



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



ANALYSE DE LA DEPENDANCE ENTRE LES VARIABLES PIEZOMETRIQUES ET HYDROCLIMATIQUES 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 [27/09/2010]

Par

FOKA ROMAIN

Travaux dirigés par : HADIZA MOUSSA SALEY

Enseignante-Chercheure, Dr

UTER : GVEA

Jury d'évaluation du Mémoire :

Président : Harouna KARAMBIRI

Membres et correcteurs : HADIZA MOUSSA Saley

Ibrahim BOUBACAR

Promotion : 2009/2010

DEDICACES

A

- Ma regrettée mère MEGADJOUE Christine
- Ma grande mère MEFOWOUE Marthe
- Mon fils FOKA Loïc Wilson

REMERCIEMENTS

Au terme de ce mémoire de fin de formation à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. Je tiens à remercier tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont particulièrement à :

- Mon encadreur, Dr HADIZA MOUSSA SALEY, pour son encadrement et sa disponibilité, son désir pour le travail bien fait a été une valeur inestimable pour ce travail,
- Dr Gile Mahé, chercheur au laboratoire d'Hydrosciences Montpellier, pour son appui,
- Tous les Enseignants de l'UTER GVEA,
- Au Directeur General des ressources en Eau du Burkina Faso et ses collaborateurs, pour m'avoir fourni les données et participer activement à l'élaboration de ce projet,
- A ma femme, MBOGNE TABOULA Judith, pour son affection et son soutien inconditionnel,
- Mon père WEDAM Lucas,
- Ma grande Sœur MOBOU Chantal pour son soutien et ses encouragements,
- Ma tante MBOUZÉKO Martine, pour son soutien moral et matériel tout au long de ma formation,
- Tous mes camarades de promotion,
- Toute ma famille.

RESUME

Cette étude a pour but d'évaluer la dépendance entre les niveaux piézométriques et les variables hydroclimatiques du sud ouest du Burkina Faso. Dans ce pays, une bonne partie de la population dépend de l'eau souterraine pour son approvisionnement en eau potable. Le renouvellement de cette ressource est assuré par une recharge des aquifères qui dépend pour sa part des précipitations, de l'évapotranspiration et du ruissellement..etc. Il est établi qu'une hausse de la température de l'air induit une plus forte évaporation et que l'infiltration des précipitations dépend du type d'événement pluvieux (durée, intensité, fréquence), ce qui pourrait amener une réduction de la recharge des aquifères.

Des séries chronologiques de niveaux piézométriques, des précipitations, des températures, de l'évapotranspiration potentielle, de l'humidité minimale et maximale, de la vitesse du vent et de débits de rivière ont été utilisées pour étudier la relation existant entre les climats et les niveaux d'eau dans les nappes aquifères. Les données disponibles pour cette étude rassemblent les informations provenant de 10 piézomètres, 14 stations de jaugeages et 6 stations météorologiques situées au Burkina Faso. Toutes les données s'étendent sur une longueur de 1 à 40. La statistique multivariée a été faite dans le but de voir le niveau de dépendance dans les jeux de données, ce niveau de dépendance a été ensuite confirmé par les tests statistiques de Student et de Mann Kendall. La modélisation sommaire du niveau de la nappe a été faite grâce à la régression linéaire multiple, enfin nous avons utilisé la régression linéaire en fonction du temps pour déterminer la rupture de tendance dans les séries piézométriques.

D'après les résultats obtenus, il existe une faible dépendance entre les séries de données piézométriques et hydroclimatiques. Les variables hydroclimatiques expliquent moins de 30% les fluctuations du niveau de la nappe. Il serait important de tenir compte de la topographie et du type d'aquifères dans les simulations. Un bon suivi des piézomètres est important pour une bonne estimation du niveau de la nappe. Les séries de données piézométriques ont plusieurs périodes ayant une tendance à la hausse.

Mots clés : Analyse, Dépendance, eau souterraine, sud ouest du Burkina Faso, bassin versant

ABSTRACT

This study aims to evaluate the dependence between the groundwater levels and hydroclimatic variables in southwestern Burkina Faso. In this country, much of the population depends on groundwater for its drinking water supply. The renewal of this resource is provided by a recharge of aquifer which depends for its share of precipitation, evapotranspiration and runoff... etc. It is established that an increase in air temperature leads to higher evaporation and infiltration of precipitation depends on the type of rainfall event (duration, intensity, frequency), which could lead to a reduction in recharge aquifers.

Time series of groundwater levels, precipitation, temperature, evapotranspiration, moisture minimum and maximum speed of wind and river flows have been used to study the relationship between climate and Water levels in aquifers. Available data for this study gathered information from 10 piezometers, 14 gauging stations and six meteorological stations in Burkina Faso. All the data extends over a length of 1-40. Multivariate statistics has been made in order to see the level of dependency in data sets, this level of dependence was later confirmed by statistical tests of Student and Mann Kendall. The model summary level aquifer was done through multiple linear regression, Finally, we used linear regression with time to determine trends in periods of break in the series piezometric.

According to the results obtained, there is a slight dependence between the series of piezometric data and hydroclimatic. Hydroclimatic variables explain less than 30% fluctuations in the level of the water. It is important to take into account the topography and type of aquifers in the simulations. Good monitoring piezometers is important for a good estimate of the level of the aquifer. The piezometric data sets have several periods with a rising trend.

Keywords: Analysis, Dependence, groundwater, south west of Burkina Faso, watershed

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

IPPC: Intergovernmental panel of Climate change

ETP: Evapotranspiration Potentielle

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

DGH: Direction Générale de l'Hydraulique

SN-SO.SU.CO: Société Sucrière de la Comoé

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

DGM : Direction Générale de la Météorologie

ACP : Analyse en Composante Principale

Tmoy : Température moyenne

HuMin : Humidité Minimale

HuMax : Humidité Maximale

V : Vitesse du vent

DGRE : Direction Générale des Ressources en Eau

MCG : Model de Circulation Générale

CO2 : Dioxyde de Carbone

P : Précipitations

DY : Débit à Yendere

DF : Débit à Folonzo

DBo : Débit à Boromo

DB : Débit à Banzo

SOMMAIRE

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME.....	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	v
SOMMAIRE	vi
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	x
I. INTRODUCTION	1
I.1. Cadre de l'étude et problématique	1
I.2. Revue de la bibliographie	3
I.3. Problématique et objectifs.....	4
I.4. Hypothèses de travail	5
I.5. Organisation du mémoire.....	5
II. ZONE D'ETUDE ET PRESENTATION DES DONNEES.....	6
II.1. Présentation de la zone d'étude	6
II.1.1. Aspects climatiques	8
II.1.1.1. Climat	8
II.1.1.2. Précipitations	8
II.1.1.3. Autres paramètres climatiques.....	8
II.1.2. Aspects géomorphologiques	9
II.1.2.1. Relief.....	9
II.1.2.2. Géologie.....	9
II.1.2.3. Sols	10
II.1.2.4. Végétation.....	11

II.1.3. Réseau hydrographique	12
II.1.3.1. Ressources en eaux de surface.....	12
II.1.3.2. Ressources en eaux souterraines	13
II.1.4. Aspects sociaux économiques.....	14
II.2. Données de l'étude	16
II.2.1. Présentation	16
II.2.2. Critique des données.....	18
II.2.2.1. Taux de lacunes	19
II.2.2.2. Reconstitution des données manquantes.....	19
II.2.2.3. Les métas données	20
II.2.2.4. Incidences rencontrées lors de la collecte des données.....	20
III. METHODOLOGIE	21
III.1. Analyse exploratoire des données	21
III.1.1 Tests d'adéquation à la loi normale	21
III.1.1.1 Courbes des Quantiles-Quantiles (QQ-plot).....	21
III.1.1.2. Test de Lilliefors (Lillietest).....	22
III.1.3. Autocorrélation et saisonnalité.....	22
III.1.4. Etude de la non stationnarité: test de Dickey Fuller Augmenté (ADFtest)	23
III.1.5. La statistique multivariée	23
III.1.5.1. Etude de corrélations entre données piézométriques et hydroclimatiques	23
III.1.5.1.1. Test de Student (t-test)	24
III.1.5.1.2. Test de Mann Kendall.....	24
III.2. Modélisation sommaire de l'évolution des niveaux d'eaux souterraines.....	25
III.2.1. Choix des stations.....	25
III.2.2. Model de régression linéaire multiple (RLM).....	25
III.2.3. Sélection des variables du Modèle	26

III.2.4. Détection de rupture de tendance dans les séries piézométriques	26
IV.1. Statistique descriptive	28
IV.1.1. Test de normalité	30
IV.1.2. L'étude de la non stationnarité.....	31
IV.2. Courbes des séries piézométriques, hydroclimatiques et moyennes mobiles	32
IV.3. Statistique multivariée.....	33
IV.4. Régression linéaire.....	34
IV.5. Rupture de tendance dans les séries piézométriques.....	37
V. RECOMMANDATIONS	41
VI. CONCLUSION.....	42
VII. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	44
ANNEXES	47
ANNEXE A :Rregroupement des differents tableaux.....	48
ANNEXE B : Quelques figures d'illustrations.....	70

LISTE DES FIGURES

Figure1 : Situation géographique du Burkina Faso	8
Figure 2 : Bassins versant nationaux du Burkina Faso.....	7
Figure 3: Type de sol des bassins du Mouhoun et de la Comoé	11
Figure 4: Réseau hydrographique de la zone d'étude	14
Figure 5 : Périmètres rizicole du sous bassin versant de Tiefora	16
Figure 6 : Répartition spatiale des stations.....	17
Figure 7 : Evolution annuelle du taux de lacunes à la station de Dogona.....	19
Figure 8 : Illustration de la droite de Henry avec l'ETP de Boromo.....	22
Figure 9 : Graphique quantile-quantile de la vitesse du vent de Bobo Dioulasso.....	30
Figure 10 : Représentation graphique des séries de pluie à Banfora, la droite de tendance et la moyenne mobile sur deux ans	33
Figure 11 : Niveau piézométrique de Dogona (Avril 1995-Décembre 2000).....	39
Figure 12 : Régression de Nafana (couleur verte), courbe d'ajustement (en rouge), droite de régression en fonction du temps (en noire) et histogramme des résidus (en bleue)	40

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Statistique descriptive des stations des variables de la zone d'étude	28
Tableau 2: Résumé de la régression multiple	345
Tableau 3 : Tableau récapitulatif des tendances pour les périodes de rupture dans les séries piézométriques	387

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.

I.1. Cadre de l'étude et problématique

Les ressources en eau : une préoccupation majeure des sociétés et des Etats africains

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.

La demande consommatrice en eau, estimée à 505 millions m³/an, concerne essentiellement l'irrigation (64%), l'eau domestique (21%) et l'élevage (14%) (Dakouré, 2003). Toutes les autres demandes, y compris la demande industrielle, sont tout à fait mineures par rapport à celles-ci. Le recours aux eaux souterraines pour la satisfaction des besoins en eau pour la consommation humaine atteint au Burkina Faso un taux de 85%, pour 15% seulement assurés par les eaux de surface. Une gestion intégrée des ressources en eau s'impose donc pour accompagner un développement durable qui puisse concilier le développement socio-économique et la préservation de l'environnement.

Les Etats africains, spécifiquement ceux de l'Afrique de l'Ouest présentent une sensibilité accrue aux situations extrêmes (inondations, sécheresse,...) (Ardoin, 2004) 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. La répercussion de ces extrêmes en termes d'impacts sera fortement préjudiciable à certains secteurs clés comme l'agriculture et aux couches socioprofessionnelles les plus défavorisés. Dès lors l'acuité des besoins en ressources en eau s'intensifie.

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.

L'évaluation des changements climatiques et de ses impacts

Dans un souci de parer à ces situations de détresse, il est indispensable de faire recours à certains moyens. Ainsi le troisième rapport de l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), rendu public en juin 2008 met clairement en évidence les progrès accomplis au cours de ces dernières décennies par la communauté scientifique internationale en matière d'évolution des phénomènes climatiques. Basés sur l'utilisation de Modèles de Circulation Générale, ces travaux valident également des prévisions de plus en plus affinées sur l'évolution du climat en réponse au forçage d'origine anthropique de l'augmentation des gaz à effet de serre. Toutefois, des problèmes majeurs relatifs à ces modèles sont soulevés : résolution non adaptée à celle de la modélisation hydrologique, différences très marquées entre les sorties des modèles (Ardoin, 2004) et des précipitations généralement peu réalistes.

I.2. Revue de la bibliographie

Plusieurs études ont été réalisées pour évaluer l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau de surface, à partir de modèles de circulation générale ou de séries temporelles des données hydrologiques. Par contre, peu d'entre elles ont été réalisées à l'échelle régionale ou se sont intéressées à évaluer les impacts sur les eaux souterraines.

Kanolin et al (2001), a évalué l'impact de la baisse de la pluviométrie sur les aquifères dans la région d'Odienné; Bitié et al (2006), a mené une étude comparative de l'action de la sécheresse sur le bassin versant du N'zi et de celui du N'zo situés en côte d'Ivoire et a conclut que les réserves en eau souterraine du N'zi sont très sensibles aux variations pluviométriques que celle du N'zo; , Brou T., E. Servat , Paturol J.E (1998), se sont penchés sur la variabilité climatique et les activités humaines ; leurs résultats ont prouvés que les variations du climat pourraient créer un écart défavorable entre la demande croissante en eau potable et les ressources disponibles en eau. Des études menées par Karambiri H. et al (2009) ont permis d'apprécier l'évolution historique des paramètres climatiques (pluie, température, évapotranspiration) et des ressources en eau de surface dans le bassin de Nakambé au Burkina Faso ; leurs résultats ont montrés que le bassin pourrait être confronté au cours des prochaines décennies à un régime climatique et hydrologique très contrasté. Il y aura des années de fortes

pluviométries pouvant entraîner des inondations. D'un autre côté on pourrait assister à des graves sécheresses pouvant entraîner la raréfaction des ressources en eau pour les divers usages et aussi une réduction des rendements des cultures.

Dakoure D. et *al* (2006) ont menés une étude hydrogéologique et la modélisation mathématique du système aquifère du bassin sédimentaire de Taoudeni au Burkina Faso, les résultats de leurs travaux offrent des perspectives intéressantes de développements ultérieurs en matière de modélisation des eaux souterraines tant pour les écoulements que pour la propagation de polluant, particulièrement en ce qui concerne la région de Bobo Dioulasso. Gardin N. et *al* (2009) se sont appesantis sur une méthode physiquement basée pour cartographier la vulnérabilité intrinsèque des ressources en eau souterraine du bassin du Kou (Sud-Ouest du Burkina Faso), ils ont conclut que dans l'ensemble du bassin les durées de pollution sont très longues.

Sauret et *al* ont contribué à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du système aquifère dans le bassin du Kou leurs résultats ont permis de quantifier les flux d'eau échangé entre « eaux souterraines - eaux de surface » et les apports des aquifères sédimentaires de l'Ouest du Burkina. Dans ces processus d'échanges, le rôle des failles paraît primordial. A l'amont du modèle elles faciliteraient plutôt, à l'*exfiltration* des eaux souterraines vers la surface, un *drainage souterrain* vers l'Ouest et le centre du modèle.

I.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).

➤ Objectif global

Il s'agit donc de mieux comprendre l'impact de la variabilité hydro-climatique combinée aux activités anthropiques et d'apporter notre contribution aux réflexions menées au sein de la communauté scientifique internationale dans ce domaine.

➤ **Objectifs spécifiques**

- Il consiste à faire une proposition d'une méthodologie permettant d'évaluer le degré de dépendance entre les fluctuations des niveaux piézométriques et les variables hydroclimatiques du sud-ouest du Burkina Faso. Cette méthodologie sera fondée sur l'utilisation d'outils d'analyses de données statistiques.
- Nous tenterons par la suite d'identifier les facteurs climatiques /ou environnementaux responsables des variations inattendues observées dans les séries piézométriques.
- L'objectif final est d'apporter des éléments précis de connaissances quant aux manifestations de la variabilité du climat et son lien avec celle des ressources en eau souterraine. Ceci permettra de contribuer à la gestion durable des ressources en eau.

I.4. Hypothèses de travail

- Les régions du sud-ouest sont très fragile du point de vue environnemental (forte pression anthropique sur la ressource eau, dégradation des sols, ... etc). Elles se révèlent ainsi un objet d'étude approprié pour traiter de l'impact de la variabilité climatique et celle liée aux ressources en eau, dans la mesure où le développement de ces régions repose largement sur leur maîtrise.
- Ces régions sont celles pour lesquelles une importante masse de données a pu être collectées depuis de nombreuses années. Cette information disponible constitue un support privilégié pour ce travail de recherche.

C'est donc pour les bassins de la Comoé et du Mouhoun que l'on cherche à amener des réponses à la question suivante : quelles variables climatiques identifier pour suivre et anticiper les grandes variations piézométriques au Sud Ouest du Burkina Faso ?

I.5. Organisation du mémoire

Le présent travail s'articule autour de cinq (5) parties, dont la première fait ressortir la problématique, les objectifs et les hypothèses de travail. La seconde quant à elle présente la zone d'étude, puis introduit les données utilisées. La troisième commente les divers matériels utilisés et la méthodologie adoptée pour ce travail. Quant à la quatrième partie, elle parle des résultats et discussions et la dernière fait allusion aux recommandations. Une conclusion nous permet de mettre un terme à cette étude.

II. ZONE D'ETUDE ET PRESENTATION DES DONNEES

Le Burkina Faso, terre de contraste en matière de climat, très fragilisé d'un point de vue environnemental, d'une part par la forte pression anthropique qu'il subit, d'autre part par les problèmes croissants de dégradation des sols. Etant donné la gamme de l'ampleur des contraintes de développement, le Burkina Faso subit de plein fouet les variations du climat. Toutefois, le contexte naturel du sud-ouest et particulièrement son capital eau, offrent des perspectives favorables à un développement économique qu'il convient de concrétiser. Cette zone révèle, ainsi, un objet d'étude appropriée pour traiter de la dépendance entre les variables hydroclimatiques et piézométriques, dans la mesure où son développement économique repose encore très largement sur la maîtrise de l'eau.

Cette description du cadre physique concerne les bassins de la Comoé et du Mouhoun qui s'inscrivent pleinement dans les potentialités agricoles du Sud-Ouest du Burkina ainsi que ses caractéristiques hydrauliques et humaines. Ces bassins sont ceux pour lesquels une importante activité socio-économique (pratique de l'élevage intense et de transhumance, culture du coton, de canne à sucre, du riz, ... ect) est enregistrée et aussi une forte concentration de la population due à ces activités.

II.1. Présentation de la zone d'étude

Le Burkina Faso est situé en Afrique de l'ouest, sa superficie est de 274120 km² sans débouché maritime, il est entouré au par le mali au nord à l'est par le Niger, au sud ouest par la Cote d'Ivoire et au Sud par le Ghana, le Togo et le Benin. Le pays est subdivisé en quatre grands bassins versants nationaux comme le montre la figure 2. La zone d'étude est constituée des bassins versants du Mouhoun et de la Comoé.

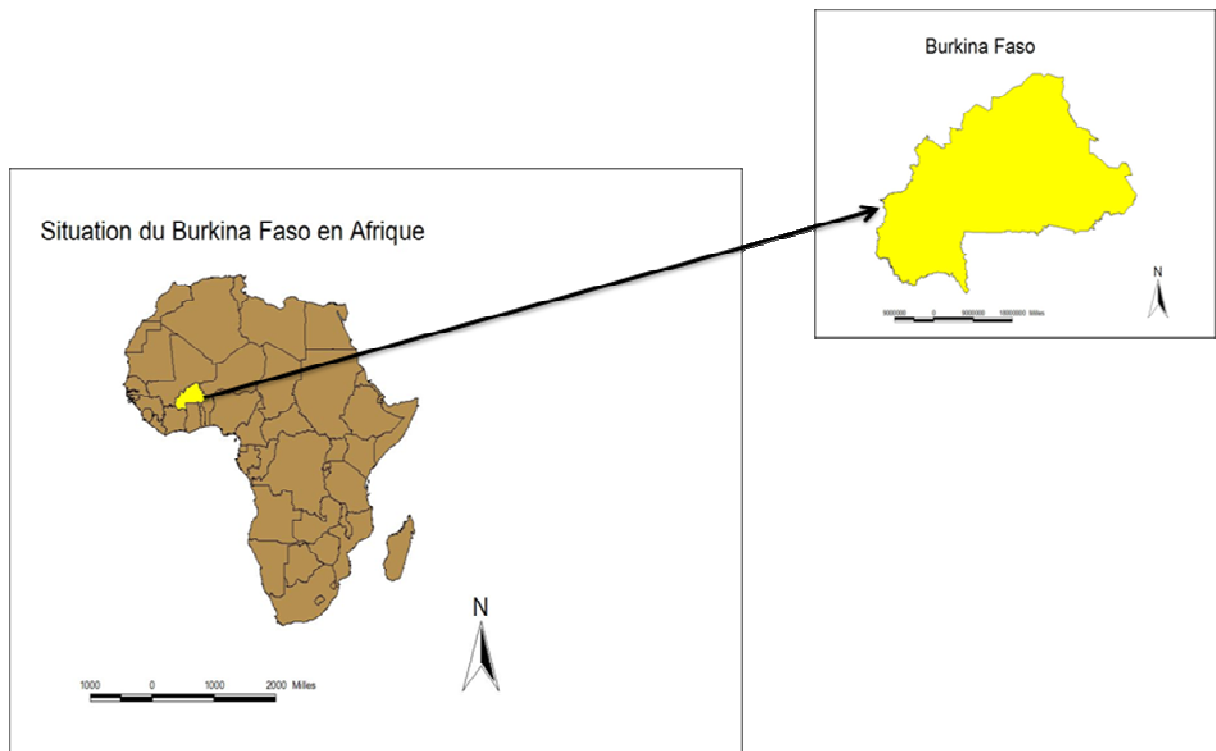


Figure 1 : Situation du Burkina Faso en Afrique

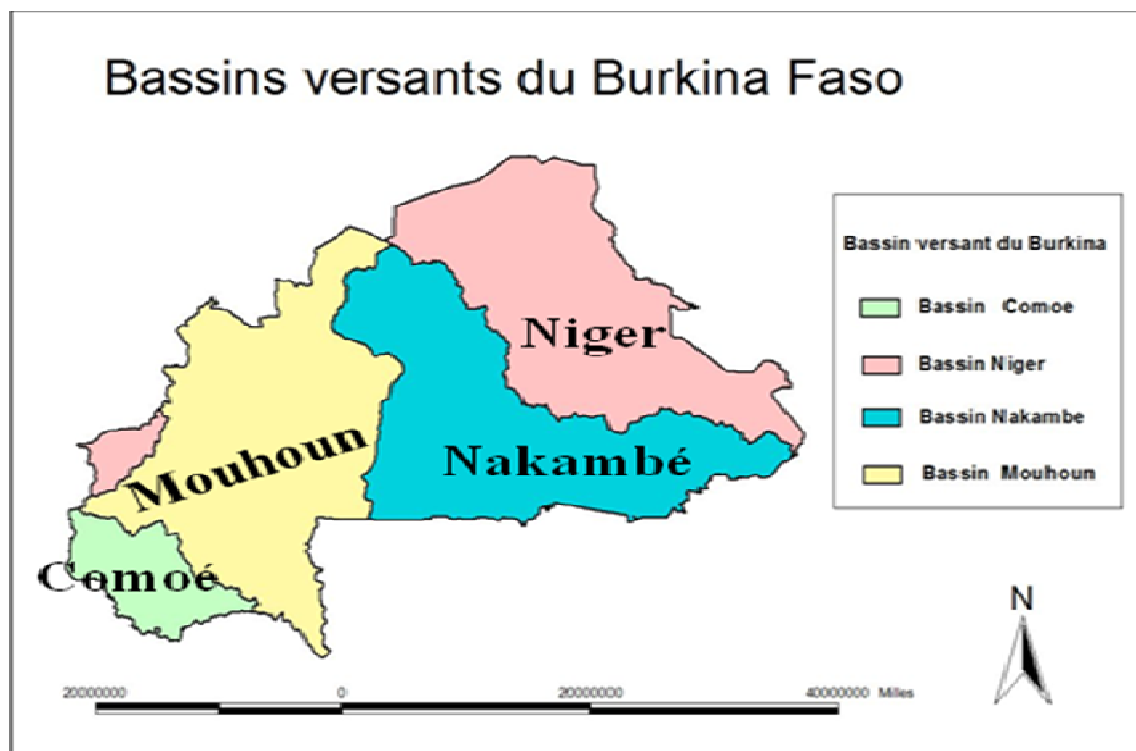


Figure 2 : Bassins versant nationaux du Burkina Faso

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.

II.1.1. Aspects climatiques

II.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.

II.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.

II.1.1.3. Autres paramètres climatiques

Les paramètres climatiques tels que, 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.

II.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.

II.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.

II.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.

II.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.

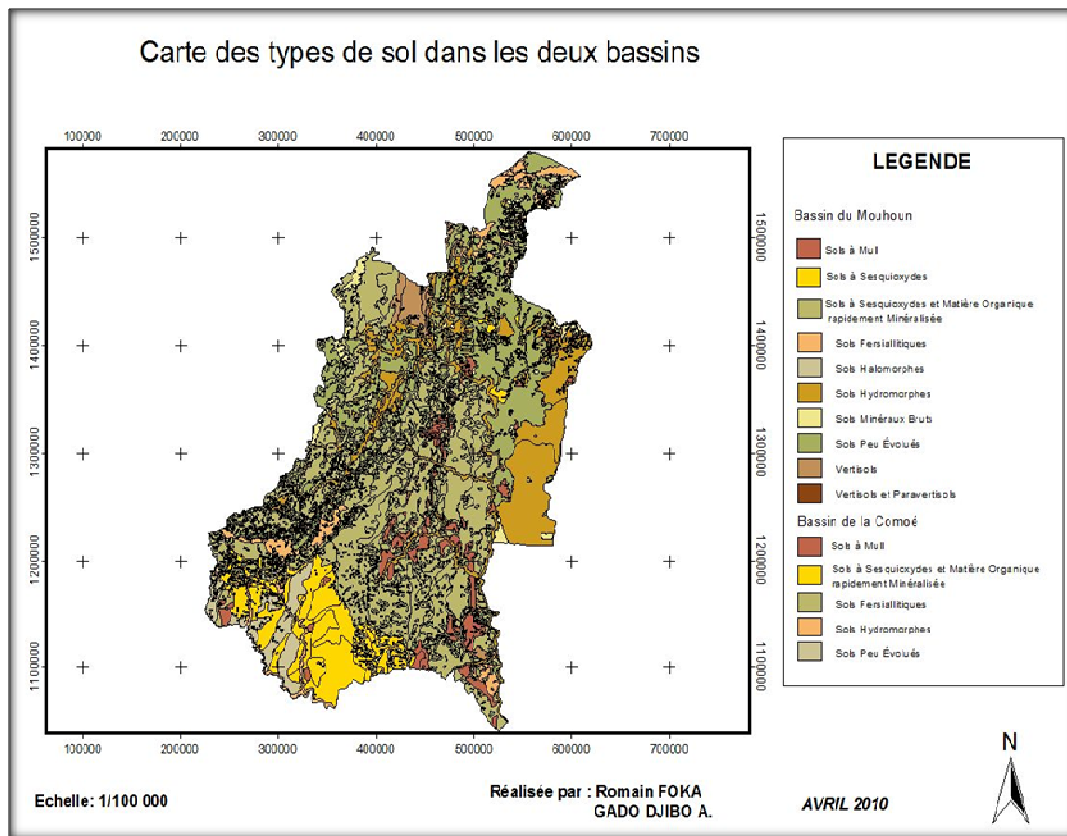


Figure 3: Type de sol des bassins du Mouhoun et de la Comoé

II.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. Il créent des conditions microclimatiques 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.

II.1.3. Réseau hydrographique

II.1.3.1. Ressources en eaux de surface

Le réseau hydrographique est moyennement 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.

Il a plusieurs affluents comme le Yanon, la Lobi, le Sinlo, le Koflandé, le Mou, le Kadiatou, ... ect, dont son plus important affluent 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 dépassent 1 000 mm par an. 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 pays 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.

II.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 (MEE/DGH, 2001).

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 (Sauret et *al.*, 1994). 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 Pessa (débit >400 m³/h) (Traore, 1997). D'autres sources à débit important existent dans la zone mais sont encore mal connues.

La recharge des nappes se fait soit par alimentation par infiltration homogène, soit par voie préférentielle (canicules, zone fracturée, filons de quartz), soit par alimentation directe (à partir de bas-fonds, vallées alluviales, dépressions topographiques...).

La décharge des nappes se fait soit par exploitation humaine, soit par écoulements souterrains latéraux, soit par évapotranspiration.

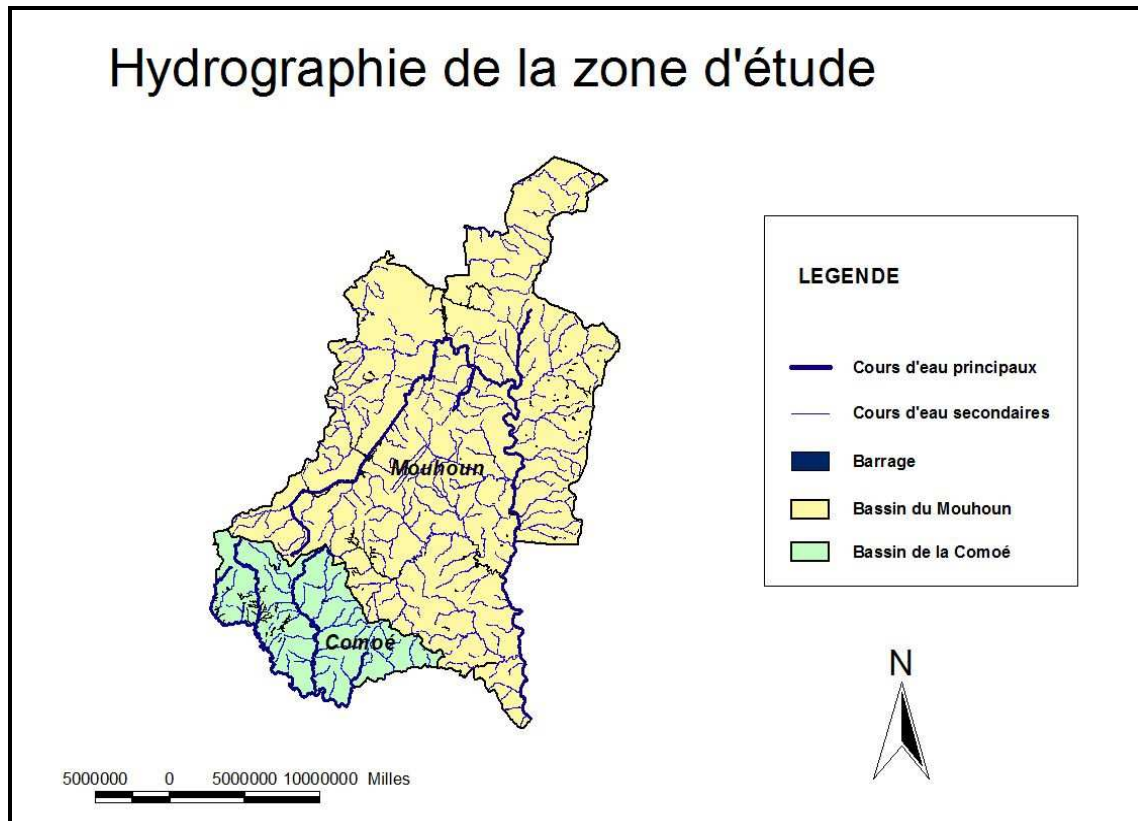


Figure 4: Réseau hydrographique du Mouhoun et de la Comoé

II.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 agricole, 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. La zone d'étude est un véritable creuset ethnique avec la cohabitation de près d'une trentaine d'ethnies différentes.

Le secteur agricole demeure le moteur de développement économique et social de la zone. Les céréales occupent 67% de la superficie du bassin de Mouhoun contre 30% (MED, 2008) pour les cultures de rente, ce qui donne lieu à une contribution de 60% à la production nationale de maïs. On note également la culture intense du riz dans le Sourou et le Kou.

Les industries les plus importantes du pays se trouvent dans cette zone dont la SN-SO.SU.CO et les grands moulins qui sont des grandes consommatrices d'eau à travers les périmètres irrigués de cannes à sucre et du blé.

A côté 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.



Figure 5 : Périmètres rizicole du sous bassin versant de Tiefora

II.2. Données de l'étude

II.2.1. Présentation

Cette étude couvre les bassins du Mouhoun et de la Comoé du sud ouest du Burkina Faso. La figure 6 présente la distribution spatiale des 28 stations de mesures sur la zone d'étude. A l'annexe A, le tableau 1 résume les stations météorologiques, hydrométriques et piézométriques avec leur localisation (longitude-latitude), la période durant laquelle des données ont été prélevées.

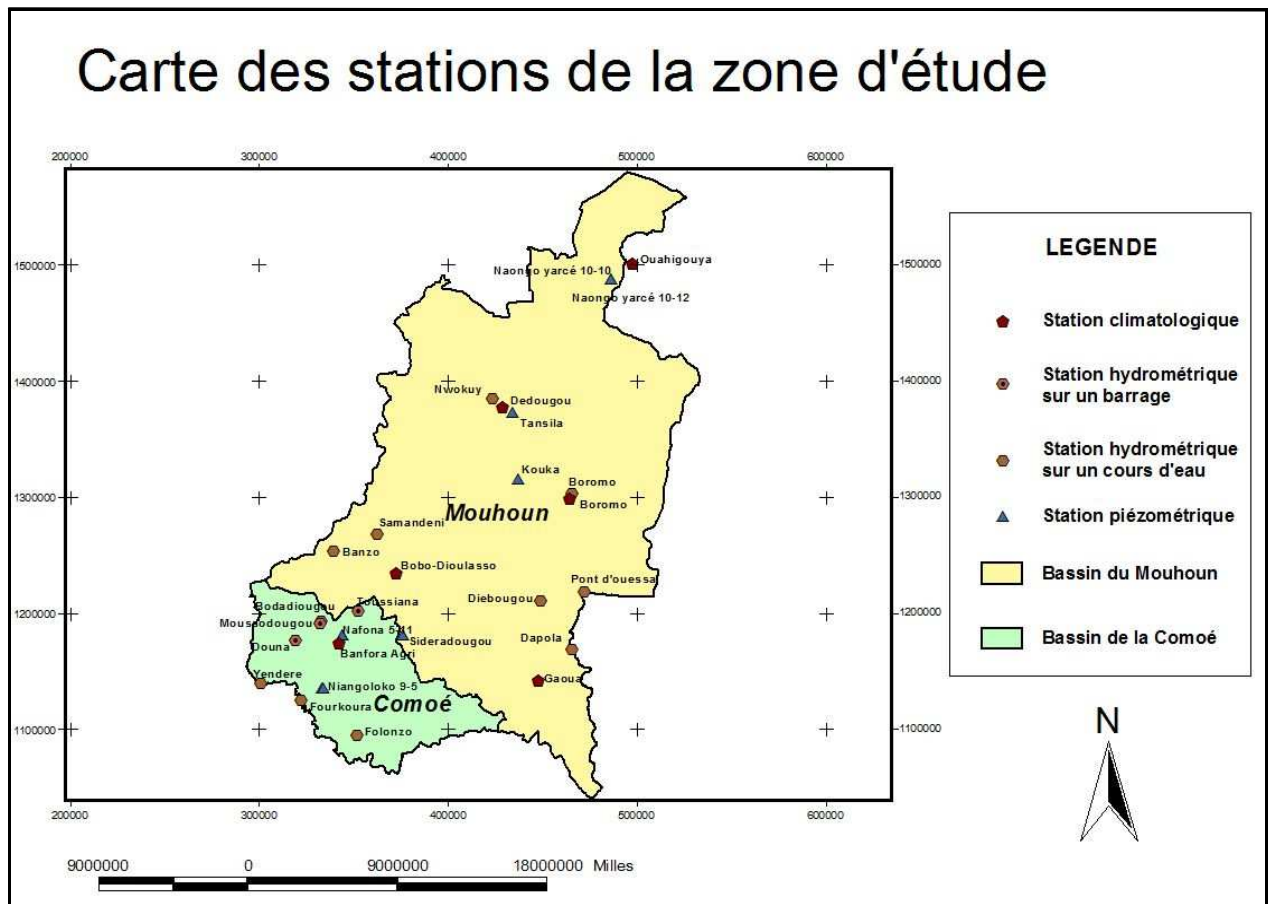


Figure 6 : Répartition spatiale des stations

Trois types de données ont été étudiées pour ce travail: piézométriques, hydrométriques et climatologiques. huit (08) stations piézométriques, 10 stations de jaugeage des cours d'eau, 4 stations situées sur les barrages et 6 stations météorologiques possédant des données sur une période de 1 à 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 hydrologiques. Très peu de piézomètres possèdent de longues périodes de données. Le tableau 2 de l'annexe A 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 les 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 sur de nombreuses années (de 1970 à 2008), elles couvrent 14 stations mais seulement 10 stations ont été utilisées car les 4 autres stations concernant les volumes des barrages ont été écartées de notre étude.

Les données climatologiques proviennent elles 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 de jaugeage, 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, 5 sont synoptiques et seules la station de Banfora agriculture fait l'exception et ne possède que les mesures mensuelles de pluies.

En tout, seulement 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, hydrologiques et piézométriques.

II.2.2. Critique des données

La critique des données est basée sur plusieurs hypothèses comme :

- deux stations voisines doivent avoir les données semblables ou tout au moins avoir des relations entre leurs valeurs,
- Suivant la nature de la station les données mensuelles ont des seuils qu'elles ne doivent pas dépasser ou alors ce serait un événement exceptionnel remarquable,
- certains mois comme janvier, février, mars, novembre et décembre n'ont généralement pas de grande valeur de pluviométrie.

A partir d'une observation simple, ou par un graphique les valeurs douteuses ont été décelées et après analyses sérieuses elles ont été remplacées par des lacunes. Il va de soit que ces contrôles n'ont permis d'éliminer que des valeurs manifestement fausses, et que la justesse des données conservées n'est pas pour autant garantie. Des erreurs et lacunes d'observations

sont inévitables (un observateur ne pouvant être présent tous les jours à la station pour diverses raisons). Ces lacunes sont acceptables s'il est possible de les combler.

II.2.2.1. Taux de lacunes

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 l'ensemble des stations. Il en ressort que les stations piézométriques sont celles dont les taux de mesures manquantes sont les plus élevés, par contre les stations météorologiques ont les taux de lacunes les plus faibles. Le tableau 1 de l'annexe A 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 7 ci-dessous montre l'évolution temporelle des lacunes à la station piézométrique de DOGONA.

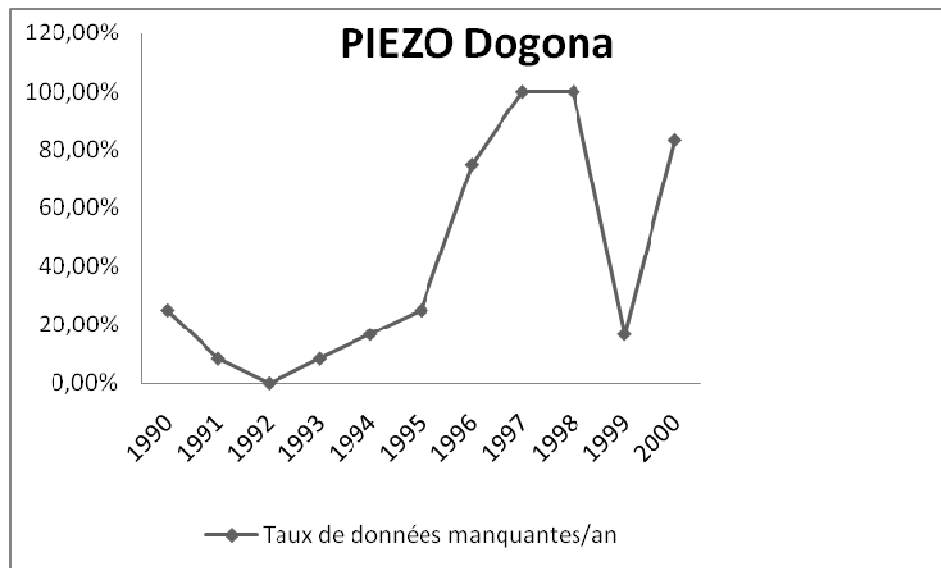


Figure 7 : Evolution annuelle du taux de lacunes à la station de Dogona

II.2.2.2. Reconstitution des données manquantes

Nous nous sommes servi dans cette partie des données reconstituées grâce aux travaux de GADO D.A. (homogénéisation des données hydroclimatiques du sud ouest du Burkina Faso : mémoire de master spécialisé, 2010) dont la zone d'étude est identique à la notre. Notons que la méthode utilisée est l'interpolation linéaire. Ainsi nous avons eu les chroniques de données les plus complètes possibles, constituant la banque de données opérationnelles utilisées ensuite pour les simulations, en gardant à l'esprit que l'estimation des données manquantes est entachée d'incertitudes, et ce quelque soit le procédé mis en œuvre.

II.2.2.3. Les métas données

➤ Techniques utilisées pour la collecte

- 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 de l'humidité
- La direction des vents se détermine à l'aide d'une girouette, quant à sa vitesse on la mesure avec 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).
- 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.

II.2.2.4. 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 piézométriques, d'où leurs ruptures constatées sur plusieurs périodes.

III. METHODOLOGIE

Pour répondre aux objectifs de cette étude, une revue de littérature des méthodes de régression linéaire multiple a été réalisée. Ainsi plusieurs tests ou procédures statistiques ont été retenus. Leur choix peut être controversé mais ce n'est pas l'objet du présent travail que d'en discuter dans la mesure où ils ont déjà été mis en œuvre sur les séries chronologiques de données de l'Afrique de l'Ouest sahélienne et non sahélienne. Ces outils mathématiques sont 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 les corrélations linéaires entre les stations. La présentation et les conditions d'application de chaque test sont données dans les paragraphes qui suivent.

III.1. Analyse exploratoire des données

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 des 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. Ainsi nous avons utilisé le logiciel MATLAB 7.9.0 (2009b) et son extension « statistical toolbox » permettant de faire l'ensemble des analyses des données. Mais au préalable le logiciel Excel a été utilisé pour la préparation des tableaux de données afin de faciliter leur analyse. Le logiciel Tanagra nous a permis de faire l'analyse en composante principale sur l'ensemble des stations afin de révéler les interrelations entre les différentes populations et faire un regroupement à partir de la carte des individus. Nos cartes ont été réalisées avec le logiciel Arview 3.2.

III.1.1 Tests d'adéquation à la loi normale

Cette section a pour but de vérifier la conformité de nos séries de données avec la loi normale. Pour ce faire, deux techniques ont été utilisées : une méthode graphique et un test statistique.

III.1.1.1 Courbes des Quantiles-Quantiles (QQ-plot)

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 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).

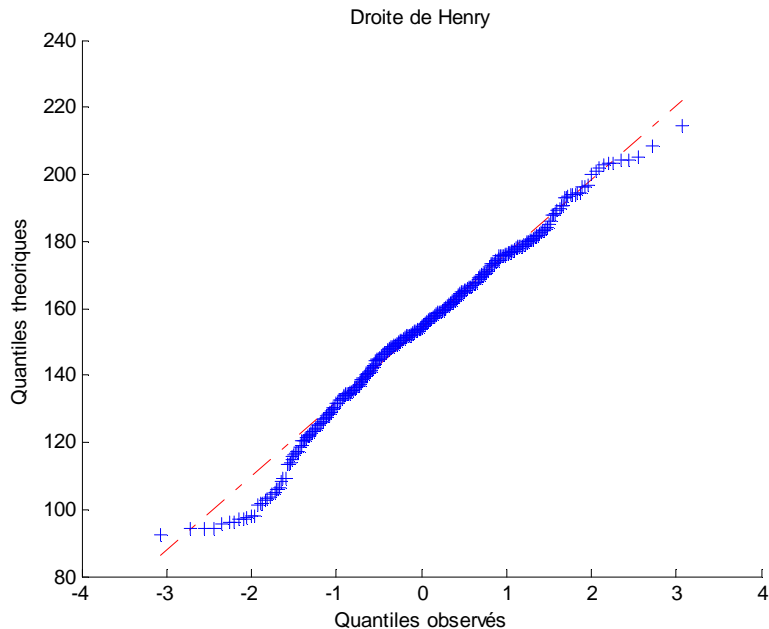


Figure 8 : Illustration de la droite de Henry avec l'ETP de Boromo

III.1.1.2. Test de Lilliefors (Lillietest)

Le test de Lilliefors repose sur l'hypothèse nulle « H0 : l'échantillon suit une loi normale » contre hypothèse alternative « H1 : 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'écartype sont égaux à ceux de l'échantillon (Lilliefors, 1967).

III.1.3. Autocorrélation et saisonnalité

Le contexte de stationnarité ou de saisonnalité a été vérifié par la représentation graphique des séries hydrométéorologiques par rapport au temps de mesure. L'application de la moyenne mobile a permis de lisser les courbes de séries ayant une saisonnalité afin d'observer leur tendance.

III.1.4. Etude de la non stationnarité: test de Dickey Fuller Augmenté (ADFtest)

L'étude de tendance s'est effectuée en deux phases, dont la première consistait à faire une analyse graphique de chaque courbe de série hydrométéorologique et de dégager sa tendance (tendance à la hausse, tendance à la baisse, tendance qui semble stationnaire en moyenne). Cependant l'utilisation d'un test statistique, contrairement à une analyse graphique, 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 F.A.(Dickey-Fuller Augmenté, 1881) (ADF test) encore appelé test de la racine unitaire, permettant d'identifier le type de la non stationnarité, notamment la présence d'une tendance dans la série étudiée.

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 :

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

Où c est un coefficient de dérive, d un coefficient à tendance déterministe, a le coefficient d'un model autorégressif d'ordre1 (AR(1)), $e(t)$ est un processus stationnaire indépendant et identiquement distribué, y_t est un processus non stationnaire.

III.1.5. La statistique multivariée

Cette partie décrit les méthodes statistiques destinées à quantifier et tester la liaison entre plusieurs variables quantitatives : on parle d'analyse de corrélation dans la littérature.

III.1.5.1. Etude de corrélations entre données piézométriques et hydroclimatiques

La statistique multivariée 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 (corrélations croisées). Ainsi l'étude de corrélations (corrélations croisées) nous a permis d'apprécier le degré de dépendance entre les différents paramètres de notre étude.

Nous avons confirmé le degré de dépendance linéaire (corrélation) entre les stations par application des tests de Student (t-test) et du tau de Mann Kendall.

III.1.5.1.1. 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 $t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$ (Ricco Rakotomalala, 2008) 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.

III.1.5.1.2. Test de Mann Kendall

Le test de Mann-Kendall, également appelé « Kendall tau », est un test non paramétrique basé sur le rang, l'hypothèse nulle « H_0 : les deux échantillons sont statistiquement dépendants, $\tau \neq 0$ », l'hypothèse alternative « H_1 : de deux échantillons indépendants, $\tau = 0$ ». 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 $-1 < \tau < 1$.

III.2. Modélisation sommaire de l'évolution des niveaux d'eaux souterraines

Cette partie a consisté en la recherche d'une relation de cause à effet entre les hauteurs piézométriques et les variables hydroclimatiques produits au niveau des stations de contrôle et pour les périodes similaires. Ceci a été rendu possible par la régression linéaire multiple des hauteurs piézométriques (l'effet) en fonction des variables hydro climatiques (les causes).

L'objectif de la régression est de déterminer s'il existe une relation fonctionnelle entre la hauteur piézométrique (variable à expliquer) et les variables hydroclimatiques (variables explicatives)

III.2.1. Choix des stations

Les stations retenues dans cette section ont été sélectionnées en fonction de la qualité, de la longueur des séries temporelles et de leur répartition spatiale. Le logiciel TANAGRA nous a permis de faire un regroupement des stations sélectionnées à partir de la carte des individus (différentes stations) , issu de l'analyse en composante principale (ACP). Cette carte se trouve en Annexe B.

III.2.2. Model de régression linéaire multiple (RLM)

Le choix du model de régression linéaire s'est fait à cause de sa simplicité et des différents outils statistiques qui s'y attachent.

Le point de départ est l'estimation des paramètres d'une régression mettant en jeu une variable endogène Y (variable à expliquer) et p variables exogènes X_j (variables explicatives). Nous disposons de n observations. L'équation de la régression s'écrit :

$$. y = a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_p X_p + \varepsilon_i$$

Où Y est la variable à expliquer ; x_i désignent les variables explicatives ; ε_i est l'erreur du model il résume les informations manquantes qui permettraient d'expliquer linéairement les valeurs de Y à l'aide de p variables X_j .

Les variables explicatives retenues sont la pluie (P), l'évapotranspiration (ETP), la température moyenne (Tmoy), l'humidité moyenne maximale ou minimale ou (Hmoy, HuMax, ou HuMin), les débits à Folonzo, Yendere, Banzo, Fourkoura, Nwokuy, Boromo

(DF, DY, DB, DF, DN, DBo,). Ces variables sont retenues compte tenu du bilan hydrologique dans un bassin versant dont l'équation s'écrit :

$P = ETP + D + \Delta S$; où D représente le ruissellement (débit) et ΔS la variation du stockage d'eau dans le sol qui est fonction l'humidité du sol et de la réserve d'eau souterraine.

III.2.3. Sélection des variables du Modèle

Pour mieux expliquer les fluctuations du niveau de la nappe nous disposons de p variables explicatives. Nous avons voulu que notre modèle soit à la fois significatif et parcimonieux (sans variables inutiles) (Ricco Rakotomalala, 2009). Voici comment nous avons procédé :

- a) Nous commençons avec une régression comportant toutes les exogènes, nous relevons le coefficient de détermination.
- b) Nous enlevons la variable qui contribue le moins à expliquer l'équation de la régression en tenant compte des corrélations croisées entre les exogènes tout en vérifiant que le nouveau coefficient de détermination n'est pas significativement inférieur à celui trouvé en (a),
- c) Nous effectuons la régression à nouveau avec toutes les variables sauf celle que nous venons d'enlever,
- d) Nous répétons les étapes (a) et (b) tant et aussi longtemps que le coefficient de détermination ne s'écarte pas à celui trouvé en (a).

III.2.4. Détection de rupture de tendance dans les séries piézométriques

Cette partie a consisté en la recherche des ruptures de tendances dans les séries piézométriques à partir des droites de régressions des périodes de rupture en fonction du temps. Pour y parvenir nous nous sommes servi des résultats de GADO D.A. (homogénéisation des données hydroclimatiques du sud ouest du Burkina Faso : mémoire de master spécialisé, 2010) sur la détection de changement de rupture dans les séries hydroclimatiques. En théorie la régression linéaire permet de déterminer la droite du plan affine qui s'ajuste au mieux à un ensemble de n points de mesure $y_i(x_i)$. Autrement dit en supposant que les écarts des mesures par rapport à une droite sont normalement distribués, on cherche à ajuster par moindres carrés le modèle linéaire à deux paramètres (a, b) : $y = ax + b$, où

a est la pente et b l'ordonnée à l'origine de la droite recherchée (dite de régression). Cette équation nous permet donc de détecter une tendance graphiquement.

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Statistique descriptive

Le tableau 1 ci-dessous résume les paramètres statistiques (moyenne, écart type, autocorrélation,...etc.) des séries hydroclimatiques de toutes les stations.

Il ressort de ce tableau que l'évapotranspiration à une moyenne plus élevée (176.31mm) que les autres variables climatiques. D'autre part les moyennes des débits varient entre 8.60 et 82.75m³/s pendant que celles des piézomètres fluctuent entre 4.63m et 13.68m.

En général toutes les variables sont bien autocorrélées, mais les coefficients d'autocorrélations les plus élevés sont ceux des humidités relatives maximales et minimales qui dépassent les 80%. Les hauteurs de pluie ont des écarts type élevés alors que ceux des températures moyennes sont faibles.

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

Stations	Mesure	Autocorrélation	Moyenne	Ecartype	Maximum	Minimum
DOGONA	Niveau piezo (m)	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
KOUKA	Niveau piezo (m)	0,30	14,20	6,36	18,09	0
NAONGO 10-10		0,44	6,70	2,24	13,46	0
NAONGO 10-12		0,86	9,62	2,57	13,15	0
TANSILA		0,81	10,61	0,57	11,19	9,58
YENDERE	Débit (m ³ /s)	0,55	25,77	48,55	300	0
FOLONZO		0,53	18,77	35,61	236	0
MOUSSOUDOUGOU		0,84	0,01	0,003	0,01	0,001
BODIOUGOU		0,86	0,001	0,001	0,002	2,89E-05
FOURKOURA		0,55	11,61	18,89	90,10	0
TOUSSIANA		0,88	0,001	0,001	0,002	0,00020
DOUNA		0,85	0,01	0,003	0,02	0,001
BOROMO		0,70	27,60	36,51	255	0,049
DAPOLA	Débit (m ³ /s)	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

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

Stations	Mesure	Autocorrélation	Moyenne	Ecartype	Maximum	Minimum
BOBO DIOULASSO	ETP (mm)	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
BOBO DIOULASSO	HuMax (%)	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
BOBO DIOULASSO	HuMin (%)	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
BOBO DIOULASSO	Tmoy (°C)	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
BOBO DIOULASSO	Vent (m/s)	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
BOBO DIOULASSO	Pluie (mm)	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.

Les résultats du tableau 1 montrent bien une forte autocorrélation au niveau des stations d'humidité relative prouvant ainsi une dépendance d'une mesure mensuelle par rapport à sa précédente. Cela s'explique par le fait que l'humidité relative dépend de plusieurs paramètres atmosphériques qui sont constamment présents dans l'atmosphère. Les valeurs moyennes d'autocorrélation au niveau des stations de débits s'expliquent par une discontinuité temporelle qui relie deux débits consécutifs (du point de vu apport) car les débits écoulés par un cours d'eau pendant plusieurs jours consécutifs ont un caractère de continuité certain, ils ont donc un rapport de dépendance.

La variation des moyennes des séries dépendent des valeurs de chaque paramètres, ainsi elle est grande si les valeurs mesurées sont élevées et petites si les mesures sont basses.

Cependant la variation brusque des mesures de débit montrant des valeurs élevées (300 à 800m³/s) pour certaines stations (Dapola, Ouessa) serait dû à l'abondance des pluies au mois d'août qui font à ce que les plan d'eau se remplissent au niveau du Sourou. 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 de mesure hydrométriques comme Ouessa et Dapola.

IV.1.1. Test de normalité

Les courbes de quantiles-quantiles appelées « QQ plot » pour l'ensemble des séries, nous laisse présager graphiquement 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. La figure 9 ci-dessous illustre un exemple de test pour la vitesse du vent de Bobo Dioulasso, d'autres figures séries issues du test de normalité sont présentées en annexe B.

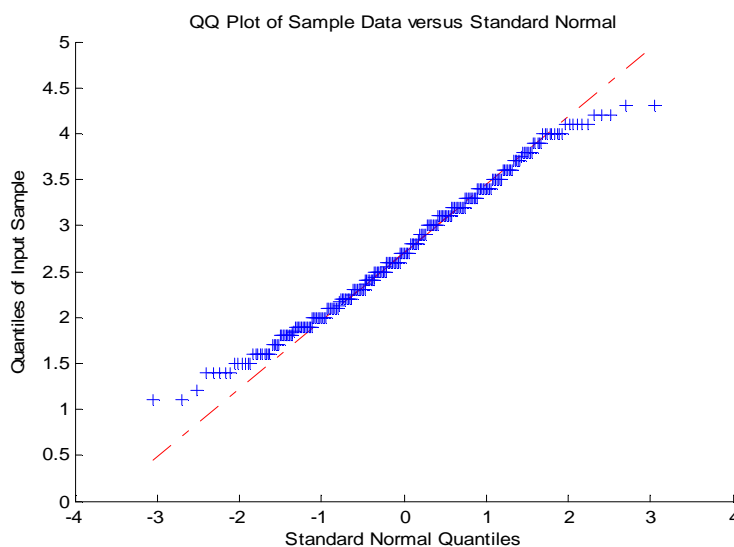


Figure 9 : Graphique quantile-quantile de la vitesse du vent de Bobo Dioulasso

IV.1.2. L'étude de la non stationnarité

L'examen graphique des séries hydroclimatiques a montré que ces séries ont toutes une tendance. Ainsi les séries piézométriques, hydrométriques, de température, 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 analyse graphique. 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.

La tendance générale croissante des niveaux piézométriques des stations de Dogona et de Nafona pourrait être liée à la bonne pluviométrie (plus de 1000mm par an) sur cette partie du bassin de la Comoé et aussi à la structure hydrogéologique (zone sédimentaire) et la texture du sol où sont localisés ces piézomètres favorisant l'infiltration des eaux de pluie et du ruissellement. Quant au niveau piézométrique décroissant de la station de Sideradougou, il résulterait de la baisse pluviométrique enregistrée dans la zone où les conditions climatiques sont moins favorables au fil des années comparées au cas précédent.

La fluctuation des tendances des débits pourrait être liée à la variation spatio-temporelle des pluies. En effet la saison pluvieuse étant comprise entre Avril et Octobre, le reste de l'année reste sans grand apport aux écoulements.

Les changements de tendance des différentes séries de mesures observés sur les stations météorologiques le long de la période d'étude sont dus d'une part à la variation de chaque paramètre pris individuellement et aussi d'autre part du fait que certains des paramètres sont influencés par la variation d'un autre. Par exemple une fluctuation des mesures de l'humidité relative et de la température moyenne a une emprise sur les valeurs des mesures de l'évapotranspiration. Mais il est à noter que seules les pluies mensuelles ont une tendance qui semble stationnaire en moyenne de 1970 à 2008.

IV.2. Courbes des séries piézométriques, hydroclimatiques et moyennes mobiles

Les séries piézométriques montrent dans l'ensemble une tendance générale croissante (Dogona, Nafona) à l'exception d'une station qui semble stationnaire en moyenne (Sideradougou). Quant aux séries hydrométriques, deux tendances sont observées : une tendance croissante d'une part (Yendere, Boromo ...etc) et une tendance décroissante d'autre part (Folonzo, ...etc). Par contre, on note trois types de tendance au niveau des séries météorologiques : une tendance à la hausse (Humidité relative minimale de Dédougou, Température moyenne de Bobo Dioulasso), une tendance à la baisse (Humidité relative maximale de Ouahigouya et Bobo Dioulasso) et la dernière tendance semble stationnaire en moyenne (Evapotranspiration de Boromo, Pluie de Gaoua). On note également une fluctuation des maxima et minima saisonniers pour l'ensemble des séries hydroclimatiques. Ainsi toutes ces séries nous montrent la présence d'une saisonnalité (Température moyenne de Boromo, Vitesse du vent à Gaoua, Débit à Nwokuy, ...). La figure 10 montre à gauche la représentation graphique des séries de précipitation de Banfora et une droite de tendance qui montre que cette série est stationnaire en moyenne ; à droite nous avons représenté la moyenne mobile de la série sur deux ans. La représentation graphique de quelques courbes de séries hydrométéorologiques est consignée en annexe B.

Le lissage des courbes de séries par la méthode de la moyenne mobile à l'ordre 25 a permis de désaisonnalisé l'ensemble des séries. Mais on décèle des sauts au niveau de la moyenne ou des ruptures sur certaines séries telles que celles de la vitesse du vent, qui sont vérifiés par des tests statistiques complémentaires.

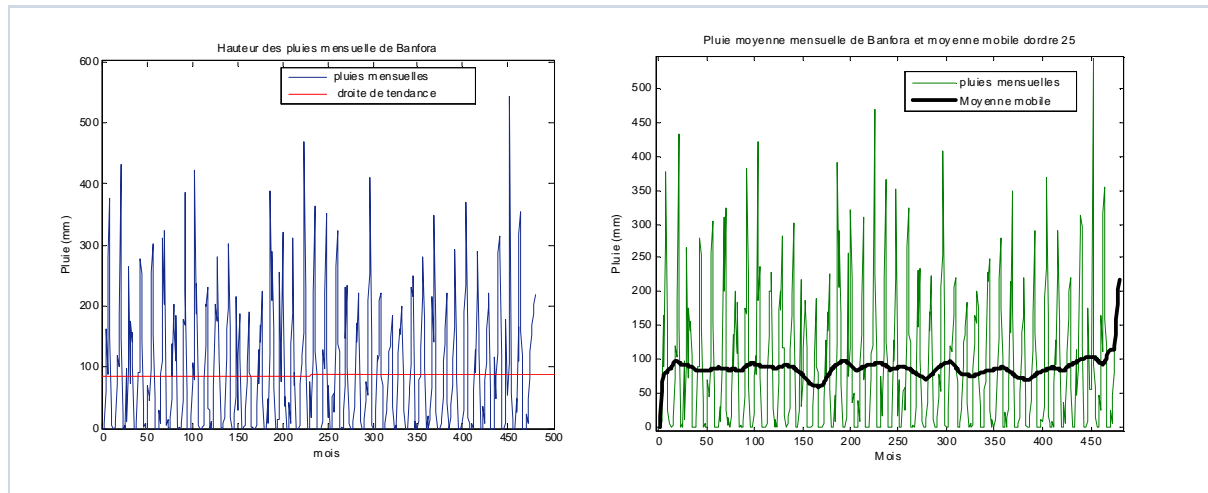


Figure 10 : Représentation graphique des séries de pluie à Banfora, la droite de tendance et la moyenne mobile sur deux ans

IV.3. Statistique multivariée

L'analyse des corrélations entre les séries de précipitations et les autres paramètres hydroclimatiques montre que la pluie est bien corrélée avec l'humidité relative minimale et moins corrélée avec le vent. Quant à la température, elle est mieux corrélée avec l'évapotranspiration (0.35 à 0.75) et moins corrélées avec l'humidité relative maximale (0.05 à 0.56). La corrélation entre l'évapotranspiration et les autres paramètres montre qu'elle est bien corrélée avec les humidités relatives maximales et minimales.

En observant le tableau des corrélations croisées (cf. Tableau3, annexe A), on note que l'humidité relative maximale est fortement corrélée à l'humidité relative minimale et à l'évapotranspiration. On remarque également que l'humidité relative minimale est mieux corrélée avec la pluie (0.77 à 0.90) et l'évapotranspiration (0.39 à 0.84) ; alors que la vitesse du vent en général n'est pas significativement corrélées avec l'ensemble des paramètres étudiés. Les hauteurs piézométriques sont très faiblement corrélées avec l'ensemble des paramètres de cette étude, tandis que les débits sont mieux corrélés à l'humidité relative minimale qu'à l'humidité relative maximale et faiblement corrélées aux autres paramètres.

Ainsi, nous pouvons conclure de façon générale à travers les tests de Student et du tau de Kendall que les coefficients de corrélation sont différents de zéro.

L'absence d'une corrélation significative entre les niveaux piézométriques et les variables hydroclimatiques serait dû à la forte variabilité spatiale entre les stations.

IV.4. Régression linéaire

Les résultats de la régression montrent que les coefficients de détermination ne sont pas statistiquement significatifs ($R^2 < 0,5$) pour toutes les combinaisons issues de la relation :

Hauteur piézométrique = f (Débit, variables climatiques)

De façon générale nous constatons que les courbes d'ajustement et les courbes des séries piézométriques sont assez synchrones. Seules les fluctuations brusques des niveaux piézométriques ne sont pas mises en évidence par les courbes d'ajustement. Les coefficients de détermination varient entre **0,02** et **0,31**. Le tableau 2 résume les résultats (coefficients de régression et coefficient de détermination) de la régression pour toutes les combinaisons de notre zone d'étude. La figure 13 est relative au modèle de régression linéaire de Nafona. De prime à bord il apparaît clairement que les pics des niveaux piézométriques ne sont pas entièrement reproduits par la courbe d'ajustement. Les variations moyennes sont assez bien reproduites et coïncident avec les variations de la courbe d'ajustement. Le modèle linéaire construit avec le piézomètre de Nafona comporte 4 variables explicatives. Nous constatons (Tableau 2) que la variable Débit (station de Yenderé), contribue plus à l'explication du comportement de la variable piezo à Nafona, par contre les précipitations, la température moyenne et l'humidité n'ont pas une forte influence sur la variable piezo de Nafona (corrélations non significatives). Nous constatons (voir tableau des corrélations croisées en annexe A) que la variable débit (station de Yendere) est fortement lié au niveau piézométrique de Nafona.

Tableau 2: Résumé de la régression multiple

Variables explicatives	Model : Niveau-piézo = f (Débit, variables hydroclimatiques)	R ²
Pluie, Tmoy, ETP, Humoy, DY	Nafona = 4,761 + 0,004*Pluie - 0,016*ETP + 0,019*Tmoy + 0,013*Hmoy - 0,0145*DY	0,27
Pluie, Tmoy, ETP, DY	Nafona = 7,274 - 0,04*Pluie - 0,022*ETP - 0,066*moy - 0,132*DY	0,26
Pluie, Tmoy, ETP, DY, DF, Humin	Niangoloko = 7,262 + 0,043*Pluie + 0,068*Tmoy - 0,239*ETP + 0,337*Vent + 0,146*DF - 0,265*DY + 0,092*Hmin	0,14

Pluie, ETP, Tmoy, Humax, DB	Sideradougou= 0,77+0,004*Pluie+0,115*Tmoy-0,065*ETP -0,027*DB-	0,25
Pluie, ETP, Tmoy, Humax, DBO	Sideradougou= 0,508+0,393*Pluie+0,221*Tmoy+0,007*ETP -0,155*DN-0,245*DBO-0,176*Hmax	0,31
Pluie, ETP, Tmoy, Vent, Humax ,	Sideradougou= 2,00+0,42*Pluie+0,20*Tmoy-0,013*ETP -0,23*Humax-0,21*DBO	0,30
Pluie, ETP, Tmoy, Humax, Vent	Naongo-Yarce10-10= 1,739+0,218*Pluie-0,397*ETP+0,438*Tmoy-0,406*Humax	0,10
Pluie, ETP, Tmoy , Humax	Naongo-Yarce10-12=0,00+0,191*Pluie+0,061*ETP+0,046*Tmoy-0,186	0,02

Pour le piézomètre de Niangoloko nous avons construit un model à 5 variables explicatives mais qui n'explique que 14% de son comportement. Dans ce model les variables ETP et Débit (station de Yendere) ont une forte contribution à l'explication du phénomène par contre les contributions de la température et de l'humidité sont faible d'après les coefficients de la régression (tableau 2).

Le modèle linéaire piezo/variables hydroclimatiques de Sideradougou montre que (tableau 2) toutes les variables contribuent presque équitablement à l'explication du comportement du niveau piézométrique, il explique 25% de ses variations.

Le modèle de Sideradougou en fonction des variables de la station météorologique de Dedougou d'une part et de Boromo d'autre part, du débit des stations hydrométriques de Nwokuy et Boromo, nous avons construit deux model à 5 et 4 variables explicatives respectivement. Avec la station météorologique de Dedougou, les variables précipitations, température, débit (station de Boromo) contribuent plus à l'explication du comportement du niveau de la nappe de Sideradougou et l'humidité (station de Dedougou) a une faible contribution. Par contre dans le cas avec la station météorologique de Boromo toutes les variables ont une contribution à peu près égale.

Les résultats de la régression de Naongo-Yarce 10-10 avec la station météorologique de Ouahigouya montre que le modèle n'explique que 10% du comportement de ce piézomètre. Par ailleurs les variables de la station météorologique de Ouahigouya n'ont presque pas d'effet sur le comportement des fluctuations piézométriques de Naongo-Yarce 10-12 car le coefficient de détermination de cette régression tend vers zéro.

Il ressort de ce qui précède que nos figures de simulations montrent (Fig. 13) une évolution synchrone entre l'évolution des variables piezo et les courbes d'ajustement des bassins du Mouhoun et de la Comoé mais les fluctuations brusques ne sont pas mise en évidence par les courbes d'ajustement. Cette situation résulterait du manque de corrélation entre les variables hydroclimatiques et les variations du niveau piézométrique (voir tableau des corrélations croisée annexe A). Les facteurs (climat, topographie, et cadre géologique) qui commandent le taux de recharge sont liés au paysage hydrologique du système aquifère. En effet l'étude des corrélations nous montre une faible dépendance entre les niveaux piézométriques et les variables hydroclimatiques à quelques exceptions près avec le cas des stations hydrométriques de Yendere et Nwokuy, et quelques variables météorologiques comme les précipitations et la température. Ceci se justifie avec le model linéaire (piezo/variables hydroclimatiques) de Sideradougou avec les stations météorologiques de Dedougou où les contributions les plus élevées sont celles du débit à Nwokuy et des précipitations d'une part et d'autre part les modèles linéaires de Nafona, Sideradougou avec les stations météorologiques de Banfora et Bobo Dioulasso où l'ETP (station de Bobo) et le Débit (station de Yendere) contribuent plus à l'explication de leurs fluctuations. Nous pensons que si le climat n'est pas le facteur prépondérant des fluctuations piézométrique dans notre zone d'étude, celles-ci résulteraient de la structure géologique de l'aquifère dans la région ou de la topographie de la zone. La plupart des piézomètres du sud ouest du Burkina sont implantés dans le système aquifère du sédimentaire (Dakouré, 2003), la presque totalité des aquifères de la zone du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso sont à nappes captives (Sauret et *al*, 2009) ce qui peut justifier nos résultats du point de vue hydrogéologique.

D'autre part les caractéristiques hydrodynamiques de la région (Dakouré ,2003) sont telles que suivant les formations lithologiques, la transmissivité est comprise entre $0,51 \times 10^{-4}$ et $8,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ et la perméabilité comprise entre $0,2 \times 10^{-4}$ et $2,6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ce qui une fois de plus justifie nos résultats. Nous pensons donc que nos résultats seraient meilleurs si nous associons

aux variables hydroclimatiques les caractéristiques hydrodynamiques de la zone ainsi que les paramètres topographiques.

D'un autre côté, sur plus de 67 piézomètres implantés sur le territoire national seulement 19% (Kone, 2000) sont dans les bassins versants du Mouhoun et de la Comoé. D'autre part les données piézométriques sont peu fiables. Ces deux facteurs peuvent aussi expliquer la médiocrité de nos résultats.

La surface piézométrique réagit fort différemment vis-à-vis des variations des débits d'alimentation et d'émergences, selon qu'elles se trouvent en régime libre, semi-captif ou captif. Dans une nappe libre, la liaison entre les fluctuations piézométriques et les variations de l'alimentation par la pluie efficace est étroite (Castany, 1982).

Dans une nappe captive, les variations de la surface piézométrique de la nappe sont fortes en raison de la faible valeur du coefficient d'emmagasinement et de l'absence d'une alimentation directe. En régime semi-captif, la nappe bénéficie du phénomène de la drainance, à partir des terrains de couverture semi-perméables, drainance qui lui permet de pallier des périodes de faible alimentation ou les excès de prélèvement.

Dans les bassins du sud ouest du Burkina Faso les coefficients d'emmagasinement sont compris entre 1,5 et $5,5 \cdot 10^{-4}$ (Gardin *et al.*, 2009), en raison de la structure de la nappe, ce qui justifie aussi la qualité de nos résultats du point de vue nature de l'aquifère.

Le tableau 1 de l'annexe A montre que les piézomètres de notre zone d'étude sont issus des formations cristallines (altérite schiste, grès, granite et gabbro) pour la plupart.

IV.5. Rupture de tendance dans les séries piézométriques

Dans un premier temps les données par station piézométrique ont été découpées en segments suivant le nombre de rupture. Nous avons ainsi pu avoir 5 segments pour la station de Nafona correspondant à 4 ruptures, 5 pour Naongo Yarce 10-12 correspondant à 4 ruptures, 2 segments pour Niangoloko et Dogona ayant chacune une rupture. Les stations de Sideradougou et Naongo Yarce 10-10 n'ont pas de rupture réelle, elles constituent donc un seul segment correspondant à la longueur réelle des données. Pour la station de Nafona 4 périodes présentent des tendances à la hausse et une à la baisse. La station de Naongo Yarce 10-12 comporte deux périodes ayant des tendances à la hausse et trois périodes à tendances

décroissantes. Niangoloko et Dogona ont chacune une période ayant une tendance à la hausse et une à la baisse. Sideradougou et Naongo Yarce 10-10 ont une tendance à la hausse. Le récapitulatif des résultats est présenté dans le tableau 3. La figure 11 illustre la tendance de Dogona pour la période de Janvier 1995-Décembre 2000. Le reste de figure est consigné en annexe B.

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des tendances pour les périodes de rupture dans les séries piézométriques

Station	Période	Tendance
Nafona	Janvier 1985-Mars 1991	à la hausse
	Avril 1991-Juillet 1994	à la hausse
	Août 1994-Février 1998	à la hausse
	Mars 1998-Mai 2000	à la baisse
	Juin 2000-Décembre 2003	à la hausse
Naongo Yarce 10-12	Janvier 1988-Avril 1990	à la baisse
	Mai 1990-Décembre 1994	à la baisse
	Janvier 1995-Juillet 1997	à la hausse
	Août 1997-Avril 2000	à la hausse
	Mai 2000-Décembre 1985	à la baisse
Niangoloko	Janvier 1985-Octobre 1992	à la baisse
	Novembre 1992-Décembre 2006	à la hausse
Dogona	Janvier 1990-Mars 1995	à la baisse
	Avril 1995-Décembre 2000	à la hausse
Sideradougou	Janvier 1985-Décembre 1986	à la hausse
Naongo Yarce 10-10	Janvier 1988-Décembre 1985	à la hausse

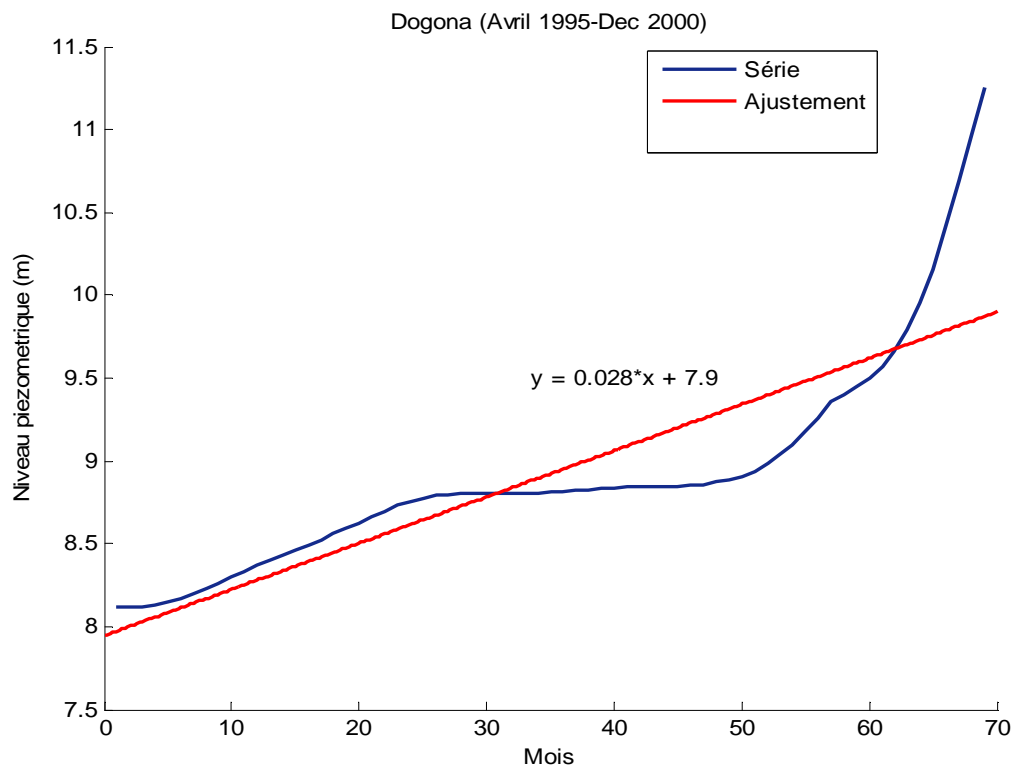


Figure 4 : Niveau piézométrique de Dogona (Avril 1995-Décembre 2000)

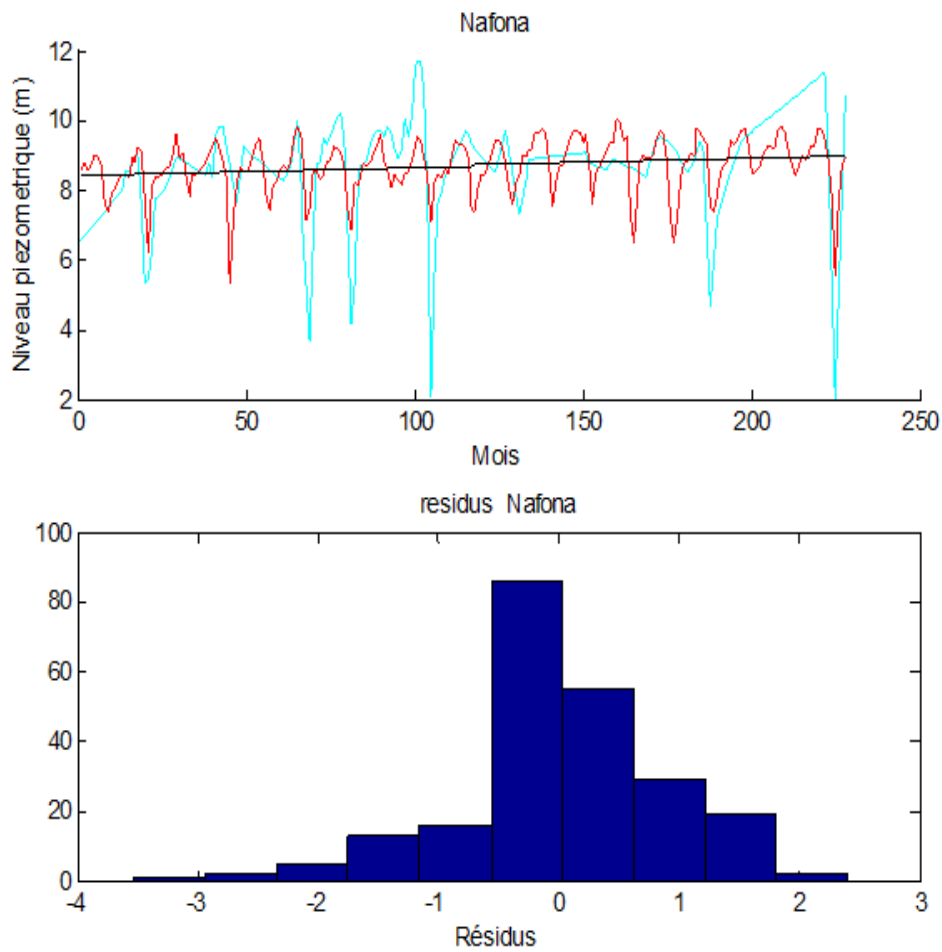


Figure 5 : Régression de Nafana (couleur verte), courbe d'ajustement (en rouge), droite de régression en fonction du temps (en noire) et histogramme des résidus (en bleue)

Il ressort de cette analyse que les niveaux piézométriques des bassins du Mouhoun et de la Comoé ne sont pas seulement expliqués par les variables explicatives choisies (coefficient de détermination variant entre 0,02 à 0,32) .

V. RECOMMANDATIONS

Les ressources en eau souterraines du Burkina Faso, notamment celles du sud ouest sont soumises aux aléas climatiques caractérisés par la décroissante persistante de la pluviométrie et la hausse des températures (Kone, 2000).

Le réseau piézométrique est un élément essentiel pour le suivi de l'évolution des ressources en eau souterraine ; l'organisation de ce réseau doit être une priorité pour les autorités. Bien que des efforts aient été consentis dans ce sens par la mise en place de plusieurs projets, le réseau reste encore très dispersé et mal suivi (DGRE, 2007).

Ainsi il s'avère nécessaire :

- d'organiser le suivi, soit par zone, soit par région ou par bassin versant, en mettant au niveau de chaque zone des stations témoins,
- multiplier les sites d'implantation des piézomètres,
- de former les releveurs sur la maîtrise des instruments de mesure, de les motiver et de les sensibiliser sur l'importance de la qualité du suivi. Pour alléger le travail à leur niveau nous proposons des relevés hebdomadaires.
- d'améliorer la collecte et le stockage des données,
- faire des bilans annuels au niveau de chaque unité de suivi, de valoriser les données par des graphiques et les valider pour des études ultérieures.

Parallèlement, vu les relations étroites entre le niveau des nappes, les écoulements de superficiels et le climat, les mêmes efforts devraient être entrepris pour les données hydroclimatiques.

VI. CONCLUSION

La variabilité des paramètres hydrologiques est un sujet d'une importance majeure pour la gestion des ressources en eau. En effet, dans plusieurs régions, la variabilité projetée des événements hydrologiques résulterait en des impacts plus importants sur les ressources en eau que sur les changements des conditions climatiques moyennes (IPCC, 1996). Toutefois, les prévisions entourant la variabilité des événements hydrologiques demeurent très incertaines et sujettes à débats. Les changements de débits de rivières observés sont généralement en accord avec les résultats des scénarios des MCG qui suggèrent des températures plus douces et une augmentation de l'évapotranspiration suite à un accroissement du CO₂. Toutefois, certaines tendances de débits de rivières pourraient être dues à un changement dans la gestion de la ressource, à des utilisations différentes du territoire ou des changements de pratiques agricoles et forestières qui pourraient augmenter les besoins en eau ou diminuer la capacité d'infiltration (IPCC, 2008).

Le Burkina Faso possède des potentialités en ressources hydrauliques, qui, selon le plan international couvre le seuil de pénurie (Kone, 2000) qui est de 1000 m³/habitant/an.

Le but de cette étude était d'évaluer les influences directes ou indirectes des variables hydroclimatiques sur le niveau piézométrique des bassins versant du Mouhoun et de la Comoé en faisant une étude de corrélation, des régressions linéaires multiples entre les variables piézométriques et hydroclimatiques et les tendances des périodes de rupture des séries piézométriques du sud ouest du Burkina Faso. Pour ce faire les données piézométriques hydrométriques et météorologiques de la dite région ont été étudiées de façon à évaluer leur liens, c'est-à-dire la relation entre le climat et les niveaux d'eau dans les aquifères.

Nous avons débuté ce travail par une critique des données à travers l'évaluation du taux de lacunes dans les séries afin de juger le pourcentage de données devant être obtenu par interpolation. Par la suite nous avons fait la statistique descriptive (moyenne, minimum, maximum, écartype, autocorrélation) de toutes les séries de données disponibles pour notre étude. Une fois des tendances visuelles établies, nous avons étudiés la normalité des séries à travers les courbes quantiles-quantiles et le test de Lilliefors, le test de Dickey-Fuller Augmenté nous a permis de déterminer le type de la non stationnarité. Une étude des corrélations croisées a été faite dans le but voir le degré de dépendance entre les séries de données des différentes stations, les tests statistiques de Student et de Man Kendall ont été

effectués à cet effet. La dernière partie de notre travail a été consacrée à l'étude de la régression linéaire multiple entre les séries de données piézométriques et hydroclimatiques et les tendances des périodes de rupture des séries piézométriques.

L'étude des corrélations croisées nous a montré une faible dépendance entre les données piézométriques et hydroclimatiques. Le test de Dickey-Fuller Augmenté a montré qu'à l'exception de deux de nos séries, toutes les autres avaient une non stationnarité de type déterministe, le test de Lilliefors a révélé que seules les séries piézométriques de Niangoloko, Sideragoudou et les séries de Vitesse moyenne de Ouahigouya étaient normalement distribuées. La régression linéaire multiple nous a montré que seules les variables hydroclimatiques ne suffisent pas pour expliquer le comportement de la nappe dans la région du sud ouest du Burkina Faso.

Dans la poursuite de cette étude, il serait important d'obtenir des informations additionnelles concernant l'environnement des stations étudiées. De nombreux facteurs sont responsables des fluctuations du niveau de la nappe dans une région. Si les puits sont influencés par différentes activités, il serait intéressant d'étudier la structure et le comportement hydrodynamique de la nappe aquifère et d'intégrer les résultats dans notre étude.

Ces travaux ont mis en évidence le fait qu'il est difficile d'étudier le comportement de la recharge pour de nombreuses raisons. Premièrement, les séries piézométriques des nappes étudiées ne devraient idéalement pas subir l'influence de pompage et devraient être à nappe libre. Deuxièmement, les séries disponibles doivent être longues (15ans est très peu) et les données fréquentes pour pouvoir effectuer des analyses statistiquement valables.

Ce genre d'étude appliquée est ambitieuse et comporte certaines limites. Cependant, des travaux concernant l'impact des changements climatiques sur notre environnement et particulièrement sur les ressources en eau douce doivent être effectués de manière à permettre une gestion durable à long terme de la ressource.

VII. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ouvrages et articles

Bi Tié Albert Goula, Issiaka Savane, Brou Konan, Vamoryba Fadika et Gnamien Béatrice Kouadio, 2006. Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'zo et N'zi en cote d'ivoire (Afrique tropicale humide), VertigO – La revue en sciences de l'environnement, vol7 no1, 12p.

Brou T., Servat E., et Paturel J.E., 1998. "Activités humaines et variabilité climatique: cas du sud Forestier ivoirien", IAHS, 252,365-373.

C. Rivard, J. Marion, Y. Michaud, S. Benhammane, A.Morin, R. Lefebvre et A. Rivera, 2003. Étude de l'impact potentiel des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine dans l'Est du Canada, Commission géologique du Canada, dossier public 1577, 39 pp. et annexes.

Dickey, D. A., and W. A. Fuller, 1979, "Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root." *Journal of the American Statistical Association*. Vol. 74, pp. 427–431.

G. Castany, 1982. Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), 233p.

Gardin N., Bieupoudé P. G., Kam A. M., Thomas L., Derouane J., Sauret E., Biaou A., Brouyère S., 2009. Utilisation d'une méthode physiquement basée pour cartographier la vulnérabilité intrinsèque des ressources en eau souterraine du bassin du Kou (Sud-Ouest du Burkina Faso), 2iE (Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement), Ouagadougou, Burkina Faso, 5p.

H. Karambiri, H. Yacouba, B. Ibrahim, J. Fotie, 2009. Impact du changement climatique sur les ressources en eau dans le bassin versant du nakambe (Burkina Faso), 2iE (Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement), Ouagadougou, Burkina Faso, 4p.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).2008.Climate change and water, IPCC Technical paper IV, <http://www.ipcc.ch/pdf/technical.../climate-change-water-en.pdf.htm>.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 3 volumes, <http://www.ipccngip.iges.or.jp/public/gl/invs1.htm>.

Johan D., DAKOURE D., 2006. Etude hydrogéologique et modélisation mathématique du système aquifère du bassin sédimentaire de Taoudeni au Burkina Faso. Programme VREO, Burkina Faso, 21p.

Kanohin Fulvie, Saley Mahaman Bachir, Savane Issiaka, 2009. Impacts de la Variabilité Climatique Sur Les Ressources en Eau et Les Activités Humaines en Zone Tropicale Humide: Cas de la Région de Daoukro en Côte D'ivoire, European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.26 No.2 (2009), pp.209-222.

Karim Traore : La télédétection comme moyen d'appui à la planification des ressources en eau (cas du Sud-Ouest du Burkina Faso) 1997 ,93PP.

Kendall, M.G. (1970) Rank Correlation Methods, Griffin

Kone Fatoumata, 2000. Suivi piézométrique au Burkina Faso. Bilan des 20 années d'observation, mémoire d'Ingénieur, Ecole Inter-états d'Ingénieurs de l'Equipement rural de Ouagadougou-Burkina Faso, 56p.

Lilliefors, H. W. "On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown." *Journal of the American Statistical Association*. Vol. 62, 1967, pp. 399–402.

Ministère de l'Economie et du Développement, 2008. Région de la boucle du Mouhoun : monographie de la région, [http://www.insd.bf/fr/IMG/pdf/Boucle Mouhoun_09_06.pdf.htm](http://www.insd.bf/fr/IMG/pdf/Boucle_Mouhoun_09_06.pdf.htm).

Ministère de l'Environnement et de l'Eau, Direction Générale de l'Hydraulique, 2001. État des lieux des ressources en eau du Burkina Faso et de leur cadre de gestion Version finale mai 2001, Direction Générale de l'Hydraulique du Burkina Faso, 252p.

Ricco Rakotomalala, 2008. Comparaison des populations, tests paramétriques, Université Lumière Lyon II, 109p.

Ricco Rakotomalala, 2009. Pratique de la régression linéaire multiple diagnostic et sélection des variables, Université Lumière Lyon II, 109p.

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

ANNEXES

ANNEXE A :

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

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

Tableau 3 : Corrélation multiples entre les variables des différentes stations de la zone d'étude

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	

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	

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

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	Banfara	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
Banfara					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	
Banfara	-0,61	-0,70	-0,66	-0,48	-0,75	
Ouahigouya	-0,65	-0,72	-0,64	-0,55	-0,71	
Pluie-HuMax	Boromo	Dedougou	Gaoua	Ouahigouya	Bobo	
Bobo	0,76	0,80	0,66	0,82	0,75	
Boromo	0,75	0,78	0,64	0,81	0,73	
Dedougou	0,72	0,78	0,62	0,81	0,71	
Gaoua	0,76	0,79	0,69	0,80	0,76	
Banfara	0,73	0,77	0,64	0,79	0,73	
Ouahigouya	-0,65	0,73	-0,64	0,80	-0,71	
Pluie-HuMin	Boromo	Dedougou	Gaoua	Ouahigouya	Bobo	
Bobo	0,87	0,88	0,84	0,88	0,86	
Boromo	0,87	0,88	0,82	0,88	0,85	
Dedougou	0,86	0,90	0,81	0,89	0,84	
Gaoua	0,85	0,85	0,85	0,83	0,84	
Banfara	0,85	0,85	0,82	0,85	0,84	
Ouahigouya	0,82	0,86	0,77	0,89	0,80	
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	
Banfara	-0,19	-0,23	-0,39	0,05	-0,46	
Ouahigouya	-0,29	-0,35	-0,45	-0,10	-0,52	
Pluie-Vent	Boromo	Dedougou	Gaoua	Ouahigouya	Bobo	
Bobo	-0,09	-0,32	0,06	0,06	0,01	
Boromo	-0,12	-0,32	0,07	0,07	0,03	
Dedougou	-0,12	-0,37	0,06	0,09	0,02	
Gaoua	-0,06	-0,30	0,06	0,11	0,05	
Banfara	-0,07	-0,32	0,04	0,04	0,01	
Ouahigouya	-0,16	-0,36	0,05	0,04	0,003	

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

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-HuMax	Boromo	Dedougou	Gaoua	Ouahigouya	Bobo
Bobo	-0,81	-0,80	-0,71	-0,83	-0,77
Boromo	-0,59	-0,54	-0,50	-0,68	-0,49
Dedougou	-0,74	-0,76	-0,63	-0,82	-0,68
Gaoua	-0,69	-0,67	-0,61	-0,73	-0,61
Ouahigouya	-0,43	-0,31	-0,34	-0,51	-0,33
ETP-HuMin	Boromo	Dedougou	Gaoua	Ouahigouya	Bobo
Bobo	-0,83	-0,83	-0,81	-0,83	-0,82
Boromo	-0,66	-0,63	-0,58	-0,73	-0,62
Dedougou	-0,79	-0,82	-0,74	-0,84	-0,77
Gaoua	-0,73	-0,73	-0,69	-0,74	-0,70
Ouahigouya	-0,49	-0,39	-0,39	-0,59	-0,44
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
ETP-Vent	Boromo	Dedougou	Gaoua	Ouahigouya	Bobo
Bobo	0,11	0,46	0,24	0,11	0,34
Boromo	0,41	0,53	0,33	0,20	0,21
Dedougou	0,27	0,75	0,28	0,22	0,26
Gaoua	0,12	0,48	0,36	0,10	0,20
Ouahigouya	0,37	0,53	0,41	0,44	0,37

Tableau 3 (suite) : Corrélations multiples entre les différentes 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
HuMin-Piezo	Sideradougou	Nafona	Naongo-Yarce 10-10	Naongo-Yarce 10-12	Dogona	Niangoloko
Bobo	-0,08	-0,15	-0,03	0,23	-0,14	0,41
Boromo	-0,13	-0,17	0,01	0,15	-0,13	0,44
Dedougou	-0,14	-0,17	0,00	0,16	-0,15	0,45
Gaoua	-0,02	-0,10	0,03	0,21	-0,10	0,46
Ouahigouya	-0,15	-0,16	-0,06	0,03	-0,32	0,44
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	
HuMax-Tmoy	Boromo	Dedougou	Gaoua	Ouahigouya	Bobo	
Bobo	0,05	0,05	-0,24	0,41	-0,29	
Boromo	-0,13	-0,12	-0,40	0,25	-0,44	
Dedougou	-0,13	-0,17	-0,32	0,19	-0,46	
Gaoua	0,05	0,05	-0,28	0,40	-0,25	
Ouahigouya	-0,26	-0,28	-0,51	0,06	-0,56	
HuMax-Vent	Boromo	Dedougou	Gaoua	Ouahigouya	Bobo	
Bobo	-0,08	-0,42	0,05	0,01	-0,02	
Boromo	-0,19	-0,47	-0,07	-0,04	-0,10	
Dedougou	-0,26	-0,44	-0,01	0,05	0,01	
Gaoua	-0,19	-0,50	-0,02	-0,02	-0,06	
Ouahigouya	-0,23	-0,49	-0,07	-0,05	-0,09	

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

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
Vent-Piezo	Sideradougou	Nafona	Naongo-Yarce10-10	Naongo-Yarce10-12	Dogona	Niangoloko
Bobo	0,55	0,42	0,40	0,25	0,47	0,34
Boromo	0,71	0,48	0,21	0,22	0,59	0,15
Dedougou	0,60	0,47	0,13	0,21	0,54	0,14
Gaoua	0,66	0,57	0,33	0,16	0,49	0,37
Ouahigouya	0,56	0,45	0,22	0,17	0,46	0,21
HuMax-Piezo	Sideradougou	Nafona	Naongo-Yarce10-10	Naongo-Yarce10-12	Dogona	Niangoloko
Bobo	-0,10	-0,12	-0,01	0,22	-0,15	0,34
Boromo	-0,24	-0,19	-0,08	0,11	-0,26	0,30
Dedougou	-0,22	-0,22	-0,06	0,12	-0,23	0,37
Gaoua	-0,18	-0,13	-0,10	0,02	-0,32	0,30
Ouahigouya	-0,21	-0,20	-0,11	0,00	-0,36	0,36
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	
HuMin-Tmoy	Boromo	Dedougou	Gaoua	Ouahigouya	Bobo	
Bobo	-0,12	-0,15	-0,38	0,22	-0,45	
Boromo	-0,17	-0,20	-0,42	0,16	-0,49	
Dedougou	-0,22	-0,28	-0,38	0,19	-0,52	
Gaoua	-0,02	-0,04	-0,32	0,32	-0,37	
Ouahigouya	-0,32	-0,37	-0,53	-0,05	-0,60	

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

HuMin-Vent	Boromo	Dedougou	Gaoua	Ouahigouya	Bobo
Bobo	-0,12	-0,41	0,05	0,08	0,00
Boromo	-0,15	-0,42	0,01	0,05	-0,01
Dedougou	-0,23	-0,45	0,04	0,09	0,04
Gaoua	-0,06	-0,38	0,07	0,09	0,02
Ouahigouya	-0,24	-0,49	-0,04	-0,02	-0,07
Tmoy-Vent	Boromo	Dedougou	Gaoua	Ouahigouya	Bobo
Bobo	0,35	0,31	0,46	0,18	0,34
Boromo	0,43	0,26	0,57	0,26	0,40
Dedougou	0,43	0,30	0,52	0,29	0,38
Gaoua	0,36	0,29	0,47	0,15	0,30
Ouahigouya	0,40	0,15	0,50	0,26	0,38

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
Vent-Debit	Boromo	Nwukuy	Banzo	Dapola	Ouessa	Samendeni	Bougouriba	Fourkoura	Folonzo	Yendere
Bobo	-0,26	-0,39	-0,08	-0,28	-0,28	-0,29	-0,29	-0,23	-0,31	-0,26
Boromo	-0,43	-0,60	-0,37	-0,45	-0,39	-0,48	-0,43	-0,43	-0,38	-0,41
Dedougou	-0,44	-0,59	-0,53	-0,53	-0,54	-0,63	-0,58	-0,58	-0,50	-0,56
Gaoua	-0,18	-0,47	-0,12	-0,26	-0,21	-0,28	-0,32	-0,26	-0,33	-0,27
Ouahigouya	-0,25	-0,34	-0,26	-0,25	-0,22	-0,30	-0,22	-0,33	-0,24	-0,26
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

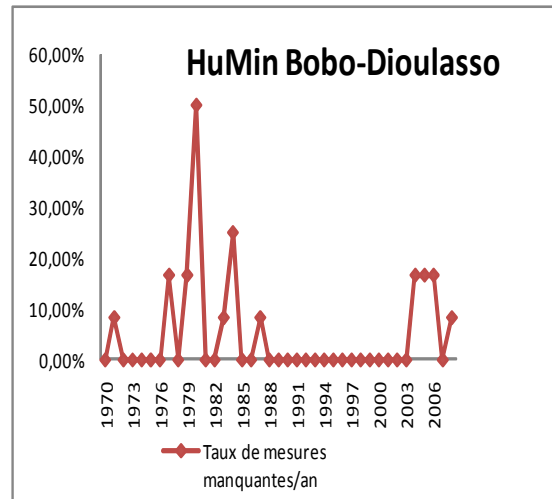
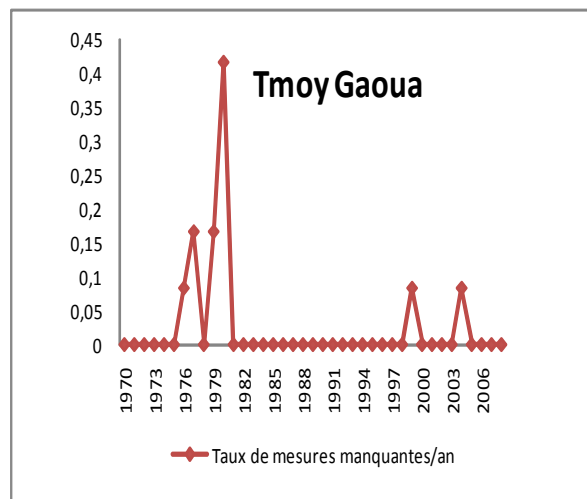
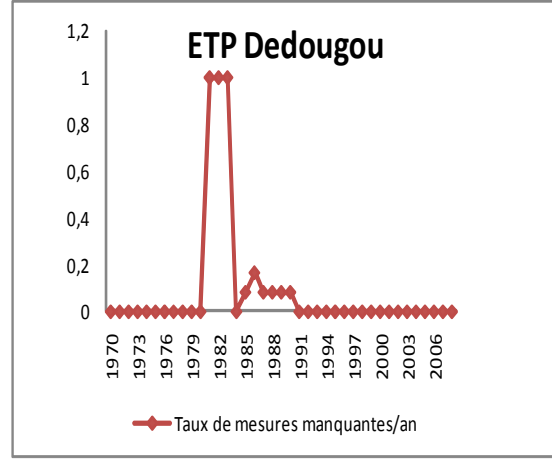
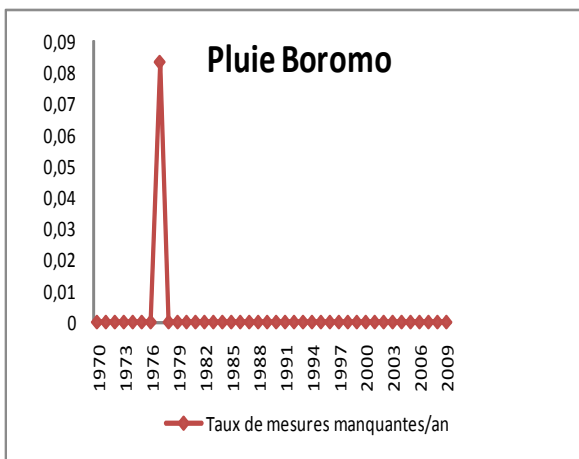
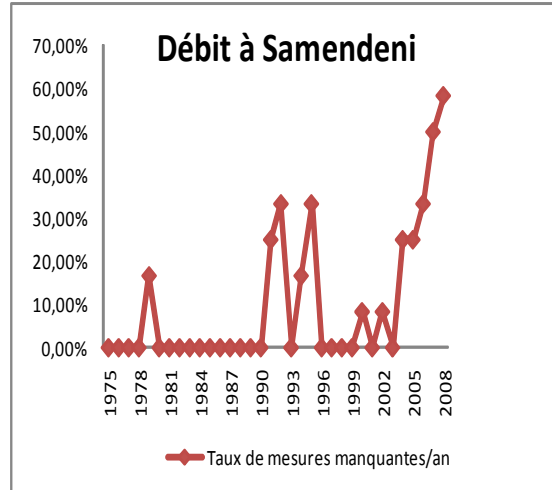
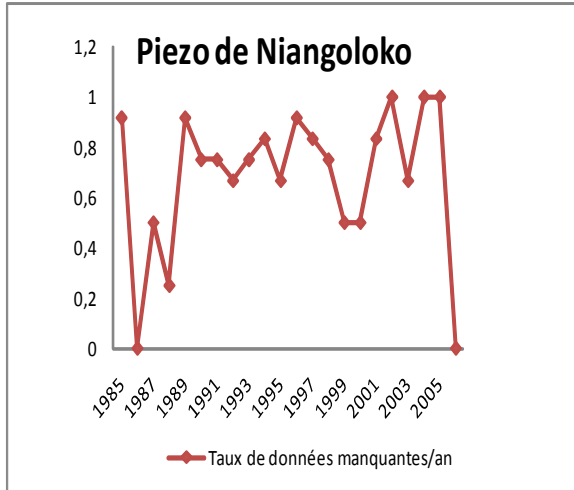
Tableau 3 (suite) : Corrélations multiples entre les différentes de la zone d'étude

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
Banfara	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
ETP -Debit	Boromo	Nwukuy	Banzo	Dapola	Ouessa	Samendeni	Bougouriba	Fourkoura	Folonzo	Yendere
Bobo	-0,51	-0,22	-0,50	-0,53	-0,56	-0,60	-0,43	-0,59	-0,46	-0,49
Boromo	-0,51	-0,33	-0,54	-0,49	-0,52	-0,56	-0,38	-0,55	-0,39	-0,45
Dedougou	-0,53	-0,27	-0,58	-0,56	-0,58	-0,64	-0,46	-0,63	-0,48	-0,53
Gaoua	-0,45	-0,24	-0,49	-0,46	-0,48	-0,53	-0,36	-0,55	-0,40	-0,43
Banfara	-0,48	-0,33	-0,51	-0,45	-0,50	-0,53	-0,36	-0,52	-0,37	-0,42
Ouahigouya										
HuMax -Debit	Boromo	Nwukuy	Banzo	Dapola	Ouessa	Samendeni	Bougouriba	Fourkoura	Folonzo	Yendere
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
HuMin -Debit	Boromo	Nwukuy	Banzo	Dapola	Ouessa	Samendeni	Bougouriba	Fourkoura	Folonzo	Yendere
Bobo	0,52	0,22	0,55	0,58	0,62	0,65	0,53	0,62	0,51	0,56
Boromo	0,56	0,23	0,58	0,63	0,66	0,69	0,55	0,63	0,53	0,58
Dedougou	0,57	0,21	0,59	0,64	0,67	0,70	0,58	0,66	0,53	0,61
Gaoua	0,48	0,18	0,52	0,55	0,59	0,61	0,49	0,58	0,48	0,52
Ouahigouya	0,64	0,25	0,64	0,67	0,72	0,75	0,56	0,70	0,55	0,64
ETP-Piezo	Sideradougou		Nafona	Naongo-Yarce10-10		Naongo-Yarce10-12		Dogona	Niangoloko	
Bobo	0,36		0,33	0,17		-0,05		0,34	-0,25	
Boromo	0,53		0,36	0,16		0,01		0,42	-0,08	
Dedougou	0,47		0,38	0,08		0,04		0,42	-0,17	
Gaoua	0,49		0,42	0,17		-0,03		0,48	-0,21	
Ouahigouya	0,59		0,42	0,19		0,09		0,46	-0,05	

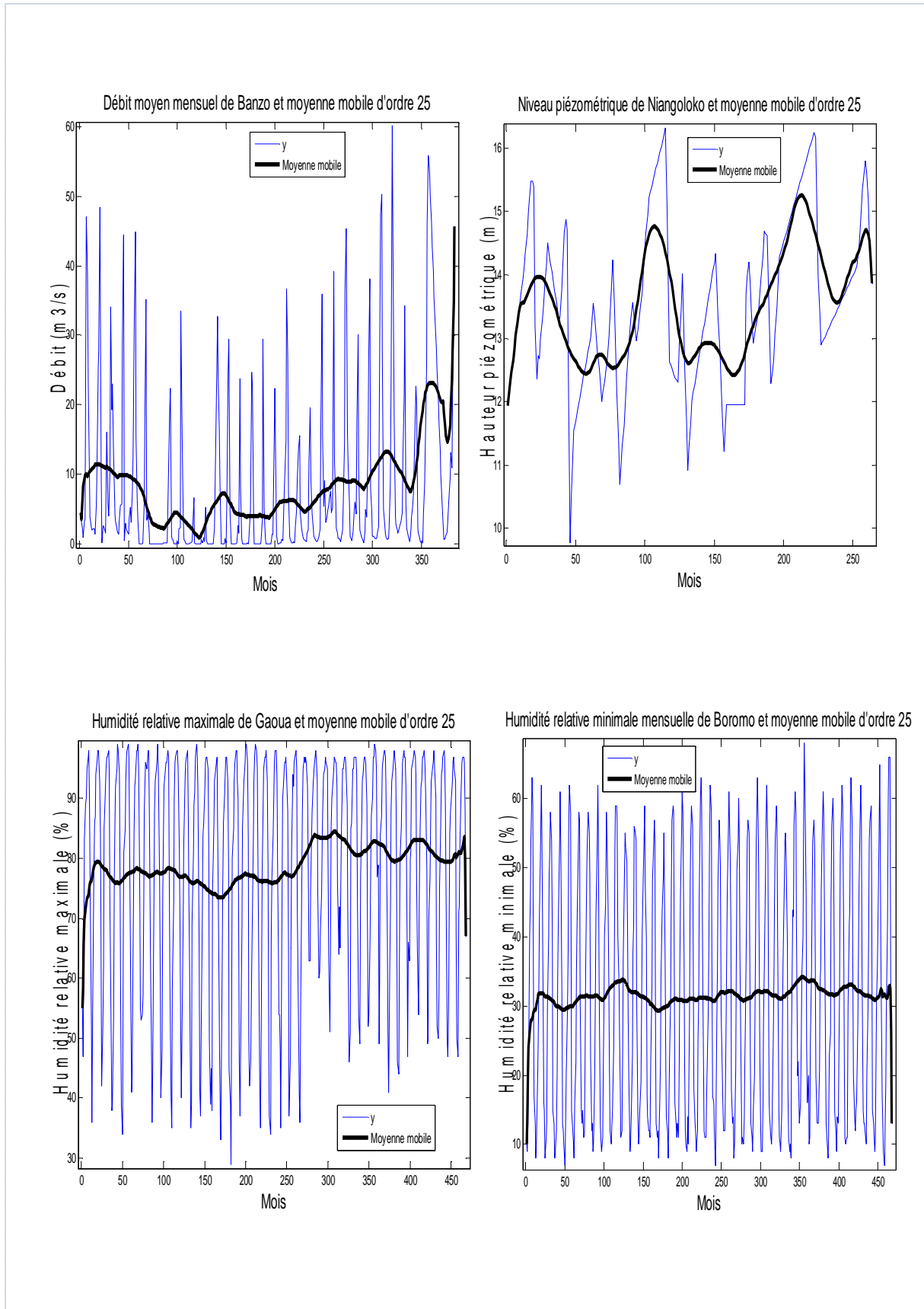
ANNEXES B :

- Evolution du taux de lacune pour quelques stations**
- Représentation graphique des courbes des séries de données piézométriques et hydroclimatiques**
- QQplot des séries de données piézométriques et hydroclimatiques**
- Carte des individus (ACP)**
- Figures des simulations**
- Rupture de tendance dans les séries piézométrique**

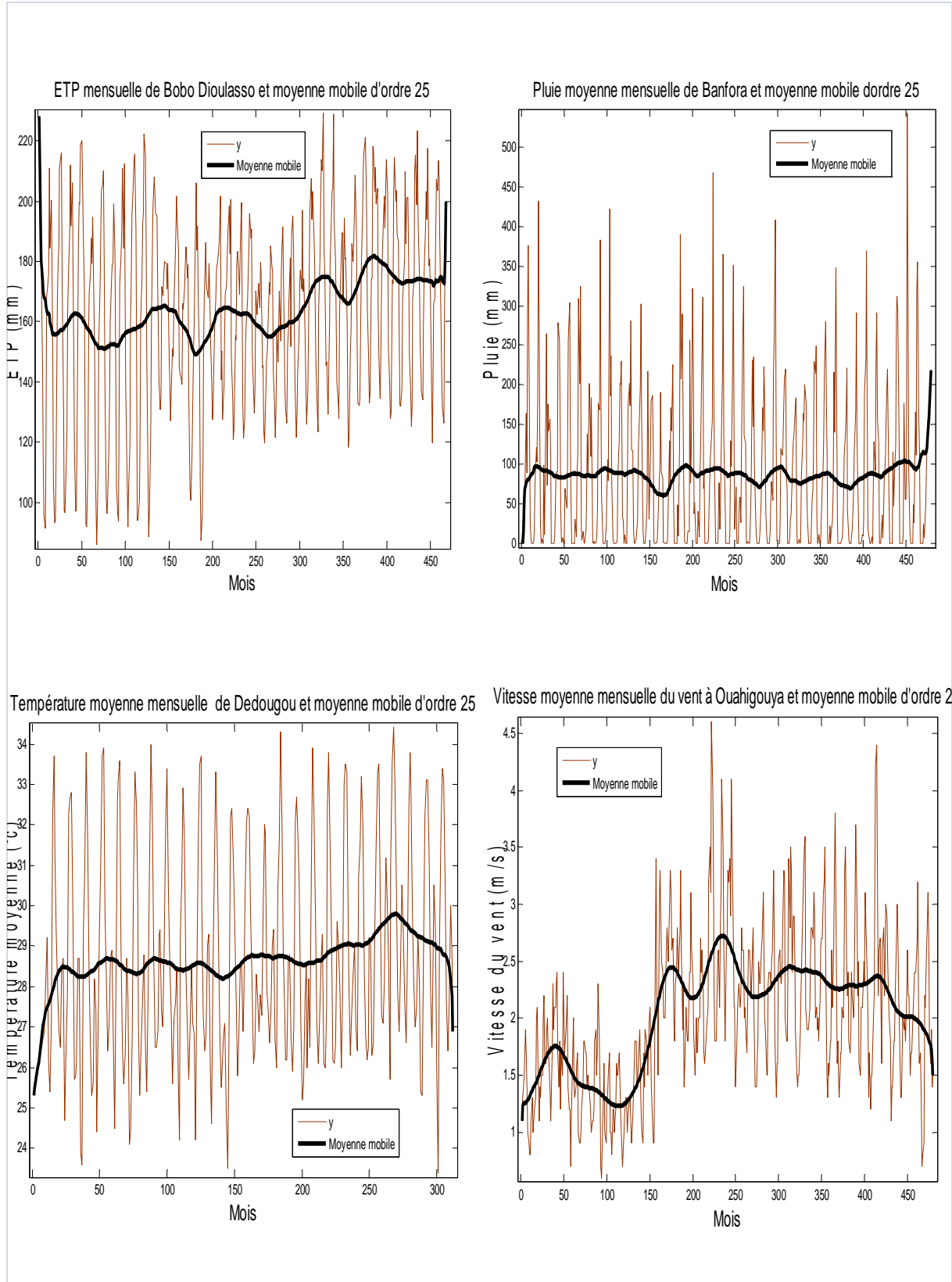
Evolution du taux de mesure manquante pour quelques stations



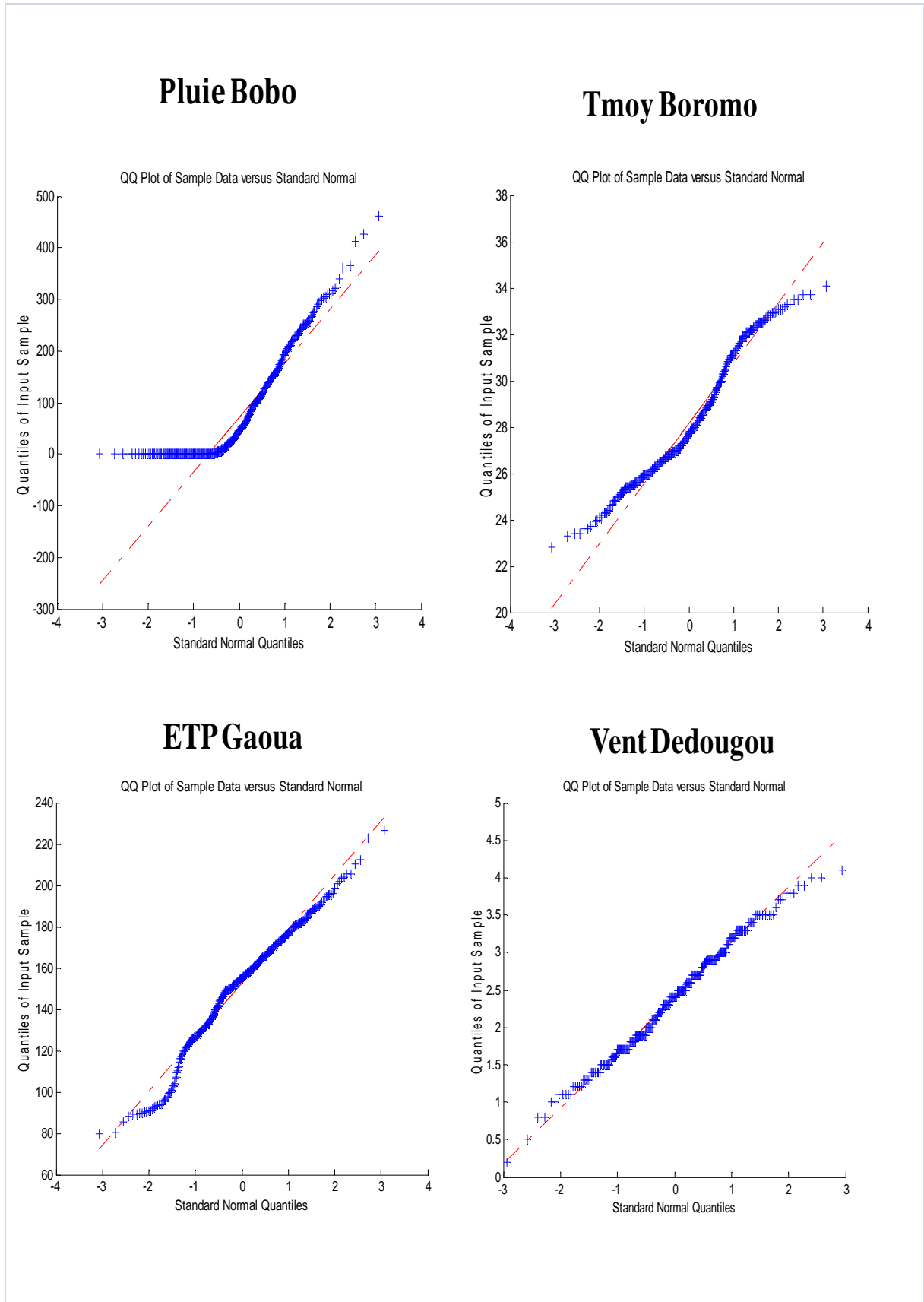
Courbes de séries piézométriques et hydroclimatiques



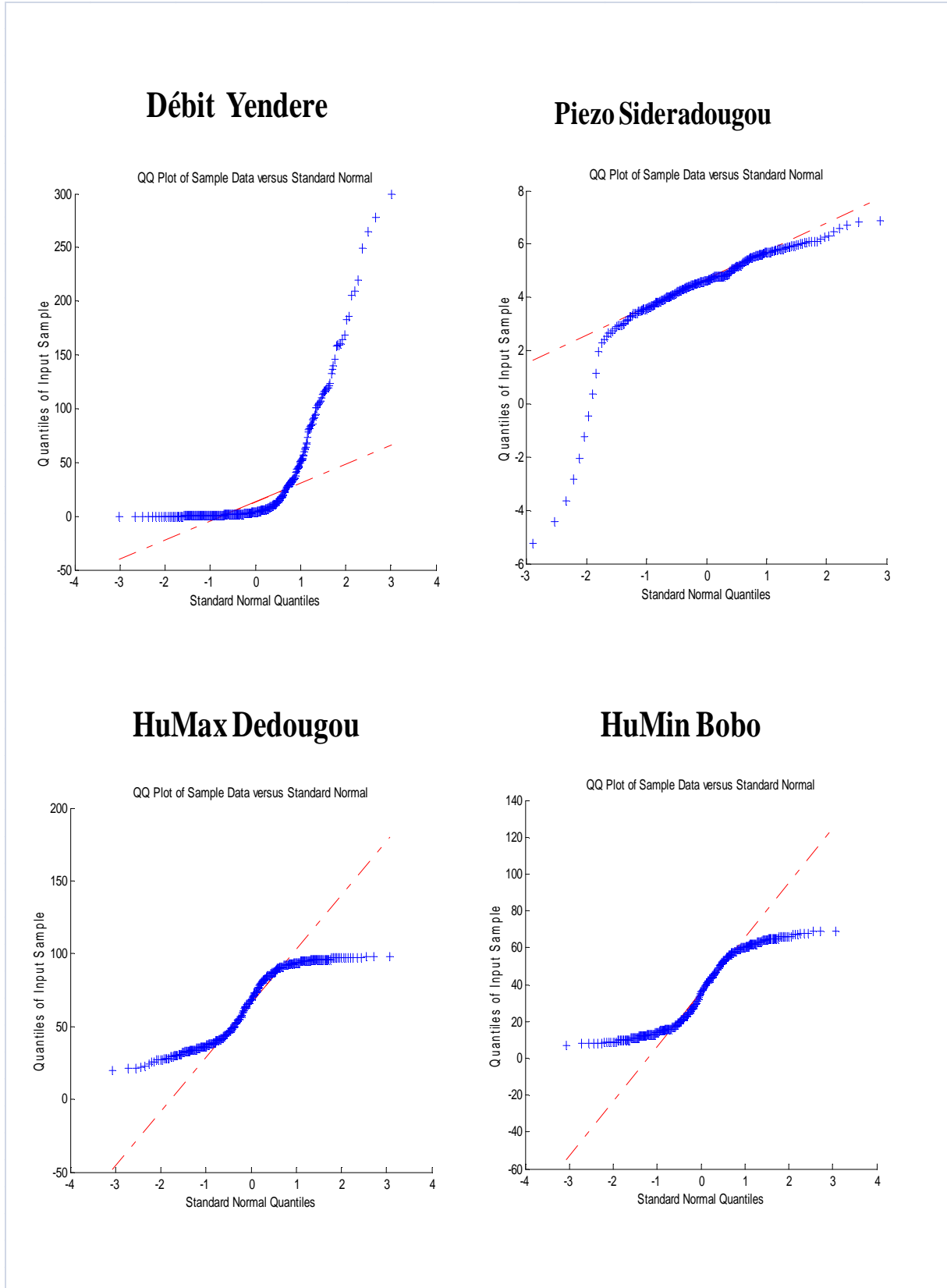
Courbes de séries piézométriques et hydroclimatiques (suite)



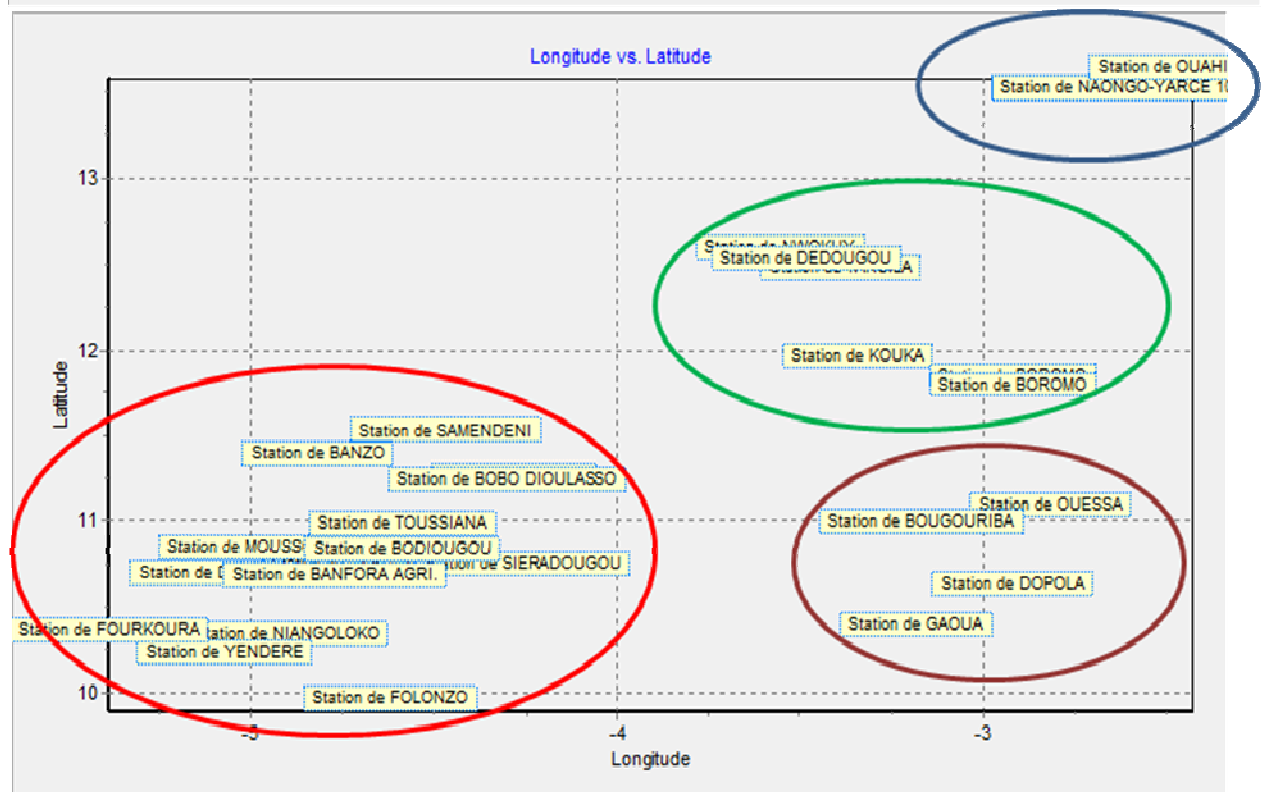
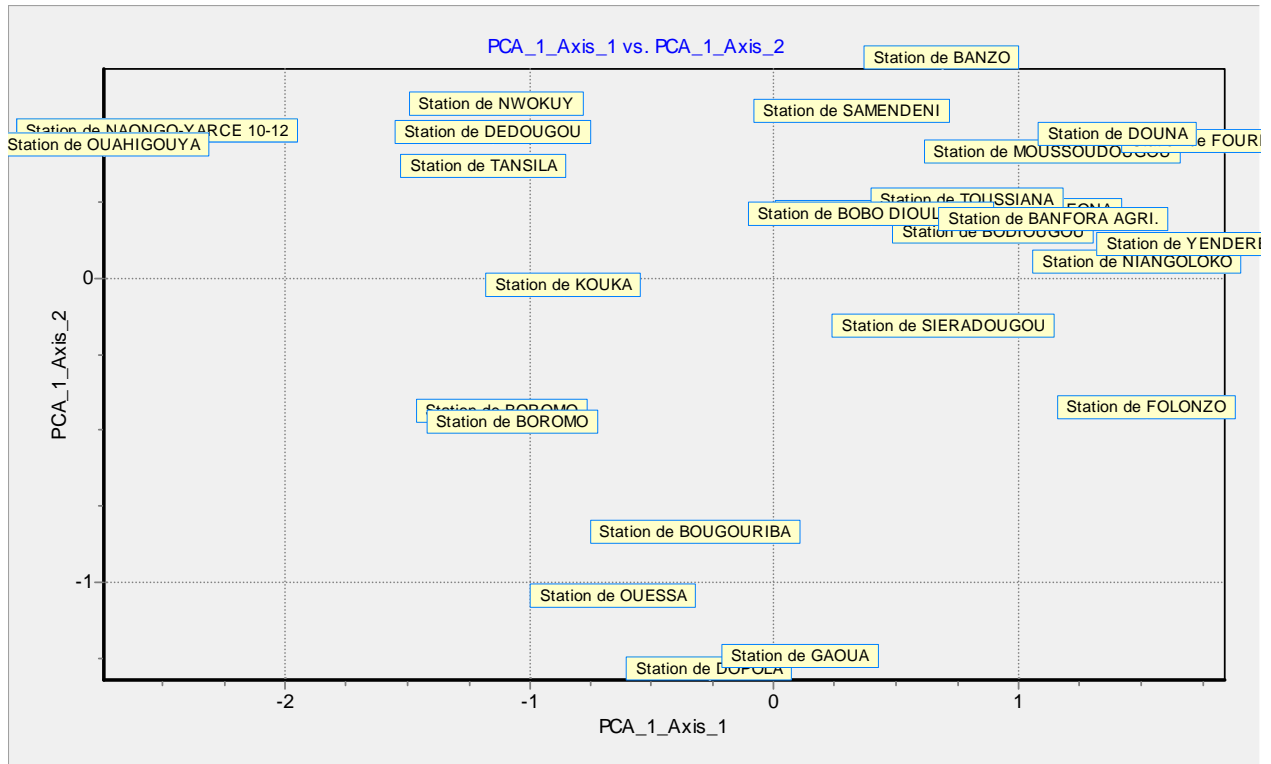
QQplot des séries piézométriques et hydroclimatiques



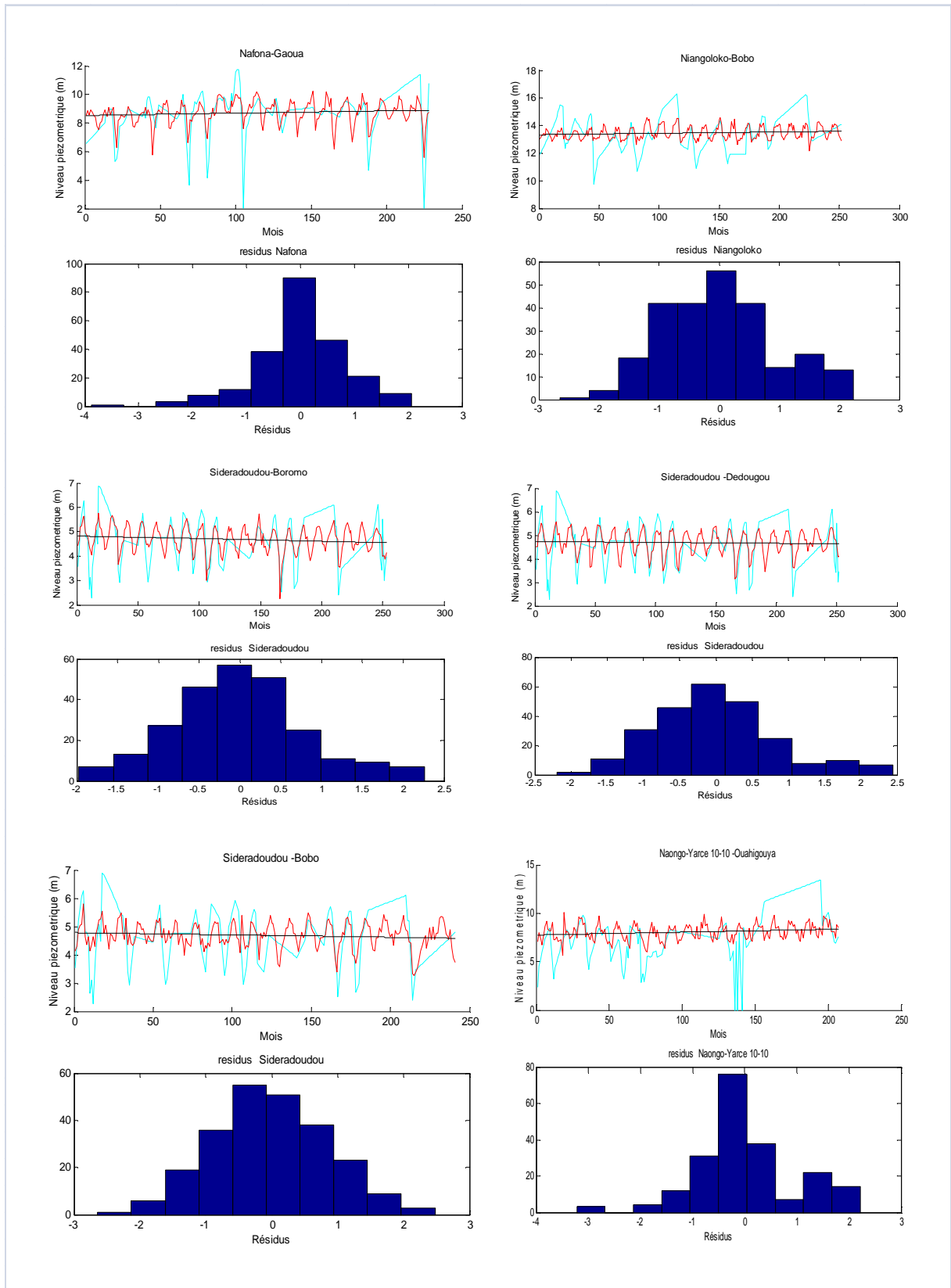
QQplot des séries piézométriques et hydroclimatiques (suite)



Résultats de l'analyse en composante principale : Carte des individus (stations)



Figures de simulations du model de regression lineaire multiple



Rupture de Tendance dans les séries piézométriques

