



**ANALYSE DE LA VARIABILITE HYDROLOGIQUE DU MOUHOUN ET IMPACT
SUR LA GESTION DU RESERVOIR DE LERY AU BURKINA FASO EN SAISON
SECHE A L'HORIZON 2030**



**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
FILIERE : INFRASTRUCTURES ET RESEAUX HYDRAULIQUES
OPTION : EAU AGRICOLE**

Présenté et soutenu publiquement le 03 Novembre 2017 par :

TIEMTORE Issiaka

Travaux dirigés par :

- **Dr. Dial NIANG**, Enseignant chercheur au LEAH/2iE
- **Bouraima KOUANDA**, Doctorant au LEAH/2iE
- **Dr. Justine YOFE/TIROGO**, encadreur externe à la DEIE/DGRE

Jury d'évaluation :

Président : Dr. Amadou KEITA

Membres et correcteurs :

- Dr. Tazen FOWE
- Moussa FAYE

Promotion [2016/2017]

CITATION

« Aucune science de la terre n'est mieux que l'hydrologie orientée vers les objectifs d'un monde meilleur »
OMM, 1977

REMERCIEMENTS

Je voudrais témoigner ma gratitude à tous ceux qui de loin comme de près ont contribué à la réalisation de ce mémoire de fin d'études. Sans être sélectif, je voudrais exprimer mes sincères remerciements à:

- Dr. Dial NIANG pour sa disponibilité, ses orientations et tout le soutien qu'il m'a témoigné durant la période de stage. Au-delà du travail, il est très ouvert et très attentif aux points de vue des autres malgré leur statut d'apprenant. Je tiens également à remercier son assistant, le doctorant KOUANDA Bouraïma, précédemment agent au ministère de l'eau du Burkina Faso pour ses appuis et propositions dans la conduite de ce travail ;
- M. Pascal NAKOHOUM, Directeur des Etudes et de l'Information sur l'Eau (DEIE) du Burkina Faso, pour m'avoir permis d'effectuer le stage dans son département ;
- Dr. Justine YOFE/TIROGO mon encadreur externe à la DEIE. Je retiens de cette collaboration toute son attention, sa disponibilité et ses orientations pour parvenir à l'aboutissement de ce document. Etant agent de la DEIE, elle a également contribué à donner des compléments d'informations sur l'état de la gestion de l'eau dans le bassin du Mouhoun ;
- M. COMPAORE Emmanuel de l'Autorité de Mise en valeur de la Vallée du Sourou (AMVS), M. ZIBA du centre ONEA de Boromo et la Direction Générale de l'Agence de l'Eau du Mouhoun (DGAEM) pour leur collaboration et pour avoir témoigné un grand intérêt sur les résultats de cette étude dans la suite de la mise en œuvre de leurs activités respectives.

Je ne saurais terminer sans remercier tout le personnel de la DEIE pour ces bons moments du stage passés ensemble.

RÉSUMÉ

Depuis la réalisation du barrage-vannes de Léry et du canal de dérivation de la rivière Mouhoun dans le réservoir de Léry au Burkina Faso, la dynamique hydrologique du Mouhoun est le reflet de l'effet cumulé de ces aménagements et de la variabilité climatique. Ces effets ont sans doute un impact sur l'exploitation du réservoir de Léry au regard des besoins en eau de plus en plus croissants. C'est dans ce contexte que cette étude a été initiée en vue de s'orienter vers la connaissance et la gestion consensuelle d'une ressource limitée, et parfois insuffisante, pour satisfaire de manière équitable des usages compétitifs. Pour mener à bien cette recherche, une caractérisation hydrologique du Mouhoun sur une série hydropluviométrique de plus de 60 ans a été effectuée. L'exploitation de ces données a permis de simuler l'exploitation du réservoir de Léry à l'horizon 2030.

Les résultats montrent avant la mise en exploitation du barrage en 1976, une baisse d'environ 50% de la pluviométrie entraînant une diminution des écoulements annuels entre 40 et 50% au début des années 1970. Après cette période, une augmentation des écoulements a été constatée au début des années 1990 en amont du barrage et sur une grande partie de la décennie 2000 en aval. Ce retard dans la hausse des écoulements en aval est certainement dû en grande partie aux lâchers du barrage. L'analyse de l'exploitation du réservoir de Léry en année décennale sèche indique un risque de pénurie d'eau à l'horizon 2030 pendant la saison sèche.

Mots Clés :

- 1. Variabilité climatique**
- 2. Barrage de Léry**
- 3. Rivière du Mouhoun**
- 4. Gestion des ressources en eau**
- 5. Burkina Faso**

ABSTRACT

Since the development of the Léry dam with floodgates and the Mouhoun river derivation canal into the Léry reservoir in Burkina, the Mouhoun hydrological dynamic is the result of accumulated effect of these facilities and the climatic variability. These effects probably have an impact over the Léry reservoir exploitation combined with the increasing water needs. It is in this context that this survey has been initiated in order to move toward the knowledge and the consensual management of a limited resource, and sometimes insufficient, to satisfy the competitive uses equitably. To carry through this research, the Mouhoun hydrological characterization based on a 60-years-set of rainfall and discharges has been done. These data allowed to simulate the Léry reservoir by the year of 2030.

The results show before the Léry dam achieved in 1976, a decrease about 50% of the rainfall causing a reduction of the annual discharges between 40 and 50% in the beginning of the years 1970. After this period, an increase of the annual discharges has been noted in the beginning of the years 1990 upstream of the dam and in a big part of the decade 2000 downstream. This delay in the annual discharges downstream rise is certainly due to the dam water release. The analysis of the Léry reservoir exploitation in dry decennial year indicates a risk of water shortage by the year 2030 during the dry season.

Keywords :

- 1. climatic variability**
- 2. Léry dam**
- 3. Mouhoun river**
- 4. water resources management**
- 5. Burkina Faso**

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|-------------|
| CITATION..... | I |
| REMERCIEMENTS..... | II |
| RÉSUMÉ..... | III |
| ABSTRACT | IV |
| TABLE DES MATIERES | V |
| LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS..... | VII |
| LISTE DES TABLEAUX | VIII |
| LISTE DES FIGURES..... | IX |
| I. INTRODUCTION | 1 |
| II. PRESENTATION DE LA ZONE D’ETUDE | 3 |
| 2.1 CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA ZONE D’ÉTUDE | 3 |
| 2.1.1 Environnement biophysique..... | 3 |
| 2.1.2 Inventaire des aménagements hydrauliques structurants sur le Mouhoun | 9 |
| 2.2 BARRAGE DE LÉRY | 10 |
| 2.2.1 Historique du fonctionnement du complexe Mouhoun Sourou | 10 |
| 2.2.2 Caractéristiques physiques du réservoir de Léry..... | 11 |
| 2.2.2.1 <i>DONNÉES TOPOGRAPHIQUES ET CLIMATIQUES</i> | 11 |
| 2.2.2.2 <i>DONNÉES GÉOLOGIQUES</i> | 12 |
| 2.2.3 Usages de l’eau en amont du barrage de Léry | 12 |
| 2.2.3.1 <i>BESOINS AGRICOLES</i> | 12 |
| 2.2.3.2 <i>BESOINS PASTORAUX</i> | 13 |
| 2.2.4 Gestion des vannes | 13 |
| 2.3 SITUATION DES BESOINS EN EAU EN AVAL DU BARRAGE DE LÉRY ... | 15 |
| 2.3.1 Usages de l’eau en aval du barrage de Léry..... | 15 |
| 2.3.1.1 <i>PRISE D’EAU DE TÉNADO</i> | 15 |
| 2.3.1.2 <i>PRISE D’EAU DE BOROMO</i> | 15 |
| 2.3.1.3 <i>PRISE D’EAU DE POURA</i> | 15 |
| 2.3.2 Débit écologique | 16 |
| 2.3.3 Débits objectifs aux sites de prélèvement des eaux brutes du Mouhoun | 16 |
| III. MATERIEL ET METHODE..... | 17 |
| 3.1 <i>DONNÉES</i> | 17 |
| 3.1.1 <i>Données</i> | 17 |
| 3.1.2 <i>Critique et comblement des données</i> | 17 |
| 3.2 <i>MÉTHODE</i> | 18 |

| | |
|--|------------|
| 3.2.1 Méthodologie | 18 |
| 3.2.2 Analyse de la variabilité hydrologique et pluviométrique du bassin du Mouhoun..... | 19 |
| 3.2.2 Etude du fonctionnement du réservoir du Sourou..... | 22 |
| IV. RESULTATS | 24 |
| 4.1 ANALYSE DE LA VARIABILITÉ HYDROLOGIQUE DU MOUHOUN..... | 24 |
| 4.1.1 Analyse des indices centrés réduits de modules..... | 24 |
| 4.1.2 Analyse de la stationnarité des échantillons de modules | 25 |
| 4.1.3 Analyse de la stationnarité des séries de pluies annuelles | 27 |
| 4.2 ETUDE DU BILAN DE FONCTIONNEMENT DE LA RETENUE DU SOUROU | 27 |
| 4.2.1 Variation saisonnière du niveau de remplissage de la retenue du Sourou | 27 |
| 4.2.2 Contribution des lâchers d'eau des vannes de Léry sur le Mouhoun inférieur | 28 |
| 4.2.3 Simulation de l'exploitation du réservoir de Léry à l'horizon 2030 en saison sèche | 29 |
| V. DISCUSSIONS | 34 |
| 5.1 IMPACT DU CLIMAT ET DU BARRAGE DE LÉRY SUR LE MOUHOUN..... | 34 |
| 5.2 EXPLOITATION DU RÉSERVOIR DE LÉRY À L'HORIZON 2030 | 36 |
| VI. CONCLUSION..... | 38 |
| VII. OUVRAGES CONSULTES | I |
| VIII. ANNEXES..... | III |

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

| | | |
|--------|---|---|
| AEM | : | Agence de l'Eau du Mouhoun |
| AMVS | : | Autorité de mise en valeur de la vallée du Sourou |
| APD | : | Avant-Projet Détaillé |
| DEIE | : | Direction des Etudes et de l'Information sur l'Eau |
| DGAEM | : | Direction Générale de l'Agence de l'Eau du Mouhoun |
| DGRE | : | Direction Générale des Ressources en Eau |
| GIRE | : | Gestion Intégrée des Ressources en Eau |
| IRD | : | Institut de Recherche et de Développement |
| MAHRH | : | Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des ressources Halieutiques |
| MCA | : | Millenium Challenge Account |
| ONEA | : | Office National de l'Eau et de l'Assainissement |
| SDAGE | : | Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux |
| SIEREM | : | Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisation |
| UBT | : | Unité de Bétail Tropical |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Zones climatiques du bassin national du Mouhoun | 4 |
| Tableau 2. Liste des stations hydrométriques utilisées dans l'étude | 7 |
| Tableau 3. Estimation des besoins en eau dans la vallée du Sourou..... | 13 |
| Tableau 4. Besoins en eau en Mm ³ pour le pâturage à l'horizon 2030 dans la vallée du Sourou | 13 |
| Tableau 5. Qualité des données hydrométriques de l'étude..... | 17 |
| Tableau 6. Détection de la première et deuxième rupture des séries de modules des stations étudiées : test de Pettitt et Lee et Heghinian | 26 |
| Tableau 7. Segmentation des séries de modules en amont et en aval du barrage de Léry..... | 26 |
| Tableau 8. Détection de la première et deuxième rupture des séries de pluies annuelles des bassins versants : test de Pettitt et Lee et Heghinian..... | 27 |
| Tableau 9. Comparaison entre le débit lâché, le débit au niveau des stations de pompage et le débit objectif..... | 29 |
| Tableau 12. Simulation de la retenue du Sourou en année quinquennale sèche sous le scénario 1 | 30 |
| Tableau 13. Simulation de la retenue du Sourou en année décennale sèche sous le scénario 1 | 31 |
| Tableau 14. Simulation de la retenue du Sourou en année quinquennale sèche sous le scénario 2..... | 32 |
| Tableau 15. Simulation de la retenue du Sourou en année décennale sèche sous le scénario 2 | 33 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1. Localisation du bassin du Mouhoun au Burkina Faso | 3 |
| Figure 2. Zones climatiques du bassin national du Mouhoun (1970-2000)..... | 4 |
| Figure 3. Réseau hydrographique du bassin du Mouhoun | 7 |
| Figure 4. Localisation des stations hydrométriques étudiées dans le bassin du Mouhoun | 8 |
| Figure 5. Réservoir d'eau en amont du barrage de Léry | 9 |
| Figure 6. Vannes du barrage de Léry (vue de l'aval)..... | 10 |
| Figure 7. Complexe Mouhoun Sourou et canal de dérivation (Tecsult, 2010) | 11 |
| Figure 8. Cuvette du réservoir du barrage de Léry enherbée | 12 |
| Figure 9. Cote d'alerte, des vannes de Léry et des prises d'eau (source : DGRE, 2012) | 14 |
| Figure 10. Indices centrés réduits des modules du Mouhoun à Samendéni..... | 24 |
| Figure 11. Indices centrés réduits des modules du Mouhoun à Boromo | 24 |
| Figure 12. Indices centrés réduits des modules du Mouhoun à Dapola..... | 25 |
| Figure 13. Evolution interannuelle du niveau d'eau moyen mensuel de la retenue du Sourou (1985-2016)..... | 28 |
| Figure 14. Soutien des lâchers d'eau à l'écoulement en aval du barrage de Léry (1985-2004) | 28 |

I. INTRODUCTION

La rivière Mouhoun est l'un des cours d'eau les plus importants du Burkina Faso en termes de débit écoulé, de longueur et de superficie drainée. L'un de ses affluents les importants le Sourou prend sa source au Mali. Fort du potentiel agricole et des ressources en eau dont regorge la vallée de cette rivière Sourou dans sa partie burkinabè, le gouvernement du Burkina Faso a entrepris un programme d'aménagements hydroagricoles basé sur la réalisation du barrage de Léry équipée de vannes en 1976 puis d'un canal qui dérive les eaux du Mouhoun dans ledit réservoir en 1984. Les vannes dudit barrage permettent de lâcher des débits minima réservés de l'ordre de 3 et 4 m³/s pendant la saison sèche dans le but d'assurer les besoins en eau en aval du barrage de Léry. Ainsi, en fonction du réglage des vannes, une bipartition s'établit entre l'eau qui va vers la retenue et celle qui rejoint l'écoulement en aval. La gestion du réservoir de Léry soulève ainsi la problématique de son influence dans la dynamique de l'hydraulicité du Mouhoun dans un contexte marqué par la variabilité et le changement climatique en Afrique de l'ouest et centrale des années 1970.

Bien que la bibliographie sur le bassin du Mouhoun soit abondante notamment avec les études englobant le processus de mise en œuvre de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) depuis les années 90, celle sur la caractérisation de la dynamique hydrologique du Mouhoun depuis la réalisation des aménagements hydrauliques dans le contexte de changement climatique semble être peu renseignée. Cependant, les travaux de Ndiaye (2003) sur l'impact du climat et des aménagements sur le régime hydrologique du Mouhoun ont permis de donner un premier aperçu de la caractérisation du régime hydrologique du Mouhoun. En effet, il a montré que depuis les années 1970, une autre sécheresse plus persistante que celle apparue entre 1940 et 1944 en Afrique tropicale sèche a été enregistrée et perdure jusqu'au début des années 2000. Cette sécheresse climatique a entraîné la baisse des écoulements dans le bassin du Mouhoun. Plus d'une décennie après, une actualisation du régime hydrologique du Mouhoun s'impose avec une attention sur l'impact du climat et du barrage de Léry sur le Mouhoun.

Par ailleurs, la vocation du barrage de Léry est de couvrir notamment les besoins agricoles d'un potentiel aménageable estimé à environ 10000 ha dans la zone autour du barrage et les besoins en eau du cheptel. Fort est de constater que ces besoins en eau sont de plus en plus croissants autour du réservoir de Léry et surtout pendant la saison sèche suite à la politique d'extension des périmètres irrigués d'une part et d'autre part des prélèvements d'eau du Mouhoun en aval du barrage de Léry pour la production d'eau potable.

Cette situation nous conforte à l'idée d'accorder une attention particulière à la connaissance et à la gestion des ressources en eau du Mouhoun au cours de la décennie future. Comment le régime hydrologique du Mouhoun est-il sous l'influence de la variabilité climatique et du barrage de Léry? Comment évoluent les écoulements annuels du Mouhoun en amont puis en aval du barrage de Léry? Une perturbation de ce régime hydrologique ne constitue-t-elle pas une menace pour la satisfaction des besoins en eau des usages en cas d'occurrence d'année sèche à long terme et ce pendant la saison sèche?

L'objectif de notre étude est d'apporter des éléments de réponse à ces questions qui contribueront à améliorer la connaissance et la gestion des ressources en eau du bassin du Mouhoun.

Pour la caractérisation du régime hydrologique du Mouhoun, nous avons eu recours à l'approche statistique incluant des tests de détection de rupture dans les séries chronologiques. Quant à l'examen du bilan de fonctionnement du réservoir de Léry en 2030 en cas d'année sèche, un bilan de fonctionnement prenant en compte les entrées et les pertes au réservoir a été employé et basé sur les caractéristiques topographiques du réservoir.

Le présent rapport se compose de trois parties :

- la première partie définit les généralités sur le bassin du Mouhoun dans sa partie située au Burkina Faso. Il est exposé l'environnement biophysique, humain et un inventaire des ouvrages hydrauliques structurants réalisés dans le bassin. Un zoom est indexé sur la description du barrage de Léry, objet de notre étude ;
- la deuxième partie expose le matériel et la méthode d'études. Cette partie est fondée sur une méthodologie axée sur la recherche documentaire, l'acquisition et le traitement des données, la visite de terrain et l'analyse et l'interprétation ;
- la troisième et dernière partie présente les résultats suivis de discussions. Ces résultats portent sur l'impact du climat et du barrage sur le régime du Mouhoun en premier lieu et en deuxième lieu sur l'exploitation du réservoir de Léry à l'horizon 2030 en cas d'année sèche et pendant la saison sèche.

II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

2.1 Contexte général de la zone d'étude

Le sujet tel que décrit plus haut concerne la gestion des ressources en eau dans le contexte du barrage de Léry. Cela nous amène à définir une zone d'étude qui comprend sa zone d'alimentation mais aussi la partie aval, dont les besoins en eau dépendent des quantités d'eau lâchées au niveau du barrage. Ainsi, nous avons axé la présentation de la zone d'étude sur la présentation du bassin du Mouhoun dans son ensemble avec un zoom sur la zone environnant le barrage de Léry. Elle est tirée du rapport d'état des lieux des ressources en eau de l'espace de compétence du Mouhoun du Millenium Challenge Account au Burkina (MCA/BF) dans le cadre de leur appui à la gestion intégrée des ressources en eau du Mouhoun en 2012.

2.1.1 Environnement biophysique

2.1.1.1 Localisation

Le bassin national du Mouhoun est l'un des quatre principaux bassins nationaux du Burkina Faso (Figure 1). Sa superficie est d'environ 90810 km², soit environ 33% du territoire national.

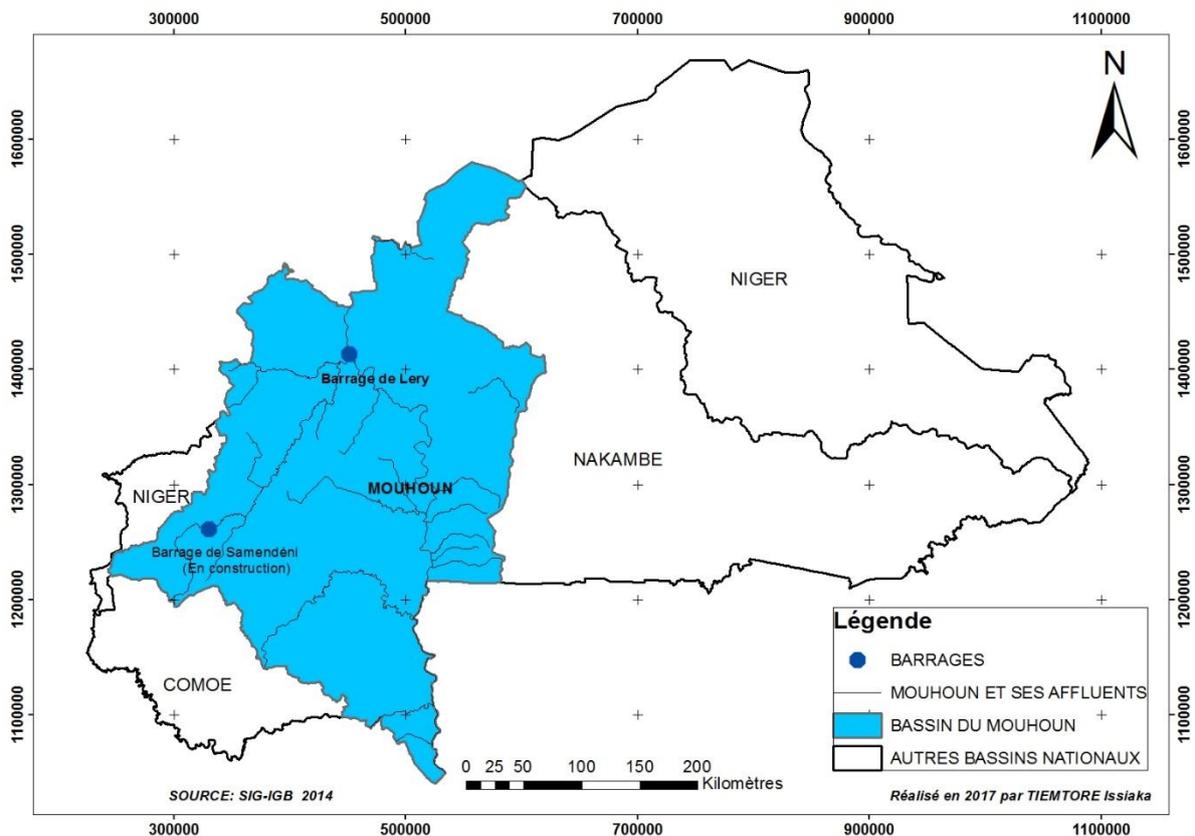


Figure 1. Localisation du bassin du Mouhoun au Burkina Faso

2.1.1.2 Climat

Le bassin national du Mouhoun est reparti en trois(3) zones climatiques (figure 2).

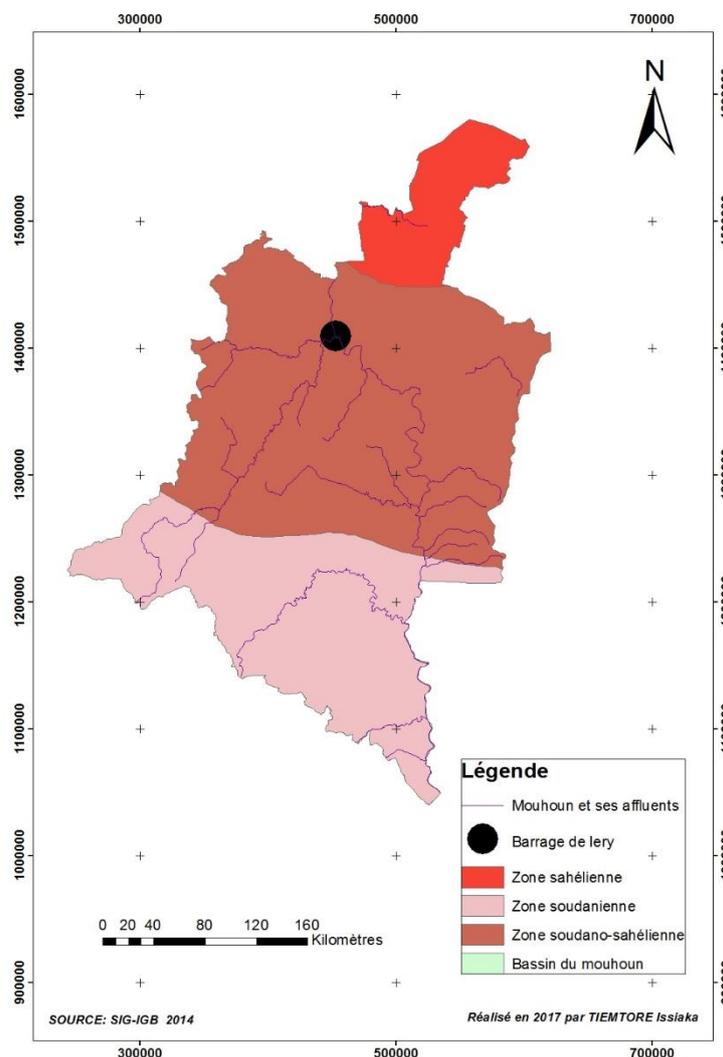


Figure 2. Zones climatiques du bassin national du Mouhoun (1970-2000)

La pluviométrie est croissante du nord au sud du bassin tandis que la température évolue de manière inverse (tableau 1) du nord au sud.

Tableau 1. Zones climatiques du bassin national du Mouhoun

| Type de climat | Pm (mm) | Jours de pluie | ETP (mm) | Ev/bac A (mm) | Température (°C) |
|----------------|------------|--------------------|-------------|---------------|------------------|
| Sahélien | Pm<600 | <45/110 | 2200 à 2500 | 3200 à 3500 | 29 |
| Nord soudanien | 600<Pm<900 | 50 à 70/150 | 1900 à 2100 | 2600 à 2900 | 28 |
| Sud soudanien | Pm>900 | 85 à 100/180 à 200 | 1500 à 1700 | 1800 à 2000 | 27 |

Pm: Pluie moyenne annuelle ; Ev: Evaporation ; ETP : évapotranspiration potentielle

2.1.1.3 Géologie et hydrogéologie

Deux entités géologiques structurent le bassin national du Mouhoun. Il s'agit :

- du socle qui occupe les parties orientales du bassin sur environ 63% du bassin. Les formations cristallines rencontrées sont à dominante granito-gneissique ou migmatique, schisto-gréseuse ou volcano-sédimentaire. Sur le plan hydrogéologique, la probabilité d'avoir des débits de forage supérieurs à 5m³/h est très faible. La principale contrainte majeure de cette zone est l'identification de la roche fracturée.
- des formations sédimentaires sur près de 37% du bassin. Elles sont composées majoritairement de formations primaire et infracambrien et d'alluvions argileuses d'origine fluvio-lacustre du continental terminal recouvrant les formations précédentes. Ces formations offrent des débits d'exploitation de 30 à 40 m³/h jusqu'à 200 m³/h dans certains cas.

2.1.1.4 Relief, sols et végétation

Le relief du bassin est assez monotone avec une pente moyenne de l'ordre de 2 %. Les altitudes sont comprises entre 273 m et 733 m.

Les sols du bassin sont issus de l'altération de matériaux kaolinitiques (faible fertilité) ou montmorillonitiques (fertilité élevée) anciens d'une part et d'autre part de dépôts quaternaires formés de sables éoliens ou d'alluvions. Ils sont repartis en 07 types distincts:

- les sols minéraux bruns ;
- les sols peu évolués d'érosion ;
- les vertisols ;
- les sols bruns tropicaux ;
- les sols ferrugineux ;
- les sols ferralitiques profonds ;
- les sols hydromorphes.

Les formations végétales du bassin sont essentiellement composées de savanes boisées, de forêts claires et de galeries forestières le long du Mouhoun. Sur la partie nord du bassin (zone sahélienne), on retrouve une végétation faite de savane arbustive et d'épineux.

2.1.1.5 Hydrographie et hydrométrie

- Le Mouhoun et ses affluents

Le réseau hydrographique du bassin du Mouhoun est assez dense avec le Mouhoun comme principal cours d'eau (figure 3). Long d'environ 1000 km et caractérisé par sa forme en boucle en territoire burkinabé, il prend sa source depuis les plateaux gréseux à l'ouest du Burkina Faso à environ 500 m d'altitude (Moniod et Sechet, 1977). En amont de la boucle, qui se situe à dans la localité de Léry, il constitue le Mouhoun supérieur et en aval, le Mouhoun inférieur :

- de sa source jusqu'à Léry, le Mouhoun supérieur coule du sud-ouest vers le nord-est et reçoit en rive gauche d'amont en aval le Plandi, le Siou et le Vouhoun et en rive droite, le Kou ;
- à la hauteur de Léry, le Mouhoun reçoit le Sourou qui jouait, avant la réalisation en 1976 du barrage-vanne de Léry, le rôle d'un affluent – défluent du Mouhoun ;
- dans sa partie inférieure, en aval de Léry, le Mouhoun a une direction nord-sud et reçoit successivement en rive droite le Grand Balé, la Bougouriba, le Poni, et la Bambassou, et en rive gauche, le Vranso, le Bulkiemdé (marigot de Koudougou), le Bolo, le Kabouti, le Bouguiguiré et le Kabarvaro.

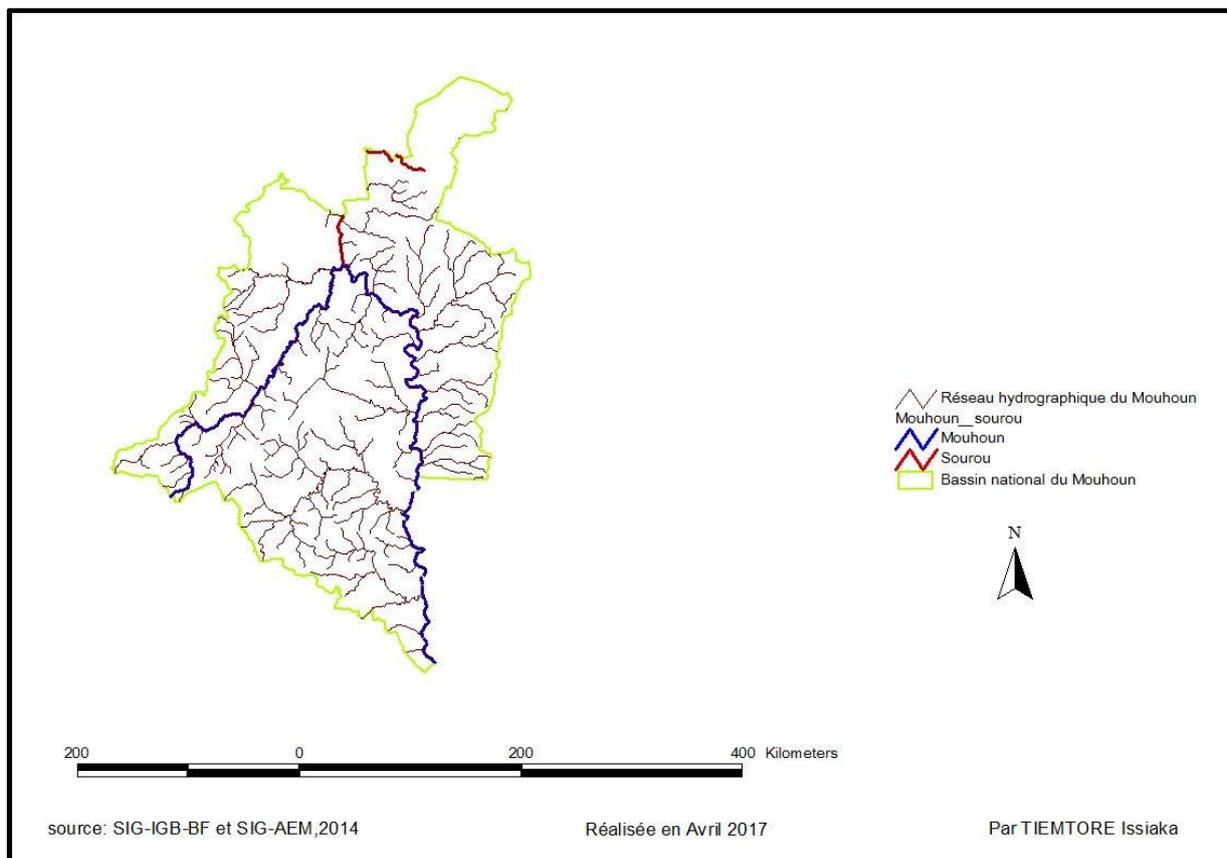


Figure 3. Réseau hydrographique du bassin du Mouhoun

- Présentation des stations hydrométriques

Le bassin du Mouhoun compte environ une cinquantaine de stations hydrométriques. Nous avons eu recours à la monographie hydrologique nationale du Burkina Faso de la Direction générale des ressources en eau (2012) pour le renseignement des caractéristiques des stations (Tableau 2 et figure 4). Elles sont équipées au moins d'une batterie d'échelles limnimétriques et d'un limnigraphe. Les critères généraux retenus sont leur proximité aux ouvrages hydrauliques et le faible taux de lacunes dans les séries de données.

Tableau 2. Liste des stations hydrométriques utilisées dans l'étude

| Stations étudiées | Code | Latitude | Longitude | Altitude (m) | bassin versant (km ²) | Année d'installation |
|------------------------------------|---------------|-----------|-----------|--------------|-----------------------------------|----------------------|
| En amont du barrage de Léry | | | | | | |
| Samendéni | 120.27.02.32 | 11° 28' N | 04° 28' W | 287 | 4580 | 1954 |
| Nwokuy | 120.27.02.29 | 12°31' N | 03° 33' W | 249,01 | 14800 | 1954 |
| Yaran | 120.27.22.15 | 12° 58' N | 03° 37' W | 248,44 | 20000 | 1955 |
| En aval du barrage de Léry | | | | | | |
| Léry nord | 120.27.02.209 | 12°45' N | 3°26' W | 248 | 27000 | 1952 |
| Ténado | 120.27.00.236 | 12° 10' N | 02° 49' W | 247 | 50000 | 1975 |
| Boromo | 120.27.02.08 | 11° 47' N | 02°55' W | 270 | 62000 | 1955 |
| Dapola | 120.27.00.211 | 10° 34' N | 02° 55' W | 228 | 94000 | 1956 |

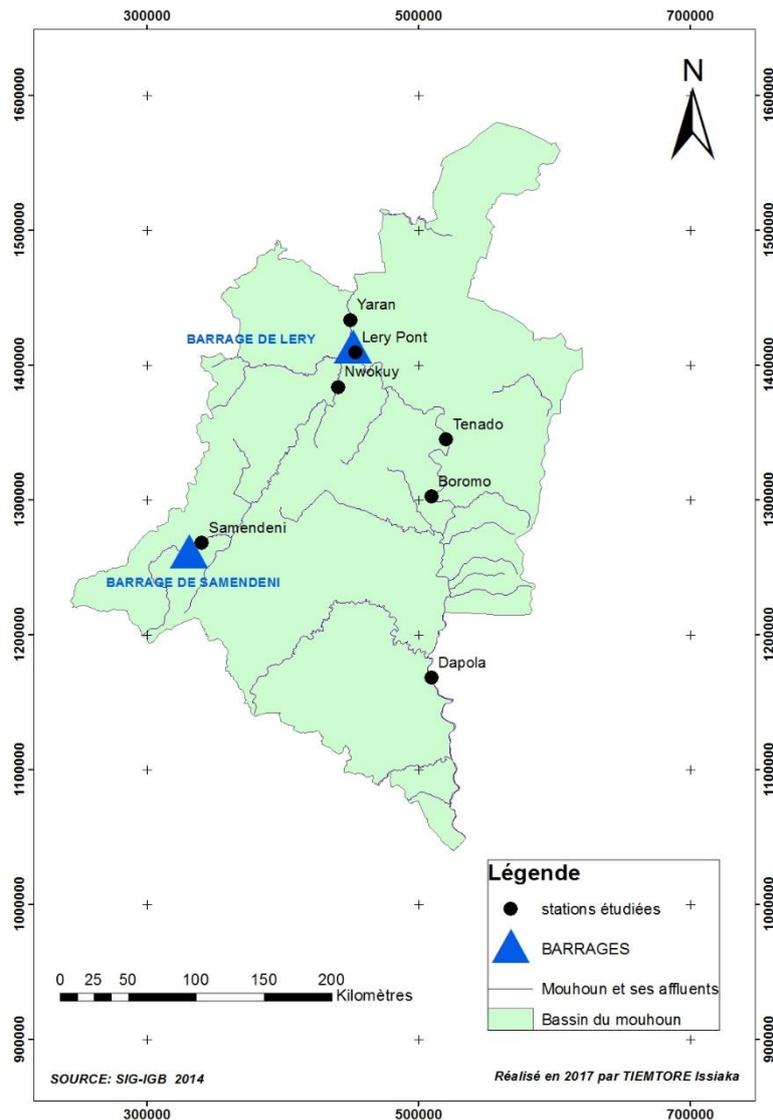


Figure 4. Localisation des stations hydrométriques étudiées dans le bassin du Mouhoun

La station de Yaran (Annexe I, page III) contrôle le niveau d'eau dans le réservoir de Léry. A partir de ce niveau d'eau lu cette station, le niveau de remplissage et la superficie du plan d'eau sont connus à l'aide des courbes hauteurs-volumes-surface. Notons que la bathymétrie de la retenue du Sourou a été actualisée dans le cadre de l'élaboration du modèle de simulation des crues du système Mouhoun Sourou de TecSult international Ltd (2010).

La station de Léry Nord est située à moins de 50 m en aval des vannes du barrage, ce qui nous a permis de considérer que le débit lâché par les vannes correspond au débit relevé à cette station.

2.1.1.6 Population

La population du bassin du Mouhoun est estimée à 3 558 559 habitants selon le recensement général de la population et de l'habitat en 1996. Elle représentait environ 34,5 % de la

population du Burkina Faso (Programme de Valorisation des Ressources en Eau de l'Ouest(PVREO), 2007). Suivant les taux moyens d'accroissement annuel de 2,04 % et 3,1 %, la population du bassin projetée est respectivement d'environ 4 361 000 et 5 909 700 habitants en 2006 et en 2016. La faible couverture en eau potable de certaines villes importantes du bassin du Mouhoun fait de ces dernières, des villes dépendantes de l'eau de la rivière et dont les prélèvements pourraient influencer le régime du cours d'eau.

2.1.2 Inventaire des aménagements hydrauliques structurants sur le Mouhoun

Au regard des enjeux socioéconomiques dans le bassin du Mouhoun, des aménagements hydrauliques structurants ont été réalisés sur le cours principal du Mouhoun et ont sans doute contribué à modifier considérablement l'hydrologie du cours d'eau. On peut citer :

- le barrage de Léry muni de quatre vannes de dimensions 4 m×2 m réalisé sur le Sourou avec une capacité initiale estimée à 300 Mm³ (figures 5 et 6). Ce barrage a pour but de stocker les eaux du Sourou à des fins agricoles dans la région.



Figure 5. Réservoir d'eau en amont du barrage de Léry



Figure 6. Vannes du barrage de Léry (vue de l'aval)

- le canal de dérivation du Mouhoun dans le Sourou réalisé en amont du barrage de Léry. Cet ouvrage qui détourne l'intégralité des eaux du Mouhoun dans le Sourou a porté la capacité de la retenue d'eau du barrage de Léry à environ 600 Mm³.
- le barrage de Samendéni mis en eau en 2017 est situé en amont du barrage de Léry. Sa capacité est d'environ 1050 Mm³. Il est à vocation agricole, hydroélectrique et est prévu également pour alimenter les populations de la zone environnante en eau potable.

Le barrage de Samendéni n'étant pas l'objet de cette étude, nous présentons dans la suite une description du barrage de Léry situé dans la vallée du Sourou.

2.2 Barrage de Léry

2.2.1 Historique du fonctionnement du complexe Mouhoun Sourou

A l'origine, le Sourou était un affluent puis défluent du Mouhoun. En effet, en période de crue, le Mouhoun alimentait le Sourou et le phénomène inverse était observé pendant la période de décrue. En 1976 a été construit sur le Sourou, à environ 300 m en amont du pont de Léry une digue en terre et un ouvrage de contrôle équipé de quatre (4) vannes levantes. En amont de ce barrage, on a ainsi créé une retenue d'eau d'environ 300 Mm³ qui submerge la vallée du Sourou en hautes eaux. En 1984, un canal de dérivation des eaux du Mouhoun dans le réservoir de Léry a été réalisé faisant ainsi du Sourou un simple réservoir d'eau alimenté par le Mouhoun en toute saison. La figure 5 indique la nouvelle configuration du complexe Mouhoun-Sourou.

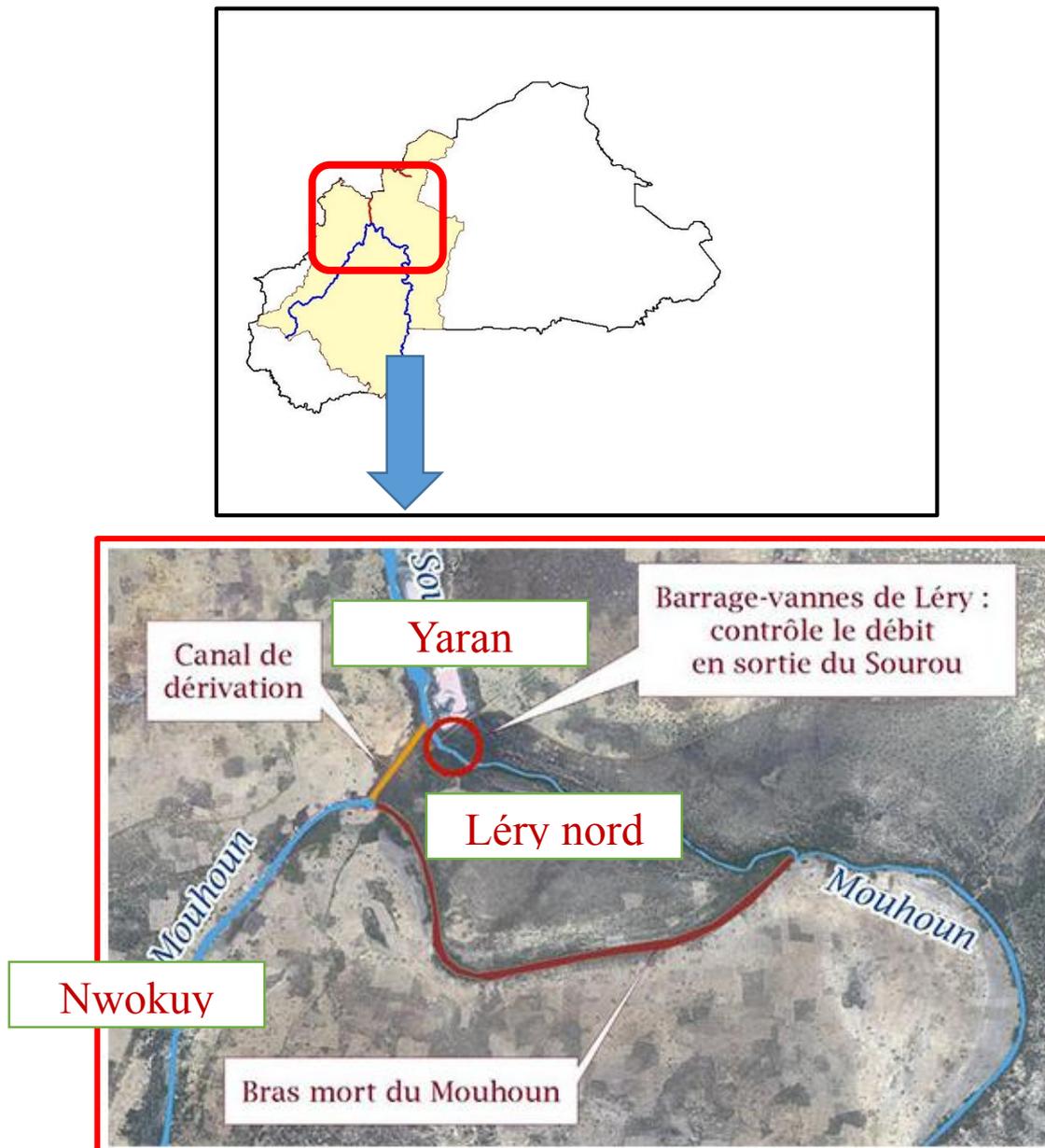


Figure 7. Complexe Mouhoun Sourou et canal de dérivation (Tecsult, 2010)

2.2.2 Caractéristiques physiques du réservoir de Léry

2.2.2.1 Données topographiques et climatiques

Le réservoir du barrage de Léry est assimilé à un plan d'eau caractérisé par les courbes hauteur-volume-surface présentées en annexe VI, page VII. Il appartient au secteur sahélien avec une pluviométrie moyenne annuelle de 500 à 700 mm (Somda et al., 2010). Son relief plat fait que la principale contrainte dans la mobilisation de la retenue est l'évaporation. La valeur moyenne annuelle est de l'ordre de 2858 mm à partir des mesures d'évaporation de type BAC classe A

de la station agronomique de Di (Millenium Challenge Account(Burkina Faso), 2012; Tecslut international Ltd, 2010)

2.2.2.2 Données géologiques

La cuvette du barrage de Léry est dominée par des formations géologiques constituées de sédiments alluviaux argileux à sablo-argileux du quaternaire. L'épaisseur de cette couverture argileuse peut atteindre par endroit 60 m (Tecslut international Ltd, 2010), ce qui réduit considérablement l'infiltration dans la retenue du Sourou. D'après les études réalisées par Tecslut international Ltd (2010) et du Millenium Challenge Account (Burkina Faso) (2012), l'infiltration journalière moyenne de la retenue du barrage de Léry est estimée à 2 mm/j. En outre, la visite de terrain que nous avons effectuée indique un fond de cuvette est enherbé (Figure 8).



Figure 8. Cuvette du réservoir du barrage de Léry enherbée

2.2.3 Usages de l'eau en amont du barrage de Léry

2.2.3.1 Besoins agricoles

Les périmètres irrigués de la vallée du Sourou existent sous plusieurs modes d'irrigation et avec plusieurs types de cultures. Les périmètres exploités actuellement sont de l'ordre de 5848 ha prenant en compte l'aménagement de 2033 ha du gouvernement américain en 2010. Il est prévu l'aménagement de 2000 ha à Dangoumana à l'horizon 2030.

Nous nous sommes référés pour l'estimation des besoins en eau des cultures à l'horizon 2030 des résultats de l'étude de Tecslut (2010) (Tableau 3).

Tableau 3. Estimation des besoins en eau dans la vallée du Sourou

| Désignation | Unité | Périmètres existants | Périmètres existants+Di | Périmètres existants+Di+Dangoumana |
|-------------|-----------------|----------------------|-------------------------|------------------------------------|
| superficie | ha | 3815 | 5848 | 7848 |
| Mars | Mm ³ | 12,7 | 19,5 | 26,1 |
| Avril | Mm ³ | 7,7 | 11,8 | 15,8 |
| Mai | Mm ³ | 2,8 | 4,3 | 5,8 |
| Juin | Mm ³ | 3,5 | 5,4 | 7,3 |
| Juillet | Mm ³ | 9,4 | 14,4 | 19,3 |
| Août | Mm ³ | 3,7 | 5,6 | 7,5 |
| Septembre | Mm ³ | 4,4 | 6,7 | 9 |
| Octobre | Mm ³ | 6 | 9,2 | 12,4 |
| Novembre | Mm ³ | 2,5 | 3,9 | 5,2 |
| Décembre | Mm ³ | 6,6 | 10,2 | 13,7 |
| Janvier | Mm ³ | 16,7 | 25,6 | 34,3 |
| Février | Mm ³ | 13,6 | 20,9 | 28 |
| Total | Mm ³ | 89,7 | 137,4 | 184,4 |

2.2.3.2 Besoins pastoraux

La vallée du Sourou est une zone d'élevage (Annexe III, page IV) par excellence du fait de l'abondance du pâturage et des ressources en eau durant toute l'année. Le cheptel est estimé à environ 253 826 bovins et 337 227 ovins et caprins (Somda et al., 2010). Sur la base du taux d'accroissement de 2,5 % pour les bovins et 3 % pour les caprins et ovins, le cheptel projeté à l'horizon 2030 est d'environ 1 024 993. Les besoins en eau ont été évalués sur la base de 40 l/UBT/j, un bovin correspondant à 0,7 UBT et un caprin ou un ovin à 0,1 UBT. Le tableau suivant donne une évaluation des besoins en eau pastoraux en saison sèche à l'horizon 2030.

Tableau 4. Besoins en eau en Mm³ pour le pâturage à l'horizon 2030 dans la vallée du Sourou

| Type de bétail | Novembre | décembre | janvier | février | mars | avril |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Bovins | 0,35 | 0,36 | 0,36 | 0,33 | 0,36 | 0,35 |
| Caprins et ovins | 0,07 | 0,08 | 0,08 | 0,07 | 0,08 | 0,07 |
| Total (Mm³) | 0,42 | 0,44 | 0,44 | 0,39 | 0,44 | 0,42 |

2.2.4 Gestion des vannes

La gestion des vannes (Annexe II, page III) est assurée conjointement par :

- le ministère en charge de l'eau du Burkina Faso à travers la Direction Générale de Ressources en Eau (DGRE) : elle est responsable des débits à lâcher en aval des vannes afin de non seulement réduire les risques d'inondation dans la vallée et mais aussi d'assurer un écoulement minimum (Ministère de l'eau et de l'environnement(MEE), 1998);
- l'Autorité de Mise en Valeur de la Vallée du Sourou (AMVS) : Sous la tutelle technique du ministère en charge de l'agriculture du Burkina Faso, elle est chargée de la distribution de l'eau dans les périmètres irrigués de la vallée du Sourou. Elle dispose d'un logiciel de bilan hydrique mensuel du réservoir du Sourou comme outil de gestion lui permettant en collaboration avec la DGRE de réguler le niveau d'eau dans la retenue (Ministère de l'Eau et de l'Environnement(MEE), 1998).

Les lâchers d'eau au niveau des vannes sont fonction de la cote de l'eau observée à la station de Yaran. A la cote 251,5 m, toutes les vannes sont totalement ouvertes pour éviter les inondations dans les périmètres irrigués et les villages riverains. Cette cote sert de cote d'alerte pour l'ouverture des vannes. Aussi, le niveau d'eau ne doit pas être inférieur à la cote 248,2 m des vannes. Ainsi, en vue de satisfaire aux besoins agricoles des périmètres et au débit minimum réservé, le niveau d'eau doit fluctuer entre 248,2 m et 251,5 m la cote des prises d'irrigation étant à la cote 250,2 m.

Depuis sa mise en place, le débit minimal lâché et observé à la station de Léry Nord est de 3,52 m³/s.

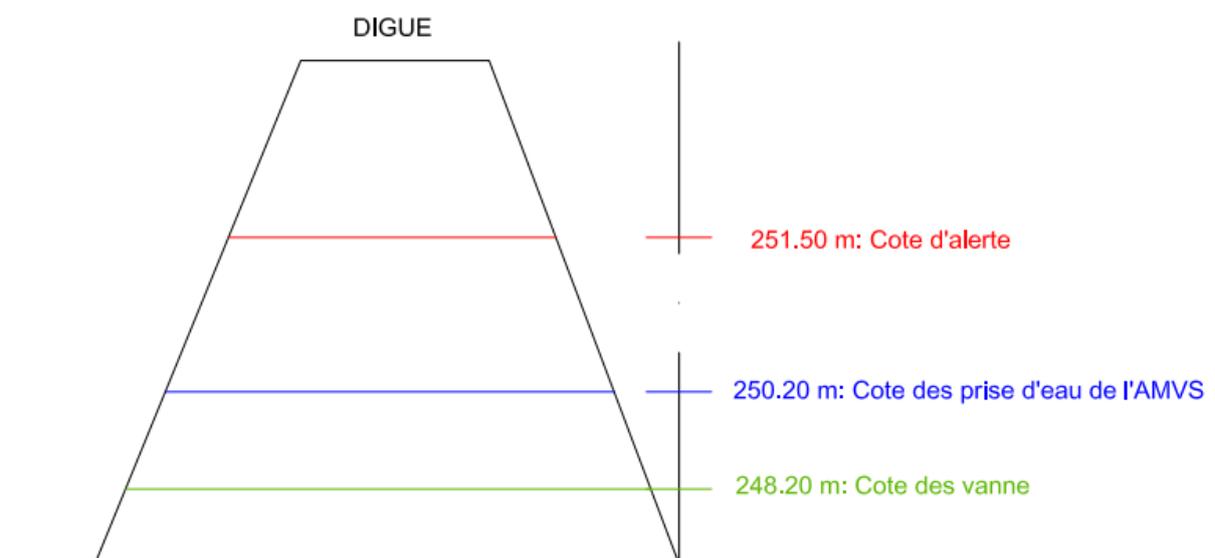


Figure 9. Cote d'alerte, des vannes de Léry et des prises d'eau (source : DGRE, 2012)

2.3 Situation des besoins en eau en aval du barrage de Léry

2.3.1 Usages de l'eau en aval du barrage de Léry

Le principal usage de l'eau en aval du barrage de Léry est la production d'eau potable assurée par l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA) pour la production d'eau potable. Le recours aux prélèvements d'eaux brutes du Mouhoun fait suite à l'incapacité de l'ONEA de satisfaire la demande en eau potable des populations à partir des eaux souterraines. En effet, les villes alimentées par ces prélèvements sont situées dans la zone de socle caractérisée par un faible potentiel d'exploitation en eau souterraine. On dénombre trois stations de pompage alimentant des prises d'eau dans le Mouhoun inférieur.

2.3.1.1 Prise d'eau de Ténado

Elle alimente la ville de Koudougou depuis la mise en eau du barrage de Léry en 1976. La prise d'eau est à quelques dizaines de mètres en amont de la station hydrométrique de Ténado. A l'horizon 2030, les prélèvements d'eau sont estimés à 8061 m³/j pour une population prévisionnelle de 133 658 habitants. Le débit de pompage est de 350 l/s sur une durée d'environ sept heures (Tecsult international Ltd, 2010).

2.3.1.2 Prise d'eau de Boromo

La prise d'eau a été installée depuis 2010 à quelques dizaines de mètres en amont de la station hydrométrique de Boromo. Les prélèvements actuels sont estimés à 1000 m³/j en 22 heures de pompage pour une population de 1250 habitants. A l'horizon 2030, le besoin serait d'environ 1040 m³/j sur la base du taux d'accroissement national (Tecsult international Ltd, 2010).

2.3.1.3 Prise d'eau de Poura

Elle est située à environ 10 km en aval de la prise de Boromo. L'évaluation à l'horizon 2030 table sur un débit de pompage de l'ordre de 3456 m³/j soit 40 l/s (Tecsult international Ltd(2010).

Certains besoins en eau tels que les besoins pastoraux sont développés au fil du Mouhoun en aval. En effet, pendant la saison sèche, le bétail n'a pour recours qu'aux ressources en eau du Mouhoun, seules ressources en eau pérennes du bassin. Ces besoins qui ne sont pas quantifiés ont été pris en compte dans la corrélation entre les débits lâchés et les débits observés en aval.

2.3.2 Débit écologique

A ces divers usages, il ne faudrait pas perdre de vue le débit écologique à garantir pour préserver les écosystèmes vitaux formés autour du cours d'eau. Aucun débit écologique fixe n'est défini au niveau national. Les débits écologiques proposés par le Millenium Challenge Account (Burkina Faso) (2012) dans le document de planification du Mouhoun ont été utilisés dans notre étude (Annexe IV, page V).

2.3.3 Débits objectifs aux sites de prélèvement des eaux brutes du Mouhoun

Les débits objectifs aux sites de prélèvement des eaux brutes du Mouhoun sont les débits minima à assurer au niveau des stations de Ténado et Boromo. Ils ont été obtenus en faisant la somme des débits écologiques et des prélèvements d'eau. Ces débits sont respectivement de l'ordre de 1,35 et 1,05 m³/s aux stations hydrométriques de Ténado et Boromo pendant la saison sèche.

III. MATERIEL ET METHODE

3.1 Données

3.1.1 Données

Les principales données utilisées dans cette étude sont les débits journaliers sur sept stations hydrométriques de la rivière du Mouhoun (Tableau 5). Ces données ont été mises à notre disposition par la DGRE.

Tableau 5. Qualité des données hydrométriques de l'étude

| Stations hydrométriques | Période étudiée | Bassins versants | Durée totale lacunes (an) | Durée totale observations (an) |
|--------------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| Samendéni | 23/03/1955-04/10/2016 | Mouhoun | 19,11 | 42,9 |
| Nwokuy | 01/01/1955-04/10/2016 | Mouhoun | 23,1 | 38,9 |
| Yaran | 01/01/1955-04/10/2016 | Sourou | 12,7 | 49,3 |
| Léry nord | 01/12/1955-30/11/2016 | Mouhoun | 25,6 | 37,4 |
| Ténado | 09/06/1976-31/08/2009 | Mouhoun | 17,6 | 34 |
| Boromo | 28/03/1955-17/10/2013 | Mouhoun | 16,9 | 42,1 |
| Dapola | 28/03/1955-17/10/2013 | Mouhoun | 14,6 | 44,4 |

Des données de pluie ont été également utilisées dans cette étude. Ce sont des séries de pluies moyennes annuelles de 1955 à 2009 sur les bassins versants du Mouhoun à Samendéni, Boromo et Dapola. Elles ont été extraites de la base de données du système d'informations environnementales sur les ressources en eau et leur modélisation (SIEREM) alimentées par des données hydrométéorologiques de la Direction Générale de la Météorologie (DGM) du Burkina Faso. Une critique de ces données a été effectuée avant leur emploi dans l'étude proprement dite.

3.1.2 Critique et comblement des données

Une attention particulière a été accordée au comblement des lacunes. En effet, cette situation pourrait affecter les résultats de notre analyse tendant au mieux vers la réalité. La reconstitution des débits journaliers serait hasardeuse étant donné qu'il existe des mois voire des années entières sans observations. Ainsi, il a été procédé plutôt au comblement des débits mensuels par

différentes méthodes Les basses eaux ont été reconstituées par interpolation linéaire du fait de la décroissance des débits d'octobre à mars sur les stations de Samendéni, Nwokuy, Boromo et Dapola. Pour les années entières sans observations, nous avons tiré les données des monographies du bassin de la volta et du bassin hydrologique national du Mouhoun où les données manquantes avaient été comblées par interpolation entre débits d'une même station et débits de stations sur un même cours d'eau.

Les débits des stations de Léry nord et Ténado n'ont pas été comblées compte tenu de leur taux de lacunes très élevé. Seules les données observées ont été utilisées pour l'étude.

Les débits moyens annuels sont calculés sur une année hydrologique allant du 01 mai de l'année i au 30 Avril de l'année $i+1$.

3.2 Méthode

3.2.1 Méthodologie

Pour atteindre les objectifs définis plus haut, l'étude s'est déroulée en quatre(4) étapes :

- Recherche documentaire

La recherche documentaire a permis de déterminer la bibliographie pertinente sur le bassin du Mouhoun d'une part et d'autre part sur les travaux de recherche utilisant les méthodes statistiques pour caractériser les écoulements d'un bassin.

- Collecte des données

Les données hydrométriques ont été collectées auprès de la DGRE. Quant aux données pluviométriques sur les stations pluviométriques de Bobo Dioulasso, Boromo et Dédougou reçues auprès de la DGM du Burkina Faso, elles n'ont pas permis d'estimer avec objectivité les pluies moyennes annuelles de bassin versant. Ainsi, nous avons eu recours à la base de données du Système d'informations environnementales sur les ressources en eau et leur modélisation (SIEREM).

Les besoins en eau agricoles ont été obtenus à partir de la bibliographie tandis que les autres usages ont été estimés à l'horizon 2030.

- visite de terrain

La visite de terrain a eu lieu dans la vallée du Sourou. Nous nous sommes imprégné de l'état de fonctionnement du barrage de Léry, des stations à l'entrée et à la sortie du barrage et de la station de Yaran.

- Analyse et interprétation des données

Après la constitution des chroniques de débits et de pluie, nous avons analysé le fonctionnement hydrologique du Mouhoun en se basant sur les tests statistiques de détection de rupture. Ce fonctionnement étant sans doute lié à la variabilité climatique et au barrage de Léry, la réserve en eau du barrage de Léry se trouve également au cœur de l'effet combiné de ces facteurs. Nous avons ainsi simulé le fonctionnement de la retenue en année quinquennale et décennale sèche afin de vérifier sa capacité à couvrir les besoins à l'horizon 2030.

3.2.2 Analyse de la variabilité hydrologique et pluviométrique du bassin du Mouhoun

L'un des objectifs de cette étude est de montrer l'impact du climat et des aménagements sur les écoulements du Mouhoun. Les auteurs comme Assani et al.(2004) et Cissé et al.(2014) ont mentionné que trois méthodes sont couramment utilisées pour l'analyse d'impact des barrages.

Il s'agit de :

- la méthode de station témoin qui consiste à comparer les données mesurées à la même station avant et après la construction d'un barrage;
- la méthode de simulation hydrologique qui consiste à comparer les débits naturels reconstitués au moyen d'un modèle hydrologique, aux débits effectivement mesurés à une station influencée par un barrage;
- la méthode de station de contrôle fondée sur la comparaison des débits mesurés en amont et en aval d'un barrage ou sur la comparaison des débits mesurés sur une rivière non influencée par un barrage et en aval d'un barrage.

Compte tenu des effets de la variabilité et du changement climatique, les deux premières méthodes n'ont pas été utilisées. Seule la méthode de station de contrôle a été utilisée dans notre étude. Cependant, la seule station de référence en amont du barrage (station de Nwokuy) se trouve influencée en permanence par la remontée des eaux du barrage de Léry en période de crue. La station de Samendéni située à environ 100 km de Nwokuy a été utilisée comme station de référence en amont. Ce choix se justifie par la bonne corrélation linéaire entre ces deux stations sur la période avant la réalisation du barrage de Léry en 1976 (coefficient de détermination $R^2= 0,911$) et qui se trouve perturbée après la réalisation du barrage (coefficient de détermination $R^2=0,39$) (Annexe V, page VI). L'objectif est d'avoir une série de débits en amont du barrage ayant les mêmes variations temporelles de débits que la station de Nwokuy. Les deux stations en aval du barrage choisies sont Boromo et Dapola.

L'analyse de l'évolution du régime hydrologique en lien avec le climat et les aménagements hydro agricole a été faite à l'aide des indices centrés réduits de modules et des tests statistiques

de détection de rupture. Ces tests ont été faits sur les séries de modules et de pluies annuelles de bassins versants aux stations étudiées. Ils ont permis d'étudier l'homogénéité des séries de débits et de pluies et leur corrélation. L'idée recherchée est de détecter les changements significatifs sur le régime du cours d'eau et les lier à ceux du climat (principalement la pluviométrie) ou aux aménagements.

3.2.2.1 Analyse des indices centrés réduits

La variation interannuelle des écoulements du Mouhoun a été mise en évidence à travers les indices centrés réduits de modules calculés comme suit :

$$I_Q = \frac{Q - \bar{Q}}{s}$$

Avec Q le module de l'année, \bar{Q} le module interannuel, s l'écart-type de l'échantillon. L'indice de débit n'a pour but que de détecter les périodes excédentaires et déficitaires.

3.2.2.2 Analyse de la stationnarité des écoulements et de la pluviométrie du bassin du Mouhoun

Le changement de régime d'écoulement se manifeste par une non-stationnarité des séries d'événements hydrologiques, ce qui se traduit par des ruptures de distribution se produisant à des années hydrologiques bien indiquées (Cissé et al., 2014). Les séries de modules et de pluies annuelles ont été soumises aux tests statistiques de détection de rupture. Le but est d'étudier l'homogénéité des écoulements du Mouhoun en détectant les années de rupture et en estimant le déficit ou l'excédent engendré. Ils sont définis par :

$$\text{Déficit ou excédent}(\%) = \left(\frac{\text{MAP} - \text{MAV}}{\text{MAV}} \right) * 100$$

Avec MAP : moyenne interannuelle après la rupture

MAV : moyenne interannuelle avant la rupture

Les tests utilisés sont le test de Pettitt, la procédure bayésienne de Lee et Heghinian et la méthode de segmentation de Hubert issus du logiciel Khronostat. Le test de Pettitt et la procédure bayésienne de Lee et Heghinian qui ne détectent qu'une seule rupture à la fois, ont été appliqués sur toute la longueur de la série pour détecter une première rupture, laquelle rupture étant la plus importante. Un deuxième test a été appliqué sur la série après l'année de rupture pour étudier le comportement de la série après cette première rupture. La méthode de segmentation de Hubert quant à elle, permet de détecter plusieurs ruptures à la fois.

La description de ces tests statistiques par Lubes-Niel et al.(1998) et (Mohamed Talla Cissé et al., 2014) a été reprise dans les lignes suivantes :

❖ Test de PETTITT

Si l'on considère une série de distribution de variables aléatoires, la méthode de Pettitt considère qu'il y a rupture des moyennes à tout point de rang t si les x_i avec $i = 1, \dots, t$ suivent une distribution $F_1(x)$ et les x_j avec $j = t + 1, \dots, N$ suivent une autre distribution $F_2(x)$ différent de $F_1(x)$. L'hypothèse nulle (absence de rupture) est testée par une formulation du test non paramétrique de Mann-Whitney. La variable U suivante est calculée :

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

Avec $D_{ij} = \text{signe}(x_i - x_j)$ or $\text{signe}(x) = 1$ si $x > 0$; $\text{signe}(x) = -1$ si $x < 0$ et $\text{signe}(x) = 0$ si $x = 0$. Le test se fait sur le maximum K_N en valeur absolue de la variable U :

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

Par la théorie du rang, Pettitt donne la probabilité de dépassement d'une valeur k de K_N par la formule :

$$\text{Proba}(K_N > k) = 2 \exp\left(\frac{-6k^2}{N^2 + N^3}\right)$$

L'hypothèse nulle est rejetée si la probabilité est inférieure au risque de première espèce α .

❖ Procédure bayésienne de Lee et Heghinian

La méthode de Lee et Heghinian est un test paramétrique qui requiert une distribution normale de la variable étudiée. L'hypothèse consiste à supposer une rupture dans la moyenne de la série à une date quelconque. Le principe de la méthode est le suivant :

$$X_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i \dots \text{avec} \dots i = 1, \dots, N \\ \mu + \sigma + \varepsilon_i \dots \text{avec} \dots i = t + 1, \dots, N \end{cases}$$

Les ε_i suivent une distribution normale; t représente la date de rupture; σ correspond à l'amplitude du changement sur la moyenne. Le test basé sur la méthode de Bayes se veut la détermination de la probabilité a posteriori des paramètres t et en supposant une distribution a priori. Ainsi, la date de rupture t est supposée suivre une distribution uniforme, c'est-à-dire que la probabilité de rupture est identique à tout instant. La nouvelle distribution dite a posteriori est donnée par les formules suivantes :

$$P\left(\frac{t}{x} > \infty\right) = \frac{\sqrt{\frac{n}{t(n-t)}}}{\sqrt{R(t)^{n-2}}} \quad ; \quad P\left(\frac{\sigma}{x}\right) = \sum_{t=1}^N P\left(\frac{\sigma}{x}\right) P\left(\frac{t}{x}\right)$$

$$R(t) = \frac{\sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}_t)^2 + \sum_{i=t+1}^n (x_i - \bar{x}_{n-t})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_1)^2}$$

Avec $\bar{x}_t = 1/t \sum_{i=1}^t x_i$ et $\bar{x}_{n-t} = 1/t \sum_{i=t+1}^n x_i$

La date de rupture est estimée être le mode de la distribution si elle est unimodale ou le mode maximum si elle est multimodale.

❖ Procédure de segmentation de Hubert

Le test non paramétrique de Pettitt et la méthode bayésienne de Lee et Heghinian décrits ci-dessus renseignent sur l'existence et la date des ruptures des moyennes dans la série. Par contre, la procédure de segmentation de Hubert permet, en plus de la détection des ruptures, de connaître leurs sens et leur amplitude. La procédure de segmentation consiste à découper la série en un certain nombre de sous séries ou segments, suivant la technique des moindres carrés, de telle sorte que les moyennes de deux segments contigus soient significativement différentes selon le principe de Scheffé. Toute décomposition de la série initiale en m sous séries est une segmentation d'ordre m.

3.2.2 Etude du fonctionnement du réservoir du Sourou

L'exploitation du réservoir d'eau de Léry a été étudiée à l'horizon 2030 au regard des besoins en eau de plus en plus croissants. Avant la simulation de l'exploitation du réservoir de Léry, nous avons en premier lieu mesuré l'influence des lâchers d'eau du barrage de Léry sur le Mouhoun inférieur sur la période 1985-2004 en estimant les débits observés sans les lâchers des vannes et en deuxième lieu procédé à une vérification de la prise en compte des besoins en eau en aval du barrage de Léry dans les débits réservés constituant les scénarios, et ce à partir de l'efficience de lâcher des vannes. L'efficience du débit lâché (rapport entre le débit lâché par les vannes et le débit observé à une autre station en aval) du mois le plus défavorable de la saison sèche a permis d'estimer le débit qu'on observerait sur les stations de pompage de Ténado et Boromo en fonction des débits réservés recommandés (3 ou 4 m³/s). Ces débits sur les stations de pompage ont été par la suite comparés aux débits objectifs.

L'exploitation de la retenue a été simulée au pas de temps mensuel en saison sèche (De novembre à Avril) suivant deux scénarios de remplissage de la retenue : quinquennale et sèche. La taille de l'échantillon de débits et volumes journaliers étant de 19, il serait hasardeux de simuler pour un temps de retour au-delà de 10 ans. Elle prend en compte d'une part les besoins agricoles et pastoraux de la vallée du Sourou et d'autre part les besoins à satisfaire en aval du barrage de Léry à l'horizon 2030, lesquels besoins sont pris en compte dans les débits lâchés. Pour la simulation de l'exploitation de la retenue, les étapes suivantes ont été abordées :

❖ **Reconstitution des volumes initiaux de la retenue à la fin du mois d'octobre**

Le volume initial de la retenue depuis la dérivation du Mouhoun dans le Sourou à la fin du mois d'octobre a été reconstitué en additionnant le volume observé à la station de Yaran et le débit lâché observé à la station de Léry nord. La série de volumes reconstitués a été par la suite ajusté à la loi de Gumbel (loi de distribution adéquate à 95%) pour la détermination de quantiles à un intervalle de confiance de 95%.

❖ **Détermination des apports extérieurs à la retenue du Sourou**

Les apports extérieurs à la retenue sont mesurés à la station de Nwokuy, station située en amont de la retenue du Sourou. Les séries de débits moyens mensuels de Novembre à Avril à partir d'une chronique allant de 1985 à 2016 ont été constitués, puis ajustés à la loi de Gumbel (loi adéquate à 95%). Les quantiles ont aussi été estimés à 95% d'intervalle de confiance (Annexe VII page VIII).

❖ **Simulation du bilan de fonctionnement suivant les scénarios de remplissage du réservoir du Sourou**

Suivant le scénario de remplissage du réservoir, des besoins en eau des différents usages projetés à l'horizon 2030 et du débit à lâcher requis en saison sèche, l'exploitation de la retenue du Sourou a été simulée à l'aide des caractéristiques topographiques du réservoir de Léry (Annexe VI, page VII).

Les résultats de cette simulation ont permis de comprendre l'aptitude de la retenue à couvrir les besoins en eau projetés à l'horizon 2030 en année quinquennale et décennale sèche.

Cela va aider les décideurs dans leur prise de décisions dans le domaine de la gestion de l'eau à l'échelle de bassin versant du Mouhoun.

IV. RESULTATS

4.1 Analyse de la variabilité hydrologique du Mouhoun

4.1.1 Analyse des indices centrés réduits de modules

La distribution des indices centrés réduits de débits laissent entrevoir trois périodes distinctes de 1955 à 2012 sur les stations hydrométriques influencées et non influencées (Figures 7, 8 et 9).

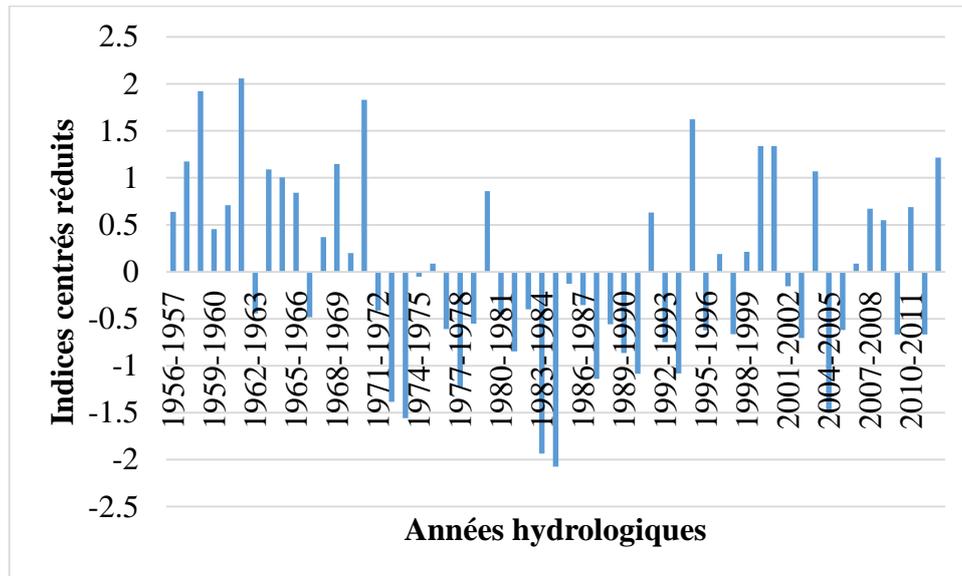


Figure 10. Indices centrés réduits des modules du Mouhoun à Samendéni

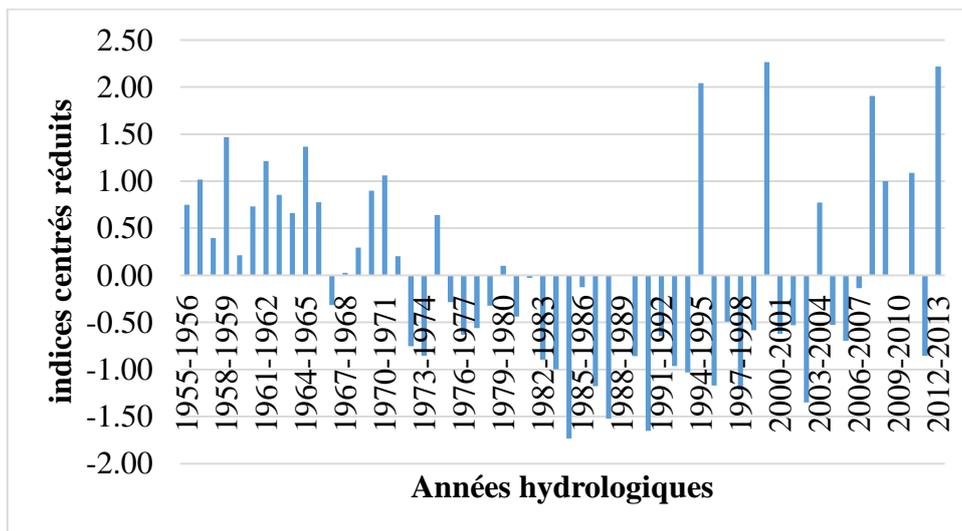


Figure 11. Indices centrés réduits des modules du Mouhoun à Boromo

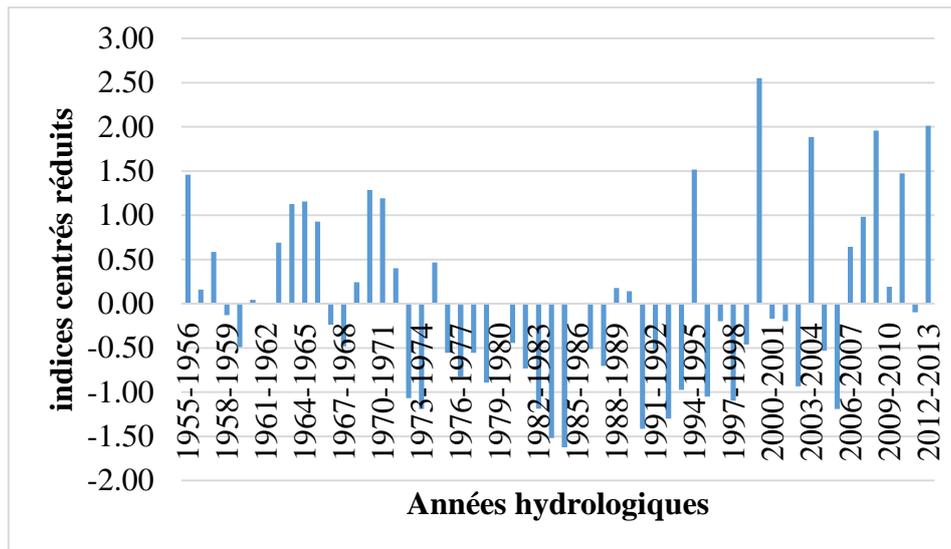


Figure 12. Indices centrés réduits des modules du Mouhoun à Dapola

La première période est marquée par une dominance d'années humides et s'étend de 1955-1956 au début des années 1970 sur toutes les stations. Elle est suivie d'une période globalement sèche qui diffère de la station non influencée (Samendéni) à celles influencées (Boromo et Dapola). En effet, à la station de Samendéni, elle s'étend de 1971-1972 à 1991-1992 tandis que sur les stations en aval elle couvre la période de 1972-1973 à 1994-1995. La dernière période observée est caractérisée par une alternance d'années humides et d'années sèches.

Les tests statistiques appliqués sur les séries de modules ont permis de cerner ces changements de comportement dans les écoulements annuels sur ces stations en détectant des années de rupture.

4.1.2 Analyse de la stationnarité des échantillons de modules

Les résultats des tests statistiques de détection de rupture ont été fournis au seuil de confiance de 90%.

4.1.2.1 Test de *PETTITT* et *LEE* et *HEGHINIAN*

Les tests de détection de la première rupture de Pettitt et Lee et Heghinian appliquées aux séries de modules ont été fournis dans le tableau 6.

La première rupture a été décelée au début des années 1970 aussi bien sur la station non influencée par le barrage de Léry que sur celles influencées selon le test de Pettitt. Ces résultats ont été confirmés par le test de Lee et Heghinian, à l'exception de la station de Dapola où on note la rupture en 2005.

Tableau 6. Détection de la première et deuxième rupture des séries de modules des stations étudiées : test de Pettitt et Lee et Heghinian

| Stations | | En amont du barrage de Léry | En aval du barrage de Léry | |
|------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------|
| | | Samendéni | Boromo | Dapola |
| Première rupture | Test de Pettitt | 1970-1971 | 1971-1972 | 1971-1972 |
| | Test de Lee et Heghinian | 1970-1971 | 1971-1972 | 2005-2006 |
| Deuxième rupture | Test de Pettitt | 1993-1994 | Absent | 1997-1998 |
| | Test de Lee et Heghinian | 1993-1994 | 2006-2007 | 1998-1999 |

La deuxième rupture indique un décalage entre les années de rupture au niveau des stations en amont et en aval du barrage de Léry. Selon le test de Lee et Heghinian, cette rupture est enregistrée en 1993-1994 à la station de Samendéni (non influencée) et à Boromo et Dapola (stations influencées) respectivement en 2006-2007 et 1998-1999. Le test de Pettitt indique plutôt qu'il n'existe aucune rupture à la station de Boromo.

4.1.2.2 Méthode de segmentation de Hubert

La procédure de segmentation de Hubert appliquée sur les séries de modules révèle deux dates de ruptures sur chacune des stations (Tableau 7). La première rupture marquée par une baisse des écoulements annuels a lieu au début des années 1970 sur les différentes stations. Elle est de l'ordre de 46% à la station de Samendéni contre 42 et 39,5% à Boromo et Dapola.

Quant à la deuxième rupture, on observe un décalage entre les années de reprise des écoulements d'amont en aval du barrage de Léry. Elle est observée en 1993-1994 à la station de Samendéni tandis qu'elle est notée respectivement en 2006-2007 et 1998-1999 à Boromo et Dapola. A la Samendéni (station non influencée), cette reprise est du même ordre que la baisse relevée à la première rupture.

Tableau 7. Segmentation des séries de modules en amont et en aval du barrage de Léry

| stations | Année de rupture | Moyenne avant (m ³ /s) | Moyenne après (m ³ /s) | tendance | Déficit(%) |
|--|------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|------------|
| station en amont du barrage de Léry | | | | | |
| Samendéni | 1970-1971 | 19,8 | 11,052 | Baisse | 46 |
| | 1993-1994 | 11,052 | 16,042 | hausse | 45,2 |
| Stations en aval du barrage de Léry | | | | | |
| Boromo | 1971-1972 | 44,041 | 25,529 | Baisse | 42 |
| | 2006-2007 | 25,529 | 47,350 | hausse | 85,5 |
| Dapola | 1971-1972 | 117,853 | 71,33 | Baisse | 39,5 |
| | 1998-1999 | 71,33 | 124,164 | hausse | 74,1 |

4.1.3 Analyse de la stationnarité des séries de pluies annuelles

La méthode de détection de la première et de la deuxième rupture des séries de modules a été utilisée également sur les séries de pluies annuelles. Les résultats des tests de rupture sont présentés dans le tableau 8. D'après le test de Pettitt et Lee et Heghinian, la première rupture a été détectée en 1970 sur les stations étudiées situées en amont et en aval du barrage de Léry. Elle est caractérisée par une baisse des pluies annuelles dont la reprise a été constatée au début des années 1990.

Tableau 8. Détection de la première et deuxième rupture des séries de pluies annuelles des bassins versants : test de Pettitt et Lee et Heghinian

| Stations | | En amont du barrage de Léry | En aval du barrage de Léry | |
|------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------|
| | | Samendéni | Boromo | Dapola |
| Première rupture | Test de Pettitt | 1970-1971 | 1970-1971 | 1970-1971 |
| | Test de Lee et Heghinian | 1970-1971 | 1970-1971 | 1969-1970 |
| Deuxième rupture | Test de Pettitt | 1990-1991 | 1990-1991 | Absent |
| | Test de Lee et Heghinian | 1990-1991 | 1990-1991 | 1993-1994 |

Il ressort de l'analyse de la stationnarité des séries de modules et de pluies que le réservoir d'eau de Léry est sous l'influence d'une variabilité climatique marquée par une baisse de la pluviométrie depuis les années 1970 dont un retour à la hausse semble s'établir au début des années 1990. Nous avons jugé opportun de simuler l'exploitation du réservoir de Léry suivant deux scénarios de remplissage de la retenue à l'horizon 2030.

4.2 Etude du bilan de fonctionnement de la retenue du Sourou

4.2.1 Variation saisonnière du niveau de remplissage de la retenue du Sourou

L'évolution interannuelle du niveau moyen mensuel de 1985 à 2016 (figure 10) montre que les plus bas niveaux de la retenue du Sourou ont été observés dans les mois de Mai et Juin tandis que les plus hauts niveaux entre Octobre et Novembre. Ces derniers marquent le début de la campagne agricole sèche dans la vallée du Sourou.

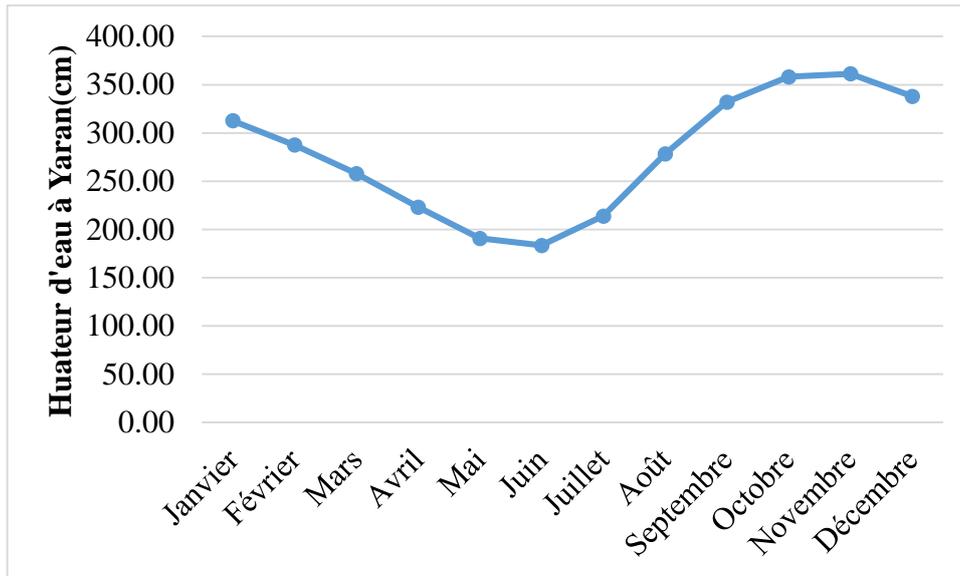


Figure 13. Evolution interannuelle du niveau d'eau moyen mensuel de la retenue du Sourou (1985-2016)

En aval du barrage de Léry sont lâchés en permanence des volumes d'eau qui contribuent à l'hydraulicité du Mouhoun inférieur.

4.2.2 Contribution des lâchers d'eau des vannes de Léry sur le Mouhoun inférieur

La figure 11 nous montre le poids des lâchers d'eau dans le soutien à l'hydraulicité du Mouhoun en période sèche. Il ressort que les lâchers des vannes de 1985 à 2016 ont contribué à assurer un écoulement permanent du Mouhoun en aval du barrage de Léry en saison sèche, notamment dans les mois de février, mars et avril.

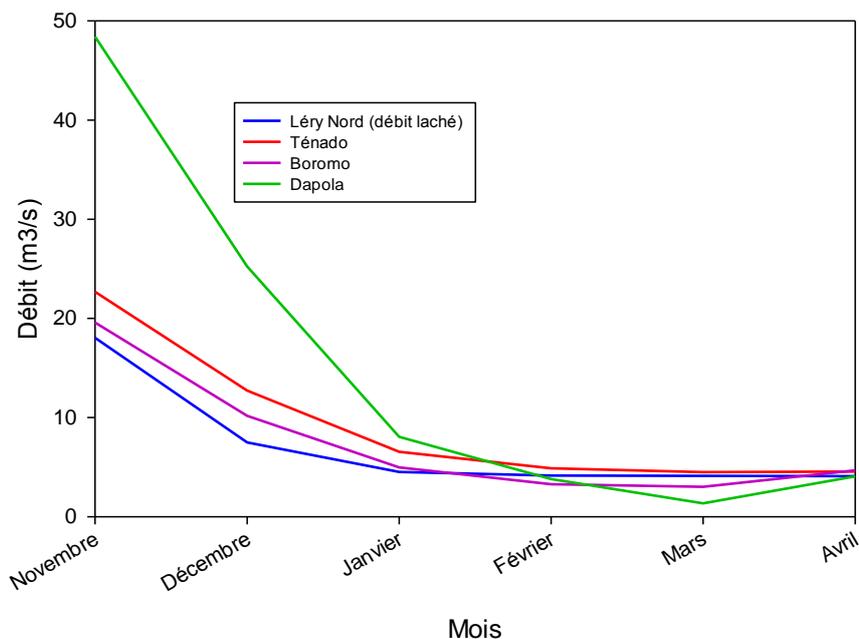


Figure 14. Soutien des lâchers d'eau à l'écoulement en aval du barrage de Léry (1985-2004)

Cette analyse montre l'importance des lâchers d'eau permanents dans la contribution à la pérennité du Mouhoun inférieur. Aussi faut-il noter qu'en considérant l'efficience des débits mensuels lâchés sur les stations de Ténado et Boromo, le mois de mars est le plus défavorable avec 27% de pertes au cours du transit.

En considérant ce coefficient d'efficience en saison sèche, les débits mensuels à observer en moyenne sur les stations de pompage couvrent largement les prélèvements d'eau au niveau des stations de pompage de Ténado et Boromo (Tableau 9).

Tableau 9. Comparaison entre le débit lâché, le débit au niveau des stations de pompage et le débit objectif

| Stations de pompage | Ténado | | Boromo | |
|---------------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| | Débit lâché (m ³ /s) | Débit estimé (m ³ /s) | Débit objectif (m ³ /s) | Débit objectif (m ³ /s) |
| 3 | 2,19 | 1,35 | 2,19 | 1,05 |
| 4 | 2,92 | 1,35 | 2,92 | 1,05 |

4.2.3 Simulation de l'exploitation du réservoir de Léry à l'horizon 2030 en saison sèche

En fonction du débit réservé, l'exploitation de la retenue du Sourou a été simulée en année quinquennale et décennale sèche (Tableaux 12, 13, 14 et 15) à partir des quantiles sur les apports en eau au barrage et des volumes d'eau à la fin du mois d'octobre marquant le début de notre simulation (Annexe VII, page VIII). Il ressort des résultats des simulations d'une manière générale que la ressource en eau existe dans le réservoir pendant la saison sèche aussi bien en année décennale et quinquennale sèche. Cependant, cette ressource ne serait pas exploitable pendant le mois d'Avril pour les besoins d'irrigation en année quinquennale sèche (sous le scénario 2) et décennale sèche (sous les scénarios 1 et 2) à l'horizon 2030. En effet, en prenant en compte les cotes d'installation actuelles des prises d'eau (250,2 m) des périmètres irrigués de la vallée du Sourou, elles seraient dénoyées dans le mois d'Avril, ce qui causerait l'arrêt de l'alimentation en eau des périmètres irrigués dans la vallée du Sourou.

Tableau 10. Simulation de la retenue du Sourou en année quinquennale sèche sous le scénario 1

| Désignation | Novembre | Décembre | Janvier | Février | Mars | Avril | Mai | Juin | Juillet | Août | Septembre | Octobre |
|---|------------|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|------|------|---------|------|-----------|---------|
| Volume en début de mois(Mm ³) | 253,38 | 244,1 | 196,5 | 133,3 | 85,7 | 36,5 | 17,2 | | | | | |
| Apports (Mm ³) | 107,8 | 76,7 | 60,1 | 44,7 | 38,5 | 23,4 | | | | | | |
| Volume final en début de mois(Mm ³) | 361 | 320,8 | 256,6 | 178,0 | 124,2 | 59,9 | | | | | | |
| Cote en début de mois (m) | 252 | 251,9 | 251,7 | 251,3 | 251 | 250,3 | | | | | | |
| Surface en début mois (ha) | 37438 | 33000 | 25000 | 17000 | 13131 | 5200 | | | | | | |
| Infiltration (mm) | 60 | 62 | 62 | 56 | 62 | 60 | | | | | | |
| Evaporation (mm) | 216,9 | 247,5 | 260,1 | 277,2 | 344,7 | 296,1 | | | | | | |
| Pertes (mm) | 277 | 310 | 322 | 333 | 405 | 358 | | | | | | |
| Volume des pertes(Mm ³) | 103,7 | 102,1 | 80,5 | 56,6 | 53,1 | 18,6 | | | | | | |
| Besoins agricoles (Mm ³) | 5,2 | 13,7 | 34,3 | 28,0 | 26,1 | 15,8 | | | | | | |
| besoins pastoraux(Mm ³) | 0,42 | 0,44 | 0,44 | 0,39 | 0,44 | 0,42 | | | | | | |
| besoins aval(Mm ³) | 7,78 | 8,04 | 8,04 | 7,26 | 8,04 | 7,78 | | | | | | |
| besoins totaux(Mm ³) | 13,40 | 22,17 | 42,77 | 35,65 | 34,57 | 24,00 | | | | | | |
| Volume en fin de mois(Mm ³) | 244,1 | 196,5 | 133,3 | 85,7 | 36,5 | 17,2 | | | | | | |

Tableau 11. Simulation de la retenue du Sourou en année décennale sèche sous le scénario 1

| Désignation | Novembre | Décembre | Janvier | Février | Mars | Avril | Mai | Juin | Juillet | Août | Septembre | Octobre |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------|------|---------|------|-----------|---------|
| Volume en début de mois(Mm ³) | 214,55 | 209,6 | 172,3 | 117,3 | 71,7 | 33,0 | 10,4 | | | | | |
| Apports (Mm ³) | 93,0 | 68,7 | 52,7 | 38,4 | 31,7 | 16,9 | | | | | | |
| Volume final en début de mois(Mm ³) | 307 | 278 | 225,1 | 155,8 | 103,4 | 49,9 | | | | | | |
| Cote en début de mois (m) | 251,8 | 251,7 | 251,5 | 251,1 | 250,7 | 249,9 | | | | | | |
| Surface en début mois (ha) | 30527 | 27072 | 20162 | 14537 | 8852 | 4335 | | | | | | |
| Infiltration (mm) | 60 | 62 | 62 | 56 | 62 | 60 | | | | | | |
| Evaporation (mm) | 216,9 | 247,5 | 260,1 | 277,2 | 344,7 | 296,1 | | | | | | |
| Pertes (mm) | 277 | 310 | 322 | 333 | 405 | 358 | | | | | | |
| Volume des pertes(Mm ³) | 84,5 | 83,8 | 64,9 | 48,4 | 35,8 | 15,5 | | | | | | |
| Besoins agricoles (Mm ³) | 5,2 | 13,7 | 34,3 | 28,0 | 26,1 | 15,8 | | | | | | |
| besoins pastoraux(Mm ³) | 0,42 | 0,44 | 0,44 | 0,39 | 0,44 | 0,42 | | | | | | |
| besoins aval(Mm ³) | 7,78 | 8,04 | 8,04 | 7,26 | 8,04 | 7,78 | | | | | | |
| besoins totaux(Mm ³) | 13,40 | 22,17 | 42,77 | 35,65 | 34,57 | 24,00 | | | | | | |
| Volume en fin de mois(Mm ³) | 209,6 | 172,3 | 117,3 | 71,7 | 33,0 | 10,4 | | | | | | |

Tableau 12. Simulation de la retenue du Sourou en année quinquennale sèche sous le scénario 2

| Désignation | Novembre | Décembre | Janvier | Février | Mars | Avril | Mai | Juin | Juillet | Août | Septembre | Octobre |
|---|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------|------|---------|------|-----------|---------|
| Volume en début de mois(Mm ³) | 253,38 | 241,5 | 188,2 | 126,7 | 75,6 | 35,3 | 12,3 | | | | | |
| Apports (Mm ³) | 107,8 | 76,7 | 60,1 | 44,7 | 38,5 | 23,4 | | | | | | |
| Volume final en début de mois(Mm ³) | 361,2 | 318,2 | 248,3 | 171,5 | 114,1 | 58,6 | | | | | | |
| Cote en début de mois (m) | 252 | 251,9 | 251,6 | 251,3 | 250,8 | 250,1 | | | | | | |
| Surface en début mois (ha) | 37438 | 33983 | 23617,2 | 17350 | 10278,6 | 5500 | | | | | | |
| Infiltration (mm) | 60 | 62 | 62 | 56 | 62 | 60 | | | | | | |
| Evaporation (mm) | 216,9 | 247,5 | 260,1 | 277,2 | 344,7 | 296,1 | | | | | | |
| Pertes (mm) | 277 | 310 | 322 | 333 | 405 | 358 | | | | | | |
| Volume des pertes(Mm ³) | 103,7 | 105,2 | 76,1 | 57,8 | 41,6 | 19,7 | | | | | | |
| Besoins agricoles (Mm ³) | 5,2 | 13,7 | 34,3 | 28,0 | 26,1 | 15,8 | | | | | | |
| besoins pastoraux(Mm ³) | 0,42 | 0,44 | 0,44 | 0,39 | 0,44 | 0,42 | | | | | | |
| besoins aval(Mm ³) | 10,37 | 10,71 | 10,71 | 9,68 | 10,71 | 10,37 | | | | | | |
| besoins totaux(Mm ³) | 15,99 | 24,85 | 45,45 | 38,07 | 37,25 | 26,59 | | | | | | |
| Volume fin de mois(Mm ³) | 241,5 | 188,1 | 126,7 | 75,5 | 35,2 | 12,3 | | | | | | |

Tableau 13. Simulation de la retenue du Sourou en année décennale sèche sous le scénario 2

| Désignation | Novembre | Décembre | Janvier | Février | Mars | Avril | Mai | Juin | Juillet | Août | Septembre | Octobre |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----|------|---------|------|-----------|---------|
| Volume en début de mois(Mm ³) | 214,55 | 207,0 | 167,1 | 109,4 | 61,3 | 25,7 | 2,3 | | | | | |
| Apports (Mm ³) | 93,0 | 68,7 | 52,7 | 38,4 | 31,7 | 16,9 | | | | | | |
| Volume final en début de mois(Mm ³) | 307,5 | 275,7 | 219,8 | 147,8 | 93,1 | 42,7 | | | | | | |
| Cote en début de mois (m) | 251,8 | 251,7 | 251,5 | 251,1 | 250,6 | 249,7 | | | | | | |
| Surface en début mois (ha) | 30527 | 27072 | 20162 | 14537,2 | 7426,2 | 3856,2 | | | | | | |
| Infiltration (mm) | 60 | 62 | 62 | 56 | 62 | 60 | | | | | | |
| Evaporation (mm) | 216,9 | 247,5 | 260,1 | 277,2 | 344,7 | 296,1 | | | | | | |
| Pertes (mm) | 277 | 310 | 322 | 333 | 405 | 358 | | | | | | |
| Volume des pertes(Mm ³) | 84,5 | 83,8 | 64,9 | 48,4 | 30,1 | 13,8 | | | | | | |
| Besoins agricoles (Mm ³) | 5,2 | 13,7 | 34,3 | 28,0 | 26,1 | 15,8 | | | | | | |
| besoins pastoraux(Mm ³) | 0,42 | 0,44 | 0,44 | 0,39 | 0,44 | 0,42 | | | | | | |
| besoins aval(Mm ³) | 10,37 | 10,71 | 10,71 | 9,68 | 10,71 | 10,37 | | | | | | |
| besoins totaux(Mm ³) | 15,99 | 24,85 | 45,45 | 38,07 | 37,25 | 26,59 | | | | | | |
| Volume fin de mois(Mm ³) | 207,0 | 167,1 | 109,4 | 61,3 | 25,7 | 2,3 | | | | | | |

V. DISCUSSIONS

Les discussions que nous portons dans cette partie sont relatives aux résultats précédents relatifs à l'impact du climat et du barrage de Léry sur le régime hydrologique du Mouhoun d'une part et d'autre part à l'exploitation du réservoir de Léry à l'horizon 2030 pendant la saison sèche.

5.1 Impact du climat et du barrage de Léry sur le Mouhoun

La distribution des indices de modules appliqués sur les stations hydrométriques en amont et en aval du barrage de Léry nous indique une période de sécheresse hydrologique qui a débuté au début des années 1970. Cette période d'environ une vingtaine d'années sur les écoulements serait intimement liée à la sécheresse climatique apparue dans les années 1970 en Afrique soudano-sahélienne comme l'ont mentionné Carbonnel et Hubert (1985) et Paturel et al.(1998). Cette situation confirme que le bassin du Mouhoun n'a pas été épargné de cette sécheresse climatique sur l'évolution des écoulements annuels. Cette période déficitaire sur les écoulements annuels prend fin au milieu des années 1990, et qui marque le début d'une nouvelle ère hydrologique sur toutes les stations étudiées caractérisée par une alternance d'années humides et sèches. Il ressort donc que malgré la réalisation des aménagements hydroagricoles, les écoulements moyens annuels observés sur les stations hydrométriques de Boromo et Dapola en aval du barrage de Léry présentent pratiquement la même configuration hydrologique, à savoir une alternance d'années humides et sèches que ceux observés à la station hydrométrique de Samendéni qui est non influencée par le barrage de Léry.

L'étude de l'homogénéité des séries de module et de pluie nous a permis de confirmer certaines analyses faites sur l'évolution des indices de débit. A partir des tests statistiques de détection de rupture, il a été noté les changements de comportement majeur dans la distribution des séries chronologiques.. Notons que les résultats de la méthode de segmentation de Hubert coïncident avec ceux des tests de Pettitt et Lee et Heghinian.

La première rupture au niveau des séries de pluies annuelles décelée au début des années 1970 sur la station non influencée à savoir Samendéni et celles influencées dont Boromo et Dapola traduit une baisse des pluies et met en évidence l'occurrence de cette rupture climatique dans le bassin du Mouhoun au Burkina Faso. Ce constat corrobore avec la thèse de Carbonnel et Hubert (1985) qui ont même proposé l'année 1971 comme année de rupture dans les séries de pluie au Burkina Faso. En comparant avec les résultats sur les séries de modules, il ressort que

la rupture la plus importante sur notre chronique de données (1955-2012) est apparue au début des années 1970. Les écoulements dans le bassin du Mouhoun étant intimement liés aux pluies, il ressort que la rupture climatique a entraîné celle hydrologique à travers les écoulements annuels, bien avant la réalisation du barrage de Léry en 1976. Cette coïncidence des dates de rupture sur les séries pluviométriques et hydrométriques a permis de confirmer l'occurrence de la sécheresse hydrologique sur les stations étudiées conformément à l'analyse de la distribution des indices de débits. L'importance de cette date de rupture qui traduit les effets d'une sécheresse précédente a été relevée dans les travaux de Ndiaye (2003). En effet, selon lui sur la période allant de 1955 à 2002, la rupture hydrologique est observée en 1970 à la station de Samendéni et en 1971 aux stations de Boromo et Dapola.

La deuxième rupture détectée par les tests de Pettitt et Lee et Heghinian sur les séries de pluies annuelles à partir des années 1990 marque une nouvelle période climatique aussi bien en amont du barrage de Léry qu'en aval. La méthode de segmentation de Hubert a permis de déterminer l'ampleur du changement décelé pendant cette période qui est de l'ordre de 50% d'excédent par rapport à la période de sécheresse précédente sur toutes les stations.

Cette reprise des pluies a aussi entraîné la reprise des écoulements annuels en amont du barrage de Léry. En effet, la deuxième rupture appliquée sur les séries de modules à la station de Samendéni indique une reprise au début des années 1990 avec un excédent de 45,2 %. Par contre en aval du barrage de Léry, cette rupture apparaît dans les années 2000. Ce décalage entre la rupture au niveau des écoulements et celle climatique montre l'effet conjugué du climat et du barrage sur les écoulements d'une part et d'autre part sur la région climatique de chaque station. La réalisation du barrage de Léry en 1976 et du canal de dérivation du Mouhoun dans le Sourou en 1984 en aval du barrage a certainement contribué à réduire l'apport annuel en aval du barrage, ce qui a considérablement eu une influence sur la tendance à la baisse de l'hydraulicité du Mouhoun. Ce maintien de la tendance à la baisse en dépit de la reprise des pluies explique le décalage entre l'année de rupture des séries d'écoulements annuels et celle des séries de pluies annuelles. Notons par ailleurs que la réalisation des aménagements majeurs de 1976 et 1984 n'ont pas eu comme on pourrait le constater un effet significatif immédiat sur la stationnarité des séries de débits à pas de temps annuel, à savoir des ruptures aux dates de réalisation des aménagements. C'est dire aussi que les lâchers d'eau au niveau des vannes ont permis d'améliorer l'hydraulicité du Mouhoun en aval même si la tendance à la baisse s'est prolongée jusqu'aux années 2000.

5.2 Exploitation du réservoir de Léry à l'horizon 2030

L'étude de l'exploitation du réservoir de Léry nous a indiqué la situation future du bilan de fonctionnement du réservoir à l'horizon 2030.

En année quinquennale sèche avec un débit lâché de $3\text{m}^3/\text{s}$ et décennale sèche quel que soit le débit lâché, les prises d'irrigation du périmètre de la vallée du Sourou risquent d'être dénoyées au mois d'Avril. Cependant, cette position des prises d'irrigation hors de l'eau ne signifie pas pour autant qu'il n'existe pas d'eau dans le réservoir, comme on le constate avec le scénario 2 en année décennale sèche (volume de $2,3\text{ Mm}^3$ à la fin du mois d'avril). Ainsi, on pourrait penser à une possibilité d'abaisser les prises d'eau d'irrigation pour pouvoir acheminer l'eau vers les périmètres. Il se trouve que ces ressources en eau en dessous du niveau des prises sont pratiquement inexploitable du fait de la topographie très plate de la vallée ($0,027\text{m}/\text{km}$) d'une part et d'autre part du souci de préserver la vie aquatique dans ce réservoir. En effet, le réservoir de Léry abrite des hippopotames et les activités de pêche sont aussi menées par les riverains, d'où l'impérieuse nécessité de réserver un volume d'eau dans le réservoir surtout en saison sèche. Cette inquiétude a été également signalée par Tecresult international Ltd (2010) après avoir étudié les deux scénarios sur une période de 43 années (de 1956 à 2008). Il signale un déficit en eau du réservoir de Léry de 21 à 24 % respectivement pour les scénarios 1 et 2 en année quinquennale sèche. Saouto (2016) évoque l'agrandissement sous la pression démographique, par le développement de périmètres irrigués non structurés dits « informels » autour des grands périmètres tels que Banzon et Kou en amont du barrage de Léry comme étant une des causes de cette pénurie d'eau en campagne sèche. Il a estimé ces déficits de l'ordre de 2,62% à 29,8% des besoins.

La simulation de l'exploitation du réservoir de Léry a pris uniquement en compte les besoins pour l'alimentation en eau potable en aval du barrage de Léry. La prise en compte de ces besoins en eau dans les débits minima de 3 à $4\text{ m}^3/\text{s}$ en saison sèche a été évaluée à partir de l'efficacité de débit lâché basée sur les débits observés. Le nombre élevé de lacunes dans les séries de données utilisées pour cette estimation (station de Léry nord et Ténado) conduirait à surestimer cette efficacité de lâcher qui est de l'ordre de 73% et apparue dans le mois de Mars comme mois défavorable. Nous n'oublions pas également la prise en compte des contributions des nappes à l'écoulement du cours d'eau pendant la période sèche. Dans tous les cas, une

augmentation du débit réservé en vue de satisfaire les besoins en eau en aval du barrage de Léry aurait un impact sur la sécurisation en eau des périmètres irrigués du Sourou.

Les multiples recours aux eaux de Mouhoun pour l'irrigation, l'alimentation en eau potable, les industries et le cheptel suscite plus d'attention quant à la satisfaction des besoins en eau au profit des différents usages du bassin du Mouhoun supérieur. L'avant-projet détaillé (APD) du barrage de Samendéni réalisée en 2009 par le Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques (MAHRH) soutient que la construction du barrage de Samendéni situé en amont du barrage de Léry, avec ces 20000 ha à irriguer, en incluant les besoins de la vallée du Sourou engendrerait l'occurrence de 22 années sur 38 comme déficitaires dans le sous bassin du Mouhoun supérieur. Dans ce contexte, il apparaît judicieux et impératif de conduire un plan de gestion intégrée du bassin du Mouhoun supérieur à long terme dont la vallée du Sourou fait partie pour garantir les besoins en eau actuels et futurs comme l'ont souligné Saouto (2016) et le Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des ressources Halieutiques (MAHRH) (2009).

VI. CONCLUSION

Cette présente étude visait à améliorer une aide à la décision dans une gestion optimale et efficiente du réservoir de Léry à l'horizon 2030.

Les principaux résultats montrent l'impact du climat sur les écoulements moyens annuels du bassin du Mouhoun surtout durant les années 1970, avant la réalisation des aménagements hydrauliques sur le Mouhoun et le Sourou. L'apparition d'une période plus humide au début des années 1990 ne s'est traduite généralement qu'à une reprise des écoulements surtout en amont du barrage. Tandis qu'en aval de celui-ci, cette reprise provient en grande partie aux lâchers fréquents du barrage. Ce constat démontre que l'importance des aménagements sur le Mouhoun n'a pas eu un effet immédiat sur les écoulements annuels surtout en période de basses eaux. Pour mieux apprécier les impacts du climat et des divers prélèvements d'eau à l'aval du barrage Léry sur l'hydraulicité, il s'avère nécessaire de procéder à une reconstitution des débits minima sur la station de Boromo (située à une centaine de kilomètres à l'aval du barrage).

L'exploitation de ce réservoir notamment en année décennale sèche indique une non satisfaction des besoins en eau des usages à l'horizon 2030. Cette situation offre une opportunité aux décideurs de l'Autorité du bassin du Mouhoun de définir un plan de gestion durable des ressources en eau orienté vers l'exploration des eaux souterraines dans la vallée du Sourou, l'adoption de techniques d'irrigation plus économes (aspersion, goutte à goutte). Par ailleurs, la mise en œuvre d'un schéma d'aménagement et de gestion des eaux du bassin du Mouhoun supérieur s'avère nécessaire pour prendre en compte les projets à réaliser autour des barrages de Samendéni et de Léry.

VII. OUVRAGES CONSULTÉS

- Assani, A. , Gravel, E., Buffin Belanger, T., & Roy, A. . (2004). Impacts des barrages sur les débits minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec(Canda). *Revue des Sciences de l'Eau*, 18(1), 103-127.
- Carbonnel, J. ., & Hubert, P. (1985). Sur la sécheresse au Sahel d'Afrique de l'Ouest. Une rupture climatique dans les séries pluviométriques du Burkina Faso (ex. Haute-Volta). *Comptes Rendus, série II*, 301(n°13), 941-944.
- Direction générale des ressources en eau. (2012). *Annuaire hydrologique national*.
- Lubes-Niel, H. , Masson, J. , Paturol, J. , & Servat, E. (1998). Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des Sciences de l'Eau*, 11(03), 383-408.
- Millenium Challenge Account(Burkina Faso). (2012). *Rapport d'état des lieux des ressources en eau de l'espace de compétence de l'agence de l'eau du Mouhoun* (Vol. version définitive).
- Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des ressources Halieutiques (MAHRH). (2009). *Etude d'Avant-Projet Définitif (APD) du barrage de Samendéni*.
- Ministère de l'eau et de l'environnement(MEE). (1998). *Politiques et stratégies en matière d'eau*.
- Mohamed Talla Cissé, Soussou Sambou, Yaya Dieme, Clément Diatta, & Mamadou Bop. (2014). Analyse des écoulements du rivière Sénégal de 1960 à 2008, 27(02), 167-187.
- Moniod, F., & Sechet, P. (1977). *Le bassin du rivière Volta*.
- Ndiaye, B. (2003). *Impacts du climat et des aménagements sur le régime hydrologique du Mouhoun*. 2iE.

- Paturel, J. E., Servat, E., kouame, B., Travalgo, M., Lubes, H., Marieu, B., & Masson, J. M. (1998). variabilité des régimes pluviométriques et hydrologiques en cette fin de siècle en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne. *Sud sciences et technologies*, (2), 44-52.
- Programme de Valorisation des Ressources en Eau de l'Ouest(PVREO). (2007). *Analyse thématique du secteur de l'eau dans le bassin du Mouhoun. rapport définitif*.
- Saouto, A. (2016). *Optimisation des allocations des eaux de surface dans une vision prospective : application du modèle WEAP 21 au complexe Mouhoun sourou au Burkina Faso*. 2iE.
- Somda, J., Zonon, A., Ouabda, J. M., & Huberman, D. (2010). *valeur économique de la vallée du Sourou*.
- Tecsalt international Ltd. (2010). *Assistance Technique pour l'Élaboration de Dossiers d'Avant Projets Détaillés des Sous Composantes Di et Léry de la Composante Gestion de l'Eau et Irrigation, Burkina Faso - AD2 : Rapport du modèle de simulation des crues du système Mouhoun Sourou*.

VIII. ANNEXES

| | |
|--|-------|
| Annexe I. Station hydrométrique de Yaran sur le Sourou (Photo prise en mai 2017)..... | IV |
| Annexe II. Talus aval en rive gauche de la digue du barrage de Léry (Photo prise en mai 2017) | IV |
| Annexe III. Abreuvement du bétail dans le lit du Sourou (Photo prise en Mai en 2017)..... | V |
| Annexe IV. Estimation des débits écologiques du bassin du Mouhoun (source : SDAGE du Mouhoun)..... | VI |
| Annexe V. Corrélation entre débits annuels de Samendéni et Nwokuy avant et après la réalisation du barrage de Léry..... | VII |
| Annexe VI. Caractéristiques topographiques du réservoir du barrage de Léry | VIII |
| Annexe VII. Analyse fréquentielle des séries de débits mensuels (apports) | IX |
| Annexe VIII. Tests de rupture sur les modules du Mouhoun à Samendéni (1956-2012)..... | XI |
| Annexe IX. Tests de rupture sur les modules du Mouhoun à Samendéni (1972-2012) | XII |
| Annexe X. Tests de rupture sur les modules du Mouhoun à Boromo (1955-2012) | XIII |
| Annexe XI. Tests de rupture sur les modules du Mouhoun à Boromo (1972-2012) | XIV |
| Annexe XII. Tests de rupture sur les modules du Mouhoun à Dapola (1955-2012) | XV |
| Annexe XIII. Tests de rupture sur les modules du Mouhoun à Dapola (1972-2012) | XVI |
| Annexe XIV. Tests de rupture sur les pluies annuelles à Samendéni (1955-2009)..... | XVII |
| Annexe XV. Tests de rupture sur les pluies annuelles à Boromo (1955-2009)..... | XVIII |
| Annexe XVI. Tests de rupture sur les pluies annuelles à Boromo (1971-2009)..... | XIX |
| Annexe XVII. Tests de rupture sur les pluies annuelles à Dapola (1955-2009)..... | XX |
| Annexe XVIII. Tests de rupture sur les pluies annuelles à Dapola (1971-2009)..... | XXI |

Annexe I. Station hydrométrique de Yaran sur le Sourou (Photo prise en mai 2017)



Annexe II. Talus aval en rive gauche de la digue du barrage de Léry (Photo prise en mai 2017)



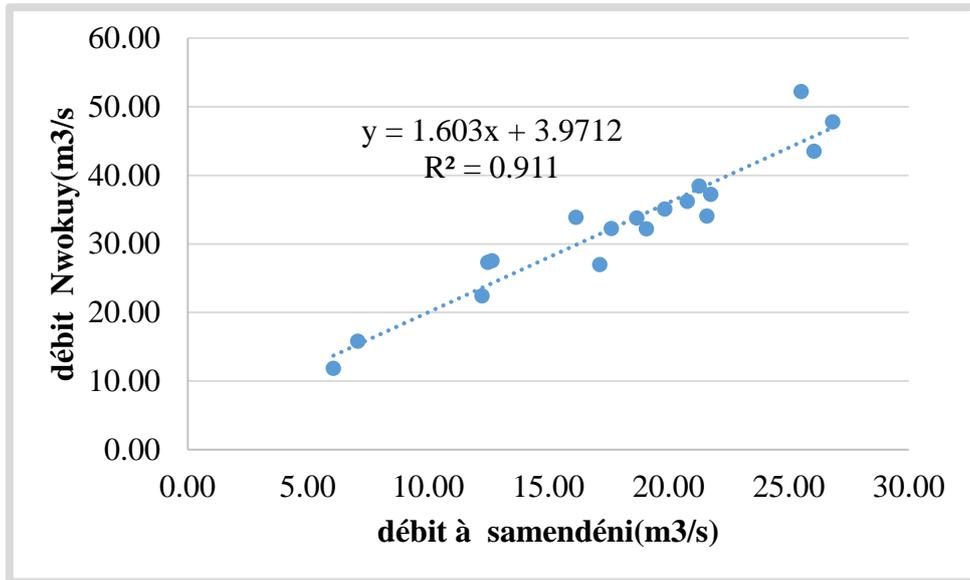
Annexe III. Abreuvement du bétail dans le lit du Sourou (Photo prise en Mai en 2017)



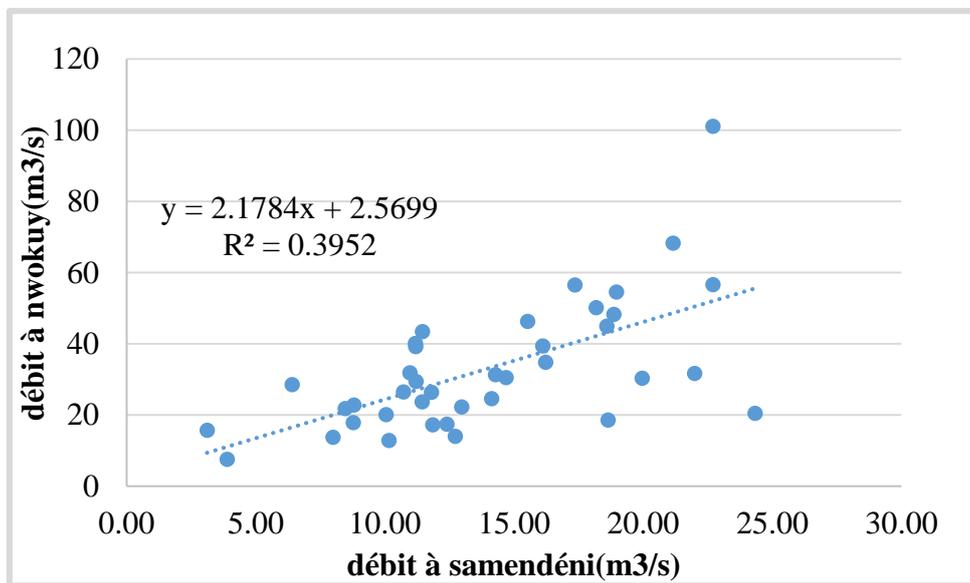
Annexe IV. Estimation des débits écologiques du bassin du Mouhoun (source : SDAGE du Mouhoun)

| N° | Cours d'eau | Site d'observation | Site de suivi et situation actuelle du suivi | Débit environnemental (m³/s) | Débit moyen mensuel exceptionnel (m³/s) |
|-----------|--------------------|---------------------------|--|--|---|
| 1 | Mouhoun | Samendéni | Station hydrométrique existante | 1,8 | 0,9 |
| 2 | Siou | Aval du Siou | Station hydrométrique à créer | 0,3 | 0,2 |
| 3 | Mouhoun | Entrée au Sourou | Station de jaugeage existante. A équiper pour une mesure de débit en continu | 1,8 | 0,9 |
| 4 | Mouhoun | Manimenso | Station hydrométrique existante | 4,7 | 3,0 |
| 5 | Vranso | Ninion | Station hydrométrique existante, hors service | 0,5 | 0,2 |
| 6 | Mouhoun | Boromo | Station hydrométrique existante | 1,0 | 0,5 |
| 7 | Grand Balé | Pâ | Station hydrométrique existante | 0,5 | 0,2 |
| 8 | Mouhoun | Ooussa | Station hydrométrique existante | 2,5 | 0,4 |
| 9 | Bougouriba | Diébougou | Station hydrométrique existante | 0,5 | 0,2 |
| 10 | Bambassou | Batié | Station hydrométrique existante | 0,3 | 0,2 |
| 11 | Mouhoun | Noumbiel | Station hydrométrique existante | 5,3 | 0,6 |

Annexe V. Corrélation entre débits annuels de Samendéni et Nwokuy avant et après la réalisation du barrage de Léry



a) Avant 1976



b) Après 1976

Annexe VI. Caractéristiques topographiques du réservoir du barrage de Léry

| Cote (m) | Volume (Mm ³) | Surface(Ha) |
|----------|---------------------------|-------------|
| 246,5 | 0 | 0 |
| 247 | 0 | 0,2 |
| 247,5 | 0,7 | 275 |
| 248 | 3,4 | 816 |
| 248,5 | 9,4 | 1578 |
| 249 | 19,8 | 2597 |
| 249,5 | 34,8 | 3377 |
| 250 | 54,7 | 4575 |
| 250,5 | 81,1 | 6000 |
| 251 | 128,9 | 13131 |
| 251,5 | 212,1 | 20162 |
| 252 | 356,2 | 37438 |
| 252,5 | 580,7 | 52399 |
| 253 | 912,1 | 80159 |
| 253,5 | 1404,9 | 116961 |
| 254 | 2160,8 | 185405 |

Ces caractéristiques topographiques ont été actualisées dans le cadre de l'étude relatif au modèle de simulation des crues du système Mouhoun Sourou conduite par le bureau d'études Tecsalt international en 2010.

Annexe VII. Analyse fréquentielle des séries de débits mensuels (apports)

Les paramètres de la loi sont : X_o = paramètre de position et s = paramètre d'échelle

Si on désigne par m : la moyenne et σ l'écart-type, on obtient :

$$X_o = m - 0.577 * \sigma$$

$$s = 0.78 * \sigma$$

Les quantiles sont déterminés à travers l'équation suivante :

$$X(fnd) = X_o + u(fnd) * s$$

Avec $X(fnd)$: le quantile de fréquence fnd

$u(fnd)$: la variable de Gumbel

- caractéristiques de la loi de Gumbel appliqué à chaque série de débits mensuels (apports mensuels à la retenue) pendant la saison sèche

| Mois | Taille de l'échantillon | Moyenne | Ecart-type | Paramètre de position | Paramètre d'échelle |
|----------|-------------------------|---------|------------|-----------------------|---------------------|
| Novembre | 23 | 58,5 | 20,53 | 49,22 | 16,02 |
| Décembre | 21 | 37,33 | 10,6 | 32,56 | 8,28 |
| Janvier | 20 | 30,5 | 9,82 | 26,8 | 7,66 |
| Février | 22 | 26,15 | 9,32 | 21,96 | 7,28 |
| Mars | 22 | 21,8 | 9,05 | 17,74 | 7,06 |
| avril | 20 | 16,3 | 8,9 | 12,31 | 6,93 |

- Estimation des apports mensuels en m^3/s à la retenue en saison sèche

| Fréquence | Novembre | Décembre | Janvier | Février | Mars | Avril |
|--------------------|----------|----------|---------|---------|--------|-------|
| Quinquennale sèche | 41,596 | 28,620 | 22,431 | 18,496 | 14,375 | 9,009 |
| Décennale sèche | 35,861 | 25,655 | 19,687 | 15,890 | 11,846 | 6,527 |

- Apports moyens extérieurs en Mm^3 à la retenue du Sourou en fonction des périodes de retour pendant la saison sèche

| Année | Période de retour | Novembre | Décembre | Janvier | Février | Mars | Avril |
|-------|-------------------|----------|----------|---------|---------|------|-------|
| sèche | 5 | 107,8 | 76,7 | 60,1 | 44,7 | 38,5 | 23,4 |
| | 10 | 93,0 | 68,7 | 52,7 | 38,4 | 31,7 | 16,9 |

- Volumes d'eau à la fin du mois d'octobre en Mm³ en fonction des périodes de retour pendant la saison sèche

| Année | Fréquence | Période de retour (an) | Volume (m ³) | Volume (Mm ³) |
|-------|-----------|------------------------|--------------------------|---------------------------|
| sèche | 0,200 | 5 | 253 382 029 | 253,4 |
| | 0,100 | 10 | 214 545 656 | 214,5 |

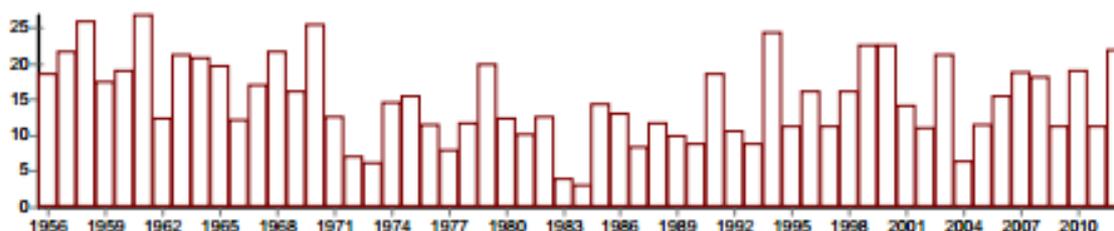
Annexe VIII. Tests de rupture sur les modules du Mouhoun à Samendéni (1956-2012)

Analyse de séries chronologiques

C:\Users\HP EliteBook\Documents\mémoire_tiemtoss_2ie\new\kronostat\Samendéni_56-16.ksl

Identification STATION DE SAMENDENI;
Variable étudiée Modules;
Unité m3/s;
Chronique de 1956 à 2012

Valeurs



Tests de vérification du caractère aléatoire

Test de corrélation sur le RANG

Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **acceptée** au seuil de confiance de 99%
 Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **acceptée** au seuil de confiance de 95%
 Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **acceptée** au seuil de confiance de 90%

Valeur de la variable de calcul: **-1.4594**

Tests de détection de rupture

Test de BUSHAND et ellipse de BOIS

Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 99%
 Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
 Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Méthode non paramétrique de PETTIT

Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 99%
 Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
 Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Probabilité de dépassement de la valeur critique du test: **8.76E-03** en 1970

Méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN

Mode de la fonction densité de probabilité a posteriori de la position du point de rupture: **0.4488** en 1970

Segmentation de HUBERT

Niveau de signification du test de Scheffé: **1%**

| Debut | Fin | Moyenne | Ecart type |
|-------|------|---------|------------|
| 1956 | 1970 | 19.800 | 4.377 |
| 1971 | 1993 | 11.052 | 4.131 |
| 1994 | 2012 | 16.042 | 5.140 |

20/06/2017 09:09:59

Kronostat 1.01 - UMR Hydrosociences Montpellier



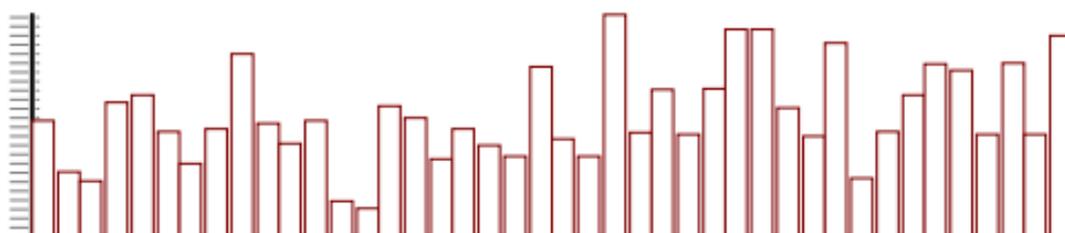
Annexe IX. Tests de rupture sur les modules du Mouhoun à Samendéni (1972-2012)

Analyse de séries chronologiques

C:\Users\HP EliteBook\Documents\mémoire_tiemtoiss_2ie\new\kronostat\Samendéni_71-12.kxi

Identification STATION DE SAMENDENI;
Variable étudiée Modules;
Unité m3/s;
Chronique de 1971 à 2012

Valeurs



Tests de vérification du caractère aléatoire

Test de corrélation sur le RANG

Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **acceptée** au seuil de confiance de 99%

Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **rejetée** au seuil de confiance de 95%

Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Valeur de la variable de calcul: **2.2867**

Tests de détection de rupture

Test de BUISSHAND et ellipse de BOIS

Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 99%

Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%

Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Méthode non paramétrique de PETTITT

Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 99%

Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%

Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Probabilité de dépassement de la valeur critique du test: **3.91E-02** en **1993**

Méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN

Mode de la fonction densité de probabilité *a posteriori* de la position du point de rupture: **0.2373** en **1993**

Segmentation de HUBERT

Niveau de signification du test de Scheffé: **1%**

| Début | Fin | Moyenne | Ecart type |
|-------|------|---------|------------|
| 1971 | 1993 | 11.052 | 4.131 |
| 1994 | 2012 | 16.042 | 5.140 |

20/06/2017 09:15:19

Kronostat 1.01 - UMR Hydrosiences Montpellier



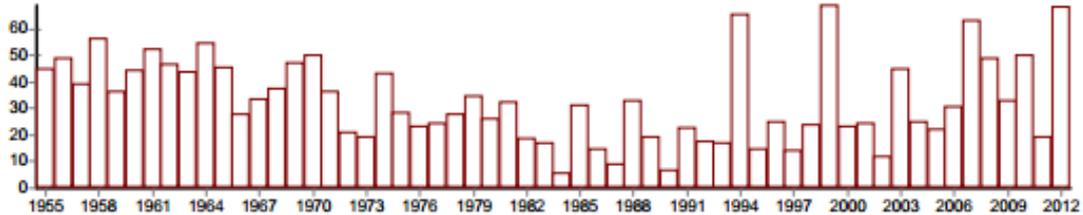
Annexe X. Tests de rupture sur les modules du Mouhoun à Boromo (1955-2012)

Analyse de séries chronologiques

C:\Users\HP EliteBook\Documents\mémoire_tiemtoiss_2ie\new\Boromo_all.ksi

Identification Station hydrométrique de Boromo
Variable étudiée débits annuels
Unité m3/s
Chronique de 1955 à 2012

Valeurs



Tests de vérification du caractère aléatoire

Test de corrélation sur le RANG

Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **acceptée** au seuil de confiance de 99%
 Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
 Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Valeur de la variable de calcul: **-2.3679**

Tests de détection de rupture

Test de BUISSHAND et ellipse de BOIS

Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 99%
 Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
 Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Méthode non paramétrique de PETTITT

Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 99%
 Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
 Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Probabilité de dépassement de la valeur critique du test: **3.07E-03** en **1971**

Méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN

Mode de la fonction densité de probabilité *a posteriori* de la position du point de rupture: **0.2100** en **1971**

Segmentation de HUBERT

Niveau de signification du test de Scheffé: **1%**

| Début | Fin | Moyenne | Ecart type |
|-------|------|---------|------------|
| 1955 | 1971 | 44.041 | 7.742 |
| 1972 | 2006 | 25.529 | 13.733 |
| 2007 | 2012 | 47.350 | 18.278 |

05/05/2017 10:58:15

Khronostat 1.01 - UMR Hydrosiences Montpellier



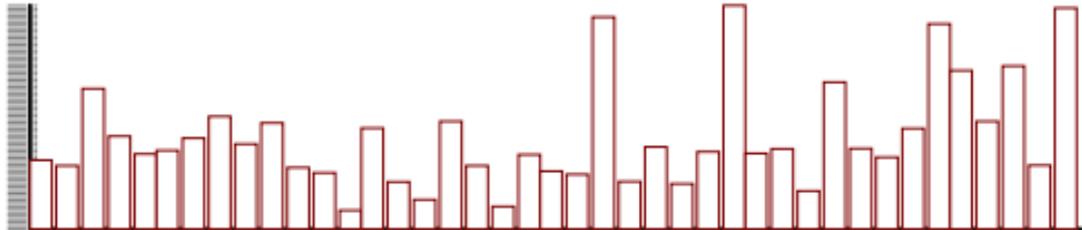
Annexe XI. Tests de rupture sur les modules du Mouhoun à Boromo (1972-2012)

Analyse de séries chronologiques

C:\Users\HP EliteBook\Documents\mémoire_tiemtoss_2ie\new\Boromo_aft_break.ksi

Identification station hydrométrique de Boromo
Variable étudiée débits annuels après rupture
Unité m3/s
Chronique de 1972 à 2012

Valeurs



Tests de vérification du caractère aléatoire

Test de corrélation sur le RANG

Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **acceptée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **acceptée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **acceptée** au seuil de confiance de 90%

Valeur de la variable de calcul: **1.4602**

Tests de détection de rupture

Test de RUISSHAND et ellipse de BOIS

Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Méthode non paramétrique de PETTITT

Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 90%

Méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN

Mode de la fonction densité de probabilité *a posteriori* de la position du point de rupture: **0.1354 en 2006**

Segmentation de HUBERT

Niveau de signification du test de Scheffé: **1%**

| Début | Fin | Moyenne | Ecart type |
|--------------|--------------|------------------|------------------|
| 1972 2007 | 2006 2012 | 25.529 47.350 | 13.733 18.278 |

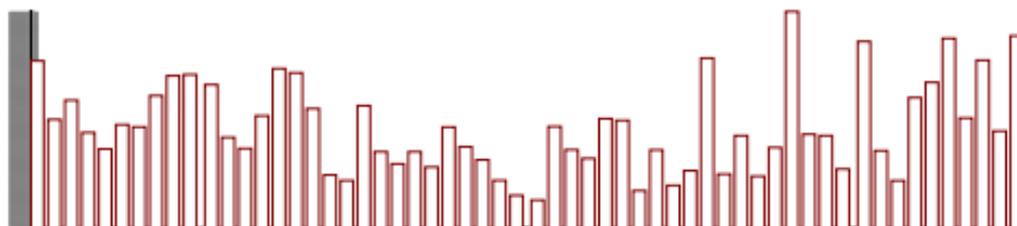
Annexe XII. Tests de rupture sur les modules du Mouhoun à Dapola (1955-2012)

Analyse de séries chronologiques

C:\Users\HP EliteBook\Documents\mémoire_tiemoss_2ie\new\Dapola_all.kxi

Identification station hydrométrique de Dapola
Variable étudiée débits annuels
Unité m3/s
Chronique de 1955 à 2012

Valeurs



Tests de vérification du caractère aléatoire

Test de corrélation sur le RANG

Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **acceptée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **acceptée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **acceptée** au seuil de confiance de 90%

Valeur de la variable de calcul: **-0.4092**

Tests de détection de rupture

Test de BUISSHAND et ellipse de BOIS

Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Méthode non paramétrique de PETTITT

Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Probabilité de dépassement de la valeur critique du test: **6.20E-02** en **1971**

Méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN

Mode de la fonction densité de probabilité *a posteriori* de la position du point de rupture: **0.1169** en **2005**

Segmentation de HUBERT

Niveau de signification du test de Scheffé: **1%**

| Début | Fin | Moyenne | Ecart type |
|-------|------|---------|------------|
| 1955 | 1971 | 117.853 | 27.711 |
| 1972 | 1998 | 71.330 | 29.861 |
| 1999 | 2012 | 124.164 | 52.098 |

05/05/2017 10:59:47

Kronostat 1.01 - UMR Hydrosiences Montpellier



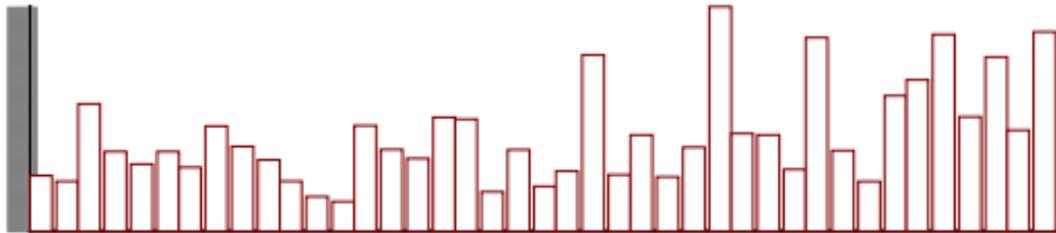
Annexe XIII. Tests de rupture sur les modules du Mouhoun à Dapola (1972-2012)

Analyse de séries chronologiques

C:\Users\HP EliteBook\Documents\mémoire_tiemtoiss_2ie\new\Dapola_aft_new.ksi

Identification station hydrométrique de Dapola
Variable étudiée débits annuels après rupture
Unité m³/s
Chronique de 1972 à 2012

Valeurs



Tests de vérification du caractère aléatoire

Test de corrélation sur le RANG

Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **rejetée** au seuil de confiance de 99%
 Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
 Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Valeur de la variable de calcul: **2.9428**

Tests de détection de rupture

Test de BUISSHAND et ellipse de BOIS

Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 99%
 Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
 Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Méthode non paramétrique de PETTITT

Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 99%
 Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
 Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Probabilité de dépassement de la valeur critique du test: **2.15E-02** en 1997

Méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN

Mode de la fonction densité de probabilité *a posteriori* de la position du point de rupture: **0.1758** en 1998

Segmentation de HUBERT

Niveau de signification du test de Scheffé: **1%**

| Début | Fin | Moyenne | Ecart type |
|--------------|--------------|-------------------|------------------|
| 1972 1999 | 1998 2012 | 71.330 124.164 | 29.861 52.098 |

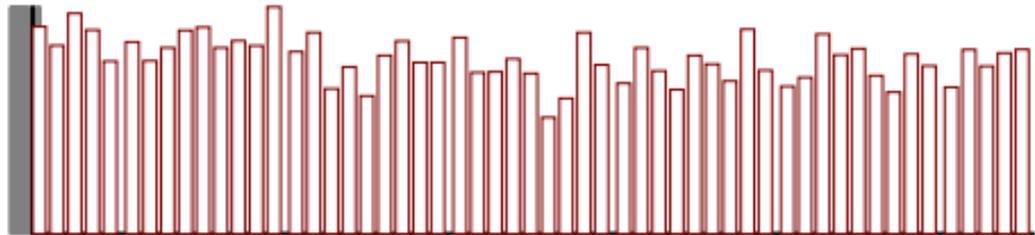
Annexe XIV. Tests de rupture sur les pluies annuelles à Samendéni (1955-2009)

Analyse de séries chronologiques

C:\Users\HP EliteBook\Desktop\courses_2ie\mémoire_tiemtoiss_2ie\new\Classeur1.ksi

Identification Bassin versant de Samendéni
Variable étudiée Pluie annuelle
Unité mm
Chronique de 1955 à 2009

Valeurs



Tests de vérification du caractère aléatoire

Test de corrélation sur le RANG

Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **rejetée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Valeur de la variable de calcul: **-2.9982**

Tests de détection de rupture

Test de BUISSHAND et ellipse de BOIS

Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Méthode non paramétrique de PETTIT

Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Probabilité de dépassement de la valeur critique du test: **5.91E-04** en **1970**

Méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN

Mode de la fonction densité de probabilité *a posteriori* de la position du point de rupture: **0.6046** en **1970**

Segmentation de HUBERT

Niveau de signification du test de Scheffé: **1%**

| Début | Fin | Moyenne | Ecart type |
|-------|------|----------|------------|
| 1955 | 1970 | 1146.250 | 90.060 |
| 1971 | 2009 | 981.282 | 116.151 |

09/14/2017 3:11:20 PM

Kronostat 1.01 - UMR Hydrosiences Montpellier



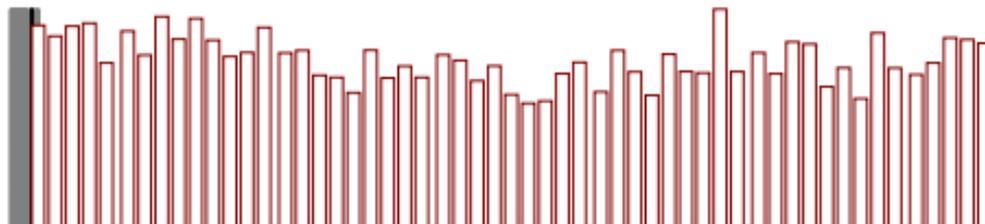
Annexe XV. Tests de rupture sur les pluies annuelles à Boromo (1955-2009)

Analyse de séries chronologiques

C:\Users\HP EliteBook\Documents\mémoire_tiemtoss_2ie\new\pluie_boromo_all.kxi

Identification bassin boromo
Variable étudiée pluie annuelle
Unité mm
Chronique de 1955 à 2009

Valeurs



Tests de vérification du caractère aléatoire

Test de corrélation sur le RANG

Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **acceptée** au seuil de confiance de 99%

Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **rejetée** au seuil de confiance de 95%

Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Valeur de la variable de calcul: **-2.1561**

Tests de détection de rupture

Test de BUIHAND et ellipse de BOIS

Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 99%

Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%

Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Méthode non paramétrique de PETTITT

Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 99%

Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%

Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Probabilité de dépassement de la valeur critique du test: **1.11E-03** en **1970**

Méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN

Mode de la fonction densité de probabilité *a posteriori* de la position du point de rupture: **0.2532** en **1970**

Segmentation de HUBERT

Niveau de signification du test de Scheffé: **1%**

| Début | Fin | Moyenne | Ecart type |
|--------------|--------------|--------------------|------------------|
| 1955 1971 | 1970 2009 | 891.500 755.154 | 70.525 98.131 |

12/05/2017 04:59:53

Kronostat 1.01 - UMR Hydrosiences Montpellier



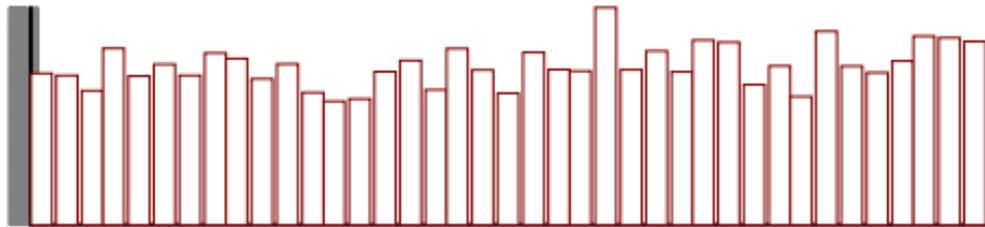
Annexe XVI. Tests de rupture sur les pluies annuelles à Boromo (1971-2009)

Analyse de séries chronologiques

C:\Users\HP EliteBook\Documents\mémoire_tiemtoss_2ie\new\Pluie_boromo_aft_break.ksj

Identification bassin boromo
Variable étudiée pluie annuelle
Unité mm
Chronique de 1971 à 2009

Valeurs



Tests de vérification du caractère aléatoire

Test de corrélation sur le RANG

Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **acceptée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Valeur de la variable de calcul: **2.2863**

Tests de détection de rupture

Test de BUISSHAND et ellipse de BOIS

Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Méthode non paramétrique de PETTITT

Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Probabilité de dépassement de la valeur critique du test: **5.69E-02** en **1990**

Méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN

Mode de la fonction densité de probabilité *a posteriori* de la position du point de rupture: **0.1213** en **1990**

Segmentation de HUBERT

Niveau de signification du test de Scheffé: **1%**

| Début | Fin | Moyenne | Ecart type |
|-------|------|---------|------------|
| 1971 | 1990 | 713.800 | 76.858 |
| 1991 | 2009 | 798.684 | 100.963 |

12/05/2017 05:03:40

Khronostat 1.01 - UMR Hydrosociences Montpellier



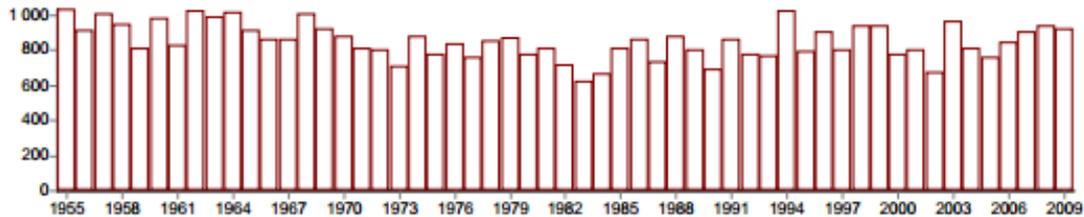
Annexe XVII. Tests de rupture sur les pluies annuelles à Dapola (1955-2009)

Analyse de séries chronologiques

C:\Users\IHP Elite\Book\Documents\mémoire_tiemtoiss_2ie\new\Pluie_dapola_all.ksi

Identification bassin versant de Dapola
Variable étudiée pluie annuelle
Unité mm
Chronique de 1955 à 2009

Valeurs



Tests de vérification du caractère aléatoire

Test de corrélation sur le RANG

Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **acceptée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Valeur de la variable de calcul: **-2.1706**

Tests de détection de rupture

Test de BUISSHAND et ellipse de BOIS

Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Méthode non paramétrique de PETTITT

Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Probabilité de dépassement de la valeur critique du test: **1.92E-03** en **1970**

Méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN

Mode de la fonction densité de probabilité *a posteriori* de la position du point de rupture: **0.2869** en **1969**

Segmentation de HUBERT

Niveau de signification du test de Scheffé: **1%**

| Début | Fin | Moyenne | Ecart type |
|-------|------|---------|------------|
| 1955 | 1970 | 936.188 | 73.703 |
| 1971 | 2009 | 816.487 | 88.195 |

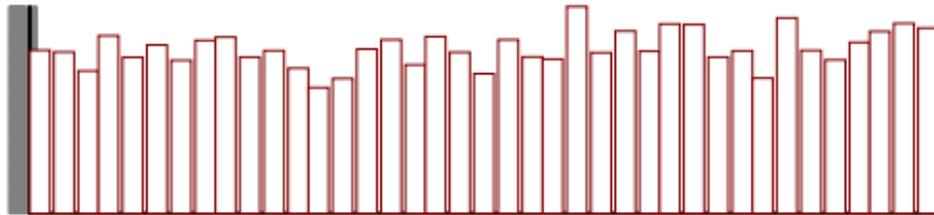
Annexe XVIII. Tests de rupture sur les pluies annuelles à Dapola (1971-2009)

Analyse de séries chronologiques

C:\Users\HP EliteBook\Documents\mémoire_tiemtoss_2ie\new\Pluie_dapola_aft_break.kxi

Identification bassin versant de Dapola
Variable étudiée Pluie annuelle
Unité mm
Chronique de 1971 à 2009

Valeurs



Tests de vérification du caractère aléatoire

Test de corrélation sur le RANG

Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **acceptée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **acceptée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Valeur de la variable de calcul: **1.9476**

Tests de détection de rupture

Test de BUISSHAND et ellipse de BOIS

Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Méthode non paramétrique de PETTIT

Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 90%

Méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN

Mode de la fonction densité de probabilité *a posteriori* de la position du point de rupture: **0.1630 en 1993**

Segmentation de HUBERT

Niveau de signification du test de Scheffé: **1%**

| Début | Fin | Moyenne | Ecart type |
|--------------|--------------|--------------------|------------------|
| 1971 1994 | 1993 2009 | 784.913 861.875 | 70.445 93.278 |

12/05/2017 04:53:46

Chronostat 1.01 - UMR Hydrosiences Montpellier

