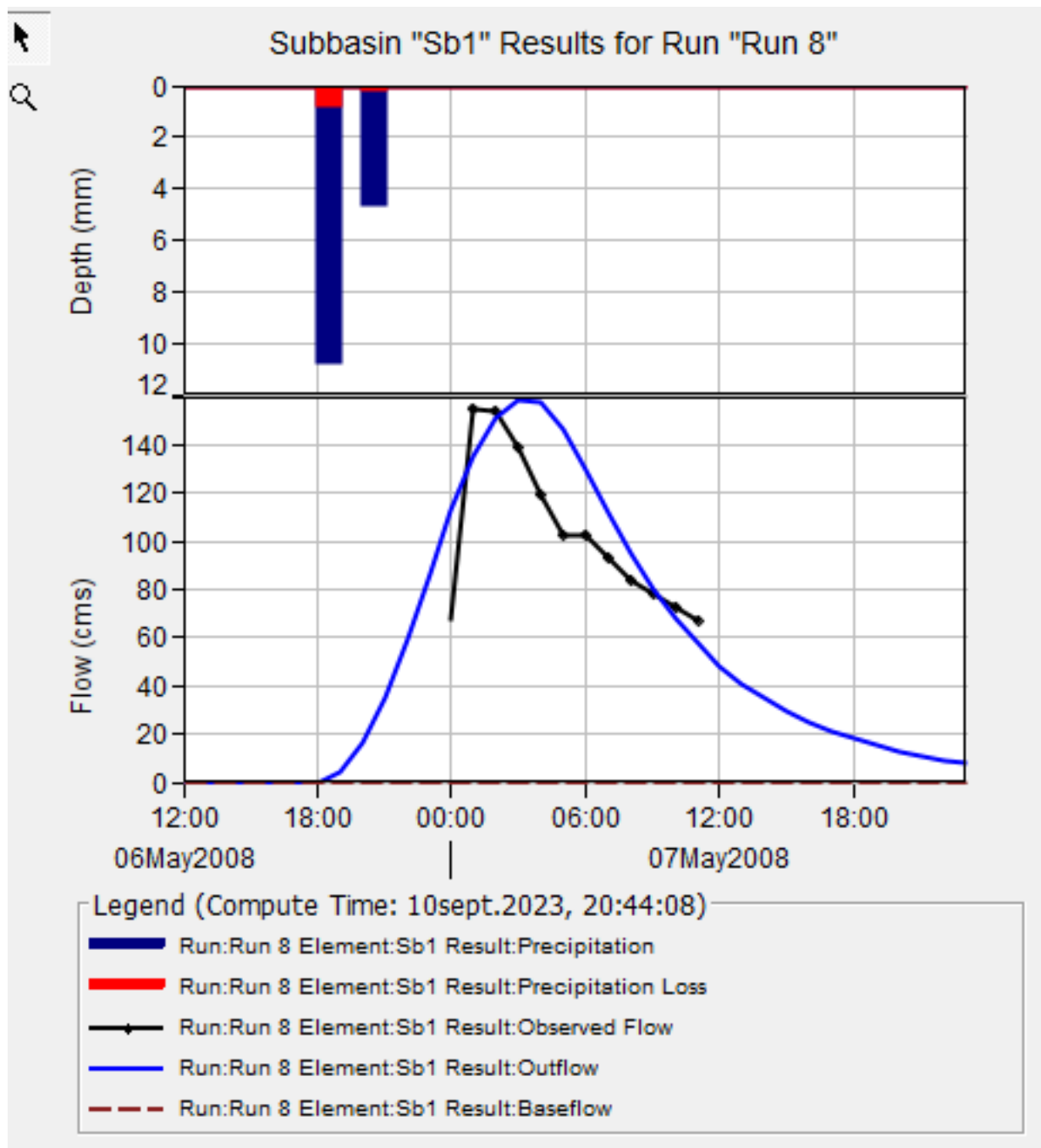
Simulation



Calage



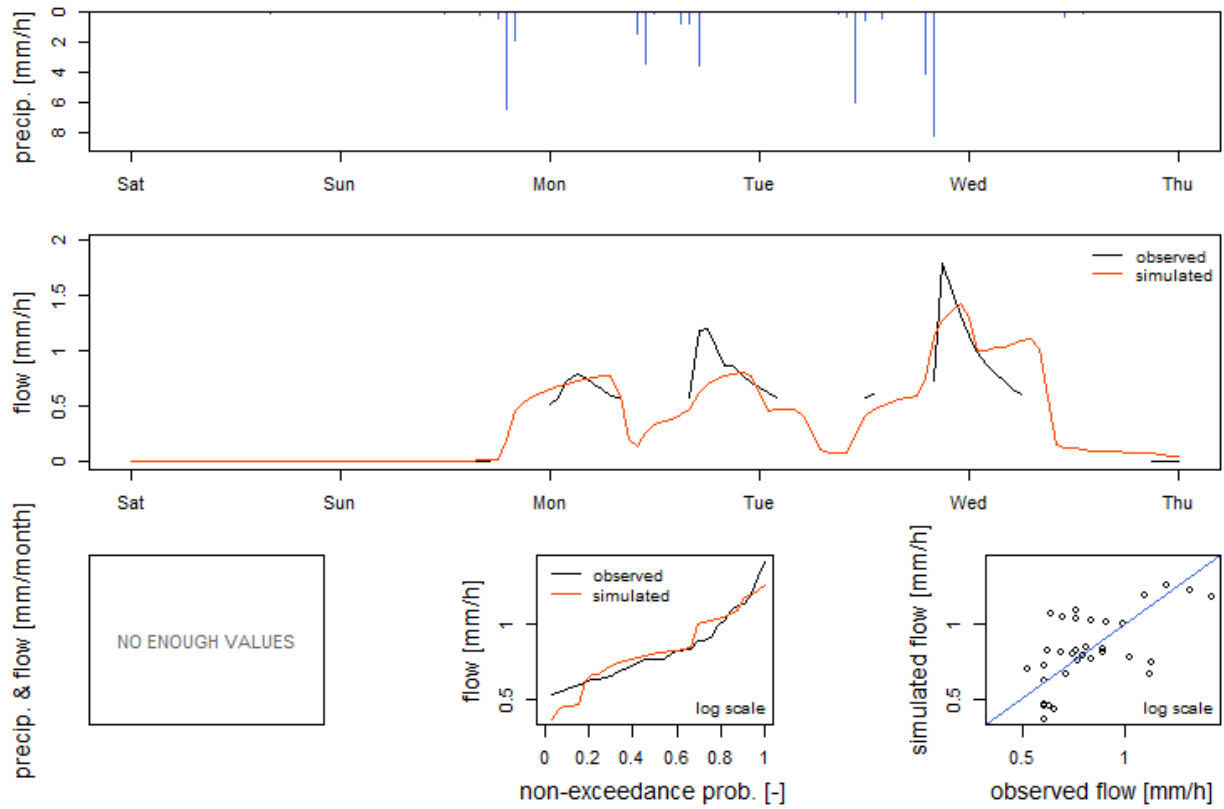
Simulation



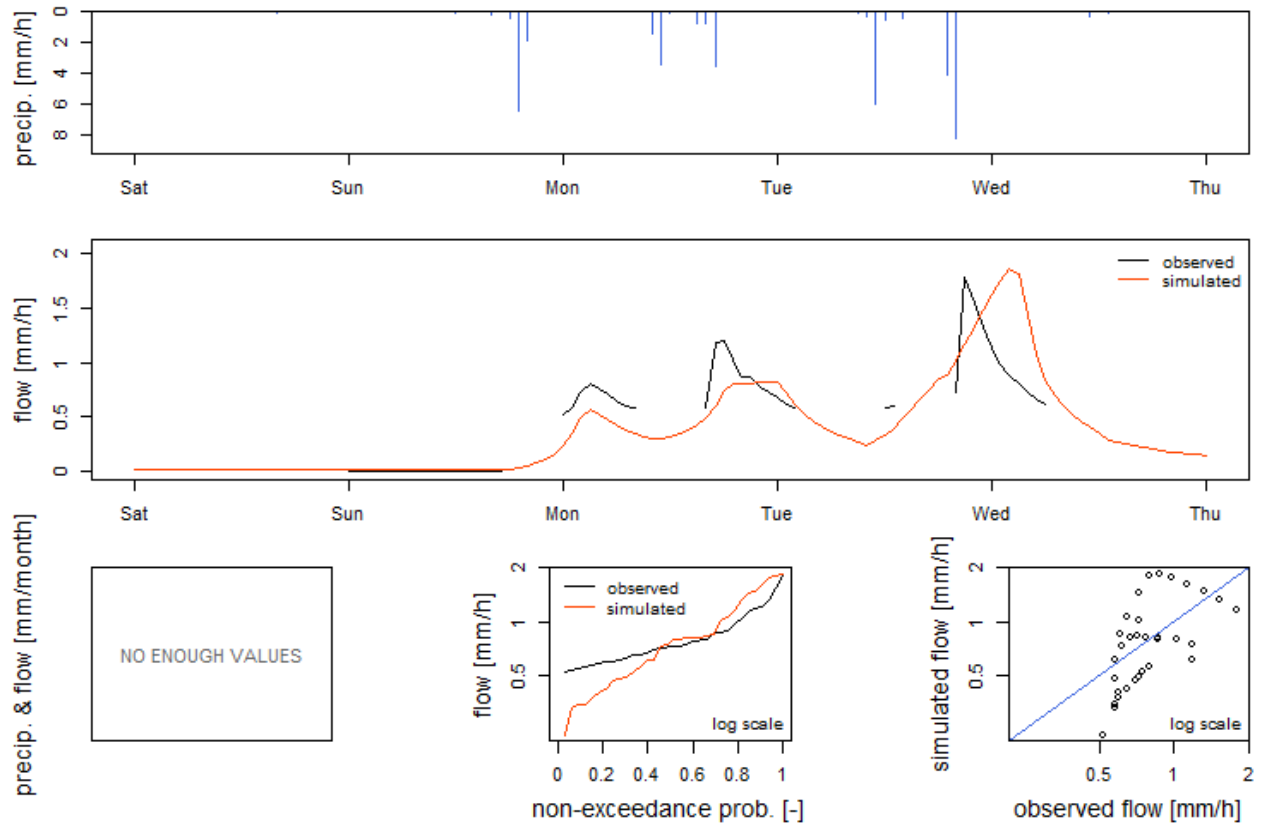
Evenement du 01-06/11/2008

GR4H

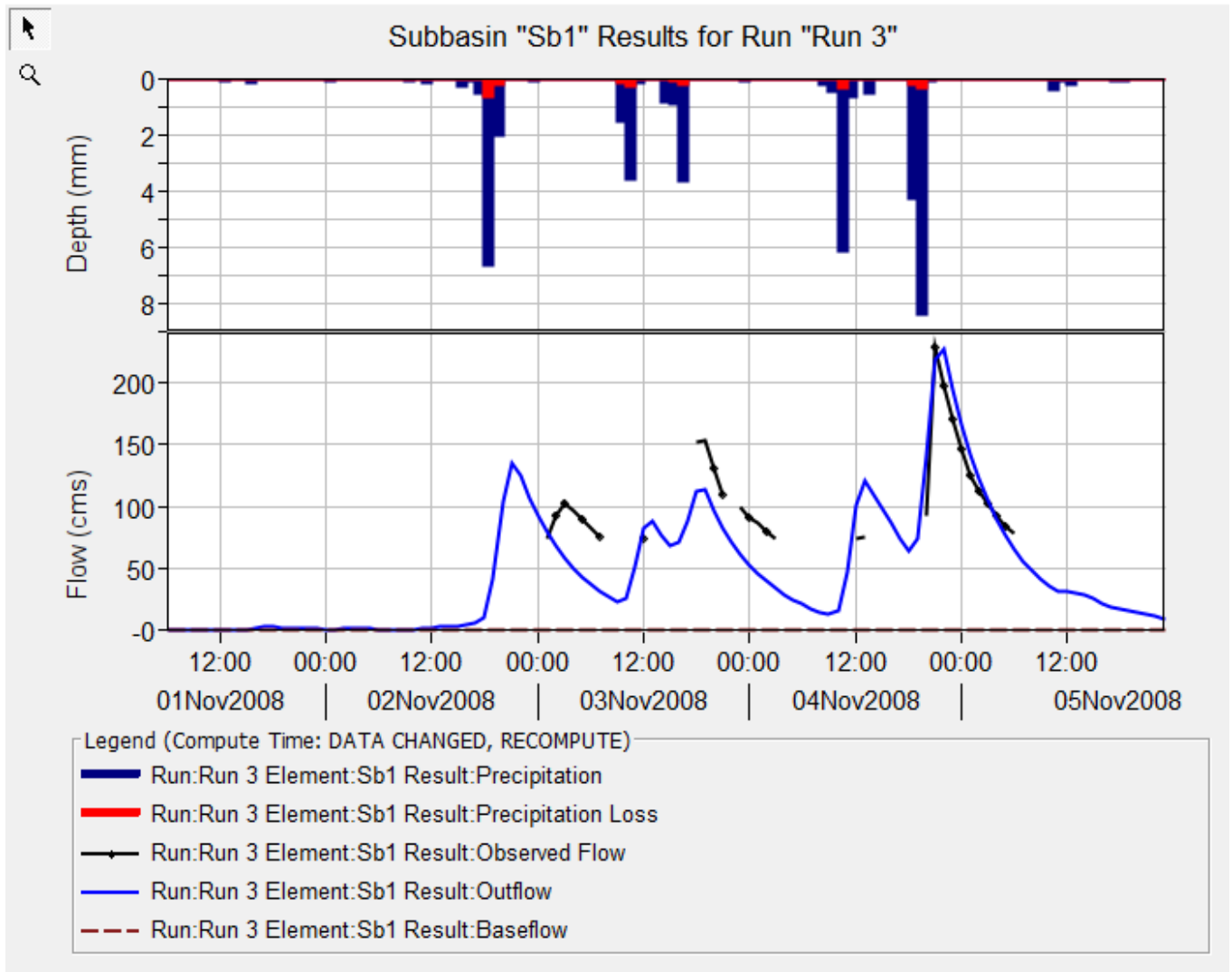
Calage



Simulation



Calage



Simulation

