



Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering



HOMOGENEISATION DES DONNEES HYDROMETEOROLOGIQUES DES BASSINS VERSANTS DU SUD-OUEST DU BURKINA-FASO

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER SPECIALISE EN GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU

Présenté et soutenu publiquement le 27 septembre 2010

Par

Abdouramane GADO DJIBO

Travaux dirigés par : Hadiza MOUSSA SALEY

Enseignante-Chercheure, Dr

UTER GVEA

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Harouna KARAMBIRI

Membres et correcteurs : Dr Dial NIANG

Dr Hadiza MOUSSA SALEY

Promotion : 2009/2010

DEDICACES

Ce mémoire est dédié à la mémoire affectueuse de mon père,
feu GADO DJIBO. Que Dieu l'agrée dans son paradis éternel,
« Amen ».

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu, le Tout Puissant, le Miséricordieux, qui m'a donné l'opportunité de mener à bien ce travail.

Je voudrais tout d'abord remercier mon superviseur Dr Hadiza MOUSSA SALEY sans qui ce travail n'aurait pu être accompli. Vous m'avez poussé à dépasser mes limites, graduellement, toujours avec un parfait dosage. Je tiens également à vous remercier pour votre patience, disponibilité, compréhension, et votre calme si apaisant. Je garde en vous la rigueur et l'amour du travail bien fait.

Mes remerciements vont à l'endroit des enseignants de l'institut 2iE en particulier ceux qui nous ont tenus tout au long de cette année académique, sans oublier les agents de la DGM et la DGAHRH pour nous avoir aidé dans l'obtention des données et les informations nécessaires.

J'aimerais particulièrement remercier ma chère mère, pour son amour inconditionnel, sa confiance en moi, et le support moral et financier qu'elle ne cesse de m'accorder tout au long de mes études. Mes remerciements vont également à mes frères, à ma sœur Hadiza GADO DJIBO et à ma cousine Hamsatou MOUSSA pour leur soutien affectueux et pour avoir su me remonter le moral dans les périodes les plus difficiles.

Je suis également redevable à tous les camarades de la 3ème promotion GIRE, en particulier FOKA Romain avec qui j'ai travaillé sur une bonne partie du mémoire.

Je tiens enfin à exprimer ma gratitude envers tous ceux qui de près ou de loin m'ont apporté leur soutien au cours de ma formation.

RESUME

Le terme homogénéisation désigne la correction des ruptures artificielles dues à des modifications dans les réseaux d'observations. Ces ruptures artificielles sont présentes dans la plupart des enregistrements climatiques et peuvent interférer avec les variations réelles du climat. Omettre de corriger ces ruptures artificielles implique de risquer que les projections futures basées sur les observations passées soient biaisées.

Ainsi la méthodologie d'homogénéisation basée sur les techniques du point ciblé, de la fenêtre glissante et de la variation de la longueur du segment a été utilisée sur des séries hydrométéorologiques mensuelles des bassins de la Comoé et du Mouhoun situés dans le Sud-Ouest du Burkina Faso. Les séries synthétiques ont été générées à partir du modèle de Beaulieu et al., (2008) et ont permis de procéder à la validation de la méthodologie. Ces techniques ont permis de détecter les changements dans les séries hydro-climatiques et de passer à leur correction. Ainsi les résultats obtenus montrent des ruptures autour de 1983-1984 pour les séries de pluies, hydrométriques et certains piézomètres. Pour les autres paramètres les dates de ruptures diffèrent d'une station à une autre et trouvent leur explication dans les métadonnées. L'ajustement de ces séries a été fait par la technique de différences de moyennes entre les segments de la série afin d'estimer l'amplitude, ce qui a permis d'éviter d'autres sauts éventuels dans le calcul de l'amplitude. Ainsi les séries mensuelles de vingt deux (22) stations ont pu être homogénéisées dont six (6) sont piézométriques, dix (10) hydrométriques et six (6) météorologiques (pluie, température, vitesse du vent, humidités relatives maximales et minimales, évapotranspiration).

Mots clés :

1. Homogénéisation
2. Métadonnées
3. Ruptures
4. Ajustement
5. Séries chronologiques

SUMMARY

The term "homogenization" indicates the correction of artificial ruptures due to modifications in the networks of observations. These artificial ruptures are present in the majority of the climatic recordings and can interfere with the real variations of the climate. Omitting to correct these artificial ruptures implies to risk that the future projections based on the passed observations are skewed.

Thus the methodology of homogenization based on the techniques by the targeted point, the sliding window and the variation in the length of the segment were used on monthly hydrometeorological series of the basins of Comoé and Mouhoun located in the South-west of Burkina Faso. The synthetic series were generated from the model of Beaulieu & *al.*, (2008) and have enabled the validation of the methods. These techniques have made it possible to detect the changes in the hydro-climatic series and to pass to their correction. Thus the obtained results show ruptures around 1983-1984 for the series of precipitations, hydrometric series and piezometric series. For the other parameters the dates of ruptures differ from one station to another and their explanation is found in the metadata. The adjustment of these series was made by the technique of differences in averages between the segments of the series in order to estimate the amplitude, this procedure made it possible to avoid other possible jumps in the calculation of the amplitude. Thus the monthly series of twenty two (22) stations have been homogenized of which six (6) are piezometric, ten (10) hydrometric and six (6) weather (precipitation, temperature, speed of the wind, relative moistures: maximum and minimal, and evapotranspiration).

Key words :

1. Homogenization
2. Metadata
3. Ruptures
4. Adjustement
5. Time series

LISTE DES ABREVIATIONS

DGAHRH: Direction Générale de l'Agriculture de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques

DGH : Direction Générale de l'Hydraulique

DGM : Direction Générale de la Météorologie

DGRE : Direction Générale des Ressources en Eau

ETP: Evapotranspiration Potentielle

HuMax : Humidité relative Maximale

HuMin : Humidité relative Minimale

IPPC: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

MEE : Ministère de l'Environnement et de l'Eau

QQplot : Courbe des quantile- quantiles

SN-SO.SU.CO: Société sucrière de la comoé

Tmoy : Température moyenne

Vmoy : Vitesse moyenne du vent

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| DEDICACES | 1 |
| REMERCIEMENTS | 2 |
| RESUME..... | 3 |
| SUMMARY | 4 |
| LISTE DES ABREVIATIONS | 5 |
| I. INTRODUCTION | 10 |
| 1. Cadre de l'étude et problématique..... | 10 |
| 2. Revue de la bibliographie..... | 11 |
| 2.1 Principales causes d'inhomogénéités | 12 |
| 2.2 Homogénéisation..... | 13 |
| 2.3 Les métadonnées | 14 |
| 3. Problématique et objectifs | 14 |
| 5. Organisation du mémoire | 15 |
| II. ZONE D'ETUDE ET PRESENTATION DES DONNEES | 16 |
| 1. Présentation de la zone d'étude | 16 |
| 1.1 Aspects climatiques..... | 16 |
| 1.1.1 Climat | 16 |
| 1.1.2 Précipitations..... | 17 |
| 1.1.3 Autres paramètres climatiques | 17 |
| 1.2 Aspects géomorphologiques..... | 18 |
| 1.2.1 Relief | 18 |
| 1.2.2 Géologie | 18 |
| 1.2.3 Sols | 19 |
| 1.2.4 Végétation | 20 |
| 1.3 Régimes hydrographiques | 21 |

| | | |
|-------|--|----|
| 1.3.1 | Ressources en eaux de surface | 21 |
| 1.3.2 | Ressources en eaux souterraines | 22 |
| 1.4 | Aspects sociaux économiques | 24 |
| 2. | Données de l'étude | 25 |
| 2.1 | Présentation | 25 |
| 2.2 | Critique des données | 26 |
| 2.3 | Les métadonnées | 26 |
| III. | METHODOLOGIE..... | 28 |
| 1. | Analyse exploratoire des données | 28 |
| 1.1 | Statistique descriptive et analyse graphique..... | 28 |
| 2. | Analyse des données | 29 |
| 2.1 | Calcul de taux de données manquantes | 29 |
| 2.2 | Reconstitution des données | 29 |
| 3. | Normalité des séries | 29 |
| 3.1 | Courbes des Quantiles-Quantiles | 29 |
| 3.2 | Test de Lilliefors (Lillietest)..... | 30 |
| 4. | Analyse de dépendance linéaire | 30 |
| 4.1 | Test de Student (T-test)..... | 31 |
| 4.2 | Tau de Kendall | 31 |
| 5. | Etude de non stationnarité | 32 |
| 6. | Méthodes de détection de changement de rupture des données | 33 |
| 6.1 | Test de Pettitt..... | 33 |
| 6.2 | Ajustement | 34 |
| 6.3 | Validation de la méthodologie | 35 |
| IV. | Résultats | 36 |
| 1. | Statistique descriptive..... | 36 |

| | |
|--|----|
| 2. Taux de données manquantes..... | 37 |
| 3. Reconstitution des données | 38 |
| 4. Normalité des séries | 38 |
| 5. Etude de corrélation..... | 39 |
| 6. Etude de non stationnarité | 39 |
| 6.2 Présence de tendance..... | 40 |
| 6.3 Autocorrélation sérielle | 41 |
| 7. Détection de ruptures..... | 41 |
| V. Discussions et recommandations | 44 |
| 1. Discussions..... | 44 |
| 2. Recommandations | 47 |
| VI. Conclusion | 48 |
| VII. Références bibliographiques..... | 49 |
| ANNEXES | 51 |
| ANNEXE I : Présentations des stations, résultats des études de corrélation, de normalité et de non-stationnarité | 52 |
| Annexe II : Evolution du taux de lacunes par station et courbes de séries..... | 62 |
| ANNEXE III : COURBES DES QUANTILE-QUANTILE..... | 75 |
| ANNEXE IV : Graphiques de détection des ruptures sur les séries hydrométéorologiques..... | 78 |

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

LISTE DES TABLEAUX :

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Statistique descriptive des stations des variables de la zone d'étude..... | 36 |
| Tableau 2 : Périodes de rupture sur les séries hydrométéorologiques..... | 42 |

LISTE DES FIGURES :

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Bassins versants nationaux du Burkina Faso | 16 |
| Figure 2 : Type de sol des bassins du Mouhoun et de la Comoé | 20 |
| Figure 3 : Occupation du sol dans les bassins du Mouhoun et de la Comoé..... | 21 |
| Figure 4 : Réseau hydrographique et stations hydrométéorologiques des bassins du Mouhoun et de la Comoé | 24 |
| Figure 5 : Exemple d'un graphique des quantiles-quantiles..... | 30 |
| Figure 6 : Evolution annuelle du taux de lacunes à la station de Niangoloko..... | 38 |
| Figure 7 : Saisonnalité des séries de pluie de Ouahigouya et de débit de Nwokuy | 40 |
| Figure 8 : Tendances de la température de la station de Bobo Dioulasso..... | 41 |
| Figure 9 : Graphique d'une rupture due à un changement de moyenne..... | 46 |
| Figure 10 : Graphique des ruptures dues à des changements de tendances..... | 46 |

I. INTRODUCTION

Le Burkina Faso, pays enclavé au centre de l'Afrique de l'Ouest, compte environ 12 millions d'habitants dont 80% vivent en milieu rural. Situé en zone aride à semi-aride, sa superficie est de 274.000 km². La majeure partie du territoire est constituée par un plateau latéritique d'une altitude moyenne de 300 mètres, qui s'incline du Nord-est au Sud-ouest. Le climat, de type soudano-sahélien, est caractérisé par des variations pluviométriques spatiales et interannuelles considérables, allant de 350 mm au Nord (climat sahélien) à 1100 mm au Sud-ouest (climat sud-soudanien). La saison des pluies s'étale sur trois mois au Nord et sur sept mois au Sud-ouest. Le réseau hydrographique est réparti en quatre bassins versants nationaux (Comoé, Mouhoun, Nakambé et Niger) et comprend deux cours d'eau majeurs permanents : la Comoé et le Mouhoun.

En moyenne sur les 40 dernières années, les écoulements en eau de surface représentent environ 4% de la pluviométrie, tandis que l'infiltration en est estimée à environ 15%. La différence, soit plus de 80% de la pluviométrie, est consommée par évapotranspiration. Cette situation, conjuguée à une baisse marquée de la pluviosité depuis une quarantaine d'années et caractérisée par des périodes de sécheresse accrue, place aujourd'hui le Burkina Faso en condition de stress hydrique. L'évaluation des ressources renouvelables faite dans le cadre de l'état des lieux national des ressources en eau donne une disponibilité de l'ordre de 850 m³/an/habitant, ce qui place le pays en dessous du seuil de pénurie habituellement fixé à 1000 m³/an/habitant.

1. Cadre de l'étude et problématique

Depuis une vingtaine d'années, un intérêt soutenu se manifeste pour l'étude du climat et de sa variabilité, compte tenu des conséquences parfois dramatiques que celle-ci peut entraîner, quelle que soit la région de la planète considérée. Les implications de cette variabilité sur celle des ressources en eau sont particulièrement fortes et touchent, à leur tour, de très nombreux secteurs d'activités.

Les Etats africains, spécifiquement ceux de l'Afrique de l'Ouest présentent une sensibilité accrue aux situations extrêmes (inondations, sécheresse,...) due à une faible capacité d'adaptation, mais aussi en raison de leur structure économique, sociale et démographique.

Ces extrêmes entraînent fréquemment des déplacements massifs de population, une paralysie économique, et dans les situations les plus graves, famines et pertes de nombreuses vies humaines (à l'exemple de la sécheresse de 1983-1984). L'évolution des ressources en eau est par conséquent au cœur des préoccupations des Etats africains, mais également de la communauté scientifique.

Ainsi, le Burkina Faso pays sahélien par excellence a connu des sécheresses de 1973 et 1983 dues à la réduction du niveau des pluies et à leur répartition spatio-temporelle inégale, les inondations provenant des fortes pluies exceptionnelles, les vagues de chaleur et les nappes de poussières intenses. Depuis le début des années 90, la région sud-ouest du Burkina-Faso a fait l'objet de plusieurs études entrant dans le cadre de programmes financés par des organismes internationaux tels que la banque mondiale. L'intérêt sans cesse croissant de cette zone dans l'analyse des impacts des changements climatiques et environnementaux sur les ressources en eau souterraine s'explique par le fait qu'on y retrouve les cours d'eau les plus importants du pays et aussi les plus fortes densités de populations. L'intensité des activités agro-économiques dans la région est aussi un facteur non négligeable qui justifie l'importance d'une telle étude dans la zone sud-ouest. Cette étude doit également sa raison d'être au contexte scientifique actuel favorable qui a permis de sensibiliser davantage la communauté scientifique sur les impacts du changement climatique à travers des débats sur le développement durable et l'accès à la ressource eau (Sandra A., 2004).

2. Revue de la bibliographie

Le cycle climatique de l'eau étant l'une des manifestations majeures du climat, son suivi permet d'appréhender certains aspects d'évolution du climat. Ainsi Mitosek indique que les variables les plus adaptées pour le suivi du climat sont (Ouarda Taha B. et al., 1999) : le débit des rivières, le niveau des lacs, les précipitations, les températures de l'air et de l'eau, la date de rupture du couvert de glace et sa durée, et le niveau des eaux souterraines.

Les évolutions possibles de ces variables climatiques peuvent être ramenées à deux types de modifications à analyser : le changement de la moyenne et celui de la variance (Ouarda Taha, B. et al., 1999).

Par le monde de nombreuses études ont été menées pour la détection de ces changements. En Afrique sahélienne et non sahélienne beaucoup d'auteurs ont mis en évidence, à partir des séries hydro-pluviométriques, une phase sèche qui a débuté vers les années 1970 et qui

perdre jusqu'à présent. Dans cette région, il a été constaté une diminution de la pluviométrie annuelle (Hubert et Carbonnel, 1987 ; Moron Vincent, 1994 ; Paturel J.E. et al., 1995 ; Paturel J.E. et al., 1997 ; Servat E. et al., 1997 ; Tarhule Aondover et Woo Ming-ko, 1998 ; Servat E. et al., 1999), du nombre de jours de pluie (Paturel J.E. et al., 1997 ; Servat E. et al., 1997 ; Houndénou C. et Hernandez K., 1998 ; Tarhule Aondover et Woo Ming-ko, 1998 ; Servat E. et al., 1999), de fortes intensités de pluies, des débits de rivières (Sircoulon, 1987 ; Opoku-Ankomah, 1998), des niveaux des lacs (Sircoulon, 1987), ainsi qu'un raccourcissement de la saison pluvieuse (Bello N.J., 1998 ; Servat E. et al., 1999).

En effet, des séries de données homogènes assurent que les changements et variations identifiés dans ces dernières sont induits par le climat (Karl et al., 1993). Des techniques statistiques peuvent être utilisées pour détecter les inhomogénéités, en utilisant la théorie classique de détection de rupture.

2.1 Principales causes d'inhomogénéités

Les principales causes d'inhomogénéités dans les séries climatologiques dépendent du paramètre qui est mesuré. Par exemple, des changements des heures d'observations ou de méthodes de calcul peuvent causer une inhomogénéité dans les séries de températures moyennes et d'humidité, mais n'affectent pas les précipitations ou la pression. Les ruptures dans les séries de précipitations peuvent être dues à des changements d'instrumentation, de la hauteur de l'instrument, de l'environnement immédiat de la station, de l'exposition de la station et des relocations. Les déplacements et changements d'exposition sont susceptibles d'introduire des ruptures très importantes dans les séries de précipitations. Daly *et al.* (2007) expliquent comment différents observateurs peuvent introduire des biais dans les séries de précipitations. De manière générale, la principale cause de rupture dans la plupart des séries climatologiques est probablement le déplacement de station. De plus, le déplacement d'une station est souvent accompagné d'un changement d'instrumentation, d'observateur et d'environnement (Mestre, 2000). Les séries de précipitations sont particulièrement susceptibles de contenir des inhomogénéités et des biais de grande amplitude (Easterling *et al.*, 1996). Les mesures de précipitations sont surtout affectées par le vent et par l'effet Venturi qui est produit au dessus du cône du pluviomètre.

2.2 Homogénéisation

Le processus de détection et de correction des ruptures d'origine non climatique est appelé homogénéisation. Plusieurs variables climatiques sont homogénéisées et présentées dans la littérature dont la température (Moberg et Alexandersson, 1997; Vincent et al., 2001; Li et al., 2004; Yagouti et al., 2006 ; Begert et al., 2003), les précipitations (Hanssen-Bauer et Forland, 1994), la pression (Young, 1993), la vitesse du vent (Thomas et al., 2005), les données prises par radiosonde (Lanzante et Klein, 2003; Haimberger, 2007), etc. On note également l'homogénéisation de six (6) paramètres hydroclimatiques en Côte d'Ivoire par Nicolas A. et al., (1997) et aussi les travaux d'homogénéisation des précipitations du Burkina Faso par Musy A. et al., (1987). Ainsi plusieurs approches sont utilisées pour l'homogénéisation des données climatiques. Certains auteurs utilisent des méthodes directes basées sur les métadonnées, des comparaisons d'instruments côte à côte ou des études statistiques de changements d'instruments (Peterson *et al.*, 1998). Ces approches ne consistent pas à détecter un changement avec une méthode statistique, elles permettent plutôt de corriger directement la série de données. Toutefois, elles sont inapplicables lorsque les informations sont vagues, incomplètes ou inexistantes (Beaulieu *et al.*, 2007). Des études comparatives ont été réalisées afin de déterminer les méthodes d'homogénéisation les plus prometteuses pour la température (Easterling et Peterson, 1992; Ducre-Robitaille *et al.*, 2003; DeGaetano, 2006), et la pression de surface (Slonosky *et al.*, 1999). Une étude a été réalisée par Lubes-Niel *et al.* (1998) pour comparer différents tests d'homogénéité (au sens statistique) sur des séries de précipitations totales annuelles. Toutefois, les techniques les plus prometteuses pour détecter des inhomogénéités (au sens climatologique) dans les séries de précipitations totales annuelles n'ont pas été identifiées.

La plupart des techniques d'homogénéisation reposent sur plusieurs hypothèses : la normalité des données, l'indépendance, l'homogénéité des séries voisines et l'homogénéité des variances. En général, l'hypothèse de normalité permet de faciliter l'analyse statistique des observations. Dans le cas des données annuelles, cette hypothèse est souvent vérifiée, mais cela dépend des caractéristiques des données. Dans le cas des données mensuelles, cette hypothèse devient moins facile à respecter, particulièrement pour les précipitations (Von Storch et Zwiers, 1999; Wilks, 2006). Pour l'indépendance, formuler cette hypothèse ne pose pas de problème dans le cas des données annuelles. Par contre, plus le pas de temps diminue, plus cette hypothèse devient contestable (Lund *et al.*, 2007).

2.3 Les métadonnées

Des métadonnées fiables et complètes sont importantes pour s'assurer que les séries de données ont été recueillies dans des conditions constantes et par le fait même, que les conclusions qui découleront de leur analyse seront valides (Aguilar *et al.*, 2003). Dans le cas où les conditions d'observations ont changé avec le temps, les métadonnées permettent de retracer l'histoire de la station de mesure et ainsi, de corriger les ruptures éventuelles induites artificiellement par les changements de conditions d'observations ou encore, de nuancer les résultats d'analyses effectuées sur ces données.

Les métadonnées sont composées des enregistrements ou des photographies d'une station, de ses annuaires météorologiques, des rapports d'inspection ou encore des entrevues avec les personnes qui en sont responsables (Peterson *et al.*, 1998).

Puisque les inhomogénéités sont dues à des changements dans les conditions d'observations, il y a toujours une cause reliée à une inhomogénéité. De ce fait, certaines méthodes d'homogénéisation n'acceptent que les ruptures artificielles qui sont documentées dans les métadonnées. Certains auteurs affirment même que les métadonnées constituent le seul outil permettant d'homogénéiser les données (Auer *et al.*, 2004). Cette approche est pertinente lorsque les métadonnées sont complètes et exemptes d'erreur. Malheureusement, elles sont souvent incomplètes et imparfaites, d'où la nécessité d'utiliser des méthodes statistiques qui permettent de détecter des ruptures (Peterson *et al.*, 1998). Par exemple, Hanssen-Bauer et Forland (1994) ont détecté des inhomogénéités de fortes amplitudes sans en identifier les causes malgré des métadonnées en principe de bonne qualité. Dans ce cas, les métadonnées peuvent toutefois fournir de l'aide pour appuyer les résultats de certains tests d'homogénéité.

3. Problématique et objectifs

L'objectif de ce travail dérive d'un constat simple : compte tenu de la variabilité du climat et des conséquences parfois dramatiques que celle-ci peut entraîner, l'évolution des ressources en eau, pour les Etats africains de la zone sahélo-saharienne, est une question préoccupante, tant pour le développement économique (agriculture, énergie hydro-électrique) que pour le devenir des populations (santé, alimentation en eau potable, sécurité alimentaire). La disponibilité des données homogènes permettra de mieux apprécier l'évolution climatique afin d'opérer une décision judicieuse.

➤ **Objectif global**

Il s'agit donc de proposer une méthodologie d'homogénéisation des données hydrométéorologiques adaptée aux caractéristiques des bassins de la Comoé et du Mouhoun.

➤ **Objectifs spécifiques**

Les objectifs spécifiques sont :

- L'identification des facteurs climatiques/environnementaux responsables des changements (sauts) observés dans les séries hydrométéorologiques.
- L'objectif final est de disposer des données homogènes permettant de contribuer à la gestion durable des ressources en eau.

5. Organisation du mémoire

Le présent travail s'articule autour de cinq (5) chapitres, dont le premier fait ressortir la problématique, les objectifs et les hypothèses de travail. Le second quant à lui présente la zone d'étude, puis introduit les données utilisées. Le troisième présente la méthodologie adoptée pour ce travail. Quant au quatrième il parle des résultats obtenus et le dernier fait allusion aux discussions et recommandations. Et enfin, une conclusion nous permet de mettre un terme à cette étude.

II. ZONE D'ETUDE ET PRESENTATION DES DONNEES

1. Présentation de la zone d'étude

Les bassins versants retenus s'étalent sur 23 provinces administratives. Le bassin de la Comoé est situé entre les parallèles 10°40N et 11° N d'une part, et les méridiens 4° 40 W 5°20W d'autre part, quant à celui du Mouhoun, il s'étend entre les 11° et 14° degrés de la latitude Nord, et les 5° et 3° degrés de la longitude Ouest.

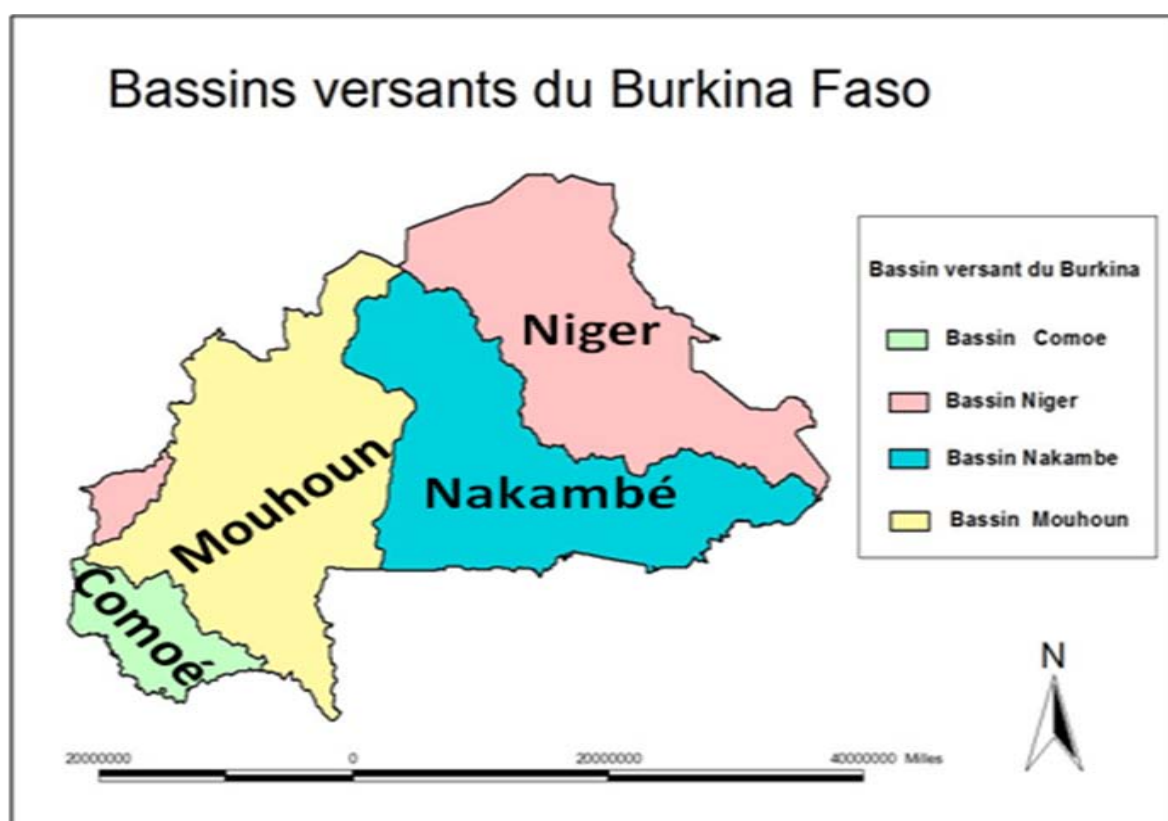


Figure 1 : Bassins versants nationaux du Burkina Faso

1.1 Aspects climatiques

1.1.1 Climat

Cette zone, située dans le domaine soudanien couvre une diversité climatique importante. La saison sèche s'allonge au fur et à mesure que l'on s'approche du bassin de la volta (vers le Nord) variant de quatre à six mois, alors que la saison humide, appelée hivernage, se situe entre avril-mai et septembre-octobre. Les précipitations annuelles vont de 500-700 mm à 1000-1200 mm, du Sahel au Nord de la frontière de la côte d'ivoire au sud.

1.1.2 Précipitations

D'une manière générale, l'ensemble de la zone d'étude s'inscrit entre les isohyètes 800 mm au Nord et l'isohyète 1000 mm au sud, en accord avec la carte de migration des isohyètes au cours des 50 dernières années du Burkina Faso. Au regard des bassins versants retenus, la gamme de variations de la pluviométrie interannuelle moyenne est réduite. Il est à noter que le bassin de la Comoé est plus arrosé comparé à celui du Mouhoun.

1.1.3 Autres paramètres climatiques

Les paramètres climatiques tels que le vent, la température de l'air, l'humidité relative (minimum et maximum) et l'évapotranspiration jouent un rôle prépondérant dans le bilan hydrologique. La description généralisée de ces paramètres s'appuie sur des valeurs moyennes. Toutefois, des perturbations locales telles que le relief et la végétation peuvent modifier leurs comportements vis-à-vis du cycle de l'eau.

Les variations saisonnières des directions et des vitesses des vents découlent de la circulation générale de l'atmosphère dans la zone intertropicale. Dans la zone d'étude, ces bassins sont soumis aux vents de secteur Est-Nord-Est, d'influence saharienne (harmattan), pendant la saison sèche, en opposition aux vents de secteur Ouest-Sud-Ouest, d'influence guinéenne (mousson) pendant la saison des pluies. Les vitesses des vents mesurées à 10 m de hauteur du sol sont faibles en moyenne, avec des valeurs qui tournent autour de 3 m/s.

Les températures moyennes annuelles sur l'ensemble de la zone d'étude sont comprises entre 26°C et 30°C. On constate une tendance à l'augmentation de la température moyenne du sud vers le nord. Les moyennes mensuelles maximales s'observent en général dans le mois qui précède la saison des pluies, c'est-à-dire mars-avril. Au contraire, les températures mensuelles minimales s'observent sur les reliefs en décembre-février.

L'humidité relative moyenne annuelle varie en sens inverse de la latitude. Les valeurs les plus fortes s'observent dans le bassin de la Comoé, où elles dépassent les 70%. Elles diminuent progressivement en montant vers le bassin du Mouhoun jusqu'à atteindre 40% au nord. Sur l'ensemble des bassins, l'abaissement de la température nocturne en saison des pluies est suffisant pour provoquer l'apparition des rosées et brouillards matinaux.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) présente un gradient croissant latitudinal du sud vers le nord dans la zone, c'est-à-dire que ces variations suivent celles de la température mais sont inverses à celles de la pluviométrie. La variabilité mensuelle de l'ETP est très faible.

1.2 Aspects géomorphologiques

Dans l'ensemble, les reliefs de la zone sont relativement homogènes. Les immenses superficies sont soumises aux effets de l'érosion, et se transforment progressivement en pénéplaine.

1.2.1 Relief

Le relief est essentiellement composé de bas-fonds, des cours d'eau encaissés, des reliefs résiduels et de falaises très escarpées.

Sur le plan topographique, les formations sont constituées de collines, de buttes, de roches et de dépressions périphériques. On rencontre également des croupes à peine marquées, des dépôts alluviaux qui bordent le long des cours d'eau et des vallées. Elles sont sinueuses et se présentent en forme d'auge avec des versants à pentes fortes.

1.2.2 Géologie

La géologie générale de la zone est représentée par deux ensembles :

- un ensemble sédimentaire constitué par les roches gréseuses (grès de base et grès inférieur) :

Pour les grès inférieurs la succession lithologique la plus complète s'observe dans la langue de Banfora, avec de la base au sommet les grès rouges fins arkosiques, les grès quartzitiques fins blancs ou verdâtres, les grès roses à débris schisteux, et un niveau schiste-gréseux terminal généralement très altéré.

Un ensemble cristallin constitué d'une part d'antébirrimiens (gneiss, gneiss granitisés ou migmatites, amphibolites, gabbro et granites) forme l'ossature ancienne de la région; de l'Est à l'Ouest on distingue quelques entités d'origine antébirrimien (Soubakaniédougou, Sidéradougou, Mangodara... etc.) ; l'autre partie du cristallin est le Birrimien représentant les parties non érodées du remplissage de sillons intracratoniques d'origine volcanique,

pyroclastique et sédimentaire, avec la succession stratigraphique de la base au sommet comme suit :

- formations basales de basaltes et d'andésites,
- formations volcaniques et volcano-sédimentaires associant séries de laves à caractère calco-alcalin dominant, tufs basiques et neutres, schistes, les niveaux de sédiments chimiques variés, et les sédiments détritiques.

1.2.3 Sols

La nature du sol est étroitement liée à la géologie et au climat de la zone. La majeure partie est occupée par les sols sableux à sablo-argileux, souvent gravillonnaires en profondeur, ferrugineux, lessivés, profonds ou à profondeur moyenne. Ils sont généralement peu fertiles. La partie Nord-Ouest est occupée par les sols limono-argileux à argilo-limoneux en surface, argileux en profondeur, développés sur le substratum gréseux. Ils sont mal drainés et la fertilité est moyenne à faible.

Vers le Sud, ces sols prennent plus d'ampleur et deviennent gravillonnaires sableux à sablo-argileux bien drainés avec une fertilité plus grande.

Aux bas-fonds de cours d'eau principaux, des sols alluviaux de composition limonoargileuse en surface, argileuse en profondeur, se présentent. Ils sont caractérisés par un faible drainage. Leur fertilité est plus ou moins élevée en fonction de la pétrographie du bassin.

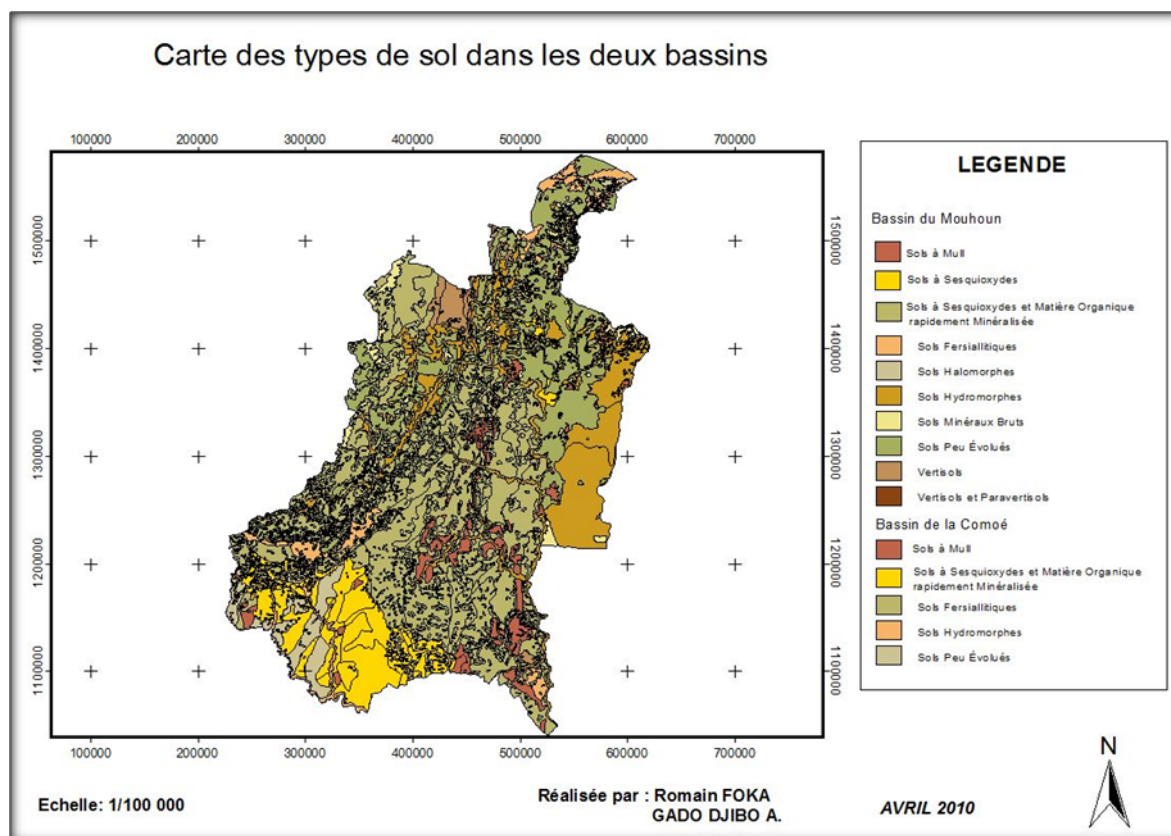


Figure 2 : Type de sol des bassins du Mouhoun et de la Comoé

1.2.4 Végétation

L'abondance des précipitations (par rapport au reste du pays) favorise le développement des espèces ligneuses qui dominent de par leur densité, leur nombre de strates et leur hauteur. Elles créent des conditions micro-climatiques du sous-bois des galeries, propices à la survie des fougères et des palmiers et d'autres plantes qui cherchent l'humidité pour vivre.

Il faut cependant remarquer qu'il existe un minimum de protection de la végétation surtout avec une savane à formation arborée (nééré, karité, rônier, tamarinier...), un tapis d'herbacé discontinu et un tapis d'arbustes peu clairsemés qui dominent les champs.

La physionomie des formations végétales se modifie de façon globale du sud vers le nord : la forêt s'éclaircit et passe à des peuplements aux espèces ligneuses de plus en plus petites et espacées.

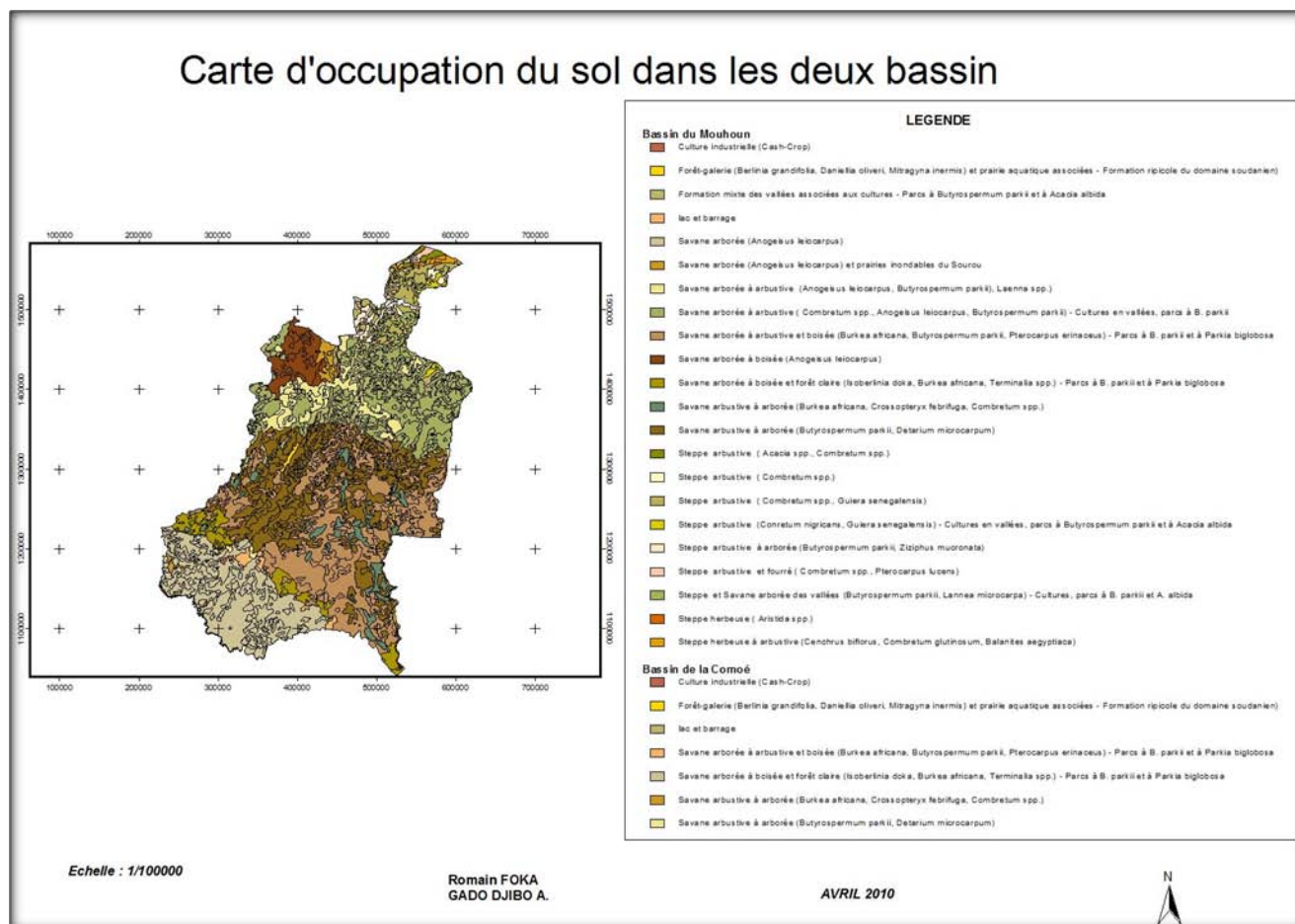


Figure 3 : Occupation du sol dans les bassins du Mouhoun et de la Comoé

1.3 Régimes hydrographiques

1.3.1 Ressources en eaux de surface

Le réseau hydrographique est dense et hiérarchisé avec les bas-fonds faiblement incisés étroits, mais avec de grandes vallées larges et de rares témoins épars de cuirasses résiduelles. Il est composé de deux principaux cours d'eau le Mouhoun et la Comoé. En outre, on dénombre de petites rivières saisonnières et de petites mares sur toute l'étendue de la zone.

Le cours d'eau principal du nom de la Comoé draine l'extrémité sud-ouest du pays sur un bassin versant de 18 000 km². Il prend sa source dans les falaises de Banfora. Son cours, coupé par des rapides et des chutes, communique avec des mares permanentes situées au pied de la falaise de Banfora, comme le lac de Tengrela. Les écoulements sont permanents. La

pluviométrie relativement abondante de ces régions confère aux rivières qui s'y trouvent un régime nettement soudanien avec une augmentation des débits dès le mois de juin et les débits de crue en août/septembre pouvant atteindre 500 m³/s. Ce cours d'eau a plusieurs affluents comme le Yanon, la Lobi, le Sinlo, le Koflandé, le Mou, le Kadiatou, ... ect, dont le plus important est la Léraba.

Quant au Mouhoun, seul cours d'eau permanent avec un bassin versant de 92 000 km², il prend sa source sur le versant nord du massif gréseux de la falaise de Banfora, dans une région où les précipitations annuelles dépassent 1 000 mm. Il coule d'abord vers le nord-est puis s'infléchit brusquement vers le sud. Au confluent du Sourou, le bassin versant du Mouhoun et ses principaux affluents (Plandi, Kou, Voun Hou) fournissent un débit moyen de 25 m³/s. Ce débit est cependant très irrégulier. Le principal affluent du Mouhoun est le Sourou, rivière à pente peu accusée, qui draine l'ancienne plaine lacustre du Gondo dont le bassin versant est de 15 200 km². Ce bassin, presque totalement sahélien ne produit que de faibles écoulements. À l'état naturel, lors des décrues, le Sourou alimentait le Mouhoun. Depuis 1984, les ouvrages de dérivation et de contrôle installés en amont de la confluence avec le Mouhoun permettent le stockage de 250 millions de m³ dérivés des crues d'hivernage et de restituer le surplus dans le Cours aval du Mouhoun pendant la saison sèche. Changeant brusquement de direction après la boucle du Sourou, le Mouhoun coule vers le sud-est puis plein sud, formant frontière avec le Ghana. Il parcourt le Burkina Faso sur une distance d'environ 860 km.

Avec la permanence de ces cours d'eau, plusieurs infrastructures hydrauliques sont érigées en vue de retenir les eaux de surface à travers la construction de barrages permettant de produire de l'hydroélectricité et de pratiquer l'agriculture irriguée.

1.3.2 Ressources en eaux souterraines

Les ressources en eau du Sud Ouest du Burkina Faso ont un volume total de 113240 m³ dont 9500 m³ constitués des ressources renouvelables (projet bilan d'eau, 1993).

On distingue deux systèmes d'aquifères :

- Le système aquifère de la zone du socle,
- Le système aquifère de la zone du sédimentaire

Les aquifères du socle sont ceux des milieux fissurés, ceux de la zone altérée et ceux des altérites. Dans la quasi totalité le socle est couvert de 10 à 30 m d'altération et les débits varient de 0.5 à 5 m³/h en moyenne.

Dans le milieu sédimentaire les aquifères sont les roches dures, la zone altérée et les altérites. La roche dure est représentée par les grès avec les failles orientées SO-NE, NO-SE (Sauret et *al.*, 2009) qui mettent en contact hydraulique plusieurs niveau et induisent : un écoulement lent et dispersé dans les grès non fracturés, et un écoulement rapide et concentré dans les zones de fractures et les niveaux de galets de quartz. Sur l'ensemble gréseux, les grès de Bobo Dioulasso et les grès de base s'avèrent de très bons aquifères : la transmissivité varie de 1.4 à 2.8 m²/s et les débits spécifiques voisins de 1 m³/h/m. Ces formations empilées les unes sur les autres et faiblement pentées (2 à 3°) sont intercalées par des argilites ou de carbonates rendant captifs la presque totalité des aquifères sédimentaires du sud ouest du Burkina Faso.

La zone se caractérise également par la présence de nombreuses sources dont les plus connues sont celles de la Guinguette (débit >6 000 m³/h.), de Nasso (débit >800 m³/h) et de Pesso (débit >400 m³/h) (Karim T., 1997). D'autres sources à débit important existent dans la zone mais sont encore mal connues.

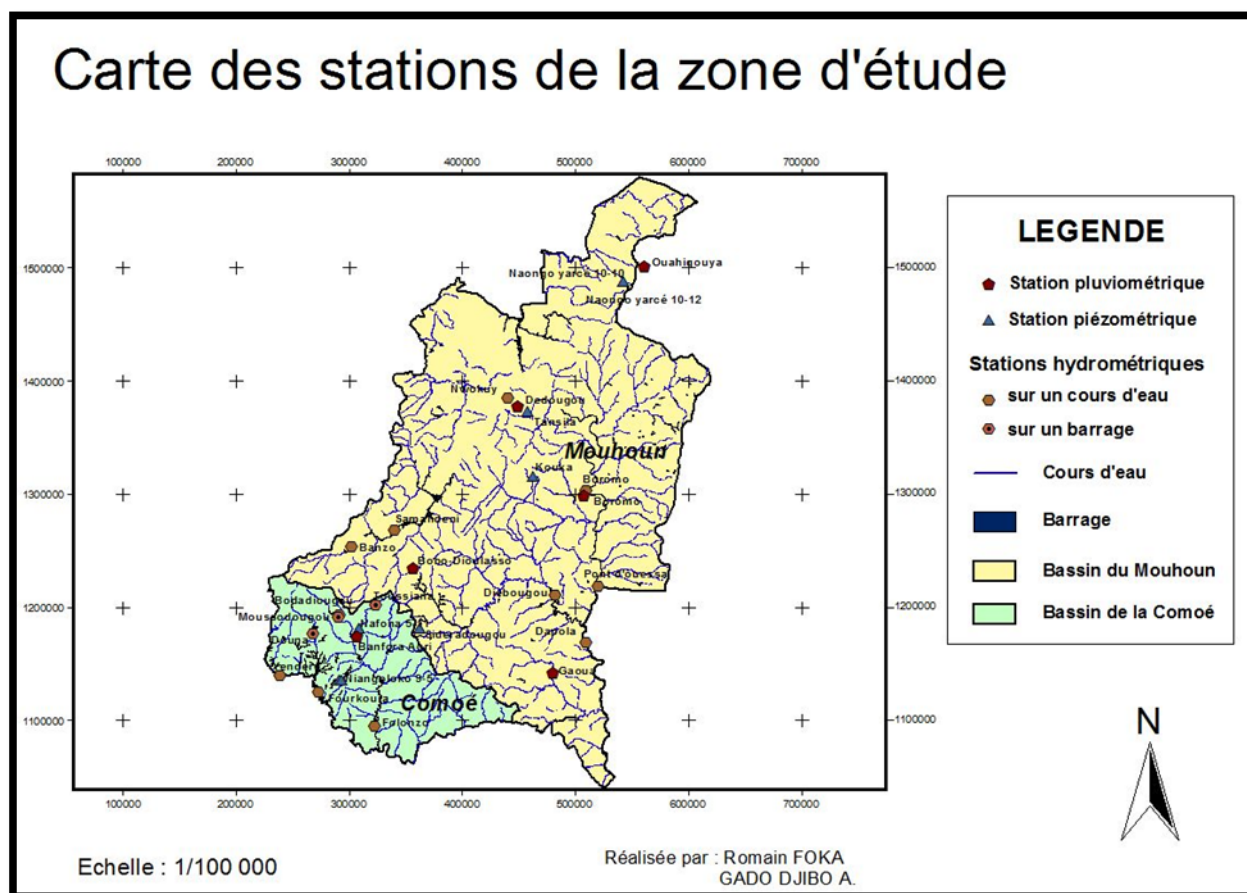


Figure 4 : Réseau hydrographique et stations hydrométéorologiques des bassins du Mouhoun et de la Comoé

1.4 Aspects sociaux économiques

Dans la zone d'étude, comme dans tout le reste du Burkina Faso, la demande en eau augmente fortement du fait d'un accroissement de la population à un rythme trop rapide pour s'accompagner d'un changement du système agraire, et aussi, à terme, de l'élévation du niveau de développement économique.

La population, sur l'ensemble de la zone d'étude, est estimée à près de 4038255 d'habitants (MEE/DGH 2001) et montre un profil démographique caractéristique de la plupart des pays en voies de développement : une progression rapide, un fort pourcentage de jeune, une inégale répartition.

Le secteur agricole demeure le moteur de développement économique et social de la zone. Les industries les plus importantes du pays se trouvent dans cette zone dont la SN-SO.SU.CO

et les grands moulins. A coté de ces usages hydroagricoles se pratiquent aussi les cultures maraichères. Ces bassins constituent une zone d'intenses activités pastorales où se côtoient les sédentaires et les transhumants. Les traversées de part et d'autres entre les frontières entraînent le plus souvent des conflits entre éleveurs et agriculteurs d'une part et d'autre part entre éleveurs locaux et étrangers pour l'utilisation des pâturages et des eaux.

La pêche ne représente qu'un complément alimentaire, mais c'est une activité répandue dans absolument tous les cours ou plans d'eau de la zone.

2. Données de l'étude

2.1 Présentation

Cette étude couvre les bassins du Mouhoun et de la Comoé situés au sud ouest du Burkina Faso. La figure 3 présente la distribution spatiale des 28 stations de mesures sur la zone d'étude. A l'annexe I, le tableau 1 résume les stations météorologiques, hydrométriques et piézométriques avec leur localisation (longitude-latitude) et période de données est fourni.

Trois types de données ont été étudiées pour ce travail: piézométriques, hydrométriques et météorologiques. Huit (08) stations piézométriques, dix (10) stations de jaugeage des cours d'eau, quatre (4) stations situées sur les barrages et six (6) stations météorologiques possédant des données sur une période de 1 à quarante (40) ans ont été compilées dans une base de données.

Les données piézométriques proviennent de la Direction Générale de l'Agriculture de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques (DGAHRH) du Burkina Faso. Les données piézométriques fournies pour notre étude étaient au départ au pas de temps journalier mais nous les avons ramenés au pas de temps mensuel pour une raison de conformité avec les données météorologiques et hydrométriques. Le tableau 2 de l'annexe I donne l'inventaire des piézomètres de la zone d'étude et leur état de fonctionnement. Les stations de Kouka et Tansila ont été écartées de l'étude car ayant des périodes de données très courtes (1 et 2 ans respectivement).

Les données hydrométriques sont constituées de débits enregistrés à des stations de jaugeage. Elles proviennent de la DGAHRH du Burkina Faso. Ces données sont mensuelles et s'étendent de 1970 à 2008, elles couvrent quatorze (14) stations dont dix (10) seulement ont

été utilisées car les quatre (4) autres concernent les volumes des barrages d'où leur exclusion de notre étude.

Les données météorologiques proviennent de la Direction Générale de la Météorologie (DGM) du Burkina Faso, collectées auprès des stations nationales. Les stations météorologiques retenues, voisines des stations piézométriques et/ou hydrométriques, présentent des valeurs mensuelles des pluies, de l'évapotranspiration, de la température moyenne, de l'humidité relative (maximale et minimale) et de la vitesse moyenne du vent. Parmi ces stations, cinq (5) sont synoptiques et seule la station de Banfora agriculture fait l'exception et ne possède que des mesures mensuelles de pluies.

Au total, vingt deux (22) stations ont pu être utilisées pour notre étude. Elles ont été sélectionnées en fonction de la qualité et de la longueur des séries météorologiques, hydrométriques et piézométriques.

2.2 Critique des données

L'observation des fiches de données recueillies fait ressortir des vides sur l'ensemble des séries hydroclimatiques. Mais le nombre de vides est élevé sur les fiches de données piézométriques et aussi sur celles des séries hydrométriques.

2.3 Les métadonnées

Des métadonnées fiables et complètes sont importantes pour s'assurer que les séries de données ont été recueillies dans des conditions constantes et par le fait même, que les conclusions qui découleront de leur analyse seront valides (Aguilar et *al.*, 2003). Dans le cas où les conditions d'observations ont changé avec le temps, les métadonnées permettent de retracer l'histoire de la station de mesure et ainsi, de corriger les ruptures éventuelles induites artificiellement par les changements de conditions d'observations ou encore, de nuancer les résultats d'analyses effectuées sur ces données.

➤ Techniques de collecte de données

- Les pluies se mesurent avec un pluviomètre. La surface du pluviomètre est placée de façon horizontale, 1mm de pluie correspond à un (1) litre d'eau sur une surface d'un mètre carré.
- La température se mesure grâce à un thermomètre à mercure placé sous abris.

- L'humidité relative se mesure à l'aide d'un hydrographe. L'élément sensible est une mèche de cheveux car elle s'allonge et se rétrécit en fonction du degré d'humidité.
- La vitesse des vents se mesure à l'aide d'un anémomètre.
- L'évapotranspiration ne se mesure pas, il existe des formules permettant de la calculer et qui tiennent compte de plusieurs paramètres (température, humidité, direction des vents, insolation...etc). La formule utilisée ici est celle de PENMAN.
- On détermine la valeur des débits à partir de la courbe de tarage (hauteurs d'eau en fonction des débits).
- Les hauteurs piézométriques sont déterminées à l'aide d'une sonde électrique, il faut chaque fois procéder à une validation de données avant de les introduire dans la base de données.

➤ **Incidences rencontrées lors de la collecte des données**

Les problèmes rencontrés sont surtout les erreurs humaines (erreurs de lecture, mauvaise appréciation d'un résultat...etc), cependant il existe le plus souvent quelques dysfonctionnements de certains appareils de mesure (thermomètre perforé ...etc) et un manque de personnels surtout au niveau de la gestion des données hydrométriques et piézométriques, d'où leur rupture constatée sur plusieurs périodes. Il faut aussi noter d'une part le manque de suivi dû à des problèmes financiers de l'Etat et d'autre part des actes de vandalisme (vol, destruction) sur les installations de mesure, d'où le remplacement ou la délocalisation des appareils d'un endroit à un autre.

III. METHODOLOGIE

Pour répondre aux objectifs de cette étude, une revue de littérature des méthodes d'homogénéisation des séries climatiques a été réalisée. Ainsi plusieurs tests ou procédures statistiques ont été retenus. Ces outils mathématiques sont la statistique descriptive, l'interpolation linéaire pour la reconstitution des données, les tests sur la normalité des séries (QQplot, Lillietest), les tests sur la non-stationnarité (ADF test), le test de Student et le tau de Kendall pour l'analyse de dépendance linéaire entre les stations, et enfin le test de Pettitt pour la détection des ruptures. Le modèle de Beaulieu *et al.*, (2008) a été utilisé pour générer les séries synthétiques afin de valider la méthodologie d'homogénéisation à travers des simulations. La présentation et les conditions d'application de chaque test sont données dans les paragraphes qui suivent.

1. Analyse exploratoire des données

L'analyse exploratoire des données est la première étape indispensable pour cette étude. Elle comprend une statistique descriptive et analyse graphique, le calcul du taux de données manquantes et la reconstitution de ces dernières. Ainsi nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour faire l'ensemble des analyses statistique des données. Mais au préalable le logiciel Excel a été utilisé pour la préparation des tableaux de données afin de faciliter leur analyse.

1.1 Statistique descriptive et analyse graphique

La description statistique de données ne peut se faire que par l'intermédiaire d'une analyse exploratoire complète d'un point de vue temporel, spatial et multivarié afin d'identifier d'éventuelles structures dans le jeu de données. Il s'agit aussi d'observer les relations de dépendance entre les différentes stations, ainsi que l'importance de chacune d'entre elles dans l'explication du phénomène. Il a permis d'observer l'autocorrélation, l'écartype, la moyenne, ... etc pour chaque série chronologique de mesure.

Quant à l'analyse graphique, elle a permis de faire une observation graphique des courbes de séries et leurs nuages de point de point afin de mieux apprécier leurs variabilités naturelles.

2. Analyse des données

2.1 Calcul de taux de données manquantes

Une vérification systématique a été effectuée sur les fichiers de valeurs brutes de données. Cette vérification a permis de dénombrer le nombre de vides par année au sein de la série permettant ainsi d'avoir le taux de données manquantes sur l'ensemble de la série.

2.2 Reconstitution des données

Les données hydrométéorologiques constituent une base de connaissance essentielle à l'évaluation des ressources en eau et pour les décisions qui en découlent dans l'étude des changements climatiques. Il est ainsi nécessaire de disposer des données complètes avec lesquelles on pourra faire sortir les bonnes analyses et décisions.

Il était préférable de chercher à reconstituer les valeurs mensuelles manquantes par interpolation linéaire si la période à reconstituer est de courte durée et ne se trouvant pas en début ou à la fin de la série chronologique. De façon générale, la reconstitution des données a été effectuée en utilisant en priorité les interpolations linéaires, puis éventuellement les moyennes intermensuelles. En gardant à l'esprit que l'estimation des données manquantes est entachée d'incertitudes, et ce, quelque soit le procédé mis en œuvre.

3. Normalité des séries

La normalité des séries de mesures hydrométéorologiques est vérifiée à travers l'utilisation des courbes quantiles-quantiles (QQ plot) complétées par l'application du test de Lilliefors (lillietest).

3.1 Courbes des Quantiles-Quantiles

Le graphique QQ plot (quantile-quantile plot) est un graphique "nuage de points" qui vise à confronter les quantiles de la distribution empirique et les quantiles d'une distribution théorique normale, de moyenne et d'écart type estimés sur les valeurs observées. Si la distribution est compatible avec la loi normale, la droite (Droite de Henry) symbolisant les quantiles de la loi normale de référence s'ajuste parfaitement au nuage de quantiles de l'échantillon observé (Ricco Rakotomalala, 2009).

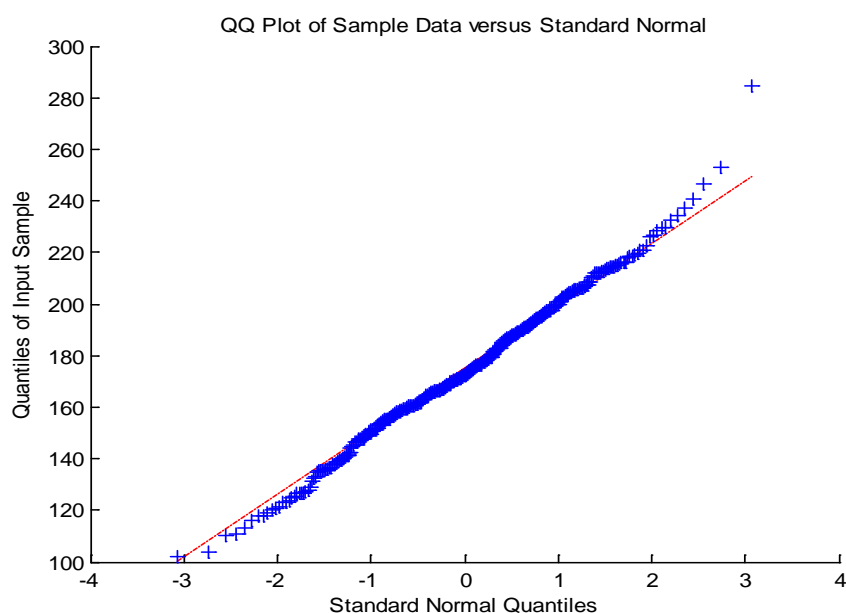


Figure 5 : Exemple d'un graphique des quantiles-quantiles

3.2 Test de Lilliefors (Lillietest)

Le test de Lilliefors repose sur l'hypothèse nulle « H_0 : l'échantillon suit une loi normale » contre hypothèse alternative « H_1 : l'échantillon n'est pas normalement distribué ». Le test de Lilliefors est le même que celui de Kolmogorov-Smirnov dont la statistique est:

$$KS = \max_x |SCDF(x) - CDF(x)|$$

Où SCDF est le cumul de la fonction de distribution empirique estimée à partir de l'échantillon et CDF le cumul de la fonction de distribution normale dont la moyenne et l'écart type sont égaux à ceux de l'échantillon (Lilliefors H., 1967).

4. Analyse de dépendance linéaire

Cette partie décrit les méthodes statistiques destinées à quantifier et tester la liaison entre plusieurs variables quantitatives. Elle permet d'étudier la variabilité des relations entre les différentes stations, d'établir des corrélations et d'identifier les variables qui peuvent potentiellement offrir un intérêt à la description du phénomène. Ainsi l'étude de corrélations linéaires permet d'apprécier le degré de dépendance entre les différents paramètres de l'étude.

Pour se faire, deux tests ont été utilisés : le test de Student (t-test) et le tau de Mann Kendall.

4.1 Test de Student (T-test)

Le test de Student est un test paramétrique permettant de savoir si le coefficient de corrélation (ρ) de deux échantillons est statistiquement significatif. Sous l'hypothèse de normalité de la population, la statistique $t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$ suit une loi de Student de $n-2$ degrés de liberté: T_{n-2} (pour $n > 2$)

On teste l'hypothèse nulle $H_0 : \rho = 0$ (absence de corrélation)

$H_1 : \rho \neq 0$ (corrélation significative)

Où r est le coefficient de corrélation entre deux échantillons de taille n .

La région critique (rejet de l'hypothèse nulle) du test au risque α s'écrit : $|t| > t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-2)$

Où $|t| > t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-2)$ est le quantile d'ordre $1 - \frac{\alpha}{2}$ de la loi de Student à $(n-2)$ degrés de libertés (Ricco Rakotomalala, 2008).

4.2 Tau de Kendall

Le test de Mann-Kendall également appelé «tau de Kendall», est un test non paramétrique basé sur le rang. On teste l'hypothèse nulle $H_0 : \tau = 0$ (les deux échantillons sont statistiquement dépendants), contre l'hypothèse alternative $H_1 : \tau \neq 0$ (les deux échantillons sont indépendants). Le tau (τ) de Mann Kendall se calcul comme suit:

Soient $(x_i, y_i), \dots, (x_n, y_n)$ un ensemble d'observations conjointes de deux variables aléatoires X et Y respectivement de telle sorte que toutes les valeurs de (x_i) et (y_i) sont uniques. Toute paire d'observations (x_i, y_i) et (x_j, y_j) sont dites concordantes si les rangs pour les deux éléments vérifient : c'est-à-dire si $x_i > x_j$ et $y_i > y_j$ ou si les deux $x_j < x_i$ et $y_j < y_i$. Elles sont dites discordantes si $x_i > x_j$ et $y_i < y_j$ ou si $x_i < x_j$ et $y_i > y_j$. Si $x_i = x_j$ ou $y_i = y_j$, la paire n'est ni concordante, ni discordante (Kendall, 1970).

Le coefficient tau (τ) de Kendall se définit comme suit :

$$\tau = \frac{(\text{nombre de paires concordantes}) - (\text{nombre de paires discordantes})}{\frac{1}{2}n(n-1)}$$

où n est la taille des échantillons et $-1 < \tau < 1$.

5. Etude de non stationnarité

L'étude de la stationnarité des séries hydrométéorologiques est une des tâches incontournables des hydrologues (BERNIER, 1977). Ainsi l'Organisation Mondiale de la Météorologie dans sa note technique numéro 79 « Climatic Change » (WMO, 1966), préconise la mise en œuvre de tests statistiques particuliers pour analyser la stationnarité des séries temporelles de nature hydrométéorologique.

Le contexte de non-stationnarité consistait à étudier la saisonnalité, la tendance et l'autocorrélation sérielle. La saisonnalité a été vérifiée à travers l'observation des représentations graphiques des séries hydrométéorologiques par rapport au temps de mesure. L'application de la moyenne mobile a permis de lisser les courbes de séries pour se débarrasser de la composante saisonnière.

Quant à l'étude de tendance s'est effectuée en deux phases, dont la première consistait à faire une analyse visuelle des nuages de points et des courbes de tendance linéaire des séries. Cette procédure permettait de dégager la tendance de la série (tendance à la hausse, tendance à la baisse, tendance qui semble stationnaire en moyenne). Cependant l'utilisation d'un test statistique, contrairement à un constat visuel, permet une différenciation plus rigoureuse des variabilités naturelles et des tendances réelles. Pour cette raison, nous avons procédé à l'application du test de Dickey-Fuller Augmenté (ADF test) encore appelé test de la racine unitaire, permettant de détecter le type de non-stationnarité, notamment la présence d'une tendance dans la série étudiée. (Dickey-Fuller, 1981)

On teste l'hypothèse nulle (H_0) selon laquelle la non stationnarité est du type TS (trend stationary) :

$$y_t = c + y_{t-1} + b_1 \Delta y_{t-1} + b_2 \Delta y_{t-2} + \dots + b_p \Delta y_{t-p} + e(t)$$

contre l'hypothèse alternative (H_1) qui dit que la non stationnarité n'est pas du type TS.

$$y_t = c + dt + ay_{t-1} + b_1 \Delta y_{t-1} + b_2 \Delta y_{t-2} + \dots + b_p \Delta y_{t-p} + e(t)$$

Où c est un coefficient de dérive, d un coefficient à tendance déterministe, a le coefficient d'un modèle autorégressif d'ordre 1 (AR1), $e(t)$ est un processus stationnaire indépendant et identiquement distribué, y_t est un processus non stationnaire.

L'autocorrélation sérielle est vérifiée à l'aide des courbes ACF (corrélogrammes) obtenues avec les séries désaisonnalisées. Le taux d'autocorrélation traduit la susceptibilité d'un évènement ayant affecté la station de se reproduire.

6. Méthodes de détection de changement de rupture des données

Au cours des dernières décennies, plusieurs méthodes ont été développées pour corriger les ruptures artificielles des séries climatiques. En effet, le besoin de longues séries de données climatiques fiables se fait de plus en plus sentir dans divers domaines. Il est alors très important de développer des techniques robustes de détection de ces biais artificiels pour que les données utilisées se rapprochent le plus possible des observations qui auraient été faites sans perturbation des conditions de mesure.

Ainsi on distingue diverses techniques d'homogénéisation de données qui peuvent être regroupées comme suit : les méthodes graphiques, les méthodes qui sont basées sur l'hypothèse de normalité (de la série de base, de la série de comparaison ou des résidus de régression), les méthodes basées sur une distribution non normale, les méthodes non paramétriques et les méthodes hybrides.

Le traitement statistique concerne la détection des changements brusques des caractéristiques de loi de distribution des variables. C'est à la détection d'un changement brusque de la moyenne que nous nous sommes intéressés.

Une rupture peut être définie de façon générale par un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu (Lubès *et al.*, 1998). Dans le cadre de cette étude nous avons opté pour le test de Pettitt.

6.1 Test de Pettitt

Le test de Pettitt (1979) a été choisi pour son utilisation dans de nombreuses études de détection de changement de la stationnarité, sa puissance surtout en ce qui concerne le test de rupture sur la moyenne (Lubès-Niel H. *et al.*, 1998), et sa robustesse (Lubès H. *et al.*, 1994).

Le test de Pettitt est non-paramétrique et dérive du test de Mann-Whitney (Pettitt, 1979). L'absence d'une rupture dans la série (x_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle H_0 . Pettitt définit la variable $U_{t,N}$:

$$U_{t,N} = \sum \sum D_{ij}$$

où $D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j)$ avec $\text{sgn}(Z) = 1$ si $Z > 0$, 0 si $Z = 0$ et -1 si $Z < 0$

Il propose de tester l'hypothèse nulle en utilisant la statistique K_N définie par le maximum en valeur absolue de $U_{t,N}$ pour t variant de 1 à $N-1$.

A partir de la théorie des rangs, Pettitt montre que si k désigne la valeur de K_N prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur k est donnée approximativement par:

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

Pour un risque α de première espèce donné, si la probabilité de dépassement estimée est inférieure à α , l'hypothèse nulle est rejetée. La série comporte alors une rupture localisée au moment τ où est observé K_N .

6.2 Ajustement

Dans cette section, on calcule des différences de moyenne entre les segments respectifs pour estimer l'amplitude des sauts sur les différentes séries chronologiques. Cette technique d'estimation vise à éviter l'interférence d'autres sauts éventuels dans le calcul de l'amplitude d'une inhomogénéité. D'abord, on applique une méthode d'homogénéisation successivement jusqu'à ce que tous les segments soient homogènes ou de longueur inférieure à 10.

Pour estimer les amplitudes, on considère que le dernier segment est homogène et on ajuste les segments précédents par rapport à celui-ci.

On estime l'amplitude du dernier saut en calculant la différence des moyennes entre le dernier segment et celui qui le précède. Ainsi pour correction, on ajoute cette valeur de l'amplitude aux données de l'avant dernier segment de manière à le ramener à la moyenne du dernier segment. Par la suite, on estime l'amplitude du deuxième saut en calculant la différence de moyenne entre le segment corrigé (i.e. l'avant dernier segment) et celui qui le précède. La correction de ce segment le ramène également à la valeur moyenne obtenue initialement. On refait la même chose pour les autres segments jusqu'au premier.

Ceci a pour but de s'assurer que les futures observations seront aussi homogènes, tant et aussi longtemps qu'il n'y a pas de nouveau changement dans les conditions de mesure de la station. (Aguilar *et al.*, 2003).

6.3 Validation de la méthodologie

La validation des techniques choisies repose sur l'évaluation de leur bonne performance générale. Pour ce faire, on a généré des séries synthétiques afin de tester la performance des méthodes d'homogénéisation. Ainsi les séries synthétiques sont générées à partir d'un modèle qui a été proposé par Easterling et Peterson (1992) et repris par Vincent (1998) et par Ducre-Robitaille et *al.* (2003) pour générer des séries synthétiques de température.

$$Z_i = \theta_1 Z_{i-1} + e_i$$

où Z_i représente la précipitation totale de l'année i standardisée, θ_1 est l'autocorrélation entre les années et e_i est un résidu normalement distribué de moyenne 0 et de variance $1 - \theta_1^2$. Par la suite, on multiplie par l'écart type et on ajoute la moyenne pour avoir y_i^* , la précipitation totale de l'année i .

Mais afin de pouvoir appliquer ce modèle, on a vérifié si les séries dessaisonnalisées sont autorégressives (AR1) sinon procéder à leur transformation. La méthodologie est validée après plusieurs simulations du modèle sur les données synthétiques.

IV. Résultats

1. Statistique descriptive

Le tableau 4.1 ci-dessous résume les paramètres statistiques (moyenne, écart type, autocorrélation,...etc.) des séries hydroclimatiques de toutes les stations.

Ce tableau montre un écartype élevé pour la station de débit de Dapola (135,15) et montre une forte autocorrélation pour les séries de ETP, débit et piézométriques.

Tableau 1 : Statistique descriptive des stations des variables de la zone d'étude

| Variables | Stations | Autocorrélation | Moyenne | Ecartype | Maximum | Minimum |
|------------------|----------------|-----------------|---------|----------|---------|---------|
| Niveau piézo (m) | DOGONA | 0,81 | 8,64 | 0,75 | 9,71 | 6,48 |
| | NAFONA | 0,72 | 8,59 | 1,72 | 11,76 | 2,02 |
| | NIANGOLOKO | 0,84 | 13,68 | 1,38 | 16,31 | 9,78 |
| | SIDERADOUGOU | 0,67 | 4,63 | 1,06 | 6,88 | 2,27 |
| | NAONGO 10-10 | 0,44 | 6,70 | 2,24 | 13,46 | 0 |
| | NAONGO 10-12 | 0,86 | 9,62 | 2,57 | 13,15 | 0 |
| Débit (m3/s) | YENDERE | 0,55 | 25,77 | 48,55 | 300 | 0 |
| | FOLONZO | 0,53 | 18,77 | 35,61 | 236 | 0 |
| | FOURKOURA | 0,55 | 11,61 | 18,89 | 90,10 | 0 |
| | BOROMO | 0,70 | 27,60 | 36,51 | 255 | 0,049 |
| | DAPOLA | 0,66 | 82,75 | 135,15 | 840 | 0 |
| | SAMENDENI | 0,67 | 14,19 | 19,05 | 94,7 | 0,006 |
| | BANZO | 0,69 | 8,60 | 12,86 | 60,1 | 0 |
| | NWOKUY | 0,79 | 29,77 | 28,73 | 180 | 0,78 |
| | OUESSA | 0,62 | 48,75 | 53,11 | 311 | 0 |
| BOUGOURIBA | 0,61 | 21,70 | 35,09 | 190 | 0 | |
| ETP (mm) | BOBO DIOULASSO | 0,79 | 163,58 | 33,10 | 229,2 | 86 |
| | BOROMO | 0,69 | 153,07 | 23,25 | 214,7 | 92,6 |
| | DEDOUGOU | 0,75 | 176,31 | 32,74 | 250,4 | 99,4 |
| | OUAHIGOUYA | 0,69 | 174,26 | 26,10 | 284,5 | 102,3 |
| | GAOUA | 0,76 | 151,77 | 26,69 | 226,6 | 79,7 |
| HuMax (%) | BOBO DIOULASSO | 0,81 | 70,37 | 25,08 | 98 | 23 |
| | BOROMO | 0,83 | 70,45 | 22,09 | 98 | 31 |
| | DEDOUGOU | 0,82 | 64,87 | 25,07 | 98 | 20 |
| | OUAHIGOUYA | 0,83 | 61,18 | 23,85 | 98 | 23 |
| | GAOUA | 0,80 | 79,06 | 19,78 | 99 | 29 |
| HuMin (%) | BOBO DIOULASSO | 0,83 | 36,14 | 19,85 | 69 | 7 |
| | BOROMO | 0,82 | 31,53 | 18,55 | 68 | 7 |
| | DEDOUGOU | 0,81 | 28,83 | 19,04 | 67 | 5 |
| | OUAHIGOUYA | 0,80 | 25,61 | 16,23 | 65 | 5 |
| | GAOUA | 0,83 | 38,10 | 18,81 | 68 | 7 |

| | | | | | | |
|---------------|----------------|------|----------|--------|-------|------|
| Tmoy (°C) | BOBO DIOULASSO | 0,66 | 27,26 | 2,10 | 32,5 | 23,6 |
| | BOROMO | 0,64 | 28,20 | 2,44 | 34,1 | 22,8 |
| | DEDOUGOU | 0,64 | 28,74 | 2,61 | 34,4 | 23,4 |
| | Ouahigouya | 0,63 | 28,91 | 2,97 | 35,2 | 21,9 |
| | GAOUA | 0,64 | 27,40 | 2,03 | 32,5 | 20,6 |
| Vent (m/s) | BOBO DIOULASSO | 0,74 | 2,76 | 0,67 | 4,3 | 1,1 |
| | BOROMO | 0,76 | 1,29 | 0,45 | 2,8 | 0,4 |
| | DEDOUGOU | 0,68 | 2,40 | 0,71 | 4,1 | 0,8 |
| | Ouahigouya | 0,79 | 2,05 | 0,70 | 4,6 | 0,6 |
| | GAOUA | 0,74 | 1,45 | 0,51 | 3 | 0,5 |
| Pluie (mm) | BOBO DIOULASSO | 0,66 | 993,13* | 96,25 | 460,4 | 0 |
| | BOROMO | 0,62 | 863,89* | 88,53 | 443,2 | 0 |
| | DEDOUGOU | 0,64 | 763,55* | 82,45 | 402,1 | 0 |
| | Ouahigouya | 0,60 | 1049,42* | 90,68 | 581 | 0 |
| | GAOUA | 0,63 | 611,41* | 73,93 | 398,7 | 0 |
| | BANFORA AGRI | 0,58 | 1035,51* | 100,41 | 543 | 0 |

Les valeurs portant le symbole (*) sont des cumuls de pluie.

■ Stations du bassin de la Comoé

■ Stations du bassin du Mouhoun

2. Taux de données manquantes

L'analyse exploratoire a permis dans un premier temps d'avoir une idée sur le taux de mesures manquantes qui varie de 0% à 63,16% pour les séries piézométriques, 0% à 26% pour les séries hydrométriques.

Il en ressort que les séries météorologiques ont les taux les plus faibles (taux variant de 1% à 5%). Le tableau 1 de l'annexe I présente l'ensemble des stations de notre zone d'étude, la période de mesure ainsi que le taux de mesures manquantes par station. La figure 5 ci-dessous montre l'évolution temporelle des lacunes à la station piézométrique de Niangoloko. Les autres figures sont présentées en annexe II, ainsi que les variations du nombre de mesures mensuelles pour les stations piézométriques.

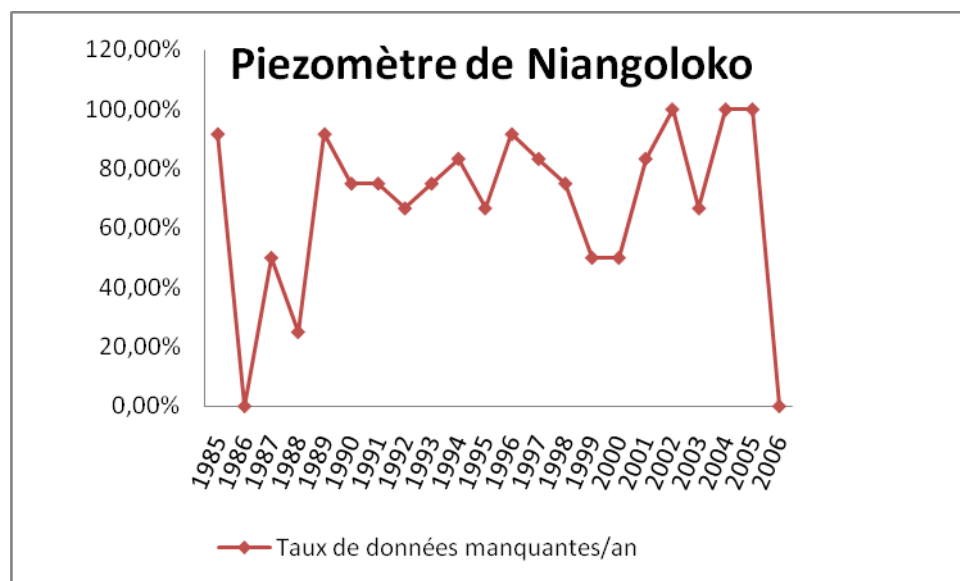


Figure 6 : Evolution annuelle du taux de lacunes à la station de Niangoloko

3. Reconstitution des données

L'analyse des données a permis dans un premier temps d'avoir une idée sur le taux de mesures manquantes qui varie de 0 à 63,16% pour l'ensemble des stations.

La technique de l'interpolation linéaire nous a permis de combler les données manquantes de 40 à 64% de lacunes au niveau de certaines stations piézométriques, 4 à 27% pour d'autres stations de débits et 0 à 12% pour quelques stations météorologiques.

Le taux élevé de lacunes constaté sur les séries hydrologiques (données hydrométriques et piézométriques) est dû à des interruptions des observations et des mesures (pillage, destruction, ...) sur une grande partie du réseau.

4. Normalité des séries

Les courbes de quantiles-quantiles appelées « QQ plot » pour l'ensemble des séries, nous laisse présager visuellement une tendance presque linéaire pour les ETP, les températures moyennes et les vitesses du vent ainsi que les hauteurs piézométriques de Niangoloko. Mais l'application du test de Lilliefors (lillietest) nous confirme que seules les séries d'évapotranspiration de Ouahigouya et celles des piézomètres de Niangoloko et Sideradougou suivent une loi de distribution normale. Pour le reste des séries l'hypothèse d'appartenance à

une distribution normale (H_0 : hypothèse nulle) est rejetée. Les courbes de toutes les séries issues du test de normalité sont présentées en annexe III.

5. Etude de corrélation

L'analyse des corrélations entre la pluie et les autres paramètres hydroclimatiques montre que la pluie est bien corrélée avec le débit. En occurrence la série de débit de Samendeni est bien corrélée aux séries de pluie (0,63), tandis que la série de débit de Nwokuy est moins corrélée aux séries de pluie (0,10). Quant à la température, elle est négativement corrélée aux séries de débit, dont la faible corrélation est entre la série de température de Ouahigouya et les séries de pluie. L'ensemble des corrélations est résumé dans le tableau 3 en annexe I.

Le test de Student nous montre que les coefficients de corrélation sont légèrement différents de zéro entre les pluies de la station de Bobo Dioulasso et les niveaux piézométriques de la station de Naongo-Yarce 10-12 d'autre part

Les valeurs du tau de Kendall (τ) montrent une forte dépendance entre les séries de pluie (0,80) d'une part et entre les séries de température et celles de débit d'autre part. On note également que les séries de température, des débits et de pluies sont moins dépendantes entre elles (0.01 à 0.30).

6. Etude de non stationnarité

6.1 Saisonnalité

L'analyse des courbes de séries fait ressortir des fortes saisonnalités pour l'ensemble des séries. A titre illustratif la figure ci-dessous montre respectivement la présence d'une forte saisonnalité sur les séries de pluie et de débit.

Le lissage des courbes de séries par la méthode de la moyenne mobile (ordre 11 et 25) a permis de se débarrasser de la saisonnalité sur l'ensemble des séries. Les courbes lissées sont regroupées en annexe III pour certaines séries chronologiques de mesures.

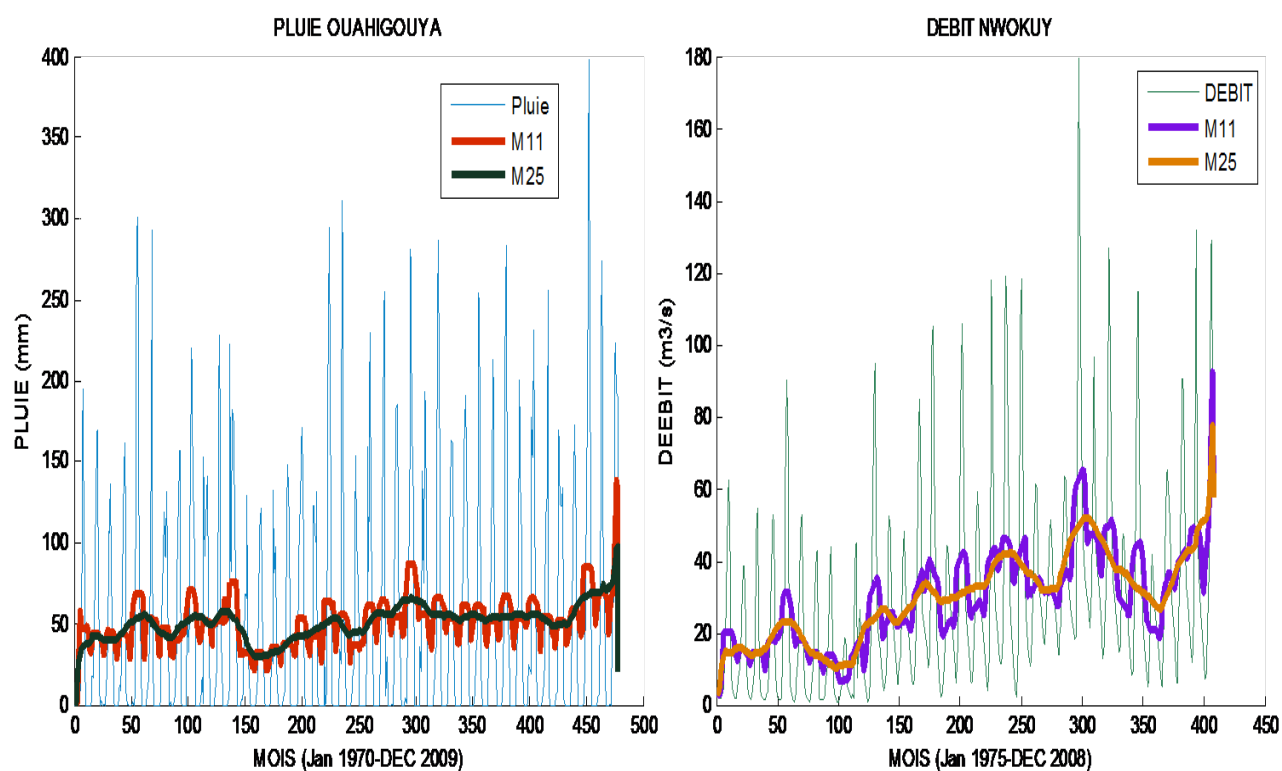


Figure 7 : Saisonnalité des séries de pluie de Ouahigouya et de débit de Nwokuy

6.2 Présence de tendance

L'analyse visuelle des nuages des points et des courbes de tendance linéaire des séries montrent que ces séries ont toutes une tendance. Ainsi les séries piézométriques, hydrométriques, de température (voir figure ci-dessous), de la vitesse du vent et des pluies ont une tendance générale à la hausse, contrairement aux humidités relatives et les pluies dont leurs tendances sont à la baisse.

Le test de Dickey-Fuller Augmenté (ADF test) a permis de faire une différenciation plus rigoureuse de ces premières tendances issues d'une constatation visuelle. Ainsi les résultats de ce test nous montre clairement qu'il existe une non stationnarité de type déterministe (TS : trend stationary) pour l'ensemble des séries, sauf les séries piézométriques de Dogona et Niangoloko. Le tableau 4 de l'annexe I nous donne la totalité des résultats de ce test.

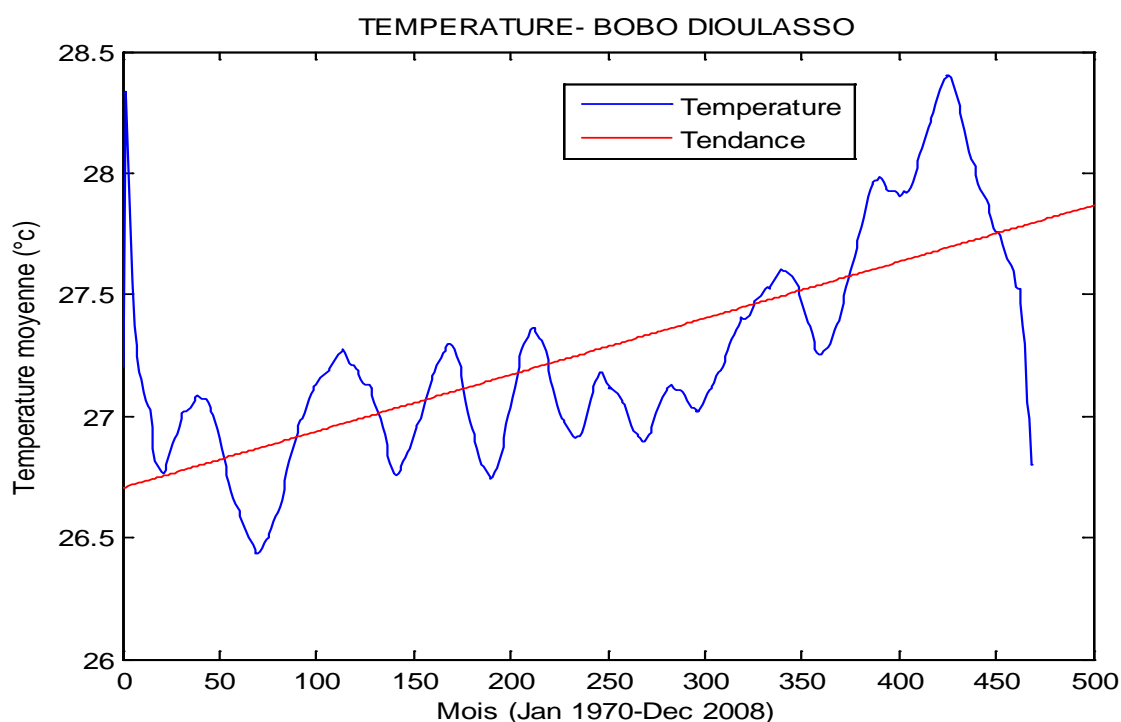


Figure 8 : Tendence de la température de la station de Bobo Dioulasso

6.3 Autocorrélation sérielle

Les plus fortes autocorrélations sont observées au niveau des séries piézométriques, hydrométriques, et d'évapotranspiration potentielle avec des valeurs variant autour de 0,80. On note également une autocorrélation moyenne pour les séries de pluie (0,45-0,6). En général, une forte autocorrélation est observée pour l'ensemble des paramètres.

7. Détection de ruptures

Les stations étudiées dans cette section sont celles qui ont été sélectionnées en fonction de la qualité et de la longueur des séries temporelles. La détection de rupture s'est faite en appliquant les trois approches de segmentation (point ciblé, fenêtre glissante et variation de la longueur du segment) sur les séries chronologiques de mesures.

Pour l'ensemble des stations hydrométéorologiques testées, les séries de pluies ainsi que celles de débits plus de ruptures (4 à 5), tandis qu'aucune rupture n'est enregistrée pour les séries piézométriques de Sideradougou et Naongo Yarce 10-10. Le tableau 4.2 ci-dessous présente les résultats de la détection des ruptures des différentes variables.

Tableau 2 : Périodes de rupture sur les séries hydrométéorologiques

| PARAMETRES | STATIONS | PERIODES DE RUPTURE |
|------------------|----------------|---|
| Niveau piezo (m) | DOGONA | Mars 1995 |
| | NAFONA | Oct 1988, Mars 1991, Juil 1994, Oct 1996, Fev 1998, Mai 2000, |
| | NIANGOLOKO | Oct 1992 |
| | NAONGO 10-12 | Avril 1990, Dec 1994, Juil 1997, Avril 2000 |
| Débit (m3/s) | YENDERE | Mars 1984, Juin 1992, Juin 1996, Sept 1999 |
| | FOLONZO | Jan 1990 |
| | FOURKOURA | Juil 1980, Avril 1990, Nov 1992, Nov 1995 |
| | BOROMO | Aout 1988, Aout 1992, Mars 2000, Mai 2002, Oct 2004 |
| | DAPOLA | Fev 1984, Fev 1998, Mars 2000, Juil 2004 |
| | SAMENDENI | Mars 1984, Oct 1988, Jan 1992, Mars 2000 |
| | BANZO | Aout 1981, Mars 1984, Mars 1986, Avril 1993, Juin 1997 |
| | NWOKUY | Avril 1984, Nov 1986, Juin 1992, Avril 2000, Avril 2005 |
| | OUESSA | Jan 1984, Oct 1989, Juin 1992, Aout 1994 |
| | BOUGOURIBA | Aout 1980, Mars 1984, Fev 1989, |
| | ETP (mm) | BOBO DIOULASSO |
| BOROMO | | Dec 1975, Juin 1983, Nov 1991 |
| DEDOUGOU | | Aout 1977, Jan 1983, Jan 1992, Avril 2004 |
| GAOUA | | Nov 1980, Sept 1985, Jan 1990 |
| OUAHIGOUYA | | Oct 1977, Jan 1990 |
| HuMax (%) | BOBO DIOULASSO | Mars 1984, Oct 1989, Dec 2001 |
| | BOROMO | Fev 1984, Juil 1989, Sept 1995, Mai 2002 |
| | DEDOUGOU | Jan 1993, Mars 2005, Jan 2000 |
| | OUAHIGOUYA | Oct 1984, Dec 1994, Dec 2002 |
| | GAOUA | Jan 1984, Mai 1991, Avril 1994 |
| HuMin (%) | BOBO DIOULASSO | Juil 1989, Sept 1998 |
| | BOROMO | Juin 1980, Jan 1984, Juil 1989, Juil 1999 |
| | DEDOUGOU | Dec 1994, Mai 1996, Juin 1999, |
| | OUAHIGOUYA | Jan 1990, Oct 1998 |
| | GAOUA | Sept 1975, Juin 2000 |
| Tmoy (°C) | BOBO DIOULASSO | Nov 1975, Sept 1994, Jan 2000 |
| | BOROMO | Nov 1975, Juil 1989, Nov 1999 |
| | DEDOUGOU | Dec 1994, Oct 1999 |
| | OUAHIGOUYA | Juil 1981, Aout 1987, sept 2000 |
| | GAOUA | Aout 1975, Juil 1995, Jan 2000 |
| Vent (m/s) | BOBO DIOULASSO | Oct 1978, Sept 1997, Juil 2002, Mai 2005 |
| | BOROMO | Juil 1996, Mars 1999, Dec 2004 |
| | DEDOUGOU | Mars 1994, Oct 1999, Avril 2004 |
| | OUAHIGOUYA | Juin 1989, Sept 1994, Jan 1999 |
| | GAOUA | Nov 1980, Juil 1989, Aout 1993, Mai 2001 |
| Pluie (mm) | BOBO DIOULASSO | Aout 1976, Oct 1980, Juin 1984, Oct 1991, Oct 1997, Aout 2005 |
| | BOROMO | Nov 1983, Oct 1974, Juil 1988, Jan 1990, Dec 1994 |
| | DEDOUGOU | Juin 1976, Fev 1983, Juin 1994, Oct 1999 |
| | OUAHIGOUYA | Mai 1983, Jan 1990, Oct 1994, Jan 1998, Oct 2004 |
| | GAOUA | Nov 1979, Fev 1984, Dec 1990 |

| PARAMETRES | STATIONS | PERIODES DE RUPTURE |
|-------------------|-----------------|------------------------------|
| | BANFORA AGRI | Fev 1985, Dec 1981, Jan 1990 |

V. Discussions et recommandations

1. Discussions

Les résultats montrent que les taux de données manquantes les plus élevés sont ceux des stations piézométriques. Cela est dû au manque de suivi des piézomètres suite à la fin du projet qui était chargé de leur suivi. Ainsi au terme de ce projet, l'Etat n'ayant pas les moyens, les piézomètres sont laissés à eux-mêmes, d'où l'accumulation des lacunes croissantes au fil du temps. Quant aux stations hydrométriques leur taux de données manquantes est essentiellement dû à des défaillances techniques et institutionnelles (manque de moyen financier pour assurer le suivi de l'ensemble des stations) et à des actes de vandalismes (vol des échelles limnimétriques, des barres IPNetc.). Cependant il existe des stations hydrométriques (Nwokuy et Banzo) qui n'enregistrent aucune donnée manquante, ce qui signifie qu'elles sont bien suivies. Les lacunes au niveau des stations météorologiques sont dues essentiellement du non déplacement de l'observateur chargé de prendre les mesures pour des raisons diverses. Il est à noter une évolution décroissante de ces manques de données, ce qui prouve un meilleur suivi tout au long des années de mesures.

Cependant la variation brusque des mesures de débit montrant des valeurs élevées (300 à 800m³/s) pour certaines stations (Dapola, Ouessa) est due à l'abondance des pluies au mois d'août qui font à ce que les plans d'eau se remplissent au niveau du Sourou et pour ne pas inonder les plaines on est obligé d'ouvrir les vannes au mois de septembre pour faire passer l'excédent. Le débit issu de toutes ces vannes est donc très important au niveau de certaines stations hydrométriques.

La technique des courbes Quantiles-Quantiles (QQ plot) montre que les courbes des séries de mesures d'évapotranspiration, de la vitesse moyenne du vent et de certaines séries piézométriques ont une bonne dispersion du nuage de points. Cependant l'application du test de Lilliefors a prouvé que l'alignement linéaire du nuage de points ne signifie pas forcément que la série suit une loi normale, ainsi seules les séries chronologiques de mesures des piézomètres de Niangoloko, Sideradougou et l'évapotranspiration de Ouahigouya sont normalement distribuées. Cela signifie que ces séries de mesures ont moins de tendance à produire des valeurs extrêmes exceptionnelles

Il ressort des résultats obtenus (Cf. tableau 2) que les séries de pluies et de débits possèdent le plus grand nombre de ruptures, cela s'explique par la grande variabilité spatiale des précipitations qui fait en sorte que les pluies soient influencées facilement par la nature. Quant aux débits il résulterait de lors forte dépendance des pluies comme l'atteste l'étude de corrélation pluies-débits (tableau 3 de l'annexe I).

Les ruptures détectées au niveau des pluies mensuelles moyennes font apparaître pour toutes les séries des périodes communes (Novembre 1983, Juin 1984, Mai 1983). Ces changements seraient liées à la sécheresse survenue vers 1983 et qui aurait touché des stations de l'Afrique de l'Ouest dont le Burkina Faso. De même certaines ruptures (février 1984, mars 1984, janvier 1984) observées au niveau des débits (Dapola, Banzo et Ouessa) seraient le résultat des étiages voire le tarissement total des cours d'eau sur lesquels sont installées les stations, ces tarissements semblent être dus à la sécheresse citée précédemment. Par contre les ruptures d'août 1988 et août 1994 résulteraient des crues exceptionnelles que les stations de Boromo et Ouessa ont enregistrées à ces périodes. On note également des ruptures liées à des augmentations ou diminutions brutales de la moyenne. En outre, pour les précipitations des ruptures sont identifiées au cours des mois les plus pluvieux (août 1976, juillet 1988), ainsi Nicolas A. *et al.*, (1997) homogénéisant des précipitations en Côte d'Ivoire (Adiopodoume) ont trouvé que leurs ruptures se produisent d'abord au cours des mois moyennement pluvieux, puis au cours du mois le plus pluvieux. D'autre part, pour Ducré-Robitaille *et al.*, (2003) le test de rang n'a pas donné de bons résultats dans l'homogénéisation des précipitations. Ils ont toutefois suggéré d'augmenter la taille de la fenêtre mobile pour augmenter sa performance. Cette suggestion a été prise en compte dans cette étude en variant la taille de la fenêtre à des pas successifs (pas minimum=10).

D'autres ruptures résulteraient des changements abrupts, par exemple pour les températures c'est en novembre 1975 que s'est produite la rupture suite à une baisse abrupte de la moyenne pour la majorité des stations.

Comme le montrent les figures 7 et 8 ci-dessous à titre illustratif, on remarque des ruptures dues respectivement à des changements abrupts dans la moyenne, des changements de tendance.

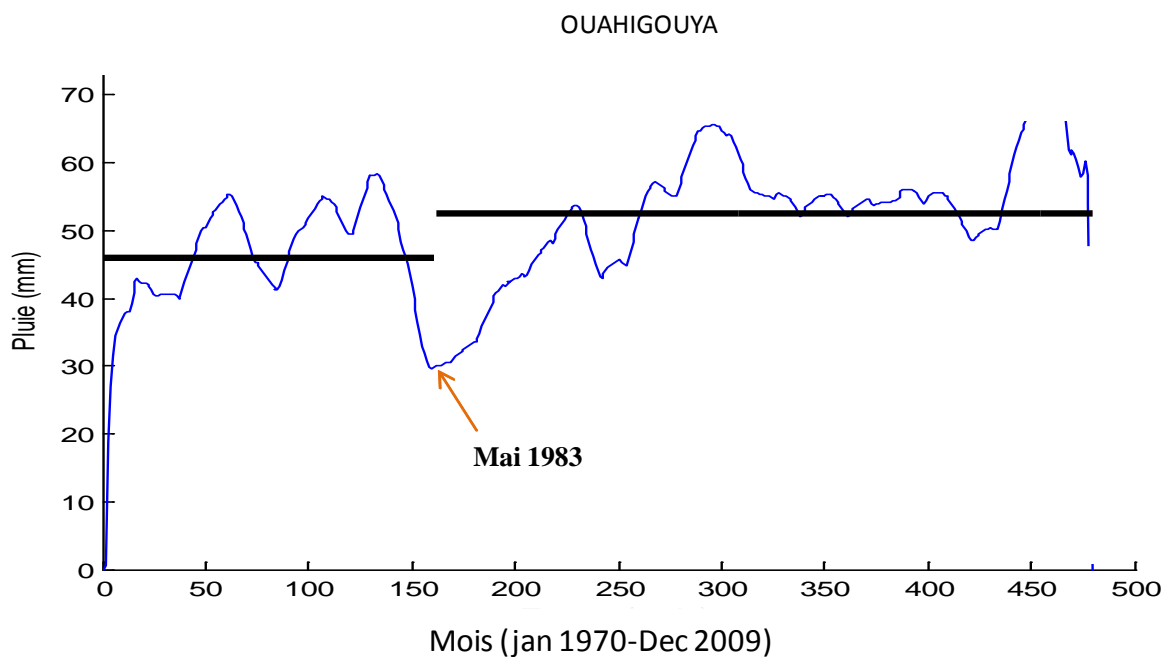


Figure 9 : Graphique d'une rupture due à un changement de moyenne

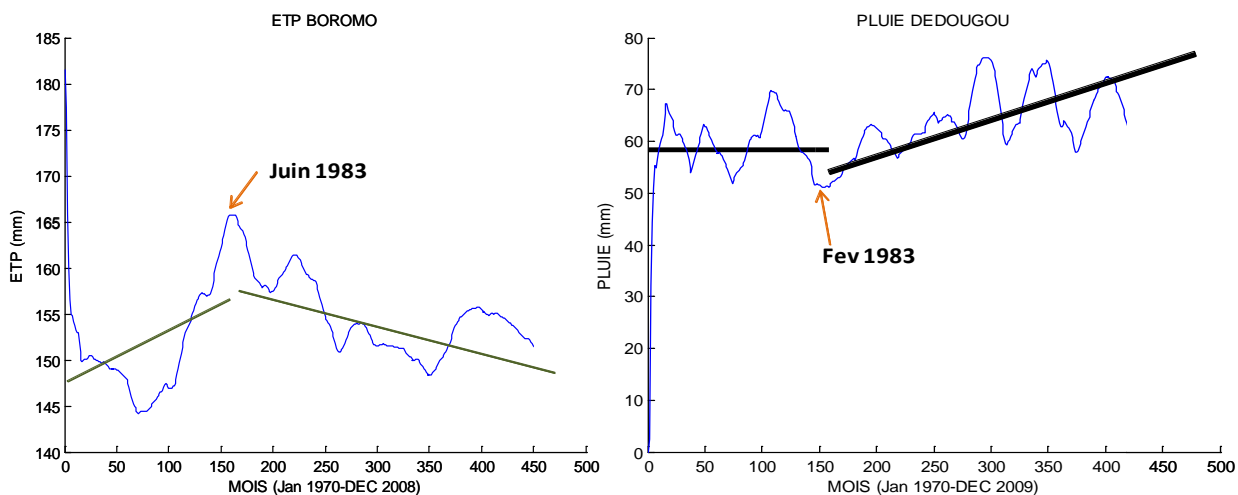


Figure 10 : Graphique des ruptures dues à des changements de tendances

Néanmoins, des ruptures trouvent leur explication dans les métadonnées : d'une part au changement des appareils comme est le cas pour certaines stations de débits (avril 2000, octobre 2004, septembre 1999) et d'autre part à la délocalisation des stations de mesures comme il en est pour les stations de pluies. Ces résultats corroborent avec ceux trouvés par Daly et *al.*, (2007) sur des séries hydrométriques, et se conforment à la conclusion (le déplacement d'une station est souvent accompagné de changement dans les données) de Mestre (2000). Les études de Begert et *al.*, (2003) complètent que certaines inhomogénéités sont dues à l'introduction de nouveau équipement dans le réseau de mesure de température. Tous les graphiques de détection de ruptures sont résumés à l'annexe IV.

2. Recommandations

Les données climatiques sont toujours contaminées par des ruptures artificielles dues à des modifications dans les réseaux d'observations. Ces modifications sont entre autre le déplacement de station, le changement d'instrument de mesure, le changement dans l'environnement immédiat d'une station, le changement d'observateur, etc. Ainsi l'utilisation des métadonnées est d'une très grande importance dans l'explication des inhomogénéités détectées dans les données. Pour cela nous suggérons la création d'une base de métadonnées au niveau de la DGM et la DGAHRH, dans lesquelles l'historique de chaque station sera tracé. Cette historique doit contenir les enregistrements, les photographies, les rapports d'inspection, les entrevues avec les personnes qui en sont responsables de la station et enfin toutes les informations pertinentes sur la station.

Les travaux effectués dans cette étude n'ont concerné que vingt deux (22) stations, il importe d'étendre cette étude à l'échelle nationale afin de disposer des bases de données complètes facilitant ainsi les études des changements climatiques et la gestion des ressources en eau. Pour cela nous recommandons un suivi régulier des stations hydrométriques et piézométriques, où trop de lacunes ont été repérées. Ce suivi pourrait être inclus dans le programme d'action national d'adaptation à la variabilité et aux changements climatiques, afin de susciter un financement par des organismes internationaux en partenariat avec le Burkina Faso. Il est aussi très primordial de sensibiliser au préalable les preneurs de décision et les cadres techniques des services concernés sur le problème crucial de la disponibilité des données complètes et fiables.

VI. Conclusion

Le développement de techniques d'homogénéisation des données est crucial pour l'étude du climat. Ainsi le but de cette étude a consisté à la proposition d'une méthodologie d'homogénéisation de données hydrométéorologiques adaptées aux caractéristiques de notre zone d'étude.

Cette méthodologie est fondée sur l'utilisation de trois techniques de segmentation dont la fenêtre glissante, celle du point ciblé par observation de la courbe de série et la dernière porte sur la variation de la longueur du segment. Pour aboutir à cette méthodologie, on a procédé dans un premier temps à répertorier les caractéristiques hydro-climatiques des bassins de la Comoé et du Mouhoun, secundo faire une analyse des données, une analyse exploratoire, une étude de normalité et de corrélation avant de réaliser une étude de non stationnarité et enfin procéder à l'homogénéisation des données.

Ces techniques ont permis de détecter des ruptures qui sont liées à des phénomènes naturelles et artificielles. On note ainsi des séries sans ruptures comme celles des stations piézométriques de Sideradougou et Naongo Yarce 10-10. Il ressort ainsi que la technique de la fenêtre mobile donne des meilleurs résultats comparée aux deux autres.

Cependant, la faible qualité des données piézométriques et hydrométriques a rendu difficile l'homogénéisation des données.

Ainsi la disponibilité de ces données homogènes permet de contribuer à l'élaboration des stratégies de politique basées sur des données fiables et complètes dans la gestion intégrée des ressources en eau.

VII. Références bibliographiques

- Aguilar E., Auer I., Brunet M., Peterson T.C., Wieringa, J. (2003), Guidelines on climate metadata and homogenization. *WMO-TD No. 1186, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.*
- Assani Ali A., (1999), Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (El Niño/La Niña). *Sécheresse*, 10(4), pp 245-252.
- Beaulieu C., (2009), Homogénéisation des séries de précipitations et identification des techniques les plus prometteuses et nouveaux développements. Thèse de Doctorat en sciences de l'eau, *Université du Québec (INRS-ETE)*, 299pp
- Beaulieu C., Ouarda T.B.M.J., Seidou O. (2007), Synthèse des techniques d'homogénéisation des séries climatiques et analyse d'applicabilité aux séries de précipitations. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques* 52 (1), 18-37.
- Beaulieu C., Seidou O., Ouarda T.B.M.J., Zhang X., Boulet G., Yagouti A. (2008), Intercomparison of homogenization techniques for precipitation data. *Water Resources Research* 44 (2), W02425.
- Bello N. J., (1998), Evidence of climate change based on rainfall records in Nigeria. *Weather*, 52(12), pp 412-418.
- Begert M., Thomas S., Walter K., (2005), Homogenous temperature and precipitation series of switzerland from 1864 to 2000. *International Journal of Climatology* 25 (1), 65-80
- Bernier J., (1977), Etude de la stationnarité des séries hydrométéorologiques. *La houille Blanche*. N°4.313-319
- Daly C., Gibson W.P., Taylor G.H., Doggett M.K., Smith J.I. (2007), Observer bias in daily precipitation measurements at United States cooperative network stations. *Bulletin of the American Meteorological Society* 88 (6), 899-912.
- Dickey D. A., Fuller W. A. (1979), Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root. *Journal of the American Statistical Association*. Vol. 74, 1979, pp. 427–431.
- Ducré-Robitaille J. F., Boulet G., Vincent L. A. (2003), Comparison of techniques for
-

- detection of discontinuities in temperature series. *International Journal of Climatology*, 23: 1087-2003.
- Easterling D.R., Peterson T.C. (1992), Techniques for detecting and adjusting for artificial discontinuities in climatological time series: a review. Proc. *Fifth International Meeting on Statistical Climatology*, 22-26 June 1996, Toronto, Ontario, Canada.
- Easterling D.R., Peterson T.C., Karl T.R. (1996), On the development and use of homogenized climate datasets. *Journal of Climate* 9 (6), 1429-1434.
- Hubert P., et Carbonnel J. P, (1987), Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 95, pp 165-183.
- Karim T. (1997), La télédétection comme moyen d'appui à la planification des ressources en eau (cas du Sud-Ouest du Burkina Faso), 93PP.
- Kendall M.G. (1970), Rank correlation methods. *Griffin*, London, United Kingdom.
- Lilliefors H. W. (1967), On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American Statistical Association*. Vol. 62, 1967, pp. 399-402
- Lubès-Niel H., Masson J.M., Paturel J.E. et Servat E., (1998), Variabilité climatique et statistique. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des sciences de l'eau*, 11(3), pp 383-408.
- Lund R., Wang X. L., Lu Q., Reeves J., Gallagher C., Feng Y. (2007), Changepoint detection in periodic and autocorrelated time series. *Journal of Climate* 20 (20), 5178-5190.
- Mahé G. Olivry J.C., (1995), Variation des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, 6(1), pp 109-117.
- Ministère de l'Environnement et de l'Eau (2001), État des lieux des ressources en eau du Burkina Faso et de leur cadre de gestion Version finale, *Direction Générale de l'Hydraulique*, 252p.
- Moron Vincent, (1994), Guinean and Sahelian rainfall anomaly indices at annual and monthly scales (1933-1990). *International Journal of Climatology*, 14(3), pp 325-341.
- Musy A., Meylan P. (1987), Modélisation d'un processus non-stationnaire-application à la

pluviométrie en zone semi-aride. *IQHS Publ. No. 168*

Nicolas A., (1997), Bilan de cinquante années d'observations climatologiques à Adiopodoume, Côte d'Ivoire. *Rapport de stage*

Ouarda T.B.M.J., Rasmussen P.F., Cantin J.-F., Bobée B., Laurence R., Hoang V.D., Barabé G. (1999), Identification d'un réseau hydrométrique pour le suivi des modifications climatiques dans la province de Québec. *Revue des Sciences de l'Eau* 12 (2), 425-448.

Peterson T.C., Easterling D.R., Karl, T.R., Groisman P., Nicholls N., Plummer N., Torok, S., Auer I., Boehm R., Gullett D., Vincent L., Heino R., Tuomenvirta H., Mestre O., Szentimrey T., Salinger J., Forland E.J., Hanssen-Bauer I., Alexandersson H., Jones P., Parker D. (1998), Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: a review. *International Journal of Climatology* 18 (13), 1493-1517.

Ricco Rakotomalala, (2008), Pratique de la régression linéaire multiple, diagnostic et sélection des variables. *Université Lumière Lyon II*. 109p.

Rodionov S.N., (2004), A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *Geophysical research letters*, VOL. 31, L09204, doi: 10.1029/2004GL019448, 2004.

Sandra ARDOIN B., (2004), Variabilité hydro climatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat en sciences de l'eau dans l'environnement continental, *Université de Montpellier II*, 330p

Tarhule Aondover, Woo Ming-ko, (1998), Changes in Rainfall characteristics in Northern Nigeria. *International Journal of Climatology*, 18(11), pp 1261-1271.

WMO (World Meteorological Organization), (1996), Climatic change by a working group of the commission for climatology. *W.M.O. 195, TP 100, Tech. note n°79. WMO Geneva, Switzerland.*

ANNEXES

ANNEXE I : Présentations des stations, résultats des études de corrélation, de normalité et de non-stationnarité

Tableau 1 : Liste des stations hydrométéorologiques de la zone d'étude

| Type de mesure | Bassin versant | Nom de la station | Latitude | Longitude | Longueurs de données | Nb de mesures/an | Taux de mesures manquantes (%) |
|-------------------------|------------------|--------------------|----------|-----------|------------------------------|------------------|--------------------------------|
| Données piézométriques | Comoé | Dogona | 11 ,2 | -4,279 | Avril.1990-Mars2000 (10 ans) | 12 | 28,70 |
| | | Nafona | 10 ,682 | -4,745 | Dec.1985-Dec.2006 (21 ans) | 27 | 54,82 |
| | | Niangoloko | 10,27 | -4,901 | Dec.1985-Dec.2006 (21 ans) | 8 | 63,16 |
| | | Sideradougou | 10,683 | -4,256 | Dec.1985-Dec.2006 (21 ans) | 26 | 57,46 |
| | Mouhoun | Kouka | 11,902 | -3,343 | Dec.2004-Dec.2005(2 ans) | 21 | 45,83 |
| | | Naongo-Yarce 10-10 | 13,457 | -2,603 | Oct.1988-Nov.2005 (17 ans) | 9 | 42,26 |
| | | Naongo-Yarce 10-12 | 13,461 | -2,602 | Oct.1988-Sept.2006 (18 ans) | 6 | 49,40 |
| | | Tansila | 12,415 | -3,387 | Fev.2005-Dec.2005 (1 an) | 41 | 16,69 |
| Données Hydrométriques | Comoé | Yendere | 10,166 | -5,068 | Janv.1975-Dec2007 (32 ans) | - | 4,04 |
| | | Folonzo | 9,901 | -4,616 | Fev.1974-Dec .2005 (31 ans) | - | 9,90 |
| | | Moussoudougou | 10,783 | -4,908 | Mai 1991-Août 2007 (16 ans) | - | 14,71 |
| | | Bodadiougou | 10,766 | -4,583 | Jan 1986-Août 2007 (21 ans) | - | 1,52 |
| | | Fourkoura | 10,3 | -5,383 | Sept.1974-Dec .2005 (31 ans) | - | 20,11 |
| | | Toussiana | 10,916 | -4,583 | Juil.1986-Août 2007 (21 ans) | - | 10,61 |
| | | Douna | 10,633 | -5,116 | Nov.1987-Avr.2007 (20 ans) | - | 23,81 |
| | Mouhoun | Boromo | 11,783 | -2,916 | Mars 1975-Nov.2008 (33 ans) | - | 2,94 |
| | | Dapola | 10,566 | -2,916 | Jan.1975-Oct.2008 (33 ans) | - | 2,70 |
| | | Samendeni | 11,466 | -4,466 | Jan.1975-Sept.2008 (33 ans) | - | 9,80 |
| | | Banzo | 11,327 | -4,816 | Mars 1974-Oct.2005(31ans) | - | 0,00 |
| | | Nwokuy | 12,527 | -3,55 | Jan.1975-Dec.2008 (33 ans) | - | 0,00 |
| | | Ouessa | 11,019 | -2,18 | Jan.1973- Oct .2005 (32 ans) | - | 25,51 |
| | | Bougouriba | 10,933 | -3,166 | Jan.1970- Dec .2005 (35 ans) | - | 15,97 |
| Données météorologiques | Mouhoun : ETP | Bobo Dioulasso | 11,17 | -4,3 | Jan.1970- Dec .2008 (39 ans) | - | 2,99 |
| | | Boromo | 11,73 | -2,92 | Jan.1970- Dec .2008 (39 ans) | - | 2,56 |
| | | Dedougou | 12,47 | -3,48 | Jan.1970- Dec .2008 (39 ans) | - | 1,62 |
| | | Ouahigouya | 13,58 | -2,43 | Jan.1970- Dec .2009 (40 ans) | - | 2,29 |
| | | Gaoua | 10,33 | -3,18 | Jan.1970- Dec .2008 (39 ans) | - | 2,78 |

Tableau 1 (suite) : Liste des stations de la zone d'étude

| Type de mesure | Bassin versant | Nom de la station | Latitude | Longitude | Longueurs de données | Nb de mesures/an | Taux de mesures manquantes |
|------------------------|--------------------------------------|-------------------|----------|-------------------------------|------------------------------|------------------|----------------------------|
| Donnée météorologiques | Mouhoun : Humidité maximale | Bobo Dioulasso | 11,17 | -4,3 | Jan.1970- Dec .2008 (39 ans) | - | 4,70 |
| | | Boromo | 11,73 | -2,92 | Jan.1970- Dec .2008 (39 ans) | - | 2,78 |
| | | Dedougou | 12,47 | -3,48 | Fev.1982- Dec .2008 (26 ans) | - | 1,54 |
| | | Ouahigouya | 13,58 | -2,43 | Jan.1970- Dec .2009 (40 ans) | - | 3,75 |
| | | Gaoua | 10,33 | -3,18 | Jan.1970- Dec .2008 (39 ans) | - | 3,21 |
| | Mouhoun : Humidité minimale | Bobo Dioulasso | 11,17 | -4,3 | Jan.1970- Dec .2008 (39 ans) | - | 4,91 |
| | | Boromo | 11,73 | -2,92 | Jan.1970- Dec .2008 (39 ans) | - | 4,06 |
| | | Dedougou | 12,47 | -3,48 | Fev.1982- Dec .2008 (26 ans) | - | 2,47 |
| | | Ouahigouya | 13,58 | -2,43 | Jan.1970- Dec .2009 (40 ans) | - | 3,75 |
| | | Gaoua | 10,33 | -3,18 | Jan.1970- Dec .2008 (39 ans) | - | 4,27 |
| | Mouhoun : Température moyenne | Bobo Dioulasso | 11,17 | -4,3 | Jan.1970- Dec .2008 (39 ans) | - | 3,42 |
| | | Boromo | 11,73 | -2,92 | Jan.1970- Dec .2008 (39 ans) | - | 4,27 |
| | | Dedougou | 12,47 | -3,48 | Fev.1982- Dec .2008 (26 ans) | - | 2,88 |
| | | Ouahigouya | 13,58 | -2,43 | Jan.1970- Dec .2009 (40 ans) | - | 2,08 |
| | | Gaoua | 10,33 | -3,18 | Jan.1970- Dec .2008 (39 ans) | - | 2,56 |
| | Mouhoun : Vitesse moyenne du vent | Bobo Dioulasso | 11,17 | -4,3 | Jan.1970- Dec .2008 (39 ans) | - | 4,49 |
| | | Boromo | 11,73 | -2,92 | Jan.1970- Dec .2008 (39 ans) | - | 5,13 |
| | | Dedougou | 12,47 | -3,48 | Fev.1982- Dec .2008 (26 ans) | - | 12,33 |
| | | Ouahigouya | 13,58 | -2,43 | Jan.1970- Dec .2009 (40 ans) | - | 2,08 |
| | | Gaoua | 10,33 | -3,18 | Jan.1970- Dec .2008 (39 ans) | - | 4,49 |
| | Mouhoun : Pluies | Bobo Dioulasso | 11,17 | -4,3 | Jan.1970- Dec .2009 (40 ans) | - | 0,42 |
| Boromo | | 11,73 | -2,92 | Jan.1970- Dec .2009 (40 ans) | - | 0,21 | |
| Dedougou | | 12,47 | -3,48 | Fev.1982- Dec .2009 (40 ans) | - | 0,83 | |
| Ouahigouya | | 13,58 | -2,43 | Jan.1970- Dec .2009 (40 ans) | - | 0,21 | |
| Gaoua | | 10,33 | -3,18 | Jan.1970- Dec .2009 (40 ans) | - | 0,21 | |
| Comoé : Pluie | Banfora agriculture | 10,616 | -4,766 | Jan.1970- Sept .2009 (40 ans) | - | 1,04 | |

Homogénéisation des données hydrométéorologiques des bassins versants du Sud-Ouest du Burkina Faso

Tableau 2 : Inventaire des piézomètres de la zone d'étude et leur état de fonctionnement

| BASSIN | VILLAGE | Code IRM | Type | Année de réalisation | Etat actuel | Fréquence de suivi | Observation | Geomorp. | Lithologie | A maintenir dans le réseau futur | Début de suivi | Tendance globale | Tendance 2000-2007 | Latitude | Longitude |
|----------|--------------|-------------|--------|----------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------|------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------|-----------|
| COMOIE | Nafona | BF/05/05-12 | Simple | 1985 | Fonctionne | 1 fois par semaine | | Plateau | ALTERSCH | 0 | 1985 | Stabilisation | Donnée insuf | 10,682 | -4,7445 |
| | | BF/05/05-12 | Simple | 1985 | Fonctionne | 1 fois par semaine | | Bas-fond | ALTERSCH | 1 | 1985 | Stabilisation | Donnée insuf | 10,682 | -4,7446 |
| | Niangoloko | BF/09/09-4 | Simple | 1984 | Fonctionne | 1 fois par semaine | Dans forêt classé | Plateau | GRANITE | 1 | 1986 | Baisse légère | Donnée insuf | 10,269 | -4,9 |
| | | BF/09/09-5 | Simple | 1994 | Fonctionne | 1 fois par semaine | | Plateau | ALTER | 1 | 1985 | Stabilisation | Donnée insuf | 10,269 | -4,901 |
| | | BF/09/09-6 | Simple | 1993 | Abandonné | Pas de suivi | | Bas-fond | GRANITE | 0 | 1993 | Baisse légère | Donnée insuf | 10,265 | -4,89 |
| | Sideradougou | BF/07/01-9 | Simple | 1984 | Fonctionne | 1 fois par semaine | | Mis-pente | GABBR O | 0 | 1985 | Stabilisation | Stabilisation | 10,282 | -4,256 |
| | | BF/07/01-10 | Simple | 1984 | Fonctionne | 1 fois par semaine | | Mis-pente | GABBR O | 1 | 1985 | Stabilisation | Stabilisation | 10,282 | -4,2562 |
| Mouhoun | Dogona | BD/15/01-11 | Simple | 1988 | Abandonné | Pas suivi | Détruit par travaux | Pente | GRES | 0 | | | | 11,2 | -4,279 |
| | Naongo-Yarce | OH/10/10-08 | Triple | 1988 | Fonctionne | 1 fois par semaine | | Plateau | ALTER | 1 | 1988 | Stabilisation | (Erreurs ?) | 13,457 | -2,603 |
| | | OH/10/10-09 | Triple | 1988 | Fonctionne | 1 fois par semaine | | Plateau | GRANITE | 1 | 1988 | Stabilisation | (Erreurs ?) | 13,457 | -2,603 |
| | | OH/10/10-10 | Triple | 1988 | Fonctionne | 1 fois par semaine | | Plateau | GRANITE | 1 | 1988 | Stabilisation | (Erreurs ?) | 13,457 | -2,603 |
| | | OH/10/10-11 | Triple | 1988 | Fonctionne | 1 fois par semaine | | Plateau | ALTER | 1 | 1988 | Stabilisation | (Erreurs ?) | 13,461 | -2,602 |
| | | OH/10/10-12 | Triple | 1988 | Fonctionne | 1 fois par semaine | | Plateau | GRANITE | 1 | 1988 | Stabilisation | Donnée insuf | 13,461 | -2,602 |
| | | OH/10/10-13 | Triple | 1988 | Sec | 1 fois par semaine | | Plateau | GRANITE | 0 | 1988 | Stabilisation | Donnée insuf | 13,461 | -2,602 |
| | Kimidougou | BD/12/06-4 | Simple | 1990 | Abandonné | Pas suivi | Bouché | Pente | ALTER | 0 | | | | 11,229 | -4,238 |
| | | BD/12/06-4 | Simple | 1990 | Non identifiable | Pas suivi | Non identifiable | Plateau | SCHISTE | 0 | | | | 12,728 | -3,868 |
| | Nouna | DD/05/29 | Simple | 2004 | Fonctionne | Tous les 5 jours | | Bas-fond | - | 1 | 2005 | Période trop courte | Donnée insuf | Non identifié | |
| Gassan | DD/04/14 | Simple | 2004 | Assez bon | 1 fois par semaine | Repère détruit | Mis-pente | - | 1 | 2004 | Période trop courte | Donnée insuf | 12,819 | -3,2 | |
| Bondokuy | HN/01/01 | Simple | 2004 | Fonctionne | ? | Collé à puit a grd | Plateau | - | 1 | 2004 | Période trop courte | (Erreurs ?) | 11,846 | -3,768 | |
| Gombio | DD/10/02 | Simple | 2004 | Fonctionne | Tous les 5 jours | | Plateau | - | 0 | 2004 | Période trop courte | Période trop courte | 12,474 | -3,726 | |

Tableau 2 (suite) : Inventaire des piézomètres de la zone d'étude et leur état de fonctionnement

| BASSIN | VILLAGE | Code IRM | Type | Année de réalisation | Etat actuel | Fréquence de suivi | Observation | Geomorp. | Lithologie | A maintenir dans le réseau futur | Début de suivi | Tendance globale | Tendance 2000-2007 | Latitude | Longitude |
|---------|---------|----------|--------|----------------------|-------------|----------------------|-------------------------|----------|--------------|----------------------------------|----------------|---------------------|---------------------|----------|-----------|
| Mouhoun | Tansila | DK/11/03 | Simple | 2004 | Fonctionne | 1-2 fois par semaine | Insectes dans le forage | Plateau | - | 0 | 2005 | Période trop courte | Période trop courte | 12,415 | -4,387 |
| | Kossoba | DD/09/16 | Simple | 2004 | Fonctionne | 2-3 fois par mois | | Plateau | Sédimentaire | 1 | 2004 | Période trop courte | Période trop courte | 12,458 | -3,963 |
| | Kouka | BD/03/01 | Simple | 2004 | Fonctionne | ? | Repère pvc endommagé | Plateau | - | 1 | 2004 | Période trop courte | Période trop courte | 11,902 | -4,343 |
| | Toungo | DK/11/08 | Simple | 2004 | Mauvais | Peu suivi | Bouché | Bas-fond | - | 0 | 2004 | Période trop courte | Période trop courte | 12,347 | -4,292 |
| | Boromo | LE/01/01 | Simple | 2004 | Fonctionne | 1fois par mois | | Plateau | - | 1 | 2005 | Période trop courte | Période trop courte | 11,741 | -2,932 |
| | | | | | | | | | | | | | | | |

Source : Mission d'assistance à la DGRE en matière de suivi piézométrique (Décembre 2007)

Tableau 3 : Corrélations multiples entre les différentes variables de la zone d'étude

| Pluie-pluie | Bobo | Boromo | Dedougou | Gaoua | Banfora | Ouahigouya |
|--------------------|---------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Bobo | 1 | 0,85 | 0,86 | 0,84 | 0,86 | 0,81 |
| Boromo | | 1 | 0,57 | 0,80 | 0,85 | 0,85 |
| Dedougou | | | 1,00 | 0,81 | 0,84 | 0,89 |
| Gaoua | | | | 1,00 | 0,82 | 0,75 |
| Banfora | | | | | 1,00 | 0,81 |
| Ouahigouya | | | | | | 1,00 |
| Pluie-ETP | Boromo | Dedougou | Gaoua | Ouahigouya | Bobo | |
| Bobo | -0,63 | -0,72 | -0,67 | -0,48 | -0,77 | |
| Boromo | -0,65 | -0,73 | -0,67 | -0,50 | -0,75 | |
| Dedougou | -0,65 | -0,74 | -0,67 | -0,52 | -0,74 | |
| Gaoua | -0,54 | -0,65 | -0,62 | -0,39 | -0,70 | |
| Banfora | -0,61 | -0,70 | -0,66 | -0,48 | -0,75 | |
| Ouahigouya | -0,65 | -0,72 | -0,64 | -0,55 | -0,71 | |
| Pluie-Tmoy | Boromo | Dedougou | Gaoua | Ouahigouya | Bobo | |
| Bobo | -0,20 | -0,24 | -0,40 | 0,05 | -0,49 | |
| Boromo | -0,24 | -0,25 | -0,41 | 0,02 | -0,49 | |
| Dedougou | -0,25 | -0,30 | -0,42 | -0,02 | -0,50 | |
| Gaoua | -0,11 | -0,14 | -0,34 | 0,15 | -0,40 | |
| Banfora | -0,19 | -0,23 | -0,39 | 0,05 | -0,46 | |
| Ouahigouya | -0,29 | -0,35 | -0,45 | -0,10 | -0,52 | |
| Tmoy-Tmoy | Bobo | Boromo | Dedougou | Gaoua | Ouahigouya | |
| Bobo | 1,00 | 0,91 | 0,93 | 0,91 | 0,74 | |
| Boromo | | 1,00 | 0,97 | 0,89 | 0,90 | |
| Dedougou | | | 1,00 | 0,89 | 0,92 | |
| Gaoua | | | | 1,00 | 0,75 | |
| Ouahigouya | | | | | 1,00 | |
| Vent-Vent | Bobo | Boromo | Dedougou | Gaoua | Ouahigouya | |
| Bobo | 1,00 | 0,29 | 0,40 | 0,71 | 0,49 | |
| Boromo | | 1,00 | 0,68 | 0,44 | 0,60 | |
| Dedougou | | | 1,00 | 0,37 | 0,50 | |
| Gaoua | | | | 1,00 | 0,45 | |
| Ouahigouya | | | | | 1,00 | |
| ETP-ETP | Bobo | Boromo | Dedougou | Gaoua | Ouahigouya | |
| Bobo | 1,00 | 0,82 | 0,90 | 0,90 | 0,70 | |
| Boromo | | 1,00 | 0,89 | 0,90 | 0,85 | |
| Dedougou | | | 1,00 | 0,88 | 0,82 | |
| Gaoua | | | | 1,00 | 0,79 | |
| Ouahigouya | | | | | 1,00 | |
| ETP-Tmoy | Boromo | Dedougou | Gaoua | Ouahigouya | Bobo | |
| Bobo | 0,35 | 0,43 | 0,55 | 0,04 | 0,62 | |
| Boromo | 0,58 | 0,71 | 0,70 | 0,34 | 0,70 | |
| Dedougou | 0,47 | 0,54 | 0,61 | 0,20 | 0,67 | |
| Gaoua | 0,44 | 0,64 | 0,65 | 0,16 | 0,64 | |
| Ouahigouya | 0,60 | 0,75 | 0,67 | 0,46 | 0,68 | |

Tableau 3 (suite) : Corrélations multiples entre les différentes variables de la zone d'étude

| Pluie-Piezo | Sideradougou | Nafona | Naongo-Yarce 10-10 | Naongo-Yarce 10-10 | Dogona | Niangoloko |
|--------------------------|--------------|----------|--------------------|--------------------|------------|------------|
| Bobo | 0,02 | -0,03 | -0,03 | -0,01 | 0,16 | 0,44 |
| Boromo | -0,09 | 0,47 | -0,19 | 0,03 | 0,11 | -0,08 |
| Dedougou | 0,05 | -0,10 | 0,01 | 0,12 | -0,16 | 0,54 |
| Gaoua | 0,02 | -0,13 | -0,03 | 0,20 | -0,08 | 0,48 |
| Banfora | 0,00 | -0,17 | -0,08 | 0,14 | -0,22 | 0,40 |
| Ouahigouya | -0,01 | -0,06 | 0,00 | 0,12 | -0,17 | 0,49 |
| HuMax-HuMax | Bobo | Boromo | Dedougou | Gaoua | Ouahigouya | |
| Bobo | 1,00 | 0,97 | 0,96 | 0,93 | 0,89 | |
| Boromo | | 1,00 | 0,98 | 0,92 | 0,93 | |
| Dedougou | | | 1,00 | 0,88 | 0,96 | |
| Gaoua | | | | 1,00 | 0,83 | |
| Ouahigouya | | | | | 1,00 | |
| HuMax-HuMin | Boromo | Dedougou | Gaoua | Ouahigouya | Bobo | |
| Bobo | 0,92 | 0,87 | 0,96 | 0,82 | 0,95 | |
| Boromo | 0,93 | 0,89 | 0,94 | 0,85 | 0,94 | |
| Dedougou | 0,96 | 0,94 | 0,96 | 0,89 | 0,97 | |
| Gaoua | 0,83 | 0,77 | 0,88 | 0,74 | 0,87 | |
| Ouahigouya | 0,96 | 0,96 | 0,94 | 0,95 | 0,95 | |
| Piezo-Piezo | Sideradougou | Nafona | Naongo-Yarce10-10 | Naongo-Yarce10-12 | Dogona | Niangoloko |
| Sideradougou | 1 | 0,61 | 0,27 | 0,10 | 0,82 | 0,44 |
| Nafona | | 1,00 | 0,37 | 0,06 | 0,51 | 0,26 |
| Naongo-Yarce10-10 | | | 1,00 | 0,28 | 0,60 | 0,22 |
| Naongo-Yarce10-12 | | | | 1,00 | 0,61 | 0,23 |
| Dogona | | | | | 1,00 | 0,42 |
| Niangoloko | | | | | | 1 |
| Tmoy-Piezo | Sideradougou | Nafona | Naongo-Yarce10-10 | Naongo-Yarce10-12 | Dogona | Niangoloko |
| Bobo | 0,53 | 0,32 | 0,23 | 0,09 | 0,47 | 0,00 |
| Boromo | 0,53 | 0,34 | 0,28 | 0,17 | 0,47 | 0,18 |
| Dedougou | 0,55 | 0,35 | 0,26 | 0,19 | 0,50 | 0,12 |
| Gaoua | 0,49 | 0,29 | 0,30 | 0,18 | 0,56 | 0,10 |
| Ouahigouya | 0,46 | 0,25 | 0,26 | 0,24 | 0,43 | 0,25 |
| HuMin-HuMin | Bobo | Boromo | Dedougou | Gaoua | Ouahigouya | |
| Bobo | 1,00 | 0,98 | 0,99 | 0,97 | 0,98 | |
| Boromo | | 1,00 | 0,93 | 0,97 | 0,95 | |
| Dedougou | | | 1,00 | 0,95 | 0,97 | |
| Gaoua | | | | 1,00 | 0,90 | |
| Ouahigouya | | | | | 1,00 | |

Tableau 3 (suite) : Corrélations multiples entre les différentes variables de la zone d'étude

| Debit-Debit | Boromo | Nwukuy | Banzo | Dapola | Ouessa | Samendeni | Bougouriba | Fourkoura | Folonzo | Yendere |
|--------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|-----------|------------|-----------|---------|---------|
| Boromo | 1 | 0,57 | 0,60 | 0,85 | 0,92 | 0,76 | 0,67 | 0,64 | 0,58 | 0,67 |
| Nwukuy | | 1,00 | 0,38 | 0,64 | 0,51 | 0,60 | 0,69 | 0,48 | 0,53 | 0,52 |
| Banzo | | | 1,00 | 0,94 | 0,68 | 0,76 | 0,61 | 0,78 | 0,59 | 0,65 |
| Dapola | | | | 1,00 | 0,94 | 0,87 | 0,91 | 0,82 | 0,83 | 0,84 |
| Ouessa | | | | | 1,00 | 0,82 | 0,78 | 0,78 | 0,78 | 0,86 |
| Samendeni | | | | | | 1,00 | 0,83 | 0,85 | 0,78 | 0,82 |
| Bougouriba | | | | | | | 1,00 | 0,76 | 0,86 | 0,77 |
| Fourkoura | | | | | | | | 1,00 | 0,76 | 0,94 |
| Folonzo | | | | | | | | | 1,00 | 0,86 |
| Yendere | | | | | | | | | | 1 |
| Tmoy-Debit | Boromo | Nwukuy | Banzo | Dapola | Ouessa | Samendeni | Bougouriba | Fourkoura | Folonzo | Yendere |
| Bobo | -0,46 | -0,29 | -0,44 | -0,44 | -0,48 | -0,53 | -0,39 | -0,50 | -0,40 | -0,43 |
| Boromo | -0,36 | -0,28 | -0,32 | -0,30 | -0,32 | -0,36 | -0,27 | -0,35 | -0,27 | -0,30 |
| Dedougou | -0,37 | -0,32 | -0,32 | -0,35 | -0,38 | -0,43 | -0,30 | -0,41 | -0,30 | -0,36 |
| Gaoua | -0,42 | -0,34 | -0,41 | -0,37 | -0,44 | -0,46 | -0,36 | -0,42 | -0,37 | -0,37 |
| Ouahigouya | -0,23 | -0,19 | -0,17 | -0,16 | -0,14 | -0,19 | -0,11 | -0,21 | -0,11 | -0,16 |
| Pluie-Debit | Boromo | Nwukuy | Banzo | Dapola | Ouessa | Samendeni | Bougouriba | Fourkoura | Folonzo | Yendere |
| Bobo | 0,51 | 0,11 | 0,58 | 0,54 | 0,60 | 0,63 | 0,48 | 0,60 | 0,48 | 0,54 |
| Boromo | 0,58 | 0,09 | 0,57 | 0,56 | 0,62 | 0,63 | 0,43 | 0,58 | 0,43 | 0,51 |
| Dedougou | 0,57 | 0,10 | 0,56 | 0,54 | 0,61 | 0,60 | 0,43 | 0,57 | 0,40 | 0,50 |
| Gaoua | 0,47 | 0,12 | 0,56 | 0,56 | 0,57 | 0,60 | 0,51 | 0,62 | 0,48 | 0,52 |
| Ouahigouya | 0,53 | 0,13 | 0,58 | 0,56 | 0,61 | 0,63 | 0,45 | 0,64 | 0,48 | 0,55 |
| Banfora | 0,58 | 0,11 | 0,57 | 0,54 | 0,60 | 0,61 | 0,41 | 0,56 | 0,40 | 0,49 |
| Piezo -Debit | Boromo | Nwukuy | Banzo | Dapola | Ouessa | Samendeni | Bougouriba | Fourkoura | Folonzo | Yendere |
| Sideradougou | -0,44 | -0,77 | -0,40 | -0,34 | -0,55 | -0,47 | -0,49 | -0,50 | -0,53 | -0,52 |
| Nafona | -0,33 | -0,59 | -0,42 | -0,47 | -0,66 | -0,48 | -0,61 | -0,58 | -0,35 | -0,70 |
| Naongo-Yarce10-10 | -0,20 | -0,46 | -0,17 | 0,00 | -0,29 | -0,25 | -0,23 | -0,20 | -0,31 | -0,28 |
| Naongo-Yarce10-12 | -0,24 | -0,24 | -0,27 | 0,05 | 0,01 | -0,11 | 0,08 | -0,13 | -0,22 | 0,06 |
| Dogona | -0,28 | -0,58 | -0,41 | -0,28 | -0,51 | -0,30 | -0,37 | -0,49 | -0,39 | -0,38 |
| Niangoloko | 0,05 | -0,41 | 0,05 | 0,23 | -0,01 | 0,05 | -0,16 | 0,06 | -0,13 | -0,05 |
| Pluie -Debit | Boromo | Nwukuy | Banzo | Dapola | Ouessa | Samendeni | Bougouriba | Fourkoura | Folonzo | Yendere |
| Bobo | 0,51 | 0,11 | 0,58 | 0,54 | 0,60 | 0,63 | 0,48 | 0,60 | 0,48 | 0,54 |
| Boromo | 0,58 | 0,09 | 0,57 | 0,56 | 0,62 | 0,63 | 0,43 | 0,58 | 0,43 | 0,51 |
| Dedougou | 0,57 | 0,10 | 0,56 | 0,54 | 0,61 | 0,60 | 0,43 | 0,57 | 0,40 | 0,50 |
| Gaoua | 0,47 | 0,12 | 0,56 | 0,56 | 0,57 | 0,60 | 0,51 | 0,62 | 0,48 | 0,52 |
| Banfora | 0,53 | 0,13 | 0,58 | 0,56 | 0,61 | 0,63 | 0,45 | 0,64 | 0,48 | 0,55 |
| Ouahigouya | 0,58 | 0,11 | 0,57 | 0,54 | 0,60 | 0,61 | 0,41 | 0,56 | 0,40 | 0,49 |
| Bobo | 0,44 | 0,24 | 0,46 | 0,51 | 0,54 | 0,57 | 0,49 | 0,53 | 0,47 | 0,48 |
| Boromo | 0,50 | 0,32 | 0,49 | 0,56 | 0,59 | 0,63 | 0,53 | 0,56 | 0,51 | 0,52 |
| Dedougou | 0,51 | 0,29 | 0,52 | 0,60 | 0,60 | 0,67 | 0,59 | 0,60 | 0,54 | 0,58 |
| Gaoua | 0,45 | 0,36 | 0,45 | 0,49 | 0,52 | 0,54 | 0,47 | 0,48 | 0,45 | 0,45 |
| Ouahigouya | 0,57 | 0,29 | 0,58 | 0,63 | 0,67 | 0,70 | 0,57 | 0,65 | 0,55 | 0,59 |

Tableau 4 : Résultats des tests de normalité et de non stationnarité

| Valeur mesurée | Station | Test de Lilliefors | Test de Dickey et Fuller |
|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|
| Niveau piézométrique (m) | Dogona | NR | TS R |
| | Nafona | NR | TS A |
| | Niangoloko | NA | TS A |
| | Sideradougou | NA | TS R |
| | Naongo-Yarce 10-10 | NR | TS A |
| | Naongo-Yarce 10-12 | NR | TS A |
| Débit (m3/s) | Boromo | NR | TS A |
| | Dapola | NR | TS A |
| | Banzo | NR | TS A |
| | Samendeni | NR | TS A |
| | Fourkoura | NR | TS A |
| | Yendere | NR | TS A |
| | Bougouriba | NR | TS A |
| | Nwokuy | NR | TS A |
| | Ouessa | NR | TS A |
| | Dedougou | NR | TS A |
| Hauteur de pluie (mm) | Bobo Dioulasso | NR | TS A |
| | Boromo | NR | TS A |
| | Dedougou | NR | TS A |
| | Gaoua | NR | TS A |
| | Ouahigouya | NR | TS A |
| | Banfora | NR | TS A |
| ETP (mm) | Bobo Dioulasso | NR | TS A |
| | Boromo | NR | TS A |
| | Dedougou | NR | TS A |
| | Gaoua | NR | TS A |
| | Ouahigouya | NA | TS A |
| Température moyenne (°C) | Bobo Dioulasso | NR | TS A |
| | Boromo | NR | TS A |
| | Dedougou | NR | TS A |
| | Gaoua | NR | TS A |
| | Ouahigouya | NR | TS A |
| HuMax (%) | Bobo Dioulasso | NR | TS A |
| | Boromo | NR | TS A |
| | Dedougou | NR | TS A |
| | Gaoua | NR | TS A |
| | Ouahigouya | NR | TS A |
| HuMin (%) | Bobo Dioulasso | NR | TS A |
| | Boromo | NR | TS A |
| | Dedougou | NR | TS A |
| | Gaoua | NR | TS A |
| | Ouahigouya | NR | TS A |

Tableau 4 (suite) : Résultats des tests de normalité et de non stationnarité

| Valeur mesurée | Station | Test de Lilliefors | Test de Dickey et Fuller |
|------------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Vitesse du vent (m/s) | Bobo Dioulasso | NR | TS A |
| | Boromo | NR | TS A |
| | Dedougou | NR | TS A |
| | Gaoua | NR | TS A |
| | Ouahigouya | NR | TS A |

NR: Normalité Refusée

NA : Normalité Acceptée

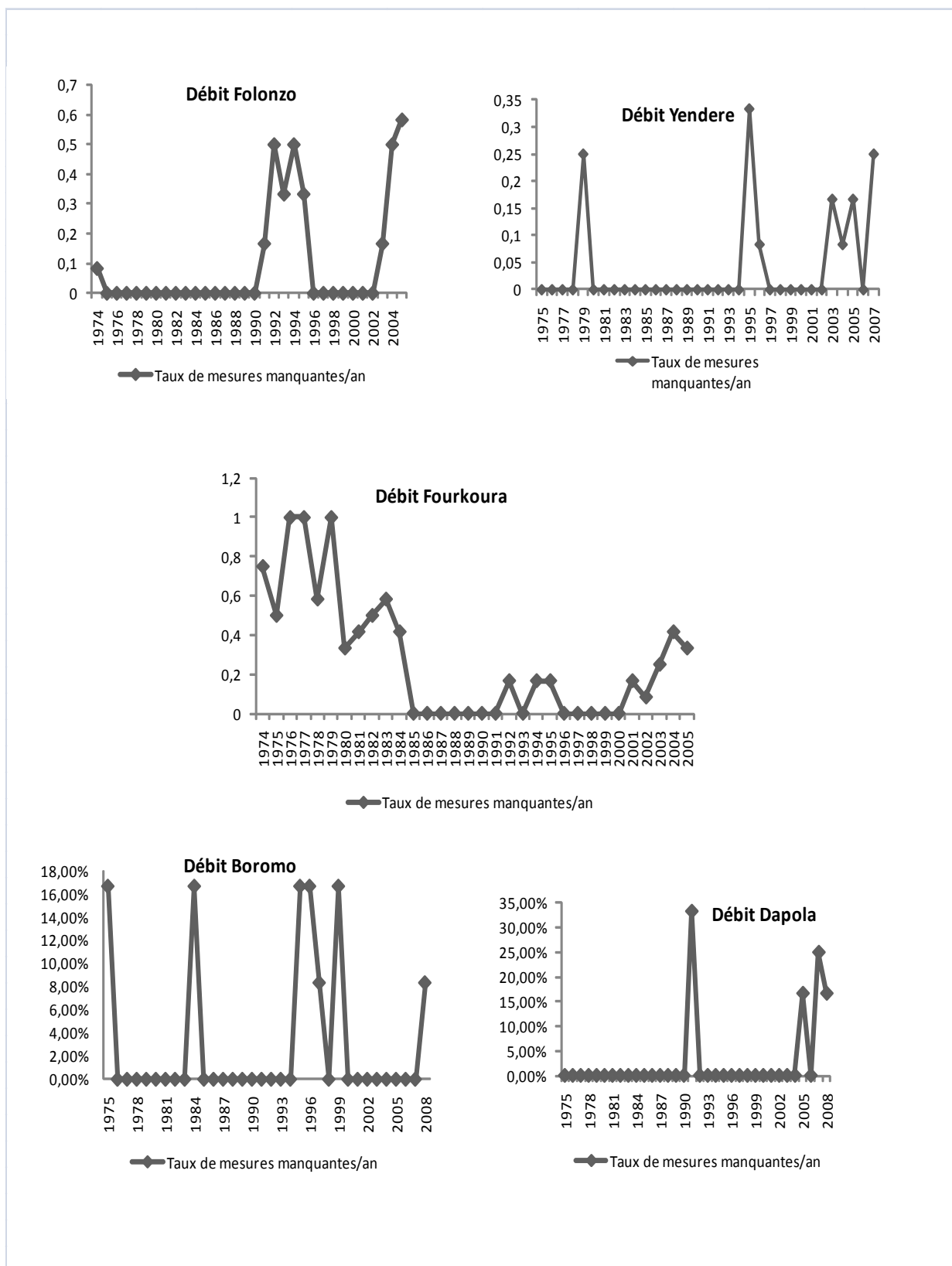
TS A :non Stationnarité De Type TS Acceptée

TS R : Non Stationnarité De Type Refusée

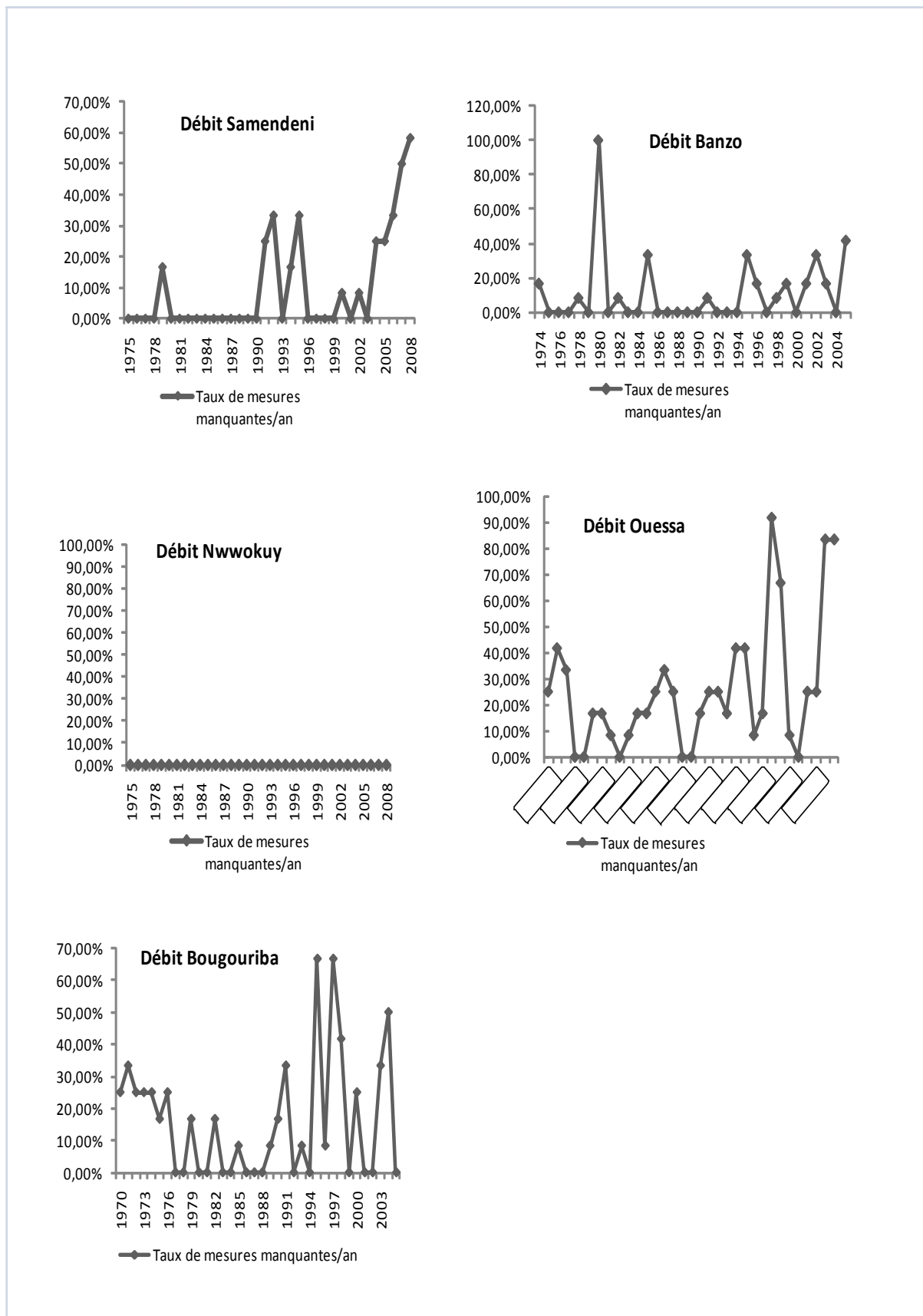
TS : Trend Stationnary

Annexe II : Evolution du taux de lacunes par station et courbes de séries

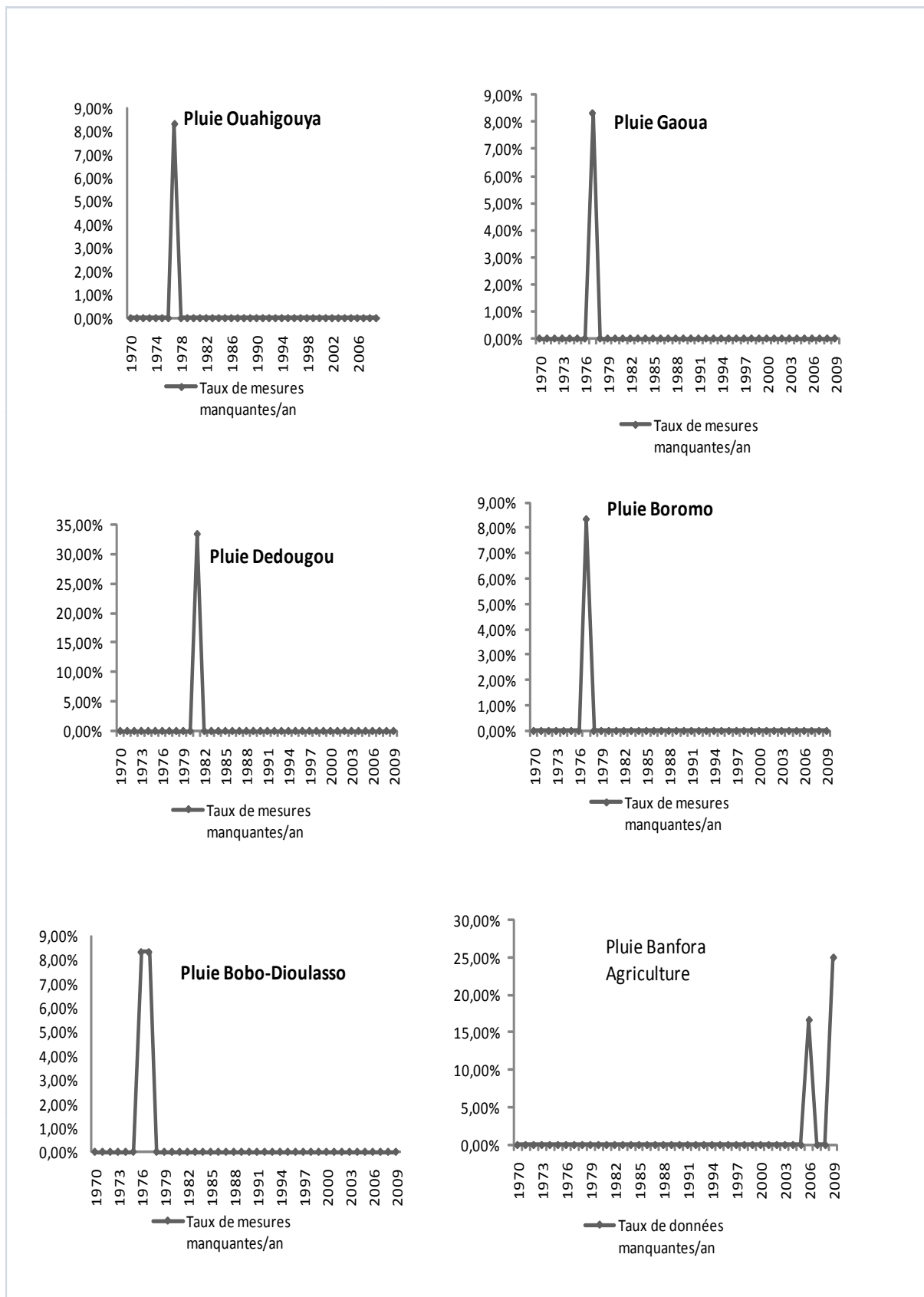
Evolution du taux de lacunes dans les séries de débit



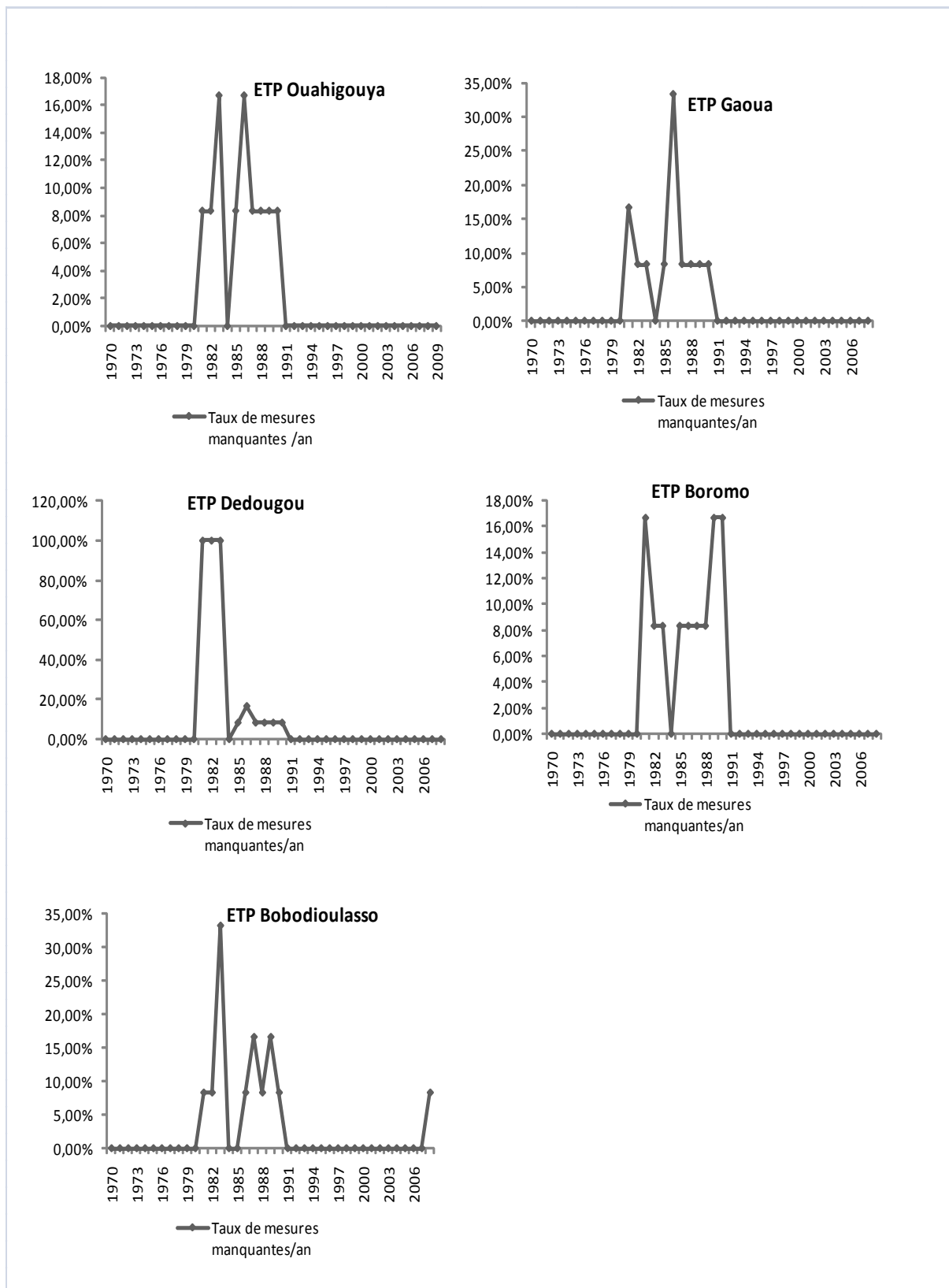
Evolution annuelle du taux de lacunes dans les series de débit (suite)



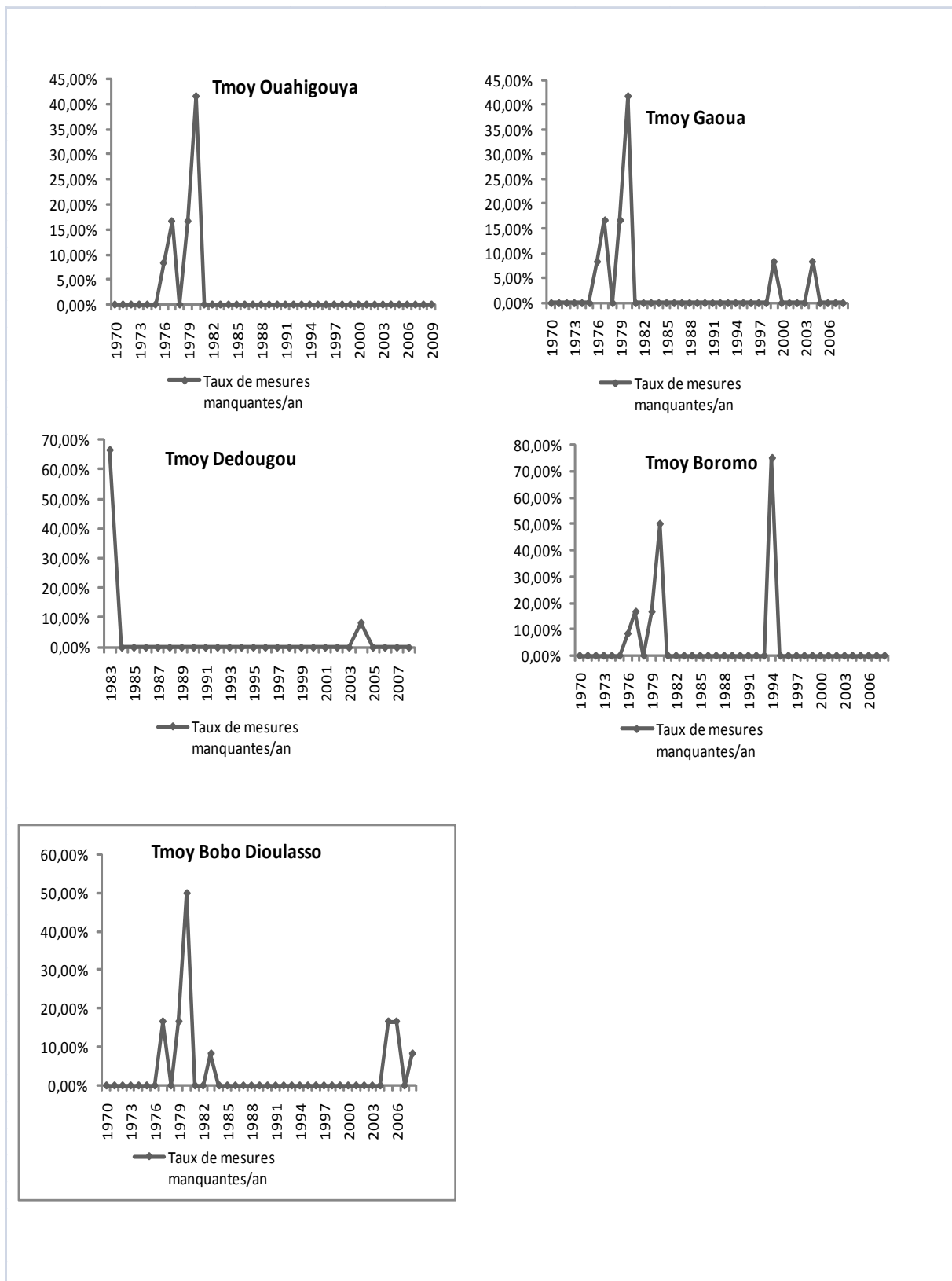
Evolution du taux annuel de lacune dans les series de precipitation



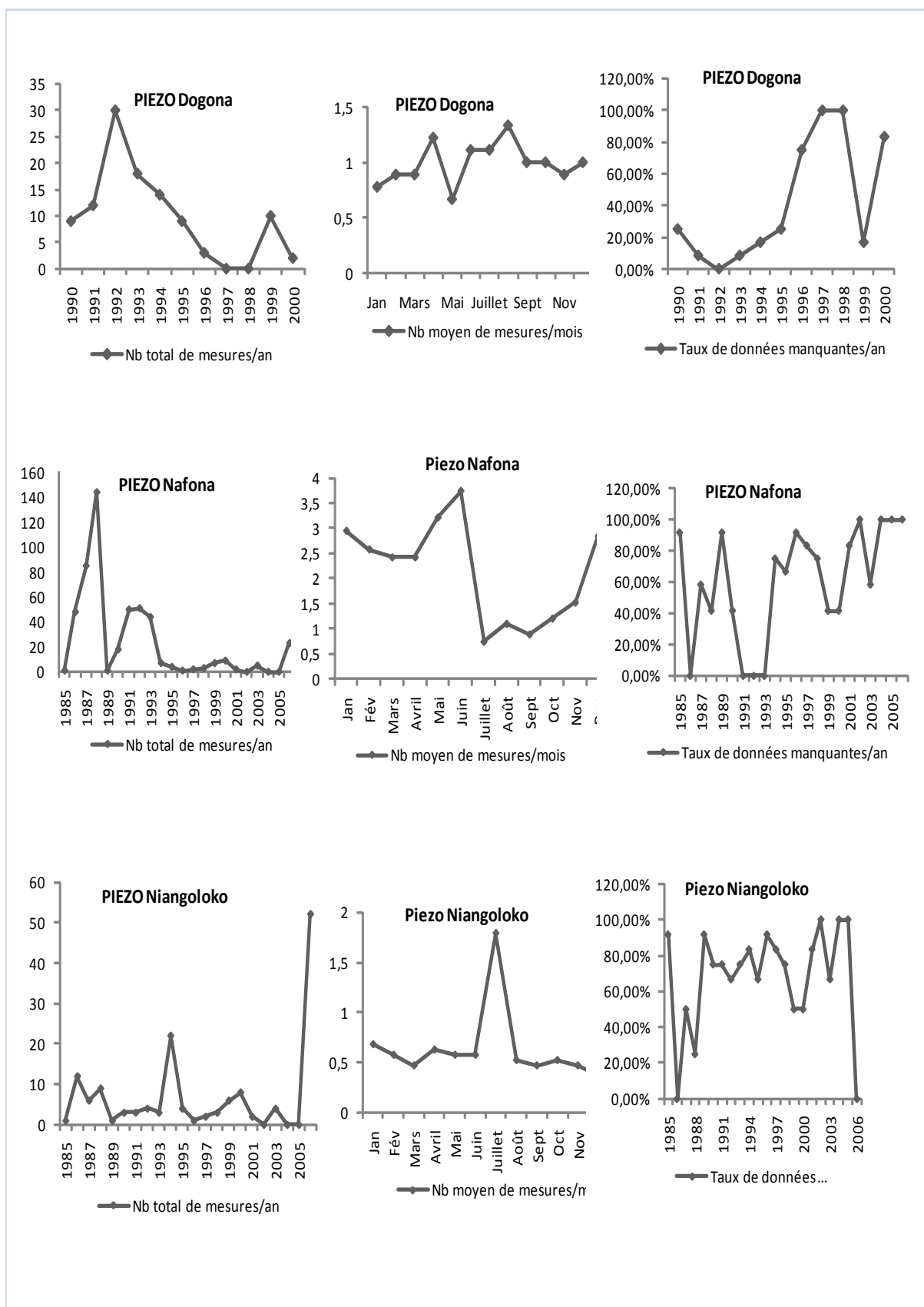
Evolution du taux de lacunes dans les series d'ETP



Evolution du taux annuel de lacunes dans les series de temperature

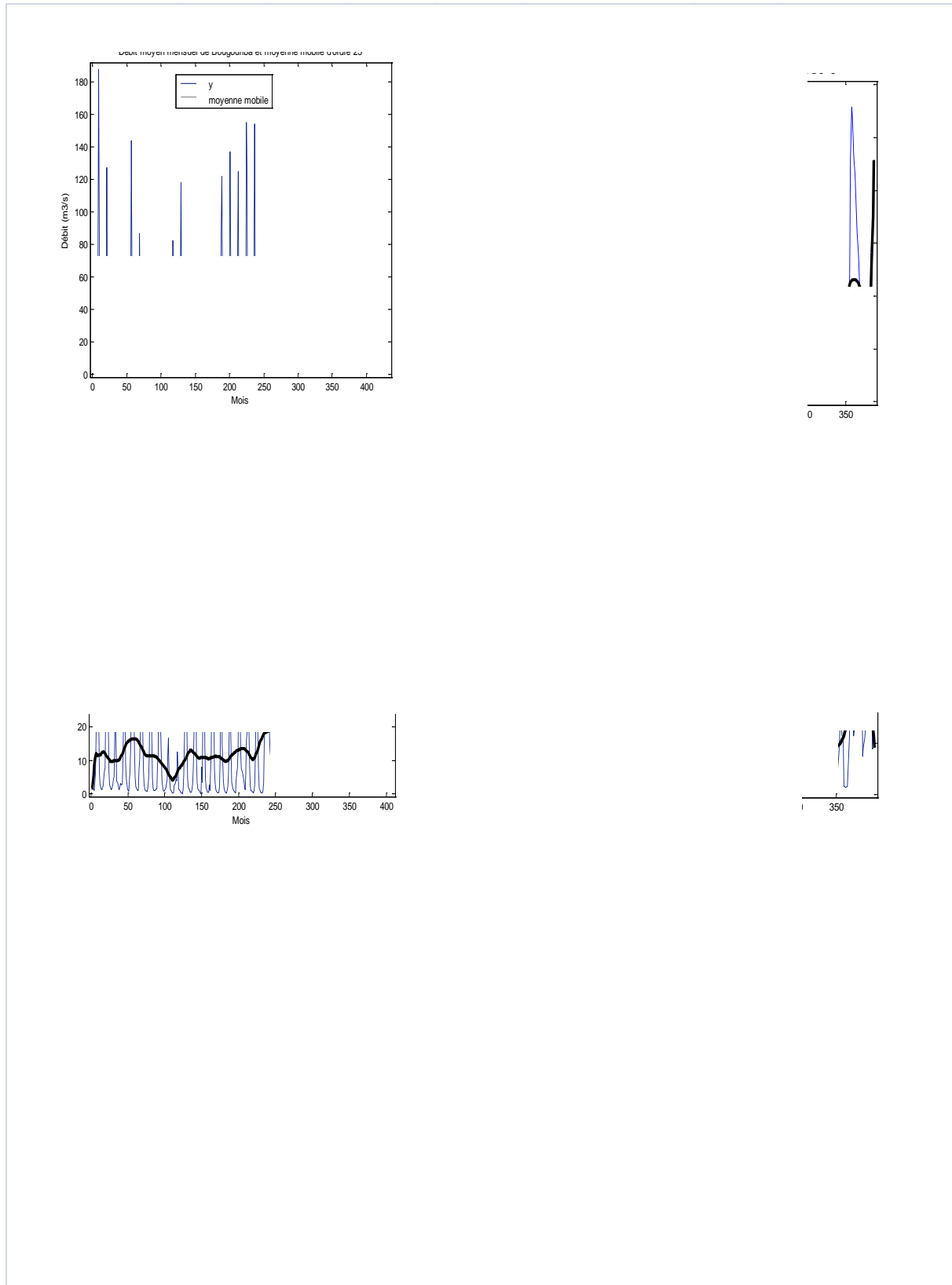


Evolution annuelle du taux de lacunes dans les series piezo

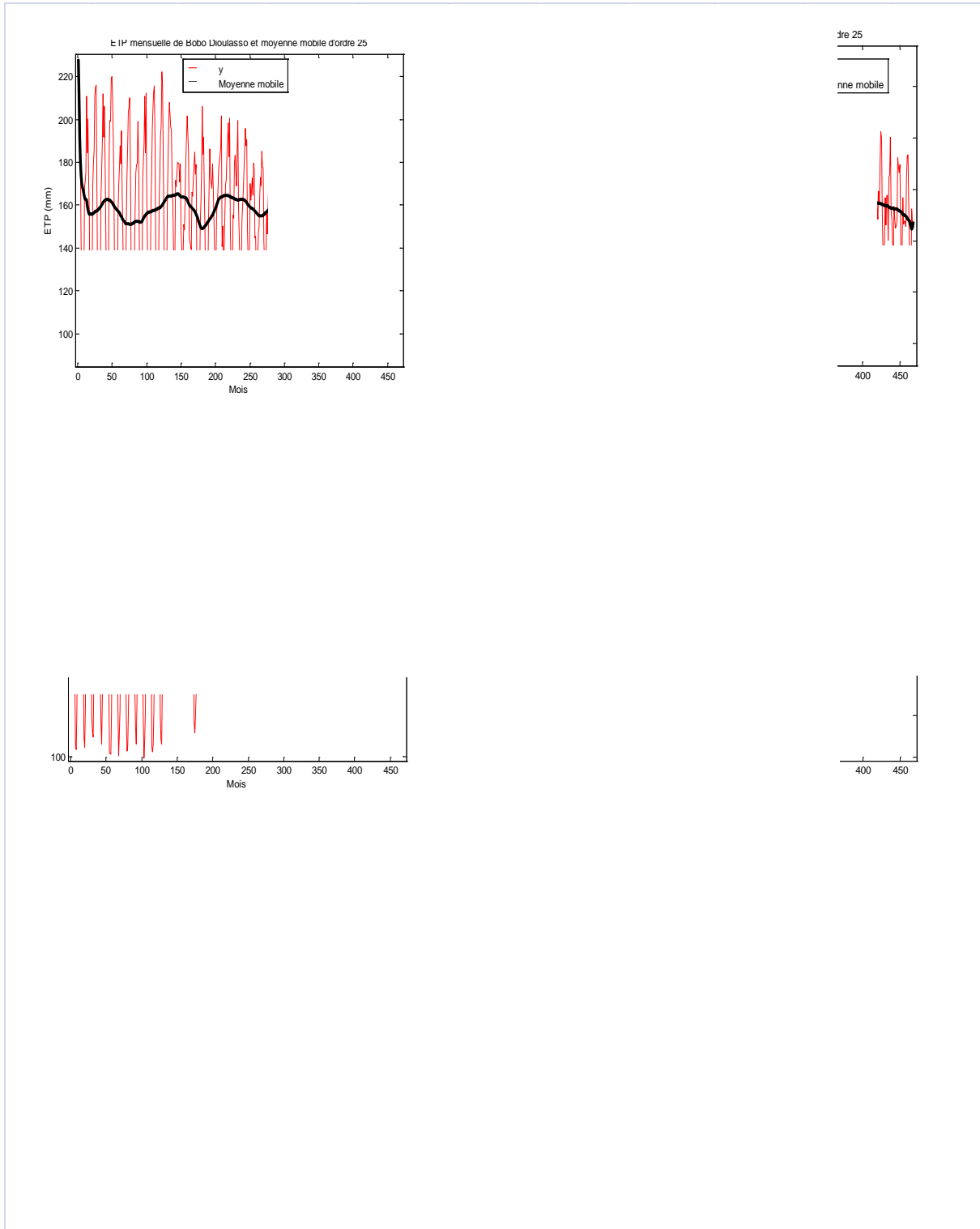


COURBES DES SERIES PIEZOMETRIQUES ET HYDROCLIMATIQUES

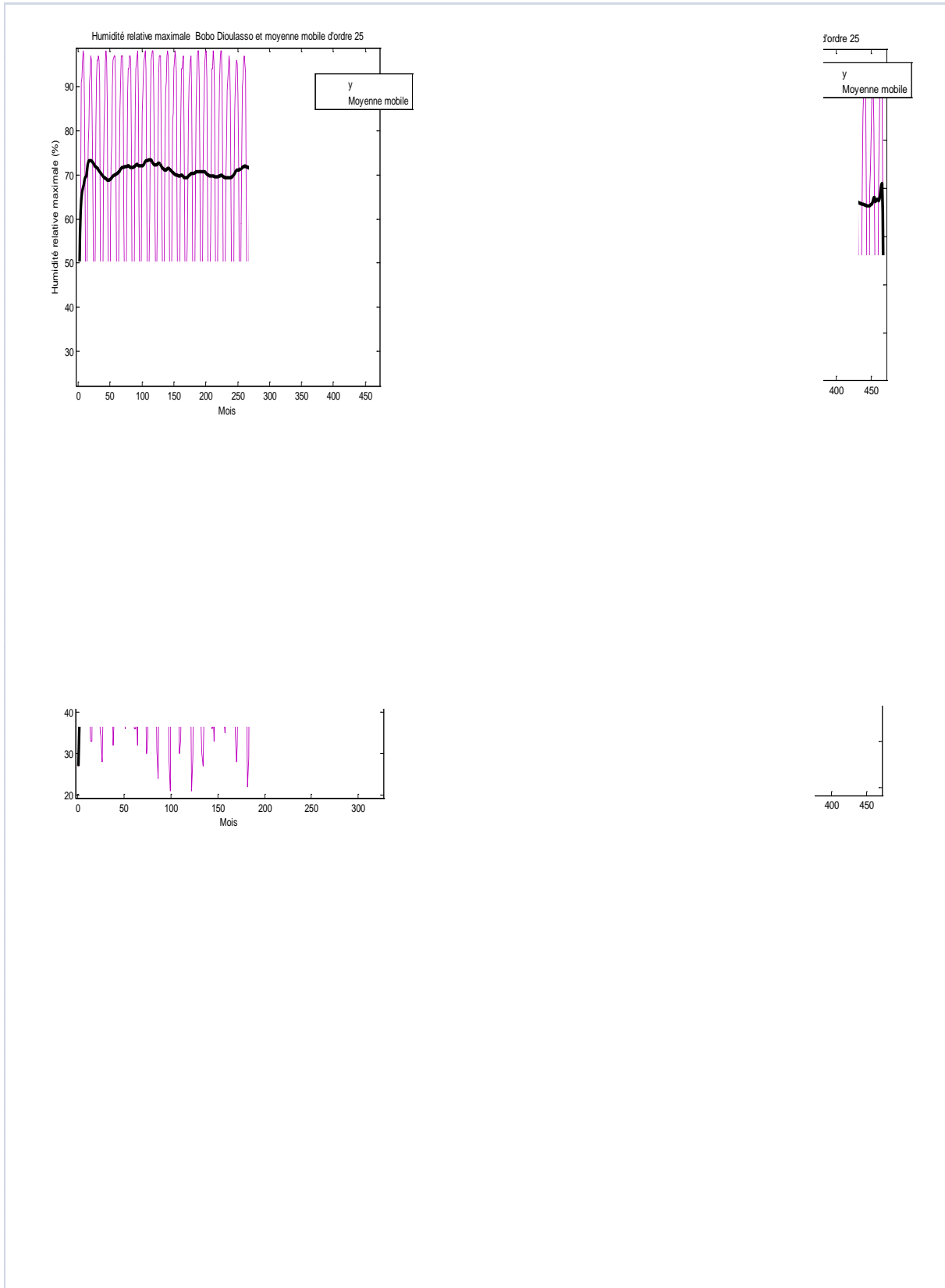
A. Series de débit



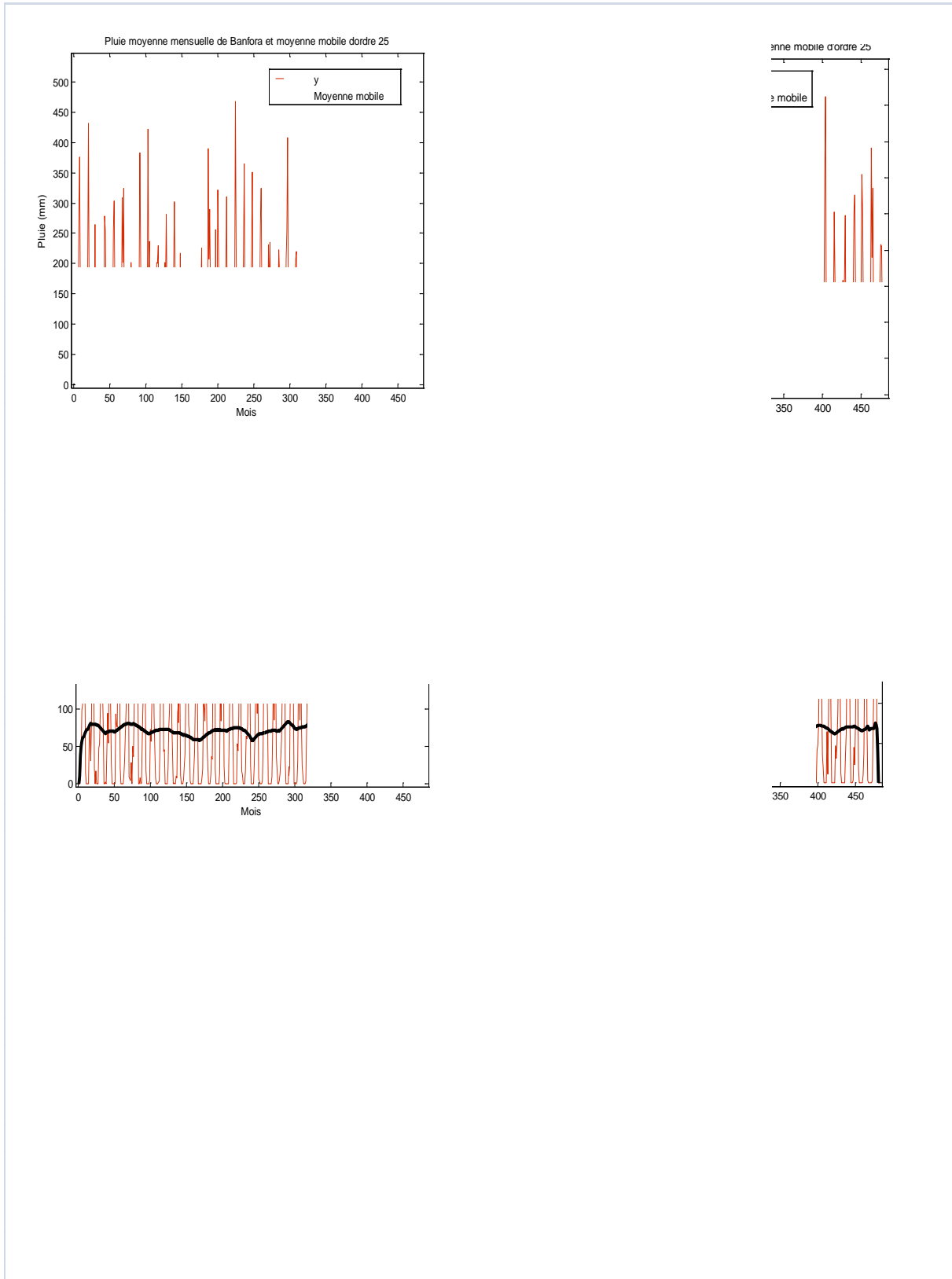
B. Séries d'évapotranspiration



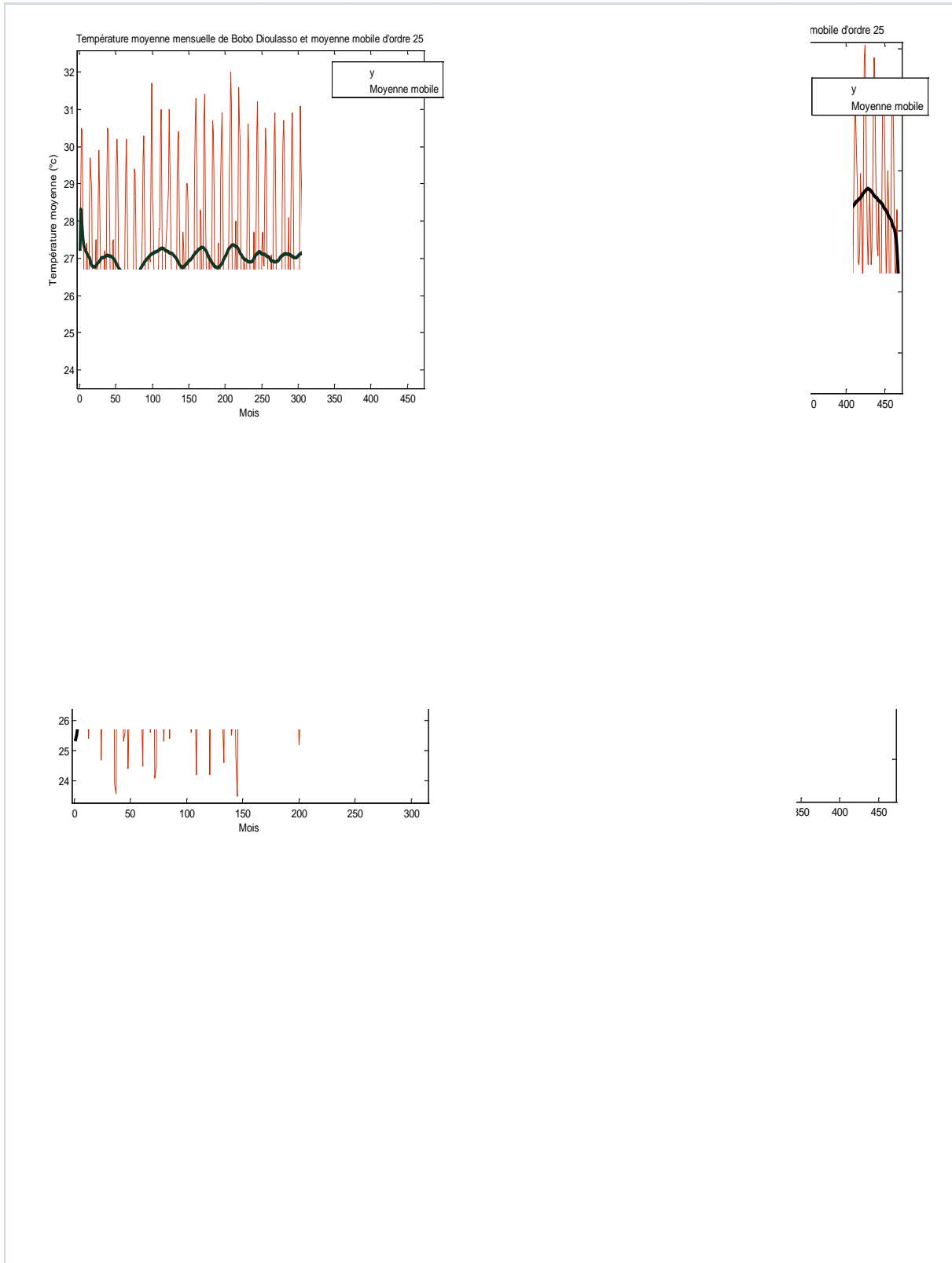
C. Séries d'humidité maximale



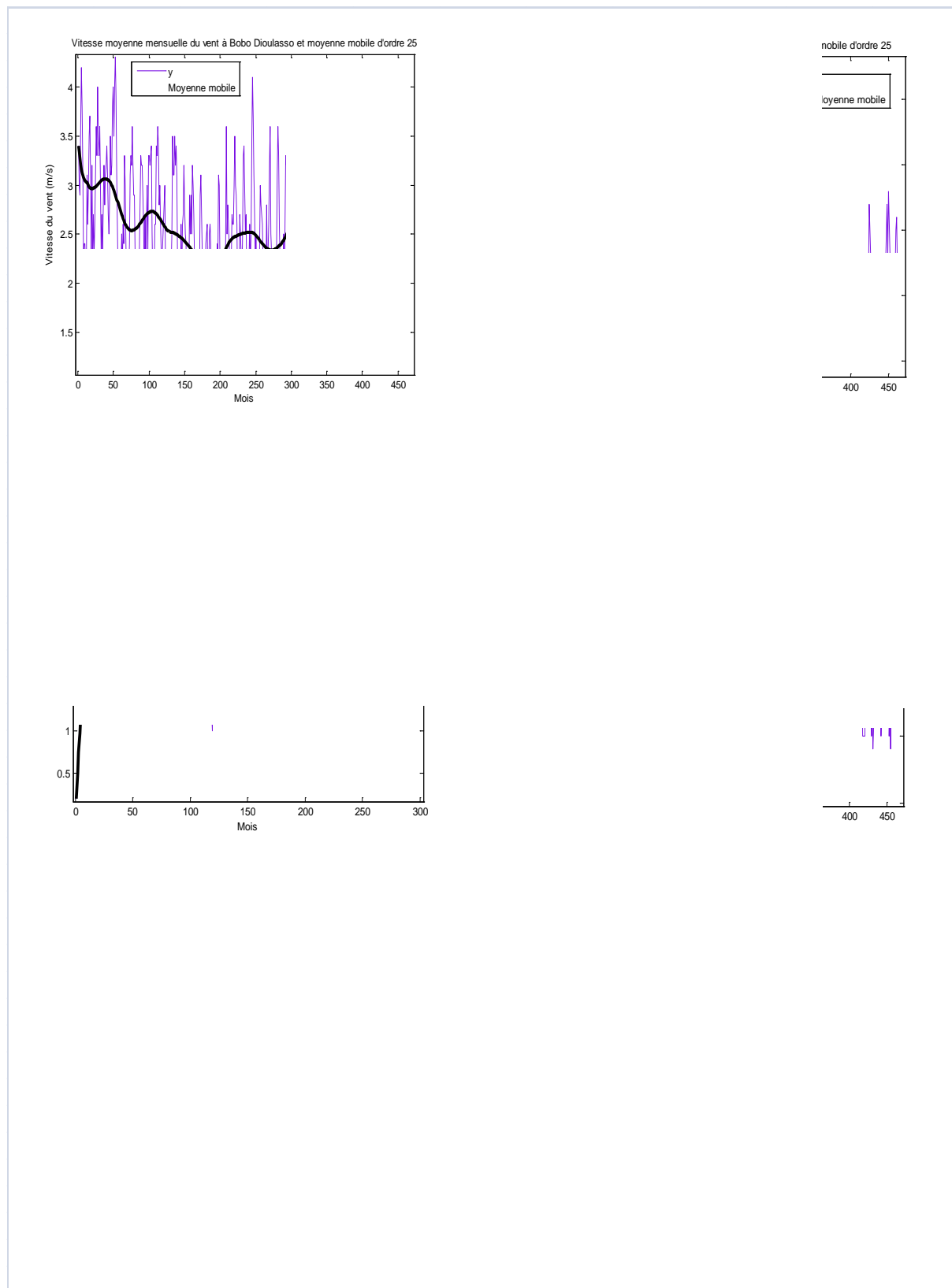
D. Séries de Précipitations



E. Séries de température moyenne

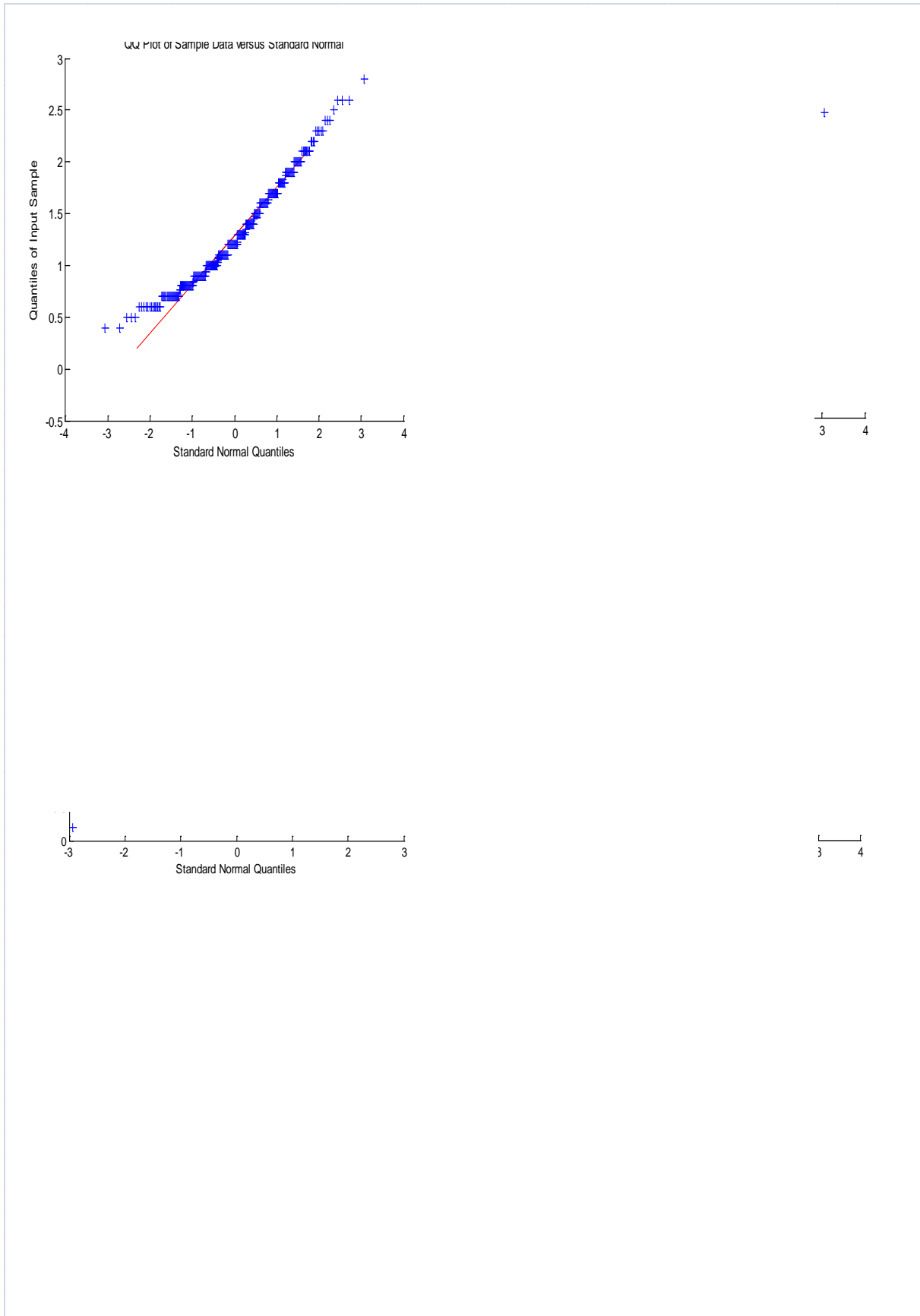


F. Séries de vent

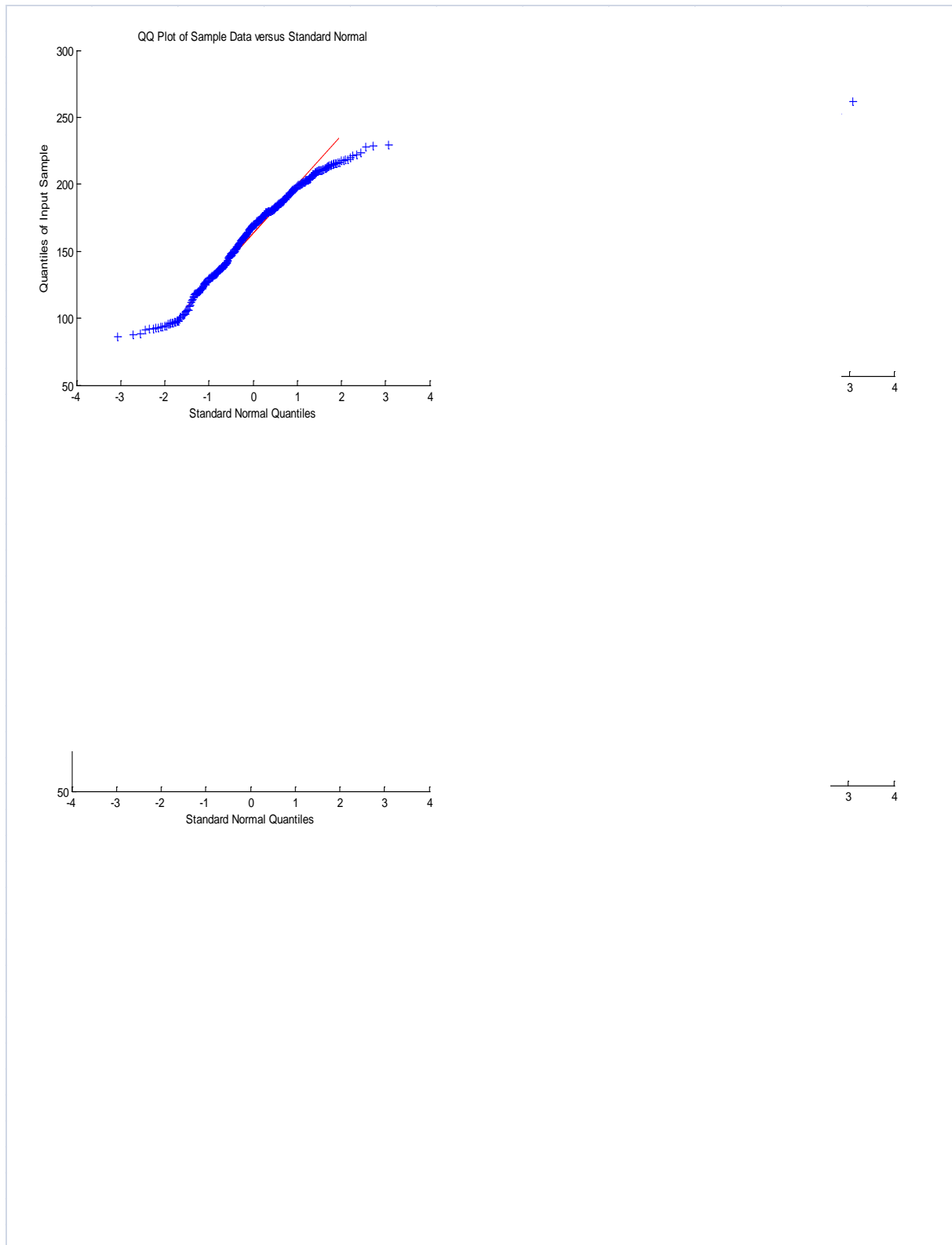


ANNEXE III : COURBES DES QUANTILE-QUANTILE

Courbes quantile-quantile des séries de vent

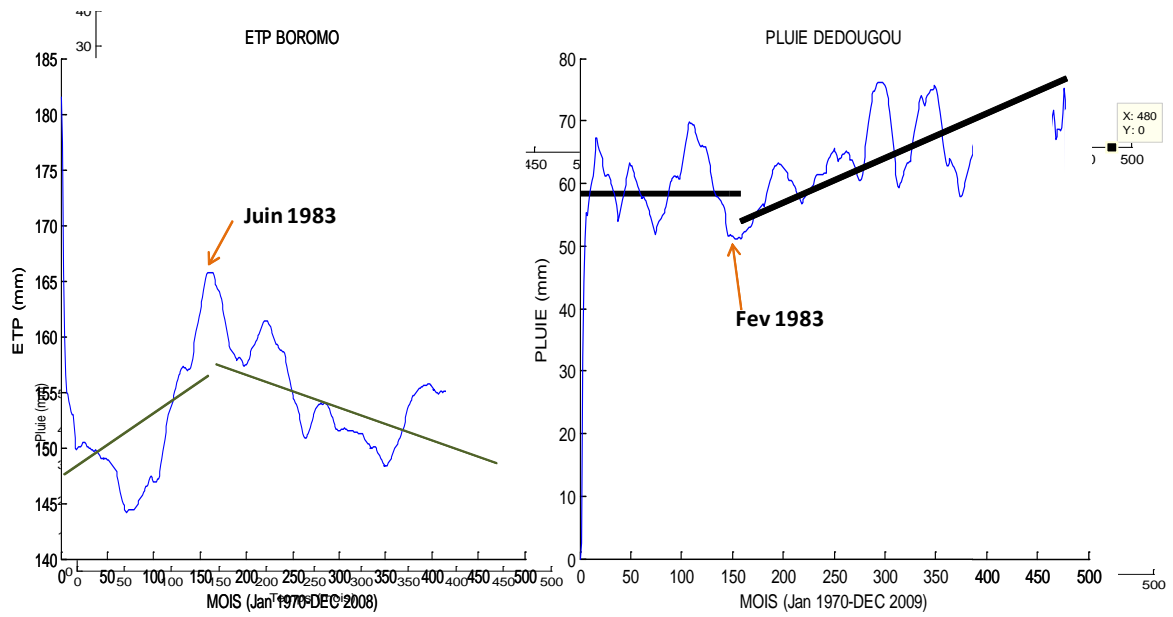


Courbes quantile-quantile des séries de ETP

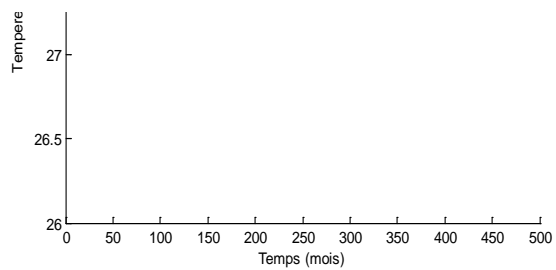


ANNEXE IV : Graphiques de détection des ruptures sur les séries hydrométéorologiques

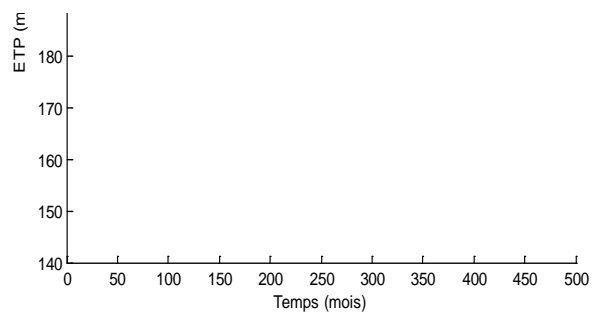
A. Graphiques de ruptures sur les séries de pluies



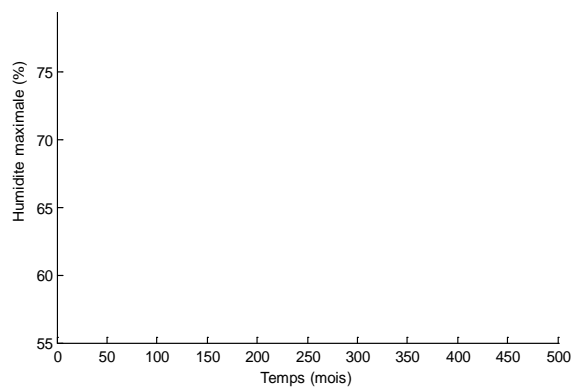
B. Graphiques de ruptures sur les séries de température



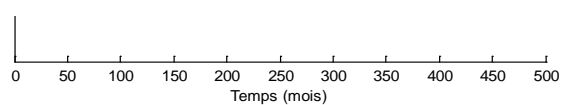
C. Graphiques de ruptures sur les séries d'évapotranspiration



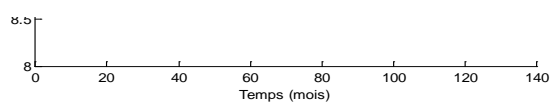
D. Graphiques de ruptures sur les séries d'évapotranspiration



E. Graphiques de ruptures sur les séries de la vitesse moyenne du vent



F. Graphiques de ruptures sur les séries piézométriques



G. Graphiques de ruptures sur les séries hydrométriques

