



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



## **THEME**

**ANALYSE DES RENDEMENTS SPECIFIQUES ET DE LA  
DISPONIBILITE DES EAUX DE SURFACE SUR LES GRANDS  
SOUS BASSINS DU BASSIN DE LA VOLTA**

**MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU  
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE  
L'ENVIRONNEMENT  
OPTION : EAU**

Présenté et Soutenu Publiquement le 17 Juin 2010 par :

**Paul Maurille S. LANMANDJEKPOGNI**

### **Travaux dirigés par :**

Harouna KARAMBIRI      2iE / UTER-GVEA  
Ph.D Hydrologie

&

Jacob TUMBULTO      ABV /Direction de l'Observatoire.  
Ph.D Hydrologie

### **Jury d'évaluation:**

Président :                    -Dr Harouna KARAMBIRI

Membres Correcteurs : -Dr Jacob TUMBULTO

-Dr Bruno BARBIER

**Promotion 2009 - 2010**

## CITATION

*" L'humanité ne se pose jamais que des problèmes qu'elles peut résoudre ; car à y regarder de plus près, il se trouve toujours que le problème lui-même ne surgit que là où les conditions matérielles pour le résoudre existent déjà, ou du moins, sont en voix de devenir. "*

**Marx.** *Contribution à la critique de l'économie politique.*

## **DEDICACES ET REMERCIEMENTS**

Tel que l'a dit Protagoras cité par Platon, ce mémoire nous a redonné la signification de ce que :  
"L'homme est la mesure de toute chose".

✚ A mon père , ma mère, mes frères et sœurs ;

✚ A ma femme et ma petite fille Maunice Peace Ornéla ,

Je dédie ce travail pour l'amour et le soutien indéfectible que vous m'avez témoigné pendant ces deux longues années d'absence à vos côtés. Puisse Dieu vous en ouvrir les portes d'une satisfaction méritée.

Aussi, Voudrais-je témoigner ma profonde gratitude à l'égard de tous ceux qui de près ou de loin m'ont apporté un soutien quelqu'il soit, pour la bonne exécution de ce travail.

Mes pensées vont particulièrement à :

- ✚ Toute l'équipe de coordination du Projet NPT 151/BEN aux PAYS-BAS et au BENIN et particulièrement au Pr Marc KPODEKON et au Dr Taofic BACHAROU pour la confiance qu'ils ont placé en moi en me recommandant à cette formation.
- ✚ Mes Encadreurs Mr Harouna KARAMBIRI du 2iE et Mr Jacob TUMBULTO de l'Autorité du Bassin de la Volta (ABV) pour les décisifs conseils et orientations qu'ils m'ont donnés tout au long de ce travail.
- ✚ Mr SOME Hélézounmin Stéphane Corentin, pour son humilité à nul autre pareil et sa totale disponibilité à appuyer toutes mes initiatives en matière de système d'Information géographique dans le cadre de ce mémoire.
- ✚ Mes compatriotes, collègues et amis de la promotion de Masters 2008-2010 du 2iE ; merci pour l'accueil, l'enthousiasme et l'amour du prochain, dont vous avez été capables durant ces années d'épreuves et de victoires passées ensemble. Pour moi, vous êtes la famille d'au delà des frontières.
- ✚ A toute la Direction du 2iE et tout le corps des Enseignants, pour la formation de qualité qu'ils nous ont transmise.

**Paul Maurille S. LANMANDJEKPOGNI**

## **RESUME**

Les variations spatiales et temporelles générales de la pluviométrie depuis les années 70 soumettent les pays Africains et en particulier ceux du bassin de la Volta à des situations très contraignantes en matière de mobilisation et d'utilisation des ressources en eau. A cet effet, de plus en plus les pays accordent un meilleur intérêt à la connaissance des comportements hydrologiques de leurs bassins fluviaux, dans le nouveau contexte climatique, afin de mieux évaluer leurs nouvelles potentialités.

Le présent travail, initié par l'Autorité du Bassin de la Volta (ABV), a combiné les outils des techniques de modélisation numérique spatialisée et d'analyse de données hydrométriques, pour évaluer la répartition géographique du bassin de la volta, et estimer la variabilité des écoulements spécifiques le long du Mouhoun ; de la Volta Blanche et de l'Oti-Pendjari. Nous avons utilisé pour cela, la base de données du fichier SRTM30\_PLUS V6, et les modules moyens interannuels au niveau des stations hydrométriques.

Les résultats indiquent 42.4% ; 3.76% ; 5.78% ; 4.17% ; 3.25% et 40.63% en proportion du bassin respectivement pour le Burkina Faso, le Bénin, le Togo, le Mali, la Côte d'Ivoire et le Ghana. La faiblesse des variations confirme la tendance que la superficie totale du bassin est très proche (12% d'écart) de 400000 km<sup>2</sup> (donnée ABV).

Par ailleurs la variation spatiale des débits spécifiques ne présente pas à priori de tendance sensible avec la distribution des populations. La variation spatiale des débits spécifiques pourrait donc s'expliquer avec la pluviométrie sur chaque zone, les paramètres géomorphologiques et les prélèvements non contrôlés sur la volta Blanche au Burkina Faso et la volta Noire au Ghana. Aussi, les formes d'utilisation des terres, et la variation des paramètres hydrodynamiques des sols peuvent modifier les ruissellements. Enfin, l'analyse de la disponibilité en ressource révèle de grandes possibilités de mobilisations des eaux de surface sur la volta pour tous les sous bassins nationaux. Les taux d'épuisement (1% en 2010 à 16% en 2025) de la disponibilité sont bien faibles en pour les besoins domestiques, industriels et du bétail. Ils sont par contre plus élevés (3% en 2010 à 65% en 2025) pour les besoins d'irrigation dans tous les pays. Les besoins de développement d'autres sources de mobilisation d'eau sont plus grands au Bénin et au Mali.

**Mots clés** : 1- Volta, 2- Superficie, 3- ressource en eau, 4- mobilisation, 5- disponibilité.

## **ABSTRACT**

The general spatial and temporal variations of the rainfall since the 1970s put the African countries, in particular those of the Volta Basin in very coercive situations concerning mobilization and use of surface water resources. To this effect, more and more of the countries accord a greater interest to the knowledge of the hydrologic functioning of their river basins, in the new climatic context, in order to better evaluate their new potentialities.

The present study, initiated by the Volta Basin Authority (VBA), combined the tools of the spatial digital modelling process and the analysis of hydrometric data, to value the geographical distribution of the Volta Basin, and estimate the variability of the specific yields along the Mouhoun (Black Volta); the White Volta and the Oti-Pendjari sub basins. We used for it, the data base of the file SRTM30\_PLUS V6, and the mean annual flows at the hydrometric stations.

The results indicated 42.4%; 3.76%; 5.78%; 4.17%; 3.25% and 40.63% in surface area proportion of the basin respectively for Burkina, Benin, Togo, Mali, the Cote d'Ivoire and Ghana. The low deviation of the variations confirms the tendency that the total surface of the basin is very near (0,12% of gap) of 400000 km<sup>2</sup> (ABV data). In other hand, the spatial variation of the specific flows doesn't present a sensible trend with the population growth. This can be in other with the uncontrolled withdrawals on the White Volta to the Burkina Faso and the Black Volta in Ghana. Also, the shapes of use of the earths, and the variation of the streamlined parameters of soils can modify the runoff. Finally, the analysis of the water resources availability reveals big possibilities of mobilizations of the surface waters from the Volta for all national basins. The rates of weariness of the availability are well weak for the domestic, industrial needs and livestock. They are on the other hand more elevated for the purpose of irrigation in all countries. The needs to develop more research for other sources of water mobilization are bigger in Benin and in Mali.

Key words : 1- Volta, 2- area , 3- water resource, 4- mobilizations, 5- availability

## **LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS**

- 1 AOC-HYCOS :** Système d'Observation du Cycle Hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale
- 2 OMM :** Organisation Mondiale de la Météorologie
- 3 AOC :** Afrique de l'Ouest et Centrale
- 4 ICCARE :** Identification et Conséquence d'une Variabilité Climatique en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne.
- 5 GIWA :** Global International Water Assessment.
- 6 GVP :** Glowa Volta Project.
- 7 ABV :** Autorité du bassin de la Volta
- 8 RGPH :** Recensement Général de l'Habitat et de la Population
- 9 2IE :** Institut International d'Ingénierie de L'eau et de l'Environnement
- 10 MNT:** Modèle Numérique de terrain.
- 11 SIREM:** Système d'Information Environnemental sur les Ressources en Eau et leur Modélisation.
- 12 SIG :** Système d'Information Géographique
- 13 TAC :** Technical Advisory Committee
- 14 CPWF :** Challenge Program on Water and Food
- 15 DEM :** Digital Elevation Model
- 16 FAO :** Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation.
- 17 WDI :** World Development Indicator
- 18 USGS :** United States Geological Survey
- 20 ORSTOM :** Office de Recherche Scientifique et Technique d'Outremer
- 21 BOAD :** Banque Ouest Africaine de Développement
- 22 DANIDA :** Danish International Development Agency
- 23 PAGEV :** Projet d'Amélioration de la Gouvernance de l'Eau dans le bassin de la Volta.
- 24 CEDEAO :** Communauté Economique de Développement des Etats de l'Afrique de l'Ouest
- 25 GTOPO :** Global Topography
- 26 SRTM :** Shuttle Radar Topography Mission
- 28 IRD :** Institut de Recherche pour le Développement
- 29 SHN :** Service Hydrologique National
- 30 IWMI :** International Water Management Institute
- 31 GIRE** Gestion Intégrée des Ressources en Eau.

## SOMMAIRE

|  |     |
|--|-----|
| <b>CITATION</b> .....  | ii  |
| <b>DEDICACES ET REMERCIEMENTS</b> .....  | iii |
| <b>RESUME</b> .....  | iv  |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | v   |
| <b>LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS</b> .....  | vi  |
| <b>SOMMAIRE</b> .....  | 1   |
| <b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....  | 3   |
| <b>LISTE DES FIGURES</b> .....   | 4   |
| <b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....   | 5   |
| <b>I- INTRODUCTION</b> .....   | 6   |
| 1-2- Contexte de l'Etude. ....   | 6   |
| 1-2- Problématique .....   | 7   |
| 1-3- Les grandes étapes de l'étude. ....   | 9   |
| <b>II- OBJECTIFS DE L'ETUDE</b> .....  | 11  |
| 2-1- Objectif Général.....   | 11  |
| 2-2- Objectifs Spécifiques .....   | 11  |
| 2-3- Questions de recherche .....  | 11  |
| 2-4- Hypothèses de Travail. ....   | 12  |
| <b>III-LES BASSINS VERSANTS ET LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE.</b> .....                          | 13  |
| 3-1- Délimitation des bassins versants. ....   | 13  |
| 3-2- Les modèles numériques de terrain (MNT).....  | 13  |
| 3-3- Mobilisation des eaux de surface et dépendance des populations. ....                    | 14  |
| <b>MATERIELS ET METHODES</b> .....   | 16  |
| <b>I- PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE.</b> .....   | 17  |
| 1-1-Situation géographique .....   | 17  |
| 1-2- Traits majeurs du relief.....   | 18  |
| 1-3- Sol et Végétation.....  | 19  |
| 1-4- Hydrographie et Conditions Climatiques. ....  | 19  |
| 1-5- Aspects socio-économiques et Institutionnels. ....                                      | 21  |
| <b>II- MODÉLISATION NUMÉRIQUE SPATIALISÉE ET DÉTERMINATION DES DÉBITS SPÉCIFIQUES.</b> ..... | 22  |
| 2-1- Présentation et traitement des données. ....  | 22  |
| 2-1-1- Les données géographiques.....  | 22  |

|  |           |
|--|-----------|
| 2-1-2- Les Données Démographiques.....   | 23        |
| 2-1-3- Les données hydrométriques.....   | 23        |
| 2-1- 4- Source et répartition des données.....   | 24        |
| 2-2- Délimitation des bassins versants.....  | 24        |
| 2-2-1- Construction d'un modèle Numérique de Terrain (MNT).....                            | 25        |
| 2-2-2- Préparation et Analyse hydrologique des Grid.....                                   | 25        |
| 2-2-3- Le réseau hydrographique numérique.....   | 25        |
| 2-3- Traitement des données hydrométriques.....  | 26        |
| 2-3-1- Critique et Reconstitution des données.....   | 26        |
| 2-3-2- La Répartition Spatiale des stations.....   | 27        |
| 2-3-3- Les indicateurs d'écoulement étudiés.....   | 27        |
| 2-4- Analyse de la disponibilité de l'eau sur les sous bassins par pays.....               | 28        |
| 2-4-1- Le module interannuel.....  | 28        |
| 2-4-2- Détermination des populations sur les sous bassins selon les pays.....              | 29        |
| 2-4-3- Les seuils de couverture des besoins sur la volta dans chaque pays.....             | 30        |
| 2-4-4- Débit environnemental.....  | 30        |
| 2-4-5- Schématisation de la démarche.....  | 64        |
| <b>RÉSULTATS ET INTERPRETATIONS.....</b>   | <b>31</b> |
| <b>I- LE BASSIN DE LA VOLTA ET SES GRANDS SOUS BASSINS.....</b>                            | <b>32</b> |
| 1-1- Les Grands sous-Bassins.....  | 32        |
| 1-2- Reconstitution des données et évolution des débits moyens annuels.....                | 34        |
| 1-3- Les débits spécifiques autour de l'année référence 1970.....                          | 35        |
| 1-4- La disponibilité de l'Eau sur la Volta Noire, la Volta Blanche et l'Oti-Pendjari..... | 37        |
| 1-5- Comparaison des apports à la demande estimée.....                                     | 38        |
| <b>DISCUSSION ET ANALYSE.....</b>  | <b>41</b> |
| <b>I- CRITIQUE DU MODÈLE NUMÉRIQUE.....</b>  | <b>42</b> |
| <b>II- IMPACT SUR LA RESSOURCE ET SA RÉPARTION SPATIO-TEMPORELLE.....</b>                  | <b>43</b> |
| <b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....</b>   | <b>45</b> |
| <b>RECOMMANDATIONS.....</b>  | <b>46</b> |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>  | <b>48</b> |
| <b>ANNEXES.....</b>  | <b>51</b> |

## **LISTE DES TABLEAUX**

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1 : Quelques résultats au sujet de la superficie du Bassin de la Volta.....                  | 8  |
| Tableau 2: Estimation de l'erreur altimétrique moyenne par type d'interpolation .....                | 14 |
| Tableau 3: Répartition du Bassin suivant les pays selon l'ORSTOM.....                                | 17 |
| Tableau 4: Variation altimétrique caractéristique du relief .....                                    | 18 |
| Tableau 5: Composantes Hydrographiques du Bassin de la Volta.....                                    | 20 |
| Tableau 6: Répartition et Origine des données étudiées.....  | 24 |
| Tableau 7 : Répartition géographique du bassin de la Volta entre les pays.....                       | 34 |
| Tableau 8 : Résultats des regressions linéaires.....   | 35 |
| Tableau 9: Evolution des population sur chaque sous bassin jusqu'en 2030.....                        | 38 |
| Tableau 10: Comparaison aux résultats de quelques études antérieures.....                            | 42 |
| Tableau 11: Caractéristiques des secteurs.....   | 57 |
| Tableau 12: récapitulatif des taux de croissance et densités de populations par pays.....            | 58 |
| Tableau 13 : Densité de population au Burkina Faso.....  | 58 |
| Tableau 14: Récapitulation des possibilités de mobilisation moyenne en 2010, 2020 et 2025.....       | 59 |
| Tableau 15 : Répartition géographique des grands sous bassins dans chaque pays.....                  | 60 |
| Tableau 16 : Superficie du bassin de la volta suivant chaque pays.....                               | 60 |
| Tableau 17: Les débits ou apports spécifiques sur les sous bassins entre 1951 et 2005 .....          | 61 |
| Tableau 18: Etendu des secteurs sur la Volta Noire selon les découpages administratifs des pays. ... | 62 |
| Tableau 19: Etendu des secteurs sur la Volta Blanche selon les découpages administratifs des pays.   | 63 |
| Tableau 20: Etendu des sceteurs sur l'Oti-Pendjari selon des découpages des pays.....                | 63 |
| Tableau 21: récapitulatif des QMA5.....  | 64 |
| Tableau 22 : Débits spécifiques suivant chaque sous bassin sur la Volta.....                         | 64 |
| Tableau 23 : Valeurs des débits dmoynens annuels utilisées.....                                      | 66 |
| Tableau 24: Les stations hydrométriques le long de la Volta Blanche (Nakambé).....                   | 67 |

## **LISTE DES FIGURES**

|  |    |
|--|----|
| Figure 1: La Pluviométrie dans le Sahel 1950-2000.....   | 14 |
| Figure 3: Situation du Bassin de la Volta ( Google earth). .....                                   | 17 |
| Figure 2: Situation du Bassin de la Volta.....   | 17 |
| Figure 4: Aperçu du Relief Numérique du Bassin de la Volta(DEM). .....                             | 18 |
| Figure 5: Carte des grands types de Sols en Afrique. ( FAO, 2005). .....                           | 19 |
| Figure 6 : Variation de l'employabilité des secteurs sur le Bassin de la Volta. (WDI, 2003). ..... | 21 |
| Figure 7: Situation de la Zone de points .....   | 22 |
| Figure 8 : Préparation à l'extraction du réseau hydrographique. ....                               | 26 |
| Figure 9 : Carte de Situation du Bassin de la Volta .....  | 32 |
| Figure 10: Les quatre grands sous bassins de la volta.....   | 33 |
| Figure 11: Les Bassins du Mouhoun, le Nakambé et l'Oti au Burkina Faso.....                        | 33 |
| Figure 12: L'Oti-Pendjari au Bénin .....   | 33 |
| Figure 13: La Volta Noire, la Volta Blanche, l'Oti et la volta Inférieure au Ghana.....            | 33 |
| Figure 14: La Volta Noire en Côte d'Ivoire .....   | 33 |
| Figure 15: La Volta Blanche et l'Oti au Togo.....  | 34 |
| Figure 16: La volta Noire au Mali.....   | 34 |
| Figure 17: variation des débits spécifiques par secteurs sur la volta Blanche .....                | 35 |
| Figure 18: variation des débits spécifiques par secteurs sur l'Oti.....                            | 36 |
| Figure 19: variation des débits spécifiques par secteurs sur le Mouhoun .....                      | 36 |
| Figure 20: Evolution du ratio d'eau de surface mobilisable sur le bassin pour chaque pays..        | 37 |
| Figure 21: Incidence séparée des besoins sur la disponibilité dans chaque pays.....                | 39 |
| Figure 22 : Courbes de regression des débits moyens annuels .....                                  | 52 |
| Figure 23: Variation des débits moyens annuels des stations de l'étude. ....                       | 54 |
| Figure 24: Superposition des couches de réseaux hydrographiques .....                              | 56 |
| Figure 25 : Carte de découpage du Bassin en secteurs d'étude. ....                                 | 55 |

**INTRODUCTION GENERALE**

## **I- INTRODUCTION**

### **1-1- Contexte de l'Etude.**

Depuis quelques décennies, l'eau est restée la question centrale de beaucoup de colloques, séminaires et autres réunions et recherches scientifiques à divers niveaux de part le monde. Cette situation est certainement une conséquence de l'avènement des perturbations climatiques survenues à partir des années 1970 ( Servat et al., 1996 ). Bien qu'en général il est difficilement vécu de part le monde, le changement du climat soumet particulièrement l'Afrique sub-saharienne à des conditions encore plus drastiques surtout en matière de sécurité alimentaire.

Au-delà de la préoccupation classique que constitue la mobilisation des ressources en eau, la question en est beaucoup plus aujourd'hui à la recherche des outils les mieux convenables pour une gestion intégrée des ressources naturelles des bassins fluviaux.

« L'eau c'est la vie » dit-on! Mais c'est aussi la mort ; (Vergnes, 2004). La ressource "Eau" n'étant certainement pas inépuisable, la pérennisation des espèces vivantes sur terre passe entre autre par la multiplication et le développement de structures spécialisées pour une meilleure connaissance des bassins versants, en vue d'une gestion durable de leurs écosystèmes. Ceci contribuera à relever l'un des principaux défis de l'humanité en ce début de 21<sup>ème</sup> siècle, à savoir : Trouver un compromis entre la satisfaction des besoins en eau douce de bonne qualité et la protection de l'environnement afin d'assurer un développement socio-économique durable.

Pour relever ce déficit, l'observation hydrologique est certainement une étape capitale. En cela, la composante Ouest-Africaine AOC-HYCOS du programme WHYCOS montée par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM), travaille à l'amélioration de la qualité des observations d'évènements hydrologiques sur les grands bassins fluviaux comme Niger-HYCOS et Volta-HYCOS. Aussi, d'autres projets tels que ICCARE, GIWA, GLOWA... etc travaillent à une meilleure connaissance des aspects géographique et hydrologique des bassins versants en Afrique de l'Ouest et Centrale. Ces projets recherchent entre autre le développement de puissants systèmes technologiques d'observation hydrologique des grands bassins fluviaux en Afrique de l'ouest et Centrale.

Objet de la présente étude, le bassin de la volta est commun à six pays Ouest-Africains que sont : le Bénin, le Burkina Faso, la Cote d'Ivoire le Ghana, le Mali, le Togo. Ces pays ont également en commun les problèmes liés à la dynamique de la croissance démographique et le besoin d'exploitation grandissant des ressources de ce bassin pour un meilleur

épanouissement de leurs populations: L'eau est recherchée essentiellement pour la consommation, l'énergie l'agriculture, la pêche et l'élevage... La nature transfrontalière du bassin sous entend des possibilité d'apparition de problèmes domaniaux entre Etats voisins. Aussi, la gestion des usages de l'eau sur son réseau hydrographique engendrent des conflits qui ont succité la création en 2007, par les six pays riverains de la Volta, d'une instance de régulation qu'est l'Autorité du Bassin de la Volta (ABV) dont le siège est au Burkina Faso.

A ce titre, l'ABV s'intéresse à travers le présent travail, à **la répartition géographique du bassin de la Volta entre ses pays riverains, et à une analyse globale de l'évolution des disponibilités des ressources en eau le long des grands cours d'eau et dans chaque pays sur le bassin.** Notons que les missions de l'ABV sont entre autre de faciliter une gestion intégrée et durable des ressources naturelles pour prévenir ou même éviter les éventuels conflits intercommunautaires devenus réccurents sur le bassin.

## **1-2- Problématique**

La croissance démographique très rapide, la construction de nouveaux centres urbains, des barrages, les activités socio-économiques et la réalisation des projets de développement, les aménagements des bassins etc.... sont autant de manifestations de la dynamique de la vie humaine qui modifient certainement le comportement qualitatif et quantitatif des formations géologiques vis-à-vis de l'eau. Rappelons que le volume de la ressource terrestre d'eau douce renouvelable n'est ni inépuisable ni systématiquement pure (Vergnes, 2004). Il importe donc que face à l'agressivité de l'action anthropique, un compromis soit recherché entre l'accroissement spatio-temporel des populations et la dégradation quantitative et qualitative des grands réservoirs naturels et des ressources en eau douce de surface qu'on peut y mobilisabler. Seulement, compte tenu des sévères périodes de sécheresse ou encore des pluies dévastatrices qui surviennent parfois au cours de ces dernières années (exemple de la pluie à Ouagadougou le 1<sup>er</sup> Septembre 2009), dans un premier temps, la question paraît plus urgente, pour ce qui concerne l'état des connaissances hydrologiques des cours d'eau et de leurs bassins versants en rapport à la variabilité climatique dans nos pays en Afrique de l'ouest.

En effet l'Afrique de l'ouest, et notamment les pays comme le Bénin, le Burkina Faso, le Mali le Ghana, le Togo et la Cote d'Ivoire, ont hérité d'une ressource naturelle commune qu'est le bassin de la Volta. En général avec un taux moyen d'accroissement annuel de près de 3% (RGPH-Burkina., 2006 ; PRB., 2009), chacun de ses pays manifeste des besoins de développement et de modernisation sans cesse grandissants. Il importe donc pour l'Autorité

du Bassin de la Volta, institution conjointement mise sur pieds, d’avoir une vision large et précise des variations spatio-temporelles des indicateurs hydrologiques et socio-économiques du bassin afin de mieux remplir la mission qui est la sienne.

Considéré comme l’un des principaux bassins parmi les 25 bassins fluviaux transfrontaliers que compte l’Afrique de l’Ouest (Traoré, 2004), la Volta joue un rôle déterminant dans le développement de la sous région. Entre le Ghana et le Burkina Faso, il héberge plus de 1000 barrages pour l’irrigation des cultures en contre saison ; Aussi, supporte-t-il la production d’électricité avec le barrage d’AKOSSOMBO au Ghana pour une capacité de stockage de 148000 Mm<sup>3</sup>, (Obeng-Asiedu, 2004). De ce fait, il intéresse de nombreux projets de développement et également les chercheurs hydrologues. Depuis 1914 et particulièrement ces dernières années, les nombreuses recherches effectuées sur ce bassin ont produit des informations pratiques pour la résolution de beaucoup de questions scientifiques . Toutefois, certains fondamentaux particulièrement délicats, sont encore sources de discussion et de contradictions à ce jour. Pour cette étude, nous nous intéressons surtout à la situation géographique du bassin. En effet, selon certains projets et recherches, les chiffres avancés sont relativement différents les uns des autres. Ainsi, la superficie du bassin peut passer de 398382 km<sup>2</sup>, (Volta-HYCOS document de projet, 2006) à 417382 km<sup>2</sup>, ( Andah, 2005). Le tableau 1 donne une illustration de la situation. Il revient donc à l’Autorité du Bassin, de rechercher le consensus sur la superficie afin de prévenir d’éventuelles situations conflictuelles entre bassins fluviaux voisins ou entre pays frontaliers du bassin de la Volta. l’inquiétude est certainement encore plus fondée, quand on sait que, pendant que chaque pays recherche d’avantage d’eau pour ses besoins grandissants, les débits d’écoulement ont baissé entre 30% et 60% au cours de la période 1969-1971 et que les bassins à régime tropical ont été plus affectés que ceux à régime équatorial (DIARRA, 2001). Le souci du lendemain nous amène donc à nous interroger sur les perspectives envisageables par rapport aux possibilités d’approvisionnement paisible en eau au cours des décennies à venir.

**Tableau 1 : Quelques résultats au sujet de la superficie du Bassin de la Volta**

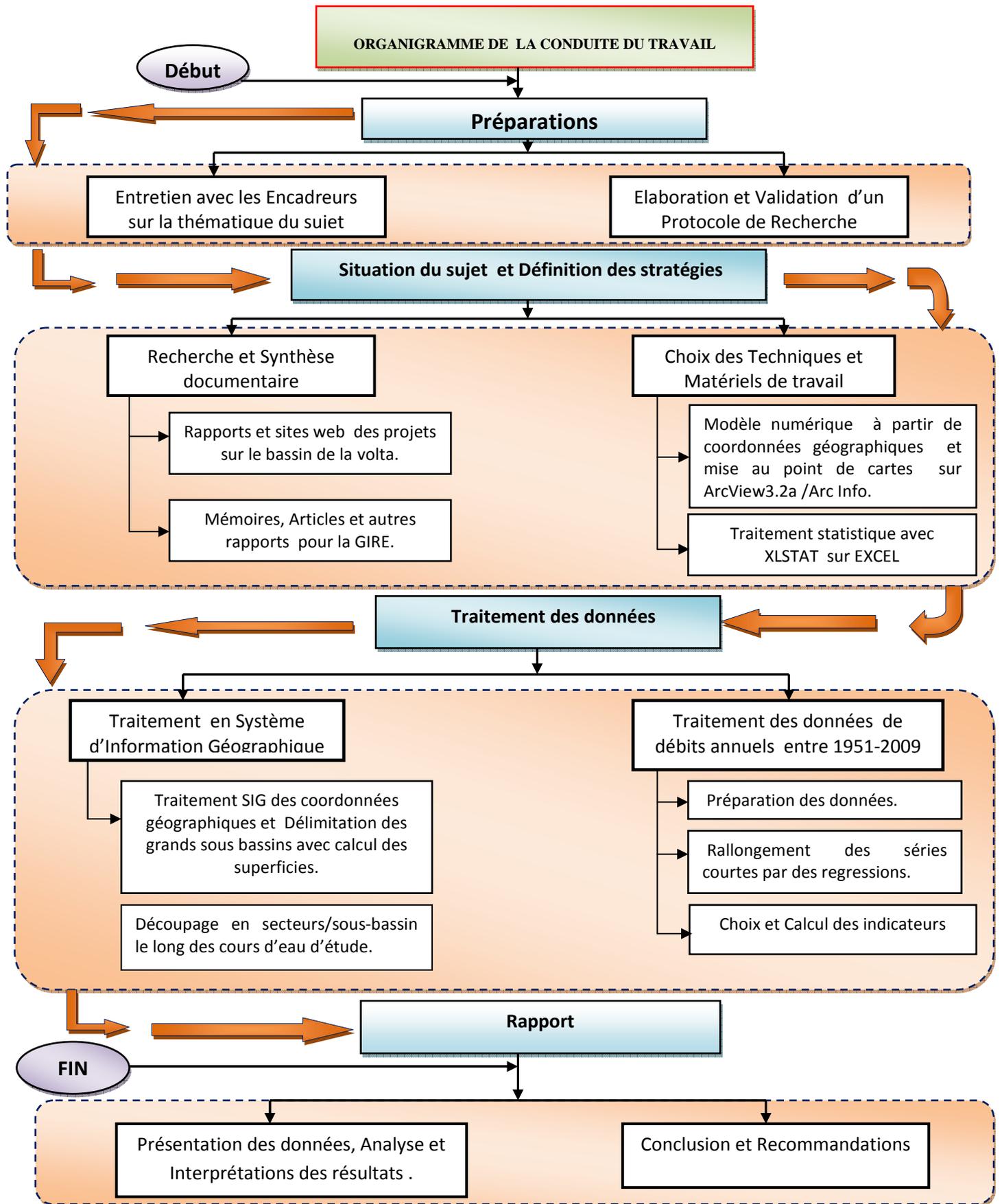
| Travaux ou Projets                   | Monographie Hydrologiques N°5 de l’ORSTOM volta(1977) | Glowa-Volta (2000) | CGIAR Winston E.I. (2005) | CGIAR D.de Condappa (2008) | Volta-HYCOS (2006) | SIEREM  | www.giwa.net |
|--------------------------------------|---|--------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------|---------|--------------|
| Superficie du bassin Km <sup>2</sup> | 398.392   | 407.093            | 417.382                   | 394.100                    | 400.000            | 412.000 | 412800       |

### **1-3- Les grandes étapes de l'étude.**

La méthodologie repose essentiellement sur l'interdisciplinarité entre les techniques d'approche dans les domaines des systèmes d'informations géographiques (SIG) et les méthodes de collecte et de traitement statistique des données hydrométriques relevées sur les stations identifiées. La démarche générale adoptée pour conduire la présente étude peut se résumer en quatre grandes phases :

- Phase préparatoire ;
- Phase de situation du sujet et définition des stratégies ;
- Phase de Collecte et traitement des données ;
- Phase de production du rapport.

Chacune des composantes de ces différentes phases constituent un ensemble de tâches à divers niveaux. Nous ne jugeons pas opportun de faire ici un détail exhaustif de toutes ces tâches. Cependant, vu le caractère plutôt technique de l'étude, nous donnerons un certain nombre de précisions sur le traitement des données au Chapitre des matériels et méthodes.



## **II- OBJECTIFS DE L'ETUDE**

### **2-1- Objectif Général**

Tel que nous l'avons annoncé dans le contexte de l'étude, l'objectif principal recherché revient à :

**L'Analyser la disponibilité pour l'horizon 2025, des ressources en eau sur les sous bassins de la Volta Noire, Blanche et l'Oti-pendjari en utilisant les rendements spécifiques sectoriels du bassin.**

Cet objectif, qui est certes, qu'une partie d'une vision beaucoup plus large pour l'ABV, va être abordé dans le cadre de ce travail en un certains nombres de points clés déclinés en objectifs spécifiques à atteindre.

### **2-2- Objectifs Spécifiques**

Dans le cadre de ce travail, nous cherchons précisément à :

- Déterminer la superficie et le périmètre du bassin de la volta et de ses grands sous bassins (Volta Noire ; Volta Blanche ; Oti-pendjari et Volta inférieure) à partir d'une modélisation numérique de terrain (MNT) ;
- Déterminer les variations spatiales spécifiques des écoulements d'eau vers la volta inférieure, le long des grands cours d'eau (Volta Noire/Mouhoun, volta Blanche/Nakambé, oti-pendjari) ;
- Déterminer les populations sur les différents sous bassins nationaux et, analyser les incidences de la demande en eau à l'horizon 2025 par rapport aux possibilités d'utilisation de l'eau à partir des modules inter annuels.

### **2-3- Questions de recherche**

Face à des informations aussi variées selon les organismes qui travaillent sur le bassin, on pourrait se poser de nombreuses questions parmi lesquelles le présent travail voudrait s'atteler à répondre à celles qui suivent :

*-En présence des nombreuses superficies, quelle est la répartition géographique à considérée aujourd'hui dans les projets et recherches sur le bassin de la volta ?*

*-Quelle est l'état actuelle et l'évolution de la disponibilité de l'eau sur les grands sous-bassins de la volta, en réaction aux divers usages le long des grands cours d'eau ?*

C'est donc dans ce contexte, et pour rechercher des réponses aux questions ci-dessus posées, que la présente étude est initiée par l'Autorité du Bassin de la Volta (ABV) et

développée en partenariat avec l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).

Elle vise globalement à contribuer à l'amélioration des systèmes d'observation des ressources en eau, pour un meilleur suivi des indicateurs hydrologiques et de la dynamique socio-économique sur le bassin. Cela favorise une gestion durable de l'écosystème sur le bassin de la Volta. Il présente l'intérêt de l'uniformisation des données au niveau de l'autorité du bassin, d'une part, et contribuera d'autre part à mettre à la disposition des Ingénieurs et autres spécialistes des données de référence et adoptée par les pays concernés, pour la conception des projets d'aménagements et de développement sur le bassin.

Le sujet est donc abordé sous deux grands aspects à savoir :

- Une analyse qui s'appuie sur les outils des systèmes d'informations géographiques pour préciser la superficie et le périmètre des grands sous-bassins (Volta Noire ; Volta Blanche ; Oti-Pendjari ; Volta Inférieure) et en donner la répartition selon les pays.
- La détermination des variations des débits spécifiques tout au long du Mouhoun (Volta Noire), du Nakambé (Volta Blanche), et de l'Oti-Pandjari et la projection des ratios d'eau disponibles à l'horizon 2025 par pays sur la Volta.

#### **2-4- Hypothèses de Travail.**

L'intérêt global de ce travail est que : l'Autorité du Bassin de la Volta sera efficace à une meilleure gestion intégrée des ressources en eau du bassin si elle dispose d'informations géographique et hydrologique réelles dont les chercheurs et autres acteurs peuvent faire usage objectivement. La présente étude s'intéresse uniquement aux eaux de surface sur la volta. Venant à la suite d'un certain nombre de travaux de recherches et de projets de développement, cette étude tient grand compte des conclusions les plus pertinentes d'entre elles. Le bassin étant un espace transfrontalier, la notion de l'intégration dans la gestion des ses ressources en eau y est capitale pour la prévention et la gestion des risques de conflits entre les populations transfrontalières. A cet effet, nous accordons une grande attention aux suggestions contenues dans le rapport n°4 du Comité Technique Consultatif (TAC) du Partenariat Mondial pour l'Eau, (1999). En ce qui concerne la définition du domaine couvert par tout le bassin, l'étude s'est particulièrement intéressée aux propositions d'un certain nombre de travaux antérieurs. Nous cherchons à vérifier les hypothèses suivant lesquelles: La superficie du bassin de la volta est de 400000 km<sup>2</sup> (selon l'ABV). Aussi, à l'état actuel des écoulements, les demandes projetées pour l'horizon 2025, seront couvertes dans chaque pays

riverains du bassin. Enfin, l'institution ABV cherche à s'assurer de la relation entre les variations des débits spécifiques et la répartition des populations sur le bassin.

### **III- LES BASSINS VERSANTS ET LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE.**

#### **3-1- Délimitation des bassins versants.**

Notons qu'à quelque niveau que ce soit, la superficie est un élément fondamental dans l'analyse des écoulements sur un bassin versant. A ce sujet, la question de la délimitation précise des bassins fluviaux à grande emprise, reste à aborder avec tact. Au delà des limites apparentes (ligne de partage des eaux), la superficie drainée par un cours d'eau est fortement influencée par la géologie du milieu (présence de Karst ou de couche drainante d'un talus voisin) ; c'est de ce fait qu'a été introduite dans la littérature la notion de bassin réel et de bassin topographique (Musy, 1963). Pour la Volta, la littérature fait état de plusieurs chiffres. On peut citer entre autre comme premiers travaux, ceux de l'ORSTOM des années 1914, révisée en 1938 et présentés dans la monographie Hydrologique N°5, le Bassin du fleuve Volta, (1977). Dans ce document, la démarche de la délimitation du bassin a été menée sur la base des techniques de planimétrie directe sur les cartes topographiques accompagnées de quelques analyses de relief, pour en conclure à une superficie d'abord de 395000 km<sup>2</sup>, ensuite de 398382 km<sup>2</sup> puis arrondie à 400000 km<sup>2</sup> et répartie diversement entre les pays. Il apparaît que les résultats en matière de délimitation de bassin versants, sont très fortement influencés par les outils et méthodes utilisés. Avec les travaux du Challenge Program on Water and Food, (Andah, 2005) la superficie du bassin est 417382 km<sup>2</sup>. On pourrait multiplier les exemples avec d'autres travaux. Seulement, les chiffres sont tout aussi différents les uns des autres. Cela est lié à la grande variété de procédés automatiques d'extraction des bassins versants.

#### **3-2- Les modèles numériques de terrain (MNT).**

L'évolution actuelle de l'informatique semble produire des résultats automatiques intéressants, qui s'appuient sur le numérique, la télédétection et le traitement d'image. C'est ce que prouve (Randriamanga, et al., 2003), pour la télédétection des géoriques dans la région d'Anjojorobe à Madagascar. Selon (Syler et al., 1999), on peut partir des modèles numériques de terrain tel que le GTOPO30 qui est un modèle mondial mise au point par l'USGS. Aussi, de nombreuses études ont montré que la qualité d'un modèle numérique de terrain est beaucoup plus liée à celle des données en entrée aux différentes algorithmes d'interpolation (IDW; RST, TIN...). Ces différentes méthodes d'interpolation gardent des proportions très

voisines d'erreur altimétrique sur le modèle global (Rousseau, 2006). Pour l'exemple de son étude comparative entre MNT, "Calcul d'erreur sur un MNT", pour une même zone les valeurs ont variées dans les grandeurs comme suit:

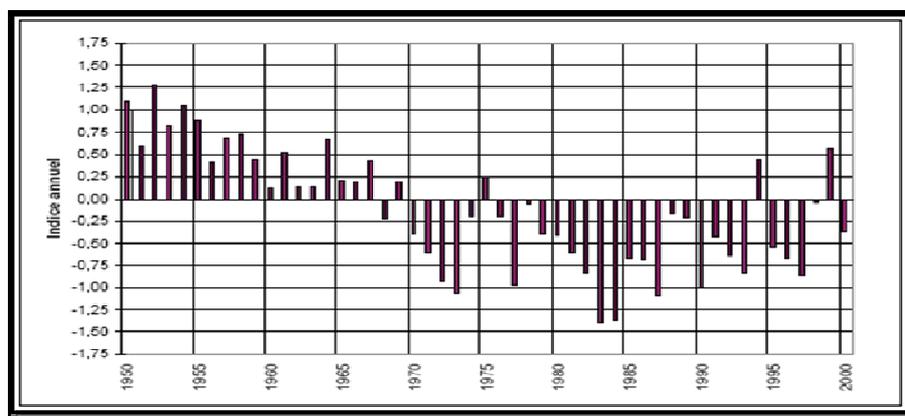
**Tableau 2: Estimation de l'erreur altimétrique moyenne par type d'interpolation**

| Type d'interpolation | Erreur moyenne sur toute la carte | Erreur moyenne sur toute la carte sans les zones sommitales et de talwegs |
|----------------------|-----------------------------------|---|
| Raster RST           | - 0,880                           | - 0,880   |
| Raster IDW           | - 0,4552                          | - 0,0116  |
| Triangulation        | - 1,078                           | - 0,789   |

**Source: Rousseau, (2006).**

### 3-3- Mobilisation des eaux de surface et dépendance des populations.

Tel que nous l'avons souligné, plus haut, la question de l'analyse des rendements spécifiques sur un grand bassin fluvial comme celui de la volta, vient d'une inquiétude profonde: Il s'agit en effet, de faire un état sur l'activité actuelle et de prévoir le comportement futur de la ressource. Avec la croissance démographique, il faudra nourrir deux à trois milliards de personnes de plus au court du prochain quart de siècle dans un contexte où de plus en plus, l'eau est considérée comme une contrainte majeure pour la production alimentaire (Partenariat mondial pour l'Eau, 2000). Parlant de baisse de la pluviométrie, depuis plus d'une trentaine d'années, la production agricole dans les pays sub sahariens est devenue particulièrement contraignante. On observe une chute brutale de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest non sahaélienne autour l'année 1970 (Paturel et al.,1996). Le Phénomène de la rupture climatique à d'ailleurs été mis en exergue par la figure n°6 tirée de L'Hote et al., (2002).



**Figure 1: La Pluviométrie dans le Sahel 1950-2000.**

**Source : L'Hote et al., (2002).**

Cette situation peut s'expliquer par le fait que les saisons pluvieuses prennent de moins en moins de temps et en laissent d'avantage aux saisons sèches. Même dans les régions "humides" d'Afrique de l'ouest la pluviométrie a baissé d'environ 25% (Servat et al., 1997). La sécheresse, peut être perçue comme: " un déficit, sur un temps assez long et sur une grande étendue, des disponibilités naturelles en eau par rapport à la valeur moyenne de ces disponibilités (précipitations, écoulement superficiel, écoulement souterrain...), (UNESCO, OMM., 1987). Les repercussions d'un tel climat se ressentent au niveau de l'hydraulicité des cours d'eau où la baisse des écoulements peut varier entre 30 et 50%, (Paturel et al., 2001). Bien que dans cette situation les besoins des populations (domestiques industriel, irrigation et autre...) ne dépassent pas encore la production des bassins, il n'en demeure pas moins que les conflits apparaissent surtout au niveau des communautés transfrontalières; selon le cadre juridique international du bassin de la volta. Ceci est entre autre une des conséquences des erreurs de gestion des barrages , qui constituent pourtant la solution la mieux utilisée dans tous nos pays pour l'irrigation des produits agricoles en contre saison. Notons que à l'échelle mondiale, l'agriculture représente globalement 90% des besoins de consommation et près de 70% des besoins totaux des populations. Ceux sont des problèmes qui rejoignent les conclusions du comité Technique consultatif du partenariat mondial pour l'eau: selon les estimations, d'ici 2025, environ 67% de la population vivra dans les pays en situation moyenne à grave de pénurie d'eau (Partenariat Mondial pour l'Eau, 2000). C'est une alerte aux pays Africains, en particuliers les pays du bassin de la Volta, à faire la balance entre la disponibilité en eau qu'offrent le bassin et les usages , afin de prévenir d'éventuelle situation de crise plus sévère.

**MATERIELS ET METHODES**

## I- PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE.

Bien que quelques unes de ses données géométriques sont encore diversement évaluées, le bassin de la volta présente tout de même un certain nombre de traits caractéristiques remarquables qui font l'unanimité des différents travaux de recherche.

### 1-1-Situation géographique

Le bassin de la Volta est un des plus grands bassins fluviaux Ouest –Africain après celui du Niger. Il draine ses eaux vers le lac Volta et est logé en latitude Nord entre 5°30 et 14°30 puis entre 2°00 de longitude Est et 5°30 de longitude Ouest. Avec des taux de couverture variés, il se partage entre le Bénin, le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Mali et enfin le Togo.



**Figure 2:** Situation du Bassin de la Volta  
**source:** Google earth.

**Tableau 3:** Répartition du Bassin suivant les pays selon l'ORSTOM.

| Pays                                   | Burkina Faso | Ghana   | Togo   | Bénin  | Mali   | Côte d'Ivoire | Total   |
|--|--------------|---------|--------|--------|--------|---------------|---------|
| Superficie de bassin(Km <sup>2</sup> ) | 171.105      | 165.830 | 25.545 | 13.590 | 12.430 | 9.890         | 398.382 |

**Source :** Monographie hydrologique N°5 de l'ORSTOM ; 1977

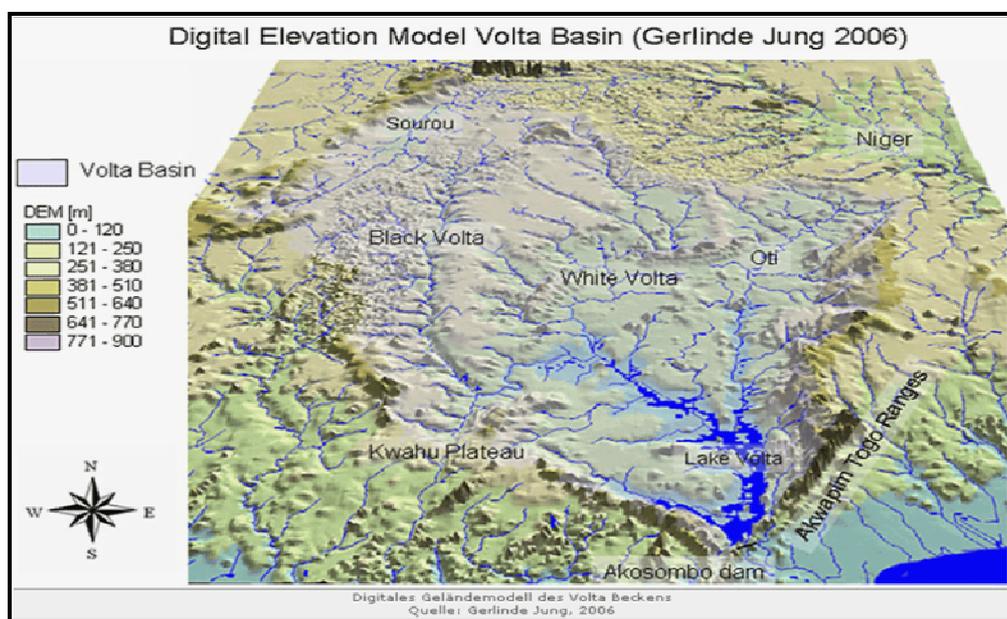
### 1-2- Traits majeurs du relief.

Le bassin est logé dans un secteur saillant d'un angle que forment deux grands bras d'accident de relief. Ils prennent naissance à l'estuaire en aval du barrage d'AKOSOMBO au Ghana. Le premier commence avec l'Océan atlantique, suit la direction des monts du TOGO, du FAZAO, puis se prolonge avec la chaîne montagneuse de l'ATACORA au BENIN en s'ouvrant vers le Nord-Est jusqu'au fleuve Niger. Le second bras du secteur est représenté par les limites ouest du plateau de KAWHU qui s'ouvre vers le Nord-Ouest depuis le barrage. Le bassin s'étend ainsi vers le nord (amont du barrage) avec une forte pénéplaine à variation d'altitude relativement lente vers le Nord. L'altitude à plus de 50% de son étendue varie entre 200 m et 300 m (Andah, 2005). La variation altimétrique est entre 1m et 920 m. Le relief présente une pente globale de l'ordre de 25 à 50cm/km. Notons cependant que les accidents de relief ne sont bien remarquables qu'aux frontières du bassin avec les bassins voisins.

**Tableau 4: Variation altimétrique caractéristique du relief**

| Altitude (m)     | Volta Noire | Volta Blanche | Oti | Volta Inférieure |
|------------------|-------------|---------------|-----|------------------|
| Altitude minimum | 60          | 60            | 40  | 1                |
| Altitude maximum | 762         | 530           | 920 | 972              |
| Altitude Moyenne | 287         | 270           | 245 | 257              |

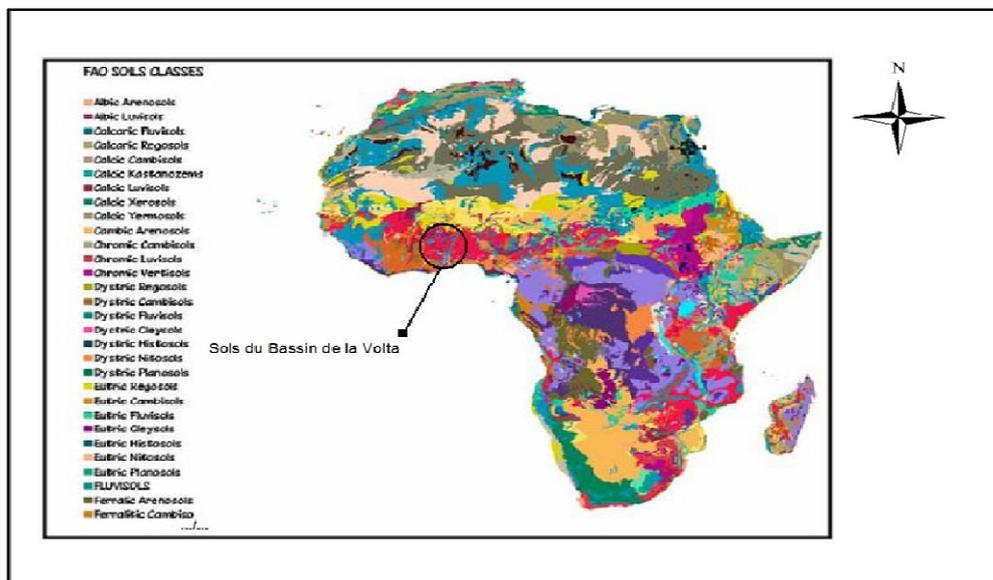
**Source:** ORSTOM Hydro, 1977



**Figure 4: Aperçu du Relief Numérique du Bassin de la Volta(DEM).**  
**Source :** Jung (2006).

### 1-3- Sol et Végétation

La zone Ouest Africaine connaît généralement trois grands types de sol. Il s'agit des sols ferrugineux et les sols ferralitiques qui sont caractéristiques des zones planes ou à faible pente, et les sols désertiques à subdésertiques qui ne sont que peu représentés dans la zone de notre étude. les sols ferrugineux sont très abondants sur le bassin de la volta. Selon la carte des sols d'Afrique (FAO, 2005), on rencontre sur le bassin une bonne couverture des vertisols, les lithosols et les sols isomorphes. Vers la partie Nord, on note une abondance des sols regiques sur matériau gravillonnaire. Bien que l'activité anthropique lui change de plus en plus sa densité, la végétation reste encore essentiellement de la steppe arbustive et relativement boisée, qui côtoie les savanes herbeuses et quelques forêts.



**Figure 5:** Carte des grands types de Sols en Afrique. ( FAO, 2005).

Remarquons que la végétation sur le bassin est assez influencée par le développement des activités agricoles d'une part, mais aussi par la variabilité climatique notée dans la zone (pluviométrie-harmattan-sècheresse).

### 1-4- Hydrographie et Conditions Climatiques.

Le réseau que draine le bassin est généralement présenté par quatre grands cours d'eau avec les apports conséquents de leurs affluents. Ces cours d'eau selon la section parcourue et le village traversé, peuvent porter plusieurs noms parfois. Pour une facilité de langage, nous utilisons les noms formalisés sous lesquels ils sont connus du milieu scientifique. Généralement les cours d'eau donnent leurs noms aux bassins qu'ils drainent. Nous distinguons alors :

- La Volta Blanche ;
- L’OTI ;
- La Volta Noire ;
- La Volta inférieure.

Chacune de ses branches, dans son parcours, reçoit divers affluents qui lui font changer ses caractéristiques hydrauliques. Nous présentons ci-dessous, une synthèse de ces cours avec leurs affluents (Tableau 5).

Les phénomènes climatiques notés dans la zone de l’Afrique de l’ouest sont tributaires des déplacements de grandes masses d’air connues sous le nom “alizés”. Ces vents se dirigent vers un voisinage proche de l’équateur où ils forment la zone de convergence inter tropicale grâce à la venue depuis le Nord, de l’anticyclone saharien qui est un vent sec (l’harmattan) et du sud, un vent océanique humide. Il se forme alors un front intertropical, dont le déplacement interagit avec les conditions locales du relief et d’altitude pour faire varier le climat (température, humidité, pluviométrie...) d’une région à l’autre. Généralement, entre les mois de décembre et février, le front intertropical parcourt le golf de Guinée et fait donc venir l’harmattan sur toute la région. Deux saisons pluvieuses sont bien marquées par le mouvement de la zone de convergence au travers du Ghana entre les mois de mars et novembre. Les périodes de précipitations maximales varient entre les mois de juin/juillet et septembre/octobre selon les régions.

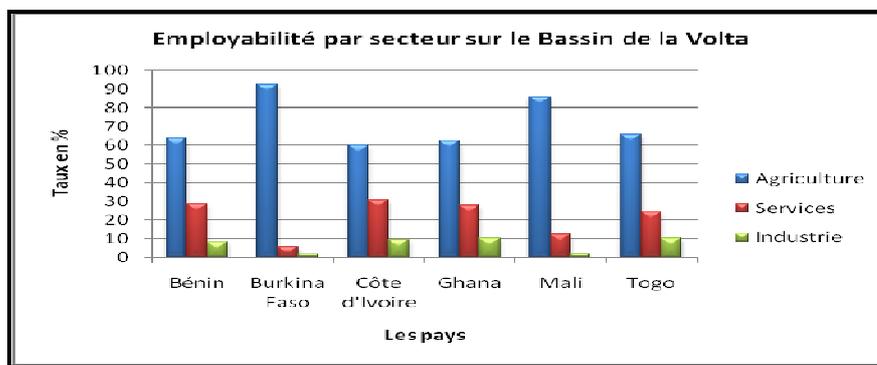
**Tableau 5: Composantes Hydrographiques du Bassin de la Volta.**

| Composante Principale          | Source  | Pays Traversés                         | Affluents  | Observation   |
|--------------------------------|---|--|--|---|
| <b>Volta Blanche (Nakambé)</b> | Dans la zone sahélienne à 335m d’altitude                           | Burkina Faso<br>Ghana.                 | -Cours de Tikare-Lac de BAM, -Lac de SIAN et DEM-Massili-Guinga-Nouaho-Tamne<br>-Koulougona-Morago-Volta Rouge-Antamore<br>-Yaragatanga-Sissili-Nasia-Nabogo | Il est en grande partie sur le territoire burkinabè.                    |
| <b>Volta Noire (Mouhoun)</b>   | Au Sud-ouest de Bobo-Dioulasso à l’altitude de 500m                 | Burkina Faso<br>Ghana<br>Cote d’Ivoire | -Plandi-Baoule-Vounhou-Sourou-Vranzo<br>Grand Bale-Bougouriba-Bambassou-Pouene<br>-Koulbi-Tain-Yerada –Lambo-Sori  | Il se répartie presque équitablement entre le Burkina et le Ghana.      |
| <b>Volta Inférieur</b>         | A l’embouchure du Mouhoun vers Mpaha et vers Nterso avec le Nakambé | Ghana                                  | L’Oti-daka-pru-afam  | Entièrement à la base du bassin dans le Ghana.                          |
| <b>L’Oti</b>                   | Dans les chaines de l’atacora                                       | Bénin -Togo                            | Pendajri –Koumongou-kéran-Kara   | Aile est du bassin, il est le principal affluent du lac volta au Ghana. |

**Source :** Monographie hydrologique de l’ORSTOM, (1977).

### **1-5- Aspects socio-économiques et Institutionnels.**

Le bassin pour chacun des six pays, joue un rôle important dans le développement social et économique surtout en ce qui concerne la sécurité alimentaire et l'utilisation de l'énergie électrique. Fondamentaux pour la prospérité de la majorité des pays (en voie de développement), l'agriculture et l'énergie sont des facteurs déterminants pour de nombreux indicateurs de développement. Une étude de la World Development Indicator (WDI), (2003) nous a permis de reconstituer comme suit l'évolution de quelques indicateurs de la dynamique socio-économique sur le bassin de la volta. Il indique que l'agriculture est le secteur qui emploie le plus la population dans tous les pays du bassin, avec particulièrement un taux voisin de 90% au Burkina Faso et au Mali. Aussi, on peut remarquer qu'après les services, l'industrie utilise le moins les populations. Le développement industriel est encore très bas dans tous les pays en 2003.



**Figure 6 :** Variation de l'employabilité des secteurs sur le Bassin de la Volta. (WDI, 2003).

Sur le plan institutionnel, on peut noter que des efforts sont faits tant à l'échelle nationale, régionale, qu'internationale, pour permettre d'élaborer des textes et des cadres juridiques pour une gestion paisible des ressources transfrontalières sans atteinte à la souveraineté et à l'intégrité des Etats. Dans les six pays du bassin, au niveau national, la ressource est gérée par les services d'hydrauliques, de ressource en eau et miniers le plus souvent rattachés directement aux Ministères des mines et de l'hydraulique. Ces services et directions, assurent, les politiques et stratégies de la planification nationale dans le domaine de l'eau et en garantissent la bonne coordination. Par ailleurs, par rapport à la recherche et aux problèmes de santé publique liée à l'eau, des soutiens financiers très importants sont accordés par des institutions internationales telles que la Banque Mondiale, la BOAD, LA DANIDA...etc.. C'est le cas, de PAGEV ; de Glowa-Projet ; Volta-HYCOS...etc. Au delà de toutes ces dispositions, L'Autorité du Bassin de la Volta (ABV) a été instituée depuis 2007 par les six pays concernés.

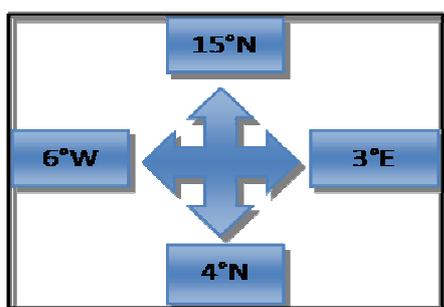
## **II- MODÉLISATION NUMÉRIQUE SPATIALISÉE ET DÉTERMINATION DES DÉBITS SPÉCIFIQUES.**

### **2-1- Présentation et traitement des données.**

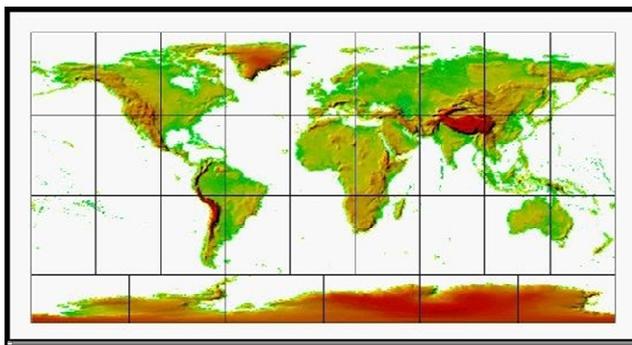
#### **2-1-1- Les données géographiques.**

L'étude étant conduite dans le contexte Burkinabè, nous avons eu recours plus aisément à la base de données des services de cartographie et télédétection de l'Institut Géographique Burkinabè (IGB) et à des informations de la Direction Générale des ressources en Eau (DGRE) par le biais de SIG Burkina pour ce qui est du réseau hydrographique.

A défaut d'un semi de points fiable levés par les services cartographiques locaux, et disponible, nous avons recouru à la base de données numérique SRTM30, disponible sur le site de <http://www.topex.ucsd.edu> de l'USGS pour la collecte des coordonnées XYZ en latitude, longitude et côte de plus 1.400.000 points dans la zone délimitée comme ci-dessous:



**Figure 7-a :** Zone de points de la sélection



**Figure 7-b :**Modèle Mondial Numérique de Terrain  
Source: <http://www.topex.ucsd.edu> de l'USGS.

### **Figure 7: Situation de la Zone de points Sélectionnés pour le MNT.**

En effet, le SRTM30\_PLUS V6.0 est un fichier numérique de terrain connu également sous l'appellation GTOPO30. Il s'agit d'un compil de points sur une grille régulière de maille une demi-minute (environ un kilomètre), rendu disponible en version numérique par le US Geological Survey Eros data Center (Sioux Falls, Sioux Dakota). Ce modèle de terrain a une couverture mondiale et est présenté en trente trois (33) pavés pour faciliter son usage électronique selon les régions. Sa projection est géographique et les altitudes sont en mètre. Il constitue en fait, un travail de numérisation (digitalisation des données cartographiques de toutes les régions du monde) fait avec de grands moyens matériels pour les analyses de terrains. La fiabilité de ses données vient du fait que les erreurs de numérisation sont assez faibles ; On admet généralement un demi intervalle en altitude : Soit 50m. Cependant, les

erreurs de constitution de cartes, les erreurs de numérisation ou d'interpolation ne sont pas connues. les cartes utilisées sont généralement au 1/1000.000 de la série International Map of the World.

### **2-1-2- Les Données Démographiques.**

Pour la détermination des populations sur les sous bassins transfrontaliers, nous avons recouru au rapport de recensement du Burkina Faso (RGPH,2006), au rapport sur la population (UNESCO, 2009) et aux synthèses des atlas pour les données démographiques sur la densité moyenne des populations en 2008, pour le Bénin, le togo le Ghana, la Côte d'Ivoire et le Mali. Les densités moyennes de population selon le pays ont été corrigées en tenant compte des seuils de concentration des populations sur le bassin. En annexe III, les tableaux 12 et 13 montrent les valeurs utilisées.

### **2-1-3- Les données hydrométriques.**

Les données utilisées pour l'étude sont les chroniques de débits moyens annuels sur chaque station de mesure et couvrant la plus longue période possible depuis l'année 1951 à 2009. Cette partie est fortement liée, d'une part aux types et performances des stations hydrométriques choisies, et d'autre part à la disponibilité des données à ces stations. L'usage de ces chroniques de débits a servit non seulement à évaluer les réponses des sous bassins à l'écoulement, mais aussi pour l'analyse de la relation débit spécifique - croissance démographique des populations sur différentes zones identifiées autour des cours d'eau. De ce fait, notre critère de choix fondamental vient de ce que, la station soit installée sur l'un des principaux cours d'eau du bassin avec dans les meilleurs cas, l'avantage qu'elle présente une importance régionale pour la gestion de l'eau sur le bassin.

Compte tenu des derniers projets en date pour la mise en place d'un réseau hydrométrique d'observation hydrologique performant sur le bassin, nous avons accordé également une priorité aux stations qui ont été prise en compte dans le projet Volta-HYCOS ou dans le projet SIEREM. Ceci pourra permettre à court et long terme de faire des études comparative pour le suivi de l'évolution de la qualité des indicateurs fournis par les stations sur les différents sous bassins. Le réseau hydrométrique comporte des stations principales et secondaires. Chaque station retenue est implantée soit à l'aval de la confluence d'au moins deux cours d'eau, soit à l'entrée ou encore à la sortie des frontières géographiques entre deux pays voisins. Le repertoire est fait de l'amont vers l'aval dans le sens global d'écoulement de la volta,(du continent vers l'océan). Notons que cette étude a été conduite autour des grands sous bassins ou secteurs.

### 2-1- 4- Source et répartition des données

Les débits utilisés proviennent de la base de données de Volta-HYCOS sous format du logiciel HYDROACCES. Cette base de données est elle-même alimentée par les Services Hydrologiques Nationaux (SHN) des pays riverains du bassin, avec quelques apports de l'IRD. Quelques données pour certaines stations du Burkina Faso, ont été extraites du rapport d'étude d'aménagement intégrée sur le bassin de la Volta noire, (Henry, 1975), avec confrontation aux données proposées dans le rapport provisoire de l'audit de l'eau sur le bassin de la Volta, (2007). Aussi pour la prise en compte des aspects quantitatifs des différents usages de l'eau effectués le long de nos cours d'eau (soit directement, soit par un affluent), nous avons recouru aux conclusions de certains rapports de synthèse de travaux. Il s'agit de (Barry et al., 2005) et (DeCondappa et al., 2008). Une petite statistique sur la répartition de nos données est présentée au tableau 6.

**Tableau 6: Répartiton et Origine des données étudiées.**

| Grands S-BV   | Cours d'Eau (nombre)   | Stations (Nbre) | Sources des données.                      | Pays pris en Compte                            |
|---------------|------------------------|-----------------|---|--|
| Volta Noire   | Mouhoun/Volta Noire    | 7               | ORSTOM<br>SHN<br>Monographies<br>Rapports | Mali<br>Burkina Faso<br>Ghana<br>Cote d'ivoire |
| Volta Blanche | Nakambé/ Volta Blanche | 4               | ORSTOM<br>SHN<br>Monographies<br>Rapports | Burkina Faso<br>Ghana<br>Togo                  |
| Oti/Pendjari  | Oti                    | 3               | ORSTOM<br>SHN<br>Monographies<br>Rapports | Burkina Faso<br>Bénin<br>Togo<br>Ghana         |

### 2-2- Délimitation des bassins versants.

Au sujet de la démarche de délimitation et de calcul des superficies des bassins versants, nombreux travaux ont été déjà effectués et ceci en utilisant des méthodes variées, des plus simples selon [www.conseilsgratuit.fr](http://www.conseilsgratuit.fr) par lecture et planimétrie sur carte topographique, aux plus complexes (Syller et al, 1999) avec la modélisation numérique de terrain, (MNT) et autre traitement d'image sur des logiciels spécialisés.

Au vu de la taille de notre zone d'étude et de la qualité des données d'entrée dont nous disposons d'une part, et d'autre part, tenant compte du matériel (software et hardware) que nous utilisons pour ce travail, l'objectif de cette étape est de vérifier par analyse comparative,

les propositions faites par les plus représentatives des différentes recherches déjà effectuées sur le sujet et qui sont récapitulées plus haut au tableau 1 du présent document.

Nous avons donc choisi d'expérimenter La méthode d'extraction des réseaux hydrographiques par les algorithmes de l'extension Arc-Hydro-Tool sur ArcView3.2a. Notons que pour la spécificité de la tâche, cet outil requiert spatial Analyst , 3D analyst et watershed delineation ou Basin1 qui permet de générer les contours des bassins.

Le traitement est donc essentiellement fait au bureau sans confrontation réelle avec le terrain. Il est donc basé sur les manipulations, les observations et analyses comparatives avec d'autres résultats d'études similaires.

### **2-2-1- Construction du modèle Numérique de Terrain (MNT).**

De l'ensemble des points obtenus sur le site <http://topex.ucsd.edu> , nous avons produit un extrait zonal du MNT mondial par importation des coordonnées XYZ au format Txt sur Arc View3.2a. Cette couche, échantillonnage régulier, représentatif du terrain, couvre la bande des 4° à 15° de latitude Nord et de longitude 6°Ouest à 3°Est. L'intersection avec notre zone d'étude est donc suffisante pour générer un MNT qui intersecte tous les six pays du bassin de la Volta. la méthode d'interpolation utilisée est le Inverse Distance Weighted (IDW). C'est une méthode qui permet de faire l'interpolation des points à partir de l'inverse de la distance les séparant du point à estimer.

### **2-2-2- Préparation et Analyse hydrologique des Grid.**

Sur le modèle raster précédemment créé, on applique les commandes de la fenêtre « Préparation » de Hydro Tool, pour la détection d'erreurs et leur correction en vue de minimiser les défauts lors de l'extraction du réseau hydrographique. L'étape de préparation est composée de cinq fonctions essentielles de correction du modèle, suivi de la partie hydrologie. Les analyses hydrologiques consistent en l'application des fonctions de la fenêtre « hydrology » sur le modèle corrigé pour la détermination des caractéristiques du bassins et la constitution des couvertures devant permettre l'extraction du réseau hydrographique numérique.

### **2-2-3- Le réseau hydrographique numérique.**

Ici , nous avons :

- Eliminer les dépressions du MNT ;
- Calculer les sens d'écoulement à partir du MNT sans dépression ;
- Calculer l'accumulation d'eau dans les cellules à partir de la grille de direction du MNT.

- Fixer un seuil d'émergence de rivière pour extraire un réseau hydrographique.

Pour s'assurer de la pertinence des résultats proposés par le logiciel, nous devons superposer le réseau numérique à un réseau extrait sur fond de carte ou faire un creusement de MNT avec un réseau hydrographique existant. Nous avons pour cela, émis l'hypothèse que le MNT numérique sera considéré valable, si pour des cours d'eau principaux et les premiers affluents (ordre 1 et 2), la superposition est parfaite sur toute ou partie représentative du domaine du bassin versant. Le réseau hydrographique du Burkina Faso, disponible a donc servi à cette fin.



**Figure 8 : Préparation à l'extraction du réseau hydrographique.**

## **2-3- Traitement des données hydrométriques.**

### **2-3-1- Critique et Reconstitution des données.**

Les valeurs de débits sont généralement obtenues en utilisant les lectures directes de hauteurs d'eau (limnimètre), et par les courbes de tarage sur les cours d'eau. Selon la technique utilisée et compte tenu de la précision de l'opérateur et des appareils de mesure, les proportions d'erreurs ne sont pas identiques, et par conséquent, les techniques de traitement varient d'une station à une autre. Dans le cadre de notre étude, certaines stations bien positionnées ne sont parfois pas fonctionnelles ou sont à peine créées. Aussi, sur les stations identifiées et présentées ci-dessous, de nombreuses insuffisances ont été relevées :

- Données non relevées ou non transmises sur plusieurs années de la série 1954-2005 ;
- Données non relevées ou non transmises sur un ou plusieurs mois de la même année;
- Données totalement absentes;
- Station non fonctionnelle.

Pour résoudre ces situations, nous avons recouru à des reconstitutions des débits moyens annuels absents, avec les stations hydrométriques les plus proches et dont l'exploitation des mesures présente des coefficients acceptables de corrélation. Les données manquantes à une station sont recherchées avec la meilleure des stations proches, soit par lecture directe des

valeurs reconstituées proposées dans le rapport de l'audit de l'eau, soit avec la méthode de corrélation linéaire dont la formule générale se présente comme suit :

$$y = a * x + b \quad (1)$$

Avec  $a = \sigma_{xy} / \sigma^2_x$  et  $b = \text{moy}(y) - a * \text{moy}(x)$

Où : a est la pente, b l'ordonnée à l'origine de la droite  $y = f(x)$  avec un coefficient **R** de corrélation.

$\sigma_{xy}$  : Covariance des variables x et y.

$\sigma^2_x$  : Variance de la variable x.

moy(y) et moy(x) les moyennes des séries des variables y et x.

### **2-3-2- La Répartition Spatiale des stations.**

La zone d'étude est subdivisée suivant deux considérations:

- Selon les grands sous bassins ;
- Selon les limites géographiques des pays.

Particulièrement, pour la sub-division des sous bassins, nous avons utilisé certaines stations hydrométriques comme exutoires afin de mieux définir les secteurs de bassin entre deux stations hydrométriques consécutives. Cela nous permet de mieux suivre les variations spatiale de la contribution des espaces géographiques à la mobilisation des eaux sur le bassin. Les aires ainsi découpées sont désignées par des secteurs, en lettre capitales (N, B, O, I) accompagnées d'un indice de distinction selon leur sous bassin d'origine et leur position dans le découpage. Comme le montre la figure 23 de l'annexe II, de l'amont vers l'aval, nous avons ainsi le secteurs N1 ;N2 ;N3 ;N4 ;N5 ;N6 et N7 sur la volta noire, B1 ;B2 ;B3 et B4 sur la volta blanche, O1 ;O2 et O3 sur l'Oti. Le bassin du lac volta qui ne fait pas objet de la présente méthode a été désignée par la lettre I.

### **2-3-3- Les indicateurs d'écoulement étudiés.**

Rappelons que selon l'objectif principal de l'étude, nous sommes conduits en priorité vers la recherche des débits spécifiques (débits par une unité de surface de bassin) pour caractériser l'état de l'apport surfacique de l'écoulement sur les bassins versants.

A cet effet, en complément à la superficie des bassins versants, nous recherchons donc les apports moyens annuels d'eau  $\Delta Q_{MA}$  (différence de mesures entre les stations consécutives), de la zone de bassin comprise entre deux stations consécutives. La formule utilisée pour la détermination des rendements est donc :

$$R = \frac{(Débit_{avalZone}) - (Débit_{AmontZone})}{surface_{Zone}}$$

(3)

Avec , R : le rendement ou débit spécifique en L/s/km<sup>2</sup> du sous bassin.

**Débit<sub>aval Zone</sub>** : Débit en m<sup>3</sup> /s mesuré à la station en aval du sous bassin, suivant l'écoulement du cour d'eau.

**Débit<sub>amont Zone</sub>** : Débit en m<sup>3</sup>/s mesuré à la station amont du sous bassin selon l'écoulement du cour d'eau.

Aussi avons-nous fait une analyse fréquentielle des débits Q<sub>MA</sub>, pour la recherche des débits de période de retour 5 ans. La connaissance de ces informations, est également très importante dans les prises de décision en ce qui concerne la protection de l'environnement et les ouvrages de régulation et d'aménagement et la gestion des barrages, surtout en regard des problèmes transfrontaliers y afférents.

## **2-4- Analyse du potentiel d'eau mobilisable sur les sous bassins par pays.**

### **2-4-1- Le module interannuel**

La période d'étudiée est celle de la meilleure disponibilité des données aux stations de mesure. Elle se ramène ici, à la plage de 1954 à 2005. L'analyse a consisté en des étapes successives comme indiquées ci-dessous :

- Observation et appréciation des tailles des échantillons disponibles ;
- Rallongement des séries par reconstitution avec des regressions linéaires sur le programme XLSTAT, selon la pertinence des coefficients obtenus ;
- Détermination des modules aux stations pour chaque sous série et suivant chaque secteur d'étude.
- Détermination des apports moyens annuels sur chaque secteur et analyse de la variation suivant les secteurs et les périodes.
- Ajustement à une loi de Gumbel, et détermination et Q<sub>MA5</sub> pour la recherche d'un débit environnemental.
- Calcul des ratios d'eau disponibles sur les sous bassin selon les pays et faire la comparaison à la demande en eau domestique , industrielle, le bétail, et irrigation pour l'horizon 2025.

Selon de nombreuses études, il y a une rupture générale au sein des séries hydrologiques en Afrique sub saharienne et côtière autour des années 1970. On peut pour cela, s'en référer par

exemple à (Diarra, 2001), ou encore, (Paturel et *al.*,1996). En plus de la série sur le période 1954-2005, nous avons donc scindé les données à chaque station en deux sous groupes par les périodes 1954-1969 et 1970-2005. Les sous-séries ainsi constituées sont présentées à l'annexe III. Le tableau 11 de l'annexe III, montre suivant chaque secteur déterminé, la superficie associée, et quelques caractéristiques indicatifs des stations hydrométriques étudiées.

Au total, nous avons 708 mesures sur le Mouhoun, le Nakambé et l'Oti réunis. Les mesures utilisées sur le mouhoun sont constituées à 6.1% de valeurs tirées du rapport d'étude d'aménagement intégrée sur le bassin de la volta noire, de (Henry, 1975), 23.54% sont obtenus par regression linéaires et le reste, du rapport d'audit de l'eau sur le bassin de la volta, (2007). Sur la volta Blanche, seulement 3.77% des valeurs sont obtenues par regressions et les 96.23% restants proviennent des valeurs reconstituées de l'audit de l'eau sur le bassin de la volta. En ce qui concerne l'oti, autre que les 17.31%, toutes les valeurs sont issues du rapport d'audit de l'eau. Les séries de débits ainsi constituées recouvrent une période moyenne de 50ans avec un minimum de 36 ans et un maximum de 55ans de données.

#### **2-4-2- Détermination des populations sur les sous bassins selon les pays.**

Les populations vivant sur le bassin, sont en pleine croissance. Les taux varient d'un pays à un autre. Du coup, les prévisions démographiques, faites sur la base des taux de la décennie précédente, sont légèrement modifiées dans la plupart des pays de la volta. A partir de la documentaion sur les atlas tirés du site <http://atlas.challenges.fr> et le rapport de population (UNESCO, 2009), nous avons retenu les taux de croissances et les densités ci-dessous pour l'estimation des populations.

Pour le Burkina, nous avons utilisé le rapports du recensement (RGPH-Burkina Faso, 2006) pour de meilleurs chiffres suivant les régions du pays. Les densités des sous bassins sont des moyennes pondérées des densités primaires directement produites par le rapport.

Les populations sont calculées à partir de la formule :

$$P_n = P_i (1+x_o)^{(n-i)} \quad (4)$$

Avec :

$P_n$  : l'effectif de la population à l'année de rang  $n$ .(cherchée)

$P_i$  : l'effectif de la population à l'année de rang  $i$ .(connue)

$x_o$  : le taux d'accroissement.

### **2-4-3- Les seuils de couverture des besoins sur la volta dans chaque pays.**

La variabilité observée au niveau des indicateurs quantitatifs du présent travail à savoir : débits d'écoulement et débits spécifiques, oppose à la croissance démographique, un contraste réel en ce qui concerne la capacité des sous bassins à répondre aux demandes en eau des populations à court et à long terme. Nous faisons l'analyse pour les années à venir en supposant une situation climatique similaire à la série 1970-2005. Nous considérons que cette série exprime mieux la situation actuelle sur le bassin. Puisque les données que nous utilisons sont les débits moyens annuels, il s'agit donc pour cette partie, de ressortir les différents modules interannuels sur la volta au niveau de chaque pays, et d'analyser les seuils de couverture des besoins induits par l'accroissement des populations pour les années 2010, 2020 et 2025. Compte tenu du fait que les débits utilisés sont pris au kilomètre carré, nous avons déterminé pour chaque sous bassin, l'apport spécifique en eau disponible par personne jusqu'en 2025. Ces calculs sont faits à partir des secteurs d'études de la figure 23. la démarche est schématisée à l'annexe IV.

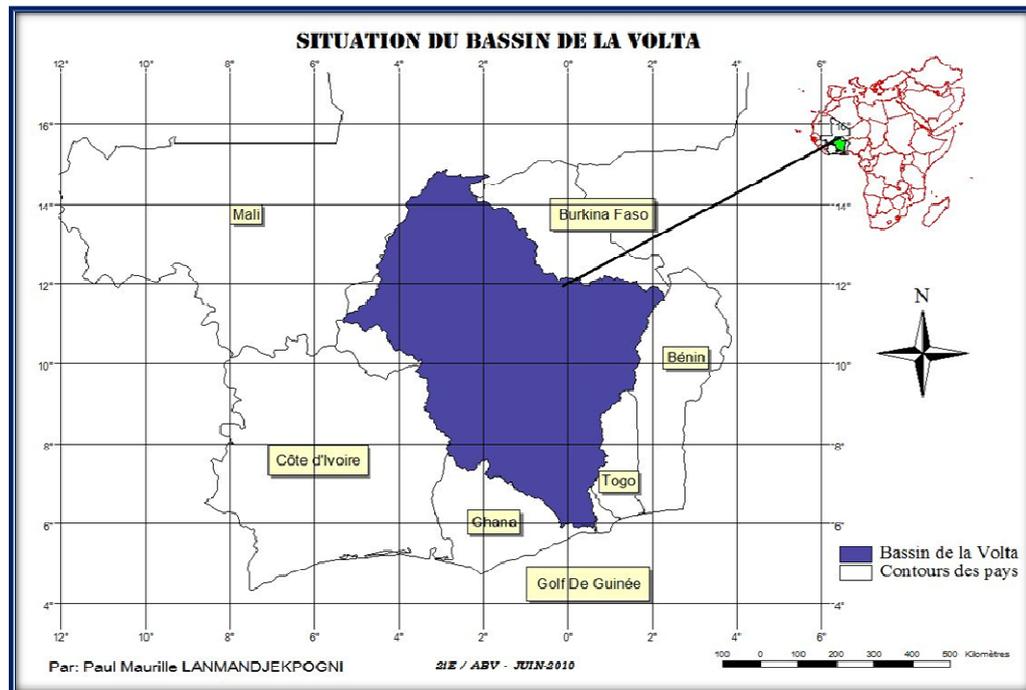
### **2-4-4- Débit environnemental**

Les prélèvements d'eau directs ou par des régulations, entravent beaucoup le fonctionnement des systèmes aquatiques à divers niveaux. Pour préserver l'écosystème aquatique, les prélèvements sont diversement réglementés selon les pays. Nous avons tenu compte pour cela de la formule de TENNANT (UICN, 2005) et du  $Q_{MA5}$  selon le règlement français ; (KARAMBIRI, 2008). La formule de TENNANT indique un taux de 30% à 60% du module interannuel sur une série donnée, pour préserver un habitat de qualité moyenne à bonne aux vies aquatiques. Nous avons considéré la plus forte valeur entre la moyenne de 45% du débit moyen interannuel et le  $Q_{MA5}$ .

**RÉSULTATS ET INTERPRETATIONS**

## I- LE BASSIN DE LA VOLTA ET SES GRANDS SOUS BASSINS.

A partir de la méthodologie présentée précédemment, nous avons obtenus différentes grilles de modèle de terrains présentées en annexes I. le bassin de la volta généré à partir du réseau hydrographique extrait des grilles de direction et d'accumulation peut être présenté sur la figure 9.

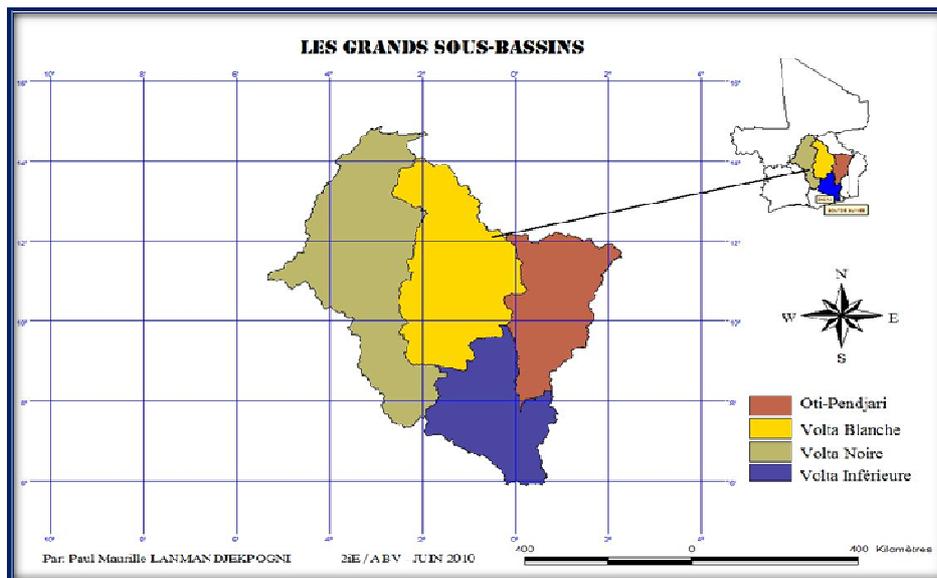


**Figure 9 : Carte de Situation du Bassin de la Volta**

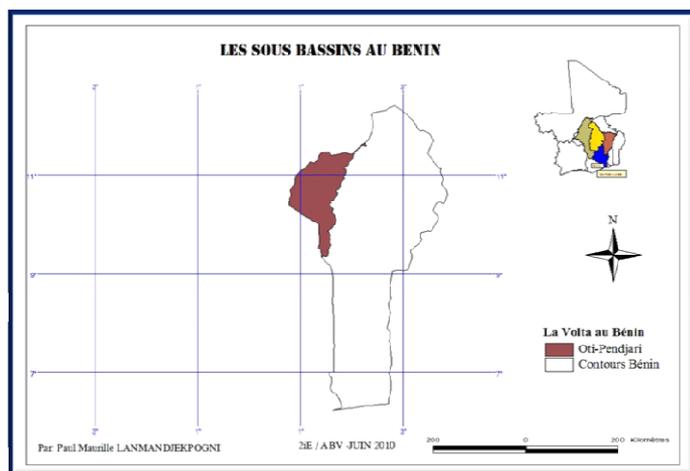
Ce tracé et positionnement du bassin, nous confirme les informations d'ordre générales, rappélées dans la présentation de notre zone d'études.

### 1-1- Les Grands sous-Bassins.

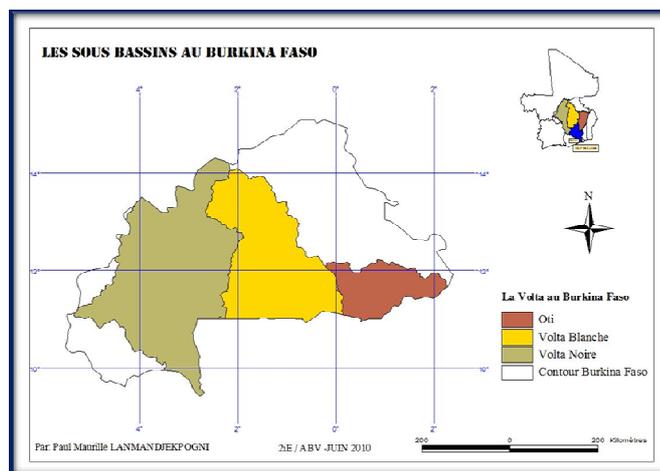
L'étude s'est appesanti surtout sur la recherche des sous bassins d'envergure sous régionale. Ceux dont les positions et les superficies passent outre les frontières entre les pays. Il s'agit donc d'abord, de la Volta Blanche ou Nakambé, de la Volta Noire ou Mouhoun, de l'Oti-Pendjari et enfin de la Volta Inférieure autour du lac Volta dans le Ghana. Ces sous bassins sont présentés sur les figures 10 à 16 ci-dessous.



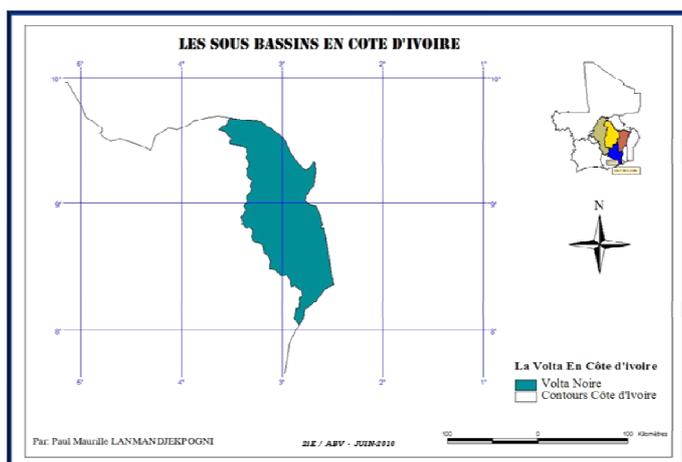
**Figure 10: Les quatre grands sous bassins de la Volta.**



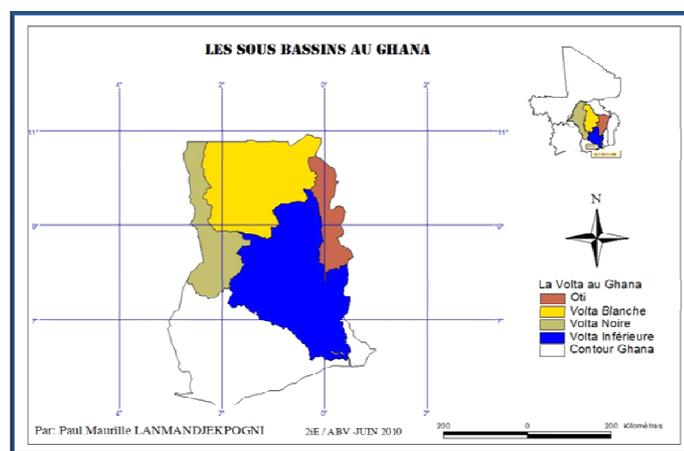
**Figure 12: L'Oti-Pendjari au Bénin**



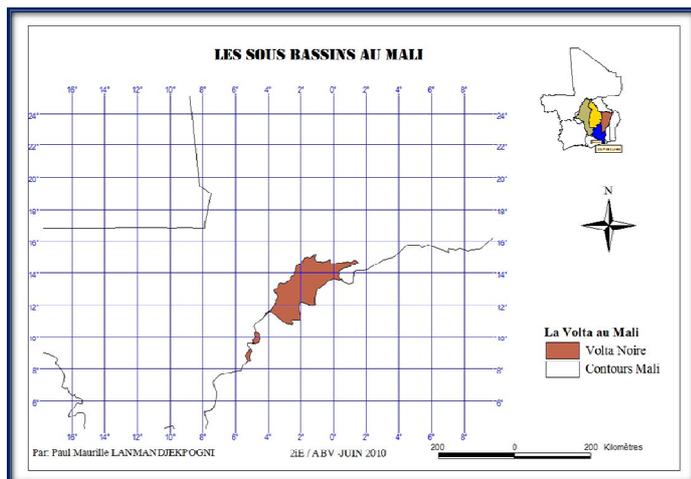
**Figure 11: Les Bassins du Mouhoun, le Nakambé et l'Oti au Burkina Faso.**



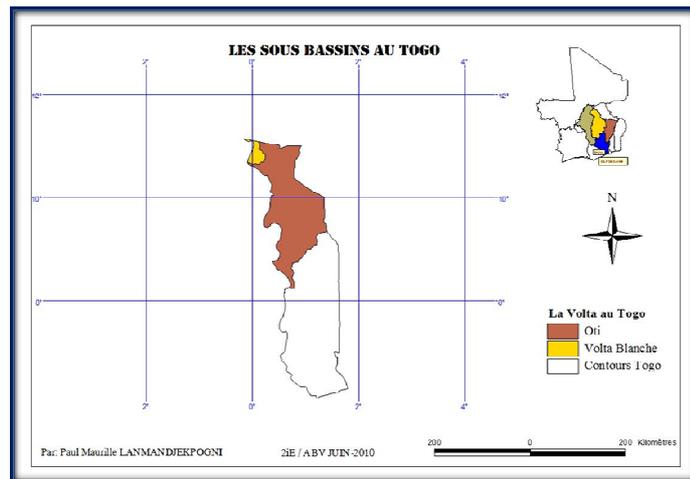
**Figure 14: La Volta Noire en Côte d'Ivoire**



**Figure 13: La Volta Noire, la Volta Blanche, l'Oti et la Volta Inférieure au Ghana**



**Figure 16: La Volta Noire au Mali**



**Figure 15: La Volta Blanche et l'Oti au Togo**

la répartition géographique du bassin est présentée au tableau 7. A l'annexe II, nous montrons au tableau 15, les proportions de chaque sous bassin suivant les pays.

**Tableau 7 : Répartition géographique du bassin de la Volta entre les pays.**

| Pays          | Bassin (Km <sup>2</sup> ) | %/pays       | %/Bassin   |
|---------------|---------------------------|--------------|------------|
| Burkina Faso  | 171559,43                 | 62,95        | 42,41      |
| Bénin         | 15227,00                  | 13,00        | 3,76       |
| Togo          | 23385,93                  | 40,78        | 5,78       |
| Mali          | 16861,15                  | 1,34         | 4,17       |
| Cote d'ivoire | 13145,23                  | 4,08         | 3,25       |
| Ghana         | 164339,55                 | 68,72        | 40,63      |
| <b>Total</b>  | <b>404518,30</b>          | <b>17,86</b> | <b>100</b> |

Le bassin présente en certaines zones, des terrains presque totalement plat (horizontal) avec donc une pente pratique de 0%. Cependant la pente varie globalement entre 0 et 14.2%, avec une moyenne qui oscille entre 2.43 et 2.75%.

### 1-2- Reconstitution des données et évolution des débits moyens annuels.

Les regressions linéaires effectuées entre certaines stations, ont présenté des coefficients de corrélation allant de 0.67 pour les moins bonnes à 0.95 dans les meilleurs cas. Le tableau 8 suivant présente pour cinq couple de stations, les coefficients de corrélation (R<sup>2</sup>), la pente (a) et l'ordonnée à l'origine (b) obtenue pour les équations de regression de y en x. les courbes de regressions sont présentée en annexe à la figure 22.

**Tableau 8 : Résultats des regressions linéaires**

| Stations  |               | Période de regression | paramètres |        |                |
|-----------|---------------|-----------------------|------------|--------|----------------|
| Station y | Station x     |                       | a          | b      | R <sup>2</sup> |
| Nwokuy    | Samendéni     | 1970-1986             | 1.54       | 0.98   | 0.67           |
| Dapola    | Boromo        | 1970-1981             | 3.82       | -32.91 | 0.92           |
| Noumbiel  | Bui Dam Amont | 1961-1969             | 0.89       | 1.32   | 0.91           |
| Yarugu    | Pwalagu       | 1962-2005             | 0.9        | 0.30   | 0.75           |
| Porga     | Saboba        | 1956-1978             | 0.19       | 13.88  | 0.79           |

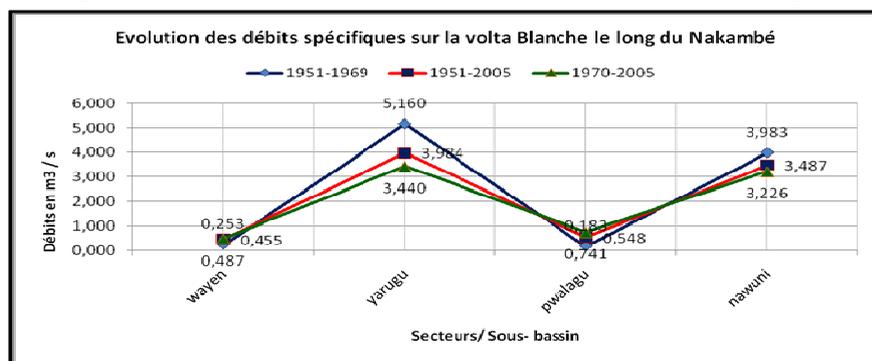
L'évolution des débits moyens annuels, les tracés des courbes de variation au fil des années sur chaque station, nous confirme globalement l'hypothèse d'une chute remarquable dans la moyenne annuelle des débits avant et après les années 1970. Les courbes de tendances (figure 23 de l'annexe), montrent une décroissance générale des débits sur toute la période depuis les années 1950. Le phénomène contraire observé à wayen dans la deuxième partie de la série est particulier. On peut le lier au processus d'augmentation des ruissellement par le fait de la mise à nu des terres pour l'agriculture.

### 1-3- Les débits spécifiques autour de l'année référence 1970.

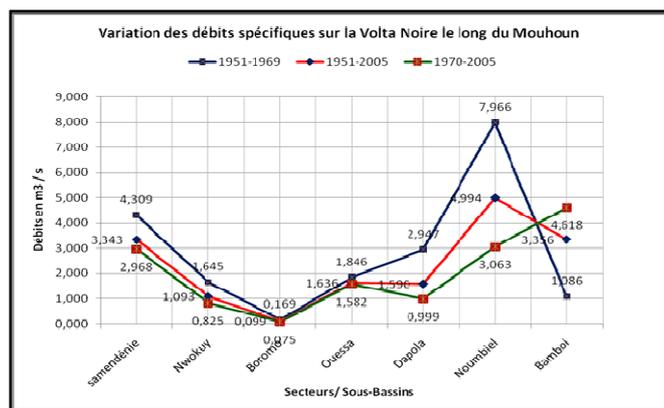
Nous avons calculé dans un premier temps, pour toute la période et pour chaque sous période les valeurs des modules. Les différences constatées sont traduites par les déficits obtenus avec la formule :

$$Déficit = \frac{(Débit_{après\ 1970}) - (Débit_{avant\ 1970})}{Débit_{avant\ 1970}} \quad (5)$$

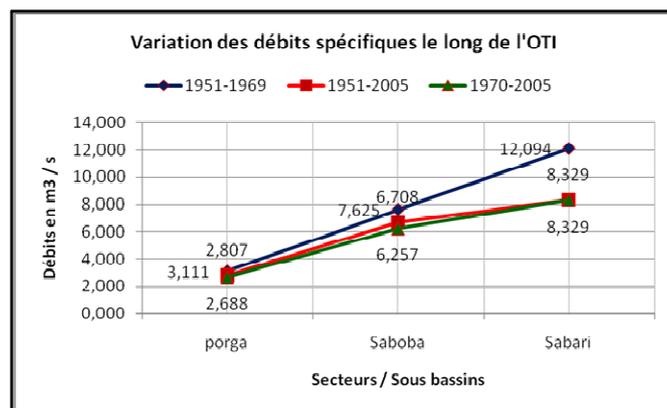
Les résultats des calculs de débits spécifiques, présentés au tableau n°14 de l'annexe II, ont permis de construire pour chaque sous bassin les courbes qui retracent l'évolution des débits spécifiques le long de la Volta Noire, de la Volta blanche et de l'Oti-Pendjari.



**Figure 17: variation des débits spécifiques par secteurs sur la Volta Blanche**



**Figure 19:** variation des débits spécifiques par secteurs sur le Mouhoun



**Figure 18:** variation des débits spécifiques par secteurs sur l'Oti

Tel que le montrent les courbes des figures n°17, 18 et 19, les débits spécifiques suivant les secteurs N, B et O, restent très variables et présentent des allures proches de celles des apports d'eau moyens annuels (annexe I), pour le Mouhoun et le Nakambé. Dans l'ensemble des trois sous bassins, les superficies des secteurs, varient de 4404.01 km<sup>2</sup> à 54799.98 km<sup>2</sup> avec une moyenne de 18668.27 km<sup>2</sup>. Les tableaux 18, 19 et 20 de l'annexe III présentent la correspondance des différents secteurs avec la situation administrative et territoriale des régions.

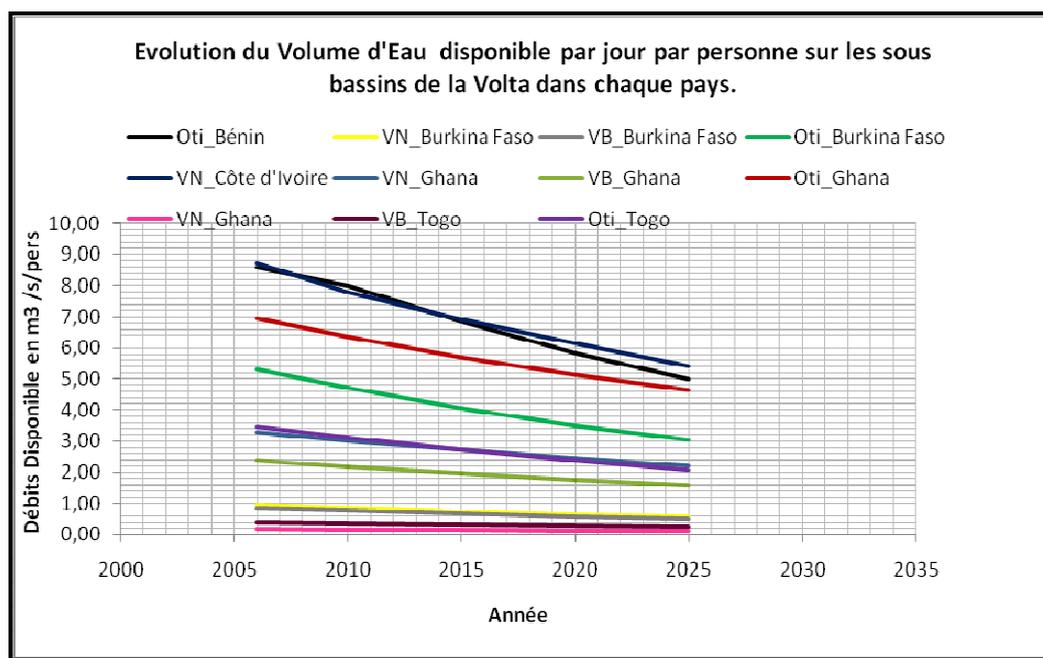
Pour ce qui concerne les  $\Delta Q_{MA}$ , ils peuvent varier jusqu'à 119m<sup>3</sup>/s sur le Mouhoun, 158.46m<sup>3</sup>/s sur le Nakambé et 243.35m<sup>3</sup>/s sur l'oti, selon la série et le secteur considérée. Pour la période après 1970, le  $\Delta Q_{MA}$  est passé de 13m<sup>3</sup>/s au secteur-samendénie à 119.72m<sup>3</sup>/s à Bamboi avec des chutes remarquables à 4.13m<sup>3</sup>/s à Boromo et 17m<sup>3</sup>/s à Dapola bien que les débits en amonts étaient légèrement au dessus de ces valeurs. Les quelques contrastes qu'on peut observer pourraient s'expliquer quelque peu par la variabilité des caractéristiques géomorphologiques et hydrodynamiques des sols sur les bassins versants et des prélèvements en route, faits sur les tronçons des cours d'eau dans la partie sud-ouest du Burkina Faso et Nord-Ouest du Ghana. Les valeurs maximales des apports de débits sont observées sur l'oti entre 71m<sup>3</sup>/s et 243m<sup>3</sup>/s.

De façon générale, le débit spécifique est utile à la comparaison des cours d'eau indépendamment des étendus de leurs bassins versants. Pour le présent travail, les débits spécifiques par secteur défini ( $Q_{MA}$  divisé par la superficie du secteur) permet entre autre de comparer la réponse de chaque tronçon (entre les stations installées pour les mesures hydrométriques) du cours d'eau à l'écoulement. On remarque donc à l'observation des

courbes des figures n°17, 18 et 19, que les valeurs sont généralement faibles entre les trois cours d'eau. Les débits spécifiques varient de 0.075 l/s/km<sup>2</sup> à 7.96 l/s/km<sup>2</sup> sur le Mouhoun selon la série et le secteur. Sur le Nakambé il peut passer de 0.183 l/s/km<sup>2</sup> pour les plus faibles, à 5.16 l/s/km<sup>2</sup>. Encore une fois les débits spécifiques observés sur l'oti sont les plus élevés avec un minimum de 2.68 l/s/km<sup>2</sup>, il peut atteindre 12 l/s/km<sup>2</sup>. Par ailleurs les débits spécifiques de la série avant 1970, sont au dessus des valeurs respectivement des séries après 1970 et pour toute la série complète. Le débit spécifique moyen sur l'ensemble du bassins est de 1.6 l/s /km<sup>2</sup>, 2.25 l/s/km<sup>2</sup>, 5.06 l/s/km<sup>2</sup> respectivement sur les bassin de la volta noire, la volta blanche et l'Oti-Pendjari après 1970.

#### 1-4- La disponibilité de l'Eau sur la Volta Noire, la Volta Blanche et l'Oti-Pendjari.

l'observation des ratios d'eau mobilisable suivant les différents sous bassins, indique les courbes qui suivent :



**Figure 20: Evolution du ratio d'eau de surface mobilisable sur le bassin pour chaque pays.**

Pour un supposé usage exclusif à 100% en eaux de surface sur le bassin, les valeurs moyennes des débits que chaque habitant peut exploiter, connaissent une décroissance générale dans tous les pays entre 2006 et 2025. Bien qu'elles restent toutes asymptotiques au fil des années, l'Oti offre la meilleure situation avec au Bénin 5m<sup>3</sup>/jr/personne en 2025 et à 4,27m<sup>3</sup>/jr/hbt à l'horizon 2030. Les indicateurs prennent les valeurs les plus faibles au Mali avec 0,16m<sup>3</sup>/jr/personne en 2010 et 0,11m<sup>3</sup>/jr/hbt en 2025. Les légères différences de

croissance des densités de populations ont pour effet de réduire les écarts des ratios d'eau entre les pays au fil du temps. Puisque l'effet du changement climatique ou des variations saisonnières des écoulements n'est pas intégré dans cette analyse, on observe un resserrement systématique vers la valeur 0, des courbes de 2006 vers 2025 et au delà.

**1-5- Comparaison de demande estimée au potentiel moyen disponible par pays..**

Nous utilisons pour cette comparaison, l'état des demandes d'eau pour les usages majeurs (domestic/industriel, bétail et irrigation) sur le bassin de Volta, présentée par (BARRY et al., 2005). Les demandes sont répertoriées au tableau 14 à l'annexe II. L'analyse est faite pour les années communes avec notre période d'étude. C'est-à-dire 2010, 2020 et 2025. La projection de la population est récapitulée au tableau 9.

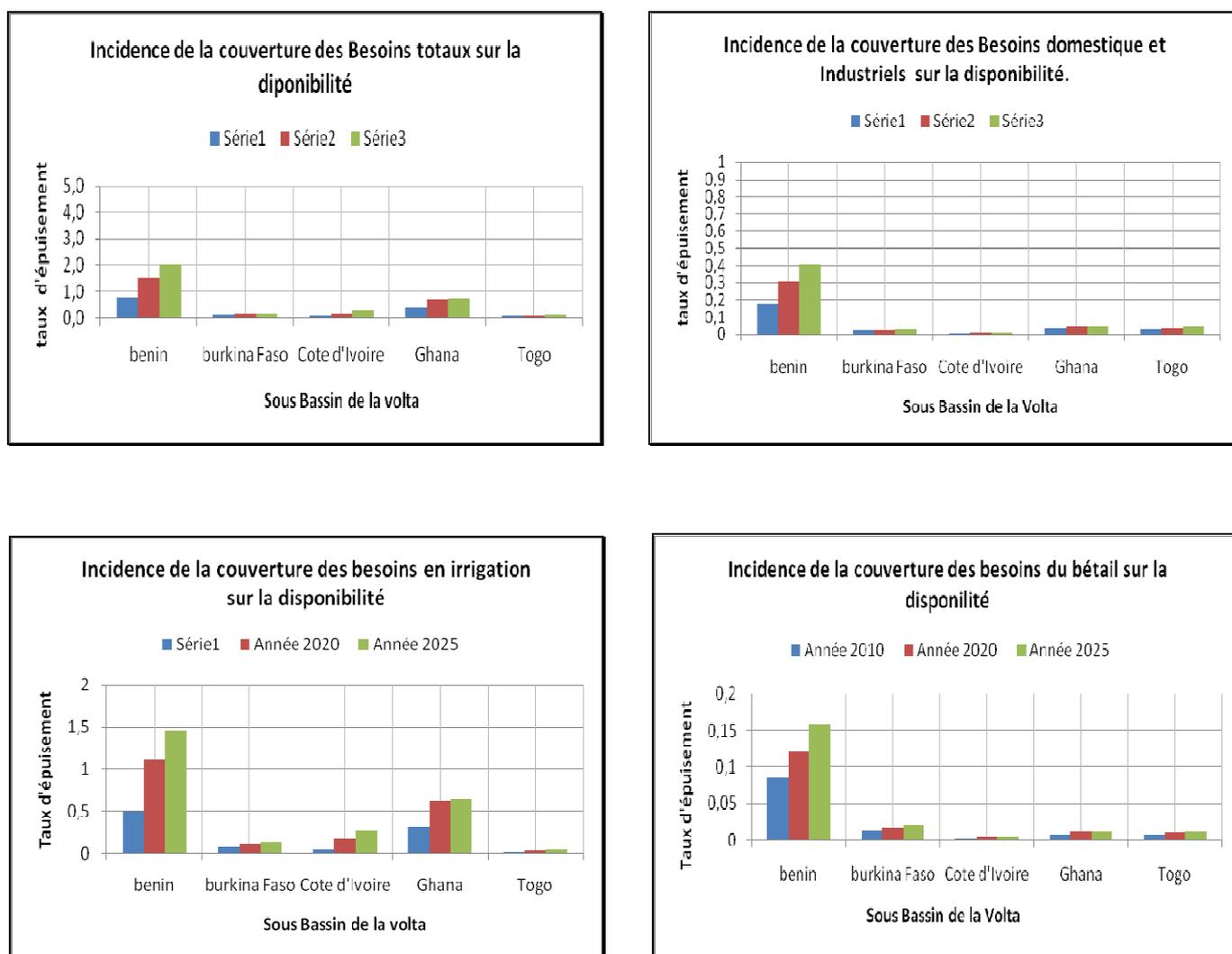
**Tableau 9: Evolution des population sur chaque sous bassin jusqu'en 2030.**

| Sous bassins \ Années            | La Population sur le Bassin de la volta |                   |                   |                   |                   |                   |
|----------------------------------|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                                  | 2006                                    | 2010              | 2015              | 2020              | 2025              | 2030              |
| <b>BENIN</b>                     | 350221                                  | 375257            | 439265            | 514192            | 601899            | 704567            |
| <b>Volta Noire BURKINA</b>       | 4292752                                 | 4831530           | 5601068           | 6493173           | 7527367           | 8726281           |
| <b>Volta Blanche BURKINA</b>     | 6108470                                 | 6875136           | 7970167           | 9239608           | 10711238          | 12417261          |
| <b>Oti BURKINA</b>               | 752247                                  | 846661            | 981512            | 1137842           | 1319070           | 1529164           |
| <b>Volta noire CÔTE D'IVOIRE</b> | 315486                                  | 354017            | 398588            | 448770            | 505270            | 568883            |
| <b>Volta Noire GHANA</b>         | 1461335                                 | 1601177           | 1776511           | 1971045           | 2186882           | 2426353           |
| <b>Volta Blanche GHANA</b>       | 2992888                                 | 3279290           | 3638385           | 4036801           | 4478845           | 4969294           |
| <b>Oti GHANA</b>                 | 839905                                  | 920279            | 1021053           | 1132862           | 1256914           | 1394551           |
| <b>Volta noire MALI</b>          | 320362                                  | 369905            | 426743            | 492315            | 567963            | 655235            |
| <b>Volta Blanche TOGO</b>        | 125613                                  | 140321            | 160315            | 183158            | 209256            | 239073            |
| <b>Oti TOGO</b>                  | 2540383                                 | 2837831           | 3242192           | 3704171           | 4231976           | 4834988           |
| <b>TOTAL</b>                     | <b>20.099.662</b>                       | <b>22.431.403</b> | <b>25.655.799</b> | <b>29.353.936</b> | <b>33.596.681</b> | <b>38.465.651</b> |

Bien que les populations augmentent assez rapidement sur le bassin, les taux moyens d'épuisement que nous avons évalués à partir des observations moyennes annuelles sont présentés à la figure 21. On peut remarquer que les besoins au niveau de la plupart des pays à l'horizon 2025 sont très largement en dessous des potentialités en eau des bassins.

Pour le Burkina Faso, on projète un épuisement de 16% en 2020 et 18% en 2025 pour l'ensemble des besoins. En Côte d'Ivoire, au Ghana et au Togo, les projections indiquent respectivement 29.5%, 71% et 11% d'épuisement des disponibilités en eau de surface en

2025. Les taux les plus forts sont à attribuer aux besoins exprimés pour l'irrigation dans les prochaines années. Pour le Bénin, le déficit apparait très tôt et peut aller jusqu'à 100% en 2025. En effet les demandes estimées sur le bassin de la volta au Bénin sont très grands ( même le double parfois de celle du Burkina), pour un apports spécifique moyen de 4.15l/s/km<sup>2</sup>. En dépit des demandes croissantes au niveau du Mali, nous estimons que les résultats obtenus ici, s'écartent beaucoup trop de la réalité. Cela peut s'expliquer par la particularité des écoulements au niveau du sourou. Ceci est une situation qu'il faudra isoler pour étude.



**Figure 21:** Incidence séparée des besoins sur la disponibilité dans chaque pays en 2010, 2020 et 2025.

En ce qui concerne l'irrigation, les besoins sont généralement grands dans tous les pays, et les taux d'épuisement projetés indiquent 46% de déficit pour le Bénin contre seulement 13% d'utilisation Burkina Faso en 2025. Le bassin au Mali fait 1% de la superficie et la majeure partie du pays est arrosée par le fleuve Niger. Les besoins d'irrigation sont énormes pour les eaux de surface et on devra recourir à d'autres sources ou cours d'eau pour les couvrir déjà avant 2020. Il y a donc dans ces pays, un besoin d'accompagner l'accroissement des demandes par des stratégies pour rationaliser les usages et de diversifier les sources d'apport en eau.

**DISCUSSION ET ANALYSE**

## I- CRITIQUE DU MODÈLE NUMÉRIQUE.

En comparaison avec les valeurs des superficies auxquelles d'autres études ont abouti, les écarts par rapports à nos résultats sont déterminés suivant selon la formule :

$$E = \frac{(S_0 - S_i)}{S_0} \quad (6)$$

Avec  $S_0 = 404518.30 \text{ km}^2$  et  $S_i(\text{km}^2)$  les différentes superficies proposées par d'autres études.

**Tableau 10:** Comparaison aux résultats de quelques études antérieures

| Travaux ou Projets                   | Monographie Hydrologiques N°5 de l'ORSTOM volta(1977) | Glowa-Volta (2000) | CGIAR Winston E.I. (2005) | CGIAR D. de Condappa (2008) | Volta-HYCOS (2006) | SIEREM  | www.giwa.net |
|--------------------------------------|---|--------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------|---------|--------------|
| Superficie du bassin Km <sup>2</sup> | 398.392   | 407.093            | 417.382                   | 394.100                     | 400.000            | 412.000 | 412800       |
| Ecart en %                           | 1.51  | -0.64              | -3.18                     | 2.58                        | 1.12               | -1.85   | -2.05        |

L'écart le plus faible est obtenu avec le projet Glowa-Volta (2000) avec moins de 1% de différence. Soit 407093 km<sup>2</sup>. Par contre nous sommes à 12 % au dessus du chiffre qu'utilise l'ABV jusque là. L'appréciation du modèle a reposé sur l'exactitude du réseau hydrographique numérique extrait. Pour un taux d'accumulation de 500 cellules, le réseau retenu, que nous avons superposé au réseau Burkinabè est présentée à la figure n°18. En l'absence d'information de source maîtrisée, seul le système d'Information géographique Burkinabè a pu être utilisé pour peu que le Burkina faso a une superficie suffisamment représentative sur la bassin de la volta (environ 42% du bassin). La superposition est alors satisfaisante pour les grands cours d'eau : Le Mouhoun, le Nakambé, le Nazinon, et une partie de l'Oti. Nous avons de ce fait considéré Le réseau numérique extrait, comme étant représentatif du bassin à un niveau de confiance acceptable.

Remarquons qu'une bonne littérature existe sur les méthodes d'interpolation, et il se trouve qu'en réalité elles commettent des erreurs très proches les unes des autres surtout au niveau des concavités ou des convexités des reliefs. Il s'agit des zones de talwegs et de crêtes. Cependant elles donnent des restitutions de qualité globalement suffisante et voisines entre elles et avec le relief (Rousseau, 2006). Tout ceci dépend fondamentalement de la qualité et du type d'information en entrée. Le choix que nous avons fait repose sur la

régularité de l'échantillon d'entrée et sa densité par rapport à la taille de la zone. Nous retiendrons alors en comparaison des écarts, qu'il faudra vérifier la démarche et la qualité des données qui ont produit la superficie de 407093 km<sup>2</sup>. Ceci permettra de porter un jugement complet entre cette valeur et notre résultat. Toute fois, il importe de souligner qu'une différence apparait du point de vue cartographique au Nord du Bassin sur la bande du sourou. Figure n° de l'annexe.

## **II- IMPACT DE LA DEMANDE ET DES RETENUES EXISTANTS SUR LA RESSOURCE ET SA RÉPARTITION SPATIO-TEMPORELLE SUR LES SOUS BASSINS.**

A la lecture des graphes de variation des apports spécifiques sur les secteurs d'étude, on peut remarquer aisément que les bassins ont des apports très variés le long des cours d'eau de l'étude. La relation entre débits spécifique et densité de population n'est pas très forte pour les grands sous bassins. Les activités des populations expliquent mieux la baisse des débits et cela se remarque mieux dans la partie Nord-Ouest du bassin du Nakambé au Burkina Faso, où les aménagements et réservoirs d'eau sont beaucoup plus concentrées que dans les parties ghanéennes. Outre la désertification sur le bassin, nous pouvons donc attribuer cette disparité des apports spécifiques aux divers stockages et ouvrages de prélèvement sur les cours d'eau ; surtout qu'elles ne sont pas toutes contrôlées : Plus de 1140 petits réservoirs non répertoriés ont été identifiés au Burkina Faso contre 253 au Ghana en 2002 et bien que leur capacité de stockage est considérée comme étant faible, il est admis arbitrairement, un taux minimal d'accroissement de 10% l'an et cela participera beaucoup à la baisse du volume d'eau à AKOSSOMBO dans les 20 prochaines années pour un seuil de 3% annuel de module moyen annuel (Decondappa, 2008). Nous sommes convaincus par ces résultats, que ces réservoirs agissent également en amont sur la ressource. Remarquons que l'évaluation de la disponibilité en eaux de surface présentée dans ce rapport, fait abstraction du potentiel d'eau déjà mobilisée au niveau de nos différents barrages et retenues. En effet, du fait du changement climatique, des ensoleillements très forts sont enregistrés (40°-50° au Burkina Faso) pendant les périodes de saison sèche. L'augmentation de la demande climatique contribue à une baisse considérable des niveaux d'eau dans les retenues. Cette démarche, qui minimise la disponibilité en eau de surface, et augmente ainsi, les risques d'obtenir des résultats inquiétants. Ce qui heureusement n'a pas été le cas. Les seuils annuels réels d'utilisation sont donc en dessous des taux obtenus et présentés au tableau 14 de l'annexe. En ce qui concerne la relation avec (Barry et al., 2005), les demandes projetées constituent en soi les besoins de stockage et de prélèvements totaux estimés pour l'horizon 2025. Il est donc important pour

l'équilibre sur le bassin, que chaque pays définisse ses utilisations prioritaire de l'eau, en tenant compte non pas seulement des moyens pour mobiliser l'eau, mais également des limites de la capacité du bassin qu'il gère.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le bassin de la Volta, bien que n'étant pas le plus grand en Afrique de l'ouest, garde tout de même un rôle décisif dans le développement socio économique et même politique des pays qui en sont naturellement héritiers. En cela, en amont aux questions proprement dites d'amenuisement des ressources et de gestion du partage de l'eau, il importe d'en convenir clairement de ses frontières géographiques. La présente étude, aux travers d'une interpolation en IDW, nous a permis d'aboutir à un modèle numérique du bassin dont la superficie totale est de 404518.30km<sup>2</sup>. il revient ainsi à chaque pays une superficie de 42.4% ; 3.76% ; 5.78% ; 4.17% ; 3.25% et 40.63% en proportion du bassin respectivement pour le Burkina Faso, le Bénin, le Togo, le Mali, la Côte d'Ivoire et le Ghana. Ces résultats sont à moins de 1% d'écart, des résultats de Glowa-projet (407093 km<sup>2</sup>) et s'écartent de 3.18% de celui du CGIAR (2005), (417382 km<sup>2</sup>). Pour l'ABV, l'utilisation du chiffre 400000 km<sup>2</sup>, n'est donc pas une fausse information à priori compte tenu de la taille du bassin. Cependant, en référence aux récents problèmes domaniaux entre les pays, le chiffre 404000km<sup>2</sup> mérite d'être approfondie et comparé à celui de Glowa-projet, pour une meilleure précision du bassin. Par ailleurs, avec un taux de croissance moyen de près de 3%, nous avons projeté qu'à l'horizon 2025, la population sur le bassin avoisinera **33.596.681** habitants, soit une densité qui passerait progressivement de 55.45 hts/km<sup>2</sup> en 2010 à 83 hts /km<sup>2</sup> en 2025.

La disponibilité en eau de surface va alors baisser diversement selon les sous bassins entre 2010 et 2025. Cela n'est pas à relier qu'à la taille de la population. Elle peut s'expliquer entre autre par les nouvelles stratégies de développement de l'agriculture d'exportation envisagée dans les pays. Avec la simulation faite dans cette étude, nous projetons alors que les taux d'épuisement des potentialités de mobilisation en eaux de surface vont atteindre les seuils respectifs de 18%, 29% et 11% au Burkina Faso en Côte d'Ivoire, et au Togo pour l'ensemble des demandes en 2025. Une politique pareille n'est intéressante pour le Ghana, puisqu'on y serait déjà à 71% en 2025. La demande pour l'irrigation au Bénin est particulièrement élevée pour les prochaines années et vu les capacités du sous bassin, le développement des initiatives pour les eaux souterraines seront les bienvenues. Bien que la situation du Mali mérite d'être revue, le volta Malienne nécessitera un apport en eau souterraine ou extérieur car seuls les besoins domestiques et industriels pourront être couverts mais à 80% d'épuisement. Nous projetons alors que si les stockages devaient augmenter jusqu'à hauteur des besoins estimés en 2025, l'abattement des volumes d'eau de surface ne serait pas dans les mêmes ordres de grandeurs pour tous les pays.

Ces résultats témoignent quelque peu de ce que la ressource n'est pas tout à fait inépuisable. Aussi, nous voudrions souligner que cette façon d'analyser la ressource vise à montrer les limites de chaque sous bassin, de sorte que les ambitions devenues très grands pour l'utilisation de l'eau dans chaque pays se mesure à la capacité de son sous bassin. par ailleurs, les apports en eau souterraines jouent un grand rôle de soutien à l'eau des surfaces sujettes à tous types d'agressivités tant naturelles qu'anthropiques.

Dans ce contexte l'ABV gagnera, en dehors des systèmes d'observations hydrologiques, à développer les stratégies de protection et de conservation des terres de plus en plus mis à nus avec les besoins d'alimentation.

## **RECOMMANDATIONS**

La tableau ainsi projeté, vise à offrir à l'Autorité du Bassin de la Volta (ABV), initiatrice de l'étude, des informations essentielles à l'élaboration d'une politique de gestion intégrée et durable des ressources du bassins affaiblies par la rupture climatique des années 1970. Mais avant, quelques travaux restent d'importance pour mieux connaître la géographie et la géologie afin de mieux expliquer les comportements hydrologiques du bassin. A cet effet, nous suggérons :

- La poursuite du présent travail, avec une étude comparative de modèles numériques de terrain sur la volta et une analyse des erreurs potentiels de modélisation.
- Le présent travail n'ayant pas concerné la volta inférieure au Ghana, l'étendre à ce sous-bassin et faire la simulation apport-demande avec des contributions variées en eaux souterraines (5%, 10%,15%,20%).
- Faire une carte de variation des paramètres hydrodynamiques des sols sur chaque sous bassins et faire le lien avec les variation des débits spécifiques le long des cours d'eau.
- Rendre effectif l'application d'un cadre juridique et d'une charte concensuelle pour suivre la gestion des eaux sur le bassin et permettre une meilleure conception des grands projets d'aménagement hydro-électrique et hydro-agricole. Cela contribuera à diminuer les problèmes environnementaux pour les populations transfrontalières : l'érosion et la dégradation des terres, l'inondation et les maladies d'origines hydriques. Aussi, pourra t- on mettre en œuvre un plan de gestion concertée des différents barrages à l'échelle du bassin et faciliter l'accès financière et techniques aux différents modèles de gestion de la balance ressource-usage.

Ces points ne sont pas exhaustifs mais pourraient contribuer à maîtriser, en marge des variations climatiques, les limites des utilisations d'eau que les sous bassins peuvent couvrir , et d'anticiper les stratégies pour une gestion durable et concertée des ressources entre les six pays du bassin de la Volta.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

ANDAH, W.E.I., 2005. Volta River Basin, Enhancing Agricultural Water Productivity through Strategic Research, Technical report n° 8, Challenge Program on Water and Food, P.O. Box 2075, Colombo, Sri Lanka. 59p.

BARRY B., OBUOBE E., ANDREINI M., ANDAH W., PLUQUET M., 2005. The Volta River Basin, Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture, IWMI, 198p.

De CONDAPPA D., CHAPONNIERE A., LEMOALLE J., 2008. Decision Support Tool for Water Allocation in the Volta Basin, Volta Basin Focal Project Report N°10. IRD, Montpellier, France, and CPWF, Colombo, Sri Lanka, 28p.

DIARRA G.A., 2001. Analyse de la Variabilité Hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale au vingtième siècle, Rapport de mémoire de fin d'étude d'ingénieur de l'EIER, Ouagadougou Burkina Faso. 98p.

ROUSSEAU F., 2006. Caractérisation d'erreur sur un modèle numérique en fonction de la zone morphologique. Bulletin d'Information scientifique et technique de l'IGN n° 75 (2006/1).6p.

HENRY J. C., 1977. Etude de l'Aménagement Intégrée du Bassin de la Volta Noire, Rapport de consultant en Hydrologie, Mission PNUD-UNOTC, Ouagadougou Burkina Faso

KARAMBIRI H., 2008. Hydrologie générale, Cours d'hydrologie en master environnement au 2iE, 2iE ex EIER-ETSHER, Ouagadougou Burkina Faso.

DYSON M., BERGKAMP G. et SCALON J., 2005. Débit-les Débits environnementaux : ce qu'il faut savoir, UICN, Gland (Suisse) et Cambridge (Royaume-Uni), 152p.

MAHE G. et OLYVRI J.C., 1991. Changement climatique et variation des écoulements en Afrique occidentale et Centrale, du mensuel à l'interannuel. Hydrology for Water Management of the Large River Basin. IAHS publication n°201. 1991. 163-171pp.

Ministère de l'Economie et du Développement du Burkina Faso, 2007. Rapport préliminaire du Recensement Général de la Population et des habitations, RGPH, 2006. Ouagadougou, Burkina Faso. 51p

MONIOD F., POUYAUD B., SECHET P., 1977. Le bassin du fleuve Volta, Monographie hydrologique ORSTOM n°5. 1714p.

Nii Consult, 2007. Audit de l'eau sur le bassin de la Volta, Rapport provisoire version 2. 82p.

Organisation Météorologique Mondiale, 1994. Guide des pratiques hydrologiques, cinquième édition, OMM-N° 168. 369-375pp.

Partenariat Mondial pour l'Eau. Comité Technique Consultatif., 2000. La Gestion Intégrée des Ressources en Eau, TAC Background papers n°4. Global Water Patnership SE.10525 Stockholm, Suède. 80p.

Paturel J. E., 1996. Procédure d'identification des " ruptures " dans des séries chronologiques, Hydrologie tropicale, Géosciences et outils pour le développement, IAHS Publication n°238. 12p (99-110).

RANDRIAMANGA S., COLLET C., RAKOTONDRAOMPIANO S. et TAHINA L., 2003. Etude par télédétection des géorisques dans la région d'ANJOJOROBE à Madagascar, Editions scientifiques GB, France. Vol3 n°2-3-4 131-149pp.

SERVAT E., PATUREL J. E., KOUAME B., TRAVAGLIO M., LUBES H., MARIEU B., FRITSCH J. et MASSON J., 1997. Modification des régimes d'écoulement en Afrique de l'Ouest et Centrale non Sahélienne et conséquences sur les ressources en eau, Regional Hydrology : Concept and Model for Sustainable Water Ressource Management, IAHS Publication N° 246, 1997. 8p.

SOME Y.C., 2005. Note de cours de Géomatique travaux pratiques : Utilisation de ArcVie3.x, Ouagadougou EIER. 66p.

TRAORE M., 2000. Importance des aménagements hydrauliques dans la transmission des schistosomiases, Mali. 7p.

Volta -HYCOS projet, 2006. Document de projet, 143p.

**SITES INTERNETS MIS À CONTRIBUTION.**

- 1- <http://www.fao.org>
- 2- <http://www.topex.ucsd.edu>
- 3- <http://giwa.net>
- 4- <http://sierem.org>
- 5- <http://www.conseilsgratuits.fr>

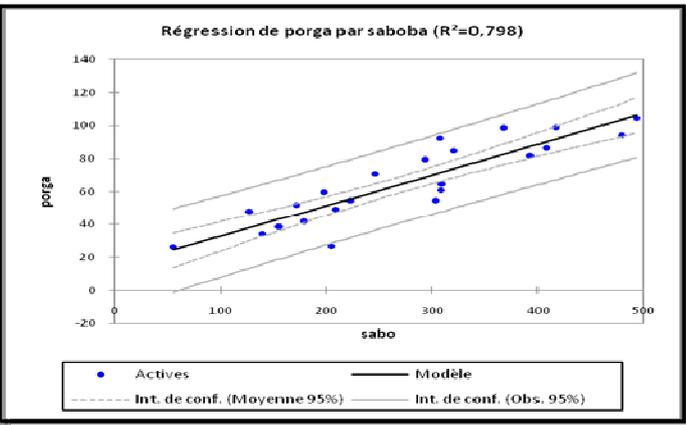
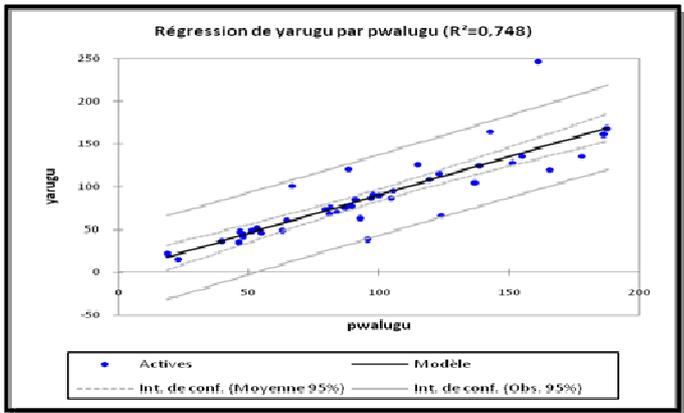
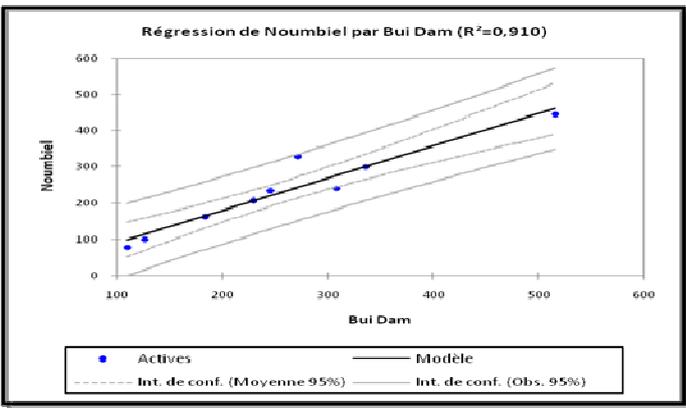
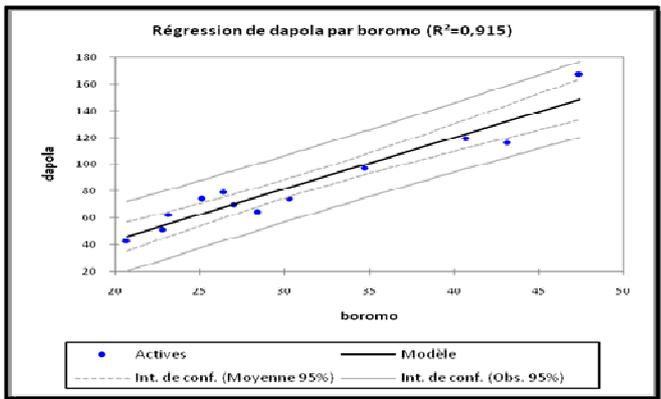
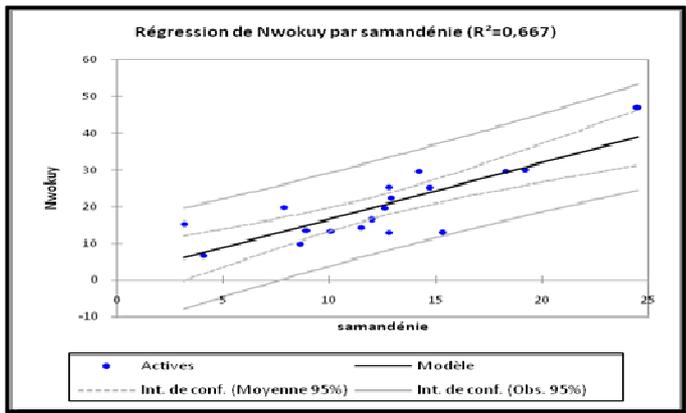
***ANNEXES***

ANNEXES -I- Les Courbes de regression et Variation des débits annuels.

ANNEXES -II- Les Cartes d'Etudes.

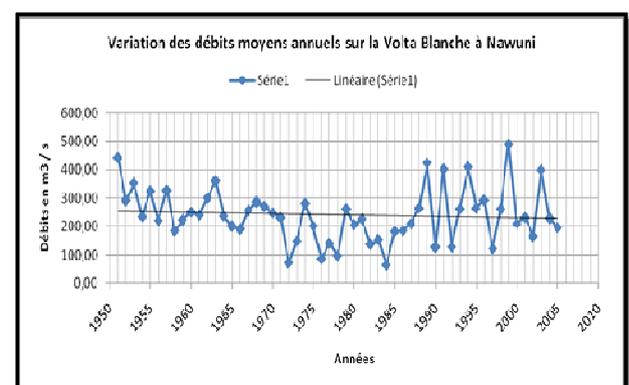
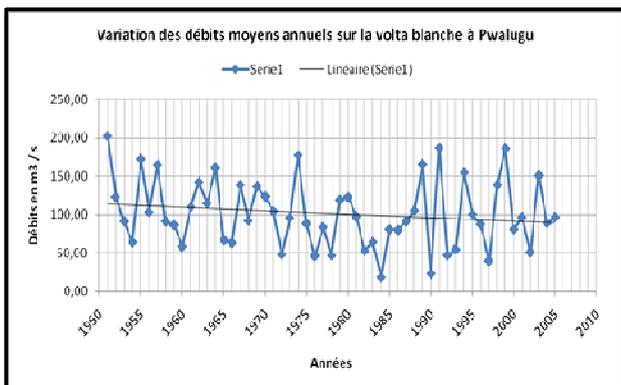
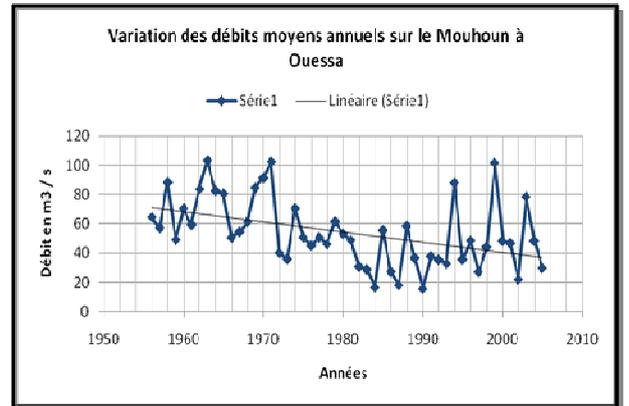
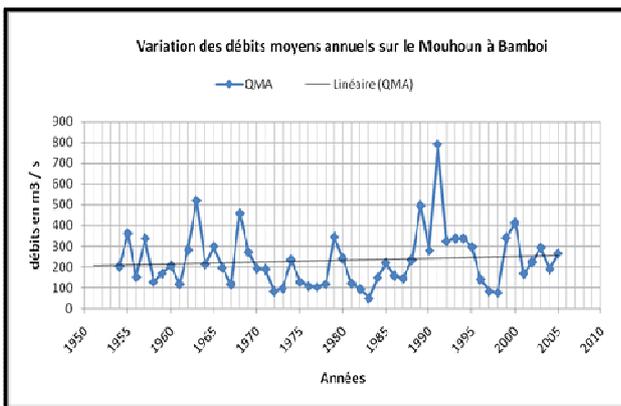
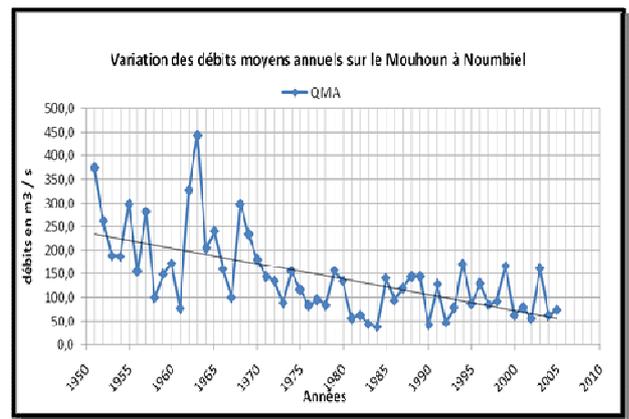
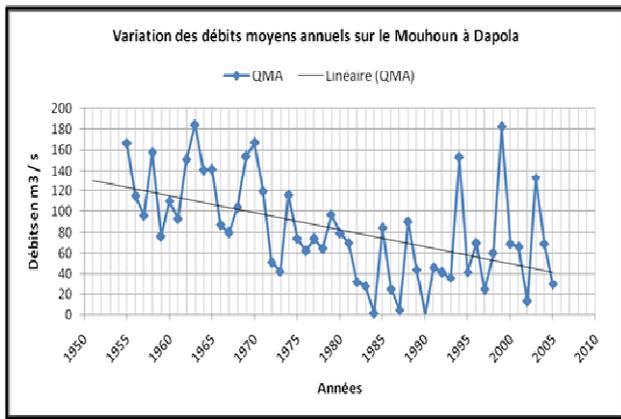
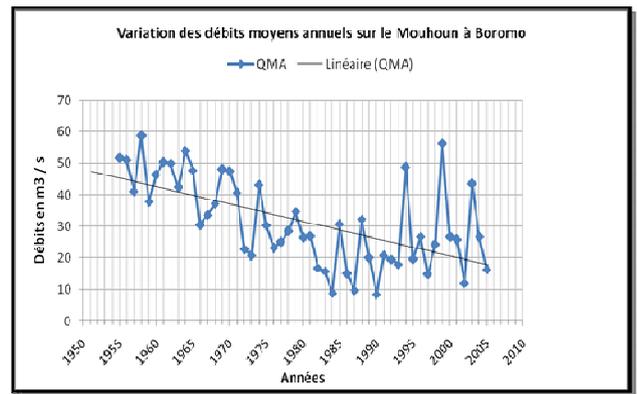
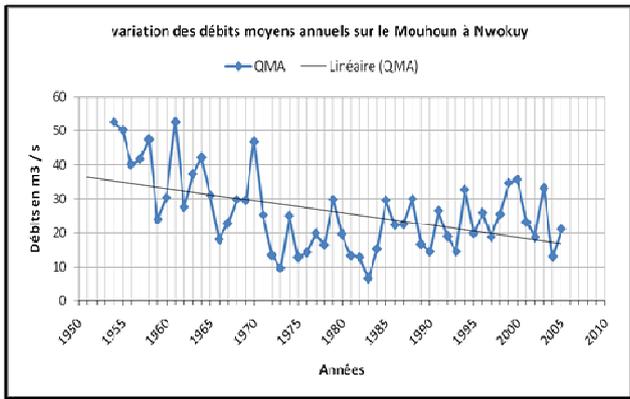
ANNEXES -III- Répertoire des tableaux et schéma de la démarche.

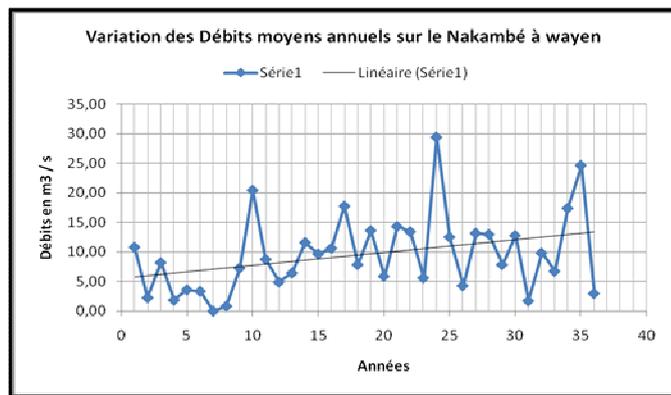
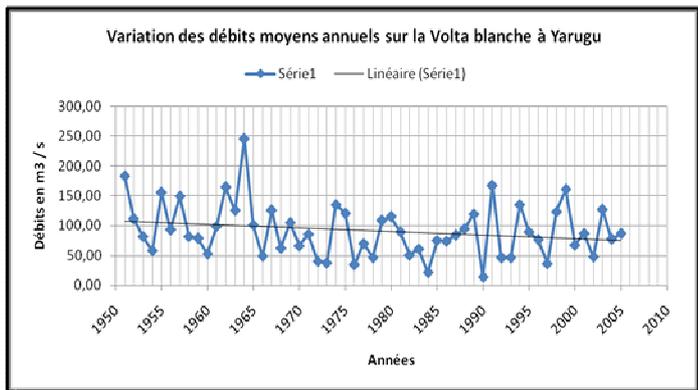
**ANNEXES -I- Les Courbes**



**Figure 22 : Courbes de regression des débits moyens annuels**

**Analyse des Rendements Spécifiques et de la Disponibilité des Eaux de Surface sur les Grands sous Bassins du Bassin de la Volta.**





**Figure 23:** Variation des débits moyens annuels des stations de l'étude.

ANNEXES -II- Les cartes d'étude

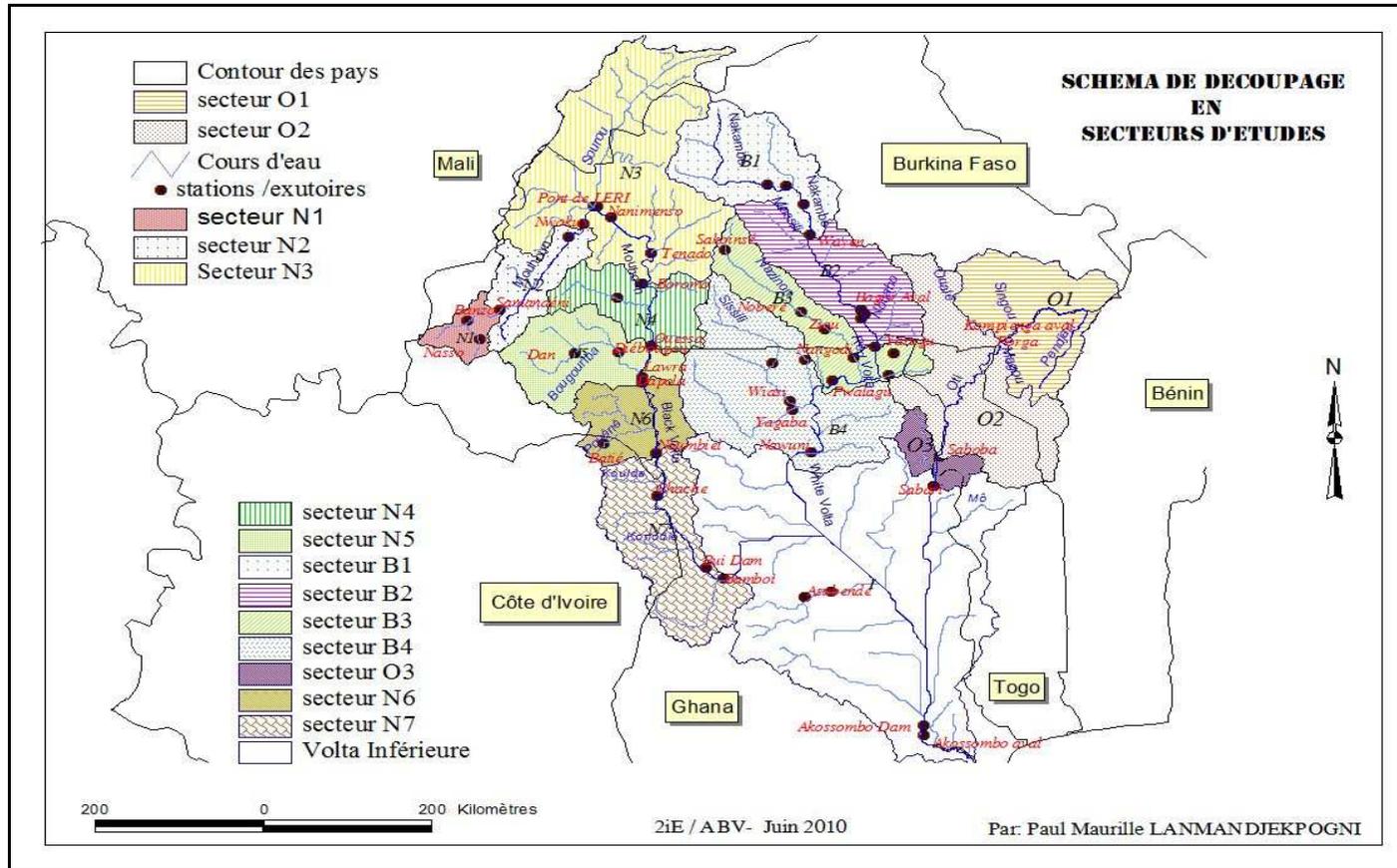


Figure 24 : Carte de découpage du Bassin en secteur d'étude.

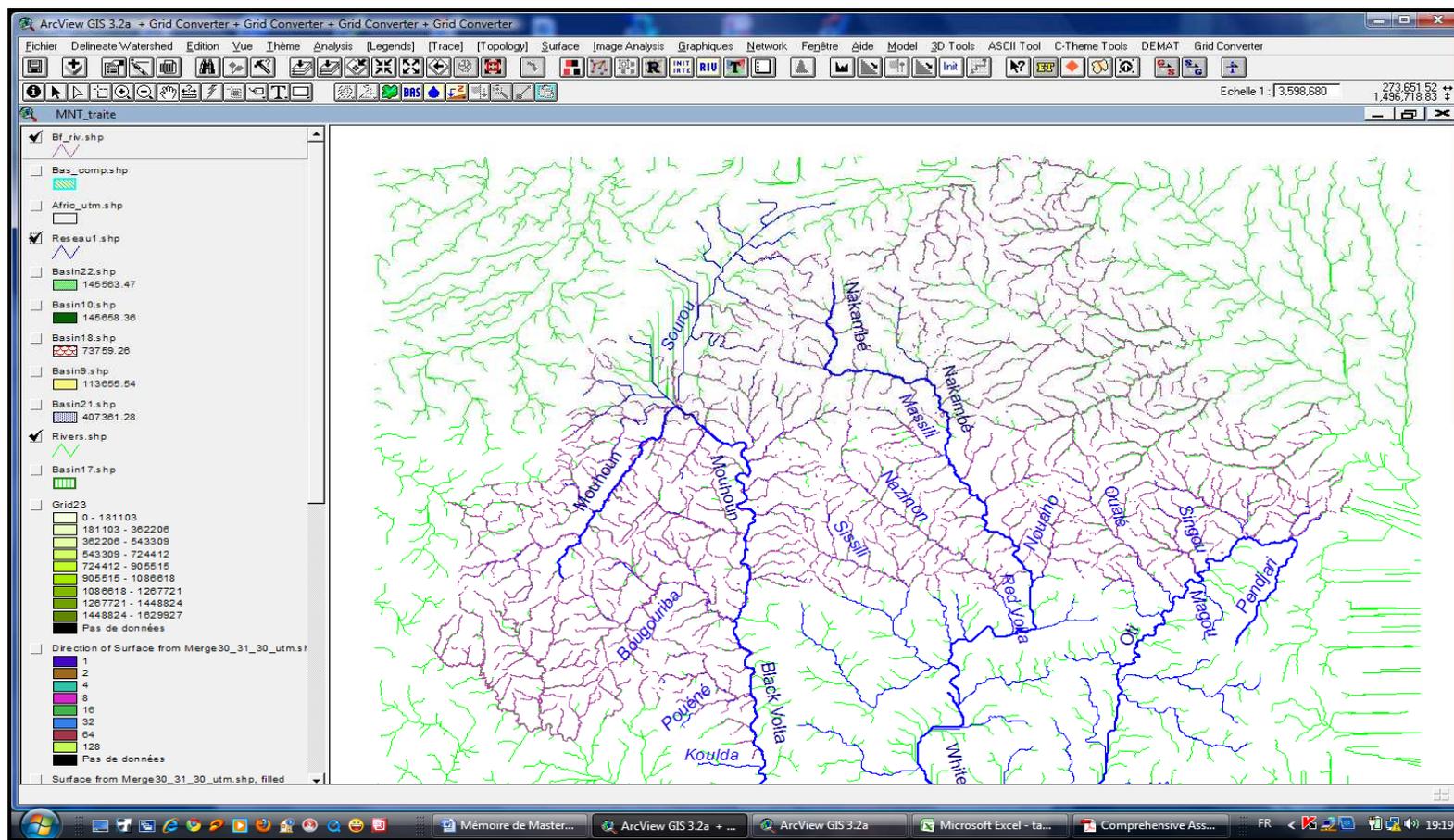


Figure 25: Superposition des couches de réseaux hydrographiques

**ANNEXES -III- Répertoire des tableaux et Shéma de la démarche.**

**Tableau 11: Caractéristiques des secteurs.**

| Secteurs | Cours d'eau            | Superficie associée | station    | Code Hydrom | Latitude | Longitude | Période   | Nbre ans |
|----------|------------------------|---------------------|------------|-------------|----------|-----------|-----------|----------|
| N1       | Volta noire /Mouhoun   | 4404.01             | Samendénie | 1202700232  | 11.46267 | -4.464807 | 1956-2005 | 50       |
| N2       | Volta noire /Mouhoun   | 10397.08            | Nwokuy     | 1202700229  | 12,5278  | -3,55     | 1954-2005 | 52       |
| N3       | Volta noire /Mouhoun   | 54799,88            | Boromo     | 1202700208  | 11,7833  | -2,9167   | 1955-2005 | 51       |
| N4       | Volta noire /Mouhoun   | 13838.58            | Ouessa     | 1202700230  | 11.02081 | -2.8255   | 1969-2002 | 50       |
| N5       | Volta noire /Mouhoun   | 17959.66            | Dapola     | 1202700211  | 10,5667  | -2,9167   | 1955-2005 | 51       |
| N6       | Volta noire /Mouhoun   | 12573.64            | Noumbiel   | 1202700228  | 9,6717   | -2,7667   | 1951-2005 | 55       |
| N7       | Volta noire /Mouhoun   | 25926,90            | Bamboi     | 1162700205  | 8,15     | -2,0333   | 1954-2005 | 52       |
| B1       | Volta Blanche /Nakambé | 21064,3             | wayen      | 1202700116  | 12,3789  | -1,08     | 1965-2000 | 36       |
| B2       | Volta Blanche /Nakambé | 20608,4             | yarugu     | 1162700165  | 11,00037 | -0,3849   | 1962-2006 | 45       |
| B3       | Volta Blanche /Nakambé | 8857.6              | Pwalagu    | 1162700140  | 10,5833  | -0,85     | 1951-2005 | 55       |
| B4       | VoltaBlanche /Nakambé  | 16649.29            | Nawuni     | 1162700130  | 9.66     | -1.055    | 1951-2000 | 55       |
| O1       | Oti                    | 23071.38            | Porga      | 1112702003  | 10.9936  | 0.9775    | 1956-2005 | 50       |
| O2       | Oti                    | 31913.22            | Saboba     | 1162701155  | 9.6      | 0.3169445 | 1953-2005 | 53       |
| O3       | Oti                    | 4985.92             | Sabari     | 1162701150  | 9.2833   | 0.2333    | 1953-2005 | 53       |

**Tableau 12:** récapitulatif des taux de croissance et densités de populations par pays.

| Pays                 | Taux de croissance en (%) | Densité sur le Bassin (hbts/km <sup>2</sup> ) | Source                                 |
|----------------------|---------------------------|---|--|
| Bénin                | 3.2                       | 24  | UNESCO-2009 Atlas-ATACORA              |
| Côte d'Ivoire        | 2.4                       | 26  | UNESCO-2009 Atlas-ZANZAN               |
| Mali                 | 2.9                       | 21  | UNESCO-2009 INSTAT-Mali.               |
| Togo                 | 2.7                       | 124   | UNESCO-2009 Atlas-Togo.                |
| Ghana                | 2.1                       | 61  | UNESCO-2009 Atlas-Ghana.               |
| <b>Burkina Faso.</b> | Taux de croissance        | Sous bassin                                   | Densité par sous bassin (région-2006). |
|                      | 3.0                       | Volta Noire                                   | 48                                     |
|                      | 3.0                       | Volat Blanche                                 | 102                                    |
|                      | 3.0                       | Oti-Pendjari                                  | 35                                     |

**Tableau 13 :** Densité de population au Burkina Faso.

| RÉGIONS           | POPULATION 2006 | SUPERFICIE (Km <sup>2</sup> ) | DENSITÉ DE POPULATION |
|-------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------|
| CASCADES          | 524956          | 18424,03                      | 28,49                 |
| HAUTS BASSINS     | 1410284         | 25573,49                      | 55,15                 |
| BOUCLE DU MOUHOUN | 1434847         | 34332,77                      | 41,79                 |
| CENTRE-OUEST      | 1183473         | 21752,48                      | 54,41                 |
| NORD              | 1182770         | 16414                         | 72,06                 |
| PLATEAU CENTRAL   | 693137          | 8605,11                       | 80,55                 |
| SUD-OUEST         | 624056          | 16317,85                      | 38,24                 |
| SAHEL             | 969881          | 36141,68                      | 26,84                 |
| CENTRE-NORD       | 1203073         | 19677                         | 61,14                 |
| CENTRE            | 1523980         | 2868,62                       | 531,26                |
| CENTRE-EST        | 1132023         | 14709,64                      | 76,96                 |
| CENTRE-SUD        | 638376          | 11457,21                      | 55,72                 |
| EST               | 1209399         | 46693,54                      | 25,90                 |

**Tableau 14:** Récapitulation des possibilités de mobilisation moyenne en 2010, 2020 et 2025.

|                             | demande projetée en eau x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>                    |      |      |              |      |      |               |       |       |         |      |      |       |      |      |         |      |      |
|-----------------------------|---|------|------|--------------|------|------|---------------|-------|-------|---------|------|------|-------|------|------|---------|------|------|
|                             | Bénin   |      |      | Burkina Faso |      |      | Côte d'Ivoire |       |       | Ghana   |      |      | Mali  |      |      | Togo    |      |      |
|                             | 2010  | 2020 | 2025 | 2010         | 2020 | 2025 | 2010          | 2020  | 2025  | 2010    | 2020 | 2025 | 2010  | 2020 | 2025 | 2010    | 2020 | 2025 |
| <b>dom/industriel</b>       | 196   | 336  | 448  | 106          | 132  | 149  | 5             | 12    | 14    | 192     | 272  | 284  | 13    | 16   | 18   | 92      | 123  | 145  |
| <b>irrigation</b>           | 548   | 1225 | 1600 | 384          | 554  | 639  | 57            | 166   | 276   | 1871    | 3605 | 3733 | 219   | 291  | 311  | 91      | 133  | 171  |
| <b>bétail</b>               | 94  | 133  | 175  | 61           | 78   | 88   | 2             | 3     | 3     | 41      | 63   | 67   | 74    | 123  | 142  | 22      | 30   | 36   |
| <b>Total</b>                | 838   | 1694 | 2223 | 550          | 764  | 876  | 64            | 181   | 293   | 2104    | 3940 | 4084 | 306   | 430  | 471  | 205     | 286  | 351  |
| <b>potentiel disponible</b> | 1097,14   |      |      | 4872,39      |      |      | 1005,03       |       |       | 5779,87 |      |      | 21,93 |      |      | 3237,68 |      |      |
|                             | Taux d'abattement moyen projeté (besoin/ disponibilité potentielle moyenne) |      |      |              |      |      |               |       |       |         |      |      |       |      |      |         |      |      |
| <b>dom/industriel</b>       | 0,18  | 0,31 | 0,41 | 0,02         | 0,03 | 0,03 | 0,005         | 0,012 | 0,014 | 0,03    | 0,05 | 0,05 | 0,59  | 0,73 | 0,82 | 0,03    | 0,04 | 0,04 |
| <b>irrigation</b>           | 0,5   | 1,12 | 1,46 | 0,08         | 0,11 | 0,13 | 0,057         | 0,165 | 0,275 | 0,32    | 0,62 | 0,65 | 9,99  | 13,3 | 14,2 | 0,03    | 0,04 | 0,05 |
| <b>bétail</b>               | 0,09  | 0,12 | 0,16 | 0,01         | 0,02 | 0,02 | 0,002         | 0,003 | 0,003 | 0,01    | 0,01 | 0,01 | 3,37  | 5,61 | 6,48 | 0,01    | 0,01 | 0,01 |
| <b>Total</b>                | 0,76  | 1,54 | 2,03 | 0,11         | 0,16 | 0,18 | 0,064         | 0,18  | 0,292 | 0,36    | 0,68 | 0,71 | 14    | 19,6 | 21,5 | 0,06    | 0,09 | 0,11 |

**Tableau 15 : Répartition géographique des grands sous bassins dans chaque pays.**

| Pays                 | Sous bassins     | Superficie (km2) | Périmètre (km) | % Bassin par pays |
|----------------------|------------------|------------------|----------------|-------------------|
| <b>Ghana</b>         | Oti              | 14735,177        | 887,268        | 6,16              |
|                      | Volta Noire      | 25637,072        | 1189,324       | 10,72             |
|                      | Volta Blanche    | 52506,814        | 1132,631       | 21,96             |
|                      | Volta Inférieure | 71460,488        | 1541,480       | 29,88             |
| <b>Togo</b>          | Oti              | 22284,065        | 1003,215       | 38,862            |
|                      | Volta Blanche    | 1101,867         | 189,969        | 1,92              |
|                      |                  |                  |                |                   |
| <b>Mali</b>          | Volta Noire      | 16861,148        | 1035,372       | 1.342             |
| <b>Cote d'ivoire</b> | Volta Noire      | 13145,234        | 679,808        | 4,08              |
| <b>Burkina Faso</b>  | Oti              | 21513,025        | 799.189        | 7,89              |
|                      | Volta Noire      | 89961,277        | 1924.363       | 33,01             |
|                      | Volta Blanche    | 60085,132        | 1355.246       | 22,05             |
| <b>Bénin</b>         | Oti-Pendjari     | 15226,998        | 759,851        | 13,01             |

**Tableau 16 : Superficie du bassin de la volta suivant chaque pays.**

|                      | Surperficie (Km <sup>2</sup> ) | % du Bassin | % du pays |
|----------------------|--------------------------------|-------------|-----------|
| <b>Bénin</b>         | 17.098                         | 4.1         | 15.2      |
| <b>Burkina Faso</b>  | 178000                         | 42.6        | 63.0      |
| <b>Cote d'Ivoire</b> | 12.500                         | 3.0         | 3.9       |
| <b>Mali</b>          | 15.392                         | 3.7         | 1.2       |
| <b>Togo</b>          | 26.700                         | 6.4         | 47.3      |
| <b>Ghana</b>         | 167.692                        | 40.2        | 70.0      |
| <b>Total</b>         | 417.382                        |             |           |

**Source:** Challenge Program on Water and Food, Baseline n°8, 2005.

**Tableau 17:** Les débits ou apports spécifiques sur les sous bassins entre 1951 et 2005 .

| bassin        | Station   | Secteur | superficie associée (km <sup>2</sup> ) | ΔQMA (m <sup>3</sup> /s) |             |             |           | ΔQMA/SBVa (l/s/km <sup>2</sup> ) |             |             |
|---------------|-----------|---------|--|--------------------------|-------------|-------------|-----------|----------------------------------|-------------|-------------|
|               |           |         |  | 1951 - 2005              | 1951 - 1969 | 1970 - 2005 | Déficit % | 1951 - 2005                      | 1951 - 1969 | 1970 - 2005 |
|               | Samendeni | N1      | 4404.01                                | 18.78                    | 14.72       | 13.07       | -11.20    | 4.31                             | 3.34        | 2.97        |
| Volta Noire   | Nwokuy    | N2      | 14811,09                               | 26,08                    | 36,07       | 21,64       | -40       | 1,76                             | 2,44        | 1,46        |
|               | Boromo    | N3      | 54789,88                               | 31,52                    | 45,33       | 25,77       | -43       | 0,10                             | 0,17        | 0,08        |
|               | Ouessa    | N4      | 13838.58                               | 25.54                    | 22.64       | 21.90       | -3.26     | 1.85                             | 1.64        | 1.58        |
|               | Dapola    | N5      | 31736,62                               | 82,7                     | 123,8       | 65,62       | -47       | 1,61                             | 2,47        | 1,26        |
|               | Noumbiel  | N6      | 12635,263                              | 145,52                   | 223,95      | 104,125     | -54       | 4,97                             | 7,93        | 3,05        |
|               | Bamboi    | N7      | 25926,899                              | 232,54                   | 252,11      | 223,85      | -11       | 3,36                             | 1,09        | 4,62        |
| Volta Blanche | wayen     | B1      | 21064.3                                | 9.57                     | 5.33        | 10.26       | 92.45     | 0.455                            | 0.253       | 0.487       |
|               | Yarugu    | B2      | 20608.4                                | 79.38                    | 98.42       | 70.48       | -28.38    | 3.852                            | 4.776       | 3.440       |
|               | Pwalagu   | B3      | 17965.71                               | 12.58                    | 11.19       | 13.32       | 19.03     | 0.700                            | 0.623       | 0.741       |
|               | Nawuni    | B4      | 39183.65                               | 138.74                   | 158.46      | 128.33      | -19.01    | 3.487                            | 3.983       | 3.262       |
| Oti-Pendjari  | Porga     | O1      | 23071.38                               | 64.76                    | 71.19       | 62.03       | -12.87    | 2.807                            | 3.111       | 2.688       |
|               | Saboba    | O2      | 31913.22                               | 214.09                   | 243.35      | 199.68      | -17.94    | 6.708                            | 7.625       | 6.257       |
|               | Sabari    | O3      | 4985.92                                | 47.55                    | 60.30       | 41.53       | -31.13    | 8.329                            | 12.094      | 8.329       |

**Tableau 18:** Etendu des secteurs sur la Volta Noire selon les découpages administratifs des pays.

| Bassins     | Secteurs     | Région traversée   | Pays         |
|-------------|--------------|--------------------|--------------|
| Volta Noire | Samendéni N1 | Cascades           | Burkina Faso |
|             |              | Hauts Bassins      | Burkina Faso |
|             | Nwokuy N2    | Boucle du Mouhoun  | Burkina Faso |
|             |              | Hauts Bassins      | Burkina Faso |
|             | Boromo N3    | Boucle du Mouhoun  | Burkina Faso |
|             |              | Centre –Ouest      | Burkina Faso |
|             |              | Nord               | Burkina Faso |
|             |              | Plateau Central    | Burkina Faso |
|             |              | Koro-Bankasso      | Mali         |
|             | Ouessa N4    | Boucle du Mouhoun  | Burkina Faso |
|             |              | Centre –Ouest      | Burkina Faso |
|             |              | Hauts Bassins      | Burkina Faso |
|             |              | Sud-Ouest          | Burkina Faso |
|             | Dapola N5    | Cascades           | Burkina Faso |
|             |              | Hauts Bassins      | Burkina Faso |
|             |              | Sud Ouest          | Burkina Faso |
|             |              |                    | Ghana        |
|             | Noumbiel N6  | Sud-ouest          | Burkina Faso |
|             |              |                    |              |
| Bamboi      | Sud-ouest    | Burkina Faso/Ghana |              |

**Tableau 19: Etendu des secteurs sur la Volta Blanche selon les découpages administratifs des pays.**

| Bassins       | Secteurs   | Régions contenues | Pays         |
|---------------|------------|-------------------|--------------|
| Volta Blanche | Wayen B1   | Boucle du Mouhoun | Burkina Faso |
|               |            | Centre            | Burkina Faso |
|               |            | Centre-Nord       | Burkina Faso |
|               |            | Nord              | Burkina Faso |
|               |            | Plateau Central   | Burkina Faso |
|               |            | Sahel             | Burkina Faso |
|               | Yarugu B2  | Centre            | Burkina Faso |
|               |            | Centre-Est        | Burkina Faso |
|               |            | Centre-Ouest      | Burkina Faso |
|               |            | Centre-Sud        | Burkina Faso |
|               |            | Est               | Burkina Faso |
|               |            | Plateau Centre    | Burkina Faso |
|               |            | Sinkassé          | Togo         |
|               | Pwalagu B3 | Centre            | Burkina Faso |
|               |            | Centre-Esst       | Burkina Faso |
|               |            | Centre-Ouest      | Burkina Faso |
|               |            | Centre-Sud        | Burkina Faso |
|               |            | Plateau Central   | Burkina Faso |
|               |            | Dapaong           | Togo         |
|               | Nawuni B4  | Centre-Ouest      | Burkina Faso |
| Centre-Sud    |            | Burkina Faso      |              |

**Tableau 20: Etendu des sceteurs sur l'Oti-Pendjari selon des découpages des pays.**

| Bassins      | Secteurs  | Régions contenue  | Pays                               |
|--------------|-----------|---|------------------------------------|
| Oti-Pendjari | Porga O1  | Atacora<br>Est Burkina Faso(tapao)                          | Bénin<br>Burkina Faso              |
|              | Saboba O2 | Donga –Atacora<br>Est Burkina Faso. ; Nord<br>Togo et Ghana | Bénin- Togo<br>Burkina Faso. Ghana |
|              | Sabari O3 | Zabzugu,bimbila ; Nord<br>togo                              | Togo-Ghana.                        |

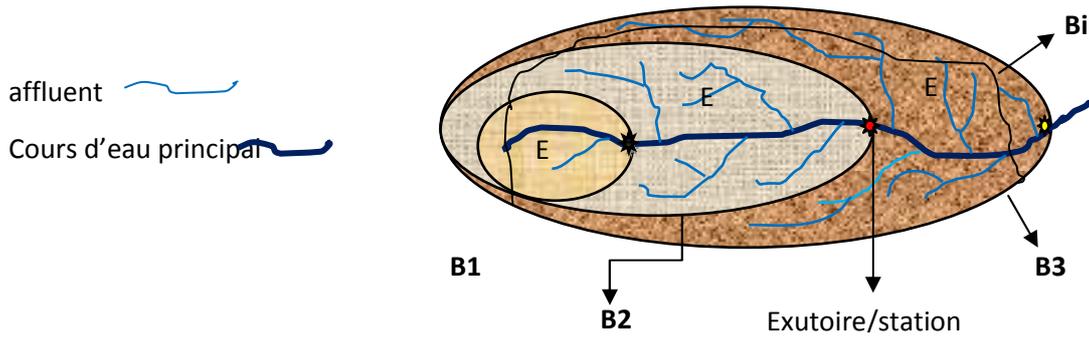
**Tableau 21: récapitulatif des QMA5.**

| Sous bassins  | Secteurs | Cours D'eau | Exutoires  | Débits moyens annuels pour une fréquence de retour de 5 ans.<br>Ajustement à une loi de Gumbel. (seuil de confiance 95%). |
|---------------|----------|-------------|------------|---|
|               |          |             |            | QMA5  |
| Volta Noire   | N0       | Mouhoun     | Samendénie | 28.1  |
|               | N1       |             | Nwokuy     | 28.3  |
|               | N2       |             | Boromo     | 34.3  |
|               | N3       |             | Ouessa     | 63.3  |
|               | N4       |             | Dapola     | 98.2  |
|               | N5       |             | Noumbiel   | 139   |
|               | N6       |             | Bamboi     | 309   |
| Volat Blanche | B1       | Nakambé     | wayen      | 13.8  |
|               | B2       |             | yarugu     | 113   |
|               | B3       |             | pwalugu    | 131   |
|               | B4       |             | Nawuni     | 300   |
| Oti-Pendjari  | O1       | Pendjari    | Porga      | 79.8  |
|               | O2       | Oti         | Saboba     | 350   |
|               | O3       |             | Sabari     | 410   |

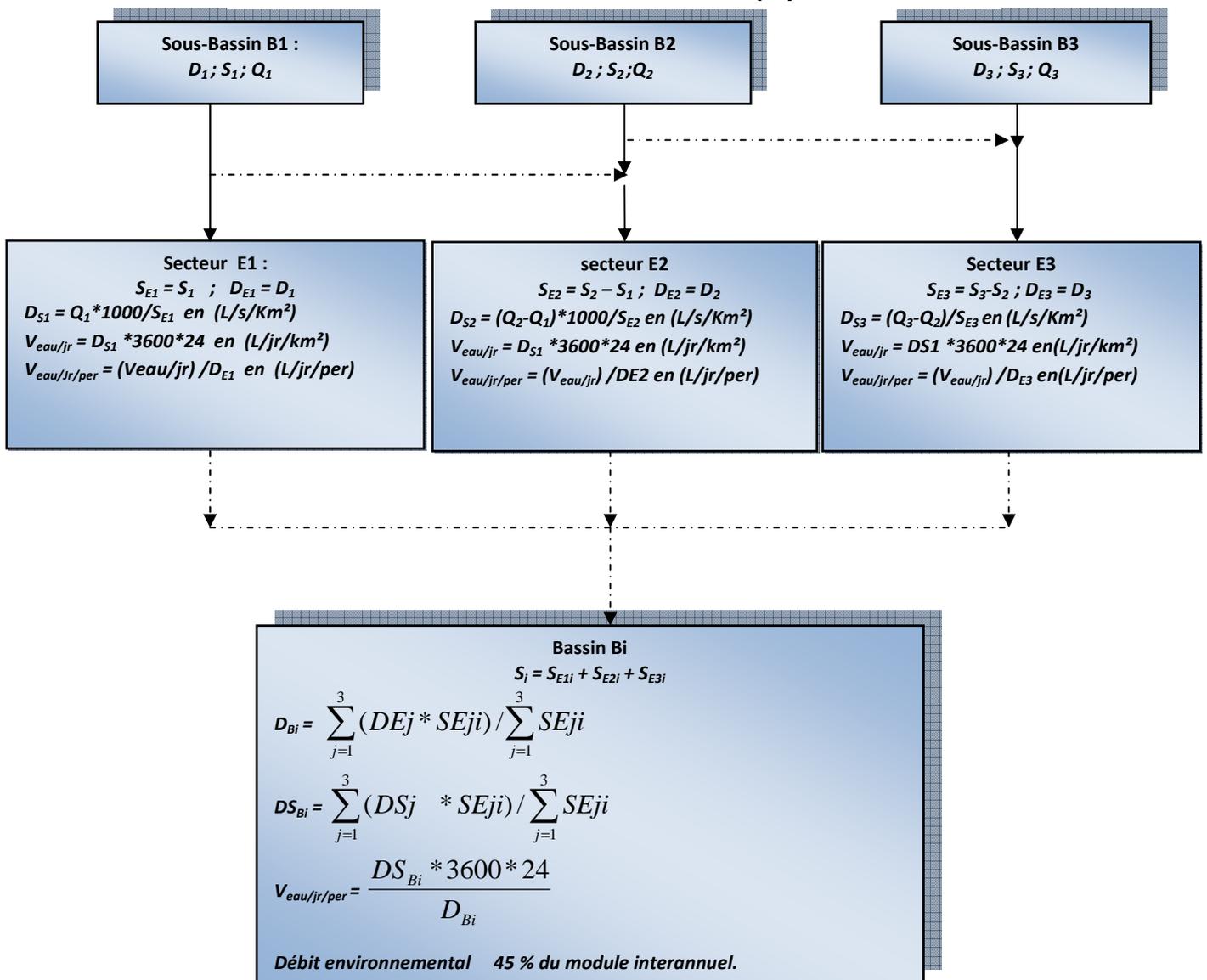
**Tableau 22 : Débits spécifiques suivant chaque sous bassin sur la Volta.**

| sous Bassins      | Débits spécifiques (L/s/km <sup>2</sup> ) |
|-------------------|---|
| Oti_Benin         | 4,15                                      |
| V_Noire Burkina   | 0,96                                      |
| V_Blanche burkina | 1,84                                      |
| Oti_burkina       | 3,91                                      |
| V_noire Ivoire    | 4,41                                      |
| V_Noire Ghana     | 3,96                                      |
| V_noire Mali      | 0,08                                      |
| V_Blanche Togo    | 0,94                                      |
| Oti_togo          | 8,33                                      |

**Schématisation de la démarche.**



**Schema d'illustration du principe de Fonctionnement des secteurs avec les sous bassin selon les pays**



$Q_i$  : Débit en m<sup>3</sup>/s du sous bassin ou secteur i.

$S_i$  ou  $S_{Ei}$ : Superficie en km<sup>2</sup> du sous bassin Bi ou du secteur Ei.

$DS_i$  : Débit spécifique en l/s/km<sup>2</sup> du secteur Ei.

**Tableau 23 : Valeurs des débits d'oyens annuels utilisées.**

| Samendénie |             | Nwokuy |       | Boromo |             | Ouessa |              | Dapola |              | Noumbiel |              | Bamboi |        |
|------------|-------------|--------|-------|--------|-------------|--------|--------------|--------|--------------|----------|--------------|--------|--------|
| Année      | QMA         | Année  | QMA   | Année  | QMA         | Année  | QMA          | Année  | QMA          | Année    | QMA          | Année  | QMA    |
| 1956       | 18,75       | 1951   |       | 1951   |             | 1951   |              | 1951   |              | 1951     | <u>374,3</u> | 1951   |        |
| 1957       | <u>20,4</u> | 1952   |       | 1952   |             | 1952   |              | 1952   |              | 1952     | <u>261,4</u> | 1952   |        |
| 1958       | 21,4        | 1953   |       | 1953   |             | 1953   |              | 1953   |              | 1953     | <u>189,1</u> | 1953   |        |
| 1959       | 16,6        | 1954   | 52,70 | 1954   |             | 1954   |              | 1954   |              | 1954     | <u>188,1</u> | 1954   | 202,92 |
| 1960       | <u>18,4</u> | 1955   | 50,10 | 1955   | <u>51,6</u> | 1955   |              | 1955   | 166,6        | 1955     | <u>298,1</u> | 1955   | 360,76 |
| 1961       | 22,3        | 1956   | 40,10 | 1956   | <u>51</u>   | 1956   | <u>64,7</u>  | 1956   | 115,1        | 1956     | <u>155,3</u> | 1956   | 152,99 |
| 1962       | 12,7        | 1957   | 41,60 | 1957   | <u>41</u>   | 1957   | <u>57,4</u>  | 1957   | 96,4         | 1957     | <u>280,3</u> | 1957   | 335,90 |
| 1963       | 19,7        | 1958   | 47,40 | 1958   | <u>58,7</u> | 1958   | <u>88,4</u>  | 1958   | 157,5        | 1958     | <u>100,4</u> | 1958   | 126,40 |
| 1964       | 24,1        | 1959   | 24,00 | 1959   | <u>37,7</u> | 1959   | <u>49,3</u>  | 1959   | 76,1         | 1959     | <u>148,6</u> | 1959   | 169,49 |
| 1965       | 19,9        | 1960   | 30,40 | 1960   | <u>46,3</u> | 1960   | <u>70,6</u>  | 1960   | 110,2        | 1960     | <u>173,7</u> | 1960   | 206,45 |
| 1966       | 12,1        | 1961   | 52,70 | 1961   | 50,4        | 1961   | <u>59,5</u>  | 1961   | 93,1         | 1961     | 77,8         | 1961   | 117,89 |
| 1967       | 17,2        | 1962   | 27,60 | 1962   | 49,9        | 1962   | <u>83,8</u>  | 1962   | 151,0        | 1962     | 327          | 1962   | 282,47 |
| 1968       | 23,8        | 1963   | 37,20 | 1963   | 42,4        | 1963   | <u>103,3</u> | 1963   | 184,3        | 1963     | 443          | 1963   | 520,23 |
| 1969       | 18,3        | 1964   | 42,00 | 1964   | 53,8        | 1964   | <u>82,7</u>  | 1964   | 140,7        | 1964     | 205          | 1964   | 212,03 |
| 1970       | <u>24,5</u> | 1965   | 31,04 | 1965   | 47,8        | 1965   | <u>80,7</u>  | 1965   | 141,4        | 1965     | 240          | 1965   | 299,39 |
| 1971       | <u>12,8</u> | 1966   | 18,18 | 1966   | 30,5        | 1966   | <u>50,8</u>  | 1966   | 87,0         | 1966     | 160          | 1966   | 197,54 |
| 1972       | <u>8,94</u> | 1967   | 22,81 | 1967   | 33,6        | 1967   | <u>54,7</u>  | 1967   | 79,7         | 1967     | 100          | 1967   | 117,13 |
| 1973       | <u>8,61</u> | 1968   | 29,74 | 1968   | 37,1        | 1968   | <u>61,5</u>  | 1968   | 104,2        | 1968     | 299          | 1968   | 458,60 |
| 1974       | <u>14,7</u> | 1969   | 29,61 | 1969   | 48,1        | 1969   | <u>84,8</u>  | 1969   | 153,7        | 1969     | 234          | 1969   | 273,60 |
| 1975       | <u>15,3</u> | 1970   | 46,94 | 1970   | 47,4        | 1970   | 91,35        | 1970   | 167,00       | 1970     | 181          | 1970   | 191,99 |
| 1976       | <u>11,5</u> | 1971   | 25,33 | 1971   | 40,7        | 1971   | 102,4        | 1971   | 119,55       | 1971     | 144          | 1971   | 188,96 |
| 1977       | <u>7,85</u> | 1972   | 13,43 | 1972   | 22,8        | 1972   | <u>40,39</u> | 1972   | 51,71        | 1972     | 135          | 1972   | 81,22  |
| 1978       | <u>12</u>   | 1973   | 9,67  | 1973   | 20,7        | 1973   | <u>36,19</u> | 1973   | 42,77        | 1973     | 88,9         | 1973   | 97,94  |
| 1979       | <u>19,2</u> | 1974   | 24,99 | 1974   | 43,1        | 1974   | <u>70,60</u> | 1974   | 116,06       | 1974     | 155          | 1974   | 232,68 |
| 1980       | <u>12,6</u> | 1975   | 12,73 | 1975   | 30,3        | 1975   | <u>50,98</u> | 1975   | 74,26        | 1975     | 116          | 1975   | 128,27 |
| 1981       | <u>10,1</u> | 1976   | 14,25 | 1976   | 23,2        | 1976   | <u>45,39</u> | 1976   | 62,35        | 1976     | 83,8         | 1976   | 107,70 |
| 1982       | <u>12,8</u> | 1977   | 19,81 | 1977   | 25,1        | 1977   | <u>50,89</u> | 1977   | 74,07        | 1977     | 95,6         | 1977   | 103,77 |
| 1983       | <u>4,09</u> | 1978   | 16,57 | 1978   | 28,4        | 1978   | <u>46,30</u> | 1978   | 64,30        | 1978     | 85           | 1978   | 118,87 |
| 1984       | <u>3,16</u> | 1979   | 29,93 | 1979   | 34,7        | 1979   | <u>61,73</u> | 1979   | 97,17        | 1979     | 156          | 1979   | 344,46 |
| 1985       | <u>14,2</u> | 1980   | 19,57 | 1980   | 26,4        | 1980   | <u>53,39</u> | 1980   | 79,41        | 1980     | 135          | 1980   | 239,61 |
| 1986       | <u>12,9</u> | 1981   | 13,25 | 1981   | 27          | 1981   | <u>49,02</u> | 1981   | 70,10        | 1981     | 56,2         | 1981   | 121,90 |
| 1987       | <u>8,34</u> | 1982   | 12,87 | 1982   | 16,9        | 1982   | <u>30,99</u> | 1982   | <u>31,70</u> | 1982     | 63,7         | 1982   | 94,36  |
| 1988       | <u>12,7</u> | 1983   | 6,51  | 1983   | 15,8        | 1983   | <u>29,02</u> | 1983   | <u>27,49</u> | 1983     | 44,3         | 1983   | 50,02  |
| 1989       | <u>10,2</u> | 1984   | 15,29 | 1984   | 8,95        | 1984   | <u>16,73</u> | 1984   | <u>1,30</u>  | 1984     | 38,2         | 1984   | 148,10 |
| 1990       | <u>8,78</u> | 1985   | 29,60 | 1985   | 30,7        | 1985   | <u>55,76</u> | 1985   | <u>84,45</u> | 1985     | 141          | 1985   | 219,27 |
| 1991       | <u>16,5</u> | 1986   | 22,30 | 1986   | 15          | 1986   | <u>27,58</u> | 1986   | <u>24,43</u> | 1986     | 94,6         | 1986   | 157,33 |

**Analyse des Rendements Spécifiques et de la Disponibilité des Eaux de Surface sur les Grands sous Bassins du Bassin de la Volta.**

| Samendénie |      | Nwokuy |              | Boromo |      | Ouessa |               | Dapola |               | Noumbiel |      | Bamboi |        |
|------------|------|--------|--------------|--------|------|--------|---------------|--------|---------------|----------|------|--------|--------|
| Année      | QMA  | Année  | QMA          | Année  | QMA  | Année  | QMA           | Année  | QMA           | Année    | QMA  | Année  | QMA    |
| 1992       | 11,7 | 1987   | 22,53        | 1987   | 9,82 | 1987   | <u>18,29</u>  | 1987   | <u>4,63</u>   | 1987     | 120  | 1987   | 145,06 |
| 1993       | 8,76 | 1988   | 30,11        | 1988   | 32,3 | 1988   | <u>58,64</u>  | 1988   | <u>90,57</u>  | 1988     | 144  | 1988   | 233,30 |
| 1994       | 20,6 | 1989   | <u>16,72</u> | 1989   | 20,2 | 1989   | <u>36,92</u>  | 1989   | <u>44,31</u>  | 1989     | 144  | 1989   | 494,89 |
| 1995       | 12,3 | 1990   | <u>14,53</u> | 1990   | 8,45 | 1990   | <u>15,83</u>  | 1990   | <u>-0,61</u>  | 1990     | 42,4 | 1990   | 280,39 |
| 1996       | 16,1 | 1991   | <u>26,44</u> | 1991   | 20,8 | 1991   | <u>37,99</u>  | 1991   | <u>46,61</u>  | 1991     | 127  | 1991   | 792,56 |
| 1997       | 11,6 | 1992   | <u>19,04</u> | 1992   | 19,5 | 1992   | <u>35,66</u>  | 1992   | <u>41,64</u>  | 1992     | 47   | 1992   | 323,73 |
| 1998       | 15,9 | 1993   | <u>14,50</u> | 1993   | 18   | 1993   | <u>32,97</u>  | 1993   | <u>35,90</u>  | 1993     | 78,6 | 1993   | 336,48 |
| 1999       | 21,8 | 1994   | <u>32,77</u> | 1994   | 48,7 | 1994   | <u>88,07</u>  | 1994   | <u>153,27</u> | 1994     | 172  | 1994   | 338,70 |
| 2000       | 22,4 | 1995   | <u>19,96</u> | 1995   | 19,6 | 1995   | <u>35,84</u>  | 1995   | <u>42,02</u>  | 1995     | 87,8 | 1995   | 296,46 |
| 2001       | 14,4 | 1996   | <u>25,83</u> | 1996   | 26,8 | 1996   | <u>48,76</u>  | 1996   | <u>69,54</u>  | 1996     | 129  | 1996   | 139,57 |
| 2002       | 11,5 | 1997   | <u>18,88</u> | 1997   | 14,9 | 1997   | <u>27,40</u>  | 1997   | <u>24,05</u>  | 1997     | 86,2 | 1997   | 83,85  |
| 2003       | 20,9 | 1998   | <u>25,52</u> | 1998   | 24,3 | 1998   | <u>44,28</u>  | 1998   | <u>59,99</u>  | 1998     | 91,5 | 1998   | 74,82  |
| 2004       | 7,76 | 1999   | <u>34,62</u> | 1999   | 56,3 | 1999   | <u>101,71</u> | 1999   | <u>182,32</u> | 1999     | 167  | 1999   | 340,06 |
| 2005       | 13   | 2000   | <u>35,54</u> | 2000   | 26,7 | 2000   | <u>48,58</u>  | 2000   | <u>69,16</u>  | 2000     | 63,5 | 2000   | 413,27 |
|            |      | 2001   | <u>23,20</u> | 2001   | 25,8 | 2001   | <u>46,97</u>  | 2001   | <u>65,72</u>  | 2001     | 79,2 | 2001   | 168,38 |
|            |      | 2002   | <u>18,73</u> | 2002   | 12   | 2002   | <u>22,20</u>  | 2002   | <u>12,96</u>  | 2002     | 57,3 | 2002   | 222,17 |
|            |      | 2003   | <u>33,23</u> | 2003   | 43,4 | 2003   | <u>78,56</u>  | 2003   | <u>133,00</u> | 2003     | 161  | 2003   | 293,54 |
|            |      | 2004   | <u>12,96</u> | 2004   | 26,7 | 2004   | <u>48,58</u>  | 2004   | <u>69,16</u>  | 2004     | 62,5 | 2004   | 187,93 |
|            |      | 2005   | <u>21,04</u> | 2005   | 16,4 | 2005   | <u>30,10</u>  | 2005   | <u>29,79</u>  | 2005     | 75,2 | 2005   | 266,89 |

**Tableau 24: Les stations hydrométriques le long de la Volta Blanche (Nakambé).**

| Wayen |       | Yarugu |               | Pwalagu |        | Nawuni |        |
|-------|-------|--------|---------------|---------|--------|--------|--------|
| Année | QMA   | Année  | QMA           | Année   | QMA    | année  | QMA    |
| 1951  |       | 1951   | <u>182,55</u> | 1951    | 202,50 | 1951   | 443,44 |
| 1952  |       | 1952   | <u>111,37</u> | 1952    | 123,41 | 1952   | 291,00 |
| 1953  |       | 1953   | <u>82,13</u>  | 1953    | 90,92  | 1953   | 351,94 |
| 1954  |       | 1954   | <u>58,104</u> | 1954    | 64,23  | 1954   | 235,43 |
| 1955  |       | 1955   | <u>155,36</u> | 1955    | 172,28 | 1955   | 324,83 |
| 1956  |       | 1956   | <u>93,082</u> | 1956    | 103,09 | 1956   | 221,49 |
| 1957  |       | 1957   | <u>148,71</u> | 1957    | 164,90 | 1957   | 328,39 |
| 1958  |       | 1958   | <u>82,163</u> | 1958    | 90,96  | 1958   | 184,21 |
| 1959  |       | 1959   | <u>78,445</u> | 1959    | 86,83  | 1959   | 223,22 |
| 1960  |       | 1960   | <u>52,963</u> | 1960    | 58,51  | 1960   | 252,12 |
| 1961  |       | 1961   | <u>98,986</u> | 1961    | 109,65 | 1961   | 239,19 |
| 1962  |       | 1962   | 164,57        | 1962    | 142,71 | 1962   | 301,64 |
| 1963  |       | 1963   | 125,40        | 1963    | 114,90 | 1963   | 360,22 |
| 1964  |       | 1964   | 245,26        | 1964    | 160,91 | 1964   | 236,06 |
| 1965  | 10,79 | 1965   | 101,48        | 1965    | 66,73  | 1965   | 200,64 |
| 1966  | 2,24  | 1966   | 48,58         | 1966    | 62,97  | 1966   | 189,67 |
| 1967  | 8,17  | 1967   | 125,21        | 1967    | 138,71 | 1967   | 255,15 |
| 1968  | 1,84  | 1968   | 62,37         | 1968    | 92,66  | 1968   | 286,05 |

**Analyse des Rendements Spécifiques et de la Disponibilité des Eaux de Surface sur les Grands sous Bassins du Bassin de la Volta.**

| Wayen |       |
|-------|-------|
| Année | QMA   |
| 1969  | 3,59  |
| 1970  | 3,33  |
| 1971  | 0,00  |
| 1972  | 0,82  |
| 1973  | 7,25  |
| 1974  | 20,42 |
| 1975  | 8,72  |
| 1976  | 4,90  |
| 1977  | 6,42  |
| 1978  | 11,57 |
| 1979  | 9,64  |
| 1980  | 10,60 |
| 1981  | 17,73 |
| 1982  | 7,83  |
| 1983  | 13,60 |
| 1984  | 5,87  |
| 1985  | 14,30 |
| 1986  | 13,41 |
| 1987  | 5,59  |
| 1988  | 29,39 |
| 1989  | 12,51 |
| 1990  | 4,29  |
| 1991  | 13,14 |
| 1992  | 12,95 |
| 1993  | 7,82  |
| 1994  | 12,76 |
| 1995  | 1,71  |
| 1996  | 9,82  |
| 1997  | 6,72  |
| 1998  | 17,37 |
| 1999  | 24,61 |
| 2000  | 2,96  |
| 2001  |       |
| 2002  |       |
| 2003  |       |
| 2004  |       |
| 2005  |       |

| Yarugu |        |
|--------|--------|
| Année  | QMA    |
| 1969   | 104,86 |
| 1970   | 66,45  |
| 1971   | 85,95  |
| 1972   | 40,49  |
| 1973   | 37,74  |
| 1974   | 135,50 |
| 1975   | 120,67 |
| 1976   | 34,37  |
| 1977   | 70,38  |
| 1978   | 46,53  |
| 1979   | 108,31 |
| 1980   | 114,91 |
| 1981   | 89,36  |
| 1982   | 50,94  |
| 1983   | 61,08  |
| 1984   | 21,34  |
| 1985   | 75,66  |
| 1986   | 74,23  |
| 1987   | 84,10  |
| 1988   | 94,90  |
| 1989   | 119,76 |
| 1990   | 14,06  |
| 1991   | 167,46 |
| 1992   | 46,12  |
| 1993   | 45,94  |
| 1994   | 135,51 |
| 1995   | 89,67  |
| 1996   | 76,04  |
| 1997   | 36,64  |
| 1998   | 123,60 |
| 1999   | 160,31 |
| 2000   | 67,64  |
| 2001   | 87,06  |
| 2002   | 47,43  |
| 2003   | 127,04 |
| 2004   | 77,68  |
| 2005   | 86,29  |

| Pwalagu |        |
|---------|--------|
| Année   | QMA    |
| 1969    | 137,06 |
| 1970    | 123,64 |
| 1971    | 104,48 |
| 1972    | 47,94  |
| 1973    | 95,69  |
| 1974    | 177,63 |
| 1975    | 88,23  |
| 1976    | 46,29  |
| 1977    | 83,89  |
| 1978    | 46,56  |
| 1979    | 119,21 |
| 1980    | 123,10 |
| 1981    | 97,61  |
| 1982    | 53,18  |
| 1983    | 64,60  |
| 1984    | 18,78  |
| 1985    | 81,24  |
| 1986    | 79,89  |
| 1987    | 91,34  |
| 1988    | 105,48 |
| 1989    | 165,55 |
| 1990    | 22,81  |
| 1991    | 187,71 |
| 1992    | 47,61  |
| 1993    | 54,66  |
| 1994    | 154,95 |
| 1995    | 100,30 |
| 1996    | 87,26  |
| 1997    | 39,66  |
| 1998    | 138,60 |
| 1999    | 186,51 |
| 2000    | 80,85  |
| 2001    | 96,75  |
| 2002    | 51,05  |
| 2003    | 151,08 |
| 2004    | 89,69  |
| 2005    | 96,70  |

| Nawuni |        |
|--------|--------|
| Année  | QMA    |
| 1969   | 269,97 |
| 1970   | 248,94 |
| 1971   | 232,08 |
| 1972   | 71,48  |
| 1973   | 149,93 |
| 1974   | 281,52 |
| 1975   | 200,58 |
| 1976   | 86,49  |
| 1977   | 141,54 |
| 1978   | 96,50  |
| 1979   | 261,52 |
| 1980   | 206,56 |
| 1981   | 224,89 |
| 1982   | 136,89 |
| 1983   | 155,75 |
| 1984   | 64,76  |
| 1985   | 182,65 |
| 1986   | 184,74 |
| 1987   | 209,81 |
| 1988   | 265,64 |
| 1989   | 423,43 |
| 1990   | 127,20 |
| 1991   | 401,78 |
| 1992   | 127,23 |
| 1993   | 263,20 |
| 1994   | 410,05 |
| 1995   | 264,76 |
| 1996   | 292,50 |
| 1997   | 121,46 |
| 1998   | 260,60 |
| 1999   | 490,48 |
| 2000   | 210,73 |
| 2001   | 232,28 |
| 2002   | 167,02 |
| 2003   | 399,99 |
| 2004   | 228,64 |
| 2005   | 196,92 |