Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines

Ecole Doctorale Pluridisciplinaire « Espace, Culture et Développement »

Université d'Abomey-Calavi

Faculté des Sciences et Techniques

Chaire UNESCO « Science, Technologie et Environnement » (CUSTE)

Thèse de Doctorat Unique
présentée par :

Henri Sourou VODOUNON TOTIN

pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université d'Abomey-Calavi

Spécialité : **Géographie physique**

Option : **Géoscience de l'Environnement et Aménagement de l'Espace**

N°d'enregistrement : 058-10/EDP/FLASH/UAC

SENSIBILITE DES EAUX SOUTERRAINES DU BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN A L'EVOLUTION DU CLIMAT ET AUX MODES D'EXPLOITATION : STRATEGIES DE GESTION DURABLE



Directeur de Thèse

M. Michel BOKO
Professeur Titulaire, FLASH, UAC (Bénin)

Co-Directeur de Thèse

M. Moussa BOUKARI
Maître de Conférences, FAST, UAC (Bénin)

Jury :

Président :
M. Salifou ALIDOU Professeur Emérite, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)

Rapporteurs :
M. Michel BOKO Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)
M. Moussa BOUKARI Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)

Examinateurs :
M. Adoté Blim BLIVI Professeur Titulaire, Université de Lomé (Togo)
M. Marc Lucien OYEDE Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)
M. Sérigne FAYE Maître de Conférences, Université Cheick Anta Diop (Sénégal)

Date de soutenance : 2 décembre 2010

Mention : Très honorable avec félicitations du Jury

Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines

Université d'Abomey-Calavi

Faculté des Sciences et Techniques

Ecole Doctorale Pluridisciplinaire « Espace, Culture et Développement »

Chaire UNESCO « Science, Technologie et Environnement » (CUSTE)

Thèse de Doctorat Unique
présentée par :

Henri Sourou VODOUNON TOTIN

pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université d'Abomey-Calavi

Spécialité : **Géographie physique**

Option : **Géoscience de l'Environnement et Aménagement de l'Espace**

N°d'enregistrement : 058-10/EDP/FLASH/UAC

SENSIBILITE DES EAUX SOUTERRAINES DU BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN A L'EVOLUTION DU CLIMAT ET AUX MODES D'EXPLOITATION : STRATEGIES DE GESTION DURABLE



Directeur de Thèse

M. Michel BOKO
Professeur Titulaire, FLASH, UAC (Bénin)

Co-Directeur de Thèse

M. Moussa BOUKARI
Maître de Conférences, FAST, UAC (Bénin)

Jury :

Président :
M. Salifou ALIDOU Professeur Emérite, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)

Rapporteurs :
M. Michel BOKO Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)
M. Moussa BOUKARI Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)

Examinateurs :
M. Adoté Blim BLIVI Professeur Titulaire, Université de Lomé (Togo)
M. Marc Lucien OYEDE Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)
M. Sérigne FAYE Maître de Conférences, Université Cheick Anta Diop (Sénégal)

Date de soutenance : 2 décembre 2010

Mention : Très honorable avec félicitations du Jury

A
Albert et Jeanne,
et

A
Rafiatou et Noukpo Fergal
Pour les nombreux sacrifices

Sommaire

Dédicace *3*
Sommaire *5*
Sigles et acronymes *7*
Avant-propos *9*
Résumé/ Abstract *13*

INTRODUCTION **15**

PREMIERE PARTIE : DEMARCHE METHODOLOGIQUE ET CARACTERISTIQUES GEOGRAPHIQUES DU BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN **21**

Chapitre I : CONCEPTS, DONNEES ET METHODES D'ETUDE **23**

1.1. Clarification des concepts et données d'étude 23
1.2. Méthode d'analyse climatique et de la dynamique des eaux souterraines 29
1.3. Evaluation de la dynamique des états de surface 60
1.4. Evaluation du système de gestion des eaux souterraines 62

Chapitre II : CADRES PHYSIQUE ET HUMAIN DU BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN **67**

2.1. Situation géographique et cadre physique 67
2.2. Populations et activités socioéconomiques : deux éléments de pression sur les ressources en eaux souterraines 91

DEUXIEME PARTIE : ETAT, TENDANCE, SCENARIOS CLIMATIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DES NAPPES SOUTERRAINES DANS LE BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN **97**

Chapitre III : TENDANCES ET SCENARIOS CLIMATIQUES DANS LE BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN **99**

3.1. Variabilité et tendance climatique dans le bassin sédimentaire côtier 99
3.2. Scénarios climatiques futurs dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin 121

Chapitre IV : DYNAMIQUE DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES DANS LE BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN **139**

4.1. Dynamique hydroclimatique des eaux souterraines 140
4.2. Influence des états de surface sur l'hydrodynamique du bassin 162

TROISIEME PARTIE : MODES D'EXPLOITATION, QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE ET BACTERIOLOGIQUE ET STRATEGIES DE GESTION DURABLE DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES **173**

Chapitre V : MODE ACTUEL D'EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES DANS LE BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN **175**

5.1. Mobilisation des ressources hydriques 175
5.2. Usages des ressources en eaux souterraines dans le bassin côtier du Bénin 193

Chapitre VI : SENSIBILITE DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES A LA VARIABILITE DU CLIMAT ET DES MODES D'EXPLOITATION **203**

6.1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines 203
6.2. Contamination bactériologique des eaux souterraines : indicateurs et variation 216

Chapitre VII : STRATEGIES DE GESTION DURABLE DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES DANS LE BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER **225**

7.1. Stratégies d'amélioration de la disponibilité des eaux souterraines 255
7.2. Mesure de gestion durable des ressources en eaux souterraines 233

CONCLUSION GENERALE **247**

BIBLIOGRAPHIE **253**

Table des matières 281

Sigles et acronymes

ABE : Agence Béninoise pour l'Environnement
ACMAD : Centre Africain pour les Applications de la Météorologie au Développement
AEP : Approvisionnement en Eau Potable
AEV : Adduction d'Eau Villageoise
AGRE : Appui à la Gestion des Ressources en Eau
AIC : Association Internationale de Climatologie
AMMA : African Monsoon Multidisciplinary Analyses
ASECNA : Agence pour la Sécurité, de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar
BGR : Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
CCNUCC : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CENATEL : Centre National de Télédétection et de Surveillance du Couvert Forestier
CIFRED : Centre Interfacultaire de Formation et de Recherche en Environnement pour le Développement Durable
CREPA : Centre Régional pour l'Eau Potable et l'Assainissement à faible coût
CSIR : Council for Scientific and Industrial Research
DG-Eau : Direction Générale de l'Eau
ECHAM : German Climate Research Centre fully coupled GCM
ENSO : El Niño-Southern Oscillation
EPA : Environmental Protection Agency
EPE : Equivalent Point d'Eau
FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
GCM : General Circulation Model
GES : Gaz à Effet de Serre
GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GIRE : Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GPS : Global Positionning System
GWP : Global Water Partnership
HadCM2 : Hadley Centre Unified Model 2
IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change
IRB : Istituto Recerche Breda
IWRM : International Water Management Institute
LABEE : Laboratoire de Biogéographie et d'Expertise Environnementale
LACEEDE : Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement
LHA : Laboratoire d'Hydrologie Appliquée
MAGICC - SCENGEN : Model for Assessment of Green House Gaze Induced Climate Change – Scenario Generator
MCR : Modèle Climatique Régional
MMEH : Ministère des Mines, de l'Energie et de l'Hydraulique
NTU : Nephelometric Turbidity Unit
OMM : Organisation Mondiale de la Météorologie
ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-mer
PACOM : Pan African START Committee
PRECIS : Providing Regional Climates and Impacts Studies
SBEE : Société Béninoise d'Electricité et d'Eau
SDAL : Schéma Directeur d'Aménagement de la Zone Littorale

SONEB : Société Nationale des Eaux du Bénin
SRES : Special Report on Emissions Scenarios
SST : Sea Surface Temperature
START : SysTem for Analysis, Research and Training
TDS : Total dissolved solids
TTC : Chlorure de triphényl-tétrazolium
UQAM : Université du Québec à Montréal
SGI : Société Générale pour l'Industrie
SIG : Système d'Informations Géographiques
UNB : Université Nationale du Bénin
PVC : PolyVinylChloride
SIES : Système d'Information Environnementale et Sanitaire

Avant-propos

Ce travail s'inscrit dans le contexte des préoccupations relatives à la récurrence des phénomènes climatiques extrêmes et leurs conséquences sur la disponibilité des ressources en eau et sur les systèmes de gestion. Cette recherche est une contribution à la connaissance approfondie de la sensibilité des hydrosystèmes souterrains à l'évolution du climat, des modes d'approvisionnement et d'utilisation des ressources en eau. Elle pourrait servir de base à la mise en œuvre des approches de gestion intégrée des ressources en eaux souterraines dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin.

Cette thèse a bénéficié du soutien financier de la Direction de Recherche Scientifique de l'Université d'Abomey-Calavi à travers le projet 3AAD intitulé « *Evolution des climats, usages des écosystèmes et gestion des risques liés à la pollution par les métaux lourds et les pesticides au Bénin* » ; du Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Dynamiques Sociales et le Développement Local (LASDEL-Parakou, Bénin) et du START/PACOM, à travers Africa Global Environmental Change Research Grant 2009 notamment le projet « *Assessment of Global Change Impacts on Groundwater in the Coastal Sedimentary Basin of Benin (West Africa)* ».

Ce travail a été réalisé grâce aux soutiens de diverses personnes à qui je dois d'exprimer mes sincères remerciements.

Je tiens avant tout à remercier chaleureusement le Professeur Michel BOKO, Directeur du Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE), pour avoir accepté de diriger cette thèse. Il m'a formé, a toujours suivi mes travaux et a amélioré la qualité de cette thèse par ses conseils et suggestions. Des idées, explications, critiques, encouragements, pistes de soutien financier, etc. sont autant de moyens dont j'ai bénéficié de sa part pour conduire à terme mes travaux de recherche en général et particulièrement cette thèse.

Mes sincères remerciements vont aussi à mon Co-Directeur de Thèse, le Professeur Moussa BOUKARI, Chef de la Division Hydrogéologie du Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA) de la Faculté des Sciences et techniques (FAST) pour son encadrement technique. Ses encouragements et incitation au travail, son sens de pousser à mieux faire par divers moyens et méthodes, les nombreux échanges scientifiques, les nombreuses corrections ont été très utiles à la réalisation de cette thèse.

J'exprime toute ma reconnaissance à Monsieur Nassirou Arifari BAKO, Maître-Assistant de Sociologie-Anthropologie, Directeur du LASDEL-Parakou, qui m'a également accueilli au sein dudit laboratoire. Les séjours d'échanges scientifiques et l'Université d'été de Niamey 2008 m'ont permis de renforcer mes capacités en méthodologies de recherches socio-anthropologiques dans le secteur de l'eau.

Je remercie particulièrement le Docteur Ibrah SEIDOU SANDA du Département de Physique à l'Université Abdou Moumouni et consultant en changements climatiques au Centre Africain pour les Applications de la Météorologie au Développement (ACMAD), Niamey (Niger). Il n'a ménagé aucun effort, malgré ses multiples occupations administratives et scientifiques, pour m'assurer un encadrement technique appréciable au cours de mon stage en modélisation climatique à ACMAD, dans le cadre de ce travail.

Que Monsieur Sérigne FAYE, Maître de Conférences au Département de Géologie de l'Université Cheick Anta Diop (UCAD), Dakar (Sénégal), Monsieur Benony K. KORTATSI, Chercheur Principal de la Division ''Groundwater'' du Water Research Institute du CSIR, Accra (Ghana) et Monsieur Abdoukarim ALASSANE du Laboratoire d'Hydrologie Appliquée de l'Université d'Abomey-Calavi trouvent, dans ce travail, le témoignage de la pertinence de leur encadrement, en étude des eaux souterraines et surtout en analyse hydrogéochimique, au cours de mes visites d'échanges scientifiques.

Je remercie infiniment les membres de jury pour avoir accepté de faire partie du jury de soutenance de thèse, malgré leurs multiples occupations.

Que Messieurs Christophe S. HOUSSOU et Constant HOUNDENOU, Maîtres de Conférences soient remerciés pour l'inspiration qu'ils me donnent et les nombreuses incitations au travail.

J'exprime également ma reconnaissance aux Docteurs Brice A.H. TENTE, Léocadie ODOULAMI, Moussa GIBYGAYE, Sidonie C. HEDIBLE pour leurs conseils et soutien moral.

Ma sincère gratitude va à l'endroit de mes amis du laboratoire : Docteurs Euloge OGOUWALE, Ibouraïma YABI, Ernest AMOUSSOU, Expédit W. VISSIN, Cyr G. ETENE, pour leur sympathie et leur contribution scientifique à travers les nombreuses corrections apportées à ce document.

Je dis merci à Messieurs Pascal AKPASSONOU du CENATEL et Vincent OREKAN du LABEE pour leurs intenses contributions aux traitements cartographiques et à l'analyse de

l'occupation du sol et l'utilisation des terres ; à Monsieur Arnaud AKANRO du Service Analyse des Performances Techniques à la SONEB pour les données et explications qu'il m'a fournies.

Je remercie Messieurs Odilon CHANGOTADE, Chimiste au LHA et Calixte AKOTEGNON de la SONEB pour leur assistance lors des campagnes de prélèvements d'échantillons et pour l'analyse des eaux ; et à Monsieur Barthélemy DOSSAVI-YOVO, conducteur de véhicule administratif au CIFRED pour son appui au cours des travaux de terrain.

Mes remerciements vont également à Monsieur Moumouni BAMISSO et son épouse Séynabou pour leurs soutiens moral et surtout spirituel.

Je ne saurais oublier Madame Elisabeth d'OLIVEIRA, pour ses aides immenses, infiniment merci pour tout.

A tous les membres de ma famille : mon père Albert, ma mère Jeanne, mes frères et sœurs Pauline, Florentin, Marius, Marcel, Huguette, Armelle, Toussaint-Simon, Glawdis, Gilbert, je dis merci pour les soutiens de tout genre.

Je prie mon épouse Rafiatou et mon fils Noukpo Fergal d'accepter l'expression de ma profonde gratitude et mes excuses pour les nombreuses absences qui n'ont toujours éloigné d'eux pour la bonne et noble cause. Je leur exprime mes sincères marques de sympathie pour leurs soutiens de tout genre et leur compréhension.

Mes marques de reconnaissance vont enfin à tous ceux qui ont contribué d'une quelconque manière à la réalisation de cette thèse.

Résumé

Cette étude vise à approfondir les connaissances sur la sensibilité des hydrosystèmes souterrains à l'évolution du climat et des modes de gestion des ressources en eau dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Elle a été menée à l'aide des méthodes de statistiques descriptives, de la modélisation climatique, du calcul du bilan d'eau souterraine, principalement à partir des données climatologiques, hydrologiques et piézométriques notamment. La méthode d'analyse statistique classique et celles de diagramme de Piper et des graphiques binaires ont été utilisées pour caractériser d'une part la dynamique de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de puits, de forages et de sources et d'autre part les faciès hydrochimiques. Enfin, l'analyse des indicateurs hydroclimatiques et des formes d'utilisation des ressources en eau a aidé à évaluer les modes de gestion des ressources en eaux souterraines en particulier.

Les résultats montrent que sur le plan climatique, la période 1951-2005 a été marquée par une baisse pluviométrique post-rupture de 17 %, une hausse des températures moyennes de 1,8 °C et une récurrence de la sécheresse. A l'horizon 2070-2089, l'élévation de la température moyenne serait de 2,4 à 3,5 °C et l'augmentation probable des pluies en moyenne de 43 % avec une variation spatiale de -18 à 87 % selon les résultats du scénario A2 du modèle PRECIS ECHAM4.

Aux phases climatiques humides correspondent des remontées piézométriques de l'ordre de 2 à 3 m, voire 5 m, traduisant une amélioration de la recharge des aquifères. Les épisodes secs entraînent une récession piézométrique pouvant même passer localement sous le niveau 0 de la mer dans les nappes côtières intensément exploitées. La recharge moyenne est d'environ 300 mm/an pour les aquifères à nappe libre superficielle et 60 mm/an pour ceux à nappe libre profonde respectivement une porosité effective de 0,26 et 0,07. A l'échelle du bassin côtier, la recharge, estimée sur la base du bilan d'eau de Thornthwaite, est en moyenne de 158 mm/an, soit 12 % du cumul pluviométrique annuelle (1130 mm) sur la période 1991-2007.

Les eaux analysées ont une abondance relative en cations dans l'ordre $Ca^{2+} > Na^{+} > Mg^{2+} > K^{+}$ et en anions de $HCO_3^{-} > Cl^{-} > NO_3^{-} > SO_4^{2-}$ en saison pluvieuse et $HCO_3^{-} > NO_3^{-} > Cl^{-} > SO_4^{2-}$ en saison sèche. Elles sont en majorité de faciès bicarbonaté calcique et magnésien (Ca-Mg-HCO_3) en saison pluvieuse (45 %) et en saison sèche (54 %) et respectivement mixte Na-Mg-Ca-HCO_3 (18 %) et chloruré sodique Na-Cl ou Na-HCO_3-Cl (14 %). Les eaux sont d'une bonne qualité naturelle au regard des paramètres physico-chimiques, qui sont encore en dessous de la norme de potabilité de l'OMS, mais très contaminées par contre par des germes bactériologiques (coliformes totaux, Escherichia coli, streptocoques fécaux), surtout au niveau des puits peu profonds, forages pédestres et sources.

Les tendances hydroclimatiques et hydrochimiques actuels et celle des modes d'exploitation des eaux souterraines sont de nature à nécessiter des stratégies de gestion durable des ressources en eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier du Bénin. Ces stratégies appellent la mise en œuvre des mesures de recharge artificielle, l'utilisation rationnée des eaux souterraines, superficielles et pluviales, le contrôle de la qualité de l'eau et la réduction de leur pollution chimique et bactériologique.

Mots-clés : *Bénin, Bassin sédimentaire côtier, eau souterraine, modélisation hydroclimatique, faciès hydrochimique, gestion durable.*

Abstract

This study aims to strengthen knowledge on groundwater and its management sensitivity to climate variability and change in the coastal sedimentary basin of Benin. It was carried out using the descriptive statistics methods, climate modelling and water budget calculation mainly with climatological, hydrological and particularly water table level fluctuations data. The method of statistical analysis, Piper diagrams and binary diagrams was used to characterize dynamics of physicochemical and bacteriological quality of wells, boreholes and spring water and the hydrochimical facies. Moreover, hydroclimatic parameters and groundwater use analysis helped to evaluate management strategies.

Climate data showed that over the period 1951-2005 the coastal basin of Benin was marked by a rainfall decrease of 17 %, a rise of average temperatures of 1.8 °C and a recurrence of the dryness. Future climate for the period 2070-2089 will lead to rising of average temperature from 2.4 to 3.5 °C and probable rainfall increase on average of 43 % with a spatial range of -18 to 87% according to the scenario A2 of the model PRECIS ECHAM4.

Wet climatic phases correspond to the groundwater level rising about 2 to 3 m, even 5 m, meaning aquifer recharge improvement. The dry episodes involve a water table level decrease being able to pass locally below the mean sea level 0 in the coastal aquifers intensely exploited. Average recharge is approximately 300 mm/year for the shallow unconfined aquifers and 60 mm/year for those deep with respective effective porosity of 0.26 and 0.07. On the whole sedimentary basin, groundwater recharge estimated according to Thornthwaite water budget is on average of 158 mm/year so be it 12% of annual rainfall of 1130 mm over the period 1991-2007.

Analyzed water shows that relative abundance of cations in groundwater is $Ca^{2+} > Na^{+} > Mg^{2+} > K^{+}$ and anions is $HCO_3^{-} > Cl^{-} > NO_3^{-} > SO_4^{2-}$ in the wet period and $HCO_3^{-} > NO_3^{-} > Cl^{-} > SO_4^{2-}$ in the dry period. There are Ca-Mg-HCO_3 represented by 45% of the groundwater in rainy season and 54% in the dry season. The second major type is Na-Mg-Ca-HCO_3 in the rainy season (18% of the samples) and Na-Cl or Na-HCO_3-Cl in the dry season (14% of the samples). Generally, groundwater is of a good natural quality in comparison with the parameters physicochemical still below the WHO drinking water standards but very contaminated by bacteriological germs (total coliforms, Escherichia coli, faecal streptococcus), especially on the level of shallow wells, foot pumping boreholes and spring.

Recent hydroclimatic and hydrochimical trends and those of groundwater extraction impose sustainable groundwater management strategies on the coastal sedimentary basin of Benin. To this end, it is important to implement measurements of artificial recharge, dominated of groundwater, surface water and rainwater use, of quality control and chemical and bacteriological pollution reduction).

Key words: *Benin, coastal sedimentary Basin, groundwater, hydroclimatic modeling, hydrochemical facies, integrated management.*

INTRODUCTION

L'évolution du climat a des implications considérables sur la disponibilité quantitative et la qualité des ressources en eau. En Afrique, les études ont très longtemps été focalisées sur la variabilité climatique (Lamb, 1982 ; Boko, 1988 ; Fontaine *et al.*, 1995 ; Paturel *et al.*, 1997a et 1997b ; Houndénou, 1999 ; Nicholson, 2000 ; Le Barbé *et al.*, 2002, etc.). Ainsi, a été mise en évidence la variation des ressources en eau de surface en réponse à la dynamique du climat (Sircoulon, 1987 ; Mahé et Olivry, 1995 ; Bricquet *et al.*, 1997 ; Ouédraogo, 2001 ; Ardoin-Bardin, 2004 ; Afouda *et al.*, 2007 ; Vissin, 2007 ; Donou, 2007 ; Ardoin-Bardin *et al.*, 2009, etc.).

Cet intérêt très marqué pour les modifications hydroclimatiques dans les réservoirs superficiels est encore peu affiché pour les ressources en eaux souterraines (IPCC, 1996, 1998 et 2001 ; Taylor *et al.*, 2009) qui, pourtant, constituent les plus grands stocks d'eau douce sur les continents surtout en Afrique. Elles sont une ressource naturelle de valeur, utilisée à des fins agricoles, domestiques et industrielles dans plusieurs pays (UNESCO, 2006). En tant que source importante d'eau potable à travers le monde, elle joue un rôle essentiel en maintenant la valeur écologique de plusieurs aires (IPCC, 2007 ; UN/WWAP, 2006). Les eaux souterraines sont la source d'environ un tiers des prélèvements d'eau mondiaux et fournissent l'eau potable à une grande partie de la population mondiale (Kundzewicz et Döll, 2009). Comme les sources d'eaux pluviale et superficielle deviennent peu fiables, la demande en eaux souterraines est susceptible d'augmenter (Calow and MacDonald, 2009). Elles seraient la seule source durable d'eau pour les communautés des régions où les eaux de surface sont absentes (Taylor *et al.*, 2009), polluées ou connaissent une forte variabilité. Selon Hiscock et Tanaka (2006), le changement climatique global aurait des effets négatifs sur des ressources d'eau en raison de la variabilité accrue des événements extrêmes tels que les sécheresses et les inondations. De plus, les changements d'occupation et d'utilisation des terres sont l'une des principales activités induites altérant le système des eaux souterraines (Calder, 1993). Les modifications qui affectent le continium Atmosphère-Terre et la sensibilité de ressources en eau souterraine dénotent de la vulnérabilité du système aquifère.

Au stade actuel de son développement, le Bénin approvisionne sa population en eau potable notamment à partir des ressources en eaux souterraines pour l'essentiel (…) (Boukari et Alassane, 2007). L'intérêt pour cette importante ressource, du moins jusqu'à une période récente, est lié exclusivement à des considérations d'ordre socioéconomique et non de

préservation (Boukari, 1998) malgré les énormes risques liés à l'évolution du système climatique, un facteur clé du développement durable. Les études étaient aussi jadis essentiellement consacrées à la prospection géologique (Slansky, 1962 ; IRB, 1987 ; Oyédé, 1991 ; Affognon et Laïbi, 2001), hydrogéologique et à l'inventaire de la ressource (Ferrand, 1965 ; Burgeap, 1965 ; Bouzid, 1967 ; SGI, 1981 ; Géohydraulique, 1985 ; UNB-UQAM, 1987 ; Pallas 1988 ; Boukari, 2007). Bien que ces travaux hydrogéologiques primordiaux constituent les bases de la connaissance du système aquifère, elles ne permettent pas de comprendre l'impact d'environnement hydroclimatique changeant sur les eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier du Bénin.

La forte dépendance population - eau souterraine et la nécessité de préservation a incité IGIP (1989) à suggérer une exploitation rationnelle des ressources disponibles en réduisant les débits de certains forages comme A1 à 110 m^3/h et A12 à 50 m^3/h pour l'aquifère de Godomey, F3 à 60 m^3/h et F4 à 94 m^3/h pour l'aquifère d'Abomey-Calavi et F7 à 70 m^3/h et F8 à 75 m^3/h pour l'aquifère de Ouando. Cette mesure sous-tend des problèmes de disponibilité liés à plusieurs facteurs dont le climat, qui joue un rôle capital dans la dynamique des ressources en eaux.

BRL/GERSAR-BETURE (1995) a montré que les besoins totaux en eau en 2000 serait de 42 500 m^3/jr alors que le potentiel total des installations en 1995 n'était que de 38 000 m^3/jr. Mais très tôt les besoins projetés pour l'année 2000 ont été atteints avant l'échéance du fait de la forte demande en eau induite par l'augmentation de la population. Le champ de captage de Godomey semblant atteindre ses limites, il préconisait de rechercher de nouveaux champs de captage dans le Continental terminal ou de faire appel aux ressources de l'aquifère du Crétacé. Boukari (1998), tout en caractérisant le fonctionnement du système aquifère du point de vue hydrodynamique, hydrochimique et bactériologique exclut les nappes superficielles pour l'approvisionnement en eau de consommation. Il évoque les raisons de forte teneur en nitrate et de très mauvaise qualité bactériologique. Les sources de pollution sont les déchets domestiques, agricoles voire industriels (Sagbo, 2000) en plus du problème de l'intrusion saline (Boukari, 1998). Alassane (2000) pour sa part a mis en évidence, à travers une étude hydrogéochimique de l'aquifère du Continental Terminal du plateau de Sakété, que les eaux sont très peu minéralisées, mais acides (pH<6), riches en gaz carbonique provenant de la décomposition de la matière organique. L'analyse de la vulnérabilité de l'aquifère superficiel du Continental Terminal de ce plateau a permis de caractériser les faciès géochimiques dominés à 60 % par les chlorurés sodiques (Alassane, 2004).

Boukari (1998) propose une étude de la vulnérabilité qualitative de cet aquifère superficiel surtout sur les aspects de pollutions diverses. Or, une meilleure connaissance de la vulnérabilité quantitative des eaux souterraines à l'évolution du climat et des modes de gestion des hydrosystèmes est aussi d'une importance capitale pour le développement des plans opérationnels d'adaptation ou de mitigation des crises de l'eau.

Par ailleurs, d'autres travaux ont été réalisés sur : (i) l'approvisionnement en eau potable dans une région hydrogéologique difficile (Toffo) où les aquifères sont en partie dénoyés (Lakognon, 2000), (ii) l'évolution quantitative et qualitative des eaux souterraines captées dans le périmètre de pompage intensif de Godomey (Gnaha et Adjadji, 2001). Ces derniers expliquent qu'il est impérieux de reconsidérer le mode d'exploitation actuel du champ de Godomey pour s'orienter vers une gestion qui préserve la pérennité de la ressource. Et cet appel est d'autant plus important et vrai que le climat futur de l'Afrique est encore marqué par des incertitudes comme l'explique le quatrième rapport du GIEC (Christensen *et al.*, 2007).

La plupart des études réalisées sur les relations variabilité climatique - ressources en eaux souterraines ont été essentiellement focalisées sur la réponse piézométrique à l'impact pluviométrique sur le plateau d'Allada (Dray *et al.*, 1989 ; Boukari, 1998 ; Azonsi, 2002 ; Boukari, 2002 ; Totin, 2005 ; Boukari *et al.*, 2005 ; Totin *et al.*, 2006 ; Totin *et al.*, 2009). Même si la variabilité pluviométrique n'est pas le seul paramètre de la recharge des aquifères, surtout à nappe libre, elle est un élément clé (en interaction avec la température et l'évaporation) de la variation spatio-temporelle des ressources en eaux souterraines. Les travaux de Rutulis (1989) ont permis de comprendre que le renouvellement des eaux souterraines dépend de la recharge qui est fonction de la pluie et de l'évapotranspiration. Hafmann *et al.* (2000), expliquent qu'une augmentation de l'évaporation et de l'évapotranspiration suite à l'accroissement des températures entraînerait une diminution de la recharge des aquifères et aurait des effets directs sur le niveau et la qualité des nappes.

Les indicateurs hydroclimatiques jusqu'à présent élaborés ne permettent pas encore d'appréhender, dans toutes ses dimensions, l'impact réel de l'évolution du climat sur la disponibilité (quantité et qualité) des ressources en eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier du Bénin. C'est dans ce contexte que les changements climatiques annoncés, et dont les effets déjà perceptibles, risquent de compromettre considérablement la satisfaction des besoins croissants en eau douce des populations en augmentation exponentielle (Kundzewicz & Döll, 2009 ; Carter et Parker, 2009 ; Mileham *et al.*, 2009). Pour UNESCO (2003) les changements climatiques seront responsables de 20 % de l'aggravation de la raréfaction de

l'eau dans le monde. Quant à Whitehead *et al.* (2009), ils expliquent que dans le contexte des changements climatiques prévus, une augmentation des températures de l'eau affectera la cinétique des réactions chimiques et, par combinaison avec la dégradation de la qualité, l'état écologique des hydrosystèmes.

Dès lors, l'importance de la place des ressources en eaux souterraines dans les systèmes socioéconomique et écologique et leur vulnérabilité aux changements environnementaux globaux font actuellement émerger de vastes programmes scientifiques d'études intégrées. Tel est par exemple le cas de la septième phase du Programme Hydrologique International, PHI-UNESCO (2008-2013) dont le thème 1 a comme champ focal « la gestion de la réponse du système d'eaux souterraines au changement global ». Le rapport de GIEC (2007) a reconnu que « davantage de recherche relative aux impacts de la variabilité et du changement climatiques sur les eaux souterraines est nécessaire ». Et, selon Macdonald *et al.* (2009), pour aider à se préparer à la variabilité accrue du climat, il est essentiel de comprendre l'équilibre entre disponibilité de l'eau, l'accès et la relation ressources/usages.

Ce sont autant de raisons qui justifient cette étude intitulé : ***Sensibilité des eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier du Bénin à l'évolution du climat et aux modes d'exploitation : Stratégies de gestion durable***. Le choix de ce sujet est guidé par les spécificités que présente le bassin :

- compris dans le domaine climatique subéquatorial, influencé par les facteurs géographiques locaux (Hounkannounon, 1979 ; Bokonon-Ganta, 1987 ; Boko, 1988 ; Houndjahoué, 1999 ; Houndénou, 1992 et 1999) et où la « diagonale de sécheresse » s'étend du sud-ouest vers le nord-est, développant ainsi un vaste secteur hydroclimatique sec (Totin, 2005) ;
- un bassin géologique situé entre l'océan Atlantique au sud et la région de socle qui forme sa limite nord ; elle est composée de plusieurs unités hydrogéologiques qui renferment 35 % des ressources en eaux souterraines du Bénin (DH, 2000 ; Boukari et Alassane, 2007) différemment exploitées ;
- la porte d'entrée continentale de la mousson ouest-africaine au Bénin et par conséquent très vulnérable à la variabilité et aux changements climatiques. De plus, sa position côtière expose les aquifères à l'élévation du niveau marin et à l'intrusion saline, une menace permanente sur les aquifères côtiers ;

- une aire de diversité socioculturelle caractérisée par une variété de perceptions populaires, qui à coup sûr soumettent encore les modes de gestion des eaux souterraines aux croyances sacrées ou au « fatalisme hydroclimatique » ;
- une région où l'évolution démographique exponentielle, les activités socioéconomiques et l'augmentation de la demande en eau sont de véritables sources de pression sur les eaux souterraines, outre celle climatique.

Cette étude est fondée sur les hypothèses suivantes :

- l'évolution du climat affecte l'hydrodynamique des aquifères, surtout à nappe libre et induit une variation spatio-temporelle des eaux souterraines et de leur qualité dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin ;
- la croissance démographique et son corollaire, l'augmentation de la demande en eau imposent une pression additionnelle sur les ressources en eaux souterraines dont les modes de gestion accroissent les risques de crises potentielles dans la région d'étude ;
- la mise en évidence des faiblesses des modes actuels de gestion permet de développer des stratégies adéquates d'adaptation ou de mitigation des impacts de l'évolution du climat et d'assurer une exploitation durable des ressources en eaux souterraines dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin.

L'objectif général de cette recherche est d'étudier la sensibilité des eaux souterraines à l'évolution du climat et des systèmes de gestion de cette ressource. Il s'agit, de façon spécifique de :

- présenter les facteurs géographiques de la disponibilité et de la gestion des ressources en eaux souterraines dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin ;
- étudier les manifestations de la variabilité et du changement climatiques (observé et futur) dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin ;
- analyser l'hydrodynamique des aquifères et la sensibilité de la qualité des eaux souterraines à l'évolution du climat et aux changements d'occupation des terres dans le bassin côtier du Bénin ;
- évaluer les modes actuels d'exploitation des eaux souterraines, leurs effets combinés à ceux du climat et les stratégies de gestion durable de ces ressources dans différents contextes hydroclimatiques dans le bassin.

Cette thèse est présentée en trois parties et subdivisée en sept chapitres.

Dans la première partie, le chapitre 1 est une description de la démarche méthodologique adoptée pour l'analyse de l'évolution du climat et de la réponse consécutive des hydrosystèmes dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Le deuxième chapitre présente les facteurs physiques et humains qui ont une certaine influence sur la production, le transfert et le stockage des eaux souterraines ainsi que sur leur gestion.

La deuxième partie met en évidence les manifestations de l'évolution récente et future du climat en terme de variabilité (1951-2005) et de changement à l'horizon 2070-2089 et de la dynamique des états de surface (chapitre 3), la sensibilité hydrologique des réservoirs souterrains en réponse à la variabilité climatique et des facteurs connexes dans le bassin côtier du Bénin (chapitre 4).

La troisième partie analyse les modes courants d'exploitation des ressources en eaux souterraines (chapitre 5), la dynamique de la qualité physico-chimique et bactériologique (chapitre 6) et propose une approche prospective de gestion durable de ces ressources dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin (chaptre 7).

PREMIERE PARTIE

DEMARCHE METHODOLOGIQUE ET CARACTERISTIQUES GEOGRAPHIQUES DU BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN

Chapitre I

CONCEPTS, DONNEES ET METHODES D'ETUDE

L'étude de l'évolution du climat et de ses impacts sur les eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier du Bénin a nécessité l'utilisation de données météorologiques, hydrogéologiques, hydrologiques et socioéconomiques. Elles ont permis, grâce aux méthodes statistiques, de modélisation et socio-anthropologiques, d'analyser l'état et les tendances climatiques ainsi que la sensibilité du système aquifère.

L'exploitation et les modes de gestion des eaux souterraines ont été évalués en se fondant sur les indicateurs hydroclimatiques élaborés, l'analyse des données relatives à l'extraction de la ressource en milieux rural et urbain et des perceptions populaires.

1.1. Clarification des concepts et données d'étude

La clarification des principaux concepts de la présente étude a présidé à la définition de son cadre thématique et au choix des données en fonction des objectifs fixés. L'analyse de l'état du réseau d'observations et de la qualité des données dudit bassin a permis d'apprécier leur fiabilité et leur pertinence pour ce travail.

1.1.1. Clarification des concepts

Les principaux concepts de la présente étude ont été définis au regard de leur sens initial et de leur évolution. Le caractère local du bassin sédimentaire côtier du Bénin a conduit à orienter les concepts et à les adapter afin d'en faciliter la compréhension, de mieux définir les méthodes et interpréter les résultats de recherche.

1.1.1.1. Bassin sédimentaire côtier : une vaste entité morphostructurale

Le bassin sédimentaire côtier est mis en place à partir des dépôts sédimentaires qui ont marqué la zone d'influence des phénomènes océaniques (transgression et régression) qui se sont succédés le long des côtes du golfe de Guinée. Ces dépôts sédimentaires côtiers du Bénin font, en effet, partie du vaste bassin sédimentaire qui s'étend entre le Ghana à l'Ouest, et le Nigeria à l'Est (Slansky, 1962). Le bassin a accumulé ces dépôts en différentes phases paléogéographiques, hydroclimatiques et lithostratigraphiques successives. D'après Slansky

(1959) cité par Oyédé (1991), au Paléocène inférieur, la transgression se poursuit, le bassin reste peu profond et la sédimentation argileuse passe vers le sommet à un calcaire zoogène caractérisé par un petit oursin, *Togoocyamus seefriedi* (Oppenheim). Quant au Paléocène supérieur, il est marqué par des dépôts argileux et marneux avec des niveaux glauconieux et phosphatés ; la microfaune est riche en *Globorotalia*.

Après une régression probable, une nouvelle transgression a lieu à l'Yprésien (Eocène inférieur), représenté par des faciès comparables à ceux du Paléocène supérieur. Le Lutétien correspond à une régression avec des pulsations qui se traduisent par des faciès argilo-sableux et des niveaux phosphatés dès la base. La période post-éocène, pour sa part, est surtout marquée par le dépôt du ''Continental terminal'' et le Quaternaire ancien par la ''Terre de barre''. Les travaux de Lang *et al.* (1986 et 1990), Istituto Recerche Breda (1987) ont donné plus de détails sur l'ensemble du bassin en se basant sur des repères lithologiques et sédimentologiques, témoignant des variations successives du niveau de la mer.

Les différentes phases de sédimentation et les constituants des dépôts du bassin côtier du Bénin ont été précisés par des études récentes (Akpiti *et al.*, 1985 pour le Tertiaire marin ; Houessou et Lang, 1978 ; Lang *et al.*, 1982 pour le ''Continental terminal'' et la ''Terre de barre'' notamment). Au regard de ses spécificités hydrologiques, il peut être aussi désigné par le terme bassin hydrogéologique côtier.

Les événements géologiques se sont donc combinés à ceux hydroclimatiques pour mettre en place les formations réservoirs d'eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier du Bénin (bassin côtier du Bénin).

1.1.1.2. Hydrosystème souterrain : un réservoir d'eau exploitable

L'hydrosystème est un système linéaire orienté de l'amont vers l'aval, intégrant au fur et à mesure les apports de son bassin-versant (Wasson, 1996). Selon cet auteur, le terme hydrosystème cherche à exprimer la complexité des interactions qui en déterminent le fonctionnement. En outre, un hydrosystème est un système composé de l'eau et des milieux aquatiques associés dans un secteur géographique délimité, notamment un bassin versant. Quant à la SDAGE (2004 ; *http://rdb.eaurmc.fr*), elle définit l'hydrosystème comme l'ensemble des éléments d'eau courante, d'eau stagnante, semi aquatiques, terrestres, tant superficiels que souterrains et leurs interactions. Le concept d'hydrosystème insiste sur la notion de système et sur son fonctionnement hydrodynamique, hydrobiologique, etc. qui peuvent être modifiés par les actions de l'homme et surtout celles climatiques.

Les aspects de l'hydrosystème qui intéressent cette étude sont les processus hydrodynamiques qui caractérisent les réservoirs d'eaux souterraines. Cette notion peut, selon le cas, se confondre avec celle de masse d'eaux souterraines, qui est un volume distinct à l'intérieur d'un ou de plusieurs aquifères. Un aquifère désigne un réservoir naturel d'eau exploitable pour la consommation courante, industrielle ou agricole. Les uns sont constamment renouvelés par les pluies ; d'autres, en profondeur, contiennent des eaux fossiles ou dont le taux éventuel de renouvellement par les infiltrations d'eau de pluie n'est pas toujours connu (Brunet *et al.*, 1992). Dans ces aquifères superficiels, l'écoulement de l'eau est libre et gravitaire, ce qui leur vaut le nom de nappes libres ou d'aquifère à nappe libre. Ils sont très influencés par l'évolution du climat, en l'occurrence la variabilité pluviométrique et constituent le centre d'intérêt de cette étude.

En outre, les nappes profondes sont situées entre des couches imperméables. Du fait de leur caractère confiné, ces nappes sont qualifiées de nappes captives. Lorsque que l'eau d'une nappe profonde est sous pression, ce réservoir est artésien (artésianisme jaillissant ou non). Ces différents types de nappes existent dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin et contribuent à définir son système aquifère et en général son bassin hydrogéologique. Ce bassin emmagasine les plus importantes ressources en eaux souterraines du pays, étant donné les facilités de recharge. La recharge est un processus par lequel la zone saturée d'un aquifère reçoit un apport d'eau extérieur, soit directement dans la formation géologique elle-même, soit indirectement par l'intermédiaire d'une autre formation géologique (Castany, 1982). Elle décrit généralement la réalimentation des systèmes d'écoulement souterrains (Winter *et al.*, 1998). La notion de « recharge directe » des aquifères est liée à celle de l'« infiltration efficace », généralement définie comme la part de la pluie qui échappe à l'évapotranspiration et au ruissellement pour rejoindre la nappe (Castany et Margat, 1977). Il a servi dans cette étude à apprécier l'impact du climat sur les eaux souterraines des nappes localisées à l'intérieur des plateaux ou directement en relation avec les masses d'eau de surface.

1.1.1.3. Disponibilité et gestion des ressources en eau

La disponibilité en eau appelle en tout premier lieu la notion de quantité. Aussi certains auteurs dont Falkermark (1989) ; Falkenmark & Widstrand (1992), Diop et Rekacewicz (2003) sont-ils arrivés à définir, par unité géographique, des seuils de pénurie d'eau. Trois seuils sont définis : pénurie, stress hydrique et vulnérabilité hydrique. La vulnérabilité hydrique est associée à une quantité d'eau de 1700 à 2500 m^3 par personne et par an, le stress

hydrique à un volume d'eau de 1000 à 1700 m^3 par personne et par an et la pénurie d'eau à un volume d'eau de moins de 1000 m^3 par personne et par an. Cette catégorisation tient plus compte de l'aspect quantité de l'eau que de celui qualité. Or, une eau de consommation est appréciée plus par sa qualité que par son volume.

La disponibilité de l'eau, en terme de qualité, résulte de son état de pollution par les éléments physiques et chimiques, et ou de sa contamination par les agents bactériens. Elle est appréciée en fonction des teneurs en polluants et des standards de l'Organisation Mondiale de la Santé (WHO, 2008) notamment. Le climat a plus d'incidence sur la variation du stock d'eau souterraine (effet le plus perceptible et dont l'analyse est aisée) que sur la qualité de celle-ci, tributaire d'autres facteurs comme la composition minéralogique des couches géologiques traversées et les changements dans l'occupation et l'utilisation des terres. Pour Gadelle (1995), la disponibilité en eau douce est dictée en grande partie par le climat et en particulier par la périodicité et la localisation des pluies ainsi que par la demande évaporatoire largement dominée par la température. Ce qui montre le rôle primordial du climat dans la variation spatio-temporelle des quantités d'eau souterraine, mais aussi sur les modes de gestion.

La gestion, quant à elle, regroupe un ensemble de techniques utilisées dans la mise en œuvre des activités de quelque nature qu'elles soient en vue de l'utilisation de la meilleure combinaison possible des ressources disponibles. Elle englobe la planification et se traduit par quatre éléments à savoir : organisation, conduite, direction et évaluation (de Boislandelle, 1998). Dans cette étude, la gestion des ressources en eau souterraine est analysée en se focalisant sur l'ensemble des techniques de mobilisation, d'approvisionnement et d'usage à des fins écologiques et socioéconomiques. Elle est conditionnée par la disponibilité (volume et qualité) de ces ressources et tributaire, entre autres, de la dynamique climatique. Les formes de gestion sont aussi mises en relation avec l'évolution du climat qui pourrait compromettre la disponibilité des eaux souterraines et accroître les conflits d'usages.

1.1.1.4. Evolution du climat : moteur de dynamique hydrologique

L'évolution du climat est assimilée à sa variabilité à toutes les échelles temporelles et spatiales et aux changements observés ou projetés susceptibles de l'affecter. Les notions de climat, variabilité climatique, variation climatique et de changement climatique sont définies en se focalisant sur le vocabulaire météorologique (OMM, 1992) et le rapport du GIEC (2007).

Selon l'OMM (1992), le *climat* est la synthèse des conditions météorologiques dans une région donnée, caractérisée par des statistiques à long terme (valeurs moyennes, variances, probabilités de valeurs extrêmes, etc.) des éléments météorologiques dans cette région. Dans son acception la plus générale, la *variabilité du climat* désigne la caractéristique intrinsèque du climat qui se manifeste par des changements climatiques avec le temps. Le degré de variabilité climatique peut être décrit par les différences dans les statistiques à long terme d'éléments météorologiques calculés pour des époques différentes (en ce sens, la mesure de la variabilité du climat est identique à la mesure du changement climatique). Ce concept traduit souvent les écarts que présentent les statistiques du climat relatives à une période particulière (par exemple un mois, une saison ou une année donnée) par rapport aux statistiques à long terme du climat relatives à la même période du calendrier (en ce sens, la variabilité du climat est mesurée par ces écarts, qualifié souvent d'anomalies). Pour le GIEC (2007), la variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique (variabilité interne) ou à des variations des forçages externes anthropiques ou naturels (variabilité externe).

Par ailleurs, la *variation climatique* est la fluctuation, ou composante de celle-ci, dont l'échelle de temps caractéristique est suffisamment grande pour aboutir à une inconstance appréciable des moyennes (normales) successives de la variable, calculées chacune sur trente ans ou plus. Ce terme sert souvent à désigner des variations interannuelles courantes ou des changements qui se produisent d'une décennie à une autre (OMM, 1992). Le *changement climatique* est la variation de l'état du climat, que l'on peut déceler (par exemple au moyen de tests statistiques) par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. Le changement climatique est un terme tout à fait général qui englobe toutes les formes d'inconstance climatique (c'est-à-dire toute différence dans les statistiques à long terme des éléments météorologiques calculés pour des époques différentes mais se rapportant au même endroit), quelle que soit leur nature statistique ou leur cause physique. Le changement climatique peut résulter de facteurs tels que des modifications de l'émission solaire, des changements à long terme d'éléments de l'orbite terrestre (…), des processus naturels intervenant à l'intérieur du système climatique, ou un forçage anthropique (par exemple une augmentation de la concentration de dioxyde de carbone et d'autre gaz à effet de serre dans l'atmosphère) (OMM, 1992). En d'autre terme, il désigne un changement significatif (c'est-à-dire entraînant des effets importants sur le plan économique, social et celui de l'environnement) des valeurs moyennes d'un élément météorologique (en particulier la

température ou la hauteur de précipitation) au cours d'une période donnée, les moyennes étant prises sur des durées de l'ordre de la décennie ou davantage. GIEC (2007) désigne les changements climatiques comme pouvant être dus à des processus internes naturels, à des forçages externes ou à des changements anthropiques persistants dans la composition de l'atmosphère ou dans l'utilisation des terres. La Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), dans son article premier, définit les changements climatiques comme des « changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables ». La CCNUCC fait ainsi une distinction entre les changements climatiques attribuables aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère et la variabilité du climat imputable à des causes naturelles. Les grands concepts, les principes et les hypothèses des changements climatiques sont très détaillés dans les rapport du GIEC (IPCC, 1996, 1998, 2001 ; GIEC, 2007) de même que leurs impacts sur les ressources en eau (Bates *et al.*, 2008).

Au regard de ces définitions de l'OMM, du CCNUCC et du GIEC (2007), l'évolution du climat dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin est appréciée à partir des indicateurs statistiques et de la modélisation. Toutefois, il est fait appel en plus aux perceptions populaires d'une ‘’rupture’’ de la manifestation des événements climatiques. Une rupture peut être définie de façon générale par un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné (Lubès *et al.*, 1994), le plus souvent inconnu (Ardoin-Bardin, 2004). Ces indicateurs statistiques et socio-anthropologiques ont permis d'apprécier la dynamique climatique aux échelles temporelles (mensuelle, saisonnière, annuelle, etc.) et spatiales (stationnelle, sectorielle, etc.) du bassin côtier. Que l'évolution du climat soit liée aux facteurs naturels ou attribuée aux effets des activités humaines, elle a des répercussions considérables sur les ressources en eaux tant superficielles que souterraines.

Cette relation climat-ressources en eau a intéressé des auteurs au point de faire naître l'hydroclimatologie qui, selon Hirschboeck (1988), désigne une approche d'étude des événements hydrologiques dans leur contexte climatique. Pour Langbein (cité par Mather, 1991), elle est l'étude de l'influence du climat sur les eaux de la terre. Les études hydroclimatiques s'intéressent aussi au bilan de l'eau et à sa variabilité spatiale et/ou temporelle, étudiés dans les contextes continental (Legates et Mather, 1992 ; Feddema, 1998), régional (Wolock et McCabe, 1999) et à l'échelle des bassins (McCabe et Wolock, 1992 ; Shelton, 1998).

A ces différents aspects hydroclimatiques peut être appliquée l'approche ''scénarios'' qui sont, selon Cole (1981) et Schwartz (1991), des schémas descriptifs de la logique dans laquelle les événements vont se dérouler dans le futur. Le scénario est, selon Ashmore et Church (2001), une description cohérente, structurée et plausible d'un état futur possible et non une prévision, les termes « prévision » et « prédiction » désignant un futur plus probable. Les scénarios décrits dans ce travail sont relatifs à l'état des ressources en eaux souterraines sous divers contextes hydroclimatiques (humide, normale et sec). Les scénarios hydroclimatiques identifiés ont permis d'envisager les stratégies de gestion durable des eaux souterraines en se fondant sur les données disponibles et élaborées.

1.2. Méthode d'analyse climatique et de la dynamique des eaux souterraines

1.2.1. Données utilisées : Nature, distribution spatiale, échelle temporelle, sources et pertinence

Les données utilisées sont d'abord les statistiques climatologiques, hydrologiques, piézométriques, et celles d'occupation du sol. Elles sont également des données d'observations ou de mesures directes comme les paramètres de qualité de l'eau. Enfin, quelques données socioéconomiques, complétées par celles d'enquêtes socio-anthropologiques, ont permis d'apprécier les modes d'exploitation et d'usages des eaux souterraines dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin.

1.2.1.1. Réseau d'observations hydrométéorologiques

Le réseau d'observation hydrométéorologique exploité dans le cadre de travail comporte 22 stations climatologiques, 4 stations hydrométriques et 12 stations piézométriques pour l'analyse de l'impact du climat sur les ressources en eaux souterraines. La figure 1.1 montre la répartition spatiale de ces stations dans le bassin sédimentaire côtier.

Le réseau climatologique est formé de deux stations synoptiques (Cotonou-aéroport et Bohicon), trois stations climatologiques (Ouidah, Pobè et Niaouli) et de dix sept postes pluviométriques. Une station climatologique couvre une superficie de 562 km² dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Le réseau hydrologique n'est pas très représentatif du bassin étant donné que les stations sont très insuffisantes et l'enregistrement des variables irrégulier. Cependant, afin d'analyser l'interaction eau de surface - eau souterraine, les stations hydrométriques des fleuves Mono à Athiémé, Couffo à Lanta, Ouémé à Bonou et de la rivière Zou à Domè ont été retenues.

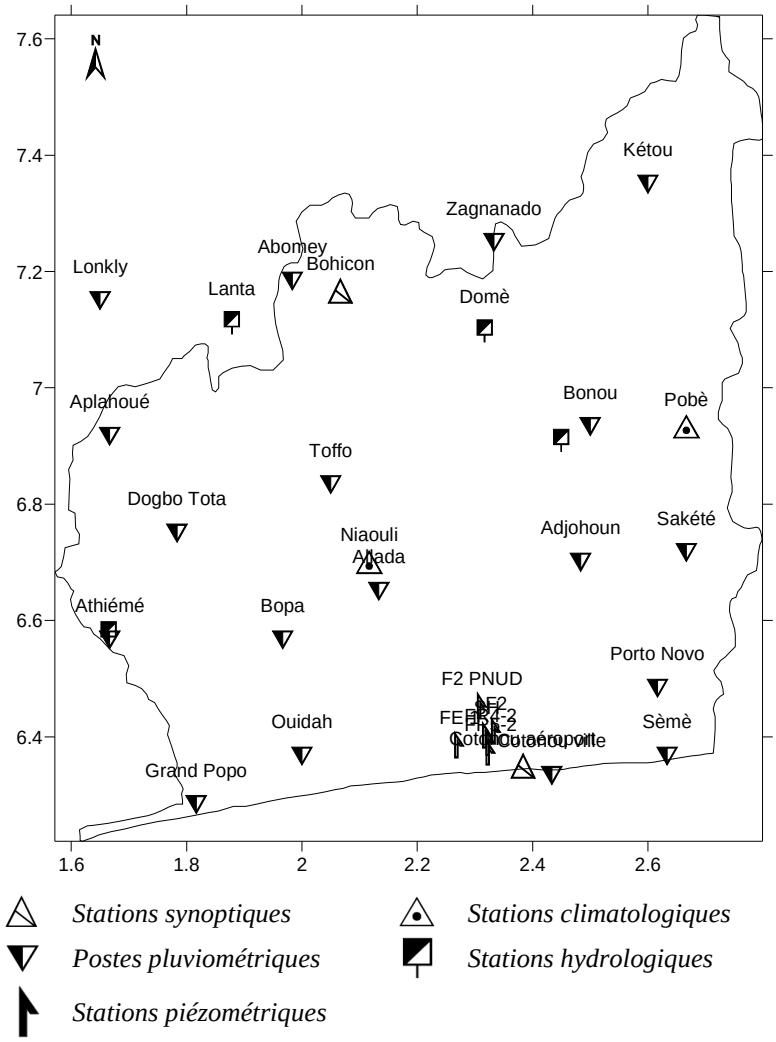


Figure 1.1 : Réseaux d'observations climatologiques, hydrométriques et piézométriques dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin

Le réseau piézométrique est celui installé, dans ou autour du champ de captage de Godomey sur le plateau d'Allada, par la Société Nationale des Eaux du Bénin (SONEB), la Direction Générale de l'Eau (DG-Eau), et le Département des Sciences de la Terre de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC).

1.2.1.2. Données climatologiques

L'état, les tendances et les extrêmes climatiques ont été étudiés à l'aide des chroniques pluviométriques, thermométriques, transpiratoires et évaporatoires et des données de sorties du modèle PRECIS. Elles ont été collectées à l'ASECNA-Cotonou et au Laboratoire de Climatologie de l'UAC pour une période de 55 ans (1951-2005). L'analyse des séquences ou des variations climatiques a nécessité la segmentation de cette période à l'aide de la méthode des ruptures. Ces données sont complétées par celles déjà collectées dans le cadre des études antérieures (Bokonon-Ganta, 1987 ; Boko, 1988 ; Moron 1994 ; Nikolson, 1994 ; Houndénou,

1999 ; Houndjahoué, 1999 ; Amoussou, 2005 ; Totin, 2005 ; Ogouwalé, 2006 ; Akibou, 2009) sur la dynamique du système climatique ouest-africain et béninois.

1.2.1.3. Données hydrogéologiques

Les chroniques hebdomadaires ou bimensuelles des piézomètres FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD situés dans et autour du champ de captage de Godomey, relevées par le Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA) de l'UAC, ainsi que les paramètres hydrodynamiques du système aquifère du bassin côtier ont constitué l'essentiel des données hydrogéologiques. Les fluctuations des niveaux piézométriques couvrant la période 1991-2007 ont principalement aidé à comprendre l'influence de l'évolution climatique sur l'hydrodynamique de l'aquifère Continental Terminal. Les données auxiliaires utilisées sont géologiques, lithologiques et topographiques dans la mesure où elles conditionnent la fonction de transfert hydrique atmosphère-sol-aquifère et celle de stockage des réservoirs souterrains. Elles sont extraites des résultats des travaux de Slansky (1967), Géohydraulique (1985), Maliki (1993), Alidou *et al.* (1994), Boukari (1998, 2002, 2007), Lakognon (2000), Zogo (2000), Alassane (2004), Boukari et Alassane (2007) sur la dynamique des aquifères dans la région d'étude. Cette base de données a été fournie par le LHA, la SONEB et la DG-Eau.

Les données hydrauliques portent, entre autres, sur le nombre de points d'eau villageoise en Equivalent Point d'Eau (EPE) [1 EPE dessert 250 personnes] considérant la période 1996-2007 et sur les volumes d'eau pompés de 1990 à 2007. Elles ont permis d'appréhender l'ampleur de la pression humaine sur les eaux souterraines extraits à partir des forages, des puits, des sources, des Adduction d'eau villageoise (AEV), des Postes Eau Autonomes (PEA). Ces données ont été collectées à la DG-Eau et à la SONEB.

1.2.1.4. Données hydrologiques

Les données hydrologiques sont les débits mensuels des fleuves Mono à Athiémé, Couffo à Lanta et Ouémé à Bonou et de la rivière Zou à Domè, qui drainent le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Elles ont permis de mettre en évidence le fonctionnement hydrologique des aquifères ayant leurs exutoires au niveau des versants de bassin des masses d'eau de surface. Ces interactions hydrologiques ont aidé à évaluer les volumes d'eau mobilisés par ces réservoirs souterrains. L'eau déstockée en saison sèche constitue l'écoulement de base dans les bassins-versants. Les chroniques hydrologiques de 1951 à 2005 ont été extraites des annales hydrologiques (édition 2008) produites par la DG-Eau. Les données complémentaires

ont été collectées lors des campagnes saisonnières organisées dans les sous-bassins pour l'observation directe des phénomènes hydrodynamiques. De plus, les résultats des travaux de Le Barbé *et al.* (1993), Totin (2003 et 2005), Amoussou (2005 et 2010), Donou (2009) ont été mis à contribution pour l'étude des phénomènes hydroclimatiques de surface.

1.2.1.5. Documents cartographiques

Les documents planimétriques dont les données sont extraites et utilisées sont, entre autres, la carte générale de la République du Bénin au 1/600000e, les cartes topographiques : feuille de Calavi, de Porto Novo, d'Abomey, d'Aplahoué à l'échelle 1/200000e. Il s'agit également de la carte pédologique : feuille d'Abomey, de Lomé et de Porto-Novo au 1/200000e (du CENAP, 1976), de la carte hydrogéologique du bassin sédimentaire côtier au 1/500000e de Géohydraulique, 1999 et de la carte de végétation au 1/50000e, réalisée par CENATEL en 1999. Ces différentes cartes ont été complétées par les images LANDSAT MSS 1973 et LANDSAT ETM7+, 2005 au 1/1 000 000e afin d'élaborer les différentes cartes thématiques et d'occupation de sol dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin.

1.2.1.6. Données démographiques et socioéconomiques

Les données démographiques et socioéconomiques concernent l'effectif de la population et les activités (agricoles, industrielles et autres) organisées autour des hydrosystèmes souterrains dans les départements de l'Atlantique, du Couffo, du Littoral, du Mono, de l'Ouémé, du Plateau et du Zou. Elles ont été utilisées pour l'analyse de la répartition spatio-temporelle de la population et de sa densité comme facteur de pression sur les hydrosystèmes souterrains. Ces données sont issues des Recensements Généraux de la Population et de l'Habitation (RGPH) de 1979, 1992 et 2002. A ces données, il faut ajouter celles élaborées grâce aux méthodes statistiques de projection démographiques.

Le choix des données d'étude est fondé sur la régularité des mesures, la représentativité, l'homogénéité, la pertinence par rapport aux faits étudiés, l'absence de lacunes majeures et les orientations données à cette étude.

1.2.1.7. Analyse critique et reconstitution des données hydrométéorologiques manquantes

Les stations climatologiques ouvertes avant ou en 1951 et 1952 constituent 91 % du réseau climatologique du bassin sédimentaire côtier du Bénin. Les données à combler sont d'environ 3,5 % pour toutes les stations du bassin. Les stations très lacunaires (plusieurs mois ou années de manque de données, > 5 %) ont été d'abord éliminées par tri visuel ou estimation de la proportion des données manquantes. Cette technique permet d'éviter l'*artificialisation* des données tout en écartant tout risque d'introduire des chiffres viciés et fantaisistes (Klassou, 1996). Elle est combinée à la méthode de ''tri à plat'', très utilisée par des statisticiens (Boursin et Duru, 1995) et adapté par Klassou (1996) pour la sélection des données d'étude. Ces méthodes ont aidé à éliminer les stations climatologiques de Lokossa, Ouando, Houn-Agamè, Sékou et celle hydrologique de la Sô dont les lacunes sont considérables. En revanche, les données des stations d'Athiémé, Dogbo-Tota, Bohicon, Toffo, Niaouli, Kétou, Sèmè, Cotonou-aéroport et Bonou, et de celles hydrométriques d'Athiémé, Lanta, Bonou et Domè ont été comblées à l'échelle journalière pour réduire les marges d'erreurs à l'échelle mensuelle.

L'estimation des valeurs manquantes pour une station quelconque à partir d'autres dont les variables sont complètes, nécessite en premier lieu, le contrôle de l'intensité des liaisons entre les différentes stations concernées (Klassou, 1996). Le test de Mantel (Smouse *et al.*, 1986) est la méthode utilisée dans cette étude (sur le programme Xlstat 2009) pour calculer la corrélation linéaire entre deux matrices de proximité (similarité ou dissimilarité) symétriques A et B de taille n suivant la formule :

$$Z(AB) = \sum_{i=n}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} a_{ij} b_{ij}$$

Le coefficient de corrélation ''r'' entre les matrices A d'une station de référence et B d'une station de données à combler est obtenu par la statistique standardisée de Mantel qui s'écrit :

$$r(AB) = \frac{1}{n(n-1)/2 - 1} \sum_{i=n}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \left(\frac{a_{ij} - \bar{a}}{S_a} \right) \left(\frac{b_{ij} - \bar{b}}{S_b} \right)$$

Les données comblées sont fiables et donnent une meilleure information lorsque le coefficient de corrélation ''r(AB)'' a une valeur entre -1 et 1. La reconstitution des données manquantes a été effectuée alternativement par le biais de la régression linéaire, de la fonction puissance,

des méthodes de Brunet-Morel (1969, 1971, 1979) et de prévision afin de choisir les meilleurs résultats.

L'équation de Brunet-Morel a pour expression mathématique :

$$y_i = \frac{\bar{y}}{\bar{x}}.x_i + \varepsilon_i$$

où y_i est la valeur manquante à estimer dans la matrice incomplète, x_i la valeur correspondante dans la matrice de référence, $\bar{y}$ et $\bar{x}$, les moyennes respectives des deux matrices sur la sous chronique complète et commune aux deux stations. La valeur ε_i est négligeable et de ce fait n'a pas été considérée dans l'estimation des valeurs manquantes.

Quant à l'équation de la fonction de prévision, elle s'écrit $b + ax$ où x représente l'observation dont la valeur recherchée est sous la forme :

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \text{ et } b = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum (x - \bar{x})^2}$$

Les séries climatologiques et hydrométriques ainsi comblées, vérifiées et validées ont servi de base à l'analyse de l'influence des événements hydroclimatiques sur la disponibilité des ressources en eaux souterraines et leur gestion.

Les données statistiques ont été complétées par celles recueillies pendant les campagnes d'observations directes et d'enquêtes socio-anthropologiques dans certaines localités choisies, de par leur spécificité par rapport aux phénomènes analysés.

1.2.1.8. Observations directes et enquêtes socio-anthropologiques

Les observations directes ont été menées sur des sites d'infiltration ou d'exfiltration des nappes souterraines (zones humides) et autour des points d'eau. Elles ont porté à la fois sur les traceurs écologiques de la dynamique hydroclimatique et la variabilité saisonnière des modes de gestion des ressources en eau. Elles ont été faites tant en saison pluvieuse qu'en saison sèche par approche participative impliquant surtout les personnes ressources locales (notables, chefs religieux, utilisateurs d'eau et les spécialistes des phénomènes étudiés).

Des champs de captage ou des points d'eau villageois ont constitué également des sites d'investigation. Ainsi, ont été observés les facteurs géographiques locaux (morphostructure, couvert végétal, types d'aménagement, modes d'exploitation des eaux, indicateurs de conflits de partage de la ressource en eau, etc.) qui pourraient influer sur le fonctionnement

hydrologique souterrain du bassin côtier de Bénin. De plus, les aspects relatifs à l'approvisionnement et à l'utilisation de l'eau par les différents groupes socioculturels ou socioprofessionnels sont observés. Les photographies instantanées, des faits marquants, prises ont servi à illustrer cette thèse.

En ce qui concerne les enquêtes socio-anthropologiques, les ménages, les centres socioprofessionnels, l'administration publique ou privé ont été assimilés à des unités de gestion des ressources en eau, surtout souterraine. Ainsi, cinq ménages et trois unités d'activités socioéconomiques (complexe agroalimentaire ou industrielle, périmètre maraîcher, site de lavage de véhicule, etc.) ont été retenus dans les agglomérations urbaines ou rurales choisies. Les enquêtes ont été effectuées dans ces unités en rapport de leur proximité d'un point d'eau, en saison sèche (novembre à février) et en saison pluvieuse (juin et octobre). Ceci vise à mieux comprendre la dynamique des pratiques en matière de gestion de l'eau. En outre, deux responsables par institution administrative de décision ou de gestion d'ouvrages ou de complexes hydrauliques (champs de captage, forages, puits, AEV, PEA, sources aménagées, etc.) ont été interviewés.

Les questionnaires, les guides d'observation et d'entretien (individuel et collectif) ont permis de collecter les données sur les perceptions populaires de la dynamique hydroclimatique, les quantités et les différents usages faits de l'eau, les sources réelles ou potentielles de conflit autour de la ressource, etc.

Des scénarios de gestion intégrée des ressources en eau sont enfin proposés en se focalisant sur les paramètres socioéconomiques et les tendances hydroclimatiques dans le bassin sédimentaire côtier.

1.2.2. Méthode d'analyse de la dynamique climatique

L'analyse de l'évolution du climat est faite en utilisant la statistique descriptive inférencielle et la modélisation. Elle a permis de mieux appréhender la variabilité ou le changement pluviométrique à l'échelle mensuelle, saisonnière et annuelle, et les autres éléments climatiques. La sensibilité des réservoirs souterrains à la dynamique climatique est appréciée en se fondant sur les fluctuations des niveaux piézométriques dans et autour du champ de captage de Godomey, l'estimation des volumes d'eau mobilisés par les nappes de versant et le bilan d'eau de Thornthwaite.

1.2.2.1. Analyse de la variabilité des pluies mensuelles et saisonnières

L'étude des régimes mensuels et saisonniers a pour intérêt de comprendre le rythme de répartition des précipitations en vue de mettre en évidence les périodes de recharge, d'inertie pluvio-hydrologique et de la pression humaine sur les eaux souterraines. A partir des précipitations mensuelles, les saisons climatiques sont découpées en fonction de deux années successives i et y. La grande saison pluvieuse (GSP) va de mars à juillet, la petite saison sèche (PSS) correspond au mois d'août, la petite saison pluvieuse (PSP) s'étend de septembre à octobre de l'année i. Quant à la grande saison sèche (GSS), elle couvre les mois de novembre à décembre de l'année i et se poursuit de janvier à février de l'année y. Cette variabilité pluviométrique dans le bassin sédimentaire côtier béninois est mise en relation avec les résultats des travaux de Janicot (2002), Sultan et Janicot (2004), etc. sur la pluviogenèse liée à la mousson ouest-africaine et de Boko (1988), Houndénou (1999) sur la dynamique du climat à l'échelle locale au Bénin.

En climatologie, la recherche de structures spatio-temporelles permettant de décrire les faits marquants de la pluviométrie, dans le temps (ruptures de stationnarité, cycles plus ou moins réguliers ou simple variabilité interannuelle) comme dans l'espace (région homogène quant à l'histoire), s'effectue fréquemment par utilisation d'analyses multivariées (Richard *et al.*, 1998 ; Beltrando, 2000). Les champs de pluies moyens sont ainsi déterminés par approche statistique et d'Analyse en Composantes Principales (ACP) sur le logiciel Xlstat 2009 et d'interpolation par krigeage sur l'interface d'un Système d'Information Géographique (SIG) sous Surfer 9. La méthode d'interpolation par krigeage (Gonzalez-Hiadalgo, 2001 ; Baillargeon, 2005) est utilisée pour la spatialisation des données, la régionalisation de la pluviométrie et la détermination des champs de pluie homogènes sur des cartes 2D du bassin.

1.2.2.2. Analyse de la variation climatique

Les tests statistiques sont effectués grâce au logiciel Khronostat 1.01, mis au point par l'UMR Hydrosciences de Montpellier. Ce logiciel regroupe des tests de vérification du caractère aléatoire de l'échantillon (test d'autocorrélation et test de corrélation sur le rang) et de détection de rupture. Ainsi, le test de Buishand et l'ellipse de Bois, la méthode non paramétrique de Pettitt, l'approche bayésienne de Lee et Heghinian et la méthode de Hubert (Lubès *et al.*, 1994) sont utilisés pour la détection de ruptures climatique et hydrologique dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin.

1.2.2.2.1. Détection de rupture de stationnarité et de la variation hydroclimatique

L'approche de Pettitt est un test non paramétrique dérivé de celui de Mann-Whitney. Ce test a été souvent utilisé pour l'étude des variables hydrométéorologiques en Afrique (Hubert *et al.*, 1989 ; Aka *et al.*, 1996 ; Paturel *et al.*, 1997 ; Demarée et Nicolis, 1990 ; Lubès *et al.*, 1994 ; Servat *et al.*, 1998 ; Ouédraogo, 2001 ; Ardoin Bardin, 2004) et dans le contexte béninois par Houndénou (1999), Vissin (2007), Yabi (2008), Totin *et al.* (2009). L'absence de rupture dans une série Xi de taille N constitue l'hypothèse nulle H_0. La mise en œuvre de ce test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N, les séries chronologiques xi, i=1,t et xj, j=t+1, N appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$ définie par :

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

où

Dij = sgn (Xi-Xj) avec sgn(x) = 1 si x>0, 0 si x=0 et -1 si x<0

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

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

H_0 est rejetée pour un risque α de première espèce donnée, si la probabilité de dépassement estimée est inférieure à α. La série comporte alors une rupture localisée au moment où est observé $\max |U_{t,N}|_{t=1,N-1}$.

La méthode bayésienne de Lee et Heghinian (1977), complémentaire, propose une approche paramétrique dont l'application sur une série nécessite une distribution normale des valeurs de cette dernière. Elle est fondée sur l'équation suivant :

$$\begin{cases} x_i = \mu+\varepsilon_i & \text{avec } i = 1, 2, 3, \ldots\tau \\ \mu+\delta+\varepsilon_i & \text{avec } i = 1, 2, 3, \ldots N \end{cases}$$

Les ε_i sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance σ^2. La position de la rupture dans le temps et l'amplitude d'un changement éventuel de la moyenne sont représentées respectivement par τ et δ. Le changement éventuel, position et amplitude, correspond au mode des distributions *a posteriori* de τ et δ. Ainsi, cette méthode fournit la

probabilité que le changement se produise au moment τ dans une série où est supposé *a priori* qu'il y a effectivement un changement à un moment déterminé. Elle donne également une estimation de la probabilité que l'amplitude du changement ait la valeur δ. La date de la rupture est estimée par le mode avec d'autant plus de précision que la dispersion de la distribution est faible et lorsque la distribution est unimodale.

De multiples changements peuvent intervenir dans une chronique de données climatologiques ou hydrologiques. Elles sont mises en évidence par la méthode de segmentation de Hubert. La procédure de segmentation des séries chronologiques consiste à découper la série en m segments (m>1) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du (ou des) segment (s) voisin (s). La procédure de segmentation se présente comme suit :

Toute série x_i où i=i_1, i_2 avec $1 \leq i_1 < i_2 \leq N$, constitue un segment de la série initiale des (x_i) avec i = 1, 2, …N. Toute partition de la série initiale en m segments constitue une segmentation de rang m définie par :

- I_k, k = 1, 2, …m le rang dans la série initiale de l'extrémité du k^{ième} ;
- N_k = ik-i_{k-1} la longueur du k^{ième} segment ;
- $\overline{X}_k = \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} x_i / n_k$ la moyenne du k^{ième} segment.

La quantité $D_m = \sum_{k=1}^{k=m} D_k = \sum_{k=1}^{k=m} \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} (x_i - \overline{x})^2$ est l'écart quadratique entre la série et la segmentation considérée. La segmentation retenue est celle qui minimise D_m.

Dans le cas où le test de Pettitt ne présente pas rigoureusement une année de rupture, celle fixée à la position du point de rupture par la méthode bayéisienne de Lee et Heghinian est retenue. Les années de rupture ont été utilisées pour caractériser la variation hydroclimatique marquée soit par une séquence humide, soit par une séquence sèche.

Les points de rupture ont été utilisés comme année pivot pour calculer les variations moyennes de la pluviométrie ou de l'écoulement grâce à l'indice de déficit hydrique (IdH). Il a servi surtout à caractériser les variations moyennes de part et d'autre de la rupture pour les variables climatiques dont la série présente une rupture (Ouédraogo, 2001 ; Ardoin-Badin, 2004 ; Totin, 2005 ; Vissin, 2007). L'IdH est estimé en pourcentage à partir de la formule :

$$IdH(\%) = 100.\frac{\bar{x}_2}{\bar{x}_1} - 1$$

avec $\bar{x}_1$ et $\bar{x}_2$ respectivement moyenne des périodes avant et après la rupture.

L'indice ainsi calculé montre selon qu'il est négatif ou positif, une séquence hydroclimatique humide ou sèche antérieure au point de rupture et renseigne sur la tendance post-rupture.

1.2.2.2.2. Détermination de l'évolution tendancielle des ressources hydroclimatiques

La tendance climatique ou hydrologique générale a été mise en évidence dans ce travail par la méthode d'évolution linéaire, les moyennes mobiles et les indices pondérés par l'écart-type. Le test non paramétrique de Spearman a permis de déterminer la significativité des changements climatiques observés.

1.2.2.2.2.1. Tendance hydroclimatique linéaire et séquentielle

Le modèle linéaire a l'avantage de proposer une représentation synthétique dynamique de l'évolution des paramètres hydroclimatiques considérés (Wesselink, 1995). L'équation de la droite de tendance est de la forme y = at+b dont a, est le coefficient dont le signe positif (+) ou négatif (-) exprime respectivement une tendance à la hausse ou à la baisse dans le temps t et b une constante. Cette méthode permet aussi d'obtenir les taux de variation (TxV) en millimètre (mm/an) à partir de l'équation de droite ou en pourcentage (%/an) par unité de temps par la formule :

$$TxV(\%) = 100.\frac{a}{\bar{x}}$$

Cette tendance linéaire, souvent résultante des séquences événementielles, est également analysée grâce à la moyenne mobile sur cinq ans et par la méthode des indices pondérés. L'indice mesure l'écart entre les variables étudiées par rapport à une moyenne établie sur une longue période et pondérée par l'écart type. Il est défini comme une variable centrée réduite (Lamb, 1982), représente l'anomalie et calculé par la formule :

$$I = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$$

avec xi variables climatiques ou hydrologiques considérées de l'année i et $\bar{x}$ et σ, respectivement moyenne et écart-type interannuels des variables étudiées sur la période de référence.

Ces indices ont été utilisés pour déterminer les années marquées par un excédent ou un déficit pluviométrique et par conséquent la réponse des aquifères à la pression climatique et hydrologique dans le bassin sédimentaire côtier.

Etant donné qu'une valeur aberrante peut peser dans l'allure de la tendance, la significativité de la tendance détectée est vérifiée par le test non paramétrique de Spearman.

1.2.2.2.2.2. Test de significativité des tendances

L'hypothèse nulle H_0 de ce test est une absence de tendance. Quant à l'hypothèse alternative, elle est celle de l'existence d'une tendance (WMO, 1966 ; Lubes et *al.*, 1994 ; Ouédraogo, 2001 ; Totin, 2005). Le test de Spearman a permis de vérifier la présence de dépendance en comparant, grâce au coefficient de corrélation, l'ordre de l'échantillon recueilli avec celui issu d'une procédure de tri. Ainsi, à chaque observation x_i, ..., x_n, sont associés son rang *i* dans l'échantillon observé et son rang R_i dans l'échantillon ordonné. Sous l'hypothèse H_0 d'indépendance des x_i, aucune corrélation n'est observée et le coefficient de corrélation ρ_s de Spearman doit être nul. L'équation de ce coefficient est :

$$\rho_s = \frac{Cov(R_i, i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} R_i . \sum_{i=1}^{n} i}} = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{n} (Ri - i)^2}{n(n^2 - 1)}$$

Comme n>30 dans cette étude, sous l'hypothèse nulle (H_0), la variable $t = \rho_s \sqrt{\frac{n-2}{1-\rho_s^2}}$ suit une distribution de Student à n-2 degrés de liberté. Ainsi, pour un risque de première espèce donné, la région d'acceptation de H_0 est comprise entre les valeurs théoriques de la variable de Student de probabilité de non dépassement respectivement égal à α et $\alpha/2$. Autrement, pour Adjovi (1991), en l'absence de toute présomption d'existence d'une tendance dans un sens déterminé, le test n'est juste que si sa forme bilatérale est adoptée, c'est-à-dire si H_0 est rejetée pour les grandes valeurs de $|\rho_s|$. Ainsi, après la détermination de la probabilité α_1, H_0 est acceptée ou rejetée au niveau de signification α_0 selon que $\alpha_1 > \alpha_0$ ou $\alpha_1 < \alpha_0$. Dans le cas des $|\rho_s|$ significatives, la tendance est à la hausse ou à la baisse si $\rho_s > 0$ ou $\rho_s < 0$.

Avec ce test, une tendance est détectée lorsque la probabilité α_1 est inférieur au niveau de signification α_0 ($\alpha_1 < \alpha_0$). Les coefficients de corrélation sur rangs de Spearman (ρ_s) et les

probabilités de non dépassement (α_1) permettent ainsi d'apprécier la significativité des tendances d'évolution spatio-temporelle des variables hydroclimatiques.

1.2.2.3. Calcul du bilan climatique

Le bilan climatique exprime la différence entre la somme des abats pluviométriques et celle de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et constitue, lorsqu'il est positif, le surplus disponible pour la recharge en eau du sol et pour l'écoulement (Sutcliffe et Piper, 1985). Il sert en réalité à analyser le rythme des excédents ou des déficits en eau (Vissin, 2007). Le bilan climatique (Bc) est calculé à partir de la formule:

avec : P, pluie totale annuelle (mm) et ETP, évapotranspiration potentielle (mm) qui est la demande climatique en vapeur d'eau.

- Si Bc > 0, alors le bilan est excédentaire ; Bc < 0, alors le bilan est déficitaire ; et Bc = 0, alors le bilan est équilibré.

En vue de mieux évaluer les risques et aider à une meilleure prise de décision en matière de gestion des ressources en eaux souterraines dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin, une étude fréquentielle des événements hydroclimatiques a été faite.

1.2.2.4. Analyse fréquentielle des événements hydroclimatiques

L'étude de la variabilité hydroclimatique a nécessité une analyse fréquentielle des événements climatiques et hydrologiques moyens et extrêmes.

1.2.2.4.1. Détermination des événements moyens et extrêmes

Les événements climatiques et hydrologiques moyens et extrêmes ont été caractérisés par la méthode des quintiles, utilisée au Sénégal par Dione (1996) et Ndione *et al.* (2005), en Thaïlande par Lacombe (2003) et par Meddi et Meddi (2004). Elle consiste à regrouper par ordre croissant les séries pluviométriques, thermométriques ou hydrologiques mensuels ou annuels et à les distribuer en cinq classes d'événements très déficitaires, déficitaires, normaux, excédentaires et très excédentaires.

Les cinq classes déterminées à l'aide du logiciel Xlstat 2009 correspondent à des seuils hydroclimatiques très secs, secs, normaux, humides et très humides atteints sur la période 1951-2005 dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. A cet effet, l'analyse fréquentielle a

permis de définir cinq scénarios hydroclimatiques, de par leur valeur et leur probabilité d'occurrence dans le bassin côtier du Bénin en utilisant le modèle de Gumbel.

1.2.2.4.2. Modèle fréquentiel de Gumbel

Un modèle fréquentiel très souvent utilisé pour décrire le comportement statistique des valeurs extrêmes est la distribution statistique de Gumbel (loi double exponentielle ou loi de Gumbel). Elle sert dans l'analyse fréquentielle des valeurs extrêmes (OMM, 1983 ; Fiorentino & Gabriele, 1984 ; Slimani, 1985 ; Masson et Lubès, 1991 ; Hubert et Bendjoudi, 1998 ; Bois *et al.*, 2007 ; Goula *et al.*, 2007). La fonction de répartition de la loi de Gumbel F(x) s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)\right) \text{ avec la variable réduite suivante : } u = \frac{x-a}{b}$$

où a et b sont les paramètres du modèle de Gumbel.

La distribution s'écrit alors de la manière suivante :

$$F(x) = \exp\left(-\exp(-u)\right) \text{ et } u = -\ln\left(-\ln\left(F(x)\right)\right)$$

En conséquence, dès lors que les points de la série à ajuster peuvent être reportés dans un système d'axes $x-u$, il est possible d'ajuster une droite qui passe le mieux par ces points et d'en déduire les deux paramètres a et b de la loi. L'estimation des paramètres a et b de l'ajustement peut se faire graphiquement, ou selon une méthode mathématique comme celle des moments non développée dans cette étude.

Il s'agit essentiellement d'estimer la probabilité de non dépassement $F(x_i)$ qu'il convient d'attribuer à chaque valeur x_i. Les formules d'estimation de la fonction de répartition à l'aide de la fréquence empirique $F(x)$ reposent toutes sur un tri de la série par valeurs croissantes permettant d'associer à chaque valeur son rang r. Des simulations ont montré que pour la loi de Gumbel, il faut utiliser la fréquence empirique de Hazen :

$$F\left(x_{[r]}\right) = \frac{r-0{,}5}{n}$$

où r est le rang dans la série de données classées par valeurs croissantes, n est la taille de l'échantillon, $x_{[r]}$ la valeur de rang r.

Le temps de retour T d'un événement est défini comme étant l'inverse de la fréquence d'apparition de l'événement et est donné par la formule :

$$T = \frac{1}{1 - F(x_i)}$$

Il a permis d'estimer le temps de retour, en terme de probabilité d'apparition, des événements climatiques et hydrologiques extrêmes. Selon le Glossaire International d'Hydrologie (1992) la période de retour, synonyme de période de récurrence, est la moyenne à long terme du temps ou du nombre d'années séparant un événement de grandeur donnée d'un second événement d'une grandeur égale ou supérieure. Les périodes de retour définies dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin sont de 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans pour les événements hydroclimatiques.

Le climat futur du bassin côtier du Bénin a été simulé à l'aide du modèle PRECIS du met office dans les conditions limites ECHAM4, scénarios A2.

1.2.3. Simulation et projection climatiques à l'aide du Modèle PRECIS / ECHAM4-A2

Le modèle Providing Regional Climates for Impacts Studies (PRECIS) fonctionne seulement sous le système d'exploitation LINUX. Il a permis de simuler l'évolution récente et future du climat dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin.

1.2.3.1. Présentation, utilité et intérêt du modèle PRECIS

Le modèle PRECIS (Jones *et al.*, 2004) fonctionne sous les scénarios d'Emissions de Gaz à Effet de Serre (SRES) (Nakicenovic *et al.*, 2000) dont A2 utilisé pour la simulation du climat futur du bassin sédimentaire côtier du Bénin. Le canevas et la famille de scénarios A2 décrivent un monde très hétérogène. Le thème sous-jacent est l'autosuffisance et la préservation des identités locales. Les schémas de fécondité entre régions convergent très lentement, avec pour résultat un accroissement continu de la population. Le développement économique a une orientation principalement régionale, et la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentées et plus lentes comme dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Le modèle PRECIS est développé par le Hadley Centre for Climate Prediction and Research (Wilson *et al.*, 2005 ; Lu, 2006) au Royaume Uni. Il est adapté à toutes les régions du globe pour les projections climatiques (Xu *et al.*, 2006 ; Hudson and Jones, 2002 ; Rupa Kumar *et al.*, 2006 ; Taylor *et al.*, 2007 ; Akhtar *et al.*, 2008 et Lincoln & Marengo, 2009). PRECIS est utilisé à une résolution horizontale (géographique) de 0.44°x0.44° (50 km x 50 km) ou 0.22°x0.22° (25 km x 25 km) latitude/longitude. Il dispose de 19 strates verticales en atmosphère et génère des données au pas de temps horaire. Les

échelles temporelles utilisées dans le cadre de ce travail sont : la normale de référence 1960-1990 pour la simulation du climat de référence et la période 2069-2089 pour la projection du climat futur. La première année de chaque période (1960 pour la référence et 2069 pour le futur) a servi à la mise en route du modèle et n'est pas prise en compte dans le traitement des résultats. Ces échelles temporelles sont très utilisées dans l'élaboration des scénarios de changements climatiques avec le modèle PRECIS (Tadross *et al.*, 2005 ; Taylor, 2006 ; Marengo *et al.*, 2009). Les interfaces de projections sont, entre autres, HadAM3P A2 et B2, HadCM3 A1B et ECHAM4 A2 et B2. Les conditions de forçage de ECHAM4 sont définies par Roeckner *et al.* (1992). La modélisation climatique, dans le cadre de cette étude, a été faite en choisissant SRES A2 de ECHAM4 sur PRECIS pour les périodes 1961-1990 et 2070-2089 à une résolution spatiale de 0,44°x0,44°. Mais le maillage de modélisation ne correspond pas à celui de la densité du réseau d'observation.

Etant donné la faible étendue du bassin sédimentaire côtier du Bénin, la simulation aurait dû être faite à une résolution de 0,22°x0,22° et à un horizon temporel plus proche (2020 ou 2050, par exemple). Ce qui n'a pas été le cas du fait : (i) de calage du modèle sur les périodes 1961-1990 et 2070-2099, (ii) des problèmes de mémoire de calcul, (iii) de durée de finition de la modélisation (au moins un an) et de la masse importante d'outputs à traiter dans un court délai, etc. Cependant, le choix de ce modèle se justifie par le fait qu'il produit sur une grille fine des données appropriées aux études d'impact et d'adaptation climatique d'une part et qu'il offre une représentation améliorée de modèles climatiques à petite échelle, des influences climatiques et des événements extrêmes d'autre part.

La première période est soit celle où il n'y a aucune émission de GES (c'est-à-dire représenter le climat préindustriel) soit celle du climat récent. Ainsi, la normale 1961-1990, référentiel de l'OMM est choisie pour la calibration des données simulées avec celles observées. La deuxième période est prise à la limite du 21ème siècle, 2070-2089 quand le signal des changements climatiques d'origine anthropique sera mis en évidence par rapport à la variabilité climatique naturelle.

Les données de températures et de précipitations simulées ont subit des traitements, des analyses statistiques à l'aide des logiciels GraDs, Matlab et Xlstat 2009 et cartographiques sur le logiciel Surfer 9. Ces traitements ont permis d'esquisser la physionomie des changements climatiques et des risques hydrologiques dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Le traitement des résultats de simulation a nécessité l'utilisation du logiciel GrADS (Grid Analysis and Display System) qui est un outil d'analyse des données des sciences de la Terre.

1.2.3.2. Vérification de la simulation climatique par le modèle PRECIS

La robustesse du modèle PRECIS sur ECHAM4, scénario A2 à simuler le climat du bassin côtier du Bénin a été appréciée en comparant les précipitations et les températures modélisées à celles observées. A cette fin, les critères d'erreurs relatives et d'anomalies annuelles ont été retenus. L'erreur relative entre les variables calculées (X_{mcr}) par le modèle et observées (X_{obs}) au niveau de chaque station ou chaque point de grille est calculée par la formule :

$$Er = \frac{X_{mcr} - X_{obs}}{X_{obs}}$$

L'erreur relative moyenne mensuelle à une station i donnée est déterminée à partir de l'expression :

$$\overline{Eri}(i) = \frac{1}{Ni * nban} \sum_{1}^{nban} \left[\sum_{1}^{Ni} \left| Er(i, mois, an) \right| \right]$$

avec Ni, nombre de mois que compte la saison pluvieuse s'il s'agit de la variable pluie et $nban$, le nombre d'années considérées.

A l'échelle annuelle, cette équation prend la forme :

$$\overline{Er}(i) = \frac{1}{nban} \sum_{1}^{nban} \left| REr(i, an) \right|$$

Selon Ardoin Bardin (2004), ces erreurs relatives moyennes, par définition, sont toutes positives et n'indiquent donc pas si le modèle climatique retenu surestime ou sous-estime les précipitations. La meilleure performance et la convergence du modèle PRECIS ont été également appréciées par rapport à la courbe de validation et du test dont l'équation $y = x$ permet de juger, en fonction de la marge d'erreur, de la validité des résultats de la simulation. Ce test est réalisé par analyse de la corrélation entre les données simulées et observées sur la période 1961-1990 au seuil d'erreur de 0,05 et par détermination de la matrice de Spearman.

1.2.3.3. Projections des précipitations et de la température moyenne à l'horizon 2070-2089

Les changements climatiques sont projetés en calculant la différence (D_{horiz}) entre les données simulées sur les périodes de référence ($\overline{X}_{ref}$), 1961-1990 et celles futures ($\overline{X}_{horiz}$), 2070-2089 et la variation (Δ_{horiz}) exprimée en pourcentage pour la pluviométrie et en degré Celsius pour les températures, calculées selon les formules :

$$D_{horir} = \overline{X}_{horiz} - \overline{X}_{ref} \qquad \text{et} \qquad \Delta_{horiz} = \left(\frac{\overline{X}_{horiz} - \overline{X}_{ref}}{\overline{X}_{ref}} \right)$$

La variation correspond à l'augmentation ou à la diminution relative des précipitations ou de la température moyenne dans le climat futur comparé à la moyenne de la période de référence. Ces données générées sont cartographiées pour permettre une bonne spatialisation des indicateurs de changements climatiques dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin et l'appréciation de leurs impacts sur les hydrosystèmes surtout souterrains.

1.2.4. Sensibilité des systèmes d'eaux souterraines à la dynamique du climat

L'impact de l'évolution du climat sur les ressources en eaux souterraines a été apprécié à l'aide de plusieurs méthodes complémentaires d'estimation de la recharge des réservoirs souterrains. La connaissance de cette recharge, même à un ordre de grandeur assez grossier près, est très utile pour la gestion des aquifères réalimentés par les pluies et pour une modélisation précise de leur comportement hydrodynamique (Milville, 1985).

1.2.4.1. Analyse de l'impact direct du climat sur les eaux souterraines

Le régime piézométrique (Np) est analysé par le modèle polynomiale d'ordre 3 et la méthode de régression multiple. La loi polynomiale de degré 3 semble mieux expliquer la saisonnalité de la réponse piézométrique des aquifères à nappe libre du bassin sédimentaire côtier du Bénin à la variabilité climatique.

Son expression : $Np = a1+b1x+c1x^2+d1x^3$ est illustrée par la figure 1.2.

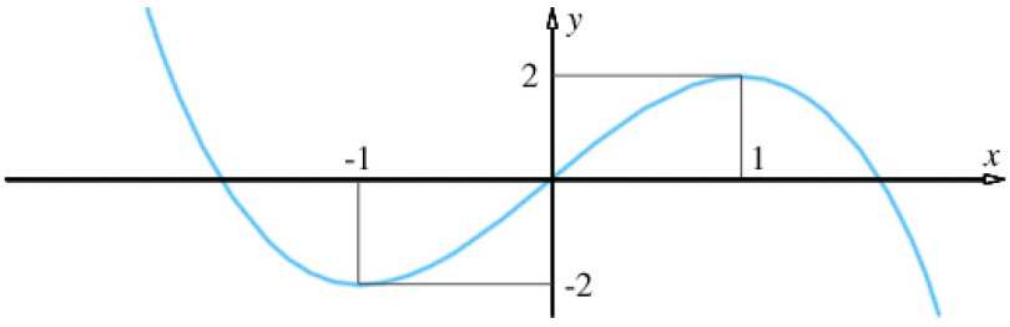


Figure 1.2 : Fonction polynomiale du troisième degré adaptée au régime piézométrique

Cette fonction, appliquée à la fluctuation des niveaux piézométriques, atteint son maximum correspondant à l'optimum en saison pluvieuse, ou son minimum, le niveau de basses eaux en début de la grande saison pluvieuse. La tendance polynomiale met en évidence l'impact de la

variabilité climatique sur les eaux souterraines. En outre, le poids de la pluviométrie (P), de la température (T) et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) est déterminé par la méthode de régression multiple. Cette régression est exprimée par la formule :

$$Np = a+Px+Tx^2 +ETPx^3$$

avec : a, constante

De plus, la corrélation non paramétrique a été utilisée pour apprécier le poids de chaque paramètre climatique dans la fluctuation des niveaux piézométriques. Le cycle de fluctuation des niveaux piézométriques illustre à divers niveaux l'influence des facteurs climatiques et selon le cas des autres composantes environnementales dans la dynamique des eaux souterraines (figure 1.3).

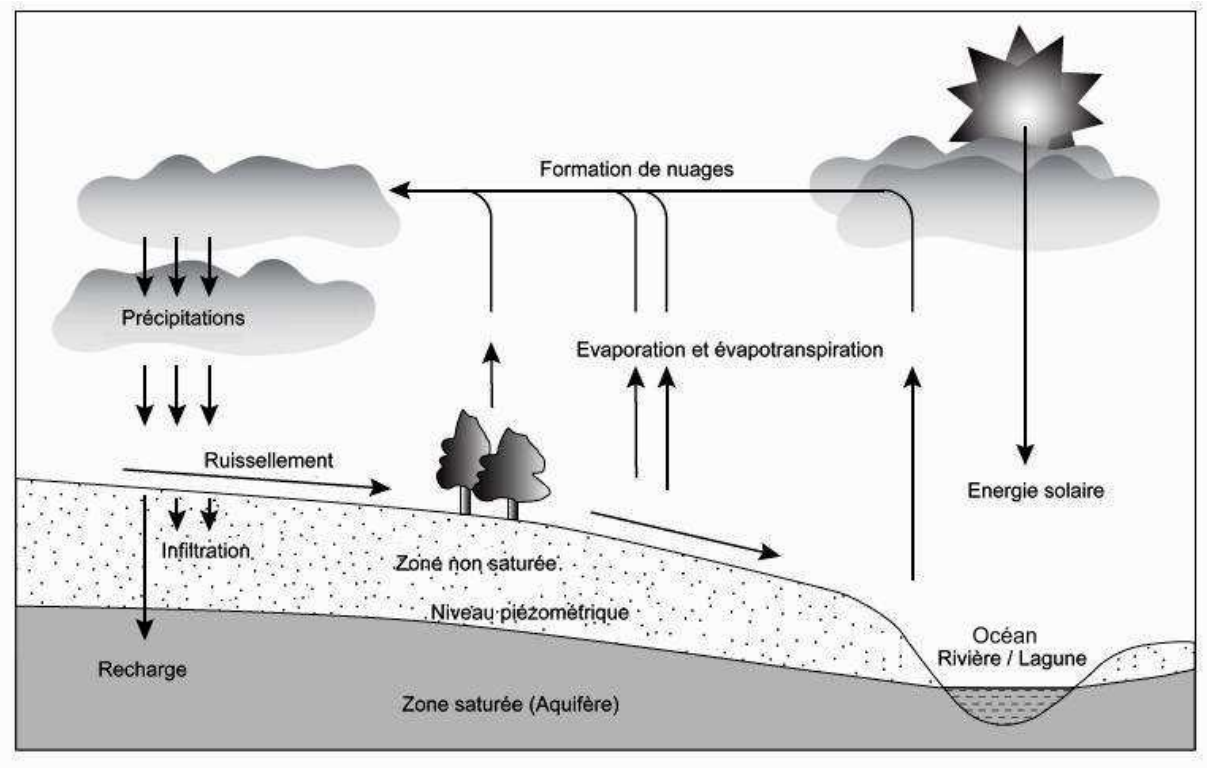


Figure 1.3 : Cycle de recharge des nappes d'eaux souterraines

Source : www.brs.gov.au/shop

Au regard des éléments qui interagissent dans ce cycle, l'analyse de la recharge des nappes d'eaux souterraines est faite dans cette étude par trois méthodes complémentaires. Il s'agit de la méthode des fluctuations de la surface piézométrique (Water-Table Fluctuation (WTF), du bilan d'eau de Thornthwaite-Mather et de celle des hydrogrammes des fleuves Ouémé, Mono, Couffo et de la rivière Zou.

1.2.4.2. Méthode des fluctuations piézométriques ou Water-Table Fluctuation (WTF) method

La méthode WTF est basée sur le principe que toute remontée du niveau piézométrique, dans les aquifères à nappe libre et superficielle, est due à un apport additionnel d'eau (Scanlon *et al.*, 2002). Cette recharge, bien qu'attribué à l'infiltration verticale des eaux pluviales, peut aussi provenir de la drainance verticale à partir d'un autre système aquifère sous-jacent. Cette méthode de dynamique du toit de la nappe sert à évaluer la recharge des aquifères par analyse des fluctuations de niveau d'eau dans des puits, les forages et les piézomètres. L'équation de la recharge s'écrit :

$$R(t_j) = S_y * \Delta H(t_j)$$

où $R(t_j)$ (cm ou m) est la recharge enregistrée entre les temps t_0 et t_j, S_y la porosité efficace ou totale pour les aquifères à nappe libre et coefficient d'emmagasinement pour les aquifères confinés ou à nappe captive et $\Delta H(t_j)$ en cm ou en m est la charge hydraulique pendant la période de recharge. $\Delta H(t_j)$ est estimée par deux méthodes. L'approche graphique consiste en une extrapolation manuelle de la récession antécédente h_0 à la base du niveau piézométrique optimal h_j. Ainsi, $\Delta H(t_j)$ correspond à la différence entre les niveaux piézométriques $h(t_j)$ et $h(t_0)$ extrapolé (figure 1.4).

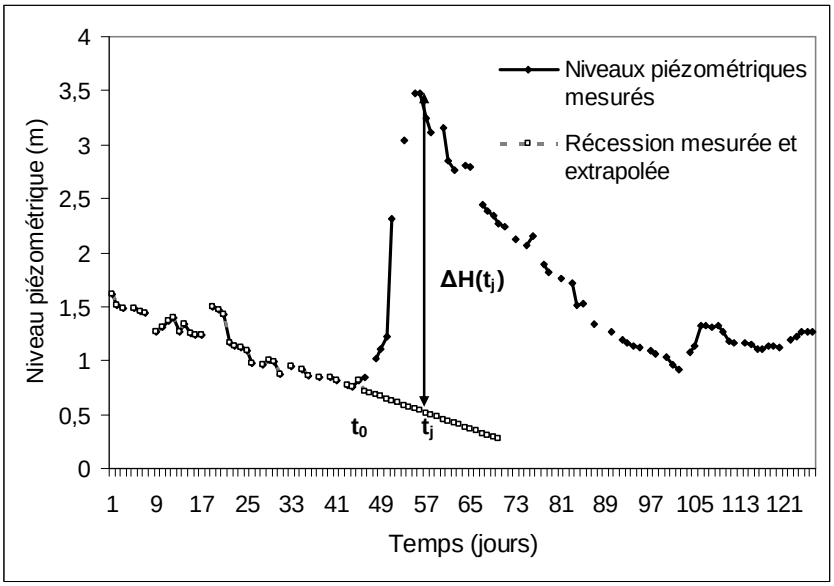


Figure 1.4 : Méthode graphique de détermination de la charge hydraulique

Quant à la méthode statistique de la courbe principale de récession (Master Recession Curve (MRC) développée par Delin *et al.*, (2007), elle consiste en une procédure automatique de calcul de $\Delta H(t_j)$ à partir des fluctuations journalières de niveau piézométrique. Elle nécessite

spécifiquement le programme FALL (Rutledge, 1993) et le logiciel d'analyse statistique S-Plus® non utilisés dans cette étude.

La méthode WTF, en raison de sa simplicité, de sa facilité d'utilisation, de la disponibilité des données piézométriques et de son application à n'importe quel puits ou forage peu profond, a été adaptée à plusieurs études (Hall & Risser, 1993 ; Rai *et al.*, 1994 ; Boukari, 1998 ; Healy and Cook, 2002 ; Scanlon *et al.*, 2002 ; Crosbie *et al.*, 2005 ; Coes *et al.*, 2007 ; Delin *et al.*, 2007 ; Faye *et al.*, 2009 ; Totin *et al.*, 2009 ; Totin, 2010). Elle n'exige aucune prétention sur les mécanismes de flux d'eau dans la zone non saturée et par conséquent, la présence des chemins préférentiels d'écoulement ne limite pas son utilisation. Mais, Healy and Cook (2002) estiment que cette approche est une simplification brute d'un phénomène très complexe, à savoir, le mouvement de l'eau vers et de l'aquifère. Dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin, cette complexité est fonction de la dynamique de l'utilisation des terres, fortement influencés par l'occupation humaine et ses corollaires.

La méthode WTF est appliquée dans cette étude aux données piézométriques de FR4-2 de PK-14, FE1 de Cococodji, FR5-2 de Dècoungbé dans la plaine côtière, F2 de Togoudo, SH de Agonkame-Togoudo et F2PNUD de Lansakomè dans le champ de captage de Godomey sur le plateau d'Allada. Le bassin sédimentaire côtier du Bénin présente une composition lithologique très variée de la plaine côtière aux plateaux. A cet effet, les valeurs de la S_y, correspondant à la porosité utile (Boukari, 1998), effective ou coefficient de drainage (OMM, 2006) ou efficace (Ababou, 2004) sont choisies en se basant sur les travaux de GIGG (1987), Turkpak (1991), Boukari (2002), Alassane (2004) mais aussi sur celui de Johnson (1967). Cet auteur présente dans le tableau 1.I une synthèse de 17 études menées sur la porosité utile, déterminée par différentes techniques.

Tableau 1.I : Synthèse statistique de 17 études sur la porosité utile

Texture	Porosité efficace moyenne	Coefficient de variation (%)	Porosité efficace minimum	Porosité efficace maximum	Nombre de détermination
Argile	0,02	59	0,00	0,05	15
Limon	0,08	60	0,03	0,19	16
Sablo argileux	0,07	44	0,03	0,12	12
Sable fin	0,21	32	0,10	0,28	17
Sable moyen	0,26	18	0,15	0,32	17
Sable grossier	0,27	18	0,20	0,35	17
Sable graveleux	0,25	21	0,20	035	15
Gravier fin	0,25	18	0,21	0,35	17
Gravier moyen	0,23	14	0,13	0,26	14
Gravier grossier	0,22	20	0,12	0,26	13

Source : Johnson, 1967, cité par Healy et Cook, 2002

Au regard des valeurs de texture présentées dans ce tableau, les porosités effectives S_y considérées pour l'étude sur le bassin sédimentaire côtier du Bénin sont égales à 0,26 (texture sable moyen) pour la plaine littorale et 0,07 (texture sablo-argileuse) pour le plateau d'Allada. Les piézomètres choisis dans et autour du champ de captage de Godomey sont supposés permettre d'avoir une idée du fonctionnement hydroclimatique souterrain du plateau d'Allada au sud-est. Mais, le système de pompage intensif risque d'influencer la variation de la charge hydraulique et de plus le réseau piézométrique ne couvre pas toute la région d'étude. Pour parer à cette insuffisance, le bilan hydrique de Thornthwaite-Mather a été calculé pour estimer les quantités d'eau pluviale disponible et pouvant contribuer à la recharge des aquifères dans les différents champs pluviométriques du bassin côtier du Bénin.

1.2.4.3. Estimation de la recharge des aquifères par la méthode du bilan d'eau de Thornthwaite-Mather modifiée

Les mesures de fluctuations des niveaux piézométriques sont indicatrices de la recharge ''réelle'' tandis que la méthode de Thornthwaite (1948) permet d'estimer la recharge à partir des termes du bilan d'eau mensuel (de Marsily, 1986). Elle consiste d'abord à calculer pour chaque mois une évapotranspiration de référence (ETP_0) pour une durée théorique d'ensoleillement, une température et une latitude données.

$$ETP_0 = 1{,}6\left(\frac{10}{I}\right)^a .T^a . f$$

avec :

T : température moyenne mensuelle (°C) ;

I : indice thermique annuel, défini comme la somme des indices mensuels i avec $i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514}$;

$a = 0{,}49 + 0{,}178I - 7{,}71.10^{-5} I^2 + 6{,}75.10^{-7} I^3$;

f : facteur de correction avec $f = N.\rho$;

N : durée astronomique du jour pendant le mois considéré (h/jr) ;

ρ : paramètre dépendant du nombre de jours par mois (= 0,0778 pour mois de 28 jours ; 0,0806 pour un mois de 29 jours ; 0,0833 pour un mois de 30 jours et 0,0861 pour un mois de 31 jours).

En milieu tropical et de climat subéquatorial, le calcul de l'ETP ne peut dépendre seulement de la variation des températures, mais de l'ensemble des paramètres climatiques. Ainsi, l'ETP-Thornthwaite a été remplacée par l'ETP-Penman-Monteith calculée à l'aide du logiciel ET_0, version 3.1 de la FAO (2009) pour estimer la recharge des aquifères. La procédure de calcul de ET_0 décrite par Allen *et al.* (1998) est :

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)}$$

avec :

ET_o : l'évapotranspiration de référence (mm/jour) ;

R_n : le rayonnement net à la surface (MJ/m²/jour) ;

G : la densité de flux de chaleur du sol (MJ/m²/jour) ;

T : la température moyenne quotidienne de l'air à 2 m de hauteur (°C) ;

u_2 : la vitesse du vent à 2 m de hauteur (m/s) ;

e_s : la pression de vapeur saturante (kPa) ;

e_a : la pression de vapeur réelle (kPa) ;

$e_s - e_a$: le déficit de pression de vapeur saturante (kPa) ;

Δ : la pente de la courbe de pression de vapeur (kPa/°C) ;

γ : la constante psychométrique (kPa/°C).

Les variables climatiques d'entrée utilisées par le logiciel ET_0 et l'équation précédente sont le rayonnement solaire, la température de l'air, l'humidité et la vitesse du vent. Elles sont recueillies au niveau des stations synoptiques de Cotonou et de Bohicon et celle climatologique de Niaouli respectivement au sud, au nord et au centre du bassin sédimentaire côtier du Bénin, pour alimenter le logiciel. Ces inputs permettent au logiciel ET_0 de générer les autres paramètres en fonction des coordonnées géographiques (latitude et longitude) et de l'altitude de chacune des stations considérées. L'ETP à l'échelle mensuelle est obtenue en multipliant les valeurs journalières d'ET_0 par le nombre de jours que compte chaque mois.

L'ETP ainsi calculée a servi en fonction des précipitations (P) et de la réserve utile du sol (capacité maximale, RUmax) à déterminer l'évapotranspiration réelle (ETR) et les autres paramètres du bilan hydrologique (Tachet, 1992 ; Maliki, 1993 ; Tsutsumi *et al.*, 2004 ; Ogolo, 2007 ; Ngounou *et al.*, 2007 ; Taheri Tizro, 2007). Selon Malou *et al.*, (1991), la réserve utile du sol (RU) représente le seuil de saturation du sol au-delà duquel tout excédent

de pluie est disponible pour l'écoulement et la percolation. Ce seuil est fixé à 100 mm d'eau dans le modèle de bilan d'eau de Thornthwaite. Mais ceux déterminés par le Centre National d'Agro-pédologie (1990) et résumés dans le tableau 1.II ont été également appliqués à l'échelle stationnelle dans cette étude.

Tableau 1.II : Réserves utiles des sols dans quelques localités du bassin côtier du Bénin

Régions étudiées	**Réserves utiles (mm)**			**Sols**
	0-60 cm	0-100 cm	0-150 cm	
Sékou (Allada)	139,29	278,5	488,55	Sols ferrallitiques
Niaouli	77,11	154,44	219,32	Sols ferrallitiques
Sèhouè	151,95	188,97	352,32	Vertisols
Agonkanmey	65,18	198,59	329,81	Sols ferrallitiques
Lokossa	69,62	257,79	431,68	Sols ferrallitiques
Aplahoué	56,64	105,6	253	Sols ferrugineux tropicaux
Comè	59,04	115,33	243,94	Sols peu évolués peu hydromorphes
	115,11	260,77	362,83	Sols peu évolués hydromorphes
Dévé	65,83	131,83	262,1	Sols alluviaux
	59,04	?	243,94	Sols peu évolués peu hydromorphes
	56,64	357,75	235	Sols ferrugineux tropicaux
	206,95	?	555,96	Vertisols
Kétou et Dogo	84,72	265,76	376,75	Sols ferrugineux tropicaux
	53,25	166,72	368,21	Sols ferrallitiques
Sakété Yoko	41,34 - 172,29	223,25	452,88	Sols ferrallitiques
Pobè	48,23 - 137,03	156,22	214,93	Sols ferrallitiques
	162,86	-	300,95	Sols ferrugineux tropicaux
Abomey	63,5	134,9	200,9	Sols ferrugineux tropicaux

Source : Centre National d'Agro-pédologie (CENAP), 1990

Les réserves utiles varient de 38 à 207 mm entre 0 et 0,6 m, 105 à 358 mm entre 0 et 1 m et 215 à 556 mm entre 0 et 1,5 m selon les types de sol (ferrallitiques, ferrugineux, alluviaux, vertisols, hydromorphes, etc.). En réalité, l'évapotranspiration potentielle ETP n'égale l'ETR que si la réserve en eau des sols est satisfaite par les apports pluviométriques.

Au regard des termes calculés, le modèle de Thornthwaite permet d'obtenir le surplus d'eau précipitée et pouvant ruisseler ou s'infiltrer pour alimenter les nappes d'eau souterraine. Il correspond à la recharge (Ngounou Ngatcha, 2007) et est donné par l'équation de budget de l'eau :

$$P - ETR \pm \Delta S - R = 0 \text{ où } R = P - ETR \pm \Delta S$$

avec : R , recharge ; ΔS , variation du stock d'eau dans le sol.

Ce surplus d'eau, fraction de pluie excédant l'ETR et qui n'est pas stocké dans le sol, contribue à réalimenter les aquifères en absence de ruissellement de surface (Xu and Chen, 2005). Cette recharge approximative et potentielle est fonction de la pluie. En fait, l'infiltration n'est pas assimilée directement à la recharge de la nappe. Cette dernière est le flux de percolation d'eau qui parvient à la nappe et qui représente ainsi un apport additionnel à sa réserve (Simmers, 1988 ; Nazoumou, 2002). La recharge naturelle des aquifères dépend non seulement de l'infiltration et de la percolation des lames d'eau précipitée (Kumar, 1993 ; Wigmosta & Guensch, 2005), mais également de l'évapotranspiration réelle (Rutulis, 1989). Pour Sophocleous (1991) elle est fonction des conditions météorologiques, des types de sols, de la végétation, des caractéristiques physiographiques et des propriétés des matériaux géologiques traversés par l'eau. Ces paramètres sont très variés dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Ainsi, la comparaison de la recharge calculée en fonction des valeurs de RU à saturation (RU = 100 mm et RU > 100 mm) a permis d'apprécier leur influence.

La méthode de Thornthwaite-Mather est l'une des plus appropriées au calcul détaillé des budgets mensuels et annuels d'eau (Scozzafava et Tallini, 2001). Elle est un outil simple, fréquemment appliqué à l'estimation des excédents d'eau qui ne sont pas stockés dans le profil de sol (Zimmermann, 2006) mais alimentent les nappes souterraines. Il importe de retenir que l'évaluation de la pluie efficace ne permet pas une estimation précise de la recharge (Ngounou *et al.*, 2007). Elle donne un excès d'eau (recharge) et ne tient pas compte de la capacité de vidange de la couche aquifère (Scozzafava & Tallini, 2001). De plus, la méthode de Thornthwaite ne renseigne pas sur le temps de la réponse de la nappe entre le début de la pluie efficace et la réaction de la surface piézométrique et surestime les possibilités d'utilisation des stocks d'eau dans les sols par l'évapotranspiration. Pour Gaye, (1990), l'imprécision de la recharge calculée ne permet pas l'utilisation de ces résultats pour la planification de l'exploitation des eaux souterraines. Ainsi, se justifie la modification du fonctionnement de ce modèle et il importe également d'utiliser d'autres méthodes pour évaluer la recharge directe des aquifères à nappes libres superficielles.

L'analyse de la dynamique des ressources en eaux souterraines a porté également sur l'estimation des volumes d'eau mobilisés par les aquifères de versants des bassins hydrologiques à partir de la courbe de tarissement des masses d'eau courante de surface.

1.2.4.4. Estimation des volumes d'eau des nappes de versant par la méthode de l'hydrogramme

La méthode des hydrogrammes, d'estimation de la recharge d'une nappe d'eau souterraine à partir des courbes de débits, a été développée par Fetter (1988), Korkmaz (1988) et appliquée au bassin de lagune de Djonou par Boukari (1998), Totin *et al.* (2009). Elle est appliquée dans cette étude aux bassins fluviaux du Couffo, de l'Ouémé, du Mono et du Zou pour estimer le tarissement et la recharge des aquifères de versant. L'équation de la courbe de récession relative à l'écoulement de base, c'est-à-dire celui qui est lié à la vidange des bassins hydrogéologiques drainés par les cours d'eau, répond à une loi exponentielle simple de la forme :

$$Q_t = Q_0 e^{-kt}$$

où : Q_t : débit à l'instant t donné ; Q_0 : débit initial (au début du tarissement) et k : coefficient de tarissement de Maillet à dimension inverse d'un temps (j^{-1}).

Selon Olivry (1997), il est difficile d'évaluer le coefficient de tarissement en région tropicale en raison d'une saison sèche trop courte. Mais, dans des études similaires en Côte d'Ivoire, Savane *et al.* (2001) et Goula *et al.* (2006 et 2009) ont utilisé la résolution dichotomique, une nouvelle méthode développée par Coulibaly (1997) pour parer cette difficulté. L'équation est :

$$\frac{e^{-kt}}{k} + \frac{V}{Q_0} - \frac{1}{k} = 0$$

avec V le volume écoulé à chaque instant (m^3).

Cette méthode est le modèle de Maillet amélioré (Savane *et al.*, 2003) pour l'estimation du coefficient de tarissement et des volumes d'eau mobilisés (V_{em}) par les aquifères, quel que soit la longueur du tarissement. Ainsi, en régime non influencé, marqué par un déficit pluviométrique (Castany, 1982), la courbe annuelle de tarissement traduit la vidange successive des réservoirs souterrains, et la quantité d'eau récupérée à la station de jaugeage correspond aux volumes dynamiques mobilisés par l'ensemble des aquifères du bassin (El-Ouafi, 1993).

Le coefficient de tarissement, dépendant des caractéristiques physiques et géométriques de l'aquifère (Olivry, 1996), le volume total d'eau mobilisé peut être obtenu par l'intégration sur l'intervalle $[0, +\infty[$ entre les dates de début et de fin de tarissement :

$$V_{em} = \int_0^{+\infty} Q_0 e^{-kt} dt = \frac{Q_0}{k} .86400$$

Le coefficient de tarissement retenu dans cette étude pour l'estimation du volume total d'eau stockée dans le système aquifère de versant est celui du mois de février ou mars correspondant à celui de l'écoulement de base. La loi de Maillet ayant pour modèle un seul réservoir, l'ensemble de l'aquifère est traité comme un réservoir ou étant comme la somme de plusieurs réservoirs dont les stations d'Athiémé, Lanta, Domè et Bonou constituent les différents exutoires.

Le bilan hydrologique (Le Barbé *et al.*, 1993 ; Vissin, 2007 ; Amoussou, 2010) a permis d'estimer l'infiltration dans les différents sous-bassins à travers l'équation :

$$P = ETR + L + I + (S_1 - S_0)$$

avec L = écoulement en mm ; I = infiltration en mm et $S_1 - S_0$ = variation du stock d'eau présent dans le bassin en mm pendant une période donnée.

Cette estimation représente le solde du bilan hydrologique, mais avec une certaine imprécision des autres termes du bilan et, par conséquent, une imprécision de l'infiltration déterminée. Par conséquent, l'infiltration n'est assimilée directement à la recharge de la nappe. Cette dernière est le flux de percolation d'eau qui parvient à la nappe et qui représente ainsi un apport additionnel à sa réserve (Simmers, 1988 ; Nazoumou, 2002). L'analyse du paramètre infiltration peut permettre de suivre l'évolution de la recharge de la nappe dans le bassin-versant (Amoussou, 2010).

L'estimation du taux de recharge des aquifères est souvent nécessaire pour modéliser les eaux souterraines, étudier le bilan d'eau, les flux chimiques, la technique d'approvisionnement en eau, et d'autres caractéristiques de la ressource d'eau (Bonta and Müller, 1999). Ce taux est obtenu par la formule :

$$Cr = \frac{R}{P}.100$$

où R est la recharge et P la pluviométrie (mm)

Il permet d'appréhender l'impact d'autres facteurs (évapotranspiration, modification des formations de surface, la nature du substratum géologique en place, la récupération des eaux pluviales, etc.) sur les échanges hydriques et la qualité des eaux par les interactions avec la variabilité climatique.

1.2.4.5. Analyse de la dynamique de la qualité des eaux souterraines

L'étude de la dynamique saisonnière de la qualité des eaux souterraines a été faite sur la base de la variation des concentrations des paramètres physico-chimiques et bactériologiques.

1.2.4.5.1. Sites et prélèvements d'échantillons d'eaux souterraines

Les échantillons d'eau ont été prélevés, suivant les protocoles décrits par Claasen (1982), Barcelona *et al.* (1985), Hounslow (1995), en saison pluvieuse (octobre) et en saison sèche (janvier) respectivement au niveau de 11 puits (de faible et de grande profondeurs), de 08 forages (pédestres et manuels) et d'une source. Les points de prélèvements, géoréférencés à l'aide du Global Positionning System (GPS) sont répartis dans le bassin comme l'illustre la figure 1.5.

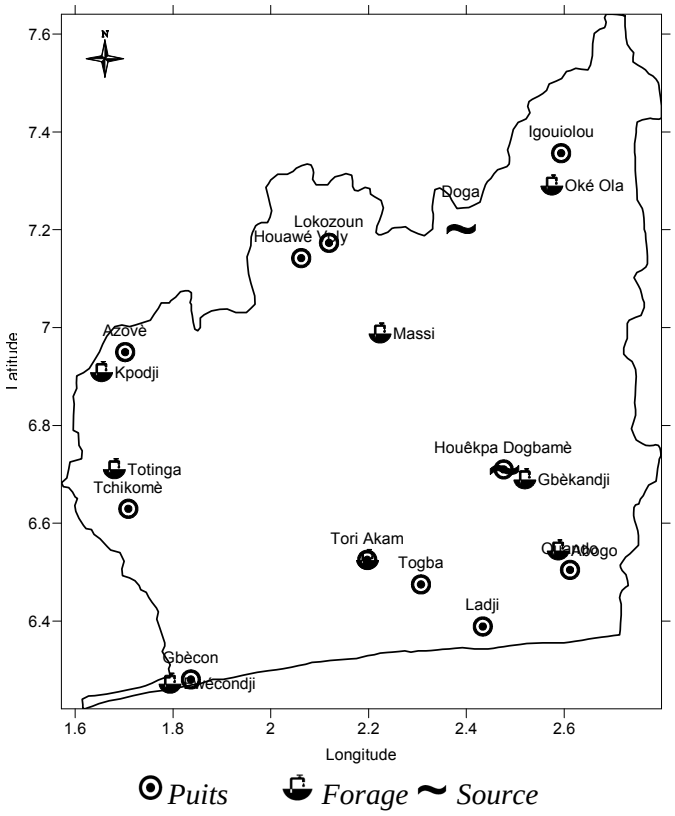


Figure 1.5 : Sites de prélèvement d'échantillon et d'analyse in situ d'eau dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin

Les sites de prélèvement d'échantillons d'eau sont choisis en tenant compte des paramètres morpho-structuraux (plateau, plaine, dépression, etc.) ; de la saisonnalité ou non des fluctuations des niveaux piézométriques, de l'accessibilité et de la pression humaine d'approvisionnement en eau. Le type de point d'eau a été aussi un critère important dans la

mesure où les puits de faible profondeur seraient plus vulnérables à la variabilité climatique et aux sources de pollution que les puits profonds et les forages, etc.

Les échantillons d'eau ont été prélevés, avec toutes les précautions d'asepsie nécessaires, dans des flacons stérilisés de 100 ml pour l'analyse physico-chimique et de 500 ml pour la détection et le dénombrement des germes bactériologiques. Ils sont ensuite conservés à une température de 4 °C. Ainsi, les éléments recherchés sont maintenus en état par usage de matériels appropriés (glacières chargées en permanence de la glace ou de stabilisateurs) puis envoyés au laboratoire.

1.2.4.5.2. Analyses hydrochimiques et bactériologiques

L'analyse physico-chimique a été réalisée au Laboratoire d'Hydrologie Appliquée de l'Université d'Abomey-Calavi. La conductivité, le potentiel Hydrogène (pH), la température, la salinité, les solides totaux dissous (TDS) et l'oxygène dissous ont été directement mesurés sur le terrain à l'aide du Conductimètre WTW 340i et du pH/Oximètre WTW 340i (photo 1.1). Cette précaution se justifie par le fait que ces paramètres varient très rapidement à l'échelle du temps et que le transport des échantillons pourrait altérer leur valeur initiale.



a b

Cliché : Orékan V., octobre 2009

Photo 1.1. Prélèvement d'échantillons d'eau (a) et analyse in situ au forage artésien de Totinga à Ouèdèmè Adja (Lokossa) (b)

Les valeurs de la couleur, de la turbidité et des matières en suspension, ont été déterminées au laboratoire avec le Spectrophotomètre HACH DR 890. Les ions calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^{+}), potassium (K^{+}), ammonium (NH_4^{+}), bicarbonates (HCO_3^{-}), fluorures (F^{-}), chlorure (Cl^{-}), sulfate (SO_4^{2-}), nitrates (NO_3^{-}), nitrites (NO_2^{-}), orthophosphates (PO_4^{3-}),

carbonates (CO_3^{2-}), l'oxydabilité ($KMnO_4$) (O_2) ont été détectés et leur teneur quantifiée par dosage à l'aide du Chromatographe ionique DIONEX ICS 1000 en blanc (photo 1.2.).



Cliché : Totin V.S.H., octobre 2009

Photo 1.2. Dispositif d'analyse physico-chimique (Chromatographe ionique DIONEX ICS 1000 en blanc) utilisé

La procédure d'analyse des anions et des cations a consisté à injecter un volume de 1 ml de chaque échantillon d'eau de puits, de forage ou de source dans le chromatographe préalablement étalonné. Il affiche à l'écran de lecture les éléments minéraux présents de même que leurs concentrations en mg/l après une séquence de 15 mn.

L'analyse bactériologique a porté sur la recherche de germes indicateurs de pollution microbiologiques tels que les germes banals, coliformes totaux, coliformes thermotolérants (*Escherichia coli*), les streptocoques fécaux et les Clostridium sulfito-réducteurs. Les analyses sont effectuées au Laboratoire de la SONEB suivant le protocole décrit dans le tableau 1.II.

Les résultats sont exprimés en nombre d'unités formant colonies (UFC par 100 ml pour les coliformes à 37 °C et 44 °C, les coliformes thermotolérants et les streptocoques fécaux. La qualité des eaux est appréciée en référant ces résultats (physico-chimiques et microbiologiques) aux normes de la potabilité de l'OMS (WHO, 2008) pour les eaux de boisson. Ces normes correspondent à la Valeur Maximale Admise (VMA), utilisée pour les résultats d'analyse bactériologique et à la Concentration Maximale Admise (CMA) pour les paramètres physico-chimiques.

Tableau 1.III : Protocole d'analyse bactériologique des eaux de puits, de forages et de sources prélevés dans le bassin côtier du Bénin

Milieu	Mode d'utilisation	Température d'incubation et temps	Colonies identifiées
Gélose nutritive pour le dénombrement des **germes banals** ou de la flore totale	- Mélange soigneux et chauffage doux avec agitation fréquente - Ebullition pendant une à deux minutes - Répartition et stérilisation à l'autoclave à 120°C pendant 15 minutes. La gélose est coulée par incorporation.	37°C pendant 24 à 48 heures	Toutes les colonies sans distinction de forme ni de couleur
Bouillon de Mac Conkey pour la recherche présomptive des **Coliformes** dans l'eau et le lait	- Homogénéiser le milieu puis répartir dans des tubes à essai munis d'une petite cloche à gaz (tube de Durham) à raison de 10 ml pour l'examen de prélèvement de 1 ml ou moins - Stériliser à l'autoclave à 120°C	37°C pendant 24 à 48 heures pour les Coliformes totaux et 44°C pour les thermo tolérants	Virage jaune avec production de gaz due à la fermentation du lactose
SLANETZ et BARTLEY pour les **Streptocoques**	- Dissolution du milieu sec dans l'eau à ébullition et chauffage pendant 5 minutes. - Refroidissement entre 45 et 50 °C. - Répartition dans des boîtes de 55 mm de diamètre pour solidification. - Réalisation d'une filtration et application de la membrane sur milieu sélectif. Sans autoclaver.	36 ± 2°C pendant 44 ± 4 heures	Colonies convexes rouges, roses ou marron, avec ou sans auréole blanche
EMB (Milieu Eosine de Méthylène) pour les **Entérobactéries** Gram négatif	- Mise de 36 grammes de milieu sec dans un litre d'eau distillée et mélanger jusqu'à homogénéité de la suspension ; chauffage en agitation fréquente et en ébullition pendant 1 à 2 minutes ; - Répartition puis stérilisation à 120°C pendant 15 minutes - Refroidissement aux environs de 45-50°C et agitation douce pour obtention d'une bonne répartition puis coulage en boîtes de Pétri.	44°C pendant 24 à 48 heures	Colonies bleu foncé présentant un reflet métallique pour les *Echerichia coli*
TSC (Tryptone-Sulfite-Cyclosérine) pour les **sulfitoréducteurs**	- Mise de 42 grammes de poudre dans un litre d'eau distillée, attente de 5 minutes, puis mélange jusqu'à obtention d'une suspension homogène - Chauffage lent avec agitation fréquente, puis ébullition jusqu'à dissolution complète - Ajustement du pH à 7,6 - Répartition en tubes ou en flacons et stérilisation à l'autoclave à 121 °C pendant 15 minutes. Ce milieu a été conservé à -2 à 8 °C durant un maximum de 15 jours.	46°C pendant 24 h en anaérobiose	Colonies noires à halo noir

Source : *Laboratoire d'Analyse des Eaux de la SONEB, janvier 2010*

De plus, des diagrammes triangulaires de Piper ont été élaborés à partir des concentrations des ions majeurs (cations et anions) pour caractériser les faciès hydrochimiques des eaux. La détermination de la qualité des analyses chimiques a été faite par calcul de la balance ionique (BI) :

$$BI(\%) = \frac{\sum Cations - \sum Anions}{\sum cations + \sum anions}$$

Avec $\sum Cations = Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}$; $\sum Anions = Cl^- + HCO_3^- + CO_3^- + SO_4^{2-}$

Les analyses ayant une balance ionique ±5 % sont considérées comme bonnes (Freeze and Cherry, 1979 ; Voudouris *et al.*, 1997 ; Casanova *et al.*, 2004 ; Kortatsi, 2006 et 2007 ; Tay & Kortatsi, 2007). Mais, l'erreur admise pour des eaux de faibles concentrations peut être inférieure à 10 % comme dans les travaux de Orange (1992), Gourcy (1994), Picouet (2004), etc. Ba (2005) attribue les BI supérieurs à 10 % à la limite des eaux douces et ceux supérieurs à 25 % aux salées fortement diluées mais aussi contenant des teneurs de nitrates élevées. Les faciès hydrochimiques ont permis de valider les types d'eau mis en évidence dans la région d'étude.

La variation spatio-temporelle de la disponibilité des ressources en eaux souterraines n'est pas seulement influencée par le climat mais aussi par d'autres facteurs environnementaux dont le plus important constitue les changements des états de surface.

1.3. Evaluation de la dynamique des états de surface

La compréhension des impacts de changement des états de surface sur le cycle hydrologique est nécessaire pour la gestion optimale des ressources naturelles (Scanlon *et al.*, 2005) dont les eaux souterraines. Pour Vorosmarty *et al.* (2004), l'impact global de la modification des états de surface peut surpasser celui du changement récent de climat. Dès lors, il importe de connaître les changements qui affectent les composantes de surface du bassin sédimentaire côtier afin de déterminer les effets combinés sur les aires de recharge et les eaux souterraines.

Les états de surface sont décrits à partir des observations de terrain, de la procédure cartographique et de l'analyse diachronique de l'occupation et de l'utilisation des terres dans le bassin.

Les unités d'occupation du sol sont supposées connaître une évolution de leur superficie entre 1973 et 2005. Les états de l'occupation du sol en ces deux années ont permis d'apprécier la variation de la pression humaine sur les hydrosystèmes du bassin côtier du Bénin. Deux cartes sont réalisées à partir des photographies aériennes de la mission Kenting de 1973 à l'échelle de 1/50 000e et des images LANDSAT MSS 1973 et 7 ETM7+ 2005 de résolution 30 m à l'échelle de 1/1 000 000e. Le calage, le géoréférencement et le traitement des images ont été faits au Centre National de Télédétection (CENATEL) et au Laboratoire de Biogéographie de l'UAC à l'aide du logiciel Arc View.

L'exécution des travaux de vérification sur le terrain a été précédée d'une sélection des images satellitaires LANDSAT MSS 1973 et LANDSAT ETM7+ 2005, soumises à des corrections géométriques, la classification et à la numérisation. En raison des connaissances préalables et expertes de la région d'étude, et se fondant sur les pratiques dans les cas d'espèces (Jensen, 1996 ; Lillesand et Kiefer, 2000), la méthode de classification a été exécutée sous ERDAS IMAGINE puis complétée par une interprétation visuelle avec ArcView ou ArcGIS pour les images LANDSAT de 2005. Pour les images LANDSAT de 1973, les unités d'occupation du sol ont été identifiées et numérisées à l'écran à l'aide d'ATLAS GIS (au CENATEL) puis converties plus tard en ArcView pour une actualisation des couches.

L'exploitation des résultats cartographiques existants sur la végétation (IMPETUS, 2005 ; Orékan, 2007) et des informations endogènes obtenues sur place a permis d'établir une légende de onze (11) classes d'occupation du sol et d'utilisation des terres regroupées en six classes dans le tableau 1.III suivant l'approche physionomique de Yangambi (1956).

Il s'agit de : formations de forêts et savanes (FS), formations marécageuses (FM), cultures et jachères (CJ), agglomération (Ag), Plan d'eau (Pe) et plages sablonneuses (Pg). Les classifications des années antérieures par rapport à 2005 ont été fondamentalement analysées par rapport à l'historique de l'occupation du sol et aux données existantes pour les fins d'analyse diachronique.

Tableau 1.IV : Unités d'occupation de sol dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin

N°	Code de désignation	Description des unités	N°	Code unité regroupée	Description
1	FD	Forêt dense	1	FS	Formations de forêts et savanes
2	FG	Forêt "galerie" ou cordon ripicole			
3	FCSB	Forêt claire et savane boisée			
4	SAA	Savane arborée et arbustive			
5	FM	Formations marécageuses (forêt, savane, prairie, mangrove, bas-fond)	2	FM	Formations marécageuses
6	PT	Plantation (forestière, fruitière ex: palmiers à huile, cocotiers, anacardiers, orangers)	3	CJ	Cultures et jachères
7	CJ	Mosaïque de cultures et de jachères			
8	CJP	Mosaïque de cultures et de jachères à palmiers			
9	Ag	Agglomération	4	Ag	Agglomération
10	Pe	Plan d'eau (fleuve, lac, barrage, mare)	5	Pe	Plan d'eau
11	Pg	Plages sablonneuses	6	Pg	Plages sablonneuses

Source : Totin, octobre 2009

L'analyse de la dynamique de l'occupation du sol et de l'utilisation des terres a été focalisée sur le bilan d'évolution des unités paysagiques, le poids de chaque unité dans le bilan global de l'occupation du sol et l'indice d'amplitude de variation entre 1973 et 2005. Le bilan B_i d'évolution des unités de l'occupation du sol et de l'utilisation des terres se traduit par la différence entre la superficie LU du type d'occupation du sol et de l'utilisation des terres i entre la date t_1 et le début t_0 de l'étude. La formule mathématique est :

$$B_i = LU_{it1} - LU_{it0}$$

Avec $B_i = 0$, stabilité ; $B_i < 0$, régression, et $B_i > 0$, extension de cette unité.

Le poids P_i de chaque type d'occupation du sol dans la dynamique globale de la région d'étude est défini par le rapport en pourcent de la différence de chaque unité à la valeur absolue des différences cumulées à l'aide de l'expression :

$$P_i = [B_i / \Sigma(LU_{it1} - LU_{it0})].100$$

L'amplitude de variation A_i de l'occupation du sol et de l'utilisation des terres a été utilisé pour mettre en évidence les caractéristiques fondamentales de leurs variations (Liu, 2000 ; Liu *et al.*, 2003 ; Sikazwe, 2008). La méthode analytique s'écrit :

$$A_i = [(LU_{it1} - LU_{it0}) / LU_{it0}].100$$

La dynamique de l'occupation du sol et de l'utilisation des terres a permis de caractériser son influence sur la réalimentation des réservoirs souterrains et les modes de gestion de ces ressources ainsi que leur effet combiné sur la qualité des eaux souterraines.

1.4. Evaluation du système de gestion des eaux souterraines

L'analyse des modes actuels de gestion des eaux souterraines est nécessaire pour connaître les bases sur lesquelles il faut fonder la nouvelle gouvernance de cette ressource sous la double pression des changements environnementaux et d'augmentation des besoins.

1.4.1. Analyse des mécanismes actuels d'exploitation des eaux souterraines

L'évaluation de la gestion des ressources en eaux souterraines est faite en analysant les systèmes de leur mobilisation, de leur approvisionnement et usage, et du cadre législatif et institutionnel, etc.

Les déterminants de la demande en eaux souterraines retenus pour cette étude sont l'accroissement démographique, le développement industriel, l'agriculture urbaine et rurale, etc. L'Equivalent Point d'Eau (EPE) correspondant à un point d'eau pour 250 personnes et les volumes d'eau pompés sont des indicateurs retenus pour l'analyse de la ponction de la ressource respectivement en agglomérations rurales et urbaines.

La projection démographique est faite, sur la base de données des recensements de 1979, 1992 et 2002 et à l'aide de la formule :

$$P_n = P_{n-1}(1+r)^n$$

avec :

P_n et P_{n-1}, respectivement les populations projetée et d'une période précédente connue et r, le taux d'accroissement et n, le temps entre les périodes considérées.

Le nombre d'habitants est multiplié par les besoins journaliers d'eau par personne pour estimer la demande totale dans le bassin sédimentaire côtier. Le taux d'exploitation des eaux souterraines (Te), lié à la croissance démographique, est corrélé au taux de renouvellement (Tn). Ceci a permis de déterminer la vulnérabilité des aquifères à la double pression climatique et humaine et les risques possibles de pénurie qui pèsent sur la population.

Trois cas de figures peuvent ainsi se présenter :

- Te > Tn, les réservoirs souterrains sont vulnérables à la pression climatique et socioéconomique et sont à protéger ;
- Te < Tn, les réservoirs souterrains ne sont pas vulnérables du point de vu quantité ;
- Te = Tn, le renouvellement des nappes et les quantités d'eau pompées sont en équilibre précaire.

Par ailleurs, l'approche éthnoécologique (Dounias, 2006 ; Bahuchet, 1997) a aidé à appréhender les savoirs et savoir-faire des populations en matière de gestion des ressources en eau dans un contexte de climat modifié dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Le sud-Bénin est marqué par l'existence de croyances, aptitudes et perceptions relatives à la fonction de l'eau et par conséquent à sa gestion (Totin 2003 et 2005 ; Hèdiblè, 2007). Ainsi, a-t-il été nécessaire d'utiliser cette approche pour mener les travaux de recherche en milieu réel sur les relations eaux souterraines - communautés locales. Selon Allain (2006), s'intéresser à la gestion du domaine de l'eau, revient à s'intéresser à la gestion d'un « anthroposystème » (Levêque et Van de Leeuw, 2003), c'est-à-dire à « un système interactif entre deux systèmes

constitués par un (ou des) sociosystème(s) et un (ou des) écosystème(s) naturel(s) et/ou artificialisé(s) s'inscrivant dans un espace géographique donné et évoluant dans le temps ». Ces sociosystèmes correspondent aux aires socioculturelles du bassin côtier du Bénin et les écosystèmes sont assimilés aux hydrosystèmes exploités par les populations à des fins de satisfaction des besoins en eau domestique, agricole et industrielle.

L'analyse de l'efficacité des ouvrages hydrauliques, des contextes hydroclimatiques, des facteurs et sources de conflits et des limites du système actuel de gestion des ressources en eau a servi de base à l'élaboration des scénarios futurs.

1.4.2. Approche de gestion durable des ressources en eaux souterraines

La méthode de conception et d'élaboration des scénarios de gestion durable des ressources en eaux souterraines dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin est inspirée des *approches par scénario* (Gallopín *et al.*, 1997 ; PNUE, 1999, 2000 et 2002 ; Cosgrove et Rijsberman, 2002). L'analyse par scénario offre une longue vision du futur à la lumière des incertitudes et de l'examen des conditions pour une transition vers la durabilité. Cette vision intègre le développement d'un sociosystème fondé sur le principe d'interactions Société-Hydrosystème-Economie comme le décrit le Partenariat Mondial pour l'Eau dans les axes de la figure 1.6).

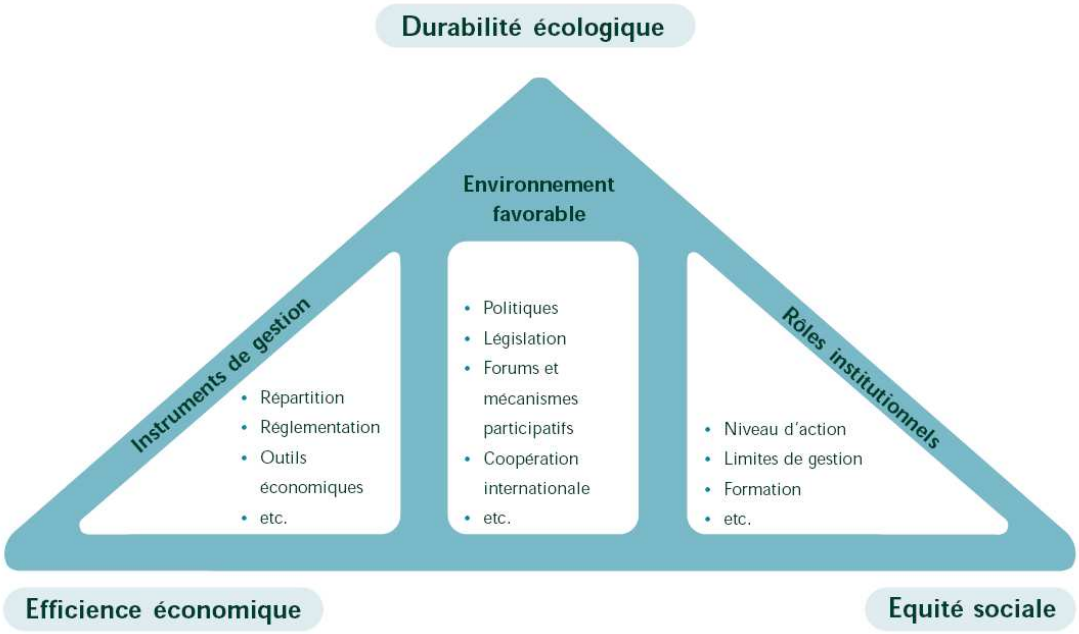


Figure 1.6 : Cadre général de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE)

Source : GWP, 2003

Les scénarios de stratégies de gestion intégrée des ressources en eau sont fondés sur la durabilité écologie, l'efficience économique et l'équité sociale au regard des faiblesses du

système actuel d'exploitation des eaux souterraines et des tendances lourdes que présente le bassin. A cet effet, les conditions environnementales et socioéconomiques du bassin sont exploitées à des fins d'amélioration de la recharge naturelle, de mise en œuvre des systèmes de recharge artificielle. De même, sont proposées des mesures alternatives d'utilisation des eaux pluviales et superficielles. En ce qui concerne l'utilisation de la ressource pluviale, la disponibilité en eau dépend du dimensionnement de la citerne ou la cuve. La capacité (C) de l'ouvrage hydraulique est donnée par la formule :

$$C = \left[(P.S.Cp) + B\right] / 2.(njr / 365)$$

avec :

Cp , coefficient de perte selon le type de toiture : toit en tuiles (0,75), toit en gravier (0,6), toit enherbé (0,3), toit en ondulé (0,8), toit plat (0,6) ;

S , la surface de toiture (en m²) ;

P , la pluviosité (en l/m²/an).

njr , nombre de jours de réserve de la cuve ; soit 30 jours dans le cadre de cette étude ;

B , besoins annuels (en L ou m^3).

La connaissance des besoins et des apports pluvieux est importante pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques de récupération d'eau pluviale et la rationalisation des usages.

Conclusion partielle

L'étude de l'impact du climat sur les ressources en eaux souterraines a nécessité l'utilisation des données climatologiques, hydrologiques, piézométriques et socioéconomiques et des méthodes de statistique descriptive et de modélisation. L'analyse de la variation spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques et bactériologiques, la comparaison aux normes OMS et la description des faciès hydrochimiques ont servi comme approche d'appréciation de la qualité des eaux souterraines. En outre, la méthode d'analyse des états de surface comme facteur influençant la recharge et la qualité des eaux est présentée.

Cette démarche méthodologique a conduit à mettre en relation les éléments de disponibilité et d'utilisation actuelle des eaux souterraines. Ceci vise à définir une approche d'exploitation durable de la ressource dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin au regard de ses spécificités physiques et humaines.

Chapitre II

CADRES PHYSIQUE ET HUMAIN DU BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN

Le bassin sédimentaire côtier du Bénin est décrit à travers ses différentes composantes physiques et humaines qui ont une certaine influence sur les hydrosystèmes souterrains et la gestion des eaux souterraines. Il s'agit de ses particularités géologiques, morpho-structurales, pédologiques, hydrographiques et climatiques et socioéconomiques. Ils constituent les facteurs d'explication de la disponibilité en eaux souterraines exploitées par les populations pour différents usages (domestiques, agricoles, industriels, etc.).

2.1. Situation géographique et cadre physique

2.1.1. Localisation du bassin sédimentaire côtier du Bénin

Le bassin sédimentaire côtier du Bénin couvre environ 12 377 km², de la côte au sud à la ligne de contact entre le sédimentaire et le socle au nord et de la frontière togolaise à l'ouest à la frontière nigériane à l'est. Il occupe environ 11 % des 114 763 km² du territoire béninois (figure 2.1).

Le bassin est compris entre les latitudes nord 6°15' et 7°05' (nord-ouest du plateau d'Aplahoué) - 7°38' (nord-est du plateau de Kétou) et les longitudes est 1°30' et 2°50'. Du point de vue administratif, il regroupe sept départements subdivisés en 43 communes. Ses particularités géologiques, morpho-structurales, pédologiques, hydrographiques et climatiques déterminent l'hydrodynamique des aquifères.

2.1.2. Contexte géologique et morpho-structural du bassin côtier du Bénin

Les dépôts sédimentaires du sud-Bénin font partie du vaste bassin sédimentaire côtier du Golfe du Bénin qui s'étend du Ghana à l'ouest au Nigeria à l'est (Slansky, 1962 ; Oyédé, 1991 ; Boukari et Alassane, 2007). Ces dépôts ont une structure monoclinale caractérisée par une subsidence différentielle croissante vers le sud-sud-est (Dray *et al.*, 1988).

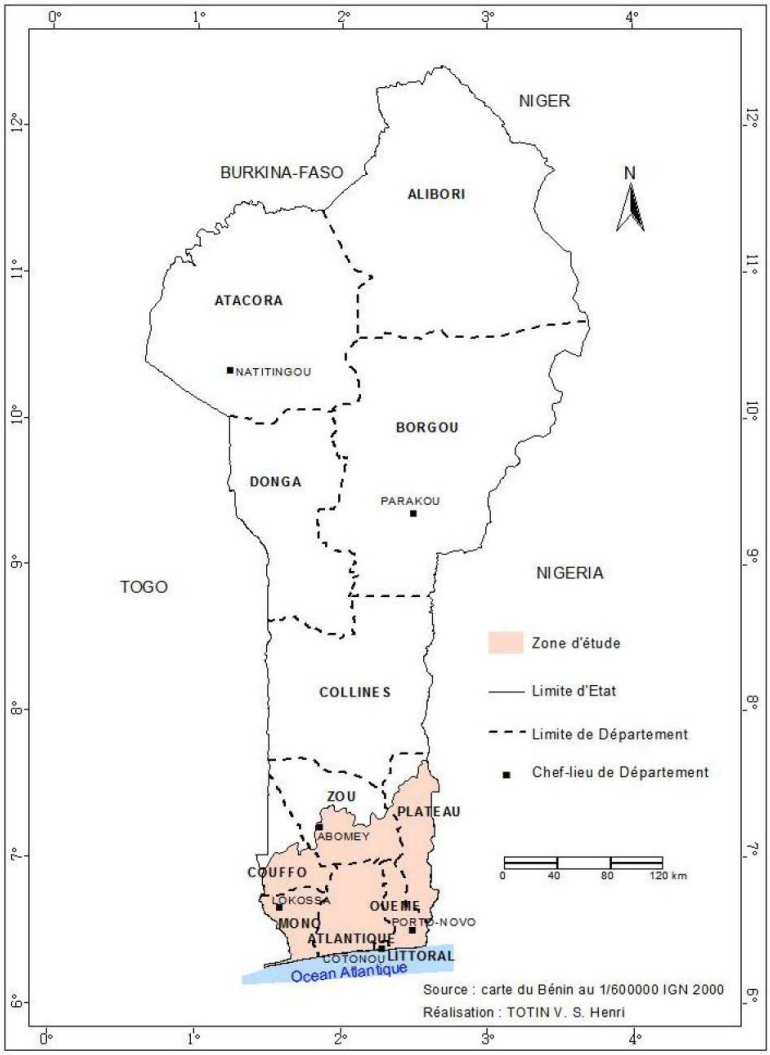


Figure 2.1 : Localisation du bassin sédimentaire côtier du Bénin

La figure 2.2 montre les formations géologiques dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Selon IRB (1987) cité par Alassane (2004), les formations sédimentaires affleurantes sont de plus en plus jeunes depuis le socle au nord jusqu'à l'océan au sud. Des dépôts du Quaternaire récent occupent les vallées des cours d'eau qui, en général, sont orientés nord-sud. Les terrains affleurant dans le bassin sont :

- le Crétacé supérieur : Cette formation géologique affleure au nord du bassin et constitue l'élément structurant des plateaux septentrionaux (Aplahoué, Abomey, Zagnanado, Kétou). Elle appartient précisément au Turonien-Coniacien (sables quarzitiques et galets) et au Maestrichtien sableux à la base puis argilo-marneux au sommet. Le Turonien-Coniacien est en contact discordant avec le socle.
- le Paléocène et l'Eocène moyen : Ils sont surtout argileux et marneux parfois calcaires et phosphatés dans la dépression de la Lama.

- le Continental terminal : Il est surtout sableux et sablo-argileux avec des bandes argileuses. Il est daté du Miocène supérieur au Pléistocène et forme les plateaux sud de Comè, Allada et Sakété, qui sont séparés les uns des autres par les vallées du Couffo et de l'Ouémé.
- le Quaternaire récent : Cette formation est constituée de sables, de sables argileux, d'argiles alluviales des vallées des masses d'eau fluviale et littorales des cordons.

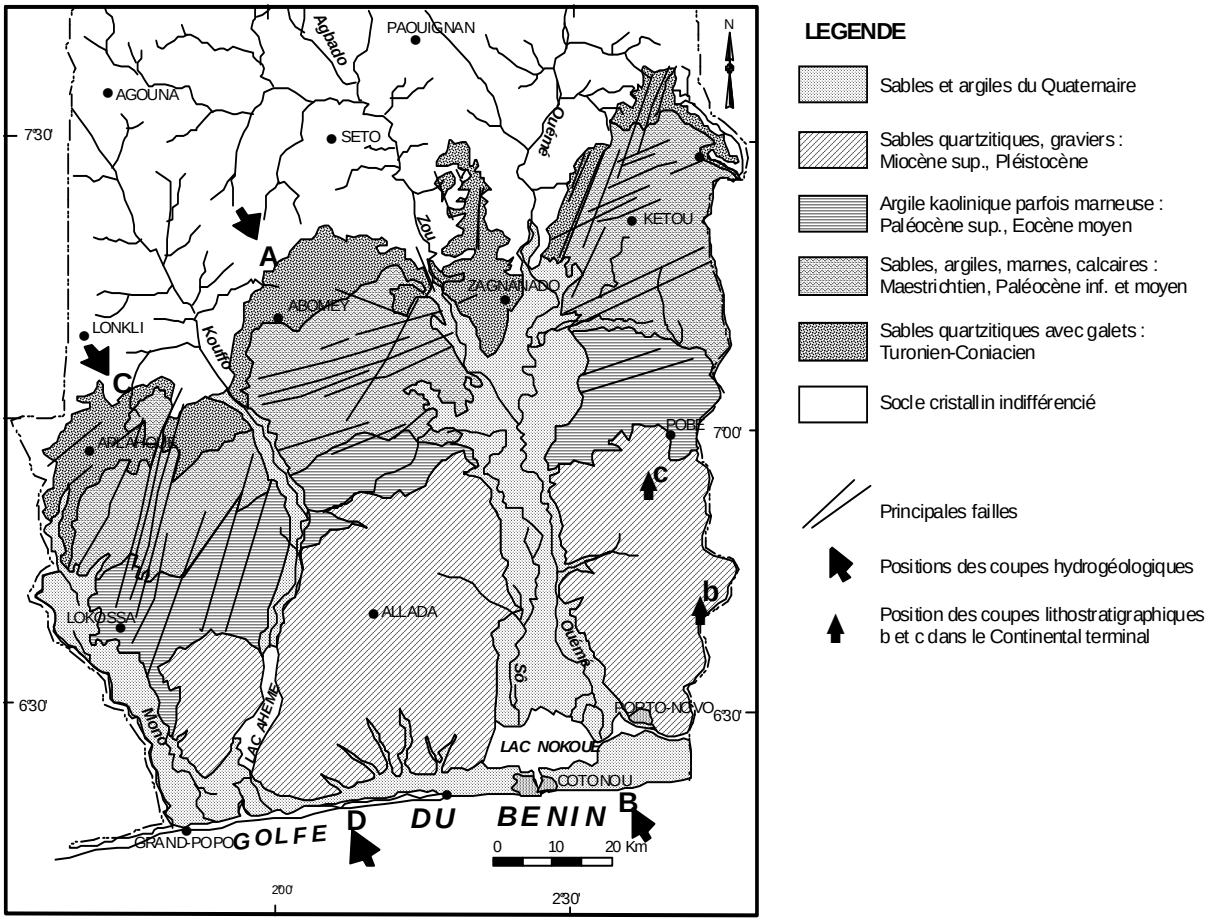


Figure. 2.2 : Carte géologique du bassin sédimentaire côtier du Bénin *(IRB, 1987)* avec la position des coupes hydrogéologiques du bassin et celle des coupes lithostratigraphiques du Continental terminal du Plateau de Sakété

Au total, huit unités stratigraphiques (IRB, 1987) sont dénombrées dans le bassin Ces unités sont décrites de façon synthétique dans le tableau 2.I. La structure stratigraphique décrite dans le tableau 2.I est perturbée par endroits par des accidents tectoniques (peu visibles) correspondant à des failles réparties en deux familles principales (Slansky, 1962 ; IRB, 1987).

Tableau 2.I. Unités stratigraphiques du bassin sédimentaire côtier du Bénin

Unités stratigraphiques	
I	Elle renferme les faciès les plus anciens du bassin au stade actuel des connaissances. Ces faciès datent du Turonien-Coniacien (Crétacé supérieur) et sont directement transgressifs sur le socle. Ils sont de nature détritique terrigène à la base avec intercalation de niveaux ligniteux, calcaires, dolomitiques et marneux. Mais au Coniacien, ils deviennent marins sableux recoupés par des niveaux de marnes, de calcaires et de calcaires gréseux.
II	Elle est à cheval sur le Crétacé supérieur (Maastrichtien) et le Paléocène inférieur (Danien). Elle est constituée à la base, de faciès variés comprenant des argiles, de marnes, des sables et des calcaires (Unité IIa), au sommet, de faciès calcaires zoogènes assez constants de 5 à 22 m d'épaisseur avec toutefois quelques intercalaires de sables (Unités IIb).
III	A cheval sur le Paléocène supérieur (Thanécien) et l'Eocène inférieur (Yprésien), elle comporte essentiellement des faciès argilo-marneux, parfois finement feuilletés et à attapulgite, avec de petits niveaux glauconieux, phosphatés et sableux.
IV	Daté de l'Eocène moyen (Lutécien et Bartonien), elle est également à dominante marneuse parfois riche en phosphates avec quelques calcaires à Nummulites, parfois argilo-marneuse avec de nombreux lits gypseux.
V	Elle se rattache au Miocène inférieur et correspond aux termes inférieurs de ce qu'il est convenu d'appeler « Continental Terminal », et qui désigne un ensemble associant des faciès sidérolitiques (Houessou, 1974), argilo-silteux, parfois conglomératiques.
VI et VII	La première est attribuée au Miocène supérieur tandis que la seconde appartiendrait au Pliocène-Pléistocène ; les deux unités font partie également du Continental Terminal et correspondent à des sédimentations argilo-sableuses, parfois conglomératiques, avec des niveaux grésifiés, donc indurés, induration d'origine diagénétique, d'extension latérale plus ou moins grande. Les faciès de ces unités identifiées comme continentales, sont couronnés par un mélange assez homogène d'argiles kaolinitiques et de sables quartzeux fins à moyens appelé « Terre de barre ». Ce sont des dépôts sidérolitiques provenant du démantèlement des sols latéritiques (Houessou, 1974).
VIII	Elle correspond, d'une part, aux faciès holocènes de la plaine littoral, c'est-à-dire à des sables bruns (ou blancs) et gris des cordons et, d'autre part, aux alluvions et vases des dépressions, d'âge également holocène.

Source : d'après Géohydraulique (1985)

La première famille est orientée NNE-SSW avec 100 m de rejet et un âge postérieur au Lutétien et antérieur au Mio-Pliocène. Quant à la seconde famille, d'orientation ENE-WSW, elle a abaissé d'une quarantaine de mètres le compartiment nord du bassin. En outre, Géohydraulique (1985) citée par Boukari (2002 et 2007) a mis en évidence des failles de directions secondaires N-S, E-W et N120° environ. Des morcellements induits par ces différents accidents, notamment ceux orientés ENE-WSW ont entraîné des approfondissements successifs des couches sédimentaires par compartiment. Le socle, qui est à 250 m d'altitude moyenne sur les limites nord du bassin sédimentaire côtier, s'enfonce jusqu'à plus de -2000 m dans sa partie sud-est.

Les colonnes lithostratigraphiques de la figure 2.3 montrent des faciès détritiques marins ou continentaux dominants avec des sables et des argiles qui jouent un rôle important dans les processus de transfert et de stockage d'eau dans les réservoirs souterrains.

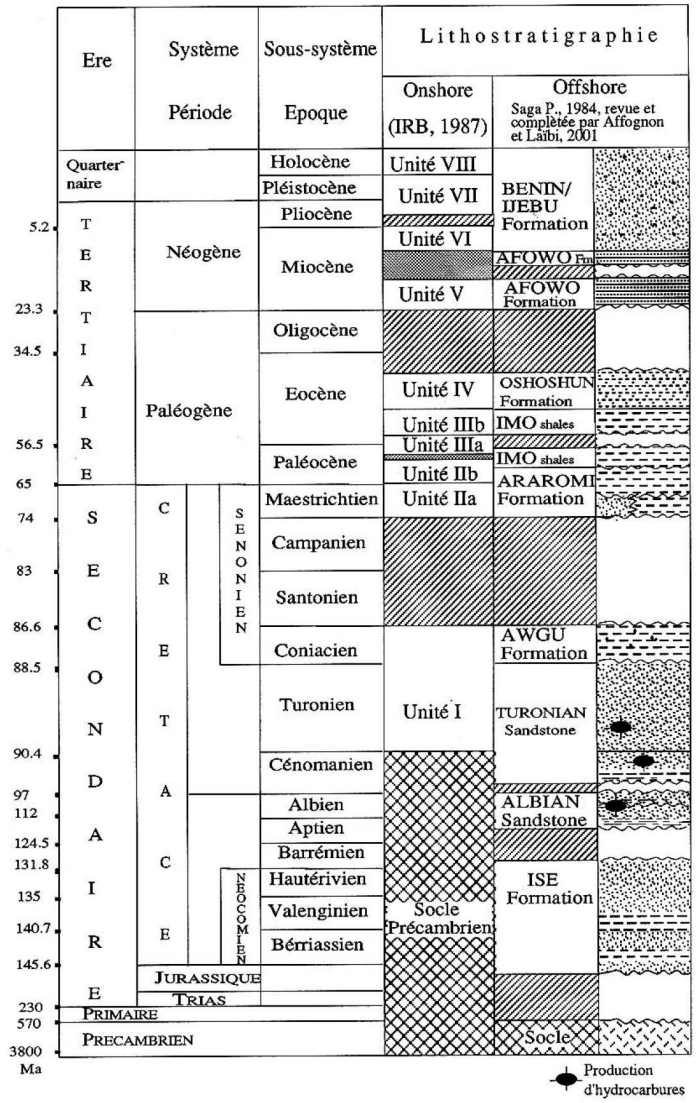


Figure 2.3 : Colonnes lithostratigraphiques des domaines onshore et offshore du bassin sédimentaire côtier du Bénin (*Laïbi et Affognon, 2001*)

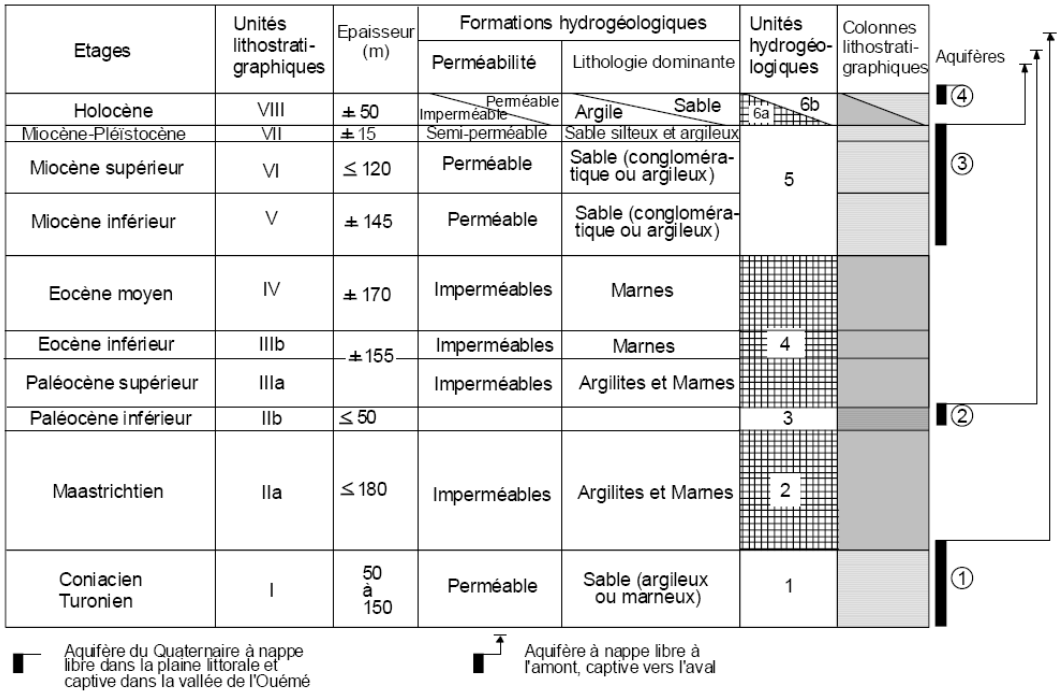
Les argiles font fréquemment place à des marnes ou des calcaires dans les unités d'origine marine (unités I, II et IV). Quelques niveaux à nodules de phosphates sont également présents dans certaines unités (unité III). Cette lithostratigraphie du bassin est un des facteurs explicatifs de l'existence des aquifères.

2.1.3. Caractéristiques hydrogéologiques du bassin côtier du Bénin

Le bassin hydrogéologique côtier du Bénin fait partie du système aquifère transfrontalier du Nigeria-Bénin-Togo, formant l'unité international 414 dont la recharge moyenne est de 15-150 mm/an (BGR/UNESCO, 2006). Quatre formations hydrogéologiques perméables y sont dénombrées (Géohydraulique, 1985a ; Maliki, 1993 ; Boukari, 1998, 2002 ; Alassane, 2004) et regorgent de 35 % des eaux souterraines du Bénin (Boukari, 2007). Elles peuvent être

reparties comme le montre la figure 2.4, en deux groupes d'aquifères (Boukari et Alassane, 2007) :

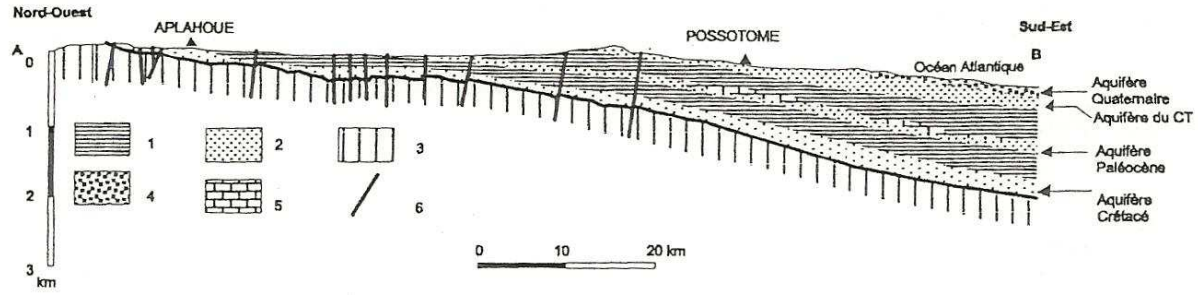
- le groupe des aquifères à fortes potentialités: Il s'agit de l'aquifère à nappe libre du Continental terminal (unité V et VII) et celui à nappe captive du Crétacé supérieur (unité I) ;
- le groupe des aquifères à faibles potentialités : il est formé par l'aquifère du Quaternaire (Holocène ou unité VIII) et celui du Paléocène inférieur (unité IIb).



1- Aquifère à nappe libre dans la plaine littorale et à nappe captive dans la vallée de l'Ouémé ;
2- Aquifère à nappe libre en amont et à nappe captive vers l'aval

Figure 2.4 : Colonne hydrogéologique du bassin sédimentaire côtier du Bénin (*Boukari, 2002*)

Ces aquifères sont séparés l'un de l'autre par des couches argileuses ou marneuses comme l'illustre la figure 2.5.



1- Argilites et marnes ; 2- Sable ; 3- Socle panafricain ; 4- Gravier ; 5- Calcaires ; 6- Faille

Figure 2.5 : Coupe hydrogéologique du bassin sédimentaire côtier du Bénin selon les directions nord-ouest et sud-est (Aplahoué-Ouidah) *Source : Dray et al., 1988*

Ils présentent des caractéristiques et propriétés hydrodynamiques variées, très détaillées dans les travaux hydrogéologiques faits sur le bassin (Boukari, 2002). Les caractéristiques ci-après présentées sont inspirées de Boukari et Alassane (2007).

- *Aquifère des sables du Crétacé supérieur*

La nappe de l'aquifère crétacé (Turonien-Coniacien ou Unité I) est libre au nord de la dépression de la Lama, où le Coniacien sableux affleure, et captive sous les argilites et marnes du Maastrichtien et de l'Eocène vers le sud, où le Coniacien s'enfonce rapidement. Une fois la nappe captée dans le secteur où elle est en charge, l'eau remonte naturellement dans les ouvrages et, souvent devient jaillissante comme à Massi, Bopa, Totinga, etc. (photo 2.1)



Cliché : Totin V.S.H., octobre 2009

Photo 2.1. Nappe captive et jaillissante de Totinga à Ouèdèmè Adja (Lokossa)

A Massi, Possotomè comme à Totinga, des aménagements hydrauliques permettent aujourd'hui de réduire la pression de jaillissement de l'eau. La nappe crétacée est captée par des forages plus ou moins profonds surtout dans le tiers nord du bassin. Au sud, elle s'approfondit rapidement rendant prohibitif, dans les conditions actuelles, son exploitation. Elle peut, cependant être exploitée à l'aide des puits à grand diamètre, mais dans une zone limitée au nord de la dépression de Lama où elle est libre et où intervient sa réalimentation, laquelle est certainement influencée par la variabilité climatique. En outre, à l'extrême nord, la nappe biseaute et l'aquifère est dénoyé, donc stérile.

- *Aquifère des calcaires paléocènes*

L'aquifère des calcaires paléocènes (Unité IIb) est à nappe captive sous les argilites et marnes du Paléocène supérieur et de l'Eocène inférieur et moyen. Son épaisseur ne varie que de quelques mètres à une trentaine de mètres au maximum. Il est parfois affleurant ou subaffleurant dans la dépression de Lama, puis s'approfondit rapidement vers le sud.

Le captage de l'aquifère du Paléocène pourrait s'avérer économiquement intéressant pour l'alimentation en eau potable dans les zones basses où sa cote piézométrique s'établit au-dessus de la cote du sol, favorisant ainsi le caractère jaillissant des forages (BURGEAP-BRGM, 1994). Il s'agit des zones lacustres de l'Atlantique et de l'Ouémé, du ''lac'' Ahémé, de la basse vallée du Mono et de l'Ouémé. Ailleurs, les calcaires et sables paléocènes sont, soit trop profonds (plus de 400 m, cas des plateaux), soit dénoyés (cas de la dépression de Lama) (Boukari, 2002).

Pour les aquifères du Crétacé et du Paléocène, les débits d'exploitation ne dépassent généralement pas 50 m^3/h alors qu'ils peuvent atteindre et même dépasser 200 m^3/h pour celui du Continental Terminal s.s. (Géohydraulique, 1985a ; IGIP-GKW-GRAS, 1989). En ce qui concerne la transmissivité, les débits spécifiques d'un forage qui recoupe une fracture sont importants, dépassant 5 m^3/h/m mais si aucune fissure n'est rencontrée, la transmissivité des sables est de 10^{-3} à 10^{-4} m^2/s (BURGEAP-BRGM, 1994).

- *Aquifère des sables du Continental Terminal s.s.*

L'aquifère des sables du Continental Terminal s.s. (Unités VI et VII) est généralement à nappe libre, se subdivisant superficiellement en trois unités hydrogéologiques correspondant aux plateaux méridionaux de Sakété, de Comè et d'Allada, ce dernier étant le plus important. Il est caractérisé par des niveaux piézométriques qui s'approfondissent progressivement du sud des plateaux au nord où leur profondeur peut dépasser 60 m (Géohydraulique-BURGEAP, 1988 ; Boukari et Alassane, 2007). Cette profondeur constitue un des facteurs inhibiteurs de l'infiltration mais aussi de protection de la nappe contre la pollution. Par contre, l'importance de la zone saturée dans le sud des plateaux favorise les débits d'exploitation des ouvrages.

Le champ de captage de l'aquifère du Continental Terminal s.s. le plus important et le plus ancien est « le champ de captage de Godomey », fonctionnel depuis 1956, et situé à l'extrême sud-est du plateau d'Allada. La transmissivité du Continental Terminal s.s. se situe entre 1,5 et 8.10^{-3} m^2/s dans les secteurs méridionaux des plateaux où les épaisseurs sont importantes et entre 10^{-5} et 4.10^{-4} m^2/s vers la dépression de la Lama (Boukari, 1998 ; Alassane, 2004). Mais Pallas (1988) l'a estimée entre 10^{-3} et 5.10^{-2} m^2/s dans la partie sud du plateau d'Allada dans le cadre de ses travaux de modélisation de cet aquifère.

- *Aquifère des sables littoraux ou alluviaux quaternaires*

Les dépôts quaternaires (Unité VIII) présentent en profondeur une structure complexe, qui évoque celle du Continental Terminal s.s., avec l'alternance de niveaux sableux ou argileux plus ou moins continus. Il existe presque toujours, au niveau des cordons littoraux une nappe phréatique comprenant des nappes d'eau douce sous forme de lentilles concaves flottant sur une nappe d'eau salée d'origine marine, voire lagunaire (Géohydraulique, 1985a). Les ouvrages hydrauliques sont délicatement installés pour éviter le captage d'eau salée. La cote de l'eau dans les ouvrages varie entre 0,5 et 3 m en moyenne au-dessus du niveau moyen de la mer (Maliki, 1993 ; Boukari *et al.*, 1995 ; Boukari, 1998). A ce sujet, la formule de Ghyben-Hersberg permet de situer la base de contact eau douce/eau salée entre 21 et 81 m de profondeur (Géohydraulique, 1985b). Mais l'existence, sur les 2/3 ouest de la bande littorale, d'une épaisse couche d'argile (15 à 20 m d'épaisseur) à environ 20 m de profondeur (Maliki, 1993 ; Boukari, 1998) ne permet pas d'appliquer aisément la formule dans cette partie du littoral. La couche d'argile et d'autres, marneuse ont permis l'existence, sous la nappe superficielle d'eau salée, d'une ou de plusieurs nappes captives à eau douce, qui se prolongent sous la mer.

Dans les alluvions des grandes vallées du fleuve Mono et surtout du complexe Ouémé-lac Nokoué, les nappes sont souvent en charge sous des niveaux argilites plus ou moins superficiels avec des phénomènes fréquents d'artésianisme jaillissant dans la partie sud de la vallée (Ganvié, Sô-Tchanhoué, etc.). L'épaisseur de ces alluvions diminue progressivement vers l'amont du fleuve et devient insignifiant vers la bordure nord du bassin (Géohydraulique, 1985a).

Les aquifères quaternaires sont aisément captés par des puits à grand diamètre, particulièrement dans la bande littorale comme l'illustre le cas de Cotonou où chaque ménage possède un puits individuel. Mais, ces eaux captées sont souvent de mauvaise qualité chimique et bactériologique (Boukari, 1998 ; Boukari *et al.*, 2006 ; Totin *et al.*, 2008). Les principaux facteurs de cette forte pollution sont la proximité des systèmes individuels d'assainissement inadéquat, l'influence des eaux marines ainsi que la faible profondeur de la nappe (contamination à partir de la surface par des rejets domestiques, industriels voire agricoles) (Boukari et Alassane, 2007 ; Odoulami, 2009 ; Totin *et al.*, 2010). Les débits d'exploitation des aquifères du Quaternaire sont compris entre 1 et 20 m^3/h et les transmissivités, essentiellement de la zone méridionale sont entre 10^{-3} et 3.10^{-2} m^2/s (Géohydraulique, 1985a). En outre, dans la vallée de l'Ouémé, elles baissent de 7.10^{-3} à 2.10^{-4}

m^2/s, du sud au nord avec la diminution de l'épaisseur saturée, mais elles peuvent atteindre 9.10^{-3} m^2/s dans les secteurs de fortes épaisseurs d'alluvions.

L'écoulement de l'ensemble des nappes s'opère en général du NNW vers le SSE, conformément au pendage des couches. Mais, le modelé géomorphologique (dépression des systèmes Sô-Ouémé-''lac'' Nokoué et Couffo-''lac'' Ahémé-Mono notamment) perturbe l'écoulement des nappes superficielles libres qui, échappe au contrôle strict par l'allure monoclinale des couches (Boukari et Alassane, 2007). Leur réalimentation, par infiltration directe des eaux de pluie, concerne la nappe du Crétacé dans sa portion libre située au nord de la dépression de la Lama (secteur amont) et les nappes du Continental terminal s.s. et du Quaternaire (excepté la vallée alluviale de l'Ouémé) qui sont généralement libres. De plus, dans certains secteurs où les conditions hydrodynamiques s'y prêtent, les eaux superficielles participent à cette réalimentation directe. Cependant, dans les secteurs où les niveaux statiques des nappes libres sont très profonds, (plus de 30-50 m), toute réalimentation directe par les eaux de pluie devient hypothétique (Boukari, 2002).

Enfin, les quatre systèmes aquifères sont subdivisés en 27 unités hydrogéologiques illustrées par la figure 2.6 et dont les caractéristiques sont détaillées dans le tableau 2.II.

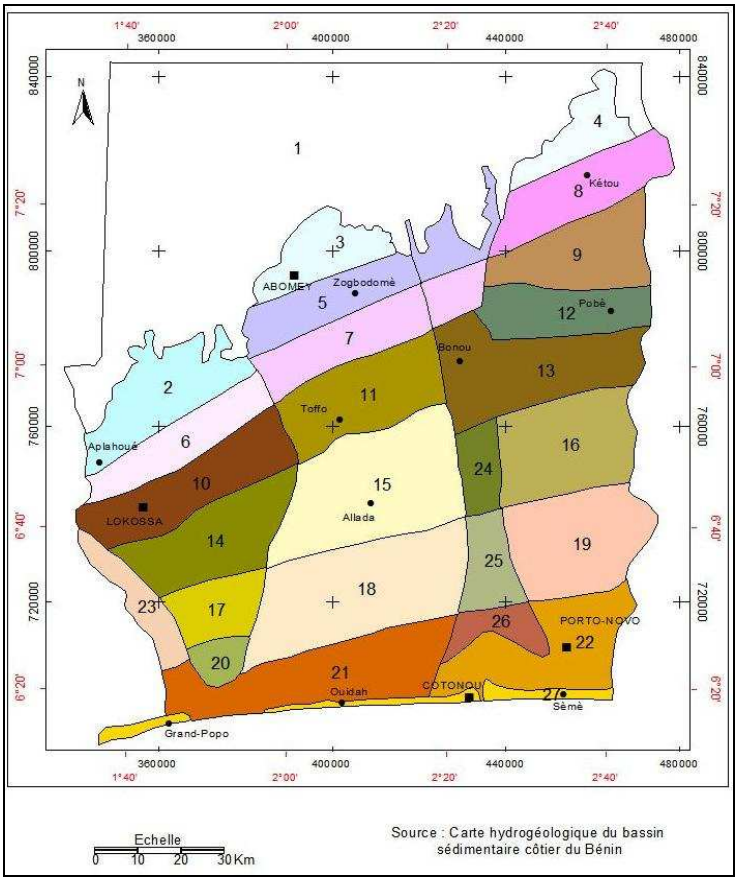


Figure 2.6 : Unités hydrogéologiques du bassin sédimentaire côtier du Bénin (*Géohydraulique, 1985a*)

Tableau 2.II : Caractéristiques générales de chacune des 27 unités hydrogéologiques du bassin sédimentaire côtier du Bénin

Unités	Caractéristiques
1	Socle granito-gneissique. Aquifère discontinu de fissures. Forages 45 à 60 m placés sur les fractures. Débit : 0 à 6 m^3/h. Niveau statique (NS) profond à l'approche du Crétacé, ailleurs eau entre 5 et 15 m de profondeur. Puits déconseillé car la couche altérée est peu épaisse. Le Crétacé continental est quasi-stérile car NS profond à la base du Crétacé. Rechercher les points bas dans les vallons et à la périphérie de la zone. Forages dans les fractures du socle, foncés à travers les sédiments du Crétacé. Problème de l'exhaure. Puits fortement déconseillés.
2	MONO : NS plus profonds que 50. Forage de 50 à 100 m. Débits de 0 à 7 m^3/h.
3	ZOU : NS entre 40 et plus de 70 m de profondeur. Forage de 50 à 100 m. Débits de 0 à 5 m^3/h.
4	OUEME : NS entre 50 et 80 m de profondeur. Forages de 60 à 100 m
5	Eau profonde (40 à plus de 70 m) mais Crétacé relativement épais (60 à 80 m) pouvant être saturé à la base. Rechercher les fonds des vallons. Forage de 60 à 100 m atteignant ou pénétrant le socle (dans ce cas, rechercher les fractures). La productivité croît du Nord au Sud. Puits déconseillés. Débits : 0 à 8 m^3/h.
6	MONO : le continental est productif dans la zone ouest, avec de bons débits. Forage de 40 à 70 m. NS = 25 à 40 m. S'il est stérile, rechercher les sables du Crétacé avec des forages de 50 à 120 m de profondeur. NS de 25 à 60 m. Débits de 3 à 11 m^3/h.
7	ZOU : Crétacé continental peu productif. Exploite les sables du Crétacé avec des forages de 50 à 130 m. Débits de 1 à plus de 10 m^3/h (jusqu'à 50 m^3/h).
8	OUEME : le Crétacé continental est vide car NS à plus de 50 m de profondeur. Rechercher l'eau dans le Crétacé marin sableux avec des forages de 60 à 130 m.
9	Aquifère des sables du Crétacé. Dans la partie ouest, implanter des forages de 50 à 70 m (vers le sud). Niveau statique de 15 à 20 m, parfois artésien. Bons débits (50 m^3/h). Dans la partie est, l'eau est profonde (problème de l'exhaure) ; chercher des sites dans les bas-fonds. Forage de 80 à 150 m de profondeur. Débits élevés (50 m^3/h). Puits déconseillés.
10	Forages dans les sables du Crétacé si les calcaires du Paléocène sont secs (limite Nord) ou si les faciès sont marneux. Forages de 90 à 190 m. NS artésiens à l'ouest et profonds sous les Continental Terminal (60 m). Débits de 0 à plus de 20 m^3/h.
11	Forages de 80 à 120 m (au Sud dans le paléocène. Les calcaires peuvent être argileux ou absents ; rechercher, dans ce cas, les sables du Crétacé situés à 80 m de profondeur au Nord et vers 160 m au Sud ; les pénétrer de 10 à 30 m. Le Crétacé argileux affleure au Nord-Est de la zone. Niveau statique aérien à 25 m. Débits de 15 à 50 m^3/h.
12	Le Paléocène est peu ou pas productif. Sables du Crétacé avec des forages de 50 m (Ouest) à plus de 150 m (Est). Puits à l'Ouest seulement. Niveau statique de 30 à 50 m à l'Est et peu profond à l'Ouest. Bons débits (20 à 50 m^3/h).
13	Forages de 60) 120 m, du Nord au Sud, dans les calcaires du paléocène. Niveau statique à moins de 25 m de profondeur, parfois artésien, (point bas). Sables du Crétacé vers 200 m au Nord et plus profonds vers le Sud (400 m). Puits possibles seulement en limite Nord mais profond (60 m) ou en bordure de l'Ouémé.
14	Continental Terminal stérile. Forage de 120 à 190 m de profondeur exploitant les calcaires du Paléocène épais de 5 à 15 m. Faciès parfois marneux. Niveau statique artésien sur les bordures à très profond sous le Continental Terminal. Débits de 0 à 90 m^3/h. Le toit du Crétacé aquifère se trouve entre 120 m au Nord et 250 m au Sud.
15	Continental Terminal quasi-stérile car Niveau statique souvent à plus de 50 m de profondeur. Les puits sont déconseillés. Paléocène argileux ou profond : 150 m au Nord et 325 m au Sud Le Crétacé aquifère est profond : 180 m au Nord et 590 m au Sud. Pour l'hydraulique villageoise, forages de 30 à 50 m dans les bas-fonds, en bordure de la zone sinon forage de 150 à 500 m, avec des débits parfois importants (30 m^3/h).
16	Continental Terminal productif malgré un Niveau statique profond : la base du Continental Terminal se trouve vers 65 à 75 m de profondeur. L'Eocène sous-jacent est stérile. Les calcaires du Paléocène sont entre 150 à 200 m de profondeur au Nord et 300 m au sud. Le toit des sables du Crétacé sont à 400 m au Nord, à près de 600 m au centre avec de bons débits (jusqu'à à 50 m^3/h). Pour l'hydraulique villageoise, forages de 30 à 50 m dans les bas-fonds (3 à 10 m^3/h). Puits possible seulement sur les bordures quand le Niveau statique est à moins de 30 m de profondeur.
17	Continental Terminal complètement dénoyé et stérile ; débit faible à la limite sud de l'affleurement du Continental Terminal (0,2 m^3/h) et dans les bas- fonds. Le Paléocène aquifère se trouve vers 240 m au Nord et 350 m au Sud et le Crétacé entre 300 m au Nord et 600 m au Sud. Tenter des forages de 40 à 60 m dans le Continental Terminal; Niveau statique de 30 à 40 m (bordures, bas-fonds).

Unités	Caractéristiques *(suite)*
18	Zone mal connue. Niveau statique profonds en général, sauf sur les bordures, ce qui réduit les ressources du Continental Terminal. Forages dans le Continental Terminal, de 50 à 70 m de profondeur. La productivité croît du Nord au Sud. Paléocène entre 250 m au Nord et plus de 400 m au Sud. Crétacé de 400 à 1000 m environ.
19	Continental Terminal aquifère dans l'ensemble. Eviter les interfluves où le Niveau statique peut être à plus de 50 m de profondeur. Forages de 50 à 80 m. Débits 1 à 10 m^3/h. Puits profonds dans les vallons. Le Paléocène est à plus de 450 m de profondeur et le Crétacé entre 650 et 700 m.
20	Le Quaternaire et le Continental Terminal s'épaississent vers le sud, de 50 m à plus de 100 m. Niveau statique de 25 m de profondeur au nord à artésien au sud. Débits parfois élevés (20 à 30 m^3/h). Forages de 25 à 150 m selon le débit recherché. Puits possibles. Attention au front salé.
21	Le Continental Terminal et le Quaternaire. s'épaississent de 70 m au nord à 150 m au sud. Niveau statique de 25 m au nord à artésien au sud. Débits localement très élevés, > 100 m^3/h. Forages de 25 à 150 m. Puits possibles. Front salé sur la bordure sud.
22	Forage de 40 à 60 m dans le Quaternaire et le Continental Terminal. Débits de 5 à 100 m^3/h. Niveau statique de 10 à 25 m de profondeur. Front salé sur la limite sud. Paléocène à plus de 500 m et Crétacé vers 1000 m.
23	Quaternaire et Continental Terminal de la dépression du Mono. Débits de 5 à 12 m^3/h avec des forages de 40 à 50 m. Niveau statique peu profond, parfois artésien. Accès parfois difficile. Paléocène productif à 120 m de profondeur. Crétacé à 250 m (Athiémé).
24	Dépression de l'Ouémé. Sources nombreuses sur les berges, mais inondables 3 à 6 mois par an. Puits dans les terres émergées. Protection de l'eau difficile. Accès difficile. Les argiles de l'Eocène affleurent sur les berges. Pas de données sur le Continental Terminal en profondeur mais certainement absent. Pour les forages, Voir 15 et16.
25	Dépression de l'Ouémé. Bons aquifères dans le Quaternaire (0 à 60 m) et dans le Continental Terminal (60 à150 m). Eau douce. Niveau statique peu profond ou artésien. Débits de 6 à 20 m^3/h. Faciès argileux sur les bordures. Accès difficile. Puits possibles.
26	Dépression de l'Ouémé, mêmes caractéristiques que 25, mais artésianisme généralisé. Front salé sur la limite sud. Le Continental Terminal peut contenir de l'eau douce sous la zone salée mais grandes difficultés pour capter l'eau douce salée du dessus.
27	Cordon littoral sableux assez large à l'est de Cotonou et à l'ouest de Grand-Popo et filiforme entre ces deux zones. Lentilles d'eau douce flottant sur l'eau salée. Niveau statique peu profond se raccordant avec l'océan et la lagune. Protection de l'eau difficile car sable très perméable. Bons débits (1 à 5 m^3/h). Ecrêter la nappe avec des puits peu profonds ou des batteries de points filtrants. Forages déconseillés malgré le Continental Terminal aquifère entre 80 et 150 m, échec à Grand-Popo avec de l'eau salée ou saumâtre dans les forages.

Source : Géohydraulique (1985a)

Les caractéristiques hydrauliques de ces unités hydrogéologiques dénotent de l'existence d'un important potentiel en eaux souterraines dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Les propriétés hydrodynamiques des aquifères témoignent de leur plus ou moins grande vulnérabilité aux changements environnementaux, dont les changements climatiques.

2.1.4. Caractéristiques pédologiques du bassin sédimentaire côtier du Bénin

Les types de sols interviennent dans les processus d'infiltration et de ruissellement à travers leurs propriétés de perméabilité, dépendantes de leur structure et ou de leur texture. Quatre types de sols sont identifiés dans le bassin côtier du Bénin : les sols ferrallitiques, les sols ferrugineux tropicaux, les vertisols et les sols hydromorphes, répartis en plusieurs sous-classes (figure 2.7).

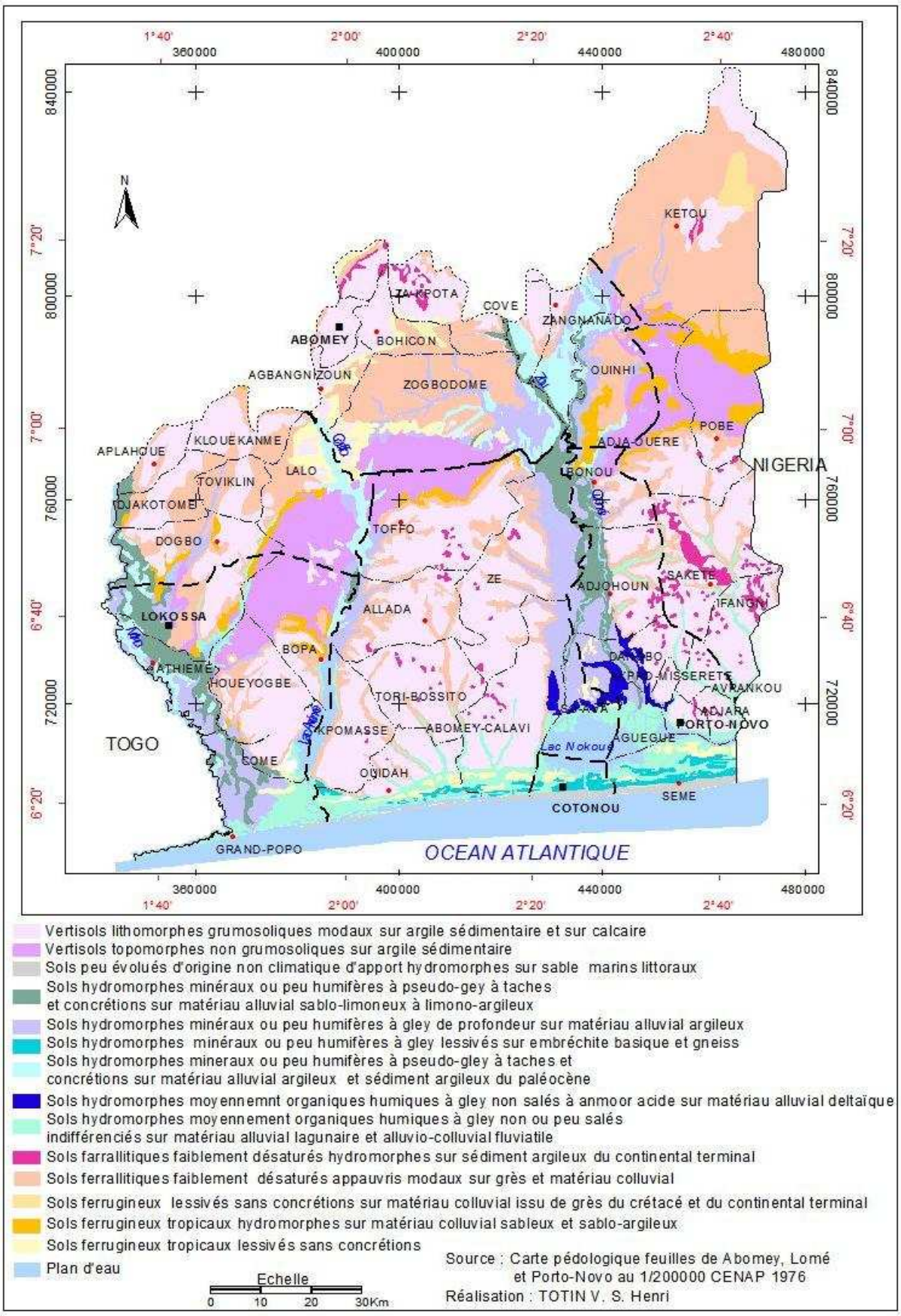


Figure 2.7 : Composantes pédologiques du bassin sédimentaire côtier du Bénin

La plupart de ces sols sont très anciens en référence à la ‘’Terre de barre’’ qui, selon Volkoff & Willaime (1963) est un sol fossile de climat forestier qui a existé à une époque où la somme annuelle moyenne des précipitations a dépassé 1400 mm dans sa zone d’élargissement. Elle recouvre la surface des mosaïques du plateau Continental terminal du bassin sédimentaire côtier dont les frontières s’étendent de l’embouchure du Volta au Ghana au Nord-Est jusqu’aux régions du Togo, Bénin, Nigéria (IGIP-GKW-GRAS, 1989).

Les sols ferrallitiques faiblement désaturés, hydromorphes sur sédiments argileux du Continental terminal occupent la totalité des plateaux du bassin. Ils sont assez sableux en surface avec un taux de 5 à 15 % d'argile qui passe rapidement à 35 % entre 30 et 60 cm de profondeur puis à 45-50 % au-delà de cette profondeur (Azontondé, 1991). La perméabilité (K) est bonne et varie entre 5 et 8 $cm.h^{-1}$ en surface et devient moyenne (3-6 $cm.h^{-1}$) en profondeur). La réserve d'eau y est faible, sensiblement constante et varie entre 40 et 50 mm à 30 cm puis entre 60 et 70 mm à 60 cm. Quant aux sols ferrallitiques faiblement désaturés appauvris modaux sur grès et matériau colluvial, ils couvrent majoritairement les plateaux du nord où affleure, par endroits, le crétacé. Ils sont sableux en surface avec 10 à 20 % d'argile et argileux en profondeur (40-50 % d'argile). La perméabilité, moins bonne que sur Terre de barre, reste assez moyenne. La réserve d'eau est de l'ordre de 60 mm en profondeur. Ils sont assez peu profonds (moins de 1 m), graveleux et présentent une cuirasse peu profonde. Ces caractéristiques pourraient constituer une contrainte physique au transfert hydrique vers les réservoirs souterrains.

Les vertisols sont localisés dans la dépression de la Lama où affleurent les argiles, marnes et calcaires des formations du Paléocène et de l'Eocène (figure 2.4, p. 67 ; figure 2.5, p. 67). Ils sont répartis en vertisols sans drainage externe et à drainage externe (Azontondé, 1991) ou vertisols hydromorphes et lithomorphes (Mama *et al.*, 1998). Les vertisols sans drainage externe sont très argileux (55 à 70 %) à dominance d'argile gonflante. La conductivité hydraulique est de 1 à 3 $cm.h^{-1}$ et la réserve d'eau de 120 à 170 mm. Quant aux vertisols à drainage externe, ils ont des taux d'argile de 60 à 80 % et une réserve d'eau d'environ 170 mm.

Les sols ferrugineux tropicaux lessivés se trouvent au nord du bassin sédimentaire côtier et aux confins de la dépression de la Lama entre 6°30’ et 7°20’ de latitude nord. Ils ont une texture légère (sableux dans tous leurs profils), leur teneur en argile varie de 5 à 25 %. Selon Azontondé (1991), la conductivité hydraulique varie de 5 à 10 $cm.h^{-1}$ et la réserve hydrique autour de 30 à 40 mm. Les sols ferrugineux tropicaux lessivés à engorgement de profondeur sont assez perméables en surface avec une conductivité hydraulique de 4 à 6 $cm.h^{-1}$, mais en

profondeur elle baisse sensiblement pour atteindre 2 ou 3 $cm.h^{-1}$. Leur réserve hydrique est de 40 mm dans les 30 cm et 120 mm en profondeur. Les sols ferrugineux tropicaux lessivés mal drainés ont une profondeur souvent faible (< 1 m) à cause de l'hydromorphie ou de la charge graveleuse importante. La perméabilité est moyenne (2-3 cm/h) en surface et médiocre ($\leq$ 1 cm/h) en profondeur et la réserve hydrique de 70 à 90 mm.

Les sols alluviaux hydromorphes de texture plus lourde (30-60 % d'argile en surface) et de profondeur inférieure à 1 m ont une perméabilité moyenne en surface (4 à 5 cm/h) et faible en profondeur (1 à 2 cm/h). Leur réserve hydrique faible est d'environ 75 ou 100 mm.

Ces sols interviennent dans les processus de transfert et de stockage des aquifères par leurs propriétés hydrodynamiques souvent dépendantes de la couverture végétale.

2.1.5. Caractéristiques hydrodynamiques du couvert végétal

Le couvert végétal intervient dans le cycle de l'eau (figure 1.3, p. 43) et par conséquent dans l'hydrodynamique des réservoirs souterrains. Les travaux de Maître et Jenni (2006) ont montré que la forêt favorise l'infiltration de l'eau dans les sols, comparée aux autres couvertures végétales. La conductivité hydraulique et donc la capacité d'infiltration du sol d'une région dépendent en effet de l'état du couvert forestier. Bharati *et al.* (2002) ont montré que les capacités d'infiltration sont nettement plus élevées (de l'ordre d'un facteur de 5) sous forêt que sous prairie ou cultures. Les sols sous forêt se caractérisent ainsi par une porosité efficace forte et profonde, en raison d'une activité biologique intense et du développement de racines pérennes et profondes (Maître et Jenni, 2006). Cette activité biologique, qui se déroule généralement sous la couche humifère et l'effet de la structure de la zone racinaire constituent des facteurs inhibiteurs de la formation de croûtes imperméables (cuirasse) et diminuent le risque des pertes en eau par ruissellement.

Par contre, pour Heath (1994), la végétation influence la recharge des aquifères à deux niveaux. Dans un premier temps, la végétation intercepte une partie des eaux précipitées par le système de mouillage des feuilles et des autres parties des arbres au début des événements pluvieux. Dans un second temps, les formations végétales procèdent à l'épuisement de l'humidité du sol et de la nappe phréatique en période sèche pour leur croissance et l'entretien du cycle de l'eau à l'échelle du bassin. Henriksen et Kirkhusmo (2000) l'ont prouvé en mettant en évidence une tendance à la hausse des niveaux d'une nappe peu profonde pendant une période de 2 ans après une coupe rase du bassin d'alimentation.

La végétation naturelle du bassin est aujourd'hui formée par les îlots de forêts reliques ou sacrées et de quelques résidus savanicoles, de plus en plus remplacées aussi par les champs, les jachères et les plantations (photo 2.2).



Forêt relique et sacrée à Ouèdo Kpotohou



Formation savanicole de fourrés entre Hêvié et Tori-Avamè



Formation marécageuse de la lagune Dati à Tori-Avamè



Champs et jachères sous palmier à Adjohoun Gbèkandji

(*Clichés, Totin V.S.H., octobre 2009*)

Photo 2.2. Quelques aspects du couvert végétal dans le bassin côtier du Bénin

En dépit des théories contradictoires sur les effets du couvert végétal sur le bilan de l'eau à l'échelle d'un bassin, il importe de conclure que la forêt consomme plus d'eau que les autres couverts végétaux d'une part, et qu'à conditions morphologiques équivalentes, elle favorise indéniablement l'infiltration de l'eau dans les sols, et, par voie de conséquence, la recharge possible des eaux souterraines d'autre part.

L'état de la végétation du bassin sédimentaire côtier du Bénin est marqué, en 2005 par une couverture de formations naturelles (forêts et savanes) de 8,3 % et une prédominance des champs et jachères (67 %). Les 25 % restantes sont constituées par les agglomérations, la plage sablonneuse et les masses d'eau de surface).

Les formations végétales tant naturelles qu'anthropisées interviendraient d'une certaine manière dans les processus hydrodynamiques des aquifères en permettant l'intensification de l'infiltration en saison pluvieuse et l'exfiltration en saison sèche.

2.1.6. Etat de la dynamique des hydrosystèmes superficiels dans le bassin sédimentaire côtier

Le bassin côtier du Bénin est drainé par un réseau hydrographique formé de masses d'eau fluviale, lacustre et lagunaire (figure 2.8). Le réseau hydrographique est formé d'unités semi-permanentes (ruisseaux, rivières, marigots, étangs) relayées, dans les grandes vallées bordières des plateaux par les complexes fluvio-lacustres (Couffo-Ahémé et Ouémé-Sô-Nokoué) et les lagunes.

Le fleuve Ouémé (510 km), après sa confluence avec la rivière Zou (150 km), entaille profondément, sur son cours inférieur, les formations du Continental terminal au niveau des plateaux de Zagnanado, d'Allada et de Sakété. Il se jette ensuite dans le lac Nokoué (150 km²) et la lagune de Porto Novo (35 km²). La pente de la rivière devient extrêmement faible (5 m de dénivelée sur 85 km) (Le Barbé *et al.*, 1993). Le fleuve Ouémé et la rivière Sô qui, jouxte le plateau d'Allada se jettent dans le lac Nokoué respectivement aux environs de Ganvié et à l'ouest de Porto Novo. Les ressources en eau superficielle du bassin de l'Ouémé à Bonou (46 990 km²) sont évaluées à 5429.10^6 m^3.

Les fleuves Mono (148 km) et Couffo (190 km) coulent à travers les formations du Continental Terminal dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin, sur leur cours inférieur. Ils sont portés dans la mer par le biais de la lagune côtière.

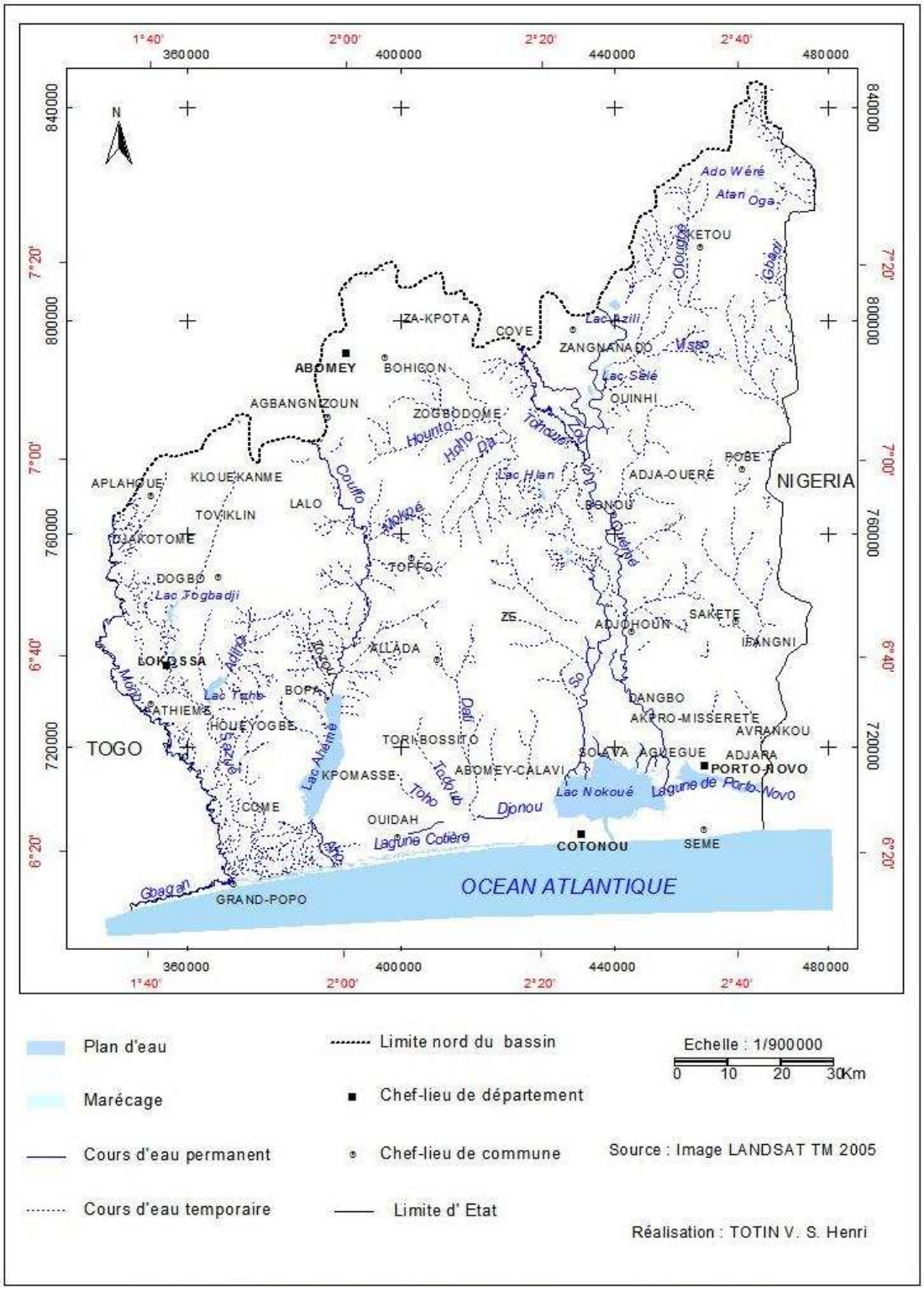


Figure 2.8 : Réseau hydrographique du bassin sédimentaire côtier du Bénin

Selon, BCEOM/SOGREAH/ORSTOM (1993) cité par Amoussou (2010), le capital hydrique est évaluée à 3185.10^6 $m^3.an^{-1}$ pour le bassin du Mono (avec un débit moyen de 119 m^3/s de 1961-2000) et 151.10^6 $m^3.an^{-1}$ pour le bassin du Couffo (avec un débit moyen de 4,9 m^3/s de 1961-2000).

Le profil en long du Couffo (figure 2.9) a une allure exponentielle, les pentes passent de 10 m/km en tête de bassin pour atteindre 0,3 m/km en amont du ''lac'' Ahémé (Le Barbé *et al.*, 1993). Il coule dans un lit étroit, totalement sec à l'étiage (pendant les mois de janvier à mars), sauf à son extrémité sud vers Agbodji dans la commune de Bopa, du fait qu'il coule sur du granite et des embréchites imperméables (Amoussou, 2010). Il est localement appelé lac Toho (Le Barbé *et al.*, 1993) et présente une profondeur variant de 2,50 m à 5 m (Amoussou, 2003).

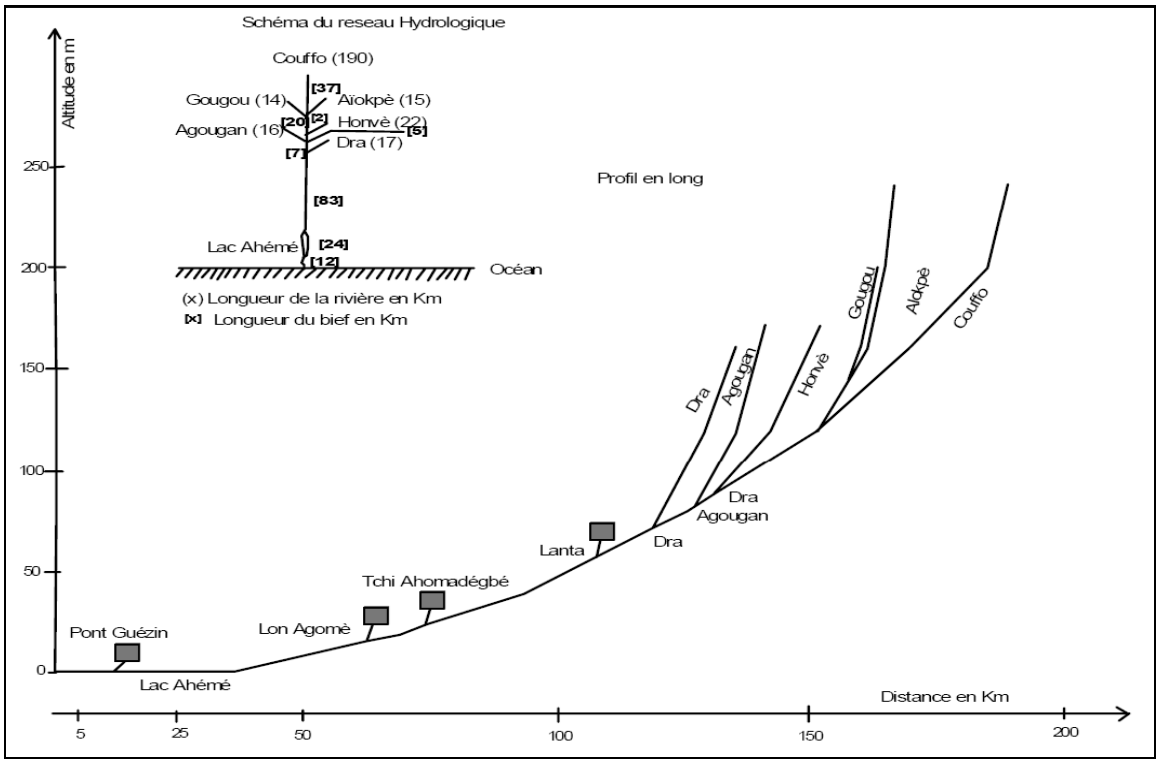


Figure 2.9 : Profil longitudinal du bassin du Couffo (*d'après Le Barbé et al., 1993*)

Sur sa rive droite, les principaux affluents sont : l'Aiokpé (47 km²), le Honvè (166 km²), le Dra (147 km²), et sur la rive gauche, le Gougou (36 km²), l'Agougan (90 km²), et le Lahoun. Ils ont des pentes fortes de 5 à 13 m/km (Le Barbé *et al.*, 1993), facilitant le ruissellement vers le lit : d'où le régime torrentiel du Couffo. Le profil et la géométrie (figure 2.10) du bassin versant du fleuve Couffo par exemple montre que le système de pentes pourrait influencer non seulement l'écoulement de surface mais aussi celui souterrain. Ainsi, l'écoulement dans le bassin du Couffo à la hauteur de Lon Agonmè, en pleine saison sèche, est évocateur de l'effet de la topographie et du pendage sur les échanges d'eau entre fleuve et aquifère.

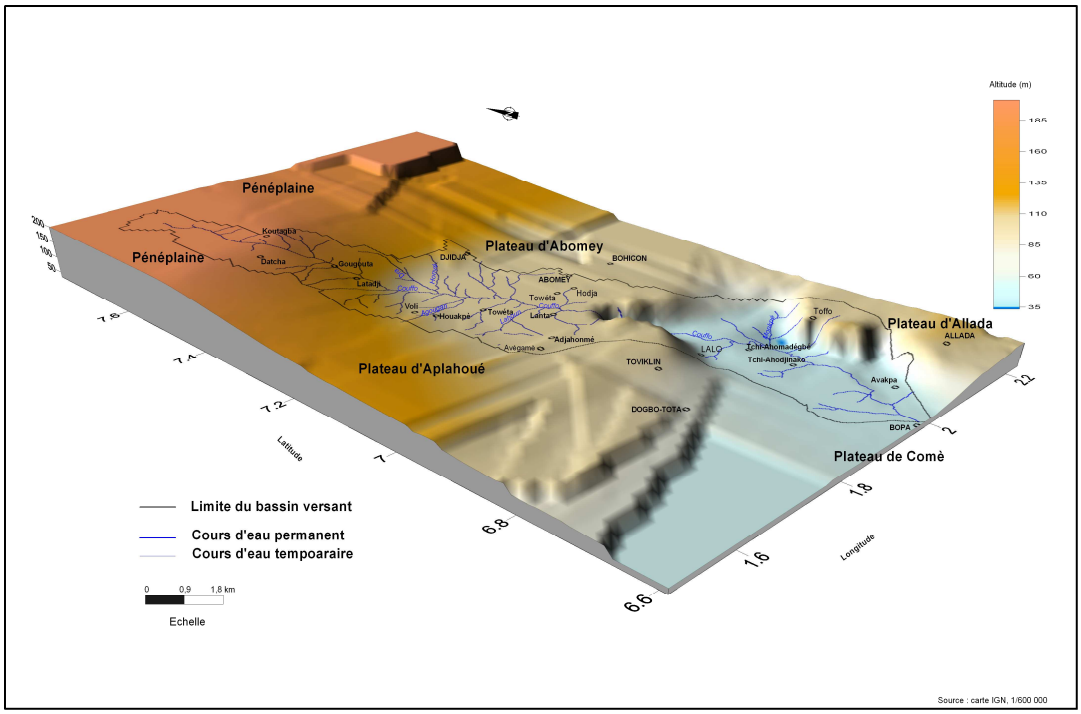


Figure 2.10 : Relief et géométrie du bassin du Couffo (*Source : Amoussou, 2005*)

Les lagunes anciennes, entre autres, Toho, Todougba, Dati, Gbakanmè forment une série de vallées qui entaillent la partie sud du plateau d'Allada. Elles constituent avec la lagune Djonou (entre Cococodji et Godomey) les exutoires des nappes souterraines. Selon Le Barbé *et al.* (1993), les lacs Togbadji (4 km²) et Toho (9,6 km²) à l'ouest caractérisent les ''zones'' d'endoréisme.

La morphologie des bassins hydrologiques constitue ainsi une interface d'échange d'eau entre les hydrosystèmes superficiels et souterrains tant en période humide qu'en période sèche comme l'illustre la photo 2.3, car la disponibilité en eau en période d'étiage serait induite en partie par le déstockage des nappes.



(*Cliché, Totin V.S.H., janvier 2010*)

Photo 2.3. Morpho-structure partielle du bassin hydrologique de l'Ouémé à Bonou à l'étiage

Les plateaux du Continental terminal, par leur forme et leur pente, fournissent aussi aux cours d'eau du bassin des apports liquides lors du ruissellement superficiel et souterrain comme l'illustre la figure 2.11. En général, trois cas de connections nappes-rivières peuvent se présenter : (1) la rivière draine la nappe ; (2) la rivière alimente la nappe, les deux étant connectées ; (3) la rivière alimente la nappe, les deux étant déconnectées.

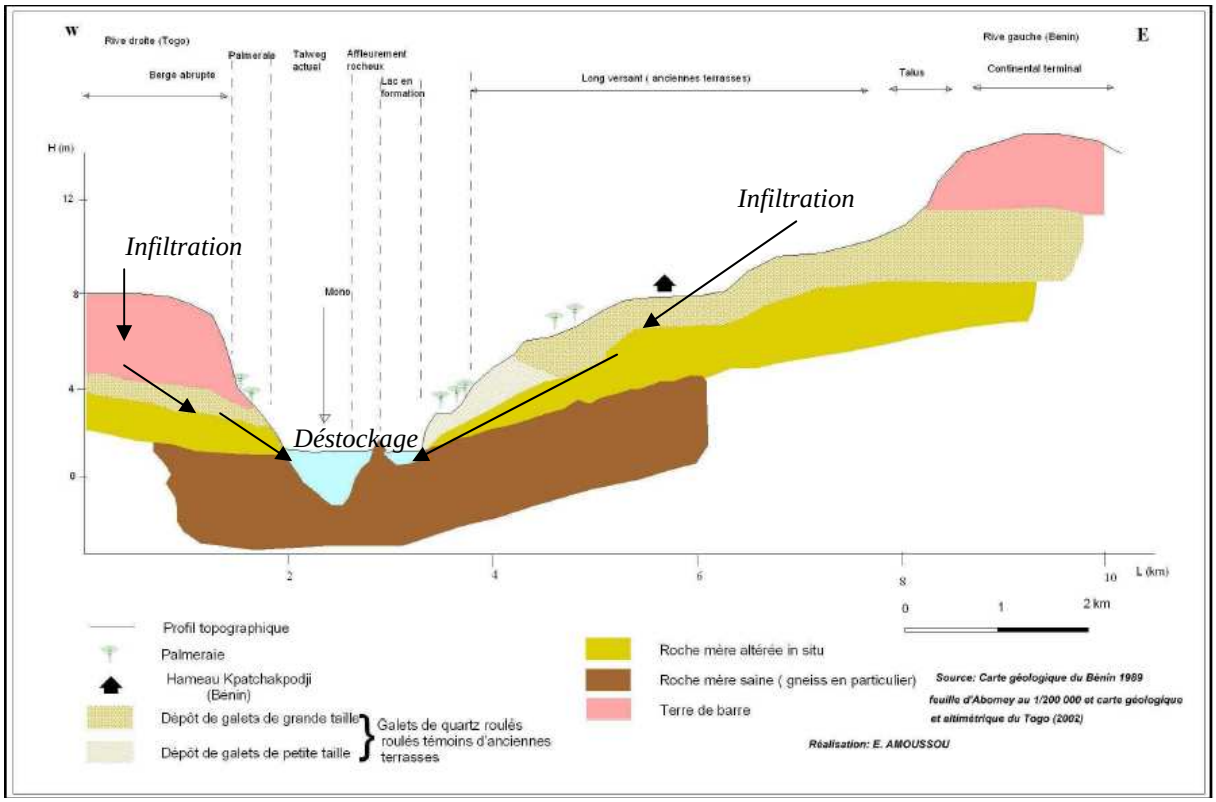


Figure 2.11 : Schéma transversal de la vallée du Mono au niveau du hameau Kpatchakpodji (*Adapté de Klassou, 1996 et Amoussou, 2010*)

Le réseau hydrographique du bassin sédimentaire côtier est d'une complexité liée au contact de différents systèmes hydrologiques (fleuve-lac et/ou lagune), à leurs interrelations avec les réservoirs souterrains et aux facettes climatiques.

Le potentiel en eau de surface du bassin côtier reste encore peu exploité à des fins d'alimentation en eau et pour le développement agricole. Les unités hydrographiques entretiennent des relations hydrauliques avec les nappes d'eaux souterraines en fonction de la dynamique du système climatique régional et local.

2.1.7. Facteurs climatiques de la dynamique des eaux souterraines

La circulation atmosphérique de la région ouest africaine est régie par trois centres d'action : l'anticyclone des Açores, celui de Sainte-Hélène et l'anticyclone égypto-libyen (Dhonneur,

1979 ; Leroux, 1983 ; Boko, 1988 ; Janicot, 1989 ; Fontaine et Janicot, 1993 ; Fontaine *et al.*, 1995, etc.). Le fonctionnement alternatif de ces centres génère la circulation de surface en Afrique de l'Ouest (Fontaine, 1981 ; Philippon, 2002), sur le Bénin (Bokonon-Ganta, 1987 ; Boko, 1988, Houssou, 1998, Houndénou, 1999). En effet, l'influence combinée de l'anticyclone des Açores (hémisphère nord) et de l'anticyclone de Sainte-Hélène (hémisphère sud) dirige sur le bassin sédimentaire du Bénin les flux océaniques et continentales et par conséquent les différentes saisons, élément moteur de la dynamique hydrologique dans les hydrosystèmes superficiels et souterrains.

L'anticyclone dynamique des Açores donne naissance à l'alizé du nord, vent relativement frais, riche en vapeur d'eau n'influençant que les franges ouest de la Mauritanie et du Sénégal. L'anticyclone continental du Sahara qui donne naissance à l'harmattan (un vent de nord-est, sec et chaud) mais n'est permanent que dans les couches moyennes de l'atmosphère (Amram, 1996). Quant à l'anticyclone dynamique de Sainte-Hélène, dans l'Atlantique sud, il est responsable d'un vent maritime de direction sud-ouest, tiède et très humide, qui prend le nom de mousson après son passage dans l'hémisphère nord. Il s'agit d'un phénomène caractéristique des conditions pluviogènes de l'Afrique de l'Ouest (Janicot, 2002 ; Sultan et Janicot, 2004). La mousson est le principal facteur régulant le cycle hydrologique et sa variabilité a un impact majeur sur les ressources en eau,… (Lebel *et al.*, 2003). A ce centre d'action sont liées les pluies dont dépend, essentiellement entre juin et septembre, la réalimentation des aquifères à nappes libres et même captives dans les secteurs où elles sont libres au nord du bassin sédimentaire côtier du Bénin.

La convergence des flux d'harmattan et de mousson au niveau d'une zone de basses pressions (ZCIT), induit des mouvements convectifs et de la pluie. Au sein de celle-ci, le FIT : Front Inter Tropical (Leroux, 1970) constitue la limite entre le flux d'air humide venant de l'hémisphère sud et le flux d'alizés à composante nord-est et plus chaud et sec après sa traversée du Sahara. Les variations saisonnières de la position du FIT et de la ZCIT conditionnent la répartition des précipitations en fonction du cycle de la mousson ouest-africaine (figure 2.12).

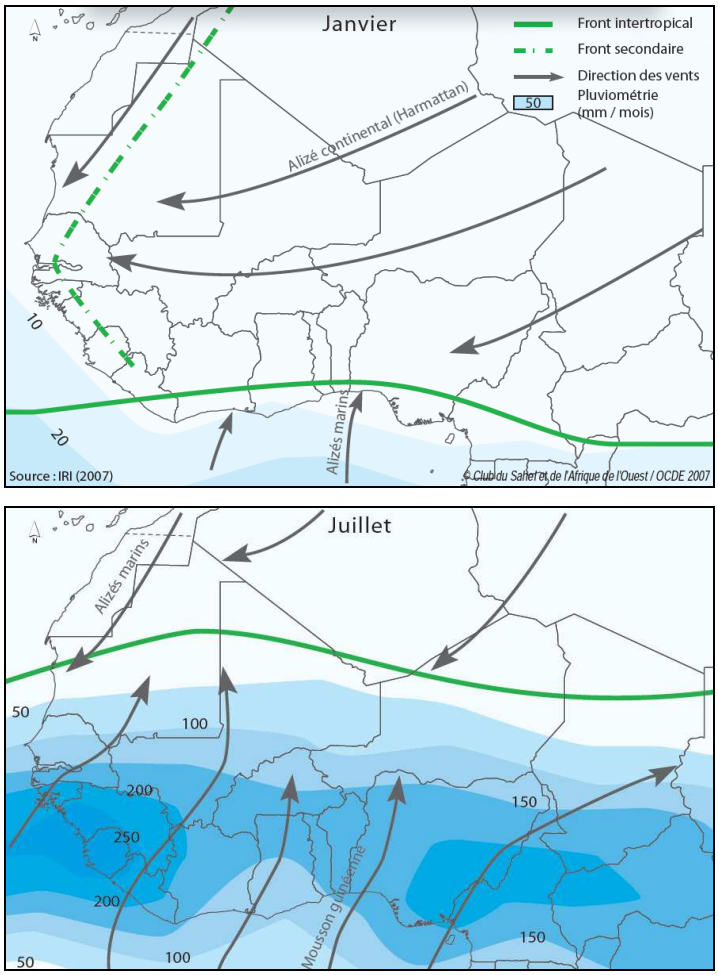


Figure 2.12 : Cycle de la mousson en Afrique de l'Ouest

Ce déroulement saisonnier voit donc se succéder au-dessus du bassin sédimentaire côtier du Bénin quatre grandes « zones de temps » différentes (figure 2.13). La zone A, au nord du tracé au sol du FIT, indique la grande saison sèche du bassin, avec la quasi absence des précipitations.

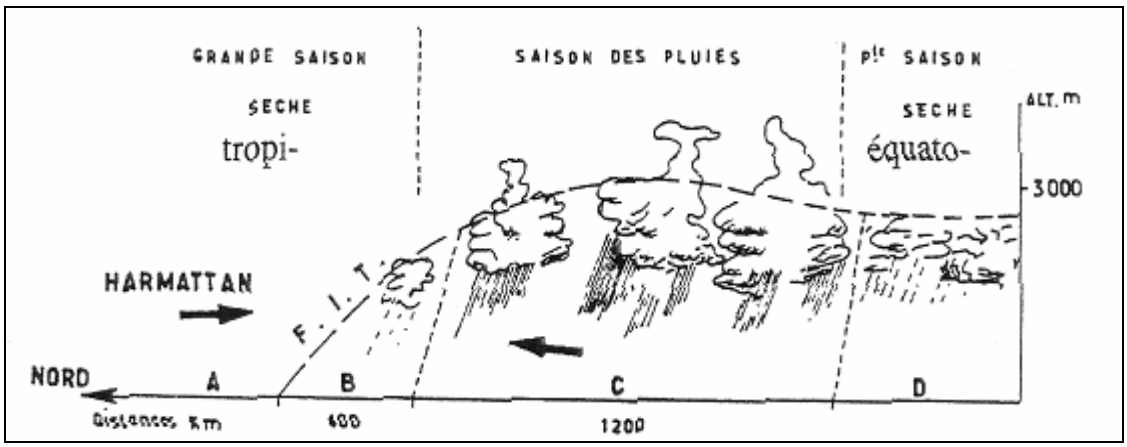


Figure 2.13 : Schéma des types de temps saisonniers en fonction de leur position par rapport au front intertropical (FIT). *Source : Casenave et Valentin, 1989*

L'épaisseur de la mousson varie au sud du tracé au sol du FIT et sur une distance de 300 à 400 km (zone B), elle n'est pas suffisamment importante pour qu'il ait un développement convectif puissant (Laporte, 1990). La zone B s'étend sur le bassin côtier du Bénin entre mars et avril. Quant à la zone C, elle développe des pluies plus intenses et persistantes en mai-juin en fonction de l'épaisseur de la mousson (1 500 à 2 000 m ou plus). Sur le plan hydrodynamique, cette zone C, de par ses manifestations pluvieuses, serait l'élément moteur de la réponse hydrologique des aquifères à l'impact pluviométrique.

En plus de ces deux masses d'air, il existe dans les couches supérieures de la troposphère entre 200 et 100 hPa et entre 600 et 700 hPa deux masses d'air. Il s'agit du Jet d'Est Tropical (JET) et du Jet d'Est Africain (JEA) qui influencent la variabilité pluviométrique en Afrique de l'ouest (Dhonneur, 1974 ; Boko, 1988 ; Houndénou, 1999). Les cellules anticycloniques, centrées sur le domaine asiatique, dirigent un flux d'Est appelé Jet d'Est Tropical (JET), qui s'étend jusqu'à l'Afrique de l'ouest, où il se réactive sous l'influence de la convection dans la ZCIT africaine et de la circulation de Hadley de l'Hémisphère Sud (Janicot, 2002).

Le bassin sédimentaire côtier situé globalement entre les 5° et 8° de latitude nord reçoit de faibles pluies, générées par un flux de mousson peu épais et divergent étant donné que la zone C (C1 et C2) est au-delà du 10° Nord. Le JTE atteint l'Afrique de l'Ouest entre 5 et 10°N (qui intègre entièrement la bassin sédimentaire côtier du Bénin) dans la haute troposphère en juillet-août. Ces jets, en plus de la mousson ouest-africaine, y modulent la pluviosité. Les pluies dues aux ondes d'Est donnent des orages et des averses orageuses, parfois abondantes selon la texture des amas nuageux. Les lignes de grains font leur expression la plus fréquente (Afouda, 1990). Le potentiel précipitable dépend en grande partie de l'apport hydrique de la mousson atlantique (Houndénou, 1999) associée à d'autres phénomènes tels que les lignes de grain, les ondes d'Est, les perturbations zonales, etc.

A l'échelle du bassin sédimentaire côtier du Bénin, les phénomènes pluviogènes liés à la circulation atmosphérique au-dessus de l'Afrique de l'Ouest ont créé le climat soudano-guinéen ou subéquatorial, appelé « climat béninien » (Boko, 1988 ; Adam et Boko, 1993). Le climat de la région d'étude est caractérisé par deux saisons sèches et deux saisons pluvieuses avec une inégale répartition spatio-temporelle des pluies comme le montre les régimes pluviométriques de quelques stations (figure 2.14).

La diversité de régimes pluviométriques bimodaux observés dans le bassin le structure en secteurs plus arrosé, moyennement arrosé et faiblement arrosé. A cet effet, la partie sud-est où

la station de Sèmè enregistre environ 1422 mm reçoit plus de pluie que le secteur sud-ouest avec à Grand Popo 964 mm étant donné qu'il situé dans la diagonale de sécheresse.

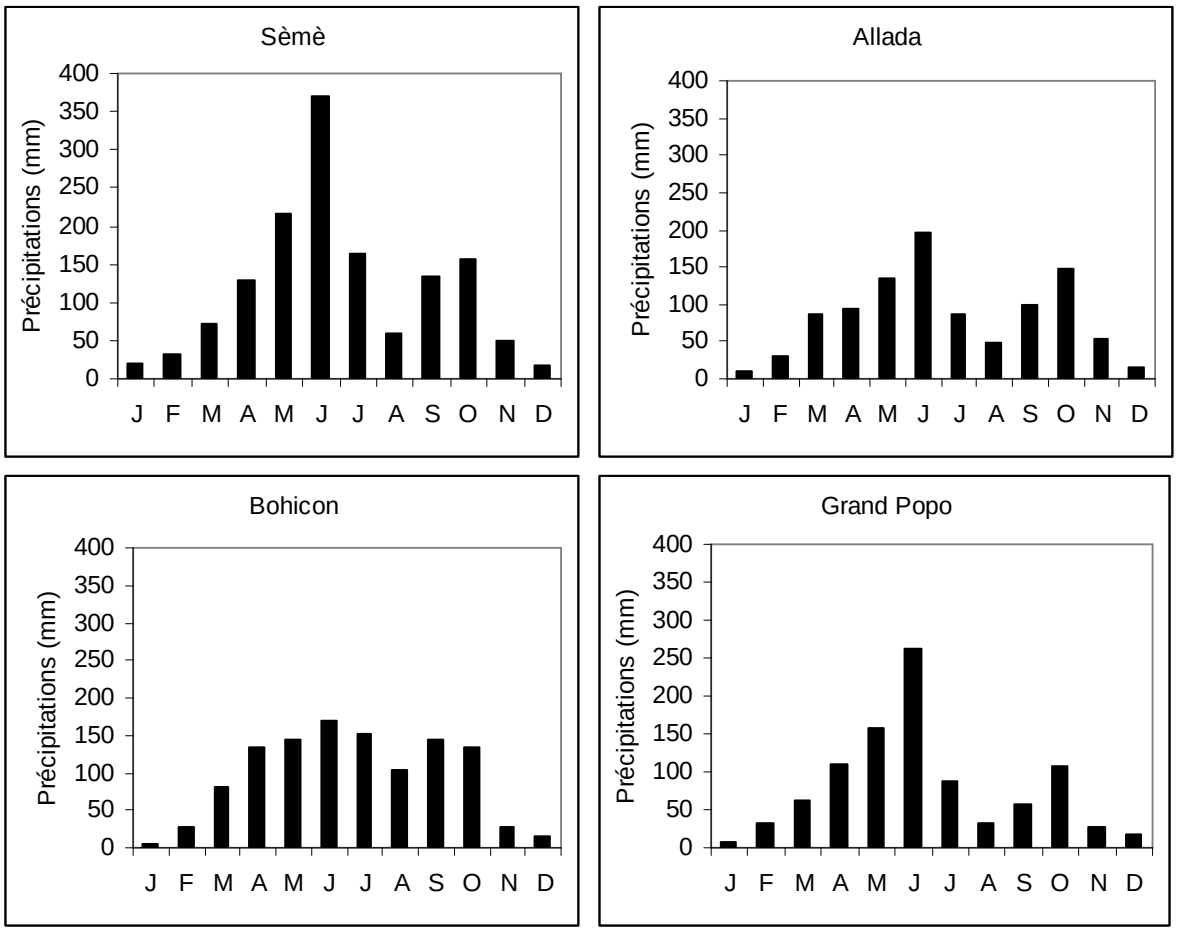


Figure 2.14 : Régimes pluviométriques caractéristiques du bassin sédimentaire côtier du Bénin

Les secteurs à pluviométrie élevée pourraient abriter des réservoirs à forte disponibilité d'eau souterraine à l'opposé de ceux situés par exemple dans le sud-ouest du bassin côtier.

Les pluies de mousson ouest-africaine constituent les plus importantes perturbations qui conditionnent la disponibilité en eaux pluviales, superficielles et souterraines et par conséquent le développement des activités socioéconomiques dans le bassin sédimentaire côtier.

2.2. Populations et activités socioéconomiques : deux éléments de pression sur les ressources en eaux souterraines

La population du bassin sédimentaire côtier du Bénin est formée d'une pluralité de groupes socioculturels, inégalement répartis. Elle est aussi en forte augmentation et les activités socioéconomiques qu'elle pratique constituent, dans une certaine mesure, un facteur de pression sur les eaux souterraines.

2.2.1. Mosaïque sociolinguistique d'une population en forte croissance

L'occupation humaine du bassin côtier du Bénin est faite par désintégration des groupes Tado venus du Togo et Ilé-Ifè du Nigéria. Boko (1975) situe le peuplement de la région entre le XIIIe siècle et 1930 à partir des foyers de dispersion de Tado et d'Ifè-Ilé. Par flux migratoires, des noyaux d'installation humaine se sont certainement formés autour des masses d'eau superficielles et souterraines essentiellement les sources naturelles ou les puits artésiens et les terres plus ou moins loin des points d'eau. Ainsi distribuées dans l'espace du bassin, les populations ont forment les civilisations d'eau et celles de terres.

2.2.1.1. Groupes sociolinguistiques

Le bassin sédimentaire côtier du Bénin est occupé par les groupes sociolinguistiques formant les civilisations fluviales, lacustres ou lagunaires tels que les Toffin et les Ekpè-Xula autour du lac Nokoué et de la lagune de Porto Novo, les Xula-Wxéda sur les bords du lac Ahémé et des lagunes côtières. Quant à la basse vallée du fleuve Ouémé, elle est occupée par les Wémè et affiliés dont les premières habitations jouxtent les exutoires des réservoirs souterrains (sources, etc.). Ces groupes sociolinguistiques dépendent pour l'approvisionnement en eau domestique et l'organisation de leurs activités socioéconomiques de ces systèmes naturels d'eau. Il en est de même des populations de Massi, Bopa, de Ouèdèmè Adja, de Doga à Zagnanado, Bonou, etc., probablement attirées par les sources, qui coulaient librement.

Les migrations ont conduit une deuxième tranche de populations vers les plateaux où les terres sont exploitables à des fins de développement de l'agriculture pluviale, dominante dans le bassin. Les groupes sociolinguistiques isolés des points d'eau sont, en majorité, constitués de Aïzo sur le plateau d'Allada, de Fon sur le plateau d'Abomey, de Nagot, Yoruba et Goun sur les plateaux de Sakété et de Kétou. Quant aux Adja, ils sont installés essentiellement à l'ouest sur le plateau d'Aplahoué. A ces communautés autochtones s'ajoutent les minorités linguistiques allochtones du Nigéria, du Ghana, du Togo, du Niger, etc. dont l'effectif est en forte augmentation.

2.2.1.2. Etat de la population : croissance et densité

Le bassin sédimentaire côtier du Bénin est occupé par une population qui est passée de 2 045 276 habitants en 1979 et 3 040 670 habitants en 1992 à 4 004 658 habitants en 2002. Elle représentait 61 % en 1979, 62 % en 1992 et 60 % en 2002 de la population totale du Bénin.

Elle augmente à un taux d'accroissement naturel (entre 1992 et 2002) qui varie selon les communes entre 0,64 % à Ifangni et 9,44 % à Abomey-Calavi (figure 2.15).

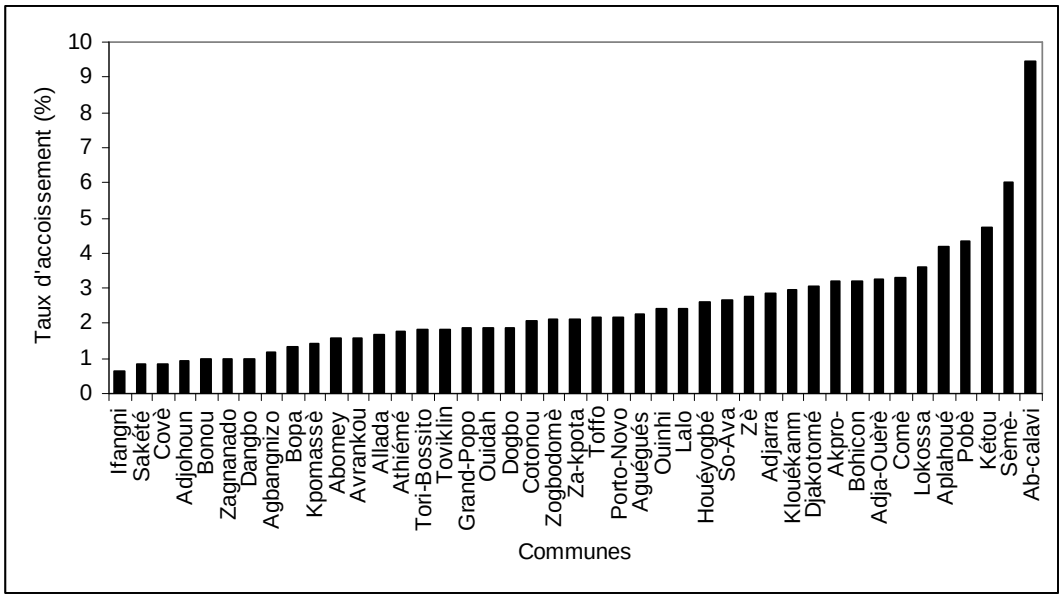


Figure 2.15 : Taux d'accroissement intercensitaire des communes du bassin côtier du Bénin

Source : Traitement de données du RGPH (2003)

La population estimée en 2008, sur la base de ces taux d'accroissement intercensitaire, est de 4 835 946 habitants. Elle a varié selon les communes de 21 333 à 536 827 habitants en 1992 ; 26 650 à 665 100 habitants en 2002 et de 30 457 à 756 343 habitants. Les grandes agglomérations telles que Cotonou, Abomey-Calavi, Porto-Novo, etc. détiennent le potentiel humain le plus élevé et par conséquent les plus fortes demandes en eau. Ces trois communes totalisent 31 % de la population totale du bassin avec respectivement 756 343 ; 524 610 et 255 325 habitants. La concentration humaine s'observe également au niveau de nouveaux pôles d'attraction que sont les communes frontalières telles que Sèmè-Kpodji, Pobè, etc.

L'inégale concentration humaine dans le bassin expliquerait la variation spatiale de la densité et conséquemment de la pression sur les ressources en eaux souterraines. Elle est en moyenne de 597 habitant/km² avec une variation spatiale de 51 à 9574 habitant/km² en 2008, 29 à 6795 habitant/km² en 1992 et 46 à 8419 habitant/km² en 2002. L'inégale densité de population permet de déterminer les secteurs du bassin sous forte emprise d'exploitation des eaux surtout souterraines. La projection démographique (population et densité) de la figure 2.16 montre une forte occupation humaine et conséquemment l'augmentation de la charge humaine de la ponction des ressources hydriques. La population doublera en 2025 et la densité le sera entre 2030 et 2035 par rapport aux données de 2008 et présage une exploitation plus accrue des eaux souterraines pour satisfaire la demande exponentielle dans le bassin.

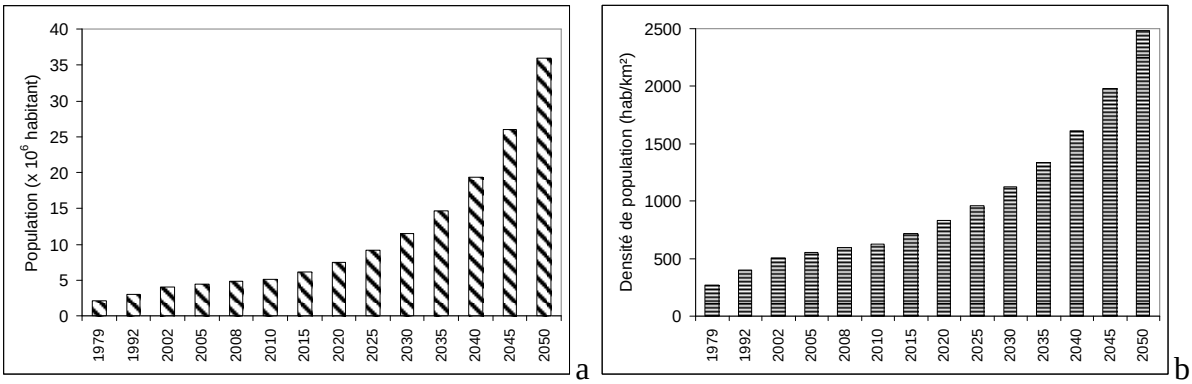


Figure 2.16 : Projections démographiques aux horizons 2025 et 2050 : population (a) et densité (b)

La concentration humaine serait un facteur clé de la dégradation des ressources en eau, surtout dans les secteurs où les formations géologiques non saturées sont peu épaisses pour protéger la nappe phréatique contre les sources de pollution comme dans la plaine côtière.

2.2.2. Activités socioéconomiques organisées autour des hydrosystèmes

La principale activité agricole pour laquelle sont exploitées les ressources en eaux souterraines est la culture maraîchère dans les centres urbains ou dans leurs quartiers périphériques. En général, l'agriculture est essentiellement pluviale en dehors des périmètres rizicoles et des sites maraîchers où l'irrigation est pratiquée à l'aide des ouvrages hydrauliques captant la nappe phréatique surtout dans la plaine côtière (photo 2.4).

L'irrigation sur les périmètres maraîchers du bassin pourrait induire un transfert de polluants chimiques ou organique vers les nappes et la contamination de leurs eaux.



Clichés Totin V.S.H., octobre 2009 et janvier 2010

Photo 2.4. Petite irrigation sur le périmètre maraîcher de Ewécondji à Grand Popo

Les cultures pratiquées dans le bassin et ne bénéficiant pas encore d'apport d'eau à partir des réservoirs souterrains sont en particulier les produits vivriers (maïs, niébé, manioc, riz, patate, etc.). Même l'ananas, la nouvelle culture de rente en plein essor, n'est pas encore irrigué

comme dans les grandes exploitations des pays de la sous-région (Côte d'Ivoire, Ghana, etc.). Cette culture ajoutée à celle du coton (dans le secteur nord du bassin) nécessite l'utilisation des intrants agricoles chimiques ; ce qui constitue une menace sur la qualité des eaux.

Par ailleurs, la transformation des produits agricoles (manioc, noix de palme, soja, arachide et ananas) nécessiterait des quantités importantes d'eau. La pisciculture est pratiquée grâce à des ouvrages hydro-agricoles aménagés et captant souvent la nappe phréatique peu profond dans les vallées, les plaines inondables des masses d'eau de surface ou la plaine côtière (photo 2.5).



a b

Cliché Totin V.S.H., Février 2005 et mai, 2008

Photo 2.5 : Ouvrages piscicoles traditionnels à Couffonou (a) et à Nazoumè (b)

Les niveaux d'eau dans ces infrastructures fluctuent généralement en fonction des événements hydroclimatiques dans les bassins versants auxquels elles sont reliées. Sous un autre angle, les eaux souterraines sont très sollicitées pour les complexes hôteliers et industriels dont la zone côtière en abrite plus des 80 % (MEPN/CEDA, 2007).

Conclusion partielle

Les facteurs géographiques physiques sont les principaux déterminants de la disponibilité des eaux souterraines. Elles servent à l'approvisionnement en eau de consommation pour les populations urbaines et rurales en augmentation exponentielle. De plus, les activités socioéconomiques, notamment industriels, hôtelières, agricoles qui sont pratiquées dans le bassin constituent une source importante de l'augmentation de la demande en eau surtout souterraine.

Ces facteurs de pression sur les ressources en eau se développent dans un contexte hydroclimatique critique mis en évidence par les tendances observées et projetées dans le chapitre III.

DEUXIEME PARTIE

ETAT, TENDANCE, SCENARIOS CLIMATIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DES NAPPES SOUTERRAINES DANS LE BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN

Chapitre III

TENDANCES ET SCENARIOS CLIMATIQUES DANS LE BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN

La variabilité climatique est l'un des principaux facteurs de la dynamique du cycle hydrologique. A cet effet, il s'est avéré nécessaire dans cette étude d'analyser les tendances actuelles et de déterminer les scénarios futurs des événements climatiques dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Cette étude est focalisée sur la caractérisation de l'état, des tendances et des scénarios climatiques en tenant compte de la pluviométrie, de la température et de la demande évapotranspiratoire.

3.1. Variabilité et tendance climatique dans le bassin sédimentaire côtier

L'analyse diagnostique de l'évolution du climat est faite au pas de temps mensuel, saisonnier, annuelle et en fonction du changement observé depuis les années de ruptures détectées et en considérant la période 1951-2005 pour mieux mettre en évidence la variabilité climatique.

3.1.1. Variabilité pluviométrique

La variabilité spatio-temporelle des précipitations est analysée à travers le rythme pluviométrique aux pas de temps mensuel, saisonnier et annuel.

3.1.1.1. Champs de pluie mensuels, saisonniers et annuels du bassin côtier

Le régime pluviométrique moyen du bassin sédimentaire côtier du Bénin est bimodal avec un premier optimum en juin et un second en octobre. L'évolution inter-mensuelle des précipitations est liée au passage des différentes zones A, B, C et D de la mousson (figure 2.13, p. 85) et la position du front intertropical (FIT) (figure 2.12, p. 85) sur le bassin. Le passage des zones pluviogènes de la mousson est le principal facteur de répartition spatiale des pluies mensuelles (figure 3.1). Il apparaît ainsi que les précipitations augmentent de 38 mm en février à 247 mm en juin, diminuent à 96 mm en août pour atteindre un second maximum de 150 mm en octobre. Les plus faibles pluies sont enregistrées entre novembre (47 mm) et janvier (20 mm).

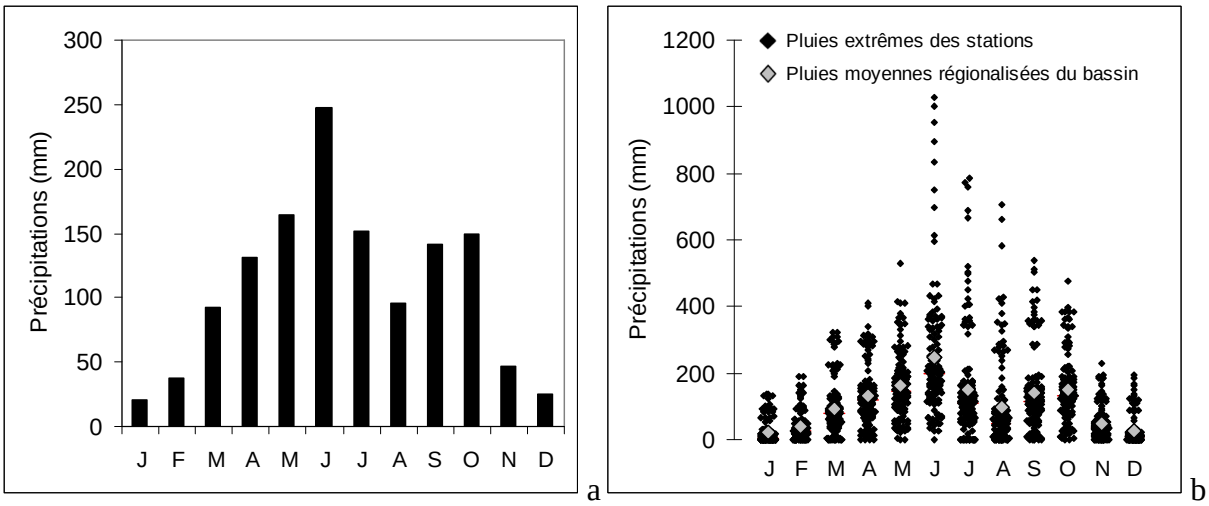


Figure 3.1 : Régimes pluviométriques mensuels moyens régionalisés (a) et extrêmes stationnels (b) sur le bassin côtier du Bénin (1951-2005)

Les événements pluviométriques mensuels extrêmes sèches et humides au niveau des stations sont trois à quatre fois plus importants que la pluviométrie moyenne régionalisée du bassin.

A l'échelle des stations, les précipitations sont de 95 à 146 mm en avril et de 158 à 370 mm en juin où le resserrement des isohyètes (figure 3.2) explique la concentration des lames d'eau précipitée et probablement une augmentation de la charge hydraulique des aquifères. Elles varient de 33 à 113 mm en août, 57 à 154 mm en septembre et 108 à 175 mm en octobre. En outre, les mois de novembre, décembre et janvier enregistrent respectivement 17 à 66 mm, 8 à 20 mm et 6 à 20 mm. Ce qui caractérise pour cette période, un état de sécheresse dans le bassin, dont l'amplitude varie suivant les champs de pluie stationnels.

La période de mars à juillet « grande saison pluvieuse » est celle pendant laquelle les pluies cumulées contribueraient à la reconstitution des stocks d'eau des horizons de sols et à la réalimentation des réservoirs souterrains. Dans ces conditions, toute modification de la structure des précipitations au cours de ces mois perturberait le fonctionnement hydrogéologique du bassin côtier du Bénin.

Le contraste pluviométrique entre le sud-ouest (moins arrosé) et le sud-est (plus arrosé) pendant la période de juillet-août-septembre en particulier s'explique, entre autres, par l'effet de la remontée d'eaux froides (upwelling).

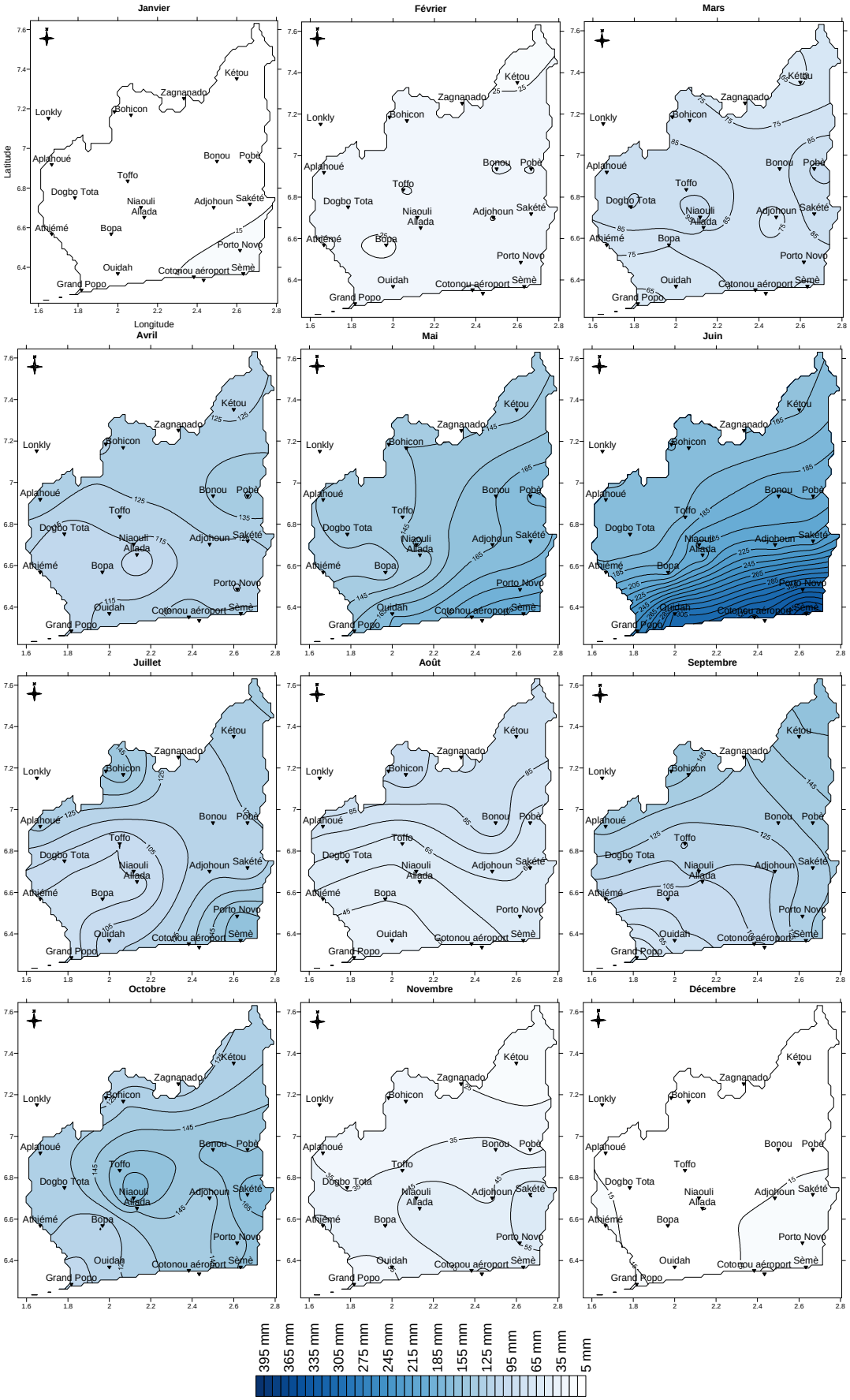


Figure 3.2 : Champs de pluie mensuels moyens (1951-2005) dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin

La figure 3.3 montre la variation des températures de surface d'eau de mer dans le golfe de Guinée.

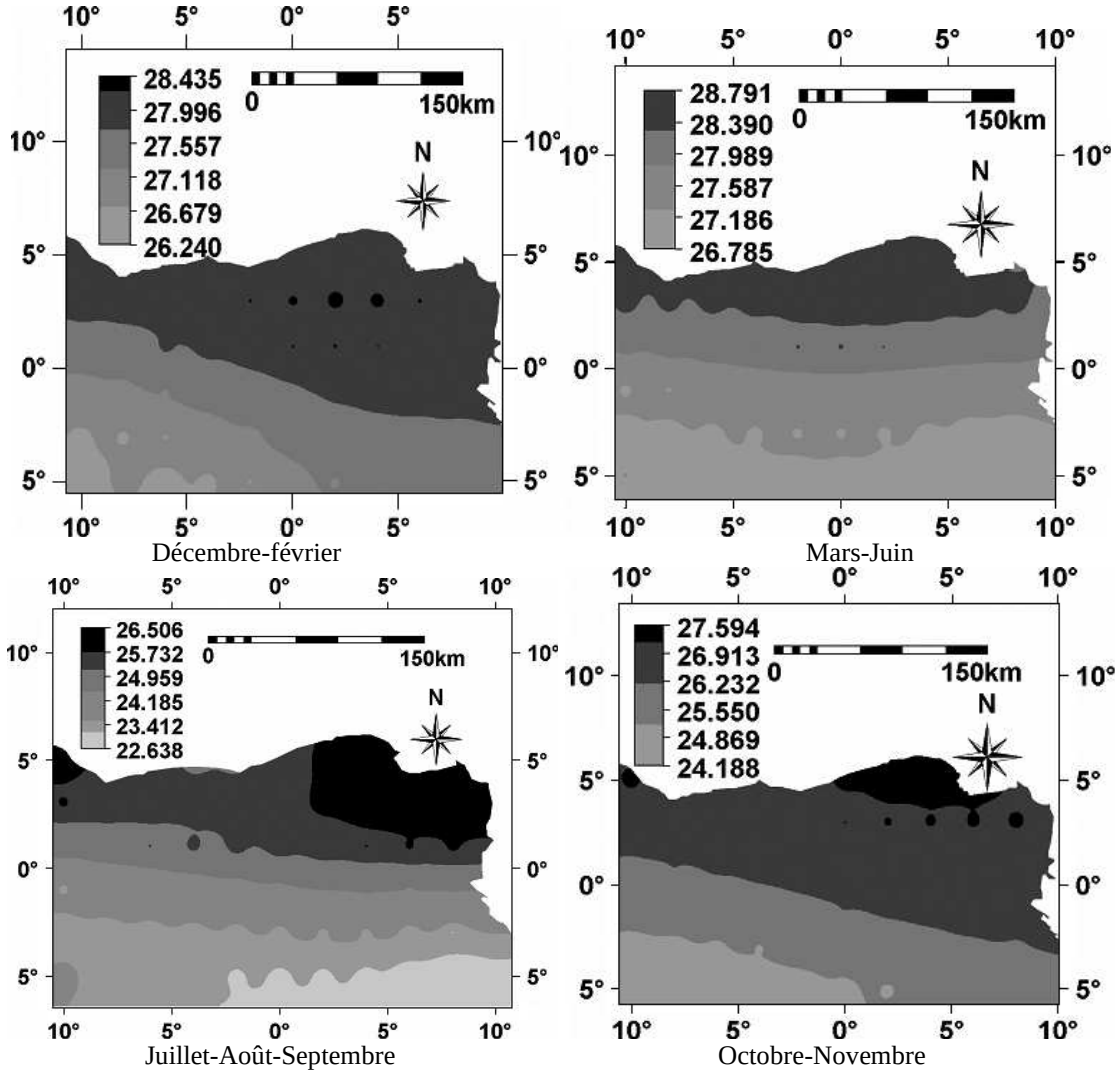


Figure 3.3 : Evolution des températures moyennes de surface de mer sur la période 1950-1998 dans le golfe de Guinée (*Odekunle & Eludoyin, 2008*)

Les températures de surface d'eau de mer (24 à 26 °C) sont faibles dans le secteur sud du bassin côtier du Bénin pendant la période de juillet-août-septembre contre 27 à 28 °C entre mars et juin. L'upwelling renforce le phénomène de la faible pluviométrie du secteur côtier occidental comme l'illustre l'incursion des isohyètes du sud-ouest vers le nord-est et l'importance de l'effet de la diagonale de sécheresse (figure 3.2. p. 101). Le champ de pluie de Grand Popo, situé dans ce secteur moins arrosé correspond, selon Toffi (2008) au secteur maritime à forte influence d'upwelling. Tabeaud et Kergomard (1990) ont montré, en ce qui concerne la récession pluviométrique d'août que « le phénomène d'upwelling côtier du golfe de Guinée entraîne un refroidissement des eaux de surface (…) inhibant les processus pluviogènes et aboutissent à la ''petite saison sèche''. Les cumuls de pluie saisonniers

permettent de faire ressortir les particularités du bassin pendant les différentes périodes de l'année (figure 3.4).

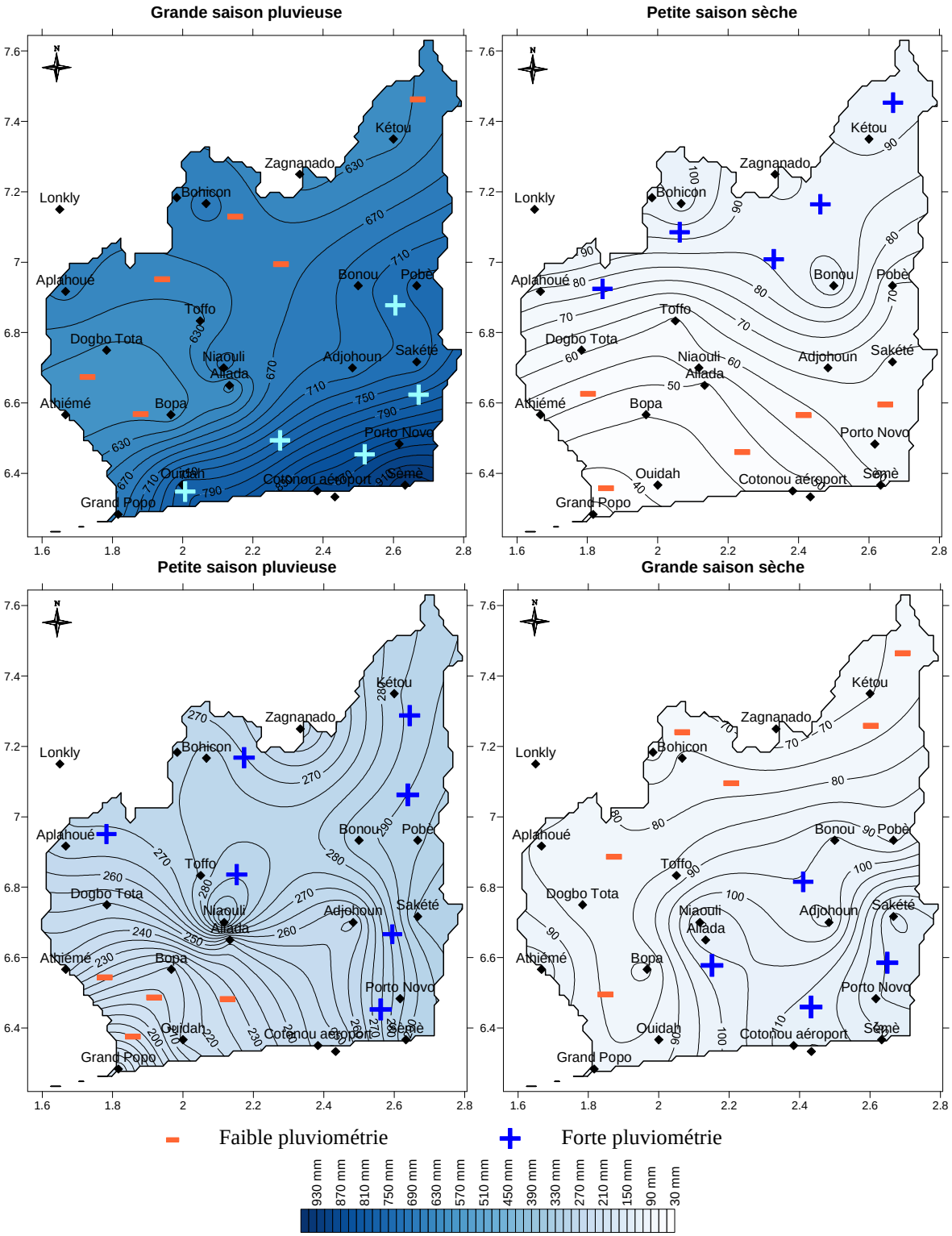


Figure 3.4 : Champs de pluie saisonniers moyens du bassin côtier du Bénin (1951-2005)

Les totaux pluviométriques sont en moyenne de 704 mm pour la grande saison pluvieuse, 249,7 mm pour la petite saison pluvieuse, 67 mm pour la petite saison sèche et 93 mm pour la

grande saison sèche. Ces données montrent une grande nuance dans la répartition spatiale des pluies avec un gradient décroissant respectif sud-est – nord-ouest, nord – sud, nord-est – sud-ouest et sud-est – nord-ouest pour les quatre saisons. Les cumuls pluviométriques varient à l'échelle stationnelle de 594 à 952 mm, 33 à 113 mm, 165 à 302 mm et 66 à 132 mm respectivement pour les différentes saisons.

Les parties sud et sud-est du bassin sont plus arrosées pendant les grandes saisons pluvieuse et sèche que les secteurs nord et ouest. Le champ de pluie de la petite saison pluvieuse est moins arrosé dans le secteur sud-ouest et dans tout le secteur sud pendant la petite saison sèche. L'humidification progressive de la petite saison sèche (août) au nord du bassin côtier du Bénin serait due à un ralentissement ou un stationnement de la zone C2 en déplacement vers la partie septentrionale du Bénin. Mais elle serait également liée à l'estompage progressif des effets du phénomène d'upwelling vers le nord du bassin. La lame d'eau pluviale est de 63 % à 23 % du cumul annuel pendant la grande et la petite saison pluvieuse contre 14 % pour les deux saisons sèches. Mais, à l'échelle stationnelle, elles varient de 53 à 85 % et 15 à 27 % pour la grande et la petite saisons pluvieuses contre 3 à 10 % pour la petite saison sèche et 6 à 12 % pour la grande saison sèche. Ce qui impliquerait un apport différentiel d'eau pluviale suivant les saisons pour la réalimentation des réservoirs souterrains du bassin, bien que cette recharge soit fonction de la pluviométrie annuelle.

Le champ de pluie annuel moyen du bassin est de 1136 mm et varie de 932 à 1421 mm sur la période 1951-2005 et suivant un gradient croissant sud-ouest – sud-est (figure 3.5a). Quant à la répartition spatiale des coefficients de variation, elle montre un contraste sud-nord (figure 3.5b). La sécheresse qui caractérise le sud-ouest au cours des deux saisons sèches et pendant la petite saison pluvieuse semble ne pas imprimer sa marque sur les coefficients de variation.

Les isohyètes décrivent globalement trois champs de la pluviométrie dans le bassin. Le champ humide est formé dans le secteur sud-est autour de Porto Novo (1333 mm), le champ modéré dans les secteurs central et nord autour d'Abomey (1100 mm) et le champ sec dans la région de Grand Popo-Bopa (964 mm). Un net contraste pluviométrique s'observe dans le sud du bassin à l'opposé de sa partie nord plus homogène. Cette nuance spatiale de la répartition des précipitations est déjà mise en évidence suivant un gradient est-ouest sur la côte Atlantique, entre Accra et Lagos par Bokonon-Ganta (1987), au Bénin par Boko (1988). Les hauteurs de pluie connaissent, à l'échelle annuelle, une variation de l'ordre de 25 à 30 % contre 20 à 24 % dans la partie continentale du bassin.

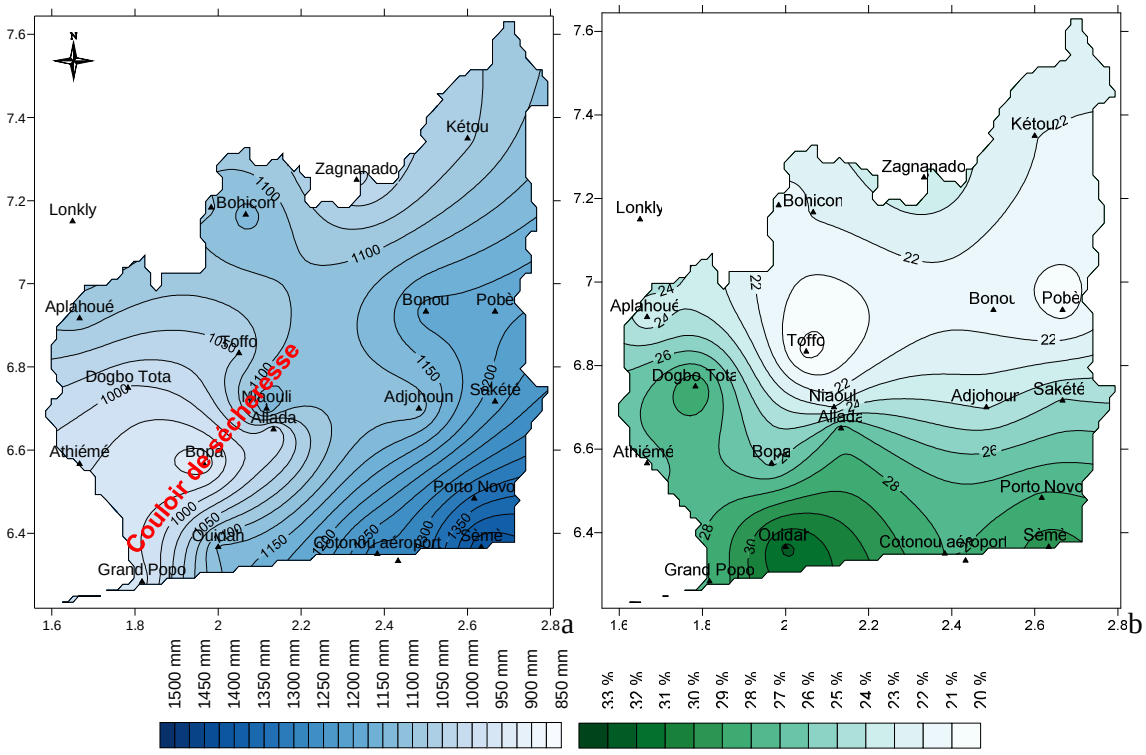


Figure 3.5 : Variation spatiale des champs de pluie annuelle moyenne (a) et des coefficients de variation (b) dans le bassin côtier du Bénin

L'évolution des pluies annuelles est marquée par une forte variation au regard des valeurs extrêmes et normales du tableau 3.I.

Tableau 3.I : Pluies annuelles moyennes et extrêmes des stations du bassin côtier (1951-2005)

Evénements / Stations	Très sèche	Sèche	Normale	Humide	Très humide
Abomey	572,9	972,2	1095,9	1180,9	1747,5
Adjohoun	622,5	930,5	1111,4	1284,1	1824,4
Allada	575,8	793,3	1001,8	1199,5	1877,4
Aplahoué	564,4	937,0	1087,2	1263,8	1847,2
Athiémé	309,5	844,7	981,2	1158,7	1705,6
Bohicon	551,6	991,3	1137,6	1273,6	1871,5
Bonou	710,1	987,2	1185,6	1343,8	1877,0
Bopa	419,1	771,2	932,8	1074,9	1682,5
Cotonou aéroport	719,4	1028,2	1294,7	1406,9	2470,2
Cotonou ville	643,3	988,5	1270,3	1449,6	2365,4
Dogbo Tota	379,6	765,6	997,9	1172,7	1826,4
Grand Popo	417,9	798,3	963,6	1113,1	2027,4
Kétou	587,0	946,2	1070,4	1169,5	1852,9
Lonkly	492,9	933,9	1137,7	1369,6	1946,4
Niaouli	620,0	1013,6	1158,4	1332,8	1938,7
Ouidah	560,3	870,0	1128,9	1284,0	2640,4
Pobè	681,2	1013,9	1191,1	1343,8	1734,4
Porto Novo	607,4	1076,9	1332,9	1516,3	2874,7
Sakété	593,7	979,3	1213,7	1337,8	2149,0
Sèmè	725,0	1170,0	1421,5	1575,7	3343,2
Toffo	618,7	915,8	1048,4	1174,7	1670,5
Zagnanado	470,8	822,5	1017,4	1173,1	1531,5

Les totaux pluviométriques stationnels sont de 310 à 725 mm et de 1531 à 3343 mm respectivement pour les événements très déficitaires et très excédentaires. En outre, en situation climatique sèche et humide, ils sont de l'ordre respectif de 766 à 1170 mm et de 1075 à 1576 mm. Dans une phase climatique très humide, la physionomie pluviométrique change, avec un secteur sud du bassin, s'étendant de la côte à la limite inférieure de la dépression de Lama (figure 3.6d), plus arrosé et homogène que les secteurs central et nord. Ce phénomène a entraîné la disparition du couloir de sécheresse qui caractérise habituellement le secteur ouest du bassin.

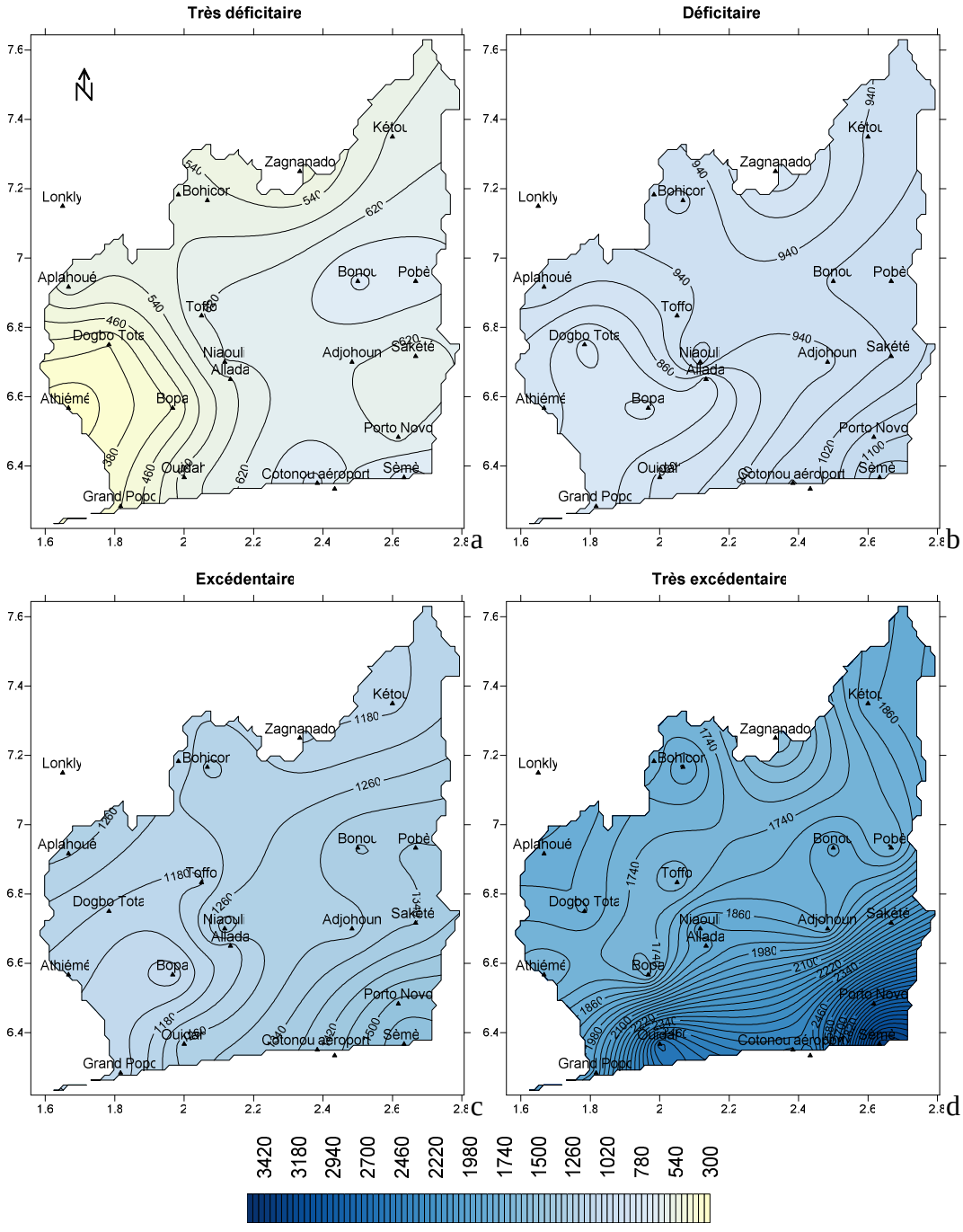


Figure 3.6 : Pluviométries annuelles extrêmes dans le bassin côtier du Bénin (1951-2005)

Les fortes pluies sont enregistrées au-dessous du 6°7' et pourraient expliquer l'importance de la disponibilité quantitative des eaux souterraines dans le secteur sud est du bassin. L'analyse fréquentielle des pluies annuelles moyennes montre des temps de retour variables selon les seuils hydroclimatiques déterminés (tableau 3.II).

Tableau 3.II : Périodes de retour des pluies moyennes (mm) du bassin côtier du Bénin (1951-2005)

Périodes (années) / Evénements pluvieux	2	5	10	20	25	50	100
Très déficitaire	765,3	595,1	482,4	374,3	340,0	234,3	129,5
Déficitaire	1018,5	851,7	741,2	635,3	601,7	498,2	395,4
Normale	1089,6	1292,3	1426,5	1555,2	1596,0	1721,8	1846,7
Excédentaire	1208,2	1424,9	1568,4	1706,0	1749,7	1884,2	2017,7
Très excédentaire	1533,6	1863,2	2081,4	2290,8	2357,1	2561,7	2764,7

Source : *Totin, octobre 2010*

Les hauteurs de pluies annuelles de récurrence très sèche et sèche centenaire sont respectivement de 130 et 395 mm contre 765 mm et 1019 mm pour celles de courtes fréquences (2 ans). Les récurrences respectives très humide et humide, de fréquences rares (100 ans), sont de 2765 mm et 2018 mm à l'opposé de celles 1534 mm et 1208 mm qui pourraient être enregistrées tous les deux ans. Mais, ces fréquences peuvent varier à l'échelle stationnelle comme, par exemple, à Athiémé où les événements pluvieux annuels très déficitaires sont de 170 mm en 100 ans et de 1023 mm tous les deux ans. Ces scénarios événementiels pluvieux laissent présager de fortes variations des ressources en eaux souterraines des aquifères influencés par l'évolution du climat.

3.1.2. Rupture de stationnarité, variation et tendances pluviométriques

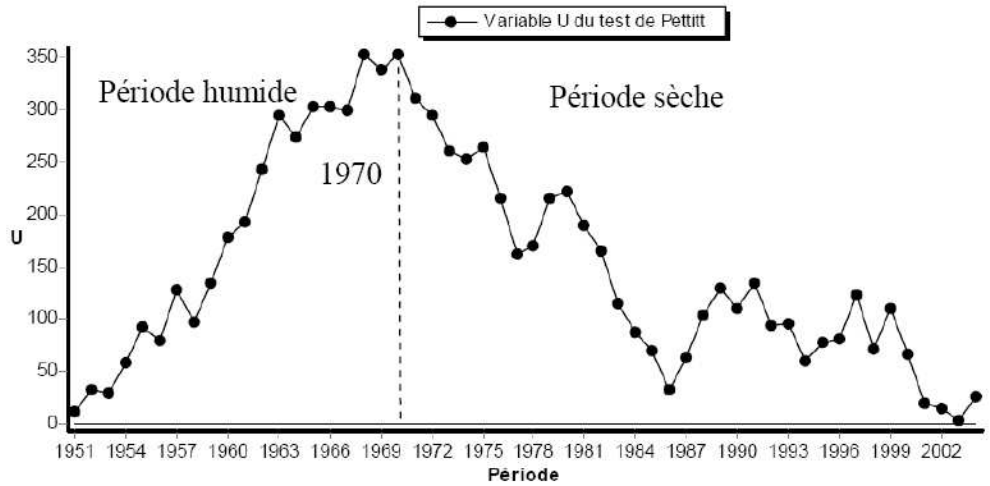
Les ruptures dans les chroniques pluviométriques sont intervenues dans les années 1960 et 1970 dans le bassin côtier du Bénin (tableau 3.III).

Tableau 3.III : Années de rupture des séries de pluies stationnelles entre 1951 et 2005

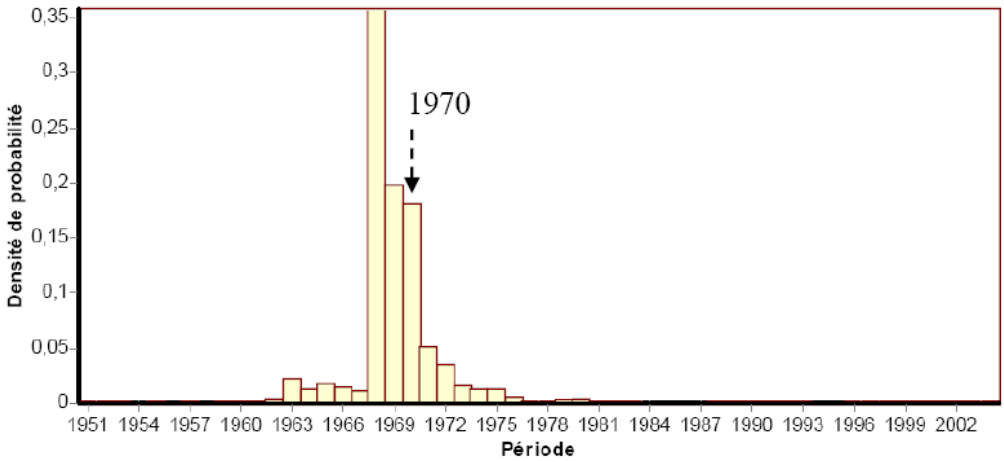
Dates de ruptures	Proportion des stations (%)	Stations concernées
1963	23	Aplahoué, Bohicon, Bonou, Kétou,Toffo
1968	41	Abomey, Allada, Athiémé, Bopa, Dogbo Tota, Lonkly, Niaouli, Pobè, Zagnanado
1969	14	Cotonou aéroport, Cotonou ville, Ouidah
1970	18	Adjohoun, Porto Novo, Sakété, Sèmè
1975	5	Grand Popo

Source : Totin, octobre 2010

La période 1968-1970 montre une rupture de stationnarité au niveau de 73 % des stations étudiées. Les ruptures de 1963, 1968 et de 1969 ont affecté respectivement les stations au nord du bassin, autour de la dépression de la Lama et celles du secteur littoral. Ceci montre le rôle des facteurs géomorphologiques sur l'évolution temporelle de la pluviométrie. La figure 3.7 illustre quelques paramètres de la rupture de stationnarité dans le champ pluviométrique moyen du bassin.



(a) Evolution de la variable U du test de Pettitt



(b) Densité de probabilité ''a posteriori'' de la position d'un changement

Figure 3.7 : Rupture de stationnarité dans l'évolution de la pluviométrie annuelle moyenne dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin

Le test de Pettitt a permis d'observer une modification dans l'évolution de la pluviométrie à partir de 1970. Cette rupture est confirmée par le signal de changement intervenu en 1968 et mis en évidence par la méthode bayésienne de Lee et Heghinian. Cette rupture, significative au seuil de 95 %, est en phase avec celles détectées par des travaux antérieurs entre la fin de la décennie 1960 et le début de la décennie 1970, dans la région ouest africaine et centrale (Albergel, 1987 ; Carbonnel *et al.*, 1992 ; Janicot *et al.*, 1993 ; Paturel *et al.*, 1996 ; Aka *et al.*,

1997 ; Servat *et al.*, 1998 et 1999 ; Mahé *et al.*, 2001 ; Ouédraogo, 2001 ; Ardoin-Bardin, 2004). Au Bénin, elle est mise en évidence par Houndénou (1999), Vissin (2001 et 2007), Ogouwalé (2006), Yabi (2008), Totin (2005 et 2009) quasiment sur les mêmes années. De plus, la segmentation de Hubert, au niveau de signification du test de Scheffé 1 %, présente des sous séries en 1951-1967, 1968 et 1969-2005 avec des totaux pluviométriques respectifs de 1241 mm, 1951 mm et 1052 mm.

La rupture a affecté le régime de pluie mensuel, saisonnier et la pluviométrie annuelle à la fin des années 1960. Le régime mensuelle post-rupture montre une baisse considérable des lames d'eau précipitée notamment au cours des mois sensibles de mai, juin et juillet (figures 3.8 et 3.9), correspondant à la période probable de recharge des réservoirs souterrains.

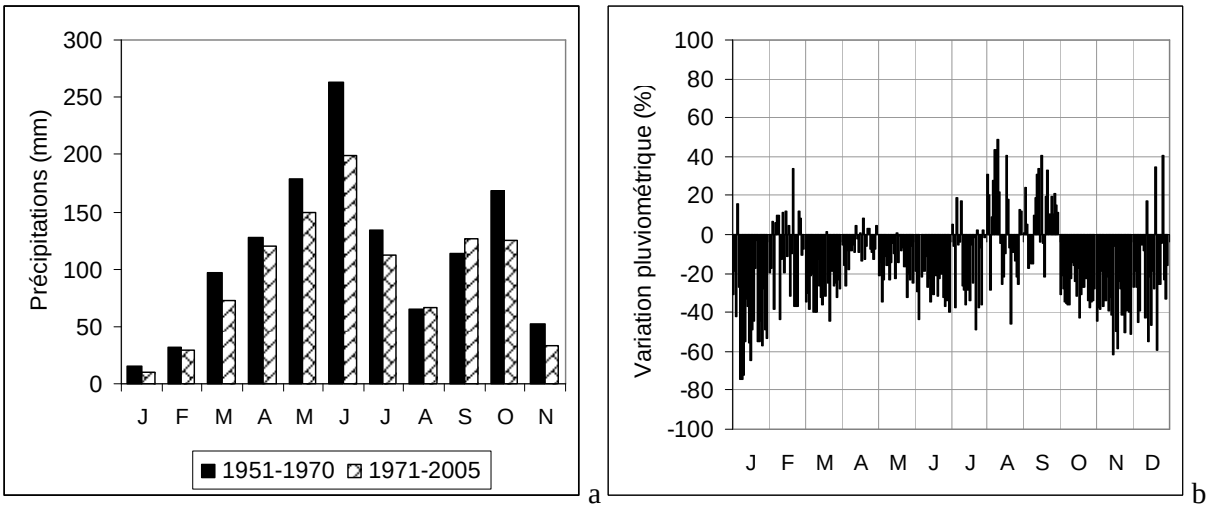


Figure 3.8 : Variation du régime pluviométrique mensuel moyen du bassin côtier (a) et de ses stations (b) entre les périodes 1951-1970 et 1971-2005

Cette variation est marquée par des déficits considérables. La diminution des pluies est importante en janvier, mars, mai, juin, juillet puis d'octobre à décembre. Cette baisse a atteint des valeurs maximales comprises entre 50 et 75 % de novembre à janvier et est de l'ordre de 30 à 49 % en février, mars, mai à août et en octobre. Quant aux mois d'avril et de septembre, correspondant respectivement au début de la grande et petite saisons pluvieuses, ils n'enregistrent que des déficits moindres compris entre 26 et 21 %.

Toutefois, des excédents de pluie de l'ordre de 40 à 50 % sont notés au niveau de 50 % des stations en août au centre et au nord du bassin et 73 % en septembre dans ses parties sud et centrale.

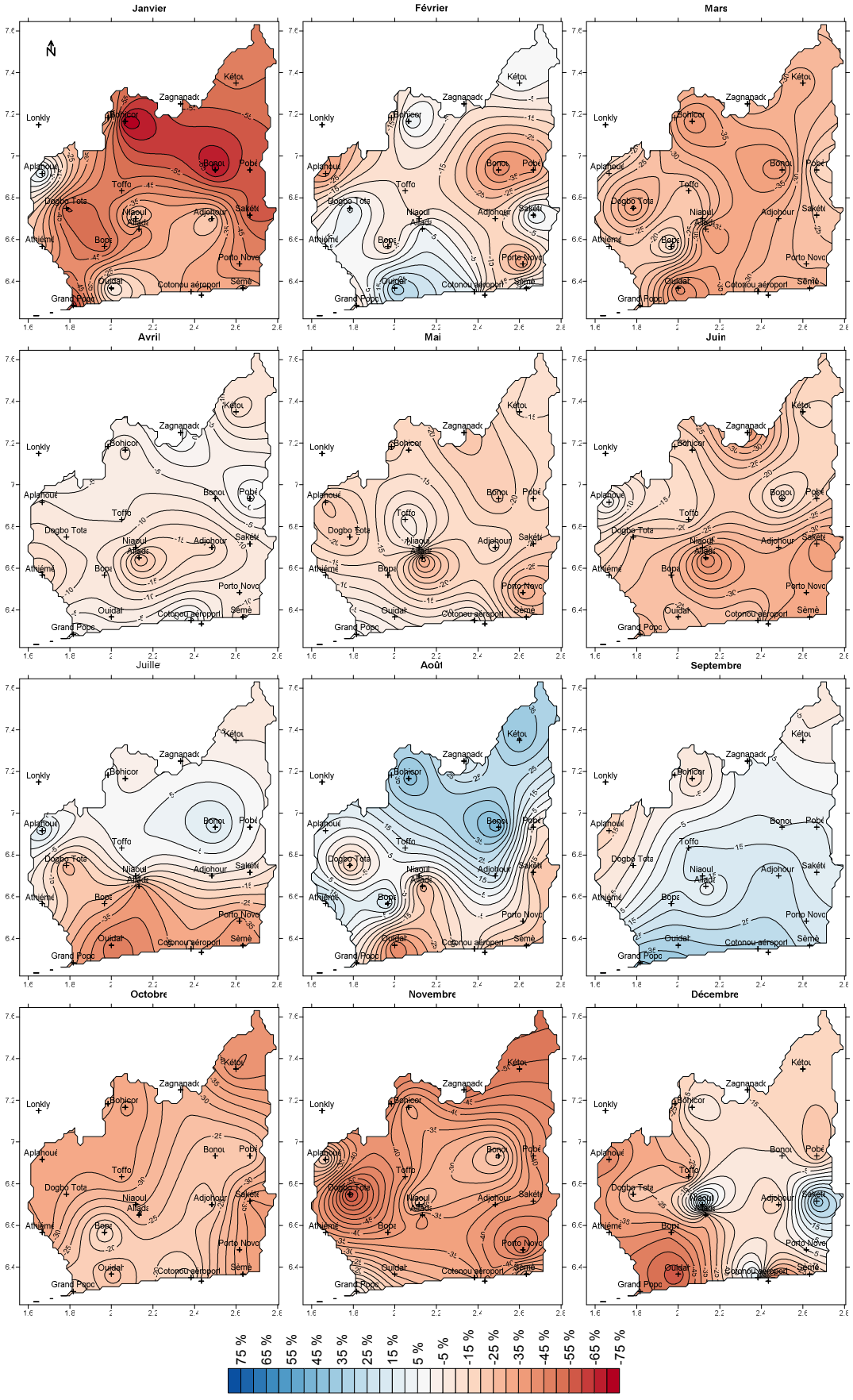


Figure 3.9 : Variation spatiale post-rupture des précipitations mensuelles sur la période 1951-2005

La variation pluviométrique à l'échelle mensuelle se traduit, au niveau des cumuls saisonniers stationnels, par une diminution de 8 à 38 % pour la grande saison pluvieuse, 1 à 26 % pour la petite saison pluvieuse et 11 à 45 % pendant la grande saison sèche (figure 3.10).

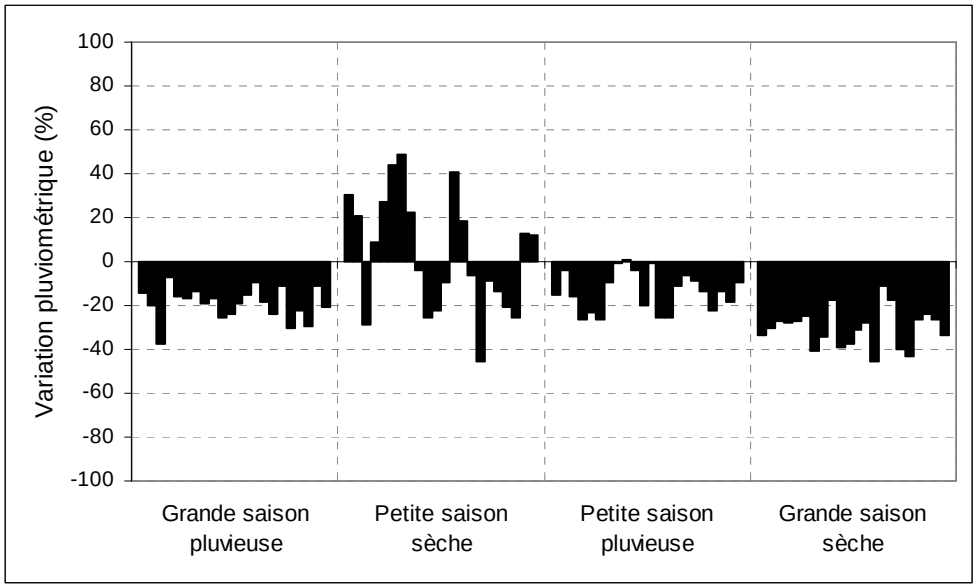


Figure 3.10 : Variation des pluies saisonnières post-rupture sur la période 1951-2005

La petite saison sèche, malgré une baisse pluviométrique de 4 à 46 %, notamment dans les champs de pluie de Cotonou ville, Allada et Ouidah, est marquée par son humidification dans les secteurs nord et ouest du bassin. Elle enregistre alors des excédents compris entre 9 % à Aplahoué et 49 % à Bonou. Les saisons pluvieuses et la grande saison sèche étant devenues plus sèches après la période 1951-1970, une menace pèserait sur la recharge des aquifères en saisons pluvieuses. Cette récurrence de la sécheresse constitue un facteur de déstockage considérable d'eau souterraine pendant la grande saison sèche.

Le bassin sédimentaire côtier du Bénin a connu une persistance de la sécheresse depuis les années 1970 comme l'illustre par la tendance générale à la baisse pluviométrique de la figure 3.11. La pluviométrie annuelle a varié de 1262 mm à 1049 mm entre les périodes 1961-1970 et 1971-2005. Cette baisse pluviométrique post-rupture est très marquée dans les années 1970 et 1980 comme le montrent les anomalies négatives qui sont, par exemple, de -2,3 en 1977 et de -2,1 en 1983, deux années très déficitaires selon Boko (1988) et Houndénou (1999). Le retour lent à une phase humide au cours de la décennie 1990, mis également en évidence par Amoussou (2010), n'a jusqu'à présent pas encore permis d'inverser cette tendance pluviométrique générale à la baisse. En effet, les hauteurs de pluie annuelle ont diminué de 4,4 mm/an ; soit une réduction des lames d'eau précipitée de 0,39 %/an sur la période 1951-2005.

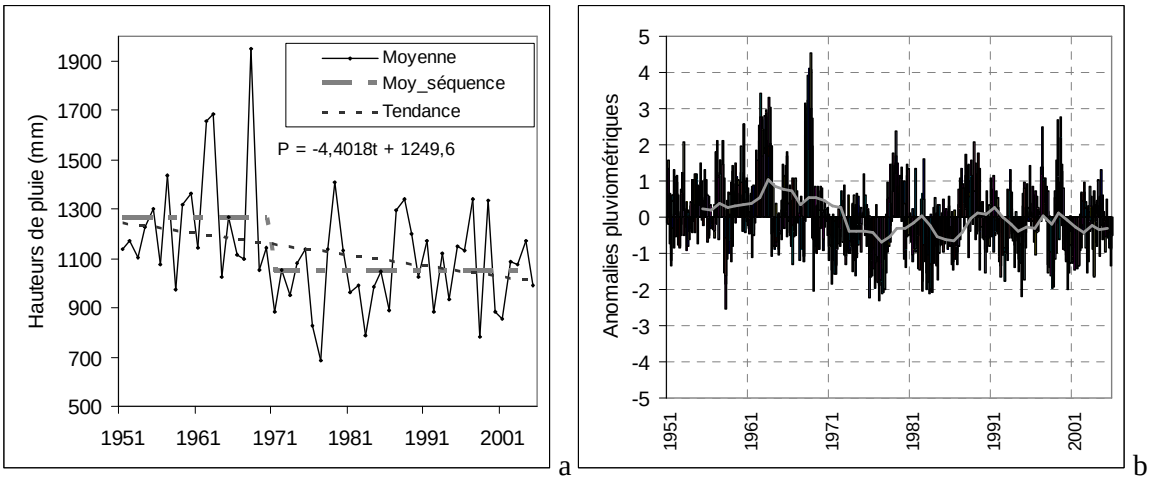


Figure 3.11 : Evolution tendancielle des pluies annuelles moyennes du bassin côtier du Bénin (a) et des anomalies pluviométriques des stations (b)

La baisse pluviométrique est de 17 % à l'échelle du bassin, mais très variée (9 à 30 %) dans l'espace comme le montre la figure 3.12. Les champs de pluie les plus affectés sont ceux de Dogbo Tota (-22 %), Allada (-30 %), Sèmè (-25 %) et Porto Novo (-27 %). Le centre et le nord du bassin sont moins marqués par ce recul pluviométrique (-9 à -15 %) en raison de l'augmentation des pluies du mois d'août dans le secteur.

La figure 3.12b montre que les isohyètes annuels 900 mm et 1210 mm, initialement à l'ouest du bassin, s'étendent vers le centre et l'est où étaient enregistrées respectivement 1100 à 1200 mm voire 1610 mm.

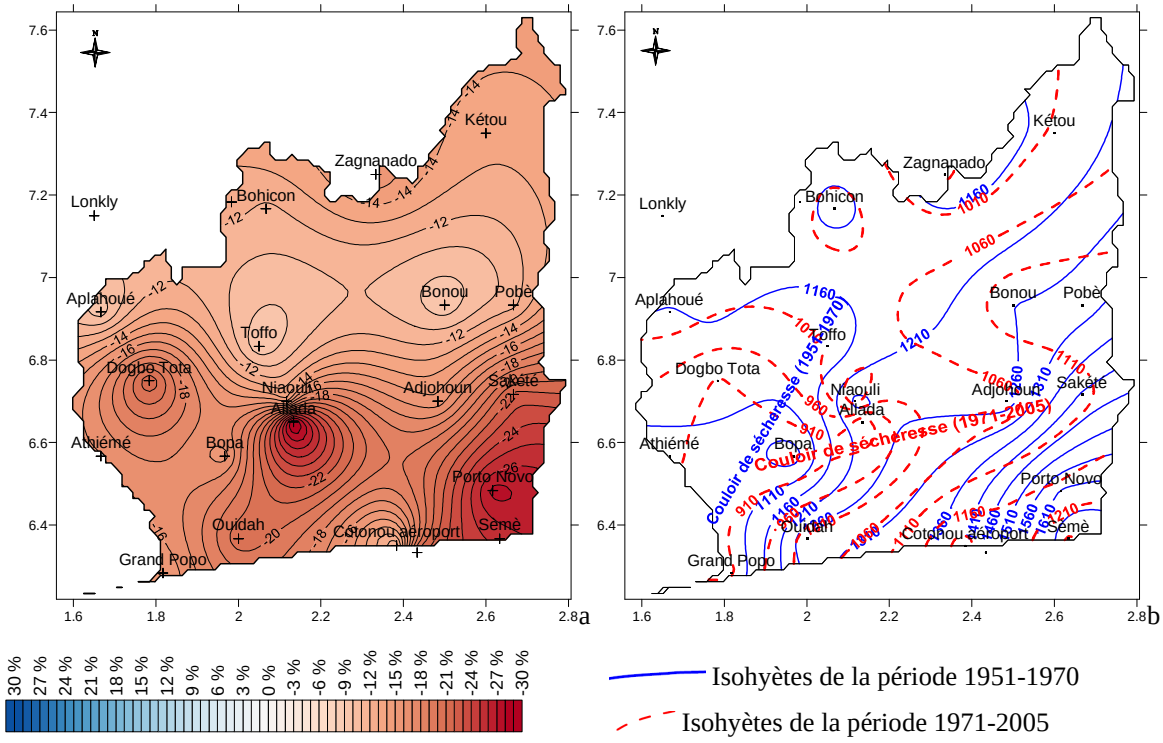


Figure 3.12 : Variation des pluies annuelles moyennes dans le bassin côtier du Bénin

La partie sud-ouest du Bénin s'individualise du point de vue pluviométrique dans la sous-région ouest africaine car étant sous l'influence de la *diagonale de sécheresse* (Bokonon-Ganta, 1987 ; Houndénou, 1999).

Les couloirs de la sécheresse, assez variables suivant les périodes 1951-1970 et 1971-2005 sont liés à la modification qui affecte les volumes d'eau précipités et leur répartition dans le bassin. Tout se passe au cours de la période post-rupture (apparition de la sécheresse) comme si le couloir de sécheresse s'élargit et s'étend au fur et à mesure que la pluviométrie baisse. En fait, la faiblesse des pluies et l'existence de la diagonale de sécheresse dans le sud-ouest du Bénin s'inscrivent dans le contexte géographique marqué par l'histoire de l'origine des savanes du Dahomey Gap qui, selon Guillaumet (1967) étaient vraisemblablement des héritages de la période aride du Pléistocène supérieur. La particularité climatique de cette entité spatiale du golfe du Bénin lui a valu l'appellation de *climat togo-dahoméen* (Cornevin, 1962), de *climat équatorial béninien* (Boko, 1975), de *quadrilatère de sécheresse* (Addra, 1978), de *couloir de sécheresse* (Donou, 1978). Boko (1988) le spécifie en terme de *climat des bas plateaux du Sud de nuance occidentale* et de *climat du bas-Mono et du lac Ahémé.*

En outre, l'intensité et l'extension du déficit pluviométrique ont été étudiées en Afrique de l'ouest par Fontaine et Janicot (1993), Paturel *et al.* (1995), Masson (1997), Servat *et al.* (1997 et 1998), Lebel *et al.* (2000), Ouédraogo (2001), Le Barbé *et al.* (2002), Ardoin-Bardin (2004). Ces travaux ont montré que, depuis le début des années 1970, une régression significative de la pluviosité affecte tant les zones soudano-sahéliennes que tropicales humides, en Afrique de l'ouest dont le Bénin.

Pour Houndénou (1999), les conditions climatiques sont caractérisées par une très forte irrégularité et une mauvaise répartition des précipitations dans le temps et l'espace. La particularité de la sécheresse post 1970 dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin est sa persistance (durée dans le temps), sa sévérité (déficits importants et son extension spatiale, préjudiciable à la disponibilité des ressources en eau souterraine. Le GIEC (2007) projette que la progression de la sécheresse conduirait à une intensification du stress hydrique. Ce phénomène est fort certain dans le bassin côtier du Bénin au regard des changements observés depuis les années 1970 et de la vulnérabilité des aquifères, surtout à nappe libre.

La récurrence des conditions hydroclimatiques sèches est accompagnée du réchauffement du climat dans le bassin et de la hausse conséquente du pouvoir évaporant de l'atmosphère.

3.1.3. Evolution des températures et du bilan climatique

3.1.3.1. Variabilité et tendances thermométriques

L'analyse de l'évolution des températures trouve son intérêt dans cette étude en ce que ce paramètre climatique influence le pouvoir évaporant de l'air, un des facteurs déterminant de l'hydrodynamique des réservoirs souterrains. La température mensuelle moyenne est de 26 °C en août, mois le plus frais et 29 °C en mars, mois le plus chaud dans le bassin côtier du Bénin. Elle atteint des valeurs extrêmes événementielles de 27 à 31 °C en période très sèche et de 24 à 28 °C en période ‘’très humide’’ (figure 3.13).

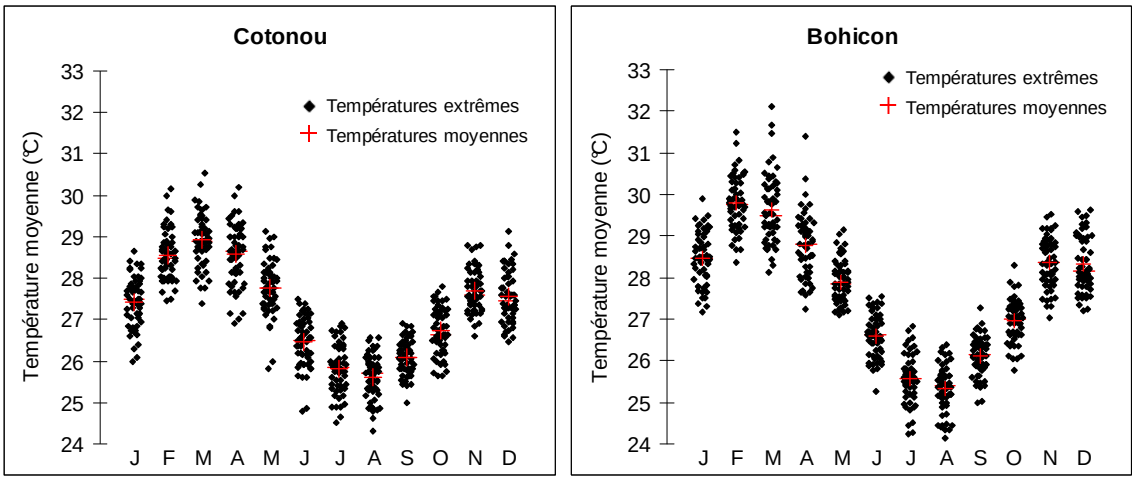


Figure 3.13 : Régimes thermométriques moyens et extrêmes (1951-2005) dans le bassin côtier du Bénin

Les moyennes thermométriques varient en fonction des différents secteurs du bassin. La figure 3.14 montre que le nord du bassin, marqué par la continentalité, est plus chaud que le secteur sud, plus soumis à l'influence de la brise de mer. Les écarts thermiques de 0,5 à 1,4 °C entre Bohicon et Cotonou, et surtout de novembre à mars, montre un réchauffement climatique dans la partie septentrional du bassin au cours de l'année. A l'opposé, les mois de juillet et août sont plus chauds au sud qu'au nord avec des écarts de -0,1 à -0,5 °C. Ce refroidissement de juillet-août pourrait être lié à l'effet de la couverture nuageuse dans cette partie septentrionale du bassin qui connaît un regain de pluie pendant cette période. Bokonon-Ganta (1987) le justifie aussi par la grande perte de rayonnement due au taux élevé de nébulosité.

Le bilan thermique, un des facteurs dont dépend l'état hydrique du bassin est illustré par le tableau 3.IV.

Tableau 3.IV : Bilan thermique mensuel du bassin côtier du Bénin sur la période 1951-2005

	Cotonou			**Bohicon**		
	Température			Température		
	Minimale	Maximale	Moyenne	Minimale	Maximale	Moyenne
Janvier	-0,4	0,4	0,2	-0,2	0,8	0,5
Février	1,3	1,0	1,2	1,2	1,5	1,4
Mars	1,9	1,1	1,5	1,6	1,2	1,3
Avril	1,4	1,0	1,2	1,2	0,6	0,7
Mai	0,3	0,5	0,5	0,6	0,0	0,2
Juin	-0,8	-0,6	-0,7	-0,4	-0,8	-0,7
Juillet	-0,8	-1,5	-1,3	-1,1	-1,4	-1,4
Août	-1,1	-1,6	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5
Septembre	-0,8	-1,1	-1,1	-1,0	-1,0	-1,0
Octobre	-0,6	-0,4	-0,5	-0,6	-0,4	-0,5
Novembre	0,0	0,6	0,4	0,3	0,5	0,5
Décembre	-0,4	0,6	0,3	0,0	0,6	0,4

Source : Totin, octobre 2010

Les anomalies de températures minimales, maximales et moyennes montrent que le bassin est marqué par un contexte climatique plus chaud de novembre à avril et moins chaud de juin à octobre. Au seuil d'erreur de 1 %, le bilan thermique est très positif pour les températures minimales (+1,6 à +1,9 °C) que pour les maximales (+1,1 à 1,5 °C) sur la période 1951-2005. Le bilan thermique positif sur sept des douze mois de l'année constituerait un indicateur de pression climatique sur les ressources en eaux en particulier souterraines. Le stress hydrique du bassin en mars est la résultante de la sensibilité de ses hydrosystèmes à la variation climatique surtout aux mécanismes évapotranspiratoires de la grande saison sèche.

L'analyse de l'évolution interannuelle des températures maximales, minimales et moyennes montre une tendance au réchauffement climatique dans le bassin (figure 3.14).

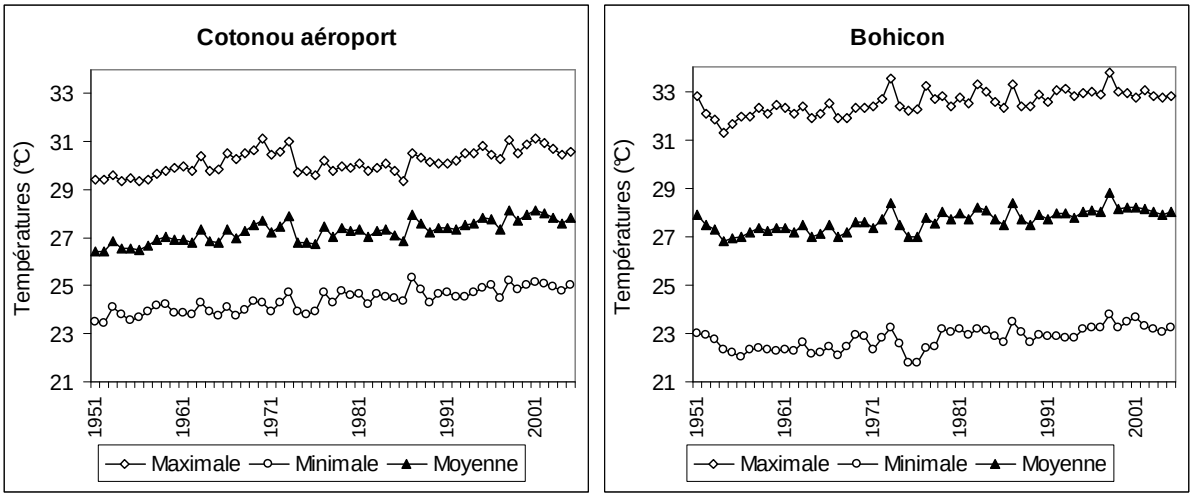


Figure 3.14 : Variabilité interannuelle des températures à Cotonou et à Bohicon

Les températures maximales ont varié de 29 à 31 °C à Cotonou et de 31 à 34 °C à Bohicon ; soit une hausse respective de 2 °C à 2,5 °C entre 1951 et 2005. Quant aux minima, ils sont passés de 23 à 25 °C à Cotonou et de 22 à 24 °C à Bohicon ; soit une augmentation de 2 °C.

De façon générale, la température moyenne annuelle est passée de 26,7 °C dans les années 1950 à 28 °C en 2005 avec une augmentation de 1,8 °C. Ce taux de réchauffement du bassin côtier est plus élevé que ceux de l'intervalle 0,2 à 1 °C dans lequel le GIEC (2007) situe globalement le Bénin. Ce réchauffement climatique est davantage illustré par l'augmentation quasi continue des anomalies thermométriques positives depuis les années 1970 (figure 3.15). La magnitude des anomalies de température moyenne est de -1,8 à +2,4 °C dans le bassin avec des nuances de -1,8 à +1,9 °C à Cotonou au sud et -1,9 à +2,6 °C à Bohicon au nord.

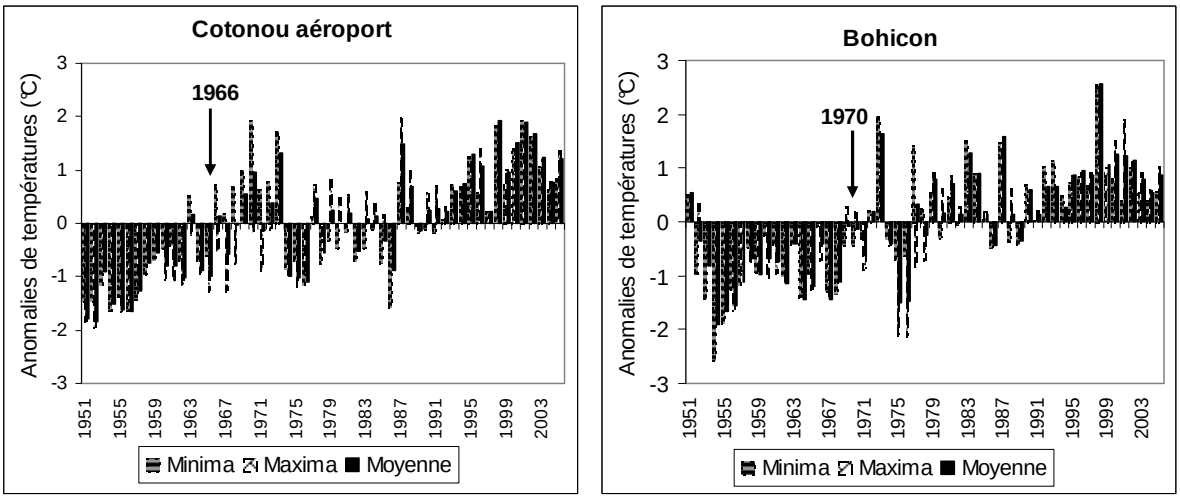


Figure 3.15 : Anomalies thermométriques dans le bassin sédimentaire côtier (1951-2005)

Les températures minimales et maximales ont enregistré les plus fortes hausses respectives de +1,8 °C en 1998 et +2 °C en 1987 à Cotonou et de +2,6 °C et +2,2 °C à Bohicon. Le record d'anomalie de la température moyenne est atteint en 1998, avec +2,4 °C. Il est supérieur à celui de +0,55 °C calculé à l'échelle mondiale (IPCC, 2001) et de +1,1 °C au Cameroun (Sighomnou, 2004) sur la même année. Ce phénomène montre une certaine concordance des faits climatiques dans le temps et dans l'espace.

L'augmentation des températures couplée à la baisse pluviométrique pourrait être préjudiciable à la disponibilité des eaux souterraines, surtout dans un contexte de d'élévation du pouvoir évaporant.

3.1.3.2. Pouvoir évaporatoire de l'air et bilan climatique

L'intensité et la durée des fortes températures ont de lourdes répercussions sur la disponibilité et la gestion des ressources en eau en milieu tropical, notamment par le biais de l'évaporation (Sighomnou, 2004). La figure 3.16 montre la relation effective qui existe entre température moyenne et pouvoir évaporant de l'air sous climats tropicaux.

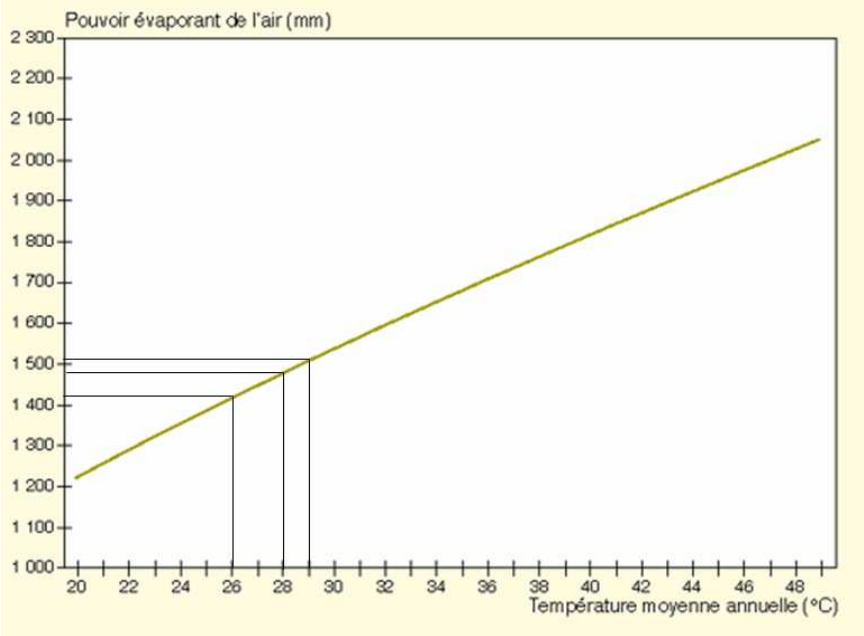


Figure 3.16 : Relation entre le pouvoir évaporant de l'air (en mm/an) et la température annuelle (en °C) en climats tropicaux (*Daget et Djellouli, 2002*)

Les valeurs de pouvoir évaporant de l'air correspondant à l'intervalle de température 26-29 °C sont de 1400 à 1500 mm pour les climats tropicaux. Ces estimations sont peu vérifiées dans le nord du bassin à Bohicon et en dessous des valeurs observées dans son secteur sud à Cotonou (figure 3.17). La corrélation entre la demande évapotranspiratoire et la température moyenne annuelle montre une variation spatiale de l'interaction de ces deux éléments climatiques.

Dans la tranche de température 26 à 29 °C sont enregistrées des demandes évapotranspiratoires supérieures à 1500 mm/an à Cotonou et 1441 à 1642 mm à Bohicon. Elles sont, en général de 1500 à 1557 mm à 27 °C, 1530 à 1635 mm entre 27 et 28 °C et de 1635 à 1666 mm au-delà de 28°C dans le secteur d'étude. Les écarts d'évapotranspiration varient de 50 à 100 mm entre le bassin côtier du Bénin et la région de climat tropical. La demande évapotranspiratoire mensuelle est de 10 mm à Cotonou et de 8,2 mm à Bohicon par unité de température.

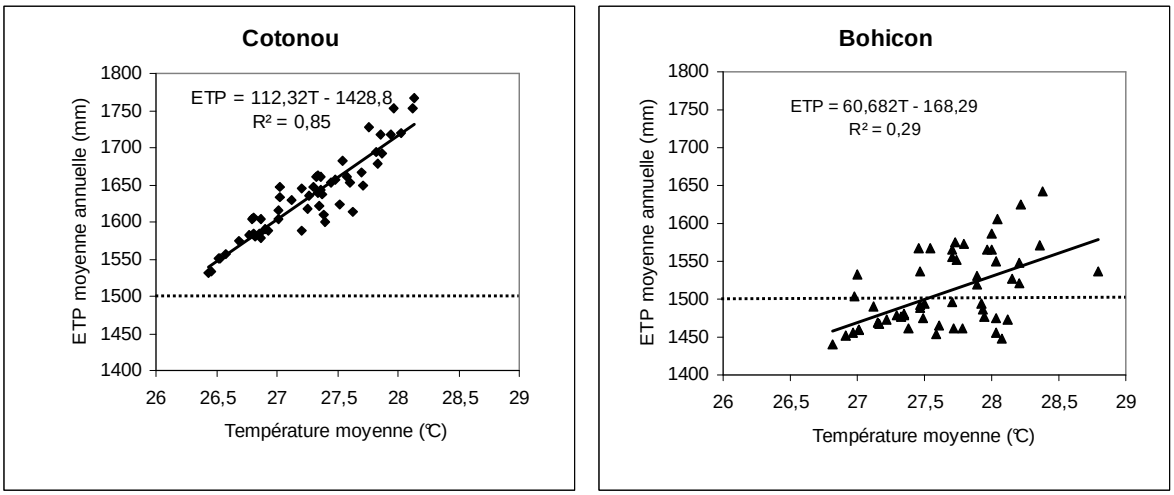


Figure 3.17 : Relation entre la demande évaporatoire de l'air et la température moyenne annuelle

L'ETP mensuelle évolue dans le même ordre que les températures à l'échelle du bassin (figure 3.18).

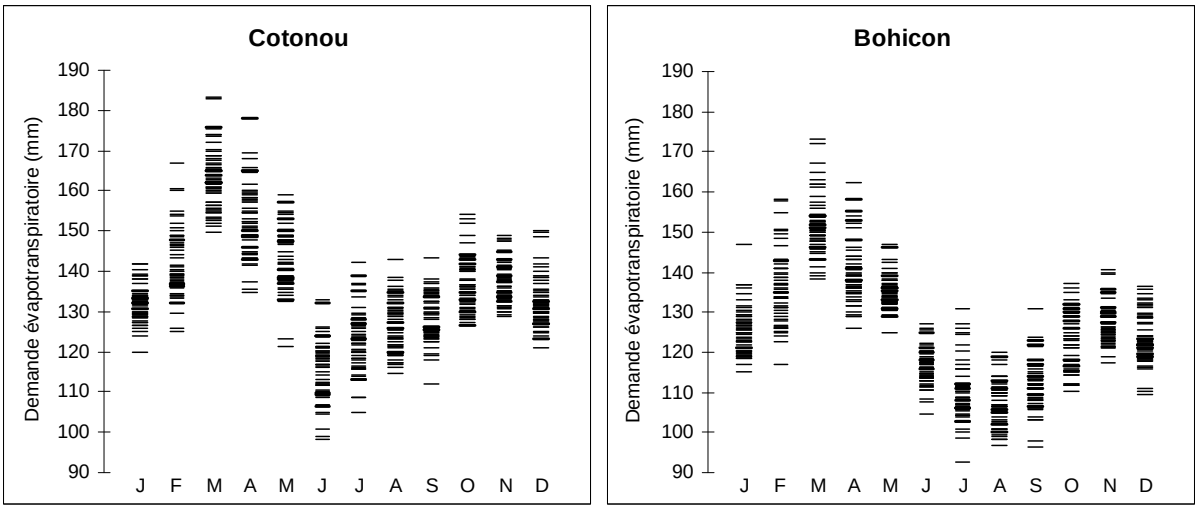


Figure 3.18 : Variation mensuelle de la demande évapotranspiratoire mensuelle moyenne et extrêmes (1951-2005) dans le bassin côtier du Bénin

L'ETP est plus élevée en mars où la température moyenne atteint également sa valeur maximale, baisse considérablement en juin, mois pendant lequel les pluies sont optimales. Elle varie en moyenne de 116 mm en juin à 158 mm en mars à l'échelle du bassin mais de 116 à 163 mm à Cotonou et 107 à 152 mm à Bohicon. Les ETP minimales et maximales sont respectivement de 98 à 150 mm et 133 à 183 mm à Cotonou et de 93 à 138 mm et 120 à 173 mm à Bohicon. A l'opposé de la température, elle est plus élevée dans le sud du bassin. Ce phénomène pourrait être lié à la densité des systèmes hydrologiques ouverts, formés par les complexes fluvio-lacustres Couffo-Mono-Ahémé, Ouémé-Nokoué, les lagunes, etc.

La photo 3.1 montre quelques aspects de l'environnement hydrologique du bassin favorable à l'intensification de l'évaporation.


a


b

Cliché : Totin V. S. H., août 2007 et octobre 2009

Photo 3.1. Masse d'eau lagunaire à Djègbadji (a) et végétation marécageuse à Tori-Avamè (b), deux systèmes ouverts à l'évaporation

Le contraste évaporatoire entre les parties méridionale et septentrionale du bassin semble également être lié à d'autres facteurs tels que la variation altitudinale et de la profondeur de la nappe phréatique, etc.

Le bilan climatique potentiel est positif de mai à juillet (figure 3.19). Mais les eaux pluviales ne sont véritablement disponibles qu'en juin pour la recharge des aquifères. Cette réalimentation des nappes souterraines ne pourrait être instantanée dans les secteurs du bassin côtier où la zone non saturée est épaisse. Le mois de juin enregistre un excédent moyen de 106 mm avec une variation spatiale de 254 à 42 mm suivant un gradient décroissant sud-est – nord-ouest. En mai et juillet, il est faiblement positif avec respectivement 19 mm et 4 mm à l'échelle du bassin et varie entre 72 mm (Sèmè) et -11 mm (Bopa) et entre 42 mm (Sèmè) à -35 mm (Grand Popo).

Les secteurs nord et est du bassin présentent un bilan climatique excédentaire avec des valeurs maximales de 40 à 45 mm pendant la période de septembre-octobre (petite saison pluvieuse). Il est par contre déficitaire de 93 mm, 114 mm, 117 mm, 109 mm, 76 mm et 24 mm respectivement en novembre, décembre, janvier, février, mars et avril où les aquifères pourrait atteindre leur plus bas niveau de rabattement. Les valeurs extrêmes de ces différents mois sont successivement de -67 à -111 mm, -104 à -123 mm, -112 à -124 mm, -101 à -117 mm, -54 à -102 mm et de 5 à -102 mm. Pendant cette période et la grande saison sèche, les secteurs ouest et nord du bassin sont les plus affectés par le déficit hydrique dont les effets pourraient être une accélération de la décrue des réservoirs d'eaux souterraines.

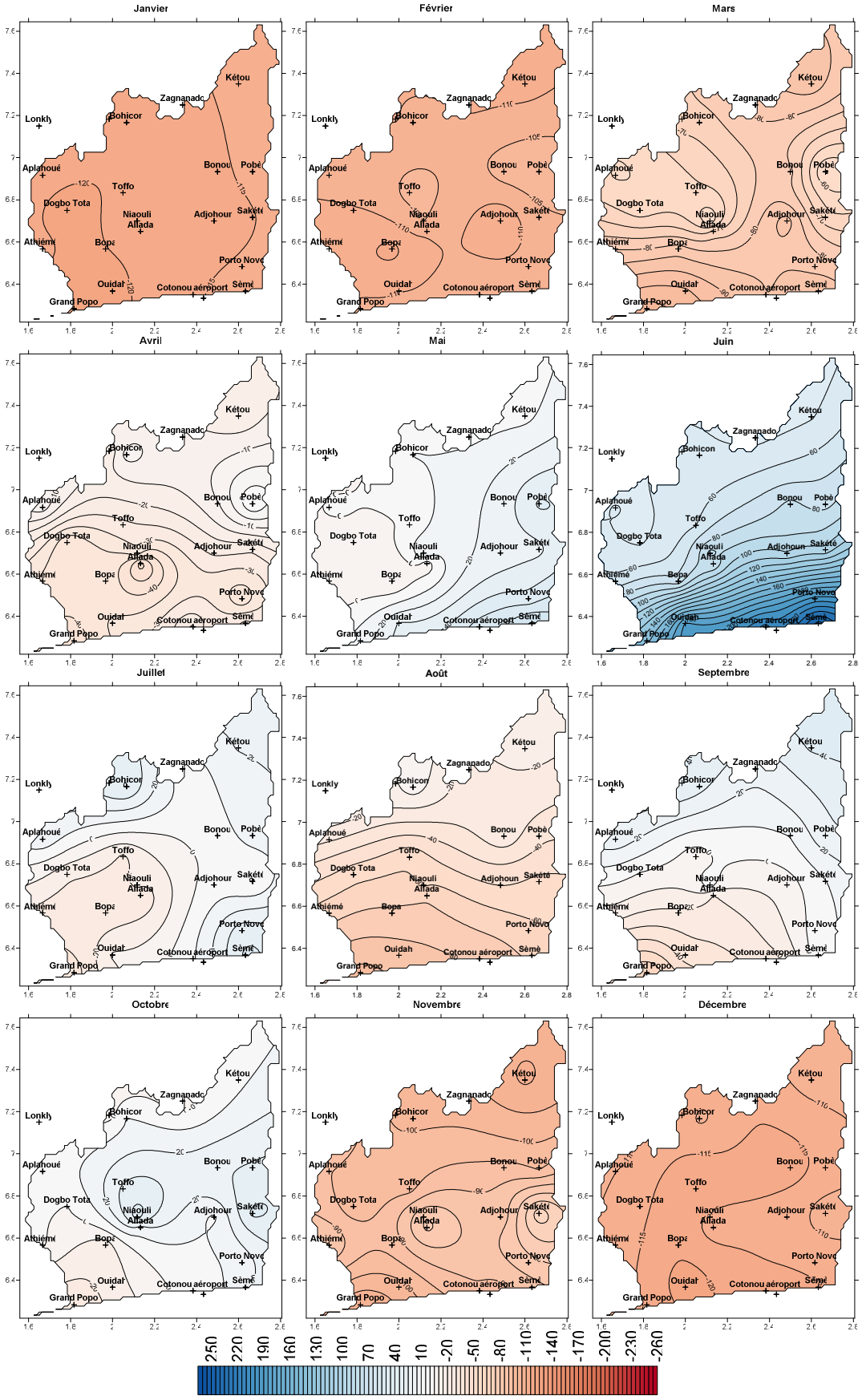


Figure 3.19 : Bilan climatique mensuel moyen (1951-2005) dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin

La demande évaporatoire annuelle moyenne est en général de 1572 mm et suivant un gradient sud-nord de 1634 mm (Cotonou) à 1510 mm (Bohicon). L'évolution interannuelle sur la période 1951-2005 montre que les pertes d'eau par évaporation sont de 1532 à 1766 mm à Cotonou et 1441 à 1642 mm à Bohicon. Ceci est un inducteur de pertes importantes d'eau, souvent non compensées par les pluies surtout en année déficitaire, et pouvant influer négativement sur les transferts d'eau vers les aquifères.

Au total, la variabilité climatique montre que le bassin sédimentaire côtier du Bénin est marqué par des phases humides des décennies 1950, 1960 et 1990 et sèches de 1970 et 1980. La baisse des pluies, la hausse des températures et l'augmentation de la demande évaporatoire qui en résultent, induisent une tendance observée de déficit hydrique, assimilée dans cette étude à un scénario de ''climat sec'' si elle se maintenait à l'horizon des changements climatiques, comme le projette dans les régions subtropicales le scénario A1B du GIEC (2007). La diminution des lames d'eau précipitée est une menace sur la recharge des aquifères et la durabilité de leur exploitation.

Ce scénario climatique de sécheresse a servi de cadre d'analyse de la dynamique des ressources en eaux souterraines, au regard des incertitudes qui marquent encore les projections climatiques, en particulier pluviométriques dans la sous-région ouest africaine. Afin d'essayer de lever cette équivoque, l'évolution du climat futur du bassin sédimentaire côtier du Bénin a été simulée à l'aide du Modèle Climatique Régional PRECIS.

3.2. Scénarios climatiques futurs dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin

L'élaboration des scénarios de climat futur de la région d'étude a d'abord eu pour base l'analyse du contexte global des changements climatiques. Il s'agit de comprendre dans un premier temps les changements qui ont affecté les paramètres climatiques à l'échelle mondiale et ouest africaine.

3.2.1. Evolution du climat à l'échelle mondiale et ouest africaine

Les données générales sur l'évolution du climat dans le monde et dans la partie ouest africaine sont essentiellement tirées des différents rapports du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) et d'autres études menées sur la question.

Les changements climatiques sont attribués aux effets conjoints des facteurs naturels et anthropiques dont les émissions de Gaz à Effets de Serre (GES). Les concentrations de GES

naturelles sont reconnues avoir été modifiées par les activités humaines depuis le début de l'ère industrielle. Les activités humaines engendrent des émissions de quatre GES à longue durée de vie : le CO_2, le méthane (CH_4), l'oxyde nitreux (N_2O) et les hydrocarbures halogénés (un groupe de gaz contenant du fluor, du chlore ou du brome). Les concentrations atmosphériques de GES augmentent lorsque les émissions l'emportent sur les processus d'absorption. A cet effet, l'une des causes de l'évolution du climat est constitué par les variations de GES et d'aérosols dans l'atmosphère, de la couverture terrestre et du rayonnement solaire qui modifient le bilan énergétique du système climatique (GIEC, 2007). La figure 3.20 donne une représentation schématique et corrélative des facteurs humains de l'évolution du climat, des effets du changement climatique et des réponses apportées.

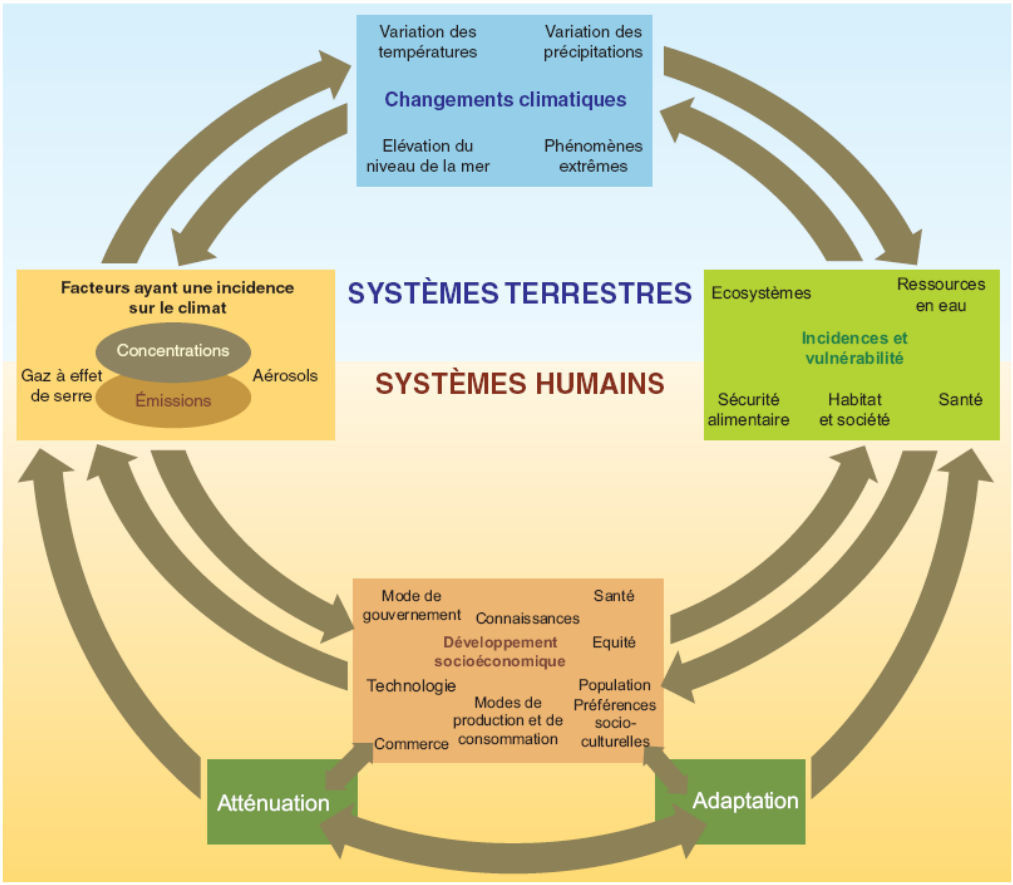


Figure 3.20 : Représentation schématique des facteurs humains de l'évolution du climat, des effets sur le changement climatique et des réponses apportées, ainsi que de leurs corrélations (*GIEC, 2007*)

L'analyse de cette figure permet de déterminer les changements climatiques et leurs incidences à partir des données socioéconomiques et des émissions. Ainsi, l'appréhension des corrélations des facteurs humains de l'évolution du climat, rend désormais possible une évaluation des différents facteurs, la définition des voies de développement possibles et des limitations des émissions globales susceptibles de réduire le risque d'incidences futures

indésirables. Les émissions mondiales de GES imputables aux activités humaines ont augmenté depuis l'époque préindustrielle ; la hausse a été de 70 % entre 1970 et 2004 (GIEC, 2007). En conséquence, depuis le début du siècle, la température moyenne de l'air a augmenté de 0,5 °C. Selon WMO (2003), les records de chaleur planétaires sont concentrés dans les années récentes comme 1998 avec +0,55 °C. Cet indicateur de réchauffement est également vérifié au sud du Bénin comme le montrent les figures 3.14 et 3.15, pp 115-116. Ce réchauffement de la planète est mis en relation avec les émissions anthropiques des GES. La figure 3.21 montre les scénarios d'émissions de GES pour la période 2000-2100 (en l'absence de politiques climatiques additionnelles) et les projections relatives aux températures en surface.

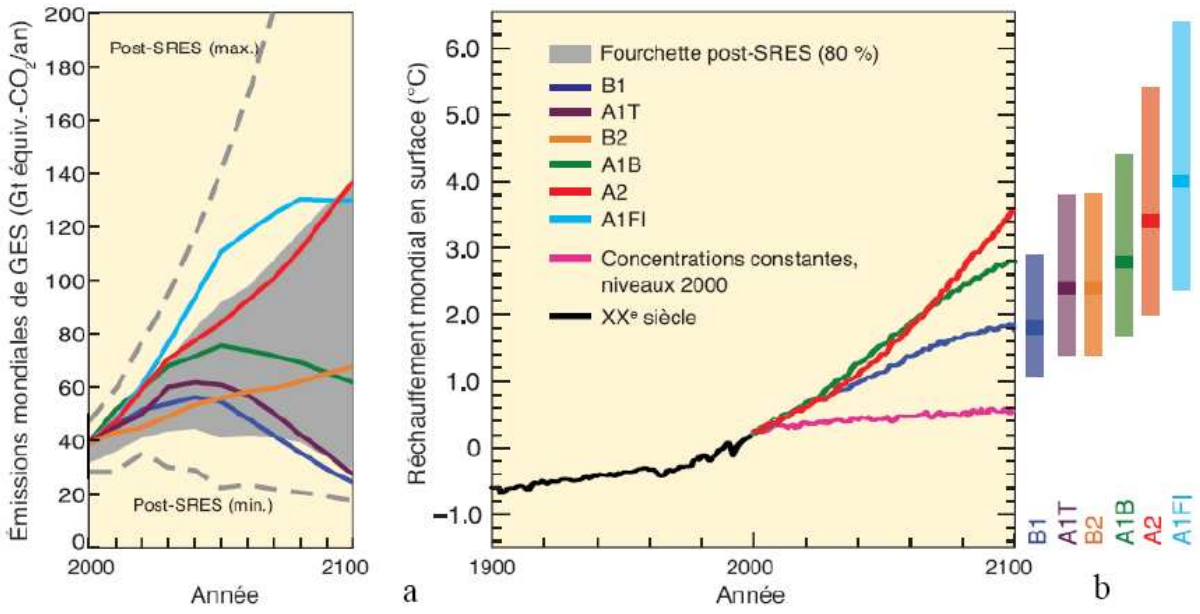


Figure 3.21 : Émissions mondiales de GES (en Gt équiv.-CO2) en l'absence de politiques climatiques (a) et projections relatives au réchauffement à la surface du globe selon plusieurs modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan (b)

Six scénarios illustratifs de référence (SRES, lignes colorées) et intervalle au 80e percentile des scénarios publiés depuis le SRES (post-SRES, partie ombrée). Les lignes en pointillé délimitent la plage complète des scénarios post-SRES. Les GES sont le CO_2, le CH_4, le N_2O et les gaz fluorés. À droite : Les courbes en trait plein correspondent aux moyennes mondiales multimodèles du réchauffement en surface pour les scénarios A2, A1B et B1, en prolongement des simulations relatives au XXe siècle. Ces projections intègrent les émissions de GES et d'aérosols de courte durée de vie. La courbe en rose ne correspond pas à un scénario mais aux simulations effectuées à l'aide de modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan (MCGAO) en maintenant les concentrations atmosphériques aux niveaux de 2000. Les barres sur la droite précisent la valeur la plus probable (zone foncée) et la fourchette probable correspondant aux six scénarios de référence du SRES pour la période 2090-2089. Tous les écarts de température sont calculés par rapport à 1980-1999. (Source : GIEC, 2007)

GIEC (2007) estime que onze des douze dernières années (1995-2006) figurent parmi les douze années les plus chaudes depuis 1850. Ainsi, la valeur moyenne établie pour 1906-2005 atteint +0,74 [0,56-0,92] °C. La hausse des températures à l'échelle mondiale permet de situer

le Bénin dans la fourche de variation de 0,2 et 1 °C sur la période 1970-2004 comme l'illustre la figure 3.22.

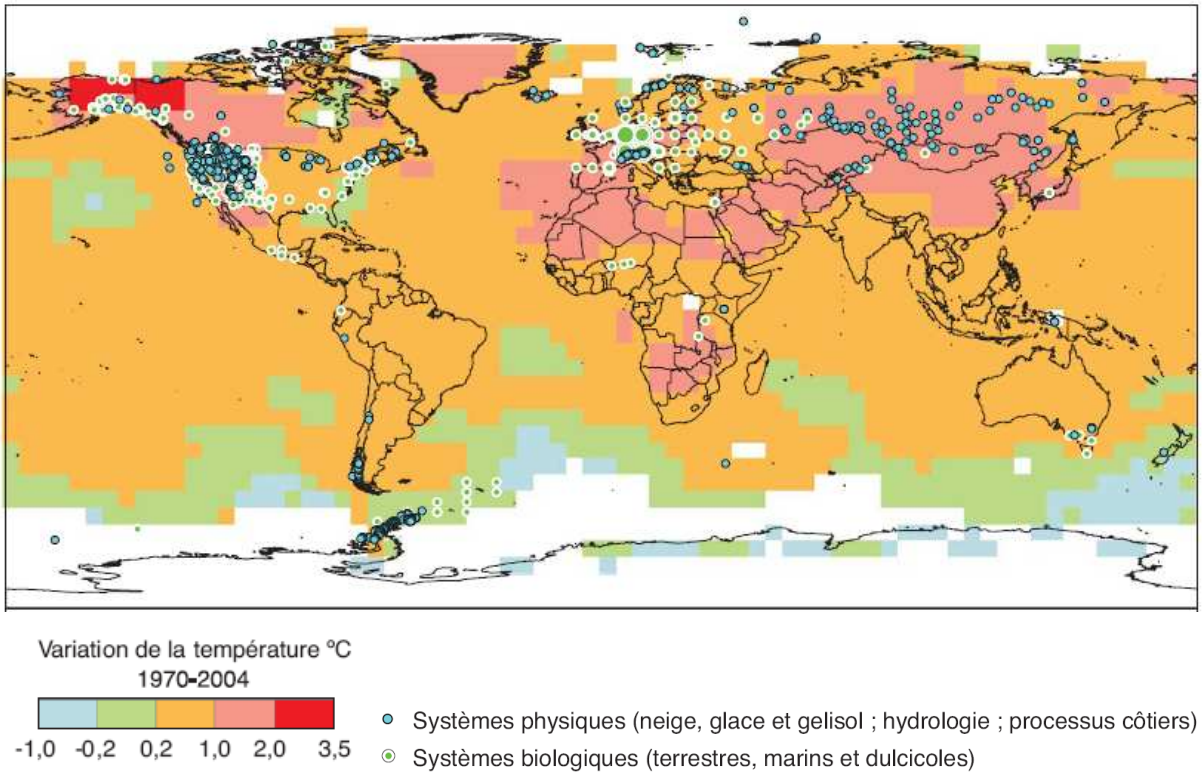


Figure 3.22 : Variations de la température de l'air en surface pendant la période 1970-2004 (*Extrait de GIEC, 2007, Modifications des systèmes physiques et biologiques et variations de la température en surface pendant la période 1970-2004*)

Les projections relatives aux changements climatiques à venir prévoient un réchauffement d'environ 0,2 °C par décennie au cours des vingt prochaines années selon les anticipations faites dans plusieurs scénarios d'émissions SRES (GIEC, 2007). Même si les concentrations de l'ensemble des GES et des aérosols avaient été maintenues aux niveaux de 2000, l'élévation des températures se poursuivrait à raison de 0,1 °C environ par décennie. Dans tous les cas, la poursuite des émissions de GES au rythme actuel ou à un rythme plus élevé devrait accentuer le réchauffement et modifier complètement le système climatique au XXIe siècle. Il est fort probable que ces changements seront plus importants que ceux observés pendant le XXe siècle. Le tableau 3.V donne les valeurs les plus probables et les intervalles probables pour le réchauffement moyen de l'air à la surface du globe selon six scénarios d'émissions de référence SRES.

Les fourchettes supérieures estimées des températures anticipées sont plus importantes que celles du troisième rapport (1,4 - 5,8 °C). Cela s'explique essentiellement par le fait que, selon l'éventail élargi des modèles maintenant disponibles, les rétroactions entre le climat et le

cycle du carbone seraient plus fortes qu'on ne l'anticipait. Dans le cas du scénario A2, par exemple, cette rétroaction entraîne une augmentation de plus de 1° C du réchauffement planétaire moyen correspondant en 2100.

Tableau 3.V : Projections des valeurs moyennes du réchauffement en surface et de l'élévation du niveau de la mer à la fin du XXIe siècle, à l'échelle du globe

Cas	**Variation de température (°C, pour 2090-2089 par rapport à 1980-1999)**		**Elévation du niveau de la mer (m, pour 2090-2089 par rapport à 1980-1999)**
	Valeur la plus probable	**Intervalle probable**	**Intervalle fondé sur les modèles sauf évolution dynamique rapide de l'écoulement glaciaire**
Concentrations constantes, niveaux 2000	0,6	0,3-0,9	Non disponible
Scénario B1	1,8	0,3-0,9	0,18-0,38
Scénario A1T	2,4	1,1-2,9	0,20-0,45
Scénario B2	2,4	1,4-3,8	0,20-0,43
Scénario A1B	2,8	1,4-3,8	0,21-0,48
Scénario A2	3,4	1,7-4,4	0,23-0,51
Scénario A1FI	4,0	2,4-6,4	0,26-0,59

Source : GIEC, 2007

Au nombre des observations effectuées sur tous les continents et sur la plupart des océans, il ressort qu'une multitude de systèmes naturels sont touchés par les changements climatiques régionaux, en particulier par la hausse des températures (GIEC, 2007). Il est certain que les hydrosystèmes en général, ceux souterrains en particulier, sont également affectés par l'évolution du climat. Les changements climatiques devraient accentuer les facteurs actuels de stress hydrique tels que la croissance démographique, l'évolution économique et l'affectation des terres (urbanisation comprise). Les variations des précipitations et de la température entraînent une modification du ruissellement et des disponibilités en eau (GIEC, 2007) en l'occurrence, celles en eaux souterraines.

Selon le GIEC (2007), il est probable que la sécheresse ait progressée à l'échelle du globe depuis les années 1970. L'analyse de la variabilité climatique sur la période 1951-2005 l'a clairement montré dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Cette tendance générale à la progression de la sécheresse depuis les années 1970 et à une augmentation de fréquences d'épisodes de fortes précipitations sont également attribuées aux activités humaines. Sur la base de plusieurs modèles, il est probable que les cyclones tropicaux (typhons et ouragans) deviendront plus intenses, avec une accélération des vitesses de pointe des vents et un accroissement des précipitations du fait de l'augmentation de la température à la surface des mers tropicales. Les projections de précipitations dans le 3ème rapport du GIEC indiquent que leur volume augmentera très probablement aux latitudes élevées, alors qu'il diminuera

probablement dans la plupart des régions continentales subtropicales (d'environ 20 % en 2100 selon le scénario A1B de la figure 3.23).

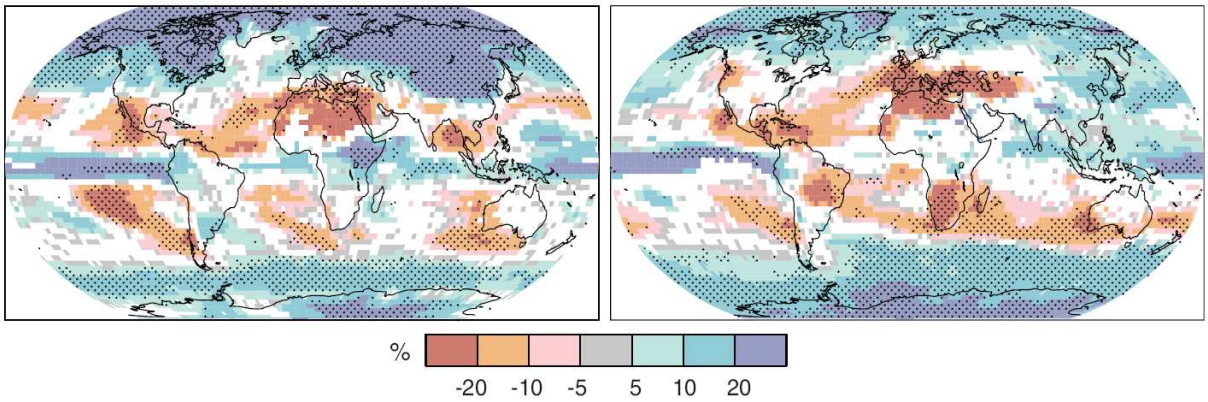


Figure 3.23 : Variations relatives du régime des précipitations (%) pour la période 2090-2099, par rapport à la période 1980-1999 (GIEC, 2007).

Les valeurs indiquées sont des moyennes tirées de plusieurs modèles, obtenues à partir du scénario A1B du SRES pour des périodes allant de décembre à février (à gauche) et de juin à août (à droite). Les ***zones en blanc correspondent aux régions où moins de 66 % des modèles concordent sur le sens de la variation*** *et les zones en pointillé à celles où plus de 90 % des modèles concordent sur celui-ci.*

Les projections de la variation des précipitations dans la sous-région ouest africaine sont encore contrastées et marquées par des incertitudes sur la tendance future (zone en blanc sur la figure 3.23). Cela serait lié au fait que la représentation dans les modèles de la mousson ouest africaine (MOA) en terme d'état moyen n'est pas satisfaisante (Cook & Vizy, 2006), malgré des progrès significatifs par rapport au troisième rapport du GIEC (Cassou et Guilyardi, 2007). A partir de quatorze GCM, certaines relations de base en terme de variabilité, en particulier les relations MOA-ENSO et MOA-SST Atlantique, ne sont pas correctement prises en compte (Joly *et al.*, 2006). L'évolution de la pluviométrie dans le bassin côtier du Bénin (situé dans cette région) vérifie-t-elle cette situation d'incertitude à l'horizon des changements climatiques ? Les résultats de simulation pluviométrique à l'aide du Modèle Climatique Régional (MCR) PRECIS aux conditions limite ECHAM4, SRES A2 confronté à ceux de l'analyse de la variabilité climatique semble confirmer ces incertitudes.

3.2.2. Modélisation du climat actuel et futur dans le bassin côtier du Bénin

Le climat futur du bassin sédimentaire côtier du Bénin est caractérisé à partir de la projection de l'évolution de la température moyenne de l'air et des précipitations aux échelles journalière, mensuelle et annuelle. Il faut rappeler que la période de référence 1961-1990 correspondrait à celle où les émissions de GES sont encore moindres ou celle du climat actuel. Quant à la période 2070-2089, elle est considérée comme celle pendant laquelle le

signal des changements climatiques d'origine anthropique sera mis en évidence par rapport à la variabilité climatique naturelle, c'est-à-dire à la limite du 21ème siècle.

La comparaison des données observées et simulées sur la période 1961-1990 a montré la capacité du modèle PRECIS à simuler le climat dans la région d'étude.

3.2.2.1. Performance du modèle PRECIS/ECHAM4-A2

Les résultats de la modélisation climatique sont présentés et la performance du modèle PRECIS sur ECHAM4 SRES A2, à une résolution de 0,44°x0,44° est analysée afin de déterminer la crédibilité des simulations du climat futur. Il ressort de la comparaison des pluies journalières moyennes observées et simulées, une variation spatiale de la réponse du modèle dans le bassin sur la période 1961-1990, (figure 3.24). Les régimes de pluies à deux optima tranchés du sud du bassin (Grand Popo, Sèmè) sont moins bien simulés que ceux atténués des parties centrale (Niaouli et Pobè) et nord (Bohicon, Aplahoué). De plus, les six régimes de pluie présentés permettent d'observer que le début de la grande saison pluvieuse, la fin de la petite saison pluvieuse et la grande saison sèche sont bien simulés à l'exception de Grand Popo situé dans l'axe du phénomène d'upwelling et de la diagonale de sécheresse dans le bassin.

Le modèle PRECIS reste inefficace à modéliser les événements pluvieux de fortes intensités (au cœur des saisons) qu'il sous-estime comme l'illustre la figure 3.24 à Grand Popo, Sèmè, Niaouli et Pobè. Les optima pluviométriques des régimes modélisés sont quasi inexistants comparés à ceux des régimes observés. La faiblesse du modèle PRECIS à bien simuler le régime bimodal franc amène à avancer l'hypothèse qu'il n'est pas suffisamment basé sur les données relatives à la mousson ouest africaine et surtout sur ses paramètres pluviogènes déterminant la grande et la petite saison pluvieuses.

Le cas de Grand Popo montre peut être que le modèle ne prend pas en compte les phénomènes tels que l'influence climatique du Dahomey Gap et de l'upwelling marquant la variabilité spatiale des précipitations dans le secteur sud-ouest du bassin. Ce résultat n'est pas surprenant car selon Ardoin Bardin (2004), il semble que les modèles climatiques ne reproduisent pas correctement les précipitations mensuelles dans les zones où les volumes précipités sont faibles (zone soudano-sahélienne) et dans les zones caractérisées par deux saisons des pluies (zone guinéenne).

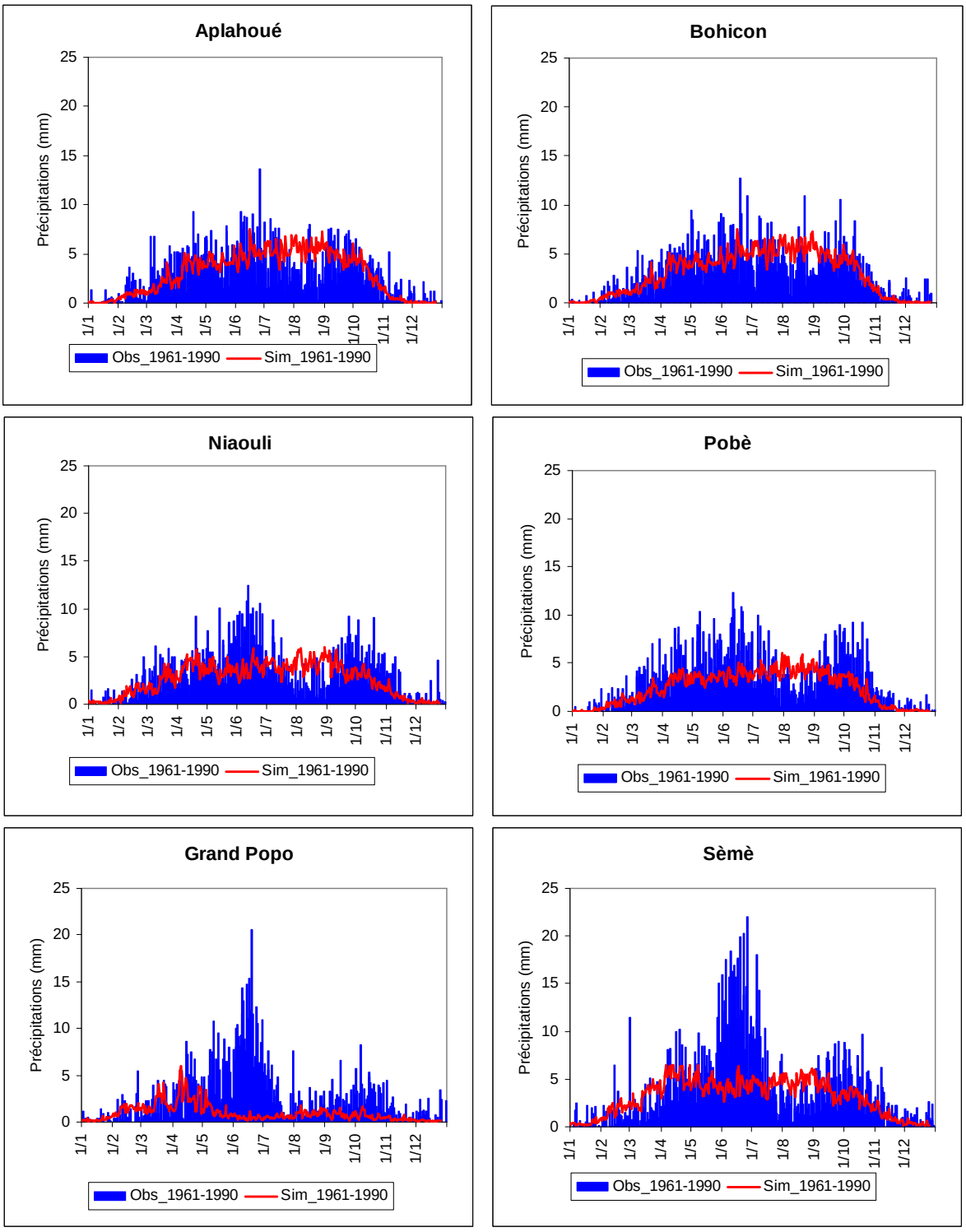


Figure 3.24 : Précipitations journalières observées et simulées sur la période 1961-1990

Les écarts entre les précipitations et les températures mensuelles observées et simulées sont présentés sont évalués sur la base des erreurs relatives et absolues (tableaux 3.VI et 3.VII).

Tableau 3.VI : Erreurs absolues et relatives des simulations de précipitations mensuelles sur la période 1961-1990

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	Aplahoué											
Observations	6	31	92	138	132	181	136	92	139	106	27	10
Simulations ECHAM4A2	3	27	55	109	123	147	158	172	152	111	22	2
Erreur absolue (mm)	3	4	37	29	9	33	22	79	13	4	5	8
Erreur relative (%)	45	7	40	21	7	18	16	75	3	4	18	81
	Bohicon											
Observations	4	29	75	127	153	175	142	112	140	119	22	14
Simulations ECHAM4A2	3	27	55	109	123	147	158	172	152	111	22	2
Erreur absolue (mm)	0	2	20	18	30	28	16	59	12	8	0	12
Erreur relative (%)	9	7	26	14	20	16	11	75	3	7	0	86
	Niaouli											
Observations	9	35	89	116	157	216	110	66	133	140	45	16
Simulations ECHAM4-A2	8	38	72	119	106	112	119	133	123	86	31	7
Erreur absolue (mm)	1	3	17	3	50	105	9	67	11	53	13	10
Erreur relative (%)	15	7	20	3	32	48	8	75	3	38	30	59
	Pobè											
Observations	9	27	94	141	186	199	125	79	145	146	29	10
Simulations ECHAM4-A2	3	26	54	97	103	113	122	136	117	84	18	2
Erreur absolue (mm)	6	1	40	44	83	86	3	57	27	62	11	8
Erreur relative (%)	67	7	43	31	45	43	2	75	3	42	37	78
	Grand Popo											
Observations	7	25	56	113	152	300	91	42	64	92	26	23
Simulations ECHAM4-A2	7	39	59	82	36	15	16	26	25	20	11	4
Erreur absolue (mm)	0	14	4	30	116	285	76	16	38	72	16	19
Erreur relative (%)	7	7	6	27	76	95	83	75	3	78	59	85
	Sèmè											
Observations	16	43	60	139	201	414	193	82	140	147	50	21
Simulations ECHAM4-A2	11	52	98	156	135	126	133	144	130	96	41	11
Erreur absolue (mm)	5	9	38	17	66	288	60	62	10	52	10	10
Erreur relative (%)	33	7	63	12	33	70	31	75	3	35	19	49

Tableau 3.VII : Erreurs absolues (°C) de simulations des températures mensuelles sur la période 1961-1990

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	Cotonou											
Observations	27,3	28,5	28,9	28,6	27,8	26,5	25,8	25,6	26,0	26,7	27,6	27,3
Simulations ECHAM4-A2	26,4	28,0	28,5	27,9	26,9	25,7	25,0	24,8	24,9	25,3	25,9	25,6
Erreur absolue (°C)	0,9	0,4	0,4	0,7	0,9	0,8	0,8	0,8	1,1	1,5	1,6	1,7
	Bohicon											
Observations	28,4	29,8	29,6	28,7	27,8	26,5	25,5	25,3	26,0	27,0	28,3	28,1
Simulations ECHAM4-A2	26,6	29,0	29,5	28,8	27,6	26,0	25,1	24,9	25,0	25,4	26,1	25,4
Erreur absolue (°C)	1,8	0,8	0,0	0,0	0,2	0,5	0,4	0,4	1,0	1,5	2,3	2,7

L'erreur dans la simulation des pluies est plus importante que pour les températures. Elle varie de 0 mm en janvier à Bohicon et Grand Popo à environ 280 mm en juin à Sèmè et Grand Popo, illustrant la sous reproduction des fortes pluies observées. Pour la température, l'erreur absolue est de 0 °C et 0,4 °C en mars à 1,7 °C et 2,7 °C en décembre respectivement à

Cotonou et à Bohicon. Les corrélations entre les données simulées et observées illustrées par les droites y = x des figures 3.25, 3.26 et 3.27 mettent en évidence la variation spatiale de l'efficacité du modèle PRECIS.

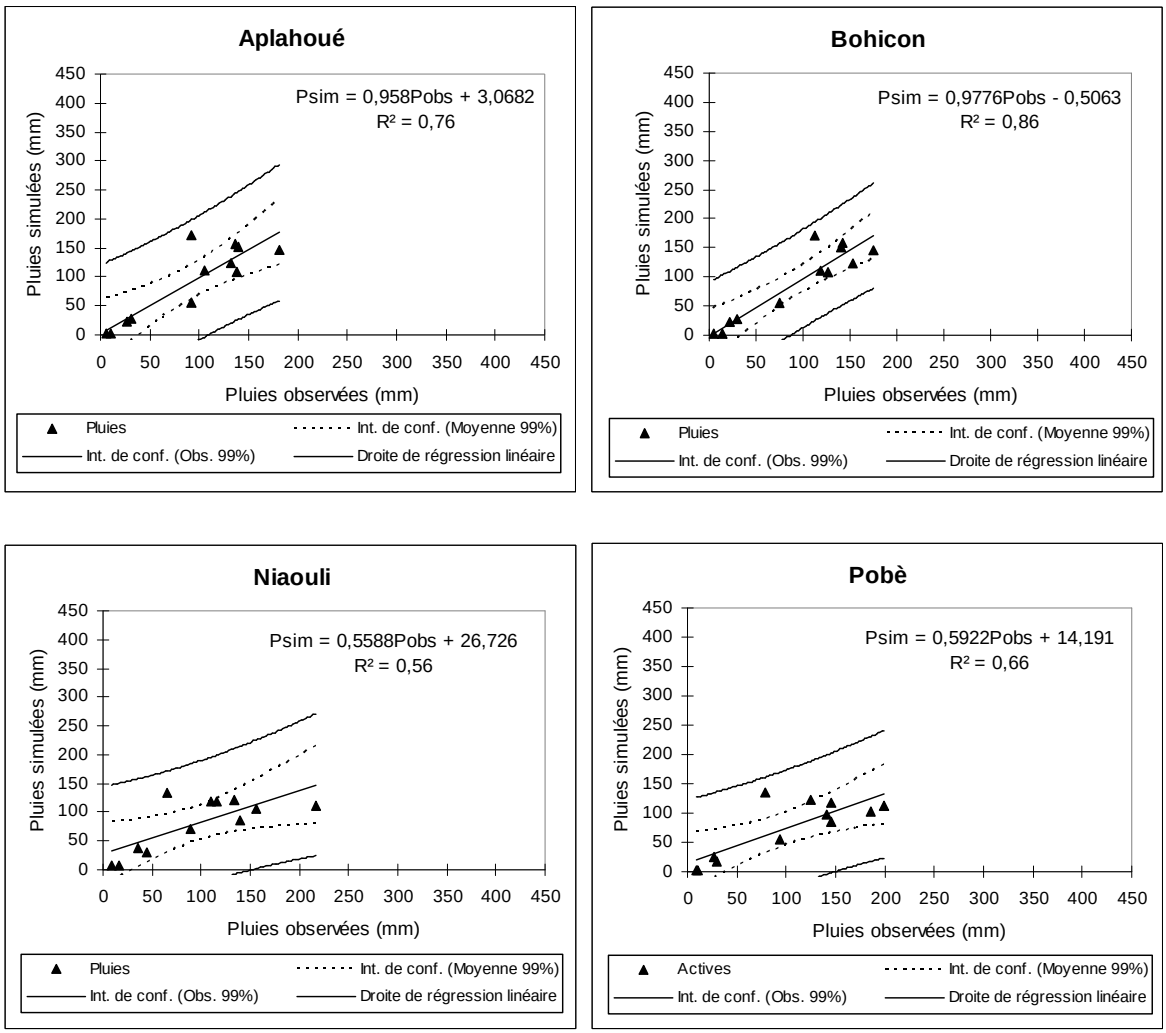


Figure 3.25 : Corrélation entre les pluies mensuelles simulées et observées (1961-1990) à Aplahoué, Bohicon, Niaouli et Pobè

Les tests de significativité aux seuils 95 % et 99 % et les coefficients de détermination (R^2 > 50 %) confirment la bonne reproduction, par le modèle PRECIS, des régimes de pluies bimodaux atténués (Niaouli, Pobè, Aplahoué et Bohicon).

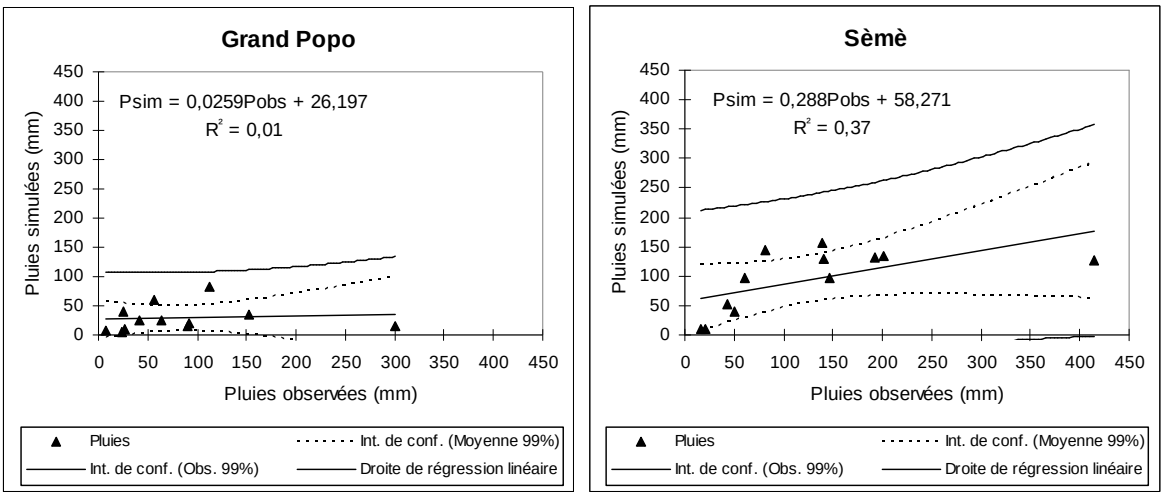


Figure 3.26 : Corrélation entre les pluies mensuelles simulées et observées (1961-1990) à Grand Popo et à Sèmè

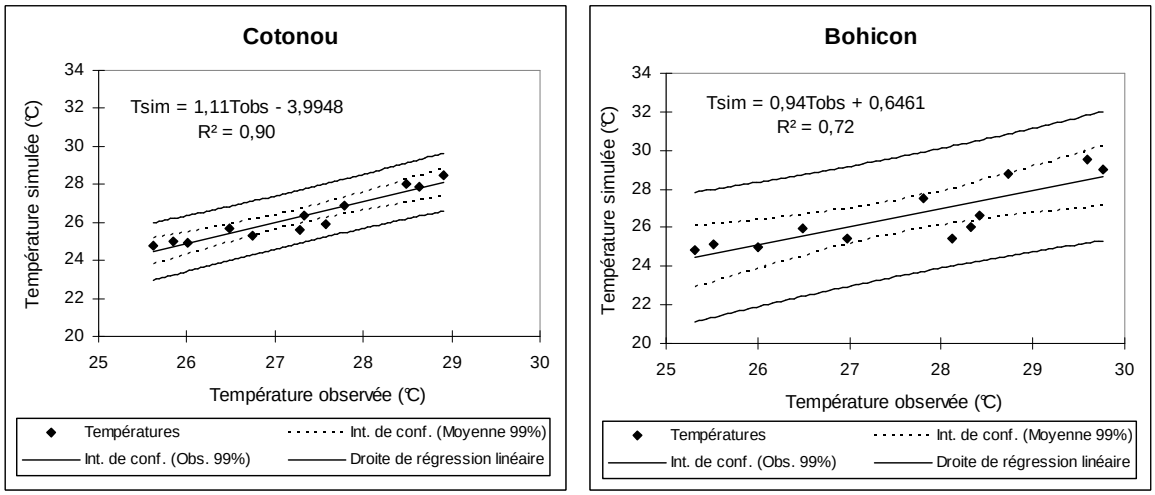


Figure 3.27 : Corrélation entre températures mensuelles simulées et observées (1961-1990)

Somme toute, le modèle PRECIS donne une meilleure simulation des températures. Ainsi peut-il être utilisé pour projeter le réchauffement climatique dans le bassin côtier du Bénin. Il semble relativement répondre à la modélisation des régimes pluviométriques bimodaux moins marqués par des événements de fortes intensités à l'intérieur des saisons et dans les secteurs central et nord du bassin.

Le modèle PRECIS, dans sa configuration actuelle, n'a pas simulé correctement la période pluvieuse de mai à juillet et les hauteurs de pluies extrêmes du régime pluviométrique bimodal. Cependant, au regard des biais relativement faible au niveau de plus de 60 % des régimes de pluie reproduits, les données de projection de la pluviométrie et des températures peuvent être utilisées, tenant compte des erreurs absolues.

3.2.2.2. Projection climatique dans le bassin côtier du Bénin à l'horizon 2070-2089

Les champs de pluie du bassin à l'horizon 2070-2089 montrent des régimes quasi similaires à ceux de la période 1961-1990 (figure 3.28).

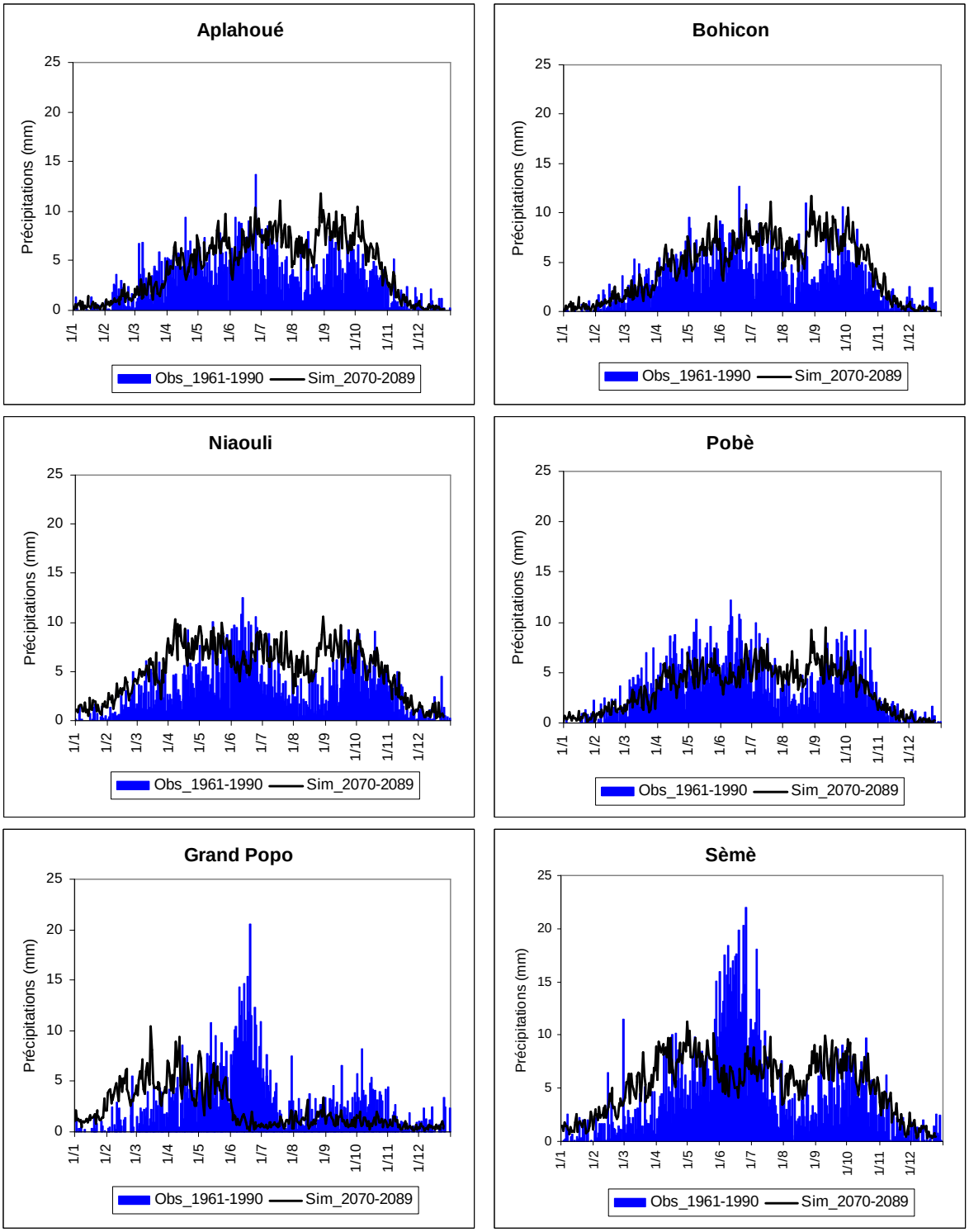


Figure 3.28 : Pluies mensuelles observées (1961-1990) et simulées à l'horizon 2070-2089

A l'horizon 2070-2089, l'évolution des pluies mensuelles est marquée par une augmentation ou une baisse selon le mois et en général un régime plus humide. Le mois de juin voire juillet devient moins arrosé à l'opposé de ceux d'août et septembre qui s'humidifient comme l'a mis en évidence la variabilité climatique (1951-2005). La variation spatiale des pluies mensuelles est présentée par la figure 3.29. Il en découle que le champ de pluie moyen mensuel simulé est de 134 mm/mois en 2070-2089 contre 94 mm observés et 80 mm simulés sur la période 1961-1990, soit une augmentation de 40 mm/mois. Les précipitations mensuelles varieront en moyenne de 18 mm en décembre à 214 mm en septembre. Les lames d'eau précipitée augmenteront de 32 % en mai, 56 % en juillet, 107 % en août et 75 % en septembre alors qu'elles diminueront de 24 % en juin par rapport à la période 1961-1990. Le modèle HadCM2 du MAGGIC/SCENGEN utilisé par Ogouwalé (2006) a mis également en évidence une baisse des précipitations pour certains mois à l'horizon 2050 dans le Bénin méridional.

Les cumuls de pluie de la grande saison pluvieuse, de la petite saison sèche, de la petite saison pluvieuse et de la grande saison sèche entre 2070 et 2089 seront respectivement en moyenne de 875 mm, 165 mm, 390 mm et 173 mm contre 718 mm, 80 mm, 244 mm et 89 mm enregistrés sur la période 1961-1990. A ce rythme, les pluies annuelles connaîtront également un regain comme le montre la figure 3.30

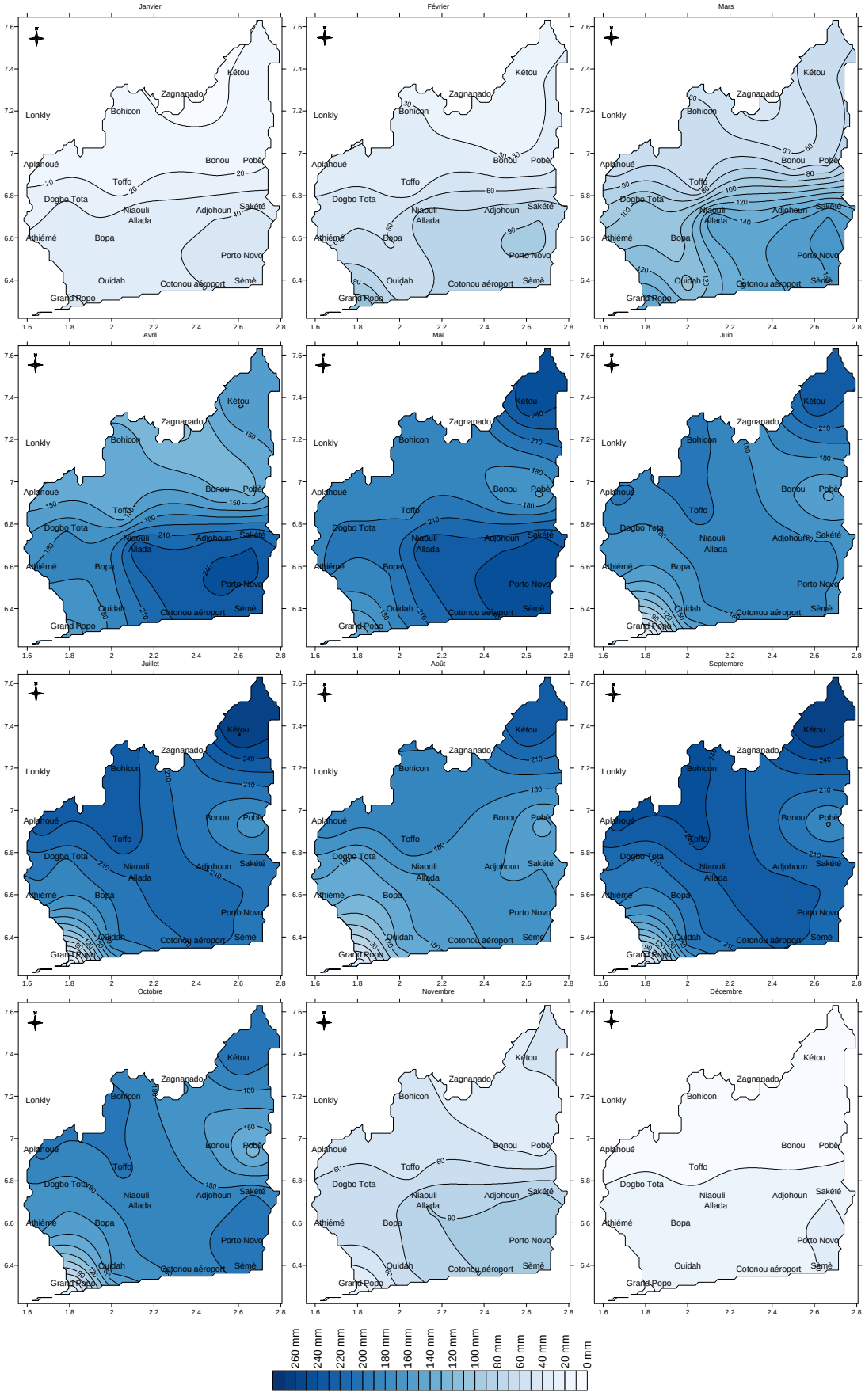


Figure 3.29 : Champs de pluie mensuelle moyenne à l'horizon 2070-2089

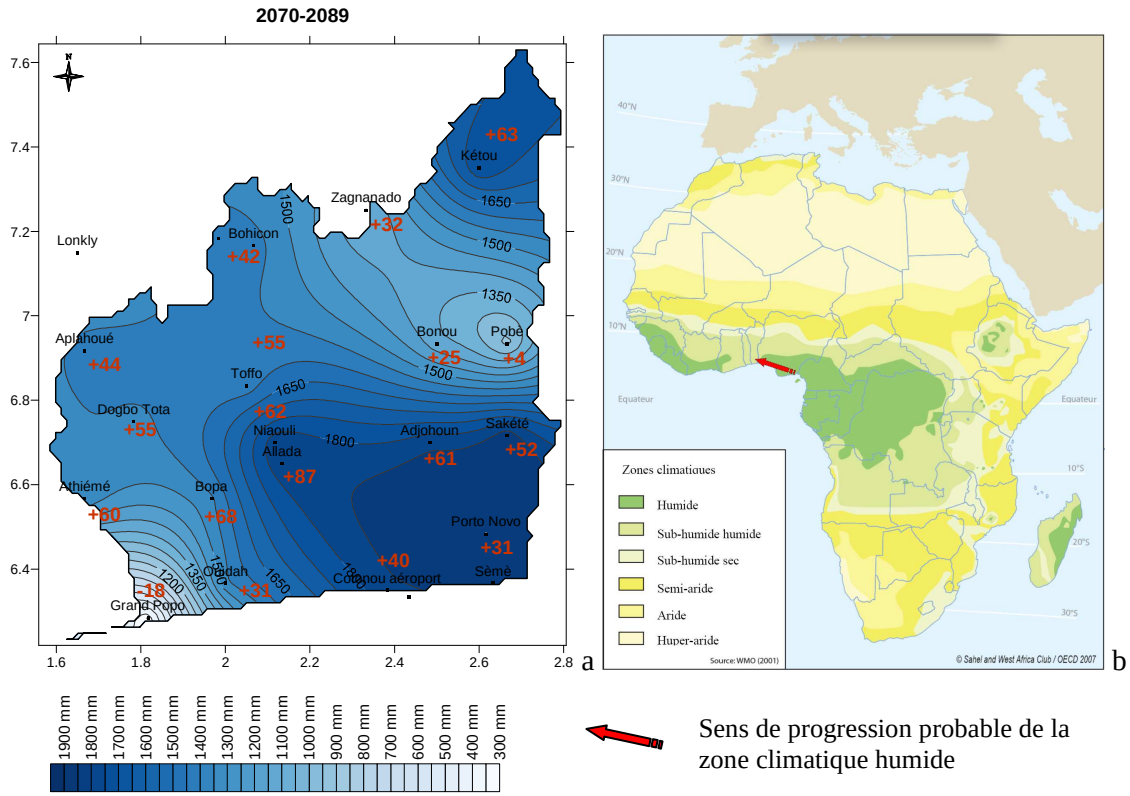


Figure 3.30 : Pluviométrie moyenne annuelle de la normale 2070-2089 du bassin sédimentaire côtier du Bénin (a) et zones climatiques de l'Afrique (b)

Le modèle projette pour le bassin côtier du Bénin à l'horizon 2070-2089 un scénario d'augmentation de la pluviométrie annuelle, qui semble être une extension de la zone climatique humide de l'Afrique centrale vers l'Afrique de l'ouest comme l'illustre la figure 3.30b. La pluviométrie en 2070-2089 par rapport à 1961-1990 augmentera en moyenne de 43 % avec une variation spatiale de -18 % (Grand Popo) à 87 % (Allada) dans le bassin. La pluviométrie à Pobè, initialement très abondante (1951-2005) pourrait être également affecté par une sécheresse probable.

L'augmentation des pluies annuelles ne conduirait pas systématiquement à la disparition de la diagonale de sécheresse mais à son confinement vers l'extrême sud-ouest. Ce résultat contrarie celui obtenu par Totin (2005) qui a mis en évidence, grâce aux méthodes statistiques empiriques une extension de cette diagonale vers le nord-est. La figure 3.30a montre que la compression de la diagonale de sécheresse est due à une extension du champ de fortes précipitations initialement situé à l'extrême sud-est vers le nord-ouest. Mais, le rétrécissement du couloir de sécheresse pourrait aussi être imputable à une inhibition des processus d'upwelling dans le secteur sud-ouest du Bénin. L'amélioration de la pluviométrie conduirait à un scénario de climat humide probablement favorable à une pérennisation de la recharge des aquifères. Toutefois, selon les prévisions du GIEC (2007), les fortes précipitations auraient

des effets néfastes sur la qualité de l'eau superficielle ou souterraine ; la contamination des sources d'approvisionnement et l'atténuation possible de la pénurie d'eau.

Par ailleurs, les températures mensuelles moyennes projetées seront de 28,4 à 32,3 °C (tableau 3.VIII) avec une importante hausse variant de 2,7 à 4,9 °C sur la période 2070-2089.

Tableau 3.VIII : Analyse statistique des températures moyennes projetées sur la période 2070-2089 dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin

Mois	Moyenne	Ecart type	Minimum	Maximum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile
Janvier	31,2	0,5	30,7	32,1	30,7	31,1	31,7
Février	32,1	0,8	31,2	33,4	31,3	31,8	32,9
Mars	32,3	0,8	31,3	33,9	31,5	32,1	33,1
Avril	31,2	0,7	30,4	32,3	30,6	31,1	31,8
Mai	30,0	0,4	29,5	30,6	29,6	30,0	30,2
Juin	29,1	0,2	28,7	29,4	28,8	29,1	29,2
Juillet	28,4	0,2	27,9	28,7	28,2	28,4	28,6
Août	28,5	0,2	28,0	28,8	28,4	28,6	28,7
Septembre	28,6	0,2	28,1	28,9	28,4	28,6	28,8
Octobre	29,3	0,2	28,8	29,6	29,0	29,3	29,5
Novembre	30,4	0,3	30,0	31,0	30,1	30,5	30,7
Décembre	30,6	0,3	30,2	31,2	30,2	30,5	30,8

La température moyenne annuelle sera de 30 °C en 2070-2089 contre 26,5 °C sur la période 1961-1990. L'évolution des températures moyennes annuelles montre que les secteurs nord et ouest se réchaufferont plus que le secteur sud-est (figure 3.31).

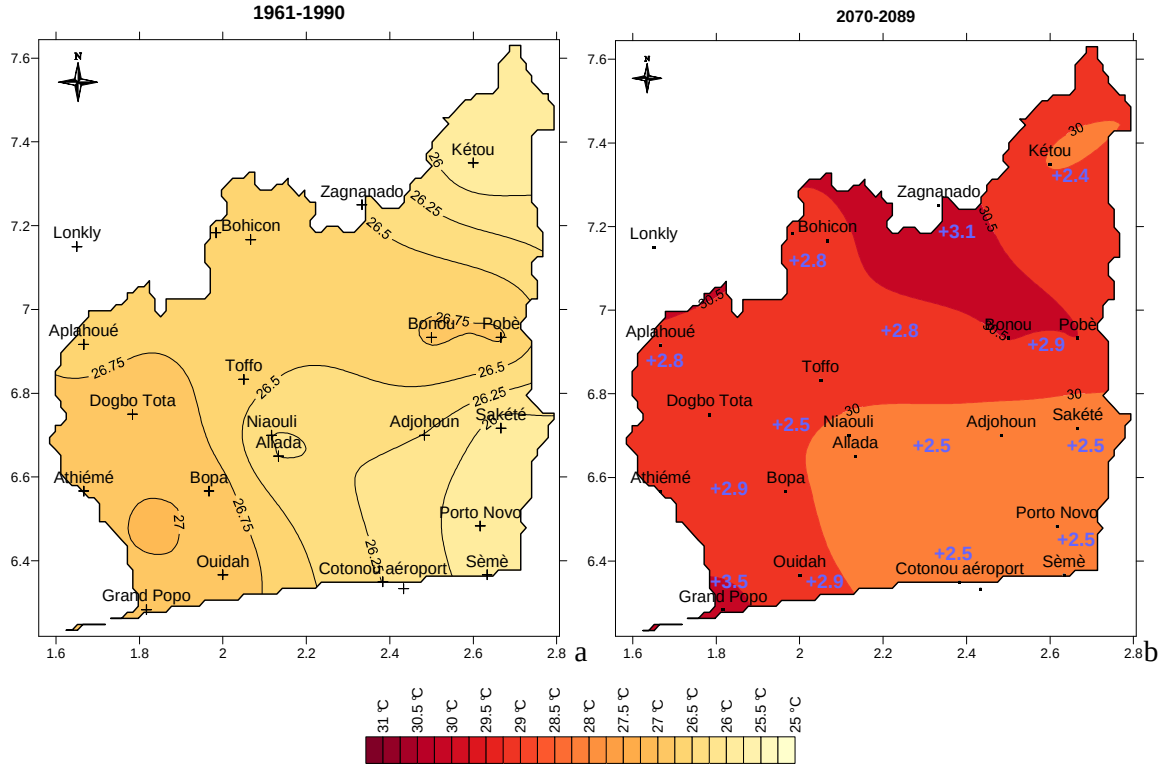


Figure 3.31 : Température moyenne annuelle de 1961-1990 (a) et de 2070-2089 (b)

Les températures moyennes annuelles varient d'une station à une autre de 29,7 à 30,7 °C, avec une augmentation de 2,4 à 3,5 °C et comparativement à la moyenne de la période de référence (25,8 °C à 27 °C). Les projections réalisées par Ogouwalé (2006) montrent une hausse des températures de 1,5 à 2 °C dans le Bénin méridional dans le scénario SRES B2 à l'horizon 2050. GIEC (2007) montre qu'une augmentation de températures moyennes de 2 à 6,1 °C aura pour conséquence une élévation du niveau moyen de la mer de l'ordre de 0,4 m à 3,7 m due à la seule dilatation thermique.

Cette élévation du niveau marin constitue un risque potentiel de diminution de la quantité et la qualité d'eau douce disponible en raison de l'intrusion d'eau salée surtout dans la bande littorale du bassin côtier du Bénin.

Les travaux de modélisation effectués par Boukari *et al.,* (2008) ont mis en évidence, dans les conditions actuelles, une intrusion d'eau de mer dans les forages d'approvisionnement en eau à partir du ''lac'' Nokoué mais également due à une recharge provenant des lagunes côtières. Ce phénomène est plutôt lié aux pompages intensifs d'eau dans le champ de captage de Godomey et non à l'influence directe de l'océan. Mais au regard de la configuration des lentilles d'eau douce qui flotte sur de l'eau salée - eau de l'océan au sud et eau des lagunes saumâtres au nord (Géohydraulique, 1985a ; Turkpak, 1991) dans le littoral du Bénin, l'intrusion saline induite par une élévation potentielle du niveau marin affecterait les aquifères côtiers. Ceci est d'autant plus réel que la profondeur de l'eau, dans la zone de cordons littoraux entre la mer et les lagunes, est de 2,5 à 3,5 m.

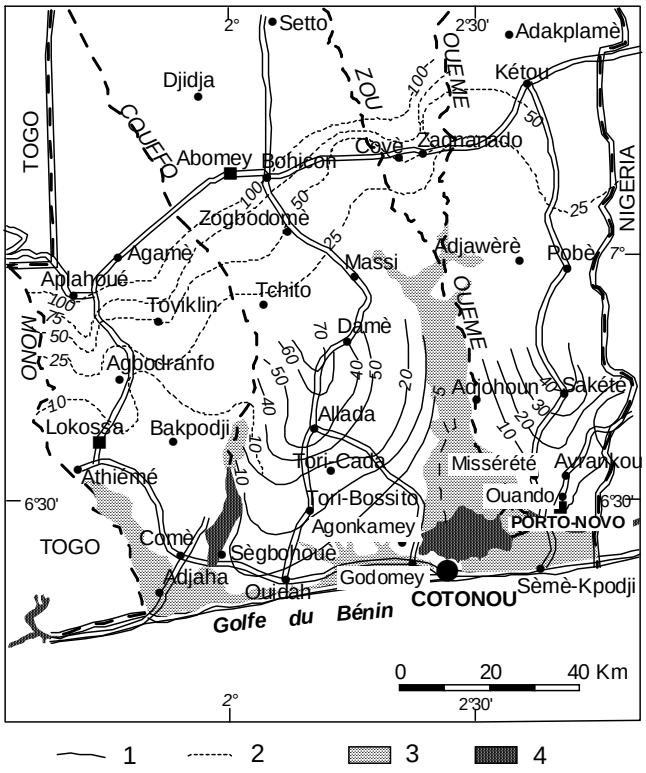
Conclusion partielle

L'évolution climatique dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin a montré que la pluviométrie annuelle a baissé de 9 à 30 % sur la période 1951-2005 alors qu'à l'horizon 2070-2089, elle augmenterait de -18 à 87 %. Cette évolution contrastée de la pluviométrie se fait dans un contexte de hausse des températures moyennes de 1,8 °C entre 1951 et 2005 et de 3,7 °C d'ici à 2070-2089. Ainsi, pourrait s'observer dans le bassin côtier du Bénin le passage probable d'un scénario de climat sec (persistance de la sécheresse) à un scénario de climat humide (amélioration de la pluviométrie, perceptible depuis les années 1990) malgré la hausse continue de la température. Au regard des incertitudes qui marquent encore les modifications du système pluviogène en Afrique de l'ouest, il importe de tenter une analyse de la dynamique quantitative des eaux souterraines en fonction des scénarios climatiques dans le bassin côtier du Bénin.

Chapitre IV

DYNAMIQUE DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES DANS LE BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN

L'hydrodynamique du système aquifère du bassin côtier du Bénin est étudiée à travers les fluctuations des niveaux piézométriques, l'estimation de la recharge basée sur les données hydrologiques et climatologiques. De plus, l'identification des facteurs naturels et ou anthropiques, qui influencent la réalimentation ou la qualité des eaux souterraines a contribué à évaluer la vulnérabilité de la ressource dans un contexte de changement environnemental dans le bassin. Les eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier du Bénin sont contenues dans quatre aquifères. Ils sont répartis du bas vers le haut comme suit : l'aquifère du Crétacé supérieur - Turonien-Coniacien- (sable et grès), l'aquifère du Paléocène (calcaire et sable), l'aquifère du Continental terminal (sable) et l'aquifère du Quaternaire (sable côtier et alluvial) (cf. chapitre II pour plus de détails). La piézométrie des nappes du bassin sédimentaire côtier du Bénin est illustrée par la figure 4.1.



1= Courbe isopièze de l'aquifère du Continental terminal s.s. ; 2 = Courbe isopièze de l'aquifère du Turonien-Coniacien affleurant ; 3 = Dépôts quaternaires ; 4 = ''Lacs'' et lagunes

Figure 4.1 : Variation spatiale de la piézométrie dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin *(U.N., 1990, rapporté par Boukari et Alassane, 2007)*

Les piézomètres FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD dont les données sont utilisées pour l'analyse de la sensibilité des eaux souterraines sont situés au sud-est du plateau d'Allada correspondant au secteur de Godomey-Agonkanmey (figure 4.2) où la piézométrie semble inférieure à 5 m.

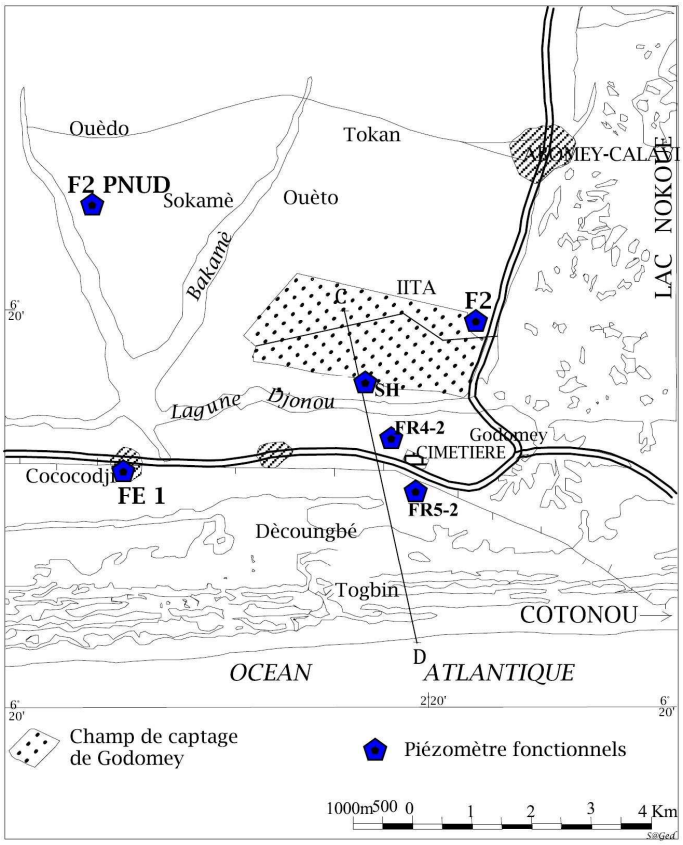


Figure 4.2 : Localisation des piézomètres FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD dans le sud-est du plateau d'Allada

La figure 4.2 montre que les piézomètres F2 et SH sont situés dans le champ de captage de Godomey sur le plateau d'Allada, FR4-2, FR5-2 et FE1 hors de ce champ et dans la plaine côtière puis F2PNUD, plus au nord du champ de captage.

4.1. Dynamique hydroclimatique des eaux souterraines

La sensibilité du toit de la nappe suivi à l'aide des piézomètres FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD a permis de caractériser l'impact de la variabilité hydroclimatique et de l'influence des pompages intensifs sur la dynamique des eaux souterraines. De plus, le bilan d'eau et les volumes d'eau mobilisés par les nappes de versants ont servi d'indicateurs du comportement hydrodynamique du système aquifère du bassin côtier.

4.1.1. Régime pluvio-piézométrique des forages FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD

La figure 4.3 illustre les régimes du toit des nappes de FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD dans leur relation avec les événements pluvieux mensuels du sud-est du plateau d'Allada sur la période 1991-2007.

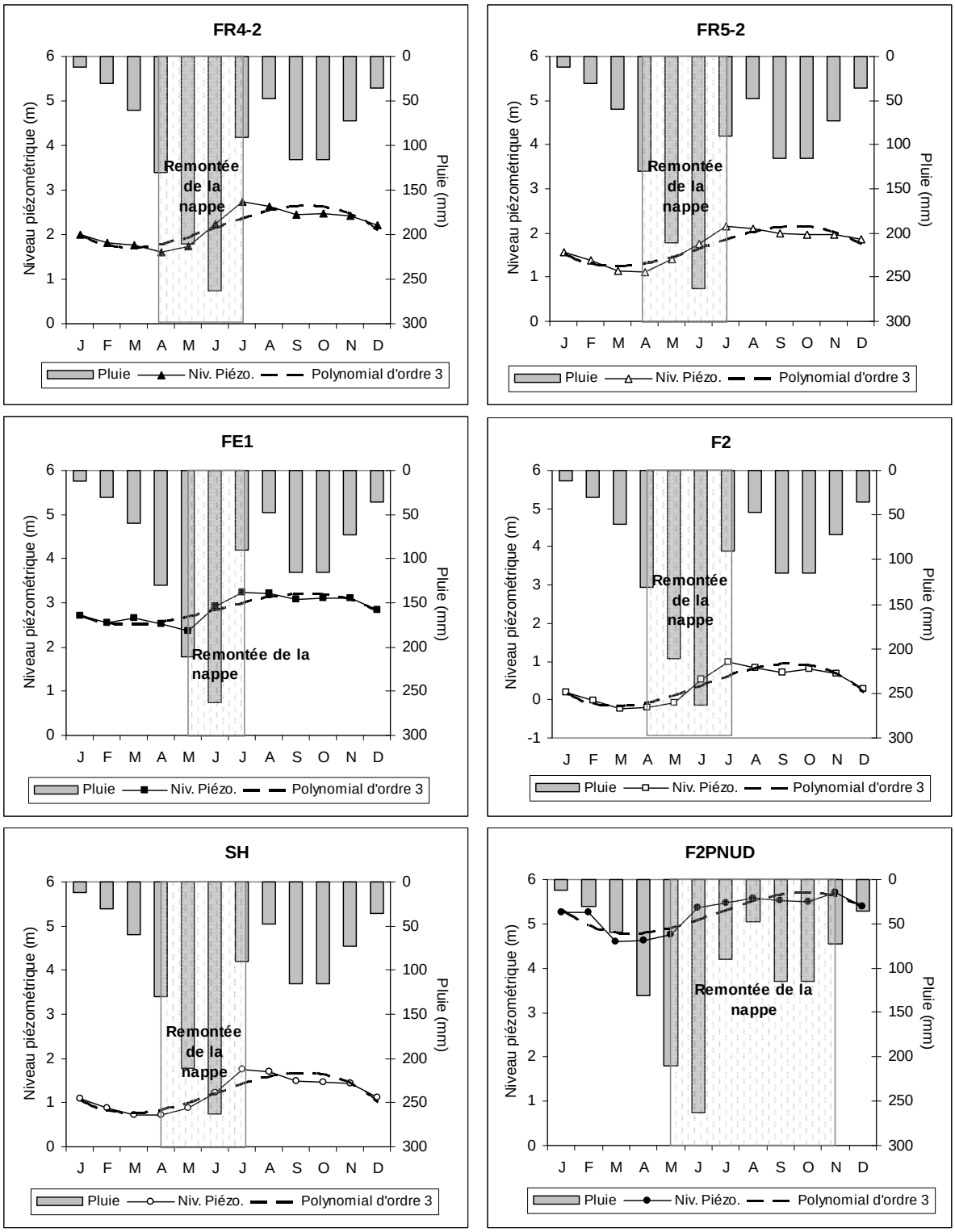


Figure 4.3 : Relation pluie-niveau piézométrique de FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD

L'analyse comparée des régimes de pluies et de niveaux du toit des nappes montre, pour un régime pluviométrique moyen bimodal, un régime piézométrique unimodal. Le maximum piézométrique, mettant en évidence le temps de réponse des nappes souterraines est observé en juillet pour FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH, c'est-à-dire entre les deux optima pluviométriques (juin et octobre), et d'août à novembre pour F2PNUD.

La décomposition des régimes piézométriques montre une période de remontée du toit de la nappe sur trois mois (d'avril à juillet) et une autre de récession qui dure environ neuf mois (août à avril) pour la nappe de FR4-2, FR5-2, F2, SH. Le régime du FE1 présente une période de recharge de deux mois (mai à juillet). Celui de F2PNUD s'étend de façon continue de mai à novembre et son abaissement saisonnier s'étale de décembre à mars-avril ; soit cinq mois de décharge de l'eau stockée en période pluvieuse.

Les régimes piézométriques coïncident avec une fonction polynomiale de 3e degré qui explique la réponse de la nappe aux grandes séquences climatiques de l'année. Ainsi, l'infiltration efficace s'effectue essentiellement au cours de la grande saison pluvieuse entre mai et juillet où l'évapotranspiration réelle (ETR) est inférieure aux précipitations (figure 4.4).

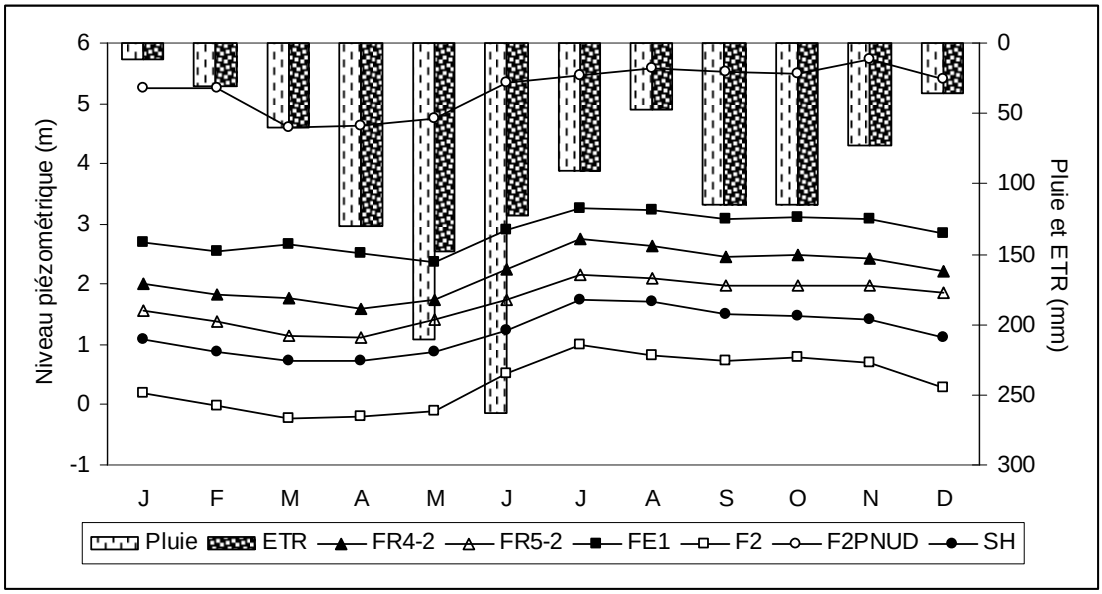


Figure 4.4 : Régimes de pluie, de l'ETR et de niveaux piézométriques de FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD

La petite saison sèche du mois d'août semble être l'élément de déclenchement du tarissement des nappes FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH car déjà l'ETR égale les lames d'eau précipitée, inhibant les processus d'infiltration. En effet, la petite saison pluvieuse n'a pas d'influence substantielle sur le niveau de ces nappes. La récession piézométrique continue pendant la

grande saison sèche jusqu'au début de la grande saison pluvieuse 2 à 3 mois après les premières pluies. Ce constat est aussi fait par Boukari (1998) qui montrait que la remontée des niveaux ne se fait pas concomitamment avec le retour de la pluie.

La réalimentation de la nappe de F2PNUD se fait de façon continue de mai à septembre voire octobre ou novembre correspondant à la période couvrant la grande saison pluvieuse, la petite saison sèche et la petite saison pluvieuse. De la grande saison sèche au début de la grande saison pluvieuse, s'observe la décrue de la nappe. Ceci s'explique par la profondeur plus importante de la nappe au toit de F2PNUD, donc de la zone non saturé comparativement à la nappe du toit de FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH plus influencée par la variabilité climatique. L'abaissement continu des nappes d'août à avril est de 0,04 m/mois pour F2, 0,13 m/mois pour SH, 0,19 m/mois pour FR5-2, 0,24 m/mois pour FR4-2 et de 0,57 m/mois pour F2PNUD.

Selon Boukari (1998 et 2002), pendant la période d'octobre à avril principalement (grande saison sèche), les nappes qui ne sont plus réalimentées, tarissent progressivement sous le triple effet de l'évapotranspiration, des prélèvements et des vidanges naturelles dans les aires d'émergence (lac, lagunes et océan). Lorsque la grande saison pluvieuse s'installe (mars à juillet), les nappes sont réalimentées et amorcent leur remontée environ deux mois après les premières pluies, c'est-à-dire souvent au mois de mai. Mais, ce délai est fonction de l'épaisseur de la zone non saturée et du temps nécessaire pour son imbibition. Les eaux pluviales cumulées de février à avril, par exemple, ne permettent pas du coup de relever le niveau des nappes, même étant situées dans la plaine côtière. Ce phénomène est lié à la compensation des pertes par évaporation et à la saturation des profils de sols au début de la grande saison pluvieuse. Quant à l'abaissement peu sensible de la nappe entre août et décembre, elle est due à la présence d'eau accumulée dans les profils de sols et dans la zone non saturée au cours des saisons pluvieuses et au faible impact de l'ETR.

Au total, la sensibilité des eaux souterraines à la dynamique du climatique, à l'échelle mensuelle, augure les impacts des changements climatiques sur la disponibilité quantitative comme l'illustre l'évolution tendancielle.

4.1.2. Evolution tendancielle des ressources en eau souterraine

L'évolution interannuelle des charges hydrauliques au niveau des piézomètres FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD est illustrée par la figure 4.5.

L'amplitude moyenne des fluctuations de niveaux du toit de la nappe est de 0,6 à 3,1 m ; 0,6 à 2,3 m ; 0,4 à 3,3 m ; 0,6 à 3,1 m ; 0,6 à 2,8 m et 0,1 à 6,2 m respectivement dans les piézomètres FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD sur la période 1991-2007. Mais ces variations moyennes cachent des disparités que permettent de mettre en évidence les événements piézométriques hebdomadaires extrêmes du tableau 4.I.

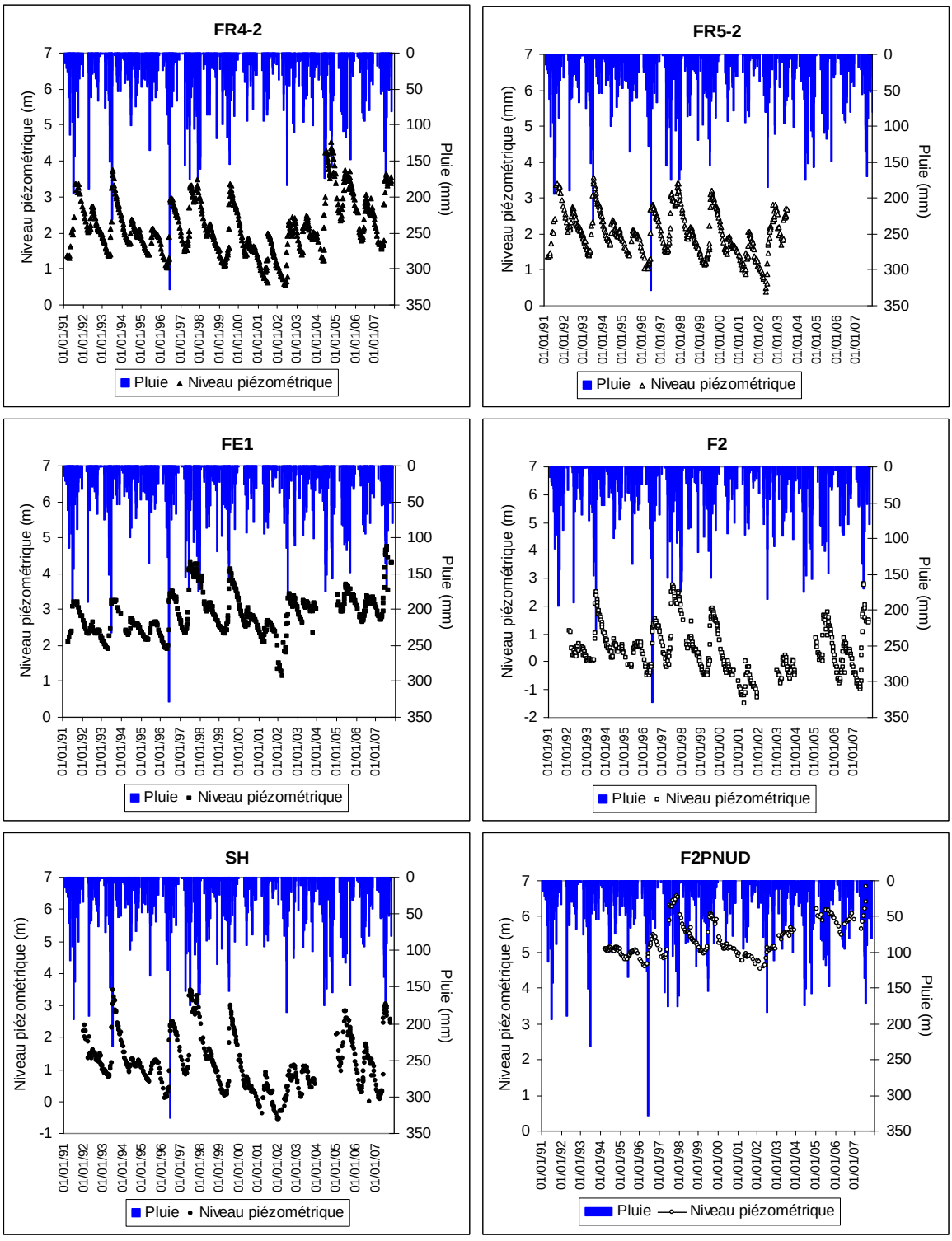


Figure 4.5 : Evolution interannuelle des niveaux piézométriques sur la période 1991-2007

Tableau 4.I : Niveaux piézométriques hebdomadaires extrêmes sur la période 1991-2007

Piézomètres	Moyenne	Ecart-type	Extrême minimum	Extrême maximum	Amplitude extrême
FR4-2	2,2	0,8	0,6	4,5	4,0
FR5-2	1,8	1,1	-3,3	3,6	6,9
FE1	2,9	0,6	1,2	4,8	3,6
F2	0,4	0,9	-1,5	2,8	4,3
SH	1,2	0,9	-0,6	3,5	4,1
F2PNUD	5,4	0,5	4,5	7,0	2,5

Source : *Totin, avril 2010*

Dans les conditions climatiques extrêmes, le niveau du toit de la nappe de FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD varie respectivement de 4 m, 7 m, 3,6 m, 4,3 m, 4,1 m et 2,5 m du temps de la récession à celui de la remontée piézométrique. La remontée de surfaces piézométriques dans F2PNUD est plus faible que dans les autres piézomètres. Cette faiblesse relative des amplitudes de fluctuations de la nappe au niveau de F2PNUD, ainsi que le lissage des courbes représentatives de l'évolution de sa surface piézométrique, sont à mettre en relation avec sa plus grande capacité de modulation du signal d'entrée (la pluie). Cette situation s'observe du sud vers le nord du système aquifère concerné, du fait d'une épaisseur saturée nettement plus importante au sud dudit système. Ces deux phénomènes s'accentuent en effet avec l'augmentation de l'épaisseur de la zone non saturée et, lorsque la nappe devient libre, la porosité utile (Boukari, 1998).

L'évolution observée du climat sur le bassin sédimentaire côtier du Bénin et les événements extrêmes inhérents, affectent la disponibilité des eaux souterraines comme le montrent les tendances séquentielles et générale des niveaux de la nappe. La figure 4.6 illustre l'évolution interannuelle des niveaux piézométriques moyennes, maximales et minimales dans les piézomètres FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD sur la période 1991-2007.

La tendance d'évolution des niveaux piézométriques moyens et extrêmes (maximaux et minimaux) est à la baisse de 1991 à 2001 et a connu une légère hausse sur la période 2002-2007, en fonction de la variabilité pluviométrique. A cet effet, les anomalies pluviométriques positives coïncident avec le relèvement du toit de la nappe et celles négatives avec l'abaissement des niveaux piézométriques.

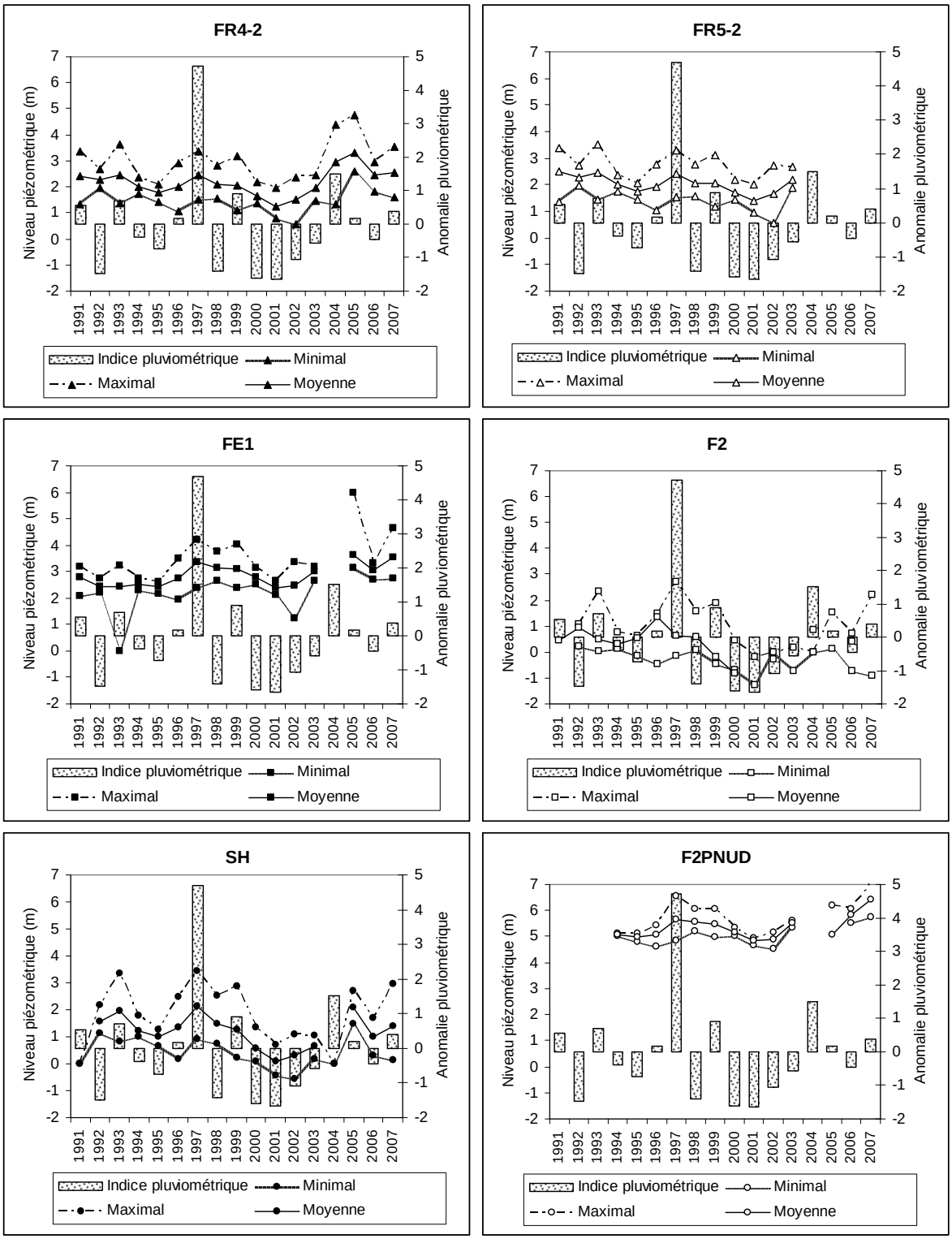


Figure 4.6 : Tendances interannuelles des niveaux piézométriques moyens et extrêmes de FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD

La tendance à la baisse de la séquence 1991-2001 est traduite par une diminution des niveaux les plus bas comme les plus élevés atteints par la surface piézométrique et celle à la hausse de 2002-2007 par leur augmentation. Selon Diop (2002), le bilan hydrologique des nappes d'eau souterraine est fonction de la hauteur de pluie annuelle (déficitaire ou excédentaire). Dans le

même sens, Boukari (1998), Taylor & Alley (2001), Faye *et al.* (2009), Totin *et al.* (2009) expliquent que l'importance des fluctuations des niveaux d'eau peut considérablement varier d'une saison à une autre et d'année en année en réponse à la modification des conditions climatiques. Les tests de significativité illustrent la relation entre les événements pluvieux et piézométriques (tableau 4.II).

Tableau 4.II : Tests de significativité (corrélation sur rang de Spearman) de la tendance des niveaux piézométriques en fonction des événements pluviométriques

Indice de significativité / Piézomètre	**Niveau minimal**		**Niveau maximal**		**Niveau moyen**	
	Matrice de corrélation (Spearman)	*p-values (α_1)*	*Matrice de corrélation (Spearman)*	*p-values (α_1)*	*Matrice de corrélation (Spearman)*	*p-values (α_1)*
FR4-2	0,000	1,000	0,821	**< 0,0001**	0,713	**0,002**
FR5-2	-0,044	0,892	0,775	**0,003**	0,654	**0,018**
FE1	0,024	0,930	0,583	**0,020**	0,479	0,062
F2	0,067	0,795	0,546	**0,025**	0,228	0,374
SH	0,143	0,579	0,372	0,141	0,533	**0,029**
F2PNUD	0,182	0,565	0,608	**0,039**	0,517	0,086

Niveau de signification $\alpha_0 = 0,05$; p-values (α_1) = Probabilité de non dépassement

Les données du tableau 4.II montrent que la tendance d'évolution des niveaux piézométriques maximaux, traduisant donc la réalimentation des réservoirs souterrains, dépend en grande partie des événements pluvieux (α_1<0,05). Quant aux niveaux piézométriques minimaux, enregistrés dans la période de la récession pluviométrique, leur tendance non significative dépendrait plus de l'ETR et peut-être aussi des pompages intensifs. La singularité de la nappe de SH serait liée à cette influence de pompages dans le champ de captage de Godomey.

Tout déficit pluviométrique se fait sentir sur l'évolution de la ressource en eau souterraine, du fait de la faiblesse des apports pluvieux et de l'importance de la reprise évapotranspiratoire, de sorte qu'une succession d'années déficitaires pourrait se traduit par un épuisement progressif de la nappe. Mais l'excédent pluviométrique d'une année n peut combler les déficits de charges hydrauliques de cette année et d'une année n+1, n+2. De la même manière, le déficit pluvial d'une année m peut induire, selon son ampleur, une baisse du niveau piézométrique en cette même année et au cours des années m+1, m+2, … m+n. Ce phénomène est observé lorsque les hauteurs de pluie ne permettent pas de combler le déficit créé et, surtout, quand l'évapotranspiration augmente. La variation des eaux souterraines ne dépend donc pas forcément des conditions climatiques ponctuelles ; elle peut être la résultante d'une succession saisonnière ou annuelle d'événements. Le rabattement progressif de la

surface piézométrique a un effet évocateur du déficit de recharge et par ricochet l'amenuisement des ressources en eaux souterraines.

Dans un scénario climatique de sécheresse comme mis en évidence sur la période 1951-2005, le bassin sédimentaire côtier du Bénin se trouvera confronté à un stress hydrique à l'horizon des changements climatiques. Ce cas, présagé pour l'Afrique de l'ouest (GIEC, 2007), pourrait s'aggraver sous l'effet de la pression additionnel d'extraction intensive d'eau dans les champs de captage du bassin en particulier celui de Godomey. Un scénario inverse est a priori admis lorsque adviendrait un climat humide tel que le montre les données de sortie du modèle PRECIS. Ce qui conduirait à une amélioration de la disponibilité quantitative des ressources en eaux souterraines.

La variabilité des niveaux piézométriques, démontré supra, est un indicateur de l'influence du climat sur la recharge des réservoirs souterrains et, donc sur les stocks d'eau. Korkmaz (1988) explique que les niveaux des eaux souterraines fluctuent naturellement en réponse aux événements climatiques et aux contraintes imposées par les caractéristiques hydrogéologiques et topographiques. Ces fluctuations sont induites par l'infiltration des eaux pluviales, estimée en terme de recharge des aquifères, surtout ceux à nappes libres.

4.1.3. Estimation de la recharge des nappes d'eau souterraine

4.1.3.1. Recharge estimée par la méthode de fluctuation piézométrique

La recharge moyenne estimée par la méthode de fluctuation piézométrique des nappes de FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD, en fonction des paramètres du tableau 4.III est illustrée par la figure 4.7.

Tableau 4.III : Recharge moyenne (1991-2007) estimée par la méthode de fluctuation piézométrique des nappes suivies

Piézomètres / Paramètres	FR4-2	FR5-2	FE1	F2	SH	F2PNUD
Profondeur du forage (m)	34,04	46,04	81	-	-	53,80
Niveau maximal (m)	2,9	2,69	3,36	1,27	2,01	5,75
Niveau minimal extrapolé (m)	0,8	0,84	1,96	-1,25	-0,60	4,49
Amplitude piézométrique (m)	2,2	1,84	1,32	2,19	2,44	0,81
Porosité efficace (S_y en %)	0,26*	0,26*	0,26*	0,07**	0,07**	0,07**
Recharge estimée (m/an)	0,6	0,48	0,34	0,15	0,17	0,06
Taux de recharge (%)***	48	41	32	15	16	5

*NB : * Texture de sable moyen (plaine côtière) ; ** Texture sablo-argileuse (plateau d'Allada) ; *** Taux de recharge calculé par rapport à la pluie moyenne de 1184 mm sur la période 1991-2007*

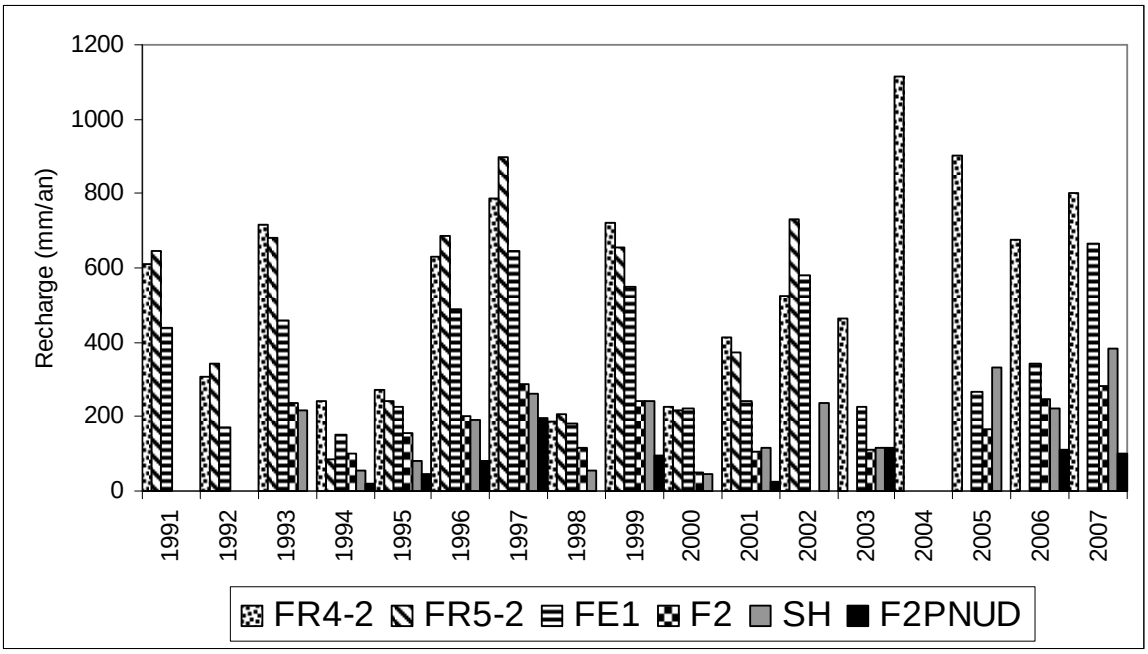


Figure 4.7 : Recharge estimée dans le secteur du champ de captage de Godomey

Les apports d'eau annuels sont de 188 à 1114 mm/an, 86 à 895 mm/an, 152 à 668 mm/an, 49 à 286 mm/an, 46 à 382 mm/an et 22 à 196 mm/an respectivement au niveau de FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD sur la période 1991-2007. Les taux de recharge respectifs représenteraient 22 à 77 %, 8 à 82 %, 14 à 65 %, 6 à 23 %, 5 à 30 % et 2 à 11 % des cumuls pluviométriques annuels (735 à 2453 mm) de cette même période. Dans les conditions hydroclimatiques actuelles du bassin, la nappe se recharge moins au niveau de F2PNUD, F2 et SH que de FE1, FR5-2 et FR4-2. Cela confirme leur faible sensibilité à la dynamique climatique et l'influence des facteurs lithostratigraphiques, de la profondeur de la zone saturée, etc. Ces profils lithostratigraphiques sont couronnés par la Terre de barre (un mélange assez homogène d'argiles kaoliniques et des sables quartzeux fins et moyens) sur le plateau (F2PNUD, F2, SH) et le sable dans la plaine côtière (FR4-2, FR5-2, FE1) (Turkpak, 1991 ; Boukari, 1998). Cela expliquerait, au regard des taux de réalimentation des nappes, le fait que l'infiltration (dépendante aussi de la profondeur du toit des nappes) est plus élevée dans la plaine côtière sableuse que sur les plateaux. Mais, la recharge des aquifères est plus fonction des effets combinés du climat, des paramètres hydrogéologiques, de l'humidité des sols, de la topographie, des états de surface et des extractions d'eau qu'à leur simple influence.

L'estimation de la recharge par la méthode de fluctuation piézométrique est limitée aux données des piézomètres FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD, donc du secteur sud-est du plateau d'Allada. Pour évaluer les quantités d'eau pluviale qui pourraient approximativement

participer à la réalimentation des aquifères dans tout le bassin, il est fait appel au modèle de calcul du bilan d'eau de Thornthwaite.

4.1.3.2. Recharge estimée par la méthode de bilan d'eau de Thornthwaite

Les termes du bilan hydrologique déterminés à l'aide du modèle de Thornthwaite et en fonction d'une variation des réserves utiles du sol à saturation sont présentés dans le tableau 4.IV.

Tableau 4.IV : Termes moyens (1964-2005) du bilan d'eau (RU = 100 mm et RU > 100 mm à saturation) dans le bassin côtier du Bénin

	J	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**J**	**A**	**S**	**O**	**N**	**D**	**An**
Pluie	9	29	74	123	150	209	122	71	124	124	33	13	1080
ETP	130	142	161	152	143	118	121	122	125	135	136	130	1615
P - ETP	-121	-113	-87	-29	7	91	2	-51	-1	-12	-103	-117	-535
	RU = 100 mm												
ETR	13	30	74	123	138	118	116	98	116	127	64	25	1042
Δsol	-4	-1	0	0	12	60	1	-27	6	-3	-31	-12	0
Déficit	117	112	87	29	5	0	4	24	8	8	72	105	573
Recharge	0	0	0	0	0	31	5	0	2	0	0	0	38
	RU > 100 mm												
ETR	31	36	78	124	138	118	113	92	117	126	64	36	1073
Δsol	-22	-8	-4	-1	12	88	6	-21	7	-2	-31	-23	0
Déficit	99	105	83	28	5	0	7	31	7	10	72	94	542
Recharge	0	0	0	0	0	4	3	0	0	0	0	0	7

L'analyse des termes du bilan d'eau montre que la disponibilité de l'eau pluviale pour la recharge des aquifères dépend non seulement de la pluie et de la demande évaporatoire mais aussi de la variation de l'humidité des sols. Ainsi, dans les mêmes conditions de bilan climatique (P-ETP), l'ETR, les stocks d'eau des sols et par conséquent la recharge varie en fonction de RU = 100 mm ou RU > 100 mm à saturation. Il faut remarquer que même si les apports d'eau des premières pluies de mars à mai (74 à 150 mm) ne permettent pas de reconstituer les déficits hydriques des sols, ils réduisent de 94 à 112 mm leur valeur par rapport à celle de janvier (99 à 117 mm). La saturation progressive de l'humidité des sols entre avril et juin (P>ETR et déficit nul) entraîne un surplus d'eau. Ceci constituerait le signal de ruissellement de surface ou de recharge des aquifères de juin à août, là où la nappe est superficielle, voire septembre-octobre là où elle est profonde. En général, la recharge est nulle pendant la période (novembre à février) où le bilan climatique est négatif, les stocks d'eau des sols négatifs à nulle, ETR $\geq$ P et les déficits (ETP-ETR) importants (72 à 117 mm). L'eau pluviale n'est réellement disponible pour la réalimentation des nappes souterraines que si P > ETR et lorsque le bilan climatique et les stocks d'eau des sols sont maximaux. Cette période

correspond aux mois de juin et juillet où la recharge moyenne dans le bassin est estimée respectivement à 31 mm et 5 mm avec RU = 100 mm, et 4 mm et 3 mm avec RU > 100 mm.

La figure 4.8 montre l'évolution mensuelle de la recharge à l'échelle stationnelle dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin.

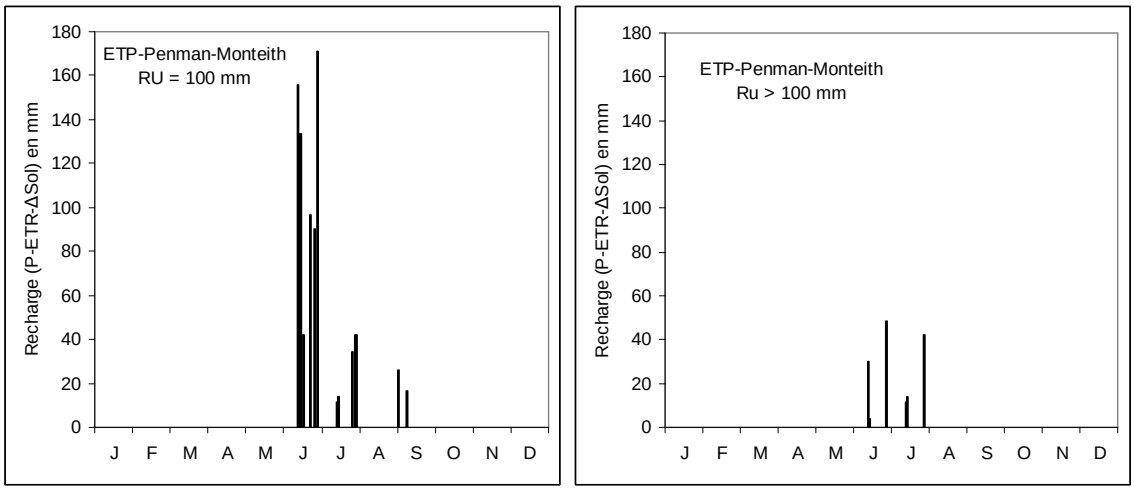
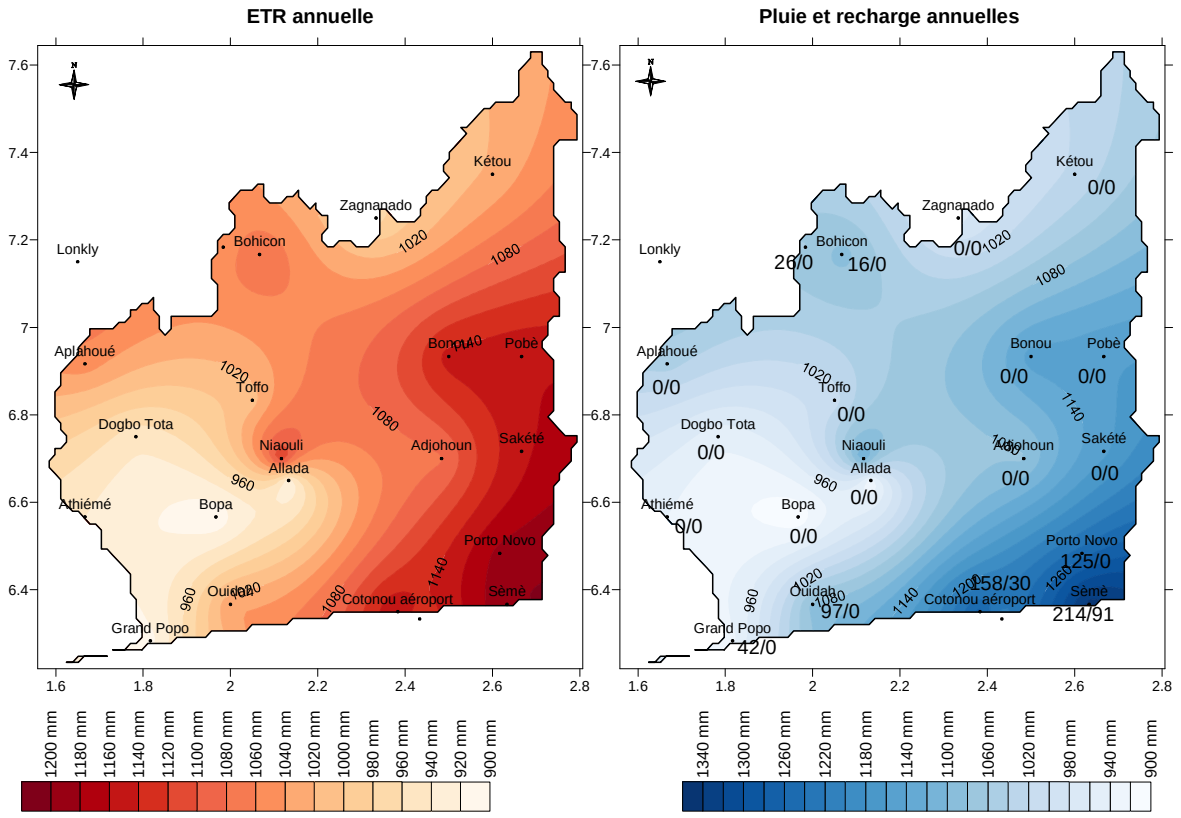


Figure 4.8 : Variation de la recharge mensuelle dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin

La recharge varie de 42 à 171 mm en juin, 12 à 42 mm en juillet lorsque la RU = 100 mm ; de 4 à 48 mm et 12 à 42 mm pour RU > 100 mm pour des pluies annuelles de 1000 à 1300 mm. Elle s'effectue souvent jusqu'en septembre dans les conditions où la réserve utile à saturation est de 100 mm et ETR < P. Excepté la station de Sèmè (secteur le plus arrosé), la recharge jusqu'en septembre est observée surtout au nord du bassin côtier du Bénin (Abomey-Bohicon) où le régime de pluie subéquatorial est atténué et la petite saison sèche plus arrosée.

La recharge annuelle est en grande partie nulle dans les champs de pluie du bassin sédimentaire côtier du Bénin où l'ETR égale la pluviométrie (figure 4.9) et les stocks d'eau des sols nuls. Cette recharge est estimée à 42 mm/an et 0 mm/an dans le secteur le moins arrosé à l'ouest (Grand Popo) et 214 mm/an et 91 mm/an dans le champ de forte pluie à l'est (Sèmè) selon les différentes valeurs de RU. Ceci semble concordé à quelque différence près avec la recharge moyenne de 15-150 mm/an estimée pour le système aquifère transfrontalier du Nigeria-Bénin-Togo (BGR/UNESCO, 2006), incluant le bassin sédimentaire côtier du Bénin. A l'échelle stationnelle, la proportion d'eau pluviale qui contribue à la recharge des aquifères serait de 0 à 16 % des totaux pluviométriques variant entre 904 et 1349 mm. En moyenne, elle est de 104 mm/an et 50 mm/an ; soit un taux de 10 % et de 5 % du cumul de pluie annuelle de 1080 mm avec respectivement RU = 100 mm et RU > 100 mm.



97/0 : Recharge avec RU = 100 mm/Recharge avec RU > 100 mm

Figure 4.9 : Variation spatiale l'ETR, de la pluie et de la recharge annuelles moyennes (1964-2005) dans le bassin côtier du Bénin

La confrontation de ces coefficients de recharge (faibles) à ceux (forts) obtenus par la méthode de fluctuation piézométrique permet d'émettre l'hypothèse que la pluviométrie ne serait pas la seule source de réalimentation des aquifères, surtout dans le sud du bassin côtier du Bénin. Dans le même sens, Boukari (2002) évoque un risque évident d'envahissement progressif du champ de Godomey par l'eau (salée) en provenance du lac Nokoué et/ou de l'océan Atlantique. En outre, l'interconnexion hydraulique entre les nappes souterraines superficielles et celles inférieures pourraient entraîner une recharge par drainance ascendante.

L'infiltration vers les nappes dépend de la structure lithologique car au contact des formations argileuses l'écoulement de surface ou hypodermique entraînerait une diffusion de l'eau pluviale ou son transfert rapide sous l'effet de la pente vers les réservoirs superficiels. Le zonage de la recharge suivant la profondeur des niveaux statiques des nappes superficielles (figure 4.10 ; Géohydraulique, 1985a) couplé à celui de la figure 4.9 met en évidence les contraintes de disponibilité en eau dans le bassin côtier du Bénin. Les aquifères sont alimentés (recharge verticale) par la pluie à différents seuils pluviométriques. Leur recharge annuelle est estimée à 600.10^6 m^3/an soit 500 m^3/ha/an (Géohydraulique 1985a).

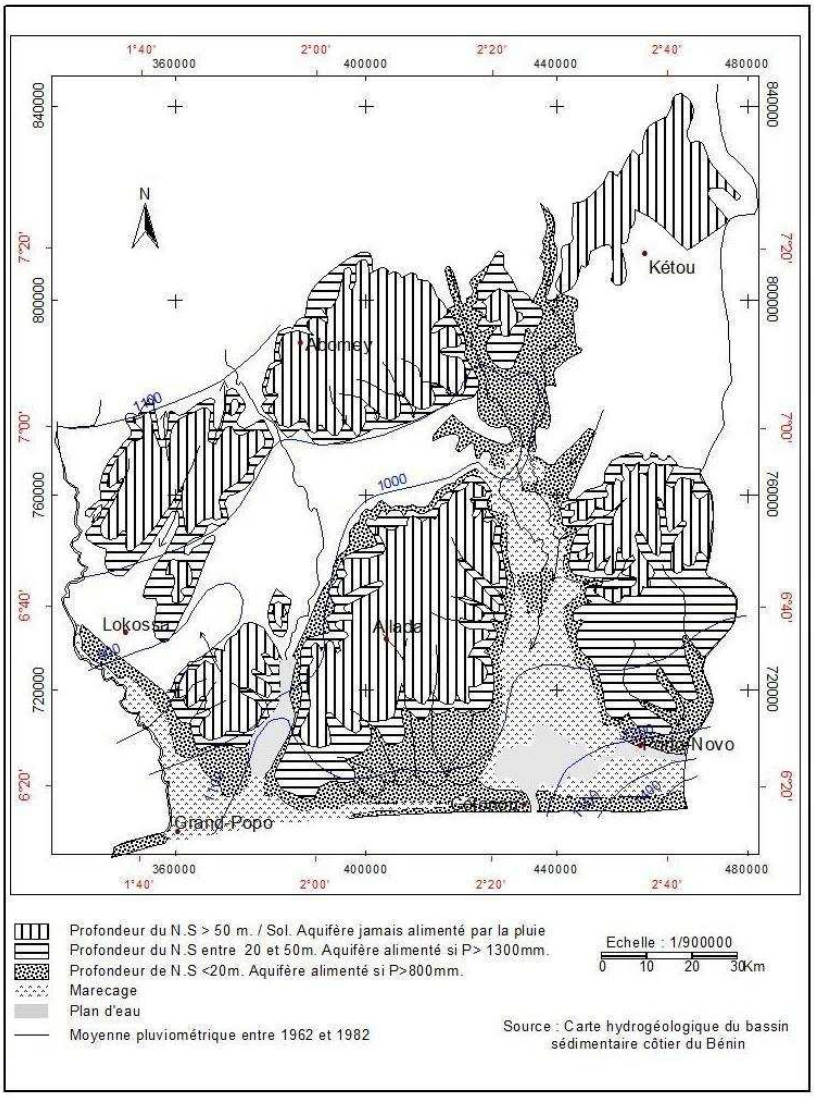


Figure 4.10 : Profondeur des niveaux statiques et seuils pluviométriques d'alimentation des aquifères superficiels dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin (*Géohydraulique, 1985*)

Les aquifères dont le niveau statique est inférieur à 20 m sont alimentés par une pluviométrie supérieure à 800 mm. Les pluies annuelles de 1300 à 1500 mm dans le secteur sud-est du bassin sur la période 1951-2005, montrent que ce seuil reste largement couvert pour la réalimentation de ces nappes. Les pluies supérieures ou égales à 1300 mm indiquées pour la recharge des nappes ayant un niveau statique compris entre 20 et 50 m ont été rarement enregistrées depuis les années 1970. Dans les secteurs concernés, le niveau actuel de la pluie moyenne (1126 mm) indique une tendance à la baisse et par conséquent un déficit de recharge, considérant le scénario ''climat sec''. En ce sens, Boukari (2002) avance l'hypothèse selon laquelle les eaux d'infiltration deviennent insuffisantes pour imbiber la tranche de terrain non saturée et atteindre la nappe. Mais, au regard de l'amélioration pluviométrique que connaît le bassin depuis les années 1990 et les 1500 à 1800 mm que prévoit le modèle PRECIS pour le bassin sédimentaire côtier du Bénin à l'horizon 2070-2089,

la recharge ces aquifères serait maximisée. Mais la vulnérabilité des aquifères, dans un contexte de climat humide, est liée au risque d'une dégradation accrue de la qualité des eaux en rapport avec la probable intensification du transfert de polluants.

Les aquifères, de niveau statique supérieur à 50 m et situés essentiellement au centre et au nord du bassin (environ 45 %), ne seraient jamais alimentés par les eaux pluviales. Mais, il n'est pas exclue qu'ils se rechargent à long terme par ''effets pistons'' successifs des eaux pluviales ayant échappé à l'évaporation et accumulées dans les formations géologiques de subsurface. Selon Olivry (1996), la zone non saturée peut piéger l'ensemble de la lame d'eau infiltrée de l'année. Celle-ci pourra être reprise par évaporation ou rester en partie en attente d'apports complémentaires des années suivantes. Ceux-ci, s'ils sont assez abondants, (bonnes précipitations), finiront par effets pistons successifs, par recharger la nappe. Mais, ces secteurs à ''hydrogéologie difficile'' enregistrent fréquemment des cas de forages négatifs comme à Toffo (Lakognon, 2000) et sont marqués par la présence d'un biseau sec pour ce qui concerne l'aquifère du Continental Terminal (Boukari, 1998) comme le montre la figure 4.11.

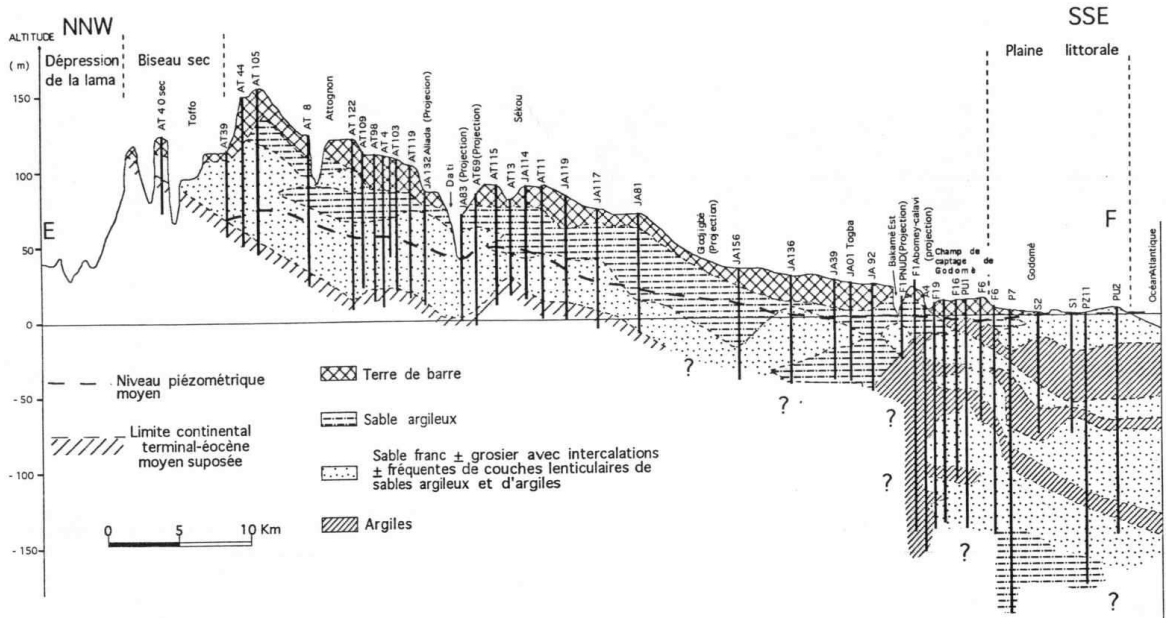


Figure 4.11 : Coupe lithologique synthétique du Continental Terminal du plateau d'Allada et du Quaternaire littoral suivant la direction NNE – SSE (*Boukari, 1998*)

La région de Toffo est couverte par l'unité hydrogéologique 15 où le Continental Terminal est à plus de 50 m et quasi stérile. Quant au Paléocène, il est argileux et profond de 150 m au nord à 325 m au sud. Le Crétacé aquifère est aussi profond et situé à 180 m au nord et 590 m au sud (Géohydraulique, 1985 ; Boukari, 1998). La profondeur des formations aquifères confirme l'inertie des transferts d'eau dans le processus de recharge de ces aquifères.

Ce phénomène est d'autant plus critique que la partie nord du bassin est très affectée par le réchauffement climatique (figures 3.15 et 3.31, pp. 116 et 136) et un probable renforcement du pouvoir évaporant de l'air. Selon Taylor & Alley (2001) les changements de la recharge et du stockage des eaux souterraines provoqués par la variabilité climatique se produisent généralement au-delà des décennies, et les niveaux d'eau des couches aquifères répondent, en général, de façon différée voire, tardive aux effets cumulatifs de la sécheresse. Mais, la morphostructure de ce secteur nord du bassin semble aussi expliquer les problèmes de disponibilité en eau souterraine. Enfin, il ne faut pas oublier que la variation de niveau des eaux souterraines est également fonction du comportement hydrologique des bassins versants notamment en période d'étiage. Ce qui a amené à examiner les transferts hydriques entre les systèmes aquifères et les bassins versants, un aspect de l'influence de la variabilité hydroclimatique sur les eaux souterraines.

4.1.4. Transferts hydriques entre systèmes aquifères et bassins versants

La densité du réseau hydrographique du bassin côtier du Bénin (figure 2.8, p. 84) et la configuration des plateaux permet d'émettre l'hypothèse d'une connexion hydraulique entre les réservoirs d'eau de surface et souterrains.

4.1.4.1. Bilan hydrologique moyen annuel dans les sous-bassins versants

L'analyse des termes du bilan hydrologique dans les sous-bassins du Mono, du Couffo, du Zou et de l'Ouémé (tableau 4.V) a permis de caractériser l'effet de la variation de l'infiltration dans la recharge des aquifères.

Tableau 4.V : Variation des termes du bilan hydrologique dans les sous-bassins du bassin sédimentaire côtier du Bénin.

	Bassin du Mono à Athiémé				*Bassin du Couffo à Lanta*		
	1951-1970	**1971-2005**	**Ecart (%)**		**1951-1970**	**1971-2005**	**Ecart (%)**
Pluie (mm)	1269	1160	-9		1179	1008	-14
ETR (mm)	847	795	-6		897	832	-7
Ecoulement (mm)	218	163	-25		120	91	-24
Infiltration (mm)	**204**	**201**	**-1**		**162**	**86**	**-47**
	Bassin du Zou à Domè				*Bassin de l'Ouémé à Bonou*		
	1951-1970	**1971-2005**	**Ecart (%)**		**1951-1970**	**1971-2005**	**Ecart (%)**
Pluie (mm)	1221	1106	-9		1262	1070	-15
ETR (mm)	847	775	-8		929	887	-5
Ecoulement (mm)	94	75	-20		313	211	-33
Infiltration (mm)	**280**	**255**	**-9**		**20**	**-28**	**-242**

L'importance du processus d'infiltration permet de déterminer quelle fraction de la pluie va participer à l'écoulement de surface, et quelle fraction va alimenter les écoulements souterrains et participer ainsi à la recharge des nappes souterraines. Cependant, l'infiltration varie considérablement en fonction de l'humidité préalable du sol, de sa texture et surtout de la stabilité de sa surface (Amoussou, 2010). Ainsi, la variation spatiale de l'infiltration témoigne non seulement de l'influence de l'évolution du climat mais aussi de la dynamique des conditions structurales du bassin, des états de surface sur la recharge. Ainsi par exemple, dans le contexte géologique du bassin (figure 2.2, p. 69), les caractéristiques pédologiques (figure 2.7, p. 79) et la dynamique de l'occupation des terres influent sur les processus de transfert d'eau vers les nappes souterraines dans les bassins-versants.

La baisse relative de l'infiltration sur le bassin de l'Ouémé à Bonou et du Zou à Domè montre le rôle associé de la forte évapotranspiration et du fort taux de ruissellement suite à la dégradation du couvert végétal. Les lames d'eau infiltrées sont très importantes à Domè (268 mm) et moindre à Bonou (-28 mm) à pluviométrique égale (1166 mm sur la période 1951-2005). Les résultats de la méthode de bilan hydrologique dans le bassin-versant de l'Ouémé à Bonou semblent conformes à ceux du bilan d'eau de Thornthwaite appliquée à la station pluviométrique.

Quant au bassin du Couffo à Lanta, cette diminution est liée au substratum géologique, constitué par le socle qui renforce les capacités de ruissellement en réduisant le pouvoir d'infiltration des nappes. Ainsi, pour une pluviométrie de 1094 mm, l'infiltration équivaut 124 mm, soit 11 % du potentiel en eau pluviale total. Ceci pourrait être lié l'intensification du ruissellement de surface au détriment de l'infiltration. Selon Amoussou (2010), la forte quantité d'eau écoulée peut provenir de la dégradation du couvert végétal et de la nature sablo-argilo-rocailleuse du sol (épaisseur de 60 à 70 cm) du secteur. De texture sableuse et par endroits argilo-graveleuse, le substrat est ici moins perméable, ce qui facilite le ruissellement superficiel, surtout si la couverture végétale est appauvrie.

Le fleuve Mono à Athiémé, abritant le barrage hydroélectrique de Nangbéto a connu une modification de son régime, perturbant ainsi la variation des écoulements et de l'infiltration. La nappe au niveau du bassin du Mono n'étant presque jamais vide ces dernières années (après la construction du barrage), le taux d'infiltration est très faible voire insignifiant.

L'évolution de l'infiltration sur la période 1951-2005 a montré globalement une baisse relative à la sécheresse séquentielle de 1971-2005. Ainsi, ce facteur important du complexe

d'éléments (pluie, évaporation, débit, etc.) qui rentrent dans la réalimentation des aquifères. Une diminution des quantités d'eau infiltrées s'observe dans les sous-bassins du Mono à Athiémé (-1 %), du Couffo à Lanta (-47 %), du Zou à Domè (-9 %) et de l'Ouémé à Bonou (-42 %) corrélativement à un déficit pluviométrique respectif de 9 %, 14 %, 9 % et de 15 %. La variation de l'infiltration montre l'impact de l'évolution du climat sur les transferts d'eau vers les aquifères. Ainsi par exemple, IGIP-GKW-GRAS (1989) a estimé pour différents contextes climatiques, surtout pluviométriques l'infiltration qui varie de 218 mm/an en année humide (1818 mm) et 107 mm/an en année moyenne (1122 mm) à 57 mm/an en année sèche avec 712 mm de pluie sur le plateau d'Allada. Sur le plateau de Sakété, l'infiltration moyenne correspond à 288 mm/an. Ceci pourrait expliquer le potentiel élevé des eaux souterraines de ce plateau. De la même manière, l'écoulement a connu une baisse, montrant l'impact de la péjoration climatique sur les ressources en eau tant de surface que souterraine comme le met en évidence la variation des volumes d'eau mobilisés.

4.1.4.2. Evaluation des volumes d'eau mobilisés par les sous-bassins

Les deux bras des anciennes lagunes Bakamè et de la lagune de Djonou drainent la nappe superficielle au voisinage du champ de captage de Godomey, pendant les hautes eaux et même à l'étiage (Boukari, 2002). Par analogie, l'hydrodynamique de ces nappes est analysée aux exutoires des fleuves Mono à Athiémé, Ouémé à Bonou, Couffo à Lanta et de la rivière Zou à Domè. Ces analyses sont faites pour la période d'octobre et mars voire avril où ces masses d'eau sont dans leurs phases de décrue et d'étiage. Cette période de l'écoulement de base correspond à celle de déstockage progressif de l'eau emmagasinée par les réservoirs souterrains des bassins hydrologiques au cours de la saison pluvieuse. L'évolution de l'écoulement de surface due au déstockage des nappes de versants à la fin de la petite saison pluvieuse et pendant la grande saison sèche est illustrée par la figure 4.12. Il en découle que la décrue des réservoirs souterrains amorcée en octobre se poursuit jusqu'en mars voire avril. Pendant cette période, les nappes ne reçoivent plus d'apport pluvial du fait de la forte évaporation et se déchargent progressivement des eaux emmagasinées en saison pluvieuse. Le tarissement estimé aux exutoires de Bonou, Athiémé, Domè et Lanta suit une loi exponentielle relative à la sécheresse climatique. Frécaut (1982) lie ce phénomène à la genèse des étiages. Le processus de tarissement met en exergue l'influence considérable du climat sur la vidange des réservoirs souterrains à partir du mois de novembre, début de la grande saison sèche.

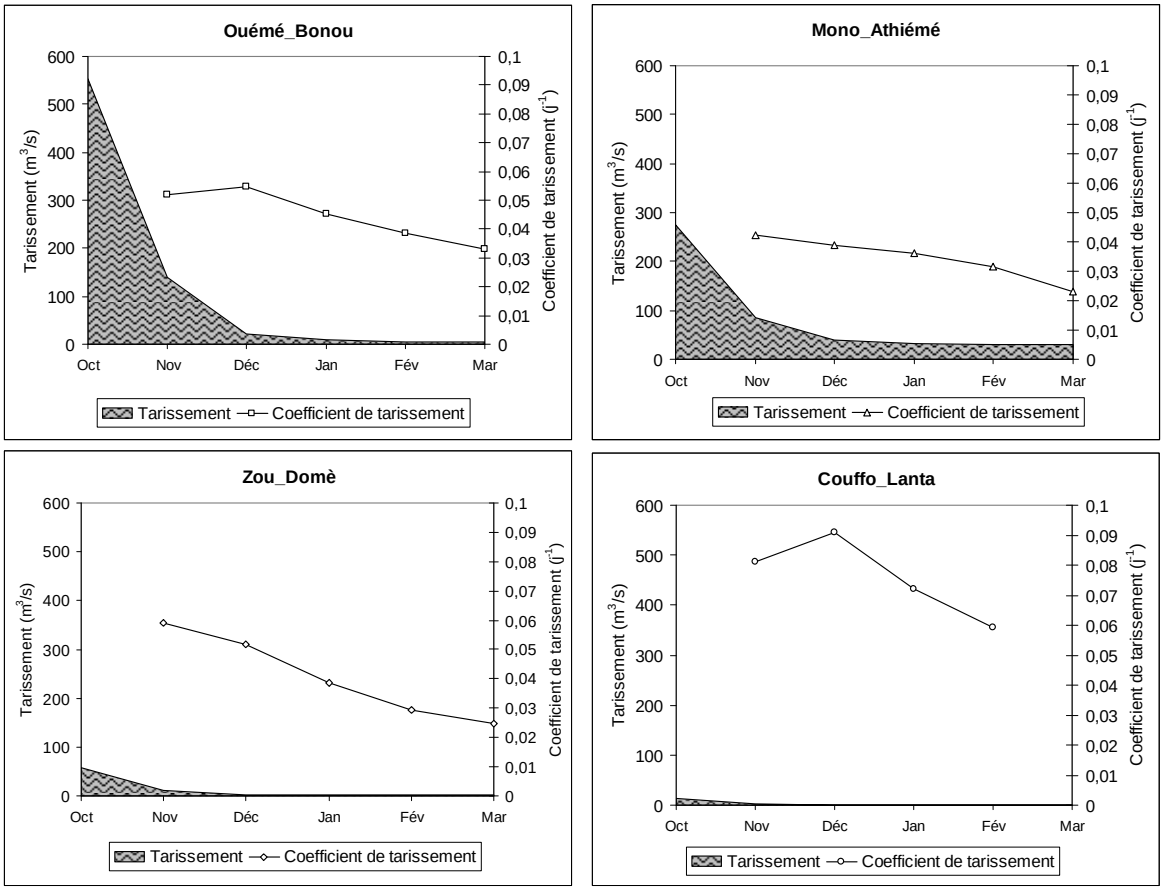


Figure 4.12 : Décrue et coefficient de tarissement dans les bassins de l'Ouémé, du Mono, du Zou et du Couffo de 1951 à 2005

Le stock d'eau de surface est réduit en novembre de 418 m^3/s, 190 m^3/s, 47 m^3/s et 11,3 m^3/s des débits enregistrés en octobre (début de vidange), respectivement à Bonou (579 m^3/s), Athiémé (275 m^3/s), Domè (58 m^3/s) et Lanta (13 m^3/s). Cela présage une pression hydroclimatique sur les réservoirs d'eau souterrains des bassins versants. La photo 4.1 illustre l'environnement hydrologique du bassin de l'Ouémé à Bonou en novembre, un à deux mois après le débit charnière qui peut atteindre 1000 m^3/s en année exceptionnelle comme 1963.



a b

Clichés Totin V.S.H., novembre 2008

Photo 4.1. Etat hydrologique du bassin de l'Ouémé à Bonou en novembre 2008

Les secteurs du bassin versant, complètement dénoyés (photo 4.1b) peuvent traduire l'abaissement rapide de la surface piézométrique des nappes de versants du bassin côtier du Bénin, juste après l'arrêt des pluies. La rapidité de vidange des réservoirs explique la faiblesse de leur capacité d'emmagasinement (El-Ouafi, 1993) et/ou de leur puissance et de la taille des réservoirs. Ainsi, d'octobre-novembre à mars, correspondant au mois le plus chaud où s'intensifie l'évaporation, les nappes libèrent 90 % (Athiémé et Domè) à 99 % (Bonou et Lanta) de leur stock d'eau.

Les coefficients de tarissement mensuels moyens pendant la période d'étiage dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin sont résumés dans le tableau 4.VI.

Tableau 4.VI : Coefficients de tarissement mensuels moyens (1951-2005) dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin

Tarissement / **Bassin**	**Coefficient exponentiel (j^{-1})**				
	Novembre	*Décembre*	*Janvier*	*Février*	*Mars*
Ouémé_Bonou	$5{,}18.10^{-2}$	$5{,}56.10^{-2}$	$4{,}63.10^{-2}$	$3{,}95.10^{-2}$	$3{,}39.10^{-2}$
Mono_Athiémé	$4{,}62.10^{-2}$	$4{,}32.10^{-2}$	$3{,}87.10^{-2}$	$3{,}62.10^{-2}$	$3{,}14.10^{-2}$
Zou_Domè	$6{,}01.10^{-2}$	$5{,}16.10^{-2}$	$3{,}87.10^{-2}$	$2{,}94.10^{-2}$	$2{,}48.10^{-2}$
Couffo_Lanta	$8{,}10.10^{-2}$	$9{,}08.10^{-2}$	$7{,}20.10^{-2}$	$5{,}92.10^{-2}$	$5{,}35.10^{-2}$

Le tarissement est plus sévère dans le bassin du Couffo que dans celui de l'Ouémé, du Zou et du Mono du fait de ce que le substratum de ce réservoir est en grande partie constitue par le socle. Les coefficients moyens varient d'un bassin à un autre entre 9.10^{-2} et $2{,}5.10^{-2}$ j^{-1}, de novembre à mars. Ils décroissent de novembre à mars à Athiémé ($4{,}6.10^{-2}$ à 3.10^{-2} j^{-1}) et Domè (6.10^{-2} à $2{,}5.10^{-2}$ j^{-1}) mais de décembre à mars à Bonou ($5{,}6.10^{-2}$ à $3{,}4.10^{-2}$ j^{-1}) et Lanta ($8{,}1.10^{-2}$ à $5{,}4.10^{-2}$ j^{-1}). En effet, les réservoirs souterrains se vident très rapidement au début de la grande saison sèche et stabilisent leur apport d'eau à l'écoulement superficiel de base vers la fin de cette saison.

L'évolution de la phase de tarissement constitue le processus majeur responsable de la diminution des basses eaux (Olivry, 1996) étant donné qu'elles sont soumises à la pression climatique et à celle d'augmentation des extractions pour les usages humains. Pour Savane *et al.* (2001), l'augmentation considérable du coefficient de tarissement dans la période sèche correspond essentiellement à une réduction de l'extension des aquifères et donc de la largeur des nappes de versant. L'affaiblissement des étiages traduit un amenuisement croissant des réserves souterraines des bassins fluviaux résultant des déficits pluviométriques (Bricquet *et al.*, 1996) et de la sécheresse hydrologique. En outre, les caractéristiques lithologiques et pédologiques propres à chaque bassin fluvial interviennent dans divers domaines

hydroclimatiques pour différencier les étiages d'un cours d'eau à l'autre (Frécaut, 1982) ou surtout, le déstockage dans les différents compartiments d'un même bassin (photo 4.2).



a *b*

Clichés Amoussou E. et Totin V.S.H., février 2005

Photo 4.2. Deux aspects hydrodynamiques diffférents du bassin du Couffo : à Lon Agonmè (Allada) (a) dans le bassin sédimentaire et à Gougouta, Djidja (b) hors du bassin, les deux localités distantes d'environ 110 km suivant le profil de la masse d'eau

L'hydrodynamique relationnelle des bassins hydrologiques et des systèmes aquifères est liée à la nature des formations géologiques. Dans cet ordre d'idée, l'état hydrologique contrasté du bassin du Couffo, observé les 25 et 26 février 2005, montre plus l'influence de la pluviométrie et des couches géologiques sur la disponibilité en eau dans les secteurs des plateaux adjacents aux bassins (Totin, 2005). Ce phénomène illustre le fait que le tarissement des points d'eau sur les versants des plateaux est lié à l'abaissement progressif du niveau de la surface piézométrique en saison sèche. Le tarissement est moins marqué en ‘’zone’’ sédimentaire (photo 4.2a) qu'en ‘’zone’’ de socle (photo 4.2b). L'écoulement presque pérenne dans la partie sud du Couffo (de Lon Agonmè l'exutoire Couffonou) est lié à sa couverture par le grès perméable (Amoussou, 2010).

Les réservoirs souterrains soutiennent, durant la grande saison sèche, l'écoulement de base dans les compartiments sédimentaires des bassins de l'Ouémé, du Mono, du Zou et du Couffo. Cet écoulement de base très faible à Bonou (5 m^3/s), Domè (4 m^3/s) et à Lon-Agonmè (non jaugé photo 4.2a) exprime la faible capacité régulatrice des nappes de versants. Le fonctionnement hydrologique et certainement hydrogéologique du bassin du Mono est complètement modifié par des lâchers d'eau du barrage de Nangbéto surtout pendant la grande saison sèche. Ces dernières décennies (1990 et 2000), l'étiage n'est plus pratiquement observé dans le bassin du Mono à Athiémé. Amoussou (2010) explique ce phénomène par la diminution considérable du tarissement et le rôle pondérateur de la retenue du barrage avant que n'arrive la saison des pluies. L'hypothèse, selon laquelle les réservoirs souterrains du

bassin du Mono au niveau du bassin sédimentaire côtier du Bénin ne se vident plus en saison sèche est donc confirmée. Les populations enquêtées (72 %) le certifient en partie par le fait que, depuis l'installation du barrage (en 1988), le niveau et le volume d'eau ne baissent plus en grande saison sèche dans les puits captant la nappe phréatique.

Les volumes d'eau mobilisés par les nappes de versants sont estimés en moyenne à 1,55 km^3 à Bonou, 1,06 km^3 à Athiémé, 0,17 km^3 à Domè et 0,02 km^3 à Lanta. Mais, quand le coefficient de tarissement augmente, le volume d'eau mobilisé par les aquifères diminue (Goula *et al.*, 2006). Les quantités d'eau mobilisées varient de 0,16 à 2,63 km^3 à Bonou, 0,03 à 5,04 km^3 à Athiémé, 0,02 à 0,43 km^3 à Domè et de 0 à 0,10 km^3 à Lanta en fonction de la variabilité climatique sur la période 1951-2005. La figure 4.13 confirme le lien entre années pluviométriques humides (comme 1963, 1968) et sèches (1977, 1983) et les volumes d'eau mobilisés dans les nappes de versants.

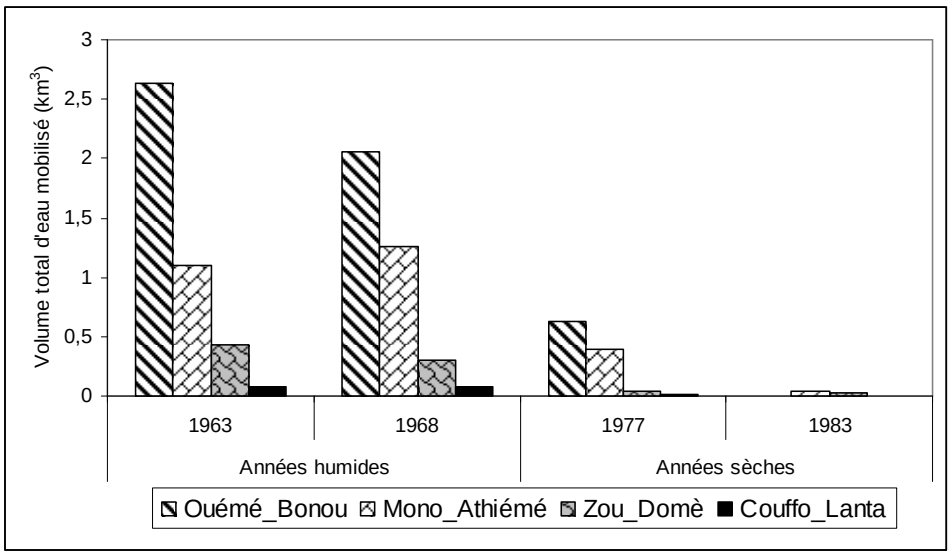


Figure 4.13 : Volumes d'eau mobilisés par les nappes de versant dans le bassin côtier du Bénin

La figure 4.13 met en évidence, par analogie aux années humides (1963 et 1968) et sèches (1977 et 1983), les impacts probables des changements climatiques sur les ressources en eaux souterraines selon le scénario qui adviendrait. Le taux de variation des eaux souterraines entre les phases climatiques humide et sèche serait de 60 à 100 %. En effet, durant l'année de sécheresse extrême de 1983, les nappes de versant ne sont pratiquement pas rechargées, surtout dans les bassins de l'Ouémé et du Couffo, plus tributaires de la variabilité pluviométrique. Au regard de ce constat, une succession d'années sèches ou de sécheresse prolongée est préjudiciable à la disponibilité en eau souterraine dans le bassin sédimentaire côtier (tel est le cas des années 1977, 1982, 1983, 1984). Ce phénomène confirme l'influence

sus évoquée des séquences climatiques sur la réalimentation des nappes au niveau des piézomètres FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD des environs du champ de captage de Godomey. Les nappes déjà très ponctionnées (Callède *et al.*, 1992 ; Olivry, 1993 ; Orange *et al.*, 1995) ont une forte probabilité de ne pouvoir se recharger, la part du bilan de l'eau destinée à l'alimentation des nappes ayant tendance à diminuer (Wesselink *et al.*, 1996). Mais, le scénario inverse est possible, considérant l'augmentation probable des pluies dans le bassin côtier du Bénin.

Mais quel que soit le scénario climatique, la recharge des réservoirs souterrains pourrait dépendre d'autres facteurs telle que la dynamique des états de surface qui influe aussi sur la disponibilité tant quantitative que qualitative des eaux souterraines.

4.2. Influence des états de surface sur l'hydrodynamique du bassin

L'hydrodynamique des aquifères et la variation de la qualité des eaux souterraines sont, non seulement influencées par le climat mais aussi par la modification des composantes de surface du bassin. Les variations spatiales des états de surface : couvert végétal, occupation des terres, catégories des sols (Kouamé *et al.*, 2007) affectent, dans une certaine mesure, les processus de recharge des aquifères et par conséquent la qualité des eaux. Il s'agit dans ce qui suit, de montrer que ces observations sont valables pour le bassin sédimentaire côtier du Bénin, tant en ce qui concerne les surfaces non côtières que la topographie côtière.

4.2.1. Variation des états de surface ''continentale'' du bassin sédimentaire côtier du Bénin et son influence sur les eaux souterraines

Les modifications que connaissent les facettes topographiques, lithologiques et l'occupation des terres influeraient sur les propriétés hydrodynamiques du bassin et par ricochet sur l'état des eaux dans ses réservoirs souterrains.

- **Formations de surface dans le bassin côtier du Bénin**

Les figures 4.14 et 4.15 montrent la variation spatiale de quelques éléments de surface qui, pourraient avoir un impact sur la répartition des eaux pluviales en surface et leur transfert vers les réservoirs souterrains.

Les coupes lithologiques et hydrogéologiques du bassin mettent en évidence les facettes topographiques régissant les processus de ruissellement et d'infiltration. Ainsi, le recouvrement superficiel, à grande échelle des couches lithologiques argileuses et marneuses, accélère sous l'effet de la pente, le ruissellement des eaux pluviales.

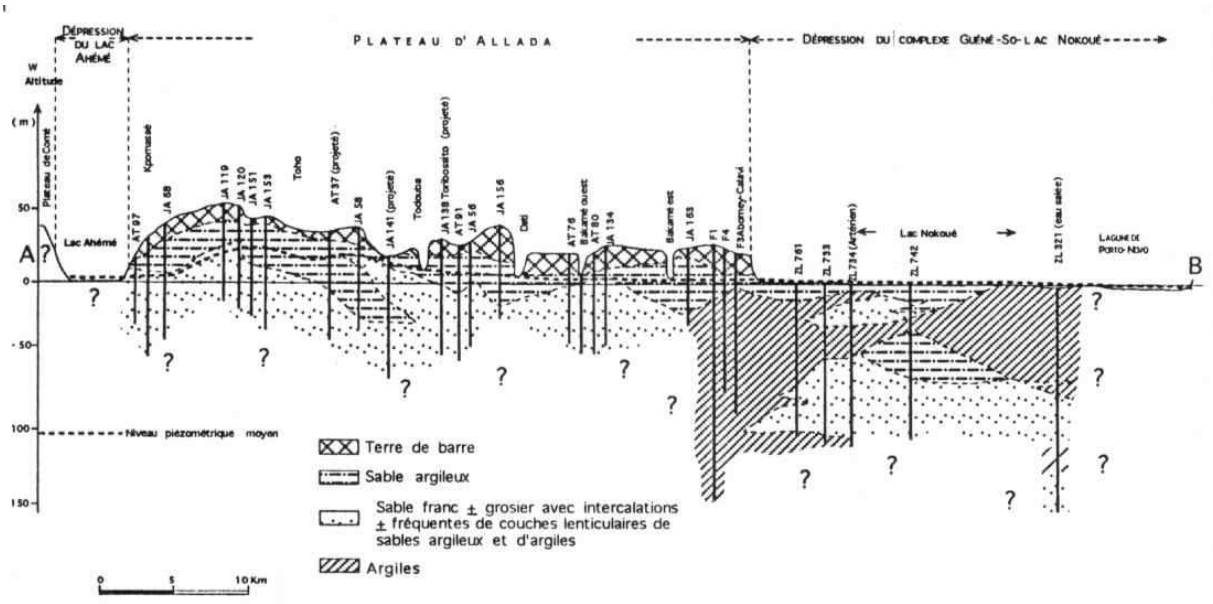
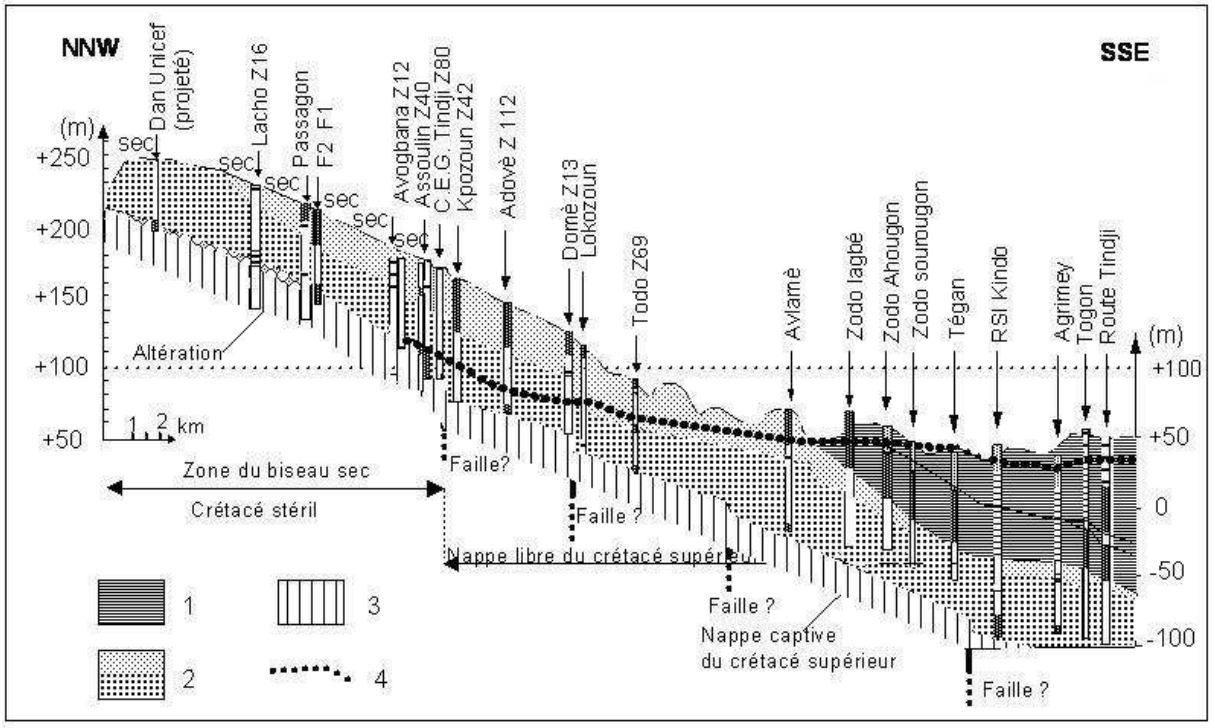


Figure 4.14 : Coupe lithologique transversale du Continental Terminal suivant la direction W-E sur le bassin sédimentaire côtier du Bénin (Boukari, 1998)

La couche imperméable en surface ou en profondeur est formée par endroits, par une croûte cuirassique qui, compte tenu de sa compacité, limite l'infiltration des eaux pluviales. La figure 4.15 illustre sa présence dans le secteur de Passagon-Tovi-Gomé-Assoulin.



1= Argilites et marnes imperméables ; 2 = Sables fins à grossiers aquifères ; 3 = Socle panafricain ; 4 = Surface piézométrique de l'aquifère du Crétacé supérieur

Figure 4.15 : Coupe hydrogéologique montrant la zone stérile (''biseau sec'') du Turonien-Coniacien au niveau du plateau d'Abomey *(Géohydraulique-BURGEAP, 1988 rapporté par Boukari et Alassane, 2007)*

Ce secteur correspond à une aire stérile des aquifères superficiels des plateaux (Boukari et Alassane, 2007) où une fréquence de forages secs est enregistrée. La photo 4.3 montre les dalles cuirassiques telles qu'elles sont souvent naturellement disposées et mises à nu à l'occasion des grands travaux d'aménagement (ouverture de voies, de carrière de sables, etc.).



Clichés Totin V.S.H., février 2005

Photo 4.3. Dalles de cuirasse superficielles sur le plateau de Sakété, entre Bonou et Adjohoun

Ces dalles limitent l'infiltration diffuse et par conséquent la recharge des nappes, sauf si elles présentent de grandes fissures permettant la circulation d'eau. L'eau pluviale qui devrait normalement s'infiltrer, s'écoule par ruissellement superficiel vers les réceptacles (dépressions fermées, vallées de masses d'eau fluviale ou lacustres). Elles réduisent ainsi les surfaces de réalimentation des nappes bien qu'elles constituent des barrières contre la pollution des eaux souterraines. Cependant, le secteur de contact entre les formations sédimentaires et celles du socle le long de la limite au nord du bassin, constitue un point de réalimentation de la nappe du Crétacé qui est captive au sud. La réalimentation par infiltration directe des eaux de pluie concerne d'une part la nappe du Crétacé dans sa portion libre située au nord de la dépression de la Lama (zone amont), d'autre part les nappes du Continental Terminal et du Quaternaire qui, hormis dans la vallée alluviale de l'Ouémé, sont également libres de façon générale (Boukari, 2002).

Une étude géochimique effectuée par les travaux de Dray *et al.*, (1988) a confirmé l'existence de recharge actuelle au niveau des affleurements cristallins et cristallophylliens qui bordent les limites nord du bassin sédimentaire côtier. Ce secteur constitue un champ important de la recharge naturelle des aquifères dont les nappes deviennent captives au sud du bassin. La quantité d'eau d'infiltration et de recharge des nappes diminue au fur et à mesure que les couches imperméables s'intensifient et que la profondeur de la surface piézométrique devient grande.

La recharge des aquifères est aussi favorisée par le transfert hydrique suivant l'inclinaison topographique, le pendage des couches géologiques et la continuité hydraulique entre les plateaux et les vallées des masses d'eau de surface (Totin, 2005). Alassane (2004) souligne que la réalimentation de l'aquifère du Continental terminal (aquifère superficiel) ne s'opère pas de façon active sur le plateau de Sakété. Elle s'effectue par endroits, soit à la faveur d'une variation latérale de faciès (passage latérale de l'argile à du sable argileux, voire à du sable franc), soit à celle d'érosion complète de la couche argileuse et sablo-argileuse au niveau des vallées et autres dépressions en position relativement perchée.

- **Composantes d'occupation du sol dans le bassin côtier du Bénin**

Par ailleurs, l'évolution des unités d'occupation du sol pourrait également affecter les paramètres hydrodynamiques du bassin. La figure 4.14 et le tableau 4.VI montrent la variation des unités paysagiques dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin entre 1973 et 2005.

En 1973, les formations de forêts et savanes occupant 36 % de la superficie du bassin se localisent en grand nombre au nord-est et dans la région de Massi. Or, ces formations, à litière importante et forte activité faunique, réduisent le ruissellement au profit de l'infiltration. Les travaux de Casenave et Valentin (1991) en zone sahélienne confirment aussi que l'activité faunique a une influence directe sur l'infiltration par la porosité qu'elle génère. Lavelle (1983), par exemple, a montré en Côte d'Ivoire dans une formation de forêt, que les vers rejettent 30 à 40 m^3 de terre en surface, par hectare et par an. A ce volume de rejets correspond un volume comparable de pores à l'intérieur du sol et cette porosité communique avec la surface, facilitant ainsi le drainage rapide de l'eau. Quant aux cultures et jachères, elles couvrent la plus grande partie du bassin sédimentaire côtier du Bénin (40 %), surtout du sud au nord-ouest. L'extension des aires culturales pourrait conduit à une dénudation du sol et inévitablement à l'accélération des processus de ruissellement.

L'évolution des unités d'occupation du sol a conduit en 1995 à une prédominance des formations de mosaïques de champs (62 %) au détriment des formations de forêts (15 %). Ceci montre *a posteriori* une réduction progressive des processus d'infiltration et donc de la recharge au profit d'une augmentation des lames d'eau ruisselées.

La figure 16c montre en 2005 une faible couverture des formations de forêt (8 %) et une progression très marquée des unités de cultures et jachères (72 %). L'évolution contrastée de ces deux unités paysagiques est liée à l'emprise humaine, de plus en plus intense dans le bassin. Selon Gaborit (2008), la déforestation au profit des nouveaux types d'occupation des

terres conduit à la perturbation du cycle hydrologique. Casenave et Valentin (1991 et 1996) expliquent la faible infiltration par l'absence de végétation, de fortes réorganisations superficielles, une activité faunique nulle et une taille importante des constituants en surface.

Il est clair que la recharge des aquifères est affectée par les modifications d'état de surface que connaît le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Ces changements conduiraient à la disparition des horizons humifères et d'imprégnation du fait de l'intensification de l'érosion et de la compacité du sol.

La dynamique d'occupation des terres de 1973 à 1995 (tableau 4.VII) montre une régression des formations de forêts et savanes (59 %) et marécageuses (23 %) et une progression de celles anthropiques telles que les cultures et jachères (56 %) et des agglomérations (101 %).

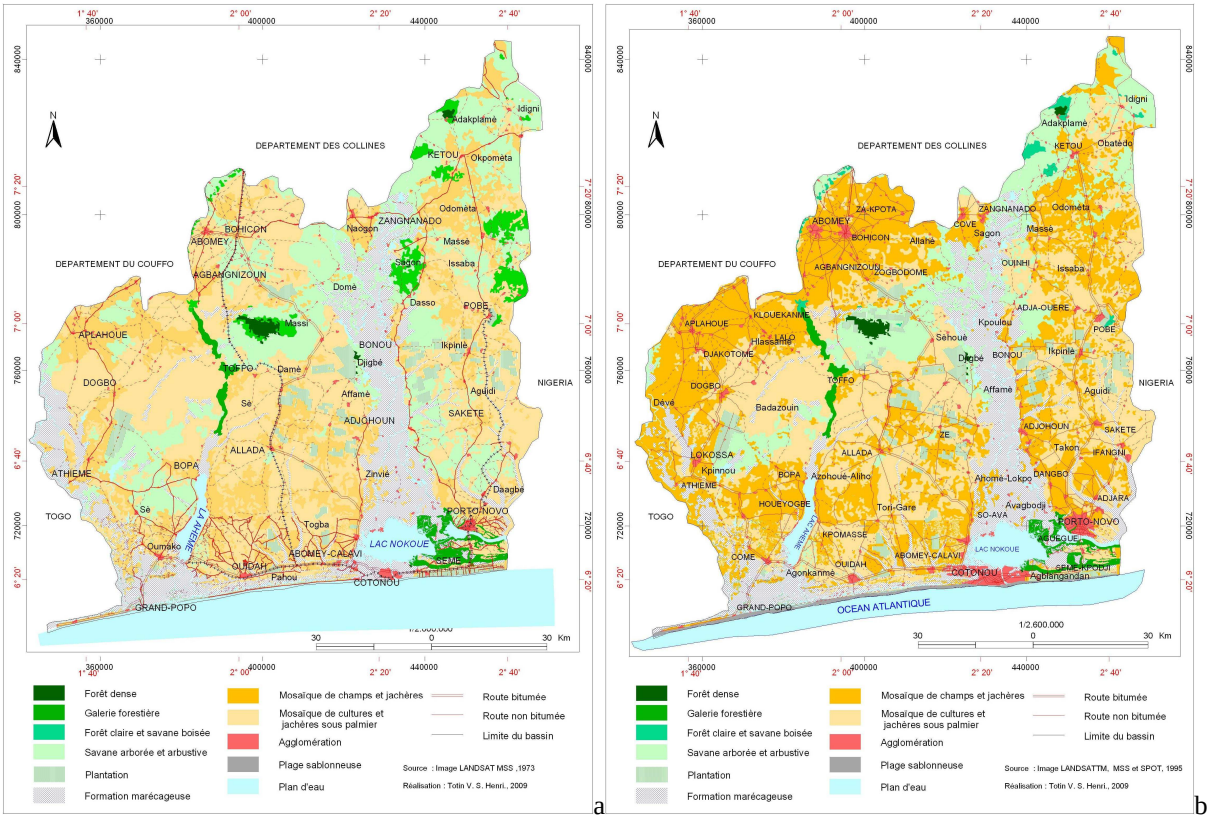
Tableau 4.VII : Bilan et amplitude de variation de l'occupation du sol dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin de 1973 à 2005

Unités d'occupation du sol	Superficie km²_1973	%	Superficie km²_1995	%	Di_1995-1973	Superficie km²_2005	%	Di_2005-1995
Formations de forêts et savanes	4442	36	1839	15	-59	1027	8	-44
Formation marécageuse	2016	16	1548	13	-23	855	7	-45
Cultures et jachères	4953	40	7727	62	56	8936	72	16
Agglomération	182	1	365	3	101	952	8	161
Plan d'eau	536	4	453	4	-15	373	3	-18
Plage	248	2	445	4	79	233	2	-48
Total	12377	100	12377	100		12377	100	

NB : Di = dynamique entre l'occupation des unités paysagères d'une année à l'autre

De 1995 à 2005, les formations naturelles ont diminué en superficie (-89 %) de même que les plans d'eau (48 %). Cette régression confirme la forte anthropisation du bassin, illustrée par l'extension des agglomérations (161 %) et des terres agricoles (16 %). La dynamique de l'occupation du sol dans le bassin côtier du Bénin est liée à la forte croissance démographique avec un taux de 2,62 % de 1979 à 1992 et 2,46 % de 1992 à 2002. L'installation humaine se justifie par une forte pression sur le foncier et les impacts inhérents (occupation des aires de recharge, augmentation des sources de contamination des eaux et accélération du ruissellement, etc.).

La photo 4.4 illustre un aspect de gestion des terres, défavorable à l'infiltration directe des eaux pluviales du fait de l'extension des surfaces bâties.



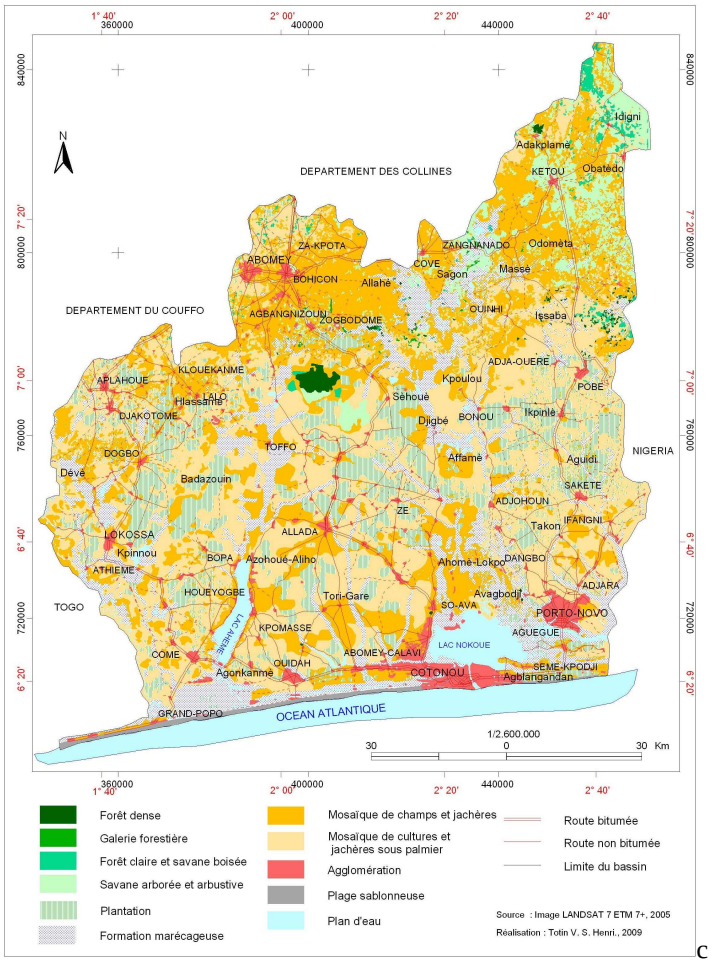


Figure 4.16 : Occupation du sol et utilisation des terres dans le bassin côtier du Bénin



a b

Clichés Totin V.S.H., octobre 2009

Photo 4.4. Sol imperméabilisé : cour de maison (a) et place publique (b) à Aplahoué

L'imperméabilisation des sols réduit la capacité d'infiltration du bassin et par conséquent la recharge naturelle. Toutefois, elle constituerait une barrière contre la pollution des aquifères par la recharge induite (eaux usées et vannes) surtout en milieu urbain. Un autre intérêt pouvant être tiré de l'extension des agglomérations serait leur contribution à la récupération des eaux pluviales à des fins de recharge artificielle des aquifères par des puits d'injections.

- **Impacts de l'occupation du sol sur le bilan d'eau**

Une analyse comparée de la variation des termes du bilan d'eau et de la superficie des unités paysagiques entre 1973 et 2005 a permis d'apprécier une certaine réponse de l'environnement hydroclimatique du bassin aux changements d'utilisation des terres (figure 4.17).

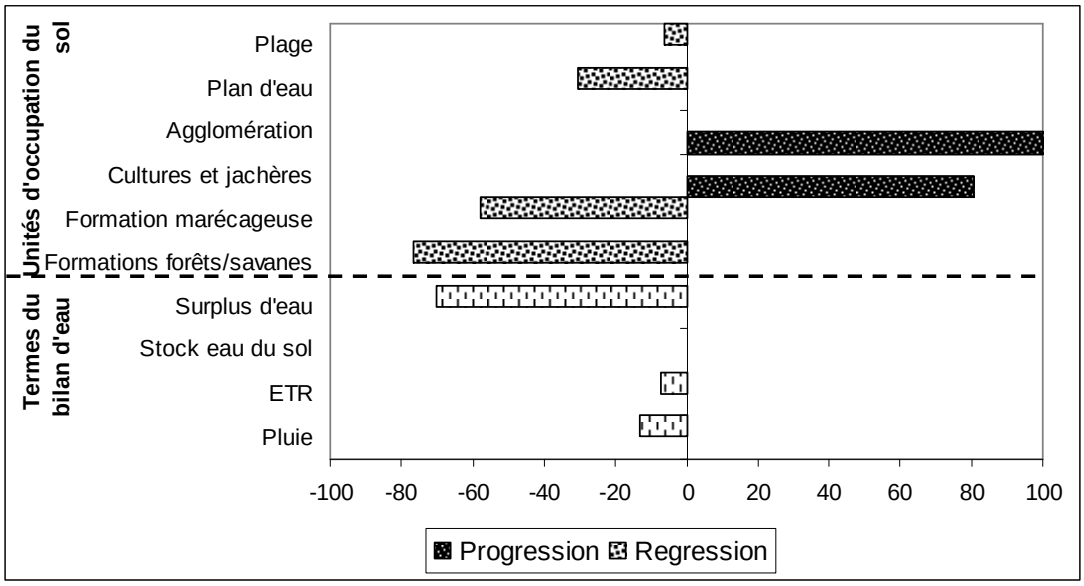


Figure 4.17 : Evolution de la superficie des unités paysagiques dans le bassin côtier du Bénin entre 1973 et 2005 et variation des termes du bilan d'eau suivant les sous périodes 1951-1973 et 1973-2005

NB : L'évolution des termes du bilan d'eau est régressive de 1973 à 2005 par rapport à la période 1951-1973. Le surplus d'eau est déficitaire.

Si, le couvert végétal réduit les gains d'écoulement et accélère l'infiltration (Harr et McCorison, 1979 ; Fritsch, 1995), il est évident que sa destruction observée dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin de 1973 à 2005 a induit une variation à la baisse des termes du bilan hydrologique. Ce phénomène est d'autant plus réel que de 1973 à 2005, la pluviométrie ayant baissé en moyenne de 13 % (1223 à 1059 mm), le surplus d'eau pour la réalimentation des nappes d'eaux souterraines a diminué de 70 % (117 à 35 mm).

La dégradation des termes du bilan d'eau s'opère dans un contexte de modification des unités paysagiques dont les superficies ont diminué de 77 % pour les formations de forêts et de savanes, 58 % pour les aires marécageuses, 30 % pour les plans d'eau. La réduction des aires marécageuses et de certains plans d'eau pourrait s'expliquer non seulement par le comblement mais aussi par la faiblesse de l'exfiltration des aquifères due à un probable déficit de recharge. Elle peut également être liée à l'extension des espaces bâtis qui ont occupé en 2005 une superficie cinq fois plus que celle d'il y a 32 ans (1973). Le développement des agglomérations n'est pas sans conséquence sur la qualité des eaux souterraines.

- **Impacts de l'occupation du sol sur la qualité des eaux souterraines**

Les changements d'occupation et d'utilisation des terres sont l'une des principales causes d'altération des processus hydrologiques tant superficiels que souterrains (Calder, 1993 ; Lambin *et al.*, 1999 ; Vissin, 2007 ; Dams *et al.*, 2008 ; Amoussou, 2010) et de la qualité des eaux (Totin, 2010). La mauvaise qualité des eaux des puits de faible profondeur (Ladji (Cotonou), Ouando (Porto-Novo), Tchikomey (Lokossa), Gbecon (Grand Popo), etc.) implantés en pleine agglomération en est évocatrice. Les taux de nitrates y sont par exemple, les plus élevés (35 à 88 mg/l) contre 0 à 22 mg/l pour les puits profonds et les forages généralement situés en milieu rural.

Pour Boukari et Alassane (2007), la propagation de la dégradation de la qualité des eaux des nappes souterraines est due à une pollution à partir de la surface en relation avec l'occupation et l'utilisation du sol (urbanisation, industrie, agriculture …). L'emprise anthropique (agglomération, systèmes d'assainissement inadéquats, activités socioéconomiques, etc.) est l'un des facteurs principaux de la détérioration de la qualité des eaux souterraines à Cotonou. Ces résultats sont conformes à ceux de Houndji et Togonou (1992), Adjamonsi (1994), Gandaho (1994), Comlanvi (1995), Adékambi et Adamou (2000), Boko (2001), Ahoussinou (2003), Totin *et al.* (2008), Odoulami (2009). Cissé Faye *et al.* (2008) ont montré des cas

similaires de pollution intense des eaux souterraines, induite par les modes inadéquats d'utilisation des terres dans la région péri-urbaine de Thiaroyé à Dakar.

En outre, en milieu rural, la contamination chimique des eaux souterraines, notamment par le nitrate serait plus liée à l'utilisation intensive des intrants agricoles chimiques dans les aires de cultures (maraîchères, de l'ananas, du coton), au regard de la prédominance de cette unité d'occupation du sol. Böhlke (2002) le confirme en montrant que l'agriculture a eu des effets directs ou indirects sur la recharge et la composition des nappes et sur la biogéochimie des aquifères.

4.2.2. Dynamique côtière et vulnérabilité des eaux souterraines

La bande côtière est réduite de 6 % entre 1973 et 2005 sous l'effet de la hausse du niveau marin, de l'érosion côtière et des activités anthropiques. Desrivières et Trystram (1997) ont estimé le recul de la côte béninoise à 50 m en moyenne ces cinquante dernières années avec une accélération récente du phénomène. Les prédictions faites de manière certaine sont un recul de 50 m à l'horizon 2025, et 100 m à l'horizon 2050, si aucune protection n'est entreprise. Ces limites semblent déjà atteintes, étant donné que les populations du secteur est de Cotonou et de Grand Popo affirment, *a posteriori* et comme l'illustre l'ampleur de l'érosion côtier, que la mer a avancé de plus de 100 m.

Selon Bates *et al.*, (2008), l'élévation du niveau de la mer pourrait accroître le potentiel d'intrusion d'eau salée dans les nappes souterraines d'eau douce des aquifères côtiers. Les travaux de Géohydraulique (1985), Turkpak (1991), Boukari (1998 et 2002) ont mis en évidence, sur la base des changements intervenus dans la qualité de l'eau des aquifères côtiers du Bénin, cette menace que constitue l'intrusion saline. La figure 4.18 illustre, par exemple la variation spatiale et saisonnière de la salinité dans les eaux analysées dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin.

Les ouvrages hydrauliques en particulier les puits profonds, les forages et les sources situés à l'intérieur du bassin ont une salinité nulle (0 mg/l). Les particularités que présentent les puits de Gbècon (Grand Popo) et de Ladji (Cotonou) montrent l'impact de l'intrusion d'eau de mer sur les eaux souterraines des aquifères côtiers superficiels. L'eau du puits de Gbècon subit l'influence directe de la marée et celle du puits de Ladji une influence indirecte par le biais du lac Nokoué. A ce phénomène naturel s'ajoute le risque d'intrusion saline, très élevé lié aux dépressions piézométriques créées par les pompages excessifs pour l'alimentation en eau potable des grandes agglomérations côtières du bassin.

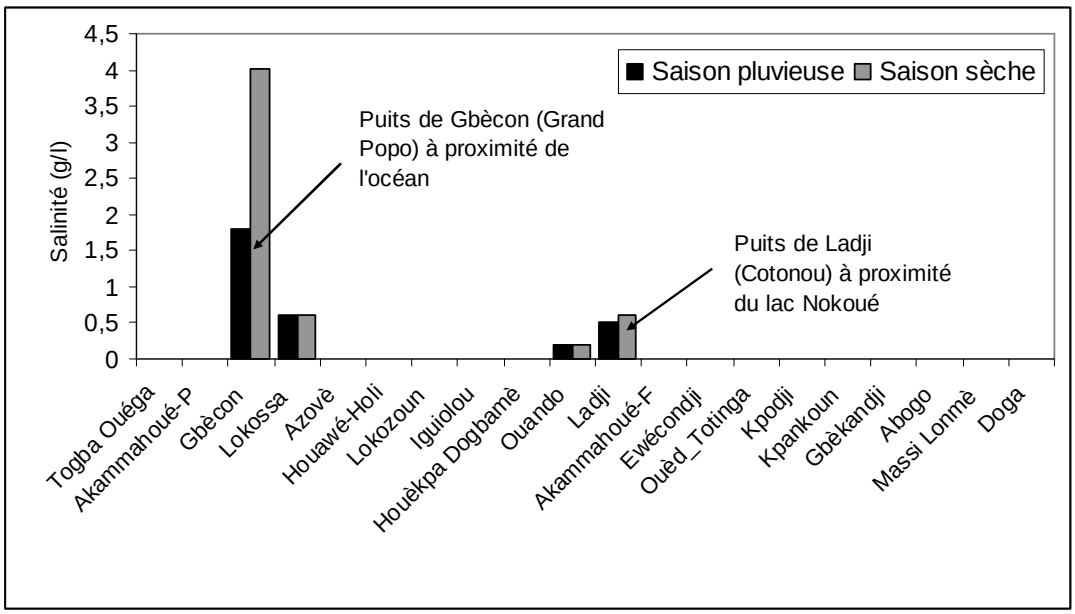


Figure 4.18 : Evolution saisonnière de la salinité dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin

GIEC (2007) confirme que dans les zones côtières, l'élévation du niveau de la mer favorisera les facteurs de stress hydrique du fait de la salinisation accrue des eaux souterraines. Ce risque d'intrusion saline pourrait également dépendre du déficit de recharge des réservoirs souterrains du bassin dans un contexte de climat sec. Chen *et al.* (2004) souligne à cet effet que toute diminution de l'alimentation des nappes souterraines aggravera l'effet de l'élévation du niveau de la mer. Ainsi, dans les aquifères intérieurs, une diminution de cette alimentation peut conduire à une intrusion d'eau salée provenant des aquifères salés voisins. GIEC (2007) estime que la dilatation thermique entraînera à long terme une élévation de 0,2 à 0,6 m du niveau de la mer pour chaque degré Celsius d'augmentation de la température moyenne du globe par rapport à l'époque préindustrielle. Cela aggraverait le risque de salinisation des eaux souterraines dans les aquifères côtiers.

Dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin, les ouvrages hydrauliques les plus vulnérables ou les plus exposés à l'intrusion saline sont ceux captant les aquifères des unités hydrogéologiques 20 ; 21 ; 22 ; 26 et 27 de la figure 2.6. p. 76. Ce phénomène se produirait surtout lorsque la recharge est une charge insuffisante pour repousser le front salin vers l'océan. Les mesures d'atténuation du risque d'avancée de la mer et d'érosion côtière au Bénin sont, entre autres, la suppression de l'exploitation du sable marin et les aménagements de la protection de la côte. Mais l'efficacité de ces mesures reste à prouver au regard de l'ampleur et la rapidité des changements globaux

Conclusion partielle

Les épisodes climatiques déterminent la variation quantitative des eaux souterraines dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Ainsi, les remontées piézométriques correspondent à des séquences humides et traduisent une amélioration de la recharge des aquifères et l'abattement des nappes s'observe pendant la période sèche. A l'échelle du bassin, la recharge des aquifères dépend non seulement des facteurs climatiques mais aussi de l'influence des paramètres hydrogéologiques, lithologiques, pédologiques et de la dynamique de l'occupation des terres.

Ainsi, se combinent des facteurs tant naturels qu'anthropiques pour conditionner la disponibilité quantitative, les modes de gestion et la variation de la qualité des eaux souterraines.

TROISIEME PARTIE

MODES D'EXPLOITATION, QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE ET BACTERIOLOGIQUE ET STRATEGIES DE GESTION DURABLE DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES

Chapitre V

MODE ACTUEL D'EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES DANS LE BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN

Les eaux souterraines sont essentiellement utilisées pour satisfaire les besoins des populations rurales et urbaines mais également pour soutenir les activités socioéconomiques, agricoles ou industrielles.

La gestion de cette ressource, telle que abordée dans cette étude concerne les techniques de mobilisation, d'approvisionnement et d'usage dans leur relation avec les événements hydroclimatiques dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin.

5.1. Mobilisation des ressources hydriques

Les eaux souterraines sont captées par divers types d'ouvrages hydrauliques à savoir les puits traditionnels ou modernes à grand diamètre, les forages équipés de pompes à motricité humaine, les forages contre puits et les sources aménagées ou non. De plus, la satisfaction des besoins en eau dans les agglomérations urbaines et périurbaines a nécessité la mise en place d'infrastructures industrielles d'extraction intensive des eaux dans les différents champs de captage. L'évolution spatio-temporelle des ouvrages hydrauliques est vue également sous l'angle d'un facteur de pression humaine sur les ressources en eaux souterraines du bassin.

5.1.1. Equipement en ouvrages d'hydraulique villageoise

La mobilisation et l'approvisionnement en eau, à partir des réservoirs souterrains, se font à l'aide d'ouvrages hydrauliques aménagés par les populations. Les points d'eau sont aussi réalisés par la Direction Générale de l'Eau du Bénin (DG-Eau) sur la base de certains critères dont les ratios du tableau 5.I.

Tableau 5.I : Ratios d'alimentation en eau des populations rurales

Ouvrages hydrauliques	Habitants desservis (en moyenne)
Point d'Eau (PE)	250
Borne Fontaine (BF)	500
Poste d'Eau Autonome (PEA)**	1000

*** A raison d'un taux journalier de 20 litres par habitant (DG-Eau, novembre 2008)*

En se fondant sur ces ratios et en fonction du poids démographique des différentes localités du bassin, le taux de desserte varie et montre d'énormes disparités spatiales. La figure 5.1

montre l'évolution du nombre de points d'eau, exprimé en Equivalent Point d'Eau (EPE) sur la période 1996 à 2007 dans le bassin.

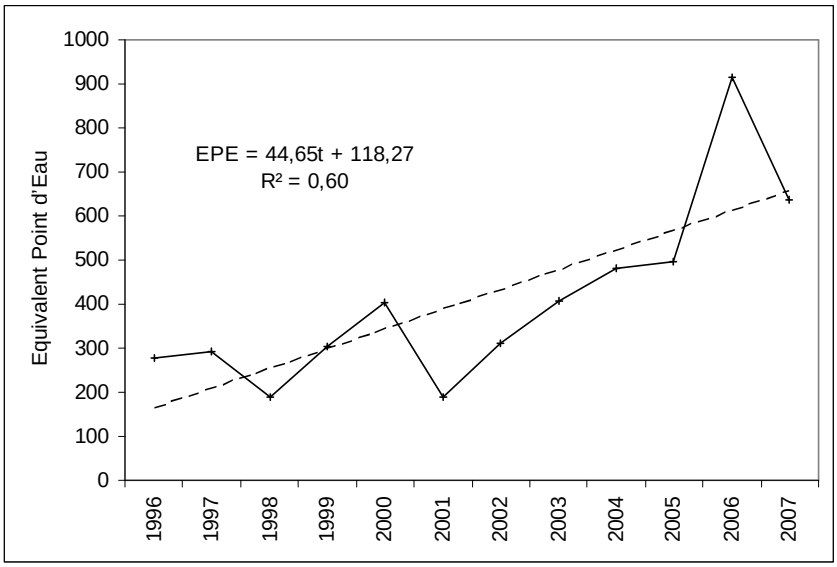


Figure 5.1 : Evolution du nombre d'Equivalent Point d'Eau de 1996 à 2007

Selon cette évolution, les ouvrages d'adduction d'eau villageoise ont augmenté en moyenne de 45 EPE /an avec une variation de 6 EPE/an dans le Zou à 16 EPE/an dans le Mono-Couffo où les conditions climatiques sont moins favorables à la disponibilité en eau pluviale. L'augmentation des EPE, donc des points d'eau de desserte des populations rurales s'explique fondamentalement par la croissance démographique dans un contexte marqué par la récurrence des événements hydroclimatiques extrêmes. La réalisation cumulée des ouvrages hydrauliques en milieu rural en 2007 est récapitulée dans le tableau 5.II.

Tableau 5.II : Equipement en ouvrages d'hydraulique rurale par Département en 2007

Départements	**FPM** (Forage, Contre-puits et source aménagée)	**PM**	**AEV**	**BF**	**PEA**	**EPE**	**Taux d'équipement 2006 (%)**
Atlantique	173	451	48	379	45	1096	45,0
Couffo	362	138	39	294	4	837	62,2
Mono	218	113	20	216	5	572	66,3
Ouémé	401	24	15	135	7	582	28,2
Plateau	281	63	30	258	19	651	58,6
Zou	681	53	41	212	30	1017	56,7
Bassin côtier	**2 116**	**842**	**193**	**1 494**	**110**	**4 755**	**53,0**

Source : *DG-Eau, novembre 2008, NB : FPM = 1 EPE, PM = 1 EPE, AEV = nbre BF, 1 BF = 2 PE, PEA = 4E PE*

En 2007, le bassin est équipé à 53 % en ouvrages d'hydraulique villageoise au regard des besoins de la population rurale. Les Départements du Mono, du Couffo, du Plateau et du Zou

enregistrent les plus forts taux d'équipement du fait probablement de la faiblesse des moyens de création de point d'eau individuel.

La facilité d'accès aux eaux souterraines explique par ailleurs, la prolifération des Postes Autonomes d'Eau ‘’non contrôlés’’ dans les Départements de l'Ouémé, du Plateau, de l'Atlantique et du Zou (photo 5.1).


a


b

Cliché : Totin V.S.H., 28 mars 2009

Photo 5.1. Postes Autonomes d'Eau à Avrankou (a) et à Kétou Iguiolou (b)

L'ampleur du phénomène de création des Postes Autonomes d'Eau (PAE) échappe au contrôle de l'Administration publique de l'eau, surtout dans l'Ouémé et le Plateau qui, selon MMEE (2006), abritaient à eux seuls 492 des 524 installations existantes, soit environ 94 % des réalisations en 2006. Les PAE ‘’non contrôlés’’ sont généralement à but lucratif et gérés par des opérateurs économiques privés. L'eau pompée et non traitée est vendue à la population à des prix fixés par le promoteur. L'eau du puits de Iguiolou (Kétou) est vendue par exemple, à 25 F la bassine de 30 L ou le bidon de 25 L. La création et la multiplication spontanées des PAE illustrent la recherche de solution aux problèmes d'eau et l'incapacité de la DG-Eau ou de la SONEB à couvrir les besoins réels des populations. La pression humaine sur les eaux souterraines risque d'influencer la disponibilité de la ressource surtout dans un scénario de climat sec. Mais cette tendance de dégradation des potentialités en eau peut être inversée dans le contexte de retour à une phase climatique humide.

Pour mieux apprécier la pression humaine sur les eaux souterraines en milieu rural dans le bassin sédimentaire côtier, des indicateurs d'approvisionnement en eau comme les taux de desserte et les quantités d'eau prélevées ont été utilisés.

5.1.2. Indicateurs de l'approvisionnement en eau potable en milieu rural

Le taux de desserte est retenu, dans ce travail, comme un indicateur de satisfaction des besoins en eau des populations rurales. L'estimation de ce taux, fonction du nombre d'habitants et du seuil démographique de création d'un point d'eau en milieu rural, est indiquée sur la figure 5.2.

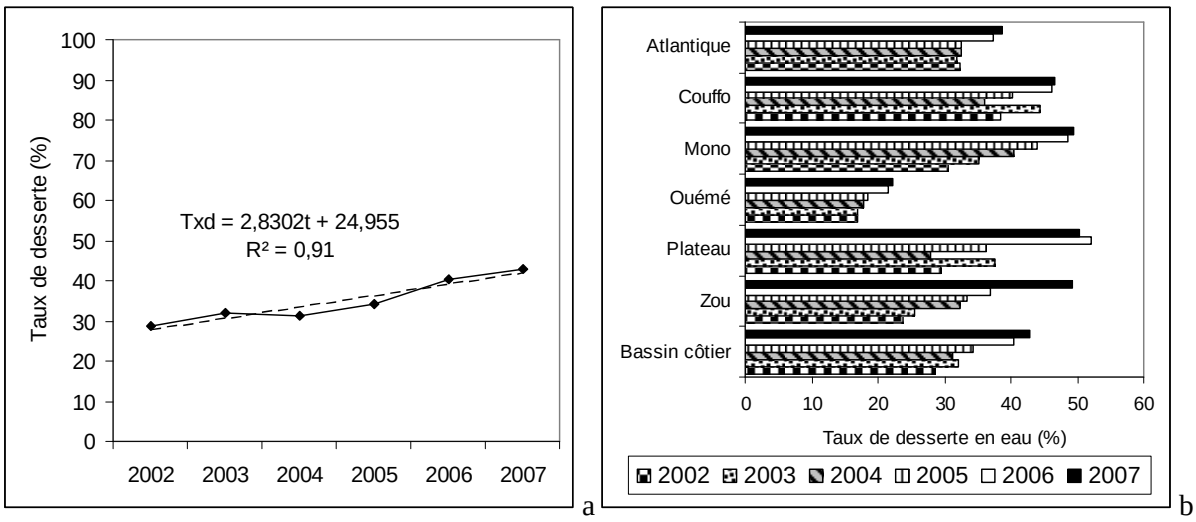


Figure 5.2 : Tendance interannuelle dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin (a) et répartition par Département (b) du taux de desserte en eau de 2002 à 2007

Le taux moyen de desserte a évolué à la hausse et est passé de 29 % en 2002 à 43 % en 2007, soit une amélioration de 3 %/an. Ce taux varie de 17 % dans l'Ouémé en 2002 à 50 % dans le Plateau en 2007. La réalisation accélérée des ouvrages hydrauliques peut être mise en relation avec l'augmentation des besoins sous les contraintes climatique, démographique et de prise de conscience de la dégradation des eaux non suivies.

Les quantités d'eau prélevées, au regard du nombre d'ouvrages hydrauliques installés par la DG-Eau sur la base de l'EPE et d'un minimum de 20 litres par habitant, sont illustrées par la figure 5.3. Elle met en relief le faible taux de desserte en eau dans les localités rurales. Les volumes d'eau potentiellement fournis par les ouvrages sont encore largement en dessous des besoins dans les grandes agglomérations que constituent les Départements les plus peuplés et urbanisés (Atlantique et Ouémé).

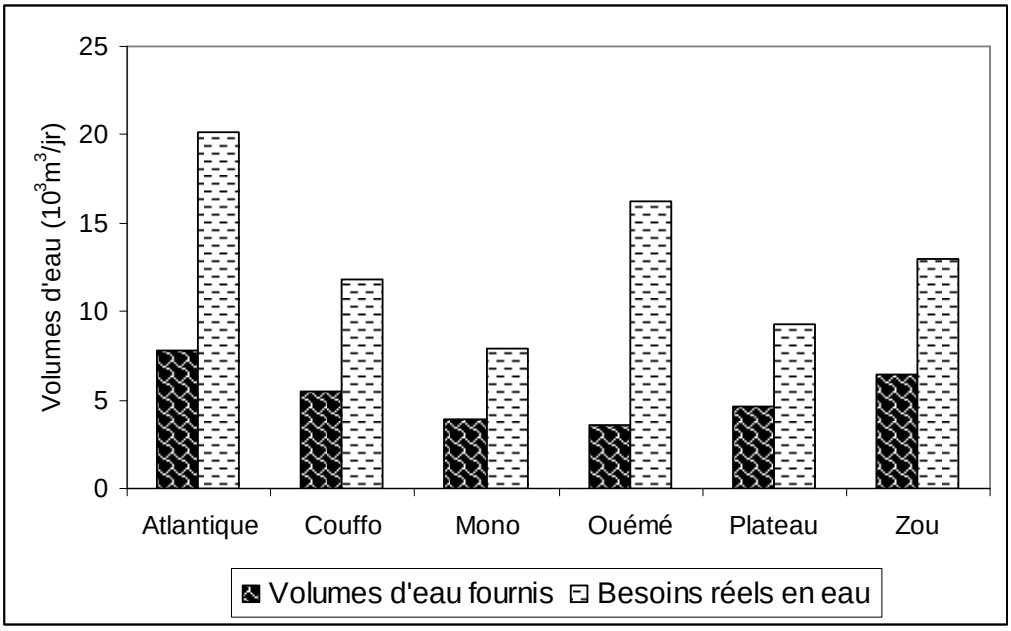


Figure 5.3 : Volumes d'eau réellement fournis et besoins potentiels en eau en 2007 dans les Départements du bassin sédimentaire côtier du Bénin

La compensation des besoins en eau se fait à partir des citernes, des puits, des trous d'eau ou des sources non aménagées, des PAE, etc.

5.1.3. Indicateurs de l'approvisionnement en eau potable en milieu urbain

Les principales villes et les centres urbains secondaires sont desservis en eau potable par la SONEB, à partir de forages installés dans les champs de captage.

5.1.3.1. Evolution des quantités d'eau pompées sur les sites de captage

Les quantités brutes d'eau pompées dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin pour la satisfaction des besoins des agglomérations urbaines sont évaluées à l'échelle des Département de l'Atlantique, du Littoral, de l'Ouémé, du Plateau, du Couffo, du Mono et du Zou.

- ***Départements de l'Atlantique et du Littoral***

Les prélèvements d'eau au niveau des différents champs de captage du plateau d'Allada sont illustrés par la figure 5.4. Les quantités d'eau pompée y sont multipliées par 5, passant de 377.10^3 à 1849.10^3 m^3, soit 5 %/an entre 1990 et 2007 où les précipitations ont baissé 6,5 mm/an.

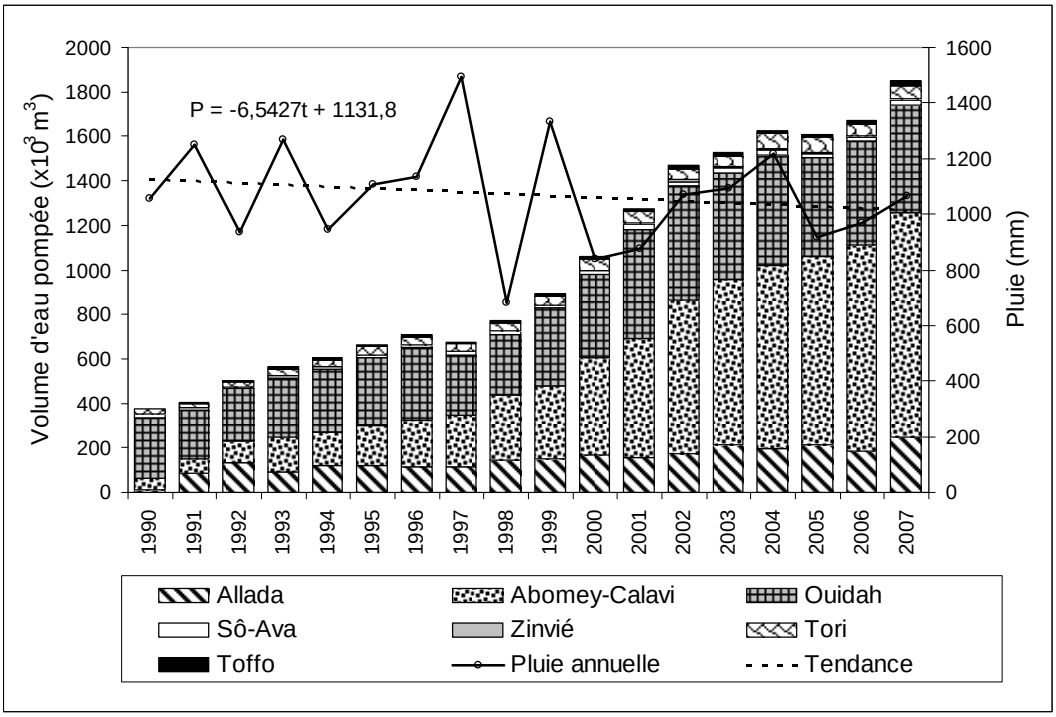


Figure 5.4 : Evolution des volumes d'eau pompée dans les champs de captages et de la pluviométrie dans le Département de l'Atlantique

Les volumes d'eau extraits des aquifères ont cru de 78 % en 2007 par rapport à 1990 et suivant un taux annuel moyen de 91.10^3 m^3 (5 %). Les villes d'Abomey-Calavi et de Ouidah, de par leurs énormes besoins croissants, ont actuellement les taux de prélèvement les plus élevés. Ce phénomène met en évidence les impacts du climat et de l'accroissement démographique sur les eaux souterraines de ce plateau. Cependant, Turkpak (1991) estimait que l'utilisation des eaux souterraines du plateau d'Allada est de seulement 2,5 % de son alimentation et que 97,5 % se perdent en mer, dans les lacs et lagunes.

La ville de Cotonou (Département du Littoral) avec une population de 740 309 habitants en 2007 est également alimentée à partir du secteur sud-est du plateau d'Allada (champ de captage de Godomey) dans le Département de l'Atlantique. Ainsi, les abstractions d'eau pour Cotonou représentent 70 % des quantités totales pompées dans le bassin sédimentaire côtier avec 10.10^6 m^3 en 1995 et 19.10^6 m^3 en 2007 ; soit une augmentation de 48 %. Le volume considérable d'eau pompée pour Cotonou est lié à sa position de monopole économique et à l'implantation des complexes industriels très consommatrices d'eau.

- ***Département de l'Ouémé***

La ville de Porto-Novo enregistre également une hausse des prélèvements d'eau, de 1142.10^3 en 1990 à 2696.10^3 m^3 en 2007 (figure 5.5).

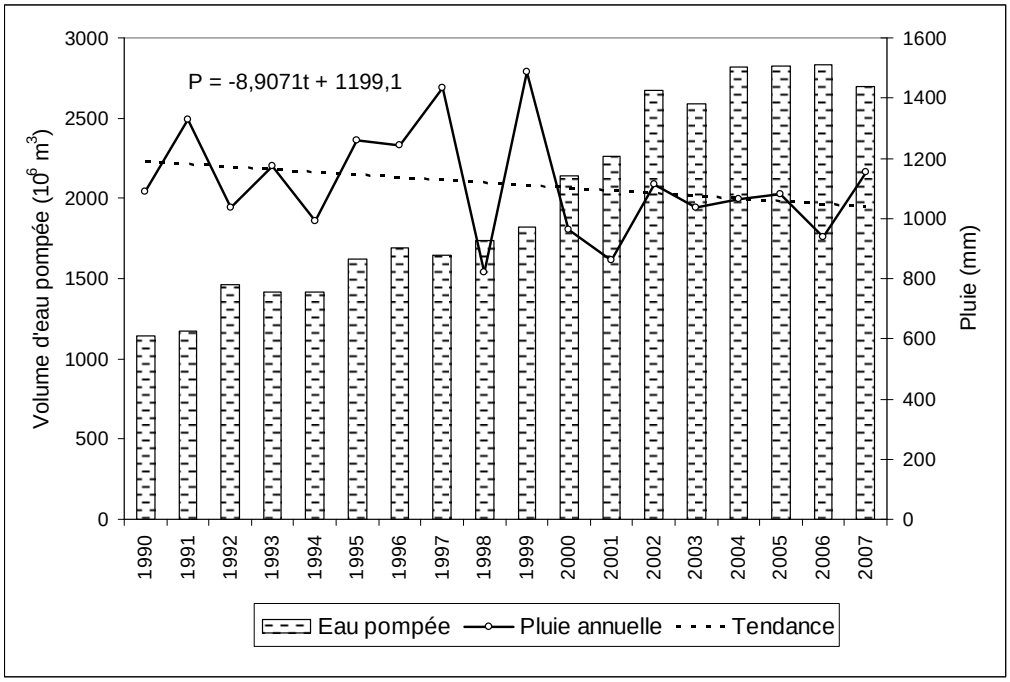


Figure 5.5 : Evolution des volumes d'eau pompée et de la pluviométrie dans le champ de captage de Porto Novo

Les extractions d'eau pour la satisfaction des besoins des populations de la ville de Porto Novo comparées à ceux des centres urbains secondaires du Département de l'Ouémé sont de 94 % contre 6 % en 1990 et 85 % contre 15 % en 2007 (figure 5.6).

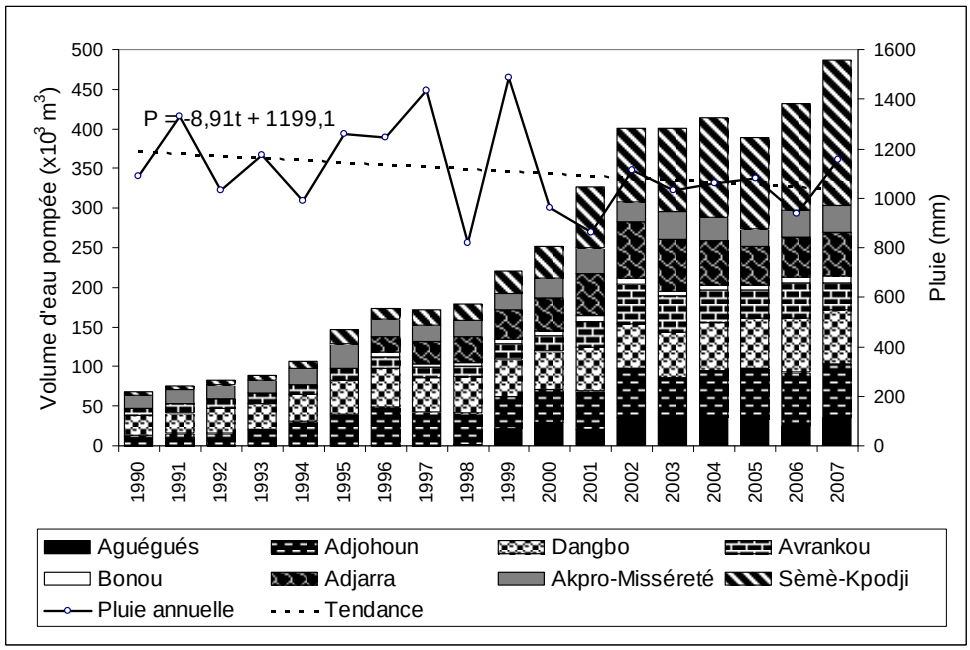


Figure 5.6 : Evolution des volumes d'eau pompée et de la pluviométrie dans les champs de captage des différentes agglomérations urbaines secondaires du Département de l'Ouémé

Les quantités d'eau prélevées sont passées de 1142.10^3 à 2696.10^3 m^3 pour la ville de Porto Novo et de 68.10^3 à 487.10^3 m^3 dans l'ensemble des villes secondaires du Département de

l'Ouémé de 1990 à 2007, avec 184.10^3 m^3 pour Sèmè Kpodji. Ainsi, le cumul d'eau pompée dans ces centres urbains secondaires était 17 fois moins important que celui de Porto Novo en 1990 et 6 fois moins en 2007. Il s'observe alors une tendance à la hausse des quantités d'eau pompée pour la satisfaction des besoins de ces agglomérations urbaines secondaires, surtout celle de Sèmè Kpodji. Elle est, en effet, frontalière du Nigeria et en très grande expansion du fait de son statut de villes frontalières, de site industriel et de cité-dortoir.

Dans le Département de l'Ouémé, les volumes d'eau pompés ont globalement varié de 1210.10^3 à 3183.10^3 m^3, soit un taux d'augmentation de 137.10^3 m^3/an.

- ***Département du Plateau***

Dans le Département du Plateau, le faible taux moyen de variation ($9{,}6.10^3$ m^3/an) traduit une diminution des volumes d'eau pompés (figure 5.7).

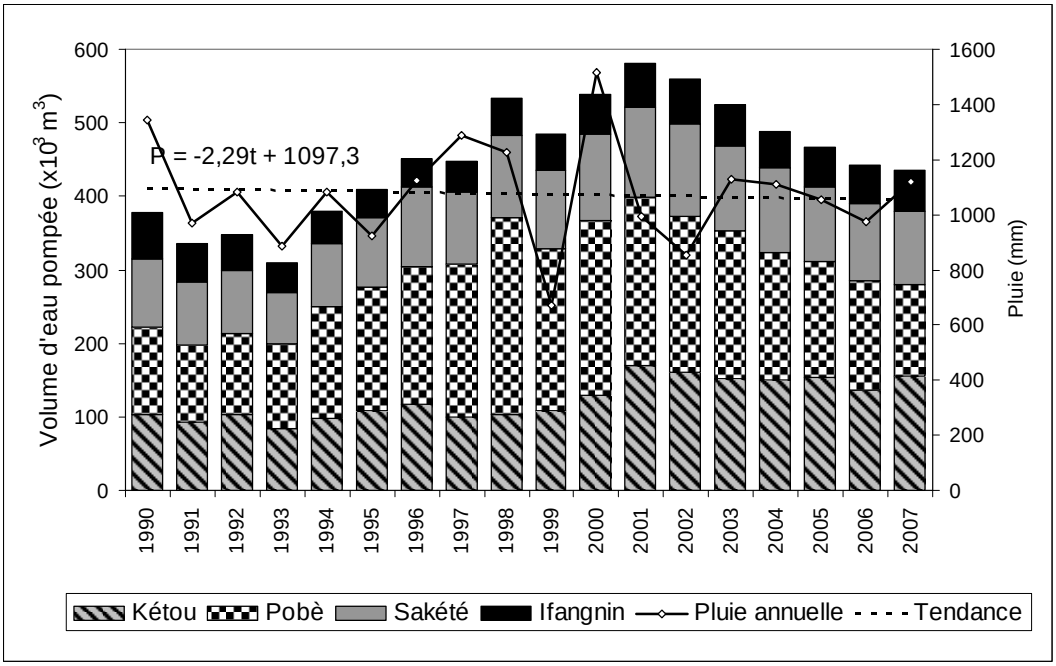


Figure 5.7 : Evolution des quantités d'eau pompée dans les champs de captage de Kétou, Pobè, Sakété et Ifangni et variabilité pluviométrique sur le plateau de Sakété

Ce phénomène de réduction des volumes d'eau pompés est surtout observé à Pobè et Sakété, centres urbains frontaliers du Nigeria, qui est le lieu d'acquisition de la technologie hydraulique d'exploitation individuelle d'eau souterraine. Les variations des quantités d'eau sont respectivement de 118.10^3 à 267.10^3 m^3 et 92.10^3 à 113.10^3 m^3 entre 1990 et 1998 à Pobè et à Sakété, soit un taux d'augmentation de $18{,}6.10^3$ m^3/an et $3{,}1.10^3$ m^3/an. De 1999 à 2007, ces valeurs ont baissé de 220.10^3 à 124.10^3 m^3 pour Pobè et 106.10^3 à 100.10^3 m^3 pour Sakété, soit une diminution respective de $14{,}3.10^3$ m^3/an et $1{,}5.10^3$ m^3/an. La baisse

progressive des volumes d'eau est liée à la prolifération des Postes Autonomes d'Eau, qui ne sont pas enregistrés à la DG-Eau. Deux habitants sur trois s'approvisionnent en eau de boisson à partir des PAE, qui offrent la ressource à un prix souvent deux fois moins cher que celui pratiqué par la SONEB.

Ce mode individuel d'exploitation des eaux souterraines est moins développé à Kétou où, certainement, la profondeur du niveau statique (> 50 m) justifie l'importance des volumes d'eau fournis SONEB.

- ***Département du Couffo***

La variation générale des extractions d'eau (203.10^3 à 526.10^3 m^3) de 1990 à 2007 dans le Couffo montre deux séquences (figure 5.8). Le taux de variation de 1990 à 2003 est de 32.10^3 m^3/an et celle de 2004 à 2007 de $-7{,}5.10^3$ m^3/an. Les prélèvements bruts d'eau ont respectivement augmenté de 203.10^3 à 547.10^3 m^3 et baissé de 547.10^3 à 526.10^3 m^3 suivant les séquences. L'agglomération urbaine de Azovè/Aplahoué enregistre les fortes quantités d'eau pompée.

Cette évolution est apparemment liée aux facteurs démographiques, au prix prohibitif de l'eau et aussi au recours à d'autres sources d'approvisionnement (puits, forages, individuels, etc.).

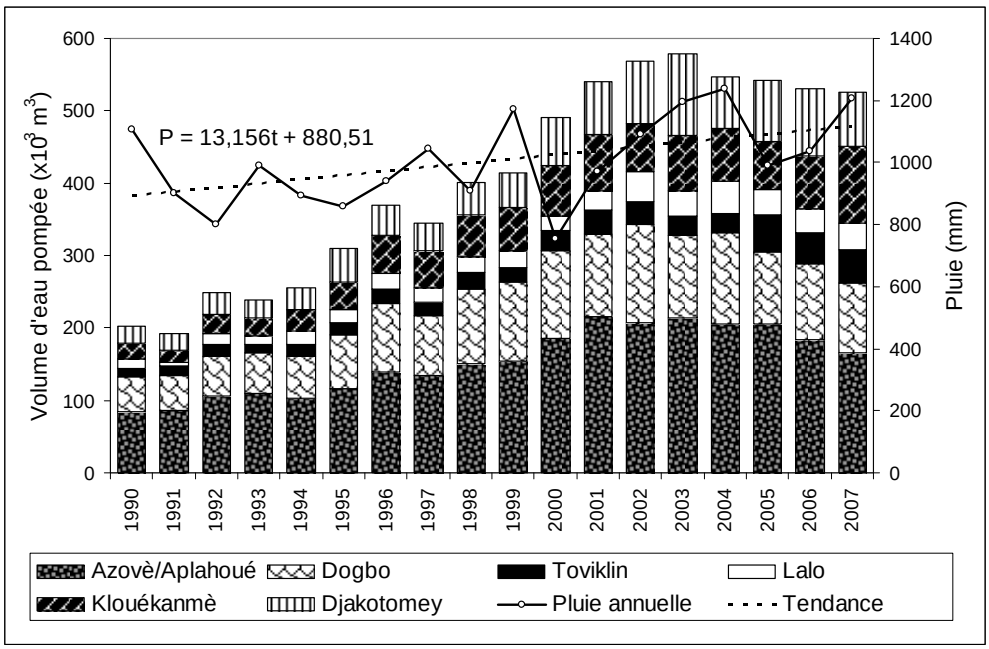


Figure 5.8 : Evolution des volumes d'eau pompée dans les champs de captage et de la pluviométrie dans les localités du Département du Couffo

L'évolution à la hausse de la pluviométrie pourrait également entraîner une forte mobilisation des eaux pluviales et expliquer un abandon de l'eau de la SONEB.

- ***Département du Mono***

Dans le Département du Mono, les prélèvements d'eau sont de l'ordre de 331.10^3 m^3 à 1050.10^3 m^3 de 1990 à 2007 (figure 5.9).

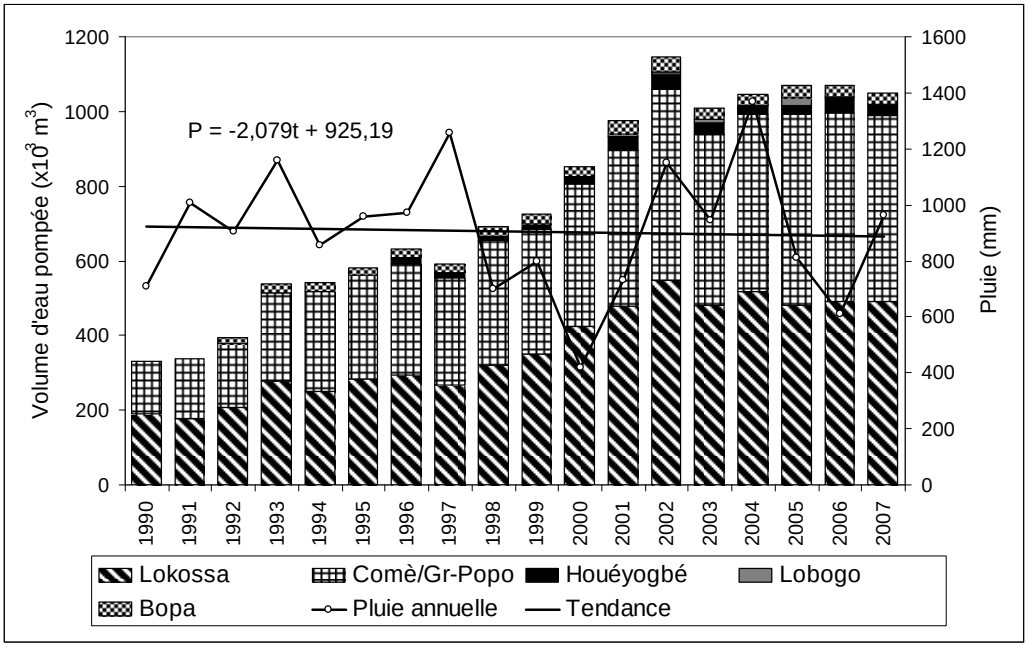


Figure 5.9 : Evolution comparée des volumes d'eau pompée dans les champs de captage et variabilité pluviométrique dans le Département du Mono

Les agglomérations urbaines de Lokossa, Comè/Grand Popo enregistrent à elles seules 90 à 100 % des prélèvements totaux d'eau du Département pour la période considérée. Les extractions ont ainsi connu une hausse respective de 61 % (189.10^3 à 490.10^3 m^3) et 72 % (142.10^3 à 501.10^3 m^3) en 2007.

Une stabilité des pompages d'eau autour de 500.10^3 m^3 s'observe depuis 2003 au niveau des deux stations précédentes et autour de 30.10^3 m^3 à Bopa, probablement pour des raisons sus évoquées.

- ***Département du Zou***

La figure 5.10 montre l'évolution des prises d'eau pour la desserte des populations urbaines du Département du Zou.

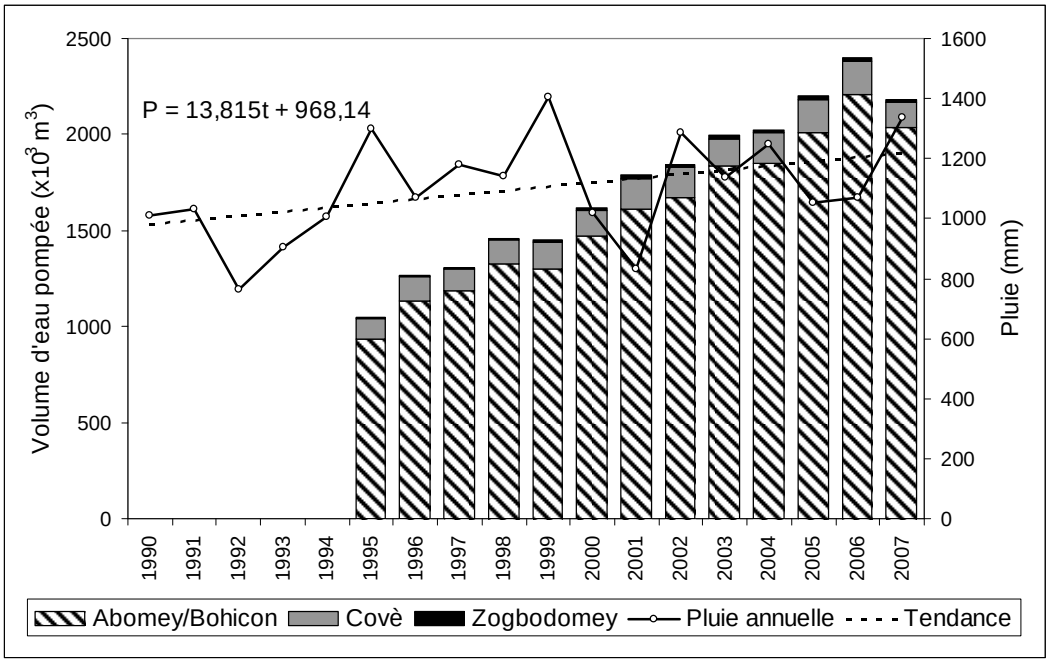


Figure 5.10 : Evolution des extractions d'eau dans les champs de captage et variabilité pluviométrique dans le Département du Zou

Les volumes d'eau pompée ont également connu une augmentation de 52 % en 13 ans dans le Zou. Ainsi, les quantités brutes d'eau extraites sont passées de 934.10^3 à 2036.10^3 m^3 à Abomey/Bohicon, 105.10^3 à 135.10^3 m^3 à Covè, 8.10^3 à 10.10^3 m^3 à Zogbodomey. L'augmentation est globalement de 1047.10^3 à 2181.10^3 m^3 pour le Département avec un taux annuel de 105.10^3 m^3. Cette augmentation des pompages d'eau se fait concomitamment à une hausse pluviométrique, avec un taux de 1,2 % sur la période 1990-2007.

En synthèse, le taux de variation des volumes d'eau pompée dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin sur la période 1990-2007 est de 1764.10^3 m^3/an, soit 10 %/an. De plus, sous l'effet de plusieurs forces directrices, dont essentiellement le stress hydrique, les contraintes hydrogéologiques, la dynamique démographique, l'accroissement de la demande en eau, l'émergence de nouveaux besoins, les eaux pompées ont augmenté de 91 % entre 1990 et 2007 ; soit 11 fois le volume de 1990.

L'analyse à une échelle fine (mensuelle et saisonnière) permet de déterminer l'influence réelle de l'évolution du climat sur les pompages d'eau brute, destinée à la satisfaction des besoins des agglomérations urbaines.

5.1.3.2. Variabilité des volumes d'eau mensuels et saisonniers pompés

Les figures 5.11 à 5.14 illustrent les régimes d'extraction mensuelle des volumes d'eau pompée sur la période 2004 à 2007.

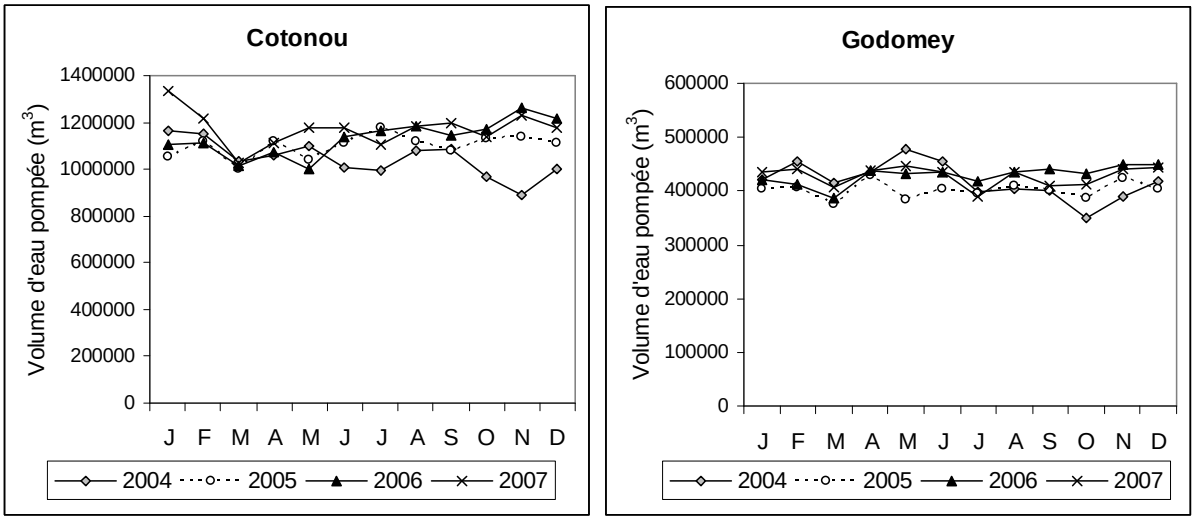


Figure 5.11 : Régime d'extraction d'eau à Cotonou et à Godomey

La figure 5.11 ne montre pas une évolution quasi constante des quantités mensuelles d'eau extraites à Cotonou et Godomey entre 2004 et 2007. Les volumes d'eau pompée sont en moyenne de 1112.10^3 m^3/mois à Cotonou et 419.10^3 m^3/mois à Godomey avec une variation respective de 1018.10^3 à 1163.10^3 m^3/mois et 395.10^3 à 435.10^3 m^3/mois. La variation saisonnière est de 0,5 % à Cotonou et de 2 % à Godomey.

L'exploitation des eaux souterraines ne suit pas un rythme saisonnier à Cotonou et à Godomey à l'opposé des agglomérations d'Abomey et de Kétou, au nord du bassin côtier du Bénin ; de Bopa et d'Allada dans son secteur central (figure 5.12).

La période humide d'avril à septembre voire octobre enregistre une baisse des volumes d'eau pompés et celle sèche de novembre à mars connaît une hausse. A cet effet, les extractions d'eaux souterraines augmentent de 159.10^3 à 181.10^3 m^3 à Abomey (12 %), 12.10^3 à 15.10^3 m^3 à Kétou (25 %), $2{,}5.10^3$ à $2{,}8.10^3$ m^3 à Bopa (11 %), 19.10^3 à 22.10^3 m^3 à Allada (11 %). Ce phénomène serait lié à la variation de la disponibilité d'eau pluviale, collectée et utilisée comme ressource complémentaire surtout en saison pluvieuse où l'eau de la SONEB est moins sollicitée. Les petites saisons sèche et pluvieuse n'influencent pas, outre mesure, les pompages d'eau dans les champs de captage concernés.

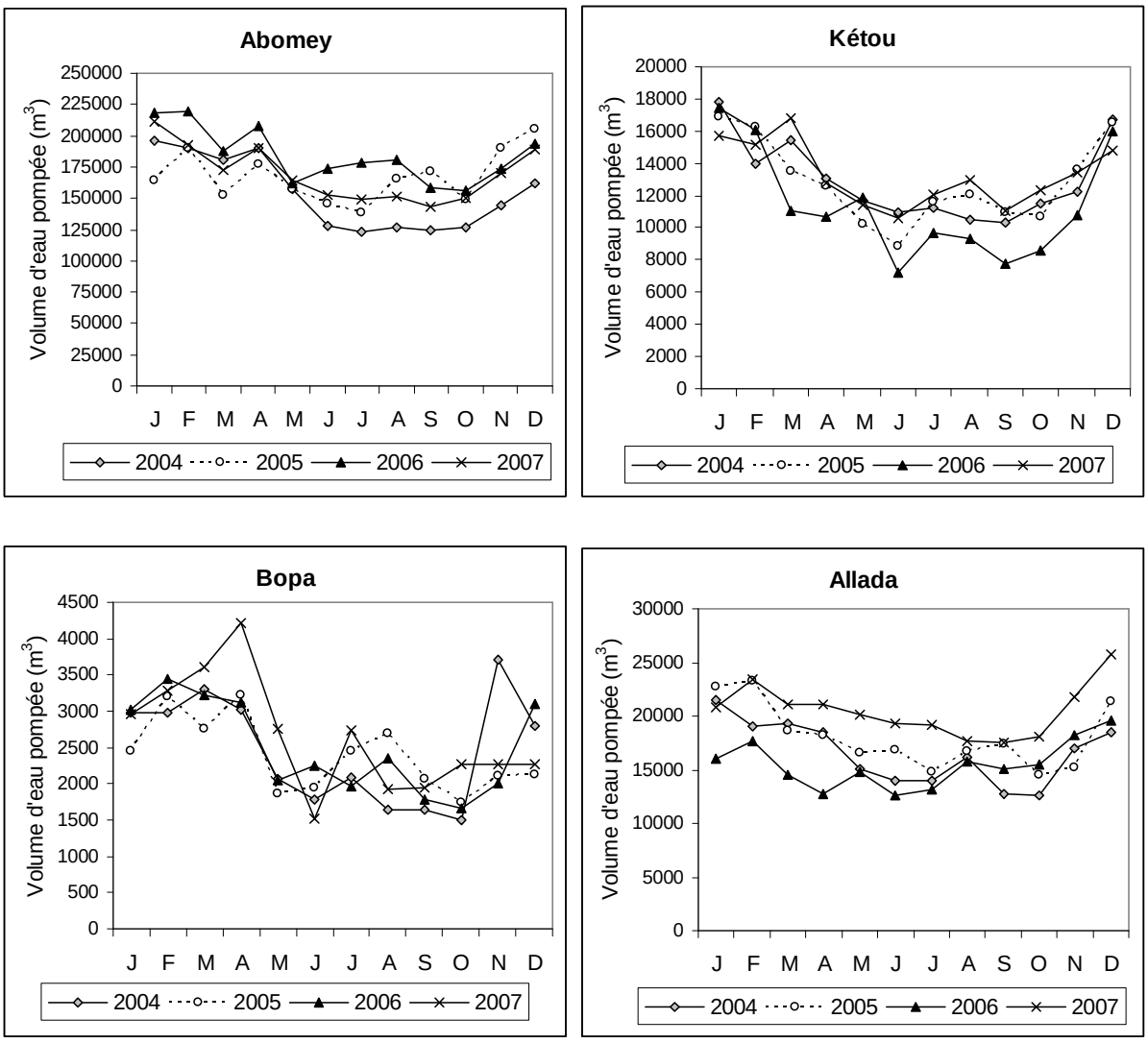


Figure 5.12 : Régime d'extraction d'eau souterraine dans les parties nord et centrale du bassin sédimentaire côtier du Bénin

La présence d'ouvrage de récupération d'eau pluviale (citernes, cuves, jarres, etc.) dans presque toutes les maisons illustre le recours massif à l'eau pluviale. De plus, les caractéristiques hydrogéologiques des unités 3, 8, 15 et 17 (figure 2.6, p. 76 ; tableau 2.II, p. 77) dans lesquelles sont respectivement situées Abomey, Kétou, Allada et Bopa, montrent que l'implantation des puits est très difficile étant donné que le niveau statique se trouve globalement à plus de 50 m.

Dans les secteurs d'Adjohoun et de Sô-Ava, respectivement caractérisés par l'existence de nombreuses sources et des eaux superficielles (rivière Sô et fleuve Ouémé), les eaux pompées varient de 5174 à 6012 m^3 (10 %) 1726 à 1685 m^3 (9 %) (figure 5.13).

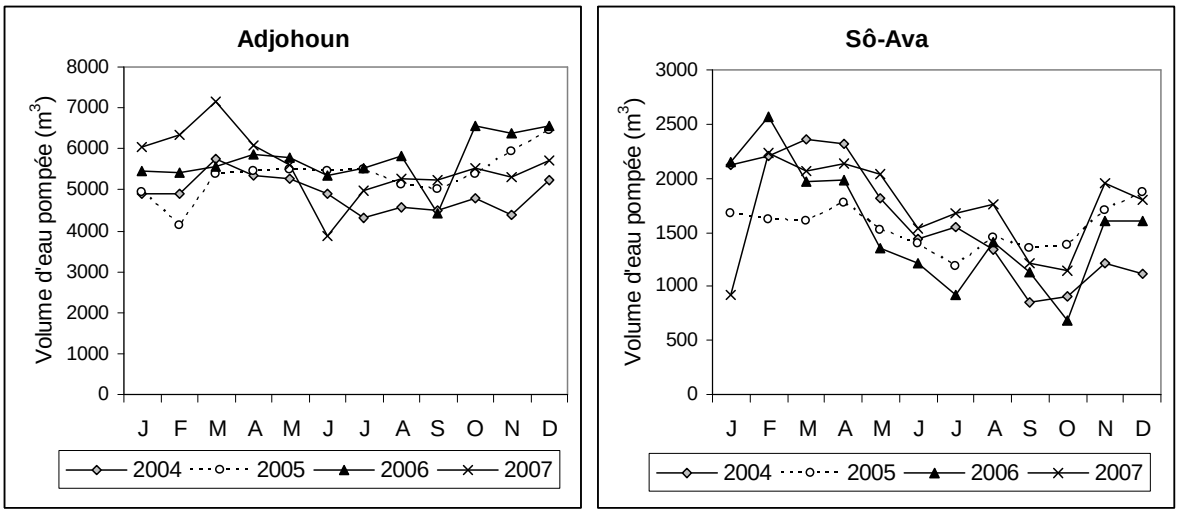


Figure 5.13 : Régime de pompage d'eau souterraine à Adjohoun et Sô-Ava

La faiblesse des pompages d'eaux souterraines dans ce secteur correspondant à la Dépression de l'Ouémé et aux unités hydrogéologiques 24, 25 et 26 (tableau 2.II, p. 77) est relative à un recours permanent aux eaux de surface et aux sources, puits et forages dont le niveau statique peu profond ou artésien offre la possibilité. La figure 5.14 illustre l'évolution mensuelle des volumes d'eau pompés dans deux champs de captage quasiment situés dans la plaine côtière.

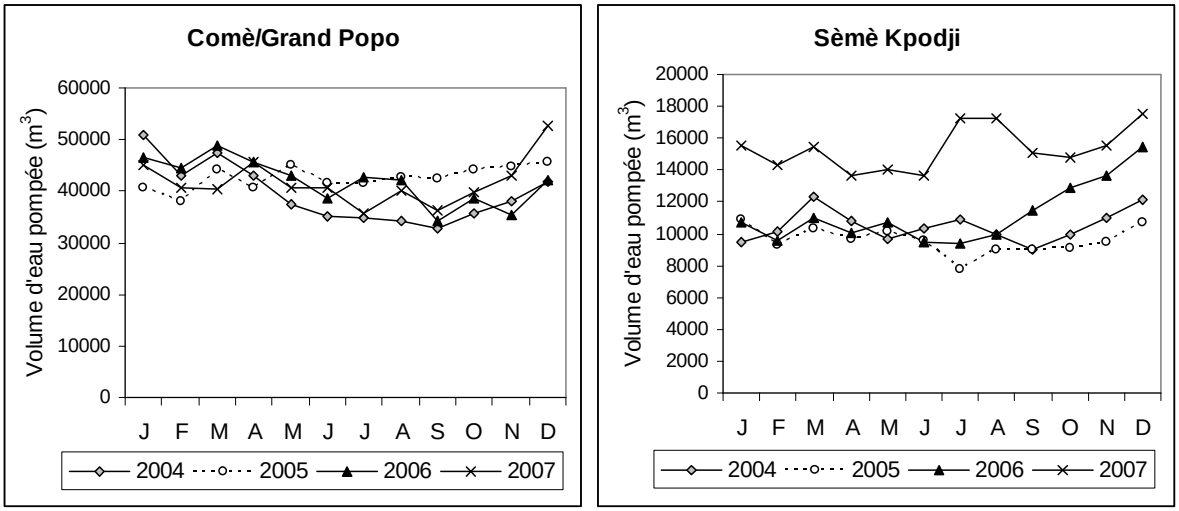


Figure 5.14 : Régime de pompage d'eau à Comè/Grand Popo et Sèmè Kpodji

Les quantités d'eau sont de 40.10^3 à 44.10^3 m^3 à Comè/Grand Popo (8 %) et 15.10^3 à 16.10^3 m^3 à Sèmè Kpodji (3 %). La faible variation des pompages serait aussi liée à l'utilisation des eaux pluviales et des puits de faible profondeur, captant une nappe phréatique peu variable à l'échelle saisonnière. Les pompages élevés en saison sèche (novembre à février) font penser à une faible utilisation des eaux de ces puits probablement sous influence de la marée océanique au regard de la position de Grand Popo et de Sèmè Kpodji dans l'unité hydrogéologique côtière 2 (figure 2.6, p. 76 ; tableau 2.II, p. 77).

Au total, l'évolution saisonnière des extractions d'eaux souterraines est évocatrice des impacts de la variabilité climatique et par conséquence des changements climatiques, qu'ils soient marqués par des événements secs ou humides extrêmes. Sur la base d'une capacité de recharge annuelle de 125 millions de m^3 dans le bassin sédimentaire côtier (Géohydraulique, 1985a), les volumes totaux d'eau pompée pour les besoins en eau des agglomérations urbaines représentent environ 23 %. En tenant compte des prélèvements d'eau à partir des ouvrages d'hydraulique villageoise et des infrastructures individuelles estimés à 94 %, le taux global d'exploitation des ressources souterraines passe à 117 %. La forte emprise humaine a probablement un rôle dans le déficit de recharge, étant donné que les apports d'eau pluviale n'arrive pas à compenser toujours les prélèvements.

5.1.4. Ouvrages hydrauliques d'exploitation des eaux souterraines

Les eaux souterraines sont essentiellement extraites en période hydroclimatique sèche où les ressources pluviales et superficielles sont très limitées ou rares. Les ouvrages hydrauliques d'exhaure sont les puits traditionnels et modernes, les forages d'adduction d'eau villageoise, les stations de pompage et de traitement d'eau potable pour les agglomérations urbaines, les sources aménagées ou semi aménagées. Les puits traditionnels peu profonds (< 25 m) tarissent en saison sèche, ou contiennent des eaux de mauvaise qualité du fait de l'infiltration des polluants organiques ou chimiques. Les populations à 86 % estiment que la capacité de production des ouvrages hydrauliques est de plus en plus faible, étant donné que les conditions climatiques sont à certaines années peu favorables à la disponibilité de l'eau. Mais la pression humaine serait aussi un facteur non négligeable. La photo 5.2 montre quelques types d'ouvrage hydraulique d'exploitation des eaux souterraines.



a b c

Cliché Totin, octobre 2009

Photo 5.2. Ouvrages d'exhaure et approvisionnement en eau à Bohicon Sodohomey Lokozoun (a), Tori Bossito (b) et à Aplahoué Kpodji (c)

Ces ouvrages hydrauliques, bien que ne permettant pas encore d'optimiser la gestion de l'eau souterraine, du point de vue quantitatif et qualitatif, aident à s'en approvisionner de façon plus

ou moins pérenne. Les sources (aménagées ou non) et les forages artésiens servent également de point de prélèvement d'eau d'usage courant pour les populations. Mais dans certains cas, l'eau continue de couler en permanence dans la nature, faute d'équipements adéquats de mobilisation et de conservation du surplus d'eau (photo 5.3).



a b

Cliché Totin V.S.H., février 2005 et octobre 2009

Photo 5.3. Aménagements inadéquats d'un forage artésien à Bopa Possotomè (a) et de la source Abaya à Adjohoun Hêkpa Dogbamè (b)

La figure 5.15 présente la répartition des sources aménagées ou non dans le bassin, confirmant l'importance de l'artésianisme du niveau statique dans la dépression de l'Ouémé (unités hydrogéologiques 24, 25 et 26 de la figure 2.6, p. 76 et du tableau 2.II, p. 77).

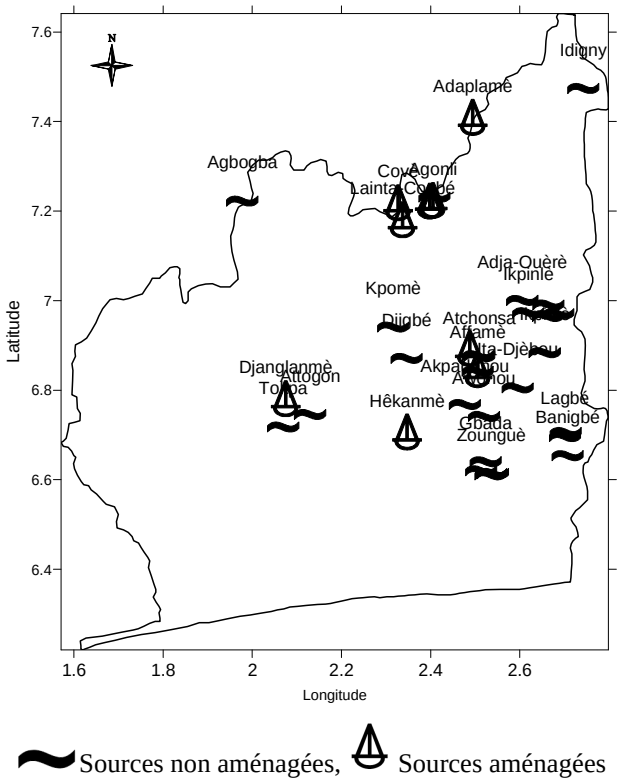


Figure 5.15 : Répartition de quelques sources dans certaines régions hydrogéologiques du bassin sédimentaire côtier du Bénin

Les sources naturelles sont essentiellement situées dans le secteur est du bassin, dans les zones basses, les vallées de cours d'eau, sur le flanc ou au pied des plateaux. Elles ont été identifiées notamment dans les villages de Hounguè, Yokon, Aïtchawé à Dangbo ; Agbomahan Hazounmèhoué, Ouébossou Tovoh, Wété à Bonou ; d'Assigui Gbongodo, Akpadanou à Adjohoun, en ce qui concerne le Département de l'Ouémé. Dans le Département du Plateau, elles sont exploitées par les populations des communes de Ifangni, Sakété, Adja-Ouèrè, Pobè et de Kétou. Dans le Département du Zou, le système aquifère des plateaux de Zagnanado et d'Abomey se décharge dans la dépression de Lama par le biais des sources Wakpa, Lêkpêtê et Somété ou Massavi à Zagnanago, Aga et Covè centre à Covè et Yansata à Agbogba (Abomey). Dans l'Atlantique, il s'agit des sources Ava à Niaouli, Havi à Tokpa-Gbédji (commune d'Allada), Yamgba à Kpanroun (commune d'Abomey-Calavi), Dovô à Kpomè et Honvô à Togouin (Toffo). Enfin, il faut citer les sources Oukpa et Wô à Djigbé et Havi à Hêkanmè, dans la commune de Zè.

L'eau thermale de la nappe du crétacé, captée par forage, est embouteillée par l'usine d'eau minérale à Possotomè. Les forages artésiens à eau thermo-minérale, construits à Hêtin-Sota, Gbéko et Dêkin (Dangbo), Gogbo (Adjohoun), Dogba, Atchabita et Bonou (Bonou) ne sont pas encore mis en exploitation.

Les sources naturelles, principales sources d'approvisionnement en eau dans les localités sises notamment dans la dépression de l'Ouémé enregistrent une baisse considérable de leur débit (photo 5.4).



a b

Clichés Totin, novembre 2008 ; janvier 2010

Photo 5.4. Source semi-aménagée à faible débit à Atchabita (a) et Massavi à Doga (b)

Ces photos prises sur le versant ouest du plateau de Sakété à Bonou Atchabita et sur celui du plateau de Zagnanado à Doga montrent de minces filets d'eau sortant du tube PVC et du dispositif aménagé au niveau de la source Massavi en saison sèche. La baisse de débit des

sources, évoquée par les populations, est déjà signalé par Azonsi *et al.*, (2003). L'affaiblissement du débit originel et/ou de chute de pression pourrait être mis en relation avec les sécheresses des années 1970 et 1980 qui ont certainement induit une réduction considérable et progressive de l'infiltration. Le déficit de recharge et probablement la ''sur-vidange'' des eaux souterraines vers les bassins versants, confrontés à une sécheresse hydrologique poussée, entraîne une diminution du débit de jaillissement des nappes artésiennes. En outre, la pression d'exploitation de ces points d'eau d'accès libre par une population en augmentation semble également être un facteur aggravant la perte du potentiel hydrique souterrain. Cette tendance inhérente à l'évolution du climat, plus marquée par les événements de sécheresse pourrait s'inverser si le scénario de climat humide devenait effectif.

Les sources, bien qu'elles assurent une fonction écologique d'entretien des écosystèmes (débit de base, maintien des zones humides, etc.), constitue une perte considérable, étant donné leurs eaux peuvent être stockées (Totin, 2005). Fort heureusement, les contraintes hydroclimatiques, le déficit de recharge, la diminution des débits de jaillissement entraînent déjà une certaine prise de conscience au niveau de l'Administration publique de l'eau et des populations. A cet effet, l'eau des sources ou des forages artésiens commence à être mobilisée et stockée dans des réservoirs aménagés comme à Massi et à Bopa (photo 5.5).


a


b

Clichés Totin, août 2002 et février 2005

Photo 5.5. Ouvrages de mobilisation et de distribution des eaux des nappes artésiennes : citerne à ciel ouvert à Bopa (a) et citerne hors sol sur l'ancien site artésien de Massi (b)

A Ouèdèmè Adja Totinga, le débit du forage artésien est modulé, à l'aide d'une tête de pompe, permettant de réduire les pertes d'eau dans la nature. La réalisation de ces ouvrages hydrauliques de contrôle des débits ou de récupération des eaux d'écoulement des sources ou des puits artésiens constitue un indicateur que la conscience de la crise prochaine de l'eau

gagne déjà les techniciens de l'eau et les utilisateurs qui, bon gré mal gré, acceptent la tarification de l'eau.

Par ailleurs, selon les populations, les difficultés d'accès à l'eau sur les plateaux, surtout en saison sèche, entraînent un changement comportemental en matière d'approvisionnement et le déplacement de certaines activités consommatrices d'eau vers les masses d'eau pérenne comme le montre la photo 5.6.



a b

Clichés Totin, février 2007 et mars 2008

Photo 5.6. Approvisionnement en eau d'usages domestiques en saison sèche dans les lits mineurs du fleuve Couffo à Lon-Agonmè (a) et à Adjaralla à Aplahoué (b)

Cette eau de surface, limitée et très exploitée en saison sèche au niveau des points de vidange (lits mineurs des cours d'eau) est celle provenant des réservoirs souterrains ayant stocké cette ressource en saison pluvieuse. Etant donné que l'écoulement est nul en période sèche et que les volumes d'eau prélevés dans ces lits fluviaux sont importants, une vidange accrue d'eau s'observe en période d'étiage (figure 4.12, p. 158). Ceci pourrait aussi expliquer le rabattement rapide de la surface piézométrique, notamment sur les bas versants des plateaux du fait de la faible profondeur de la nappe phréatique.

L'analyse des volumes d'eau prélevés a permis de cerner leur évolution spatio-temporelle. Elle n'a toutefois pas permis de comprendre l'évolution des besoins en eau dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Pour ce faire, il est nécessaire de faire le point des différents usages faits des ressources en eau dans ce bassin.

5.2. Usages des ressources en eaux souterraines dans le bassin côtier du Bénin

L'eau potable est fournie aux usagers par les institutions publiques compétentes (SONEB et DG-Eau) dans l'ensemble du bassin sédimentaire côtier du Bénin. Mais elle est utilisée à des fins domestiques, agricoles et industrielles. L'eau étant une ressource d'intérêt, à multiples

fonctions et usages, sa gestion relève de plusieurs secteurs de la vie économique et sociale (MMEE, 2006). Les usages de l'eau dans le bassin sont analysés sur la base de leurs fonctions socioéconomiques.

5.2.1. Principales fonctions socioéconomiques des eaux souterraines

L'eau a plusieurs fonctionnalités qui sont : eau potable pour les populations, eau pour la production alimentaire (agriculture, élevage, pêche), eau pour les écosystèmes et pour les autres usages productifs (industrie, énergie, mine, transport, tourisme, etc.). Elle a, en outre, une dimension culturelle et religieuse, aspects non négligeables dans le contexte béninois (MMEE, 2006). Toutefois, les utilisations de l'eau souterraine dans le bassin côtier du Bénin sont encore limitées aux usages essentiellement domestiques, industriels et dans une moindre mesure agricoles.

5.2.1.1. Usages domestiques de l'eau souterraine

L'usage domestique est lié à la satisfaction des besoins des personnes physiques formant un ménage. Les utilisations concernent essentiellement l'alimentation humaine et les soins d'hygiène. L'alimentation humaine nécessite primordialement l'eau potable pour la boisson et dans une certaine mesure pour la cuisson. Mais, l'eau dite potable en agglomération rurale peut ne pas l'être en réalité, dans la mesure où elle ne subit pas de traitements qualitatifs comme celle fournie par la SONEB. L'eau sert au quotidien aux usages alimentaires et corporels (boisson, cuisson, bain/douche et vaisselle) et autres (lessive, sanitaires, lavage de véhicules ou arrosage du jardin et dans certains ménages). La figure 5.16 montre la part des différents usages dans la consommation quotidienne de l'eau fournie par la SONEB et la DG-Eau, dans les agglomérations du bassin telle que ressortie par les enquêtes menées dans le cadre de ce travail.

L'analyse des différents usages montre que l'eau souterraine est en grande partie consommée pour les soins d'hygiène (67 %) en milieu urbain alors qu'en milieu rural elle est prioritairement destinée à la boisson et à la cuisson. Cela s'explique par l'existence d'une diversité de points d'approvisionnement en eau (eaux souterraines, eaux de surface ou citernes) en ‘’zone’’ rurale comparativement en milieu urbain. La pluralité de points d'eau en milieu rural conduit à une meilleure rationalisation de l'utilisation de la ressource. Les usages tels que le bain, la lessive, la vaisselle ne nécessitent pas forcément une eau de bonne qualité. Elle peut provenir des points d'eau de surface (ruisseau, mare, étang, lac, etc.) ou des ouvrages de récupération d'eau pluviale (citernes, jarres, cuves, etc.).

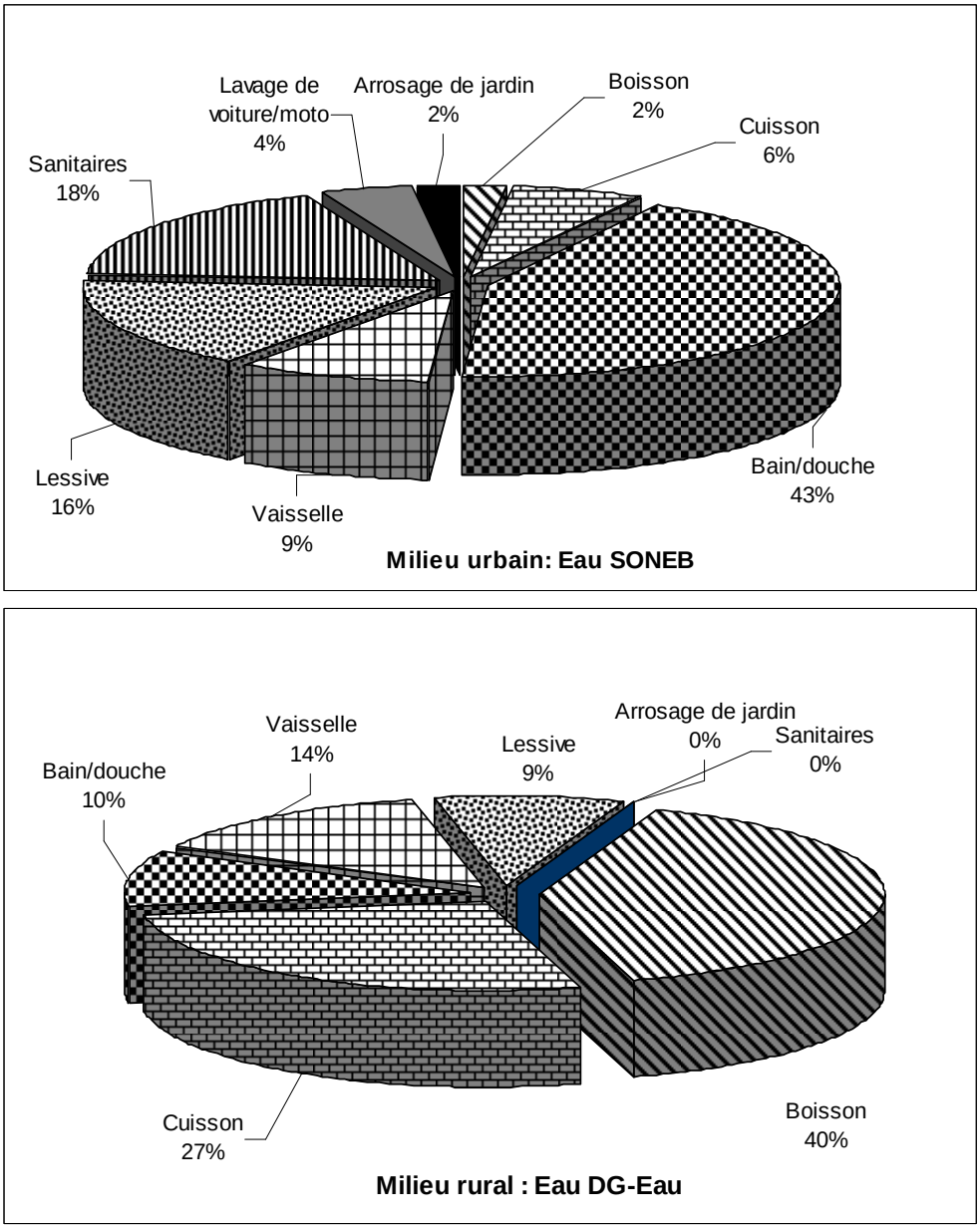


Figure 5.16 : Destination de l'eau fournie par la SONEB et la DG-Eau utilisée pour les besoins domestiques dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin

Dans les agglomérations urbaines, la boisson et la cuisson des aliments n'utilisent que 8 % de l'eau potable, contre 86 % pour le bain/douche, la vaisselle, la lessive et les sanitaires très consommateurs d'eau. L'exemple des chasses d'eau qui déversent 11 litres, voire plus à chaque passage d'un usager, est à cet égard éloquent. De plus, cette eau potable qui, selon l'entendement, devrait servir à la satisfaction des besoins vitaux, est ''détournée'' pour le lavage de véhicules, l'arrosage de jardins, etc. De la sorte, la consommation journalière d'eau est en réalité souvent supérieure de deux, voire quatre fois à la norme de 50 l/jr/pers, visée pour les populations urbaines. Mieux, la norme de 70 l/hab/jour définie dans la « Vision Eau Bénin 2025 » est déjà largement dépassée.

La forte sollicitation des eaux souterraines en saison sèche est indicatrice de la pression qui s'exercera sur les aquifères du bassin côtier dans un scénario de climat sec. Mais, comme déjà évoqué, l'usage des eaux n'est pas que domestique, elle est également agricole.

5.2.1.2. Usages agricoles de l'eau souterraine dans le bassin côtier du Bénin

Les systèmes de production agricole dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin sont encore très dépendants des eaux pluviales. Il n'y existe en effet pas d'irrigation à grande échelle à partir des ressources en eau en général, celles souterraines en particulier. Cette dépendance de la production agricole annuelle à l'eau pluviale, est liée aux apports importants d'eau des saisons pluvieuses (climat subéquatorial) du bassin.

La demande en eau agricole est très faible si bien que l'irrigation, encore à un stade embryonnaire, est limitée aux périmètres maraîchers des villes et périphéries. Cette demande en eau souterraine pour l'agriculture urbaine connaît d'ailleurs une augmentation exponentielle, depuis un certain temps en relation avec la forte demande en produits maraîchers. Selon MMEE (2006), dans les zones urbaines, périurbaines et quelques autres localités du Bénin, les eaux souterraines sont de plus en plus sollicitées pour l'irrigation des cultures, surtout celles maraîchères à petite échelle. Cette irrigation est faite sur des espaces sommairement aménagés, de taille généralement très réduite mais en expansion comme à Cotonou, Godomey, Porto-Novo, Grand Popo notamment.

Dans le cadre de l'élaboration d'un programme de promotion de l'irrigation privée au Bénin sur financement du PNUD, la Direction du Génie Rural a estimé, en 2006, à environ 2500 ha la superficie totale des micro-périmètres maraîchers, contre 1624 ha en 1999. Sur cette base, la superficie des terres maraîchères irriguées en 2009 est évaluée à 301 ha, inégalement réparties dans le bassin côtier du Bénin. Se fondant sur la norme FAO d'irrigation (16 000 m^3/ha/an), le volume d'eau souterraine prélevé dans ces périmètres maraîchers est estimé à environ 4 810 630 m^3.

L'eau souterraine nécessaire à la petite irrigation ou à l'arrosage dans les périmètres maraîchers est extraite au moyen de forages équipés de motopompes (photo 5.7a) ou de trou d'eau captant la nappe phréatique (photo 5.7b).



a b

Cliché : Totin V.S.H., janvier 2009 et novembre 2008

Photo 5.7. Double forage sur le site maraîcher de Grand Popo (a) et trou d'eau captant la nappe phréatique à Houéyiho, Cotonou (b)

Le choix des infrastructures hydro-agricoles dépend de l'étendue des périmètres maraîchers. Ainsi, les petites exploitations sont arrosées à partir des trous d'eau captant la nappe subaffleurante, à moins de 2 m de la surface du sol. L'influence du climat sur cette nappe a conduit à l'aménagement d'ouvrages hydrauliques pour capter la nappe plus profonde dont le niveau piézométrique saisonnier fluctue moins comme à Grand Popo.

A l'opposé de l'agriculture urbaine, les complexes industriels sont de très grandes consommatrices d'eaux souterraines.

5.2.1.3. Usages industriels de l'eau souterraine

Les utilisations industrielle et hôtelière de l'eau souterraine n'ont pas fait l'objet d'une analyse détaillée dans cette étude, mais elle nécessite une attention compte tenu de l'importance relative des infrastructures. Les industries implantées dans le bassin constituent environ 85 % du total du Bénin. Il s'agit entre autres, des industries du ciment, alimentaires, du meuble, textiles, de papeterie, chimiques, cosmétiques, énergétiques et de machines à outils (ABE, 2001) dont la grande partie se trouve dans les environs de la ville de Cotonou.

Les besoins en eau de la plupart de ces unités industrielles sont satisfaits à partir du réseau de distribution de la SONEB ou des équipements hydrauliques installés, qui captent directement les nappes souterraines superficielles sur leur site. Les industries alimentaires, textiles, de mécanique légère et de construction métallique, les industries minières ou chimiques, les industries d'imprimerie, d'électronique, de maroquinerie et du bâtiment et des travaux publics (BTP) sont de très grosses consommatrices d'eau par unité de temps et en permanence.

Au regard des types d'industries installées dans le bassin et, étant donné qu'elles sont à quelques différences près conçues suivants les mêmes normes que partout ailleurs, le volume d'eau nécessaire à la fabrication de certains produits industriels, comme au Bénin, est résumé dans le tableau 5.III.

Tableau 5.III : Volumes d'eau nécessaires pour fabriquer une tonne de produits industriels

Produits	**Quantité d'eau (litre)**
Ciment	environ 35
Savon	de 1 à 35
Matière plastique	de 1 à 2

***Source** : Syndicat National des fabricants de sucre de France, 2003*

Dans le même ordre d'idée, il faut environ 25 L d'eau pour produire un litre de bière et 100 L pour obtenir un litre d'alcool (EPS, 2005).

La fonction industrielle du bassin sédimentaire côtier du Bénin serait donc un facteur de baisse du niveau des nappes et d'intrusion saline induite par les extractions massives d'eaux souterraines. Ces données indiquent combien les activités socioéconomiques pourraient induire une pression additionnelle sur les ressources en eaux souterraines dans un contexte climatique marqué par l'augmentation des événements extrêmes secs. Les projets futurs de création et viabilisation de zones franches industrielles, augurent à une intensification de cette pression sur le système aquifère. Cela pourrait, en l'absence de mesures de planification et de gestion intégrée, s'aggraver et même générer des conflits d'utilisation de la ressource.

Pour tous ces usages d'eau passés en revue, les impératifs de qualité diffèrent. Ainsi, l'eau potable est indispensable pour la production alimentaire (sous-produits de fabrication par exemple) mais pas pour le refroidissement des installations industrielles ou le lavage des matières premières.

5.2.1.4. Autres formes d'usages des eaux souterraines

L'eau potable de la SONEB, est utilisée à d'autres fins, au point de friser le gaspillage. L'eau est, par exemple, très consommée pour les activités de génie civil. Ainsi, sur les chantiers de construction de bâtiments notamment et de travaux publics en général, la ressource hydrique utilisée est généralement celle du réseau d'adduction d'eau potable. Il en est de même en ce qui concerne l'eau utilisée pour le lavage des véhicules (50 à 150 litres par voiture) dont le parc est en plein développement dans les centres urbains voire ruraux. Cette pratique de gaspillage de l'eau potable onéreusement traitée, s'observe particulièrement dans les agglomérations urbaines de Cotonou, Porto-Novo, Abomey-Calavi, Bohicon, etc. Un autre

facteur de gaspillage d'eau potable est l'arrosage des espaces verts publics et privés, étant donné qu'il faut environ 15 à 20 litres par m².

L'eau potable, fournie par les institutions compétentes, est donc utilisée pour des usages ne nécessitant pas un niveau de qualité élevé de l'eau, même dans les ''zones'' où la nappe est affleurante et où un puits suffirait pour satisfaire les usages autres que la boisson humaine (MMEE, 2006). L'augmentation des quantités de la ressource pour satisfaire ces besoins de ''prestige'' entraîne une pression de prélèvement sur le potentiel hydrique des aquifères. Ce phénomène pourrait également expliquer la cherté de la ressource, du fait de l'augmentation des coûts d'extraction et de traitement des eaux souterraines captées.

L'exploitation et l'utilisation des ressources en eau souterraine dépendent aussi des croyances qui fondent le contexte socioculturel du bassin côtier du Bénin.

5.3. Croyances empiriques et gestion des ressources en eau

Le Sud-Bénin est marqué par l'existence des croyances, aptitudes et perceptions relatives à la fonction de l'eau et, par conséquent, à sa gestion (Totin, 2005) dans chaque aire socioculturelle. L'analyse éthnoécologique qui a porté sur l'étude des relations d'une société avec son milieu naturel (Bahuchet, 1997) a permis de mettre en évidence le paradigme ''culture'' et ''ressources en eau'' dans le bassin côtier du Bénin. Or, selon Allain (2006), s'intéresser à la gestion du domaine de l'eau, c'est s'intéresser à la gestion d'un « anthroposystème » (Levêque et Van de Leeuw, 2003), c'est-à-dire à la gestion d'« un système interactif entre deux systèmes constitués par un (ou des) socio-système(s) et un (ou des) écosystème(s) naturel(s) et/ou artificialisé(s) s'inscrivant dans un espace géographique donné et évoluant dans le temps ».

Ainsi, face à l'ampleur de l'impact de l'évolution du climat, des problèmes hydriques et sanitaires, les populations développent des stratégies inspirées de leurs us et coutumes, et des relations établies entre les éléments physiques du milieu naturel et leur propre culture (Totin, 2003). Ces stratégies sont, entre autres, le recours à la législation traditionnelle, la matérialisation de leurs connaissances en modèle empirique, les attributs des différentes divinités qui commandent la gestion des ressources en eau dans le panthéon vôdoun du Sud-Bénin. Selon Hountondji (1994), les divinités sont partout présentes dans l'environnement béninois. Elles sont dans les éléments naturels tels que l'eau, la pierre, le fer, l'arbre, etc.

Dans la tradition fon par exemple, la croyance religieuse animiste établit un lien entre les événements climatiques, hydrologiques et différentes divinités. Mais, ces considérations

religieuses, très importantes dans la protection des écosystèmes ou des hydrosystèmes, tendent à disparaître du fait de l'urbanisation et de l'expansion des religions évangélistes envahissantes qui tendent à les diaboliser. Cependant, elles continuent, dans une certaine mesure, de régir la gestion des ressources en eau en milieu rural fortement ancré dans la tradition. Même si la sacralisation des eaux souterraines n'est pas clairement établie, la figuration des eaux terrestres les sous-entend. Pour Six (1998) par exemple, les cours d'eau sont très recherchés également pour faire des cérémonies de purification. Toutes les rivières dans lesquelles l'eau est prélevée pour faire des cérémonies sont sacrées et sont considérées comme des divinités.

La principale source productrice de l'eau superficielle et souterraine, la pluie est ainsi considérée comme un don de la divinité *Xèbiosso*, envoyée pour féconder sa sœur, la déesse de la Terre, *Sakpata*, et les plantes ou cultures qu'elle porte. Par conséquent, *Xèbiosso*, est l'une des grandes divinités du panthéon béninois, qui dirige la pluie, … Il est assisté de ses quarante-un (41) enfants *''So''* et chacun, à sa manière, contrôle et rythme le temps et le climat : *Aden* donne la pluie, *Aklombè* produit l'orage et la crue des fleuves, *Adjakata* envoie les averses les plus violentes, *Akélé* est, quant à lui, chargé d'évaporer l'eau de mer (Pérard, 1991 ; Boko, 2004). Par conséquent, la colère d'une ou des divinités en charge de la pluviogenèse selon les règles de la météorologie locale, et le châtiment infligé aux humains seraient à l'origine de la récurrence des extrêmes climatiques dont les pluies diluviennes et des crues aléatoires imprévisibles. Les significations révélées par les populations montrent que la malfaisance et la violation des règles naturelles ou des interdits sociaux (le *sududu*) ont atteint, ces dernières années, un point culminant, appelant à la colère des dieux du panthéon Vodoun. Baglo *et al.*, 2002 ont montré que la croyance au *Vodoun* est généralisée dans la société traditionnelle étant donné que les divinités sont considérées comme des dieux vengeurs et punitifs en cas de transgression de leurs interdits. Ainsi, s'observe une intensification des événements hydroclimatiques sans une explication scientifique concrète. Selon Akibou (2009), une frange de la population estime que le ''climat est malade''. Ces événements éthno-hydroclimatiques auraient un impact sur la variation spatio-temporelle des ressources en eau, même souterraines.

L'importance de l'eau, appelée *sin* est attestée dans la religion Vodoun où la plupart des divinités règnent sur cet élément ou le touchent de près (Pérard *et al.*, 1992). La figure 6.4 illustre ces rapports entre un socio-système (la divination) et les hydrosystèmes naturels.

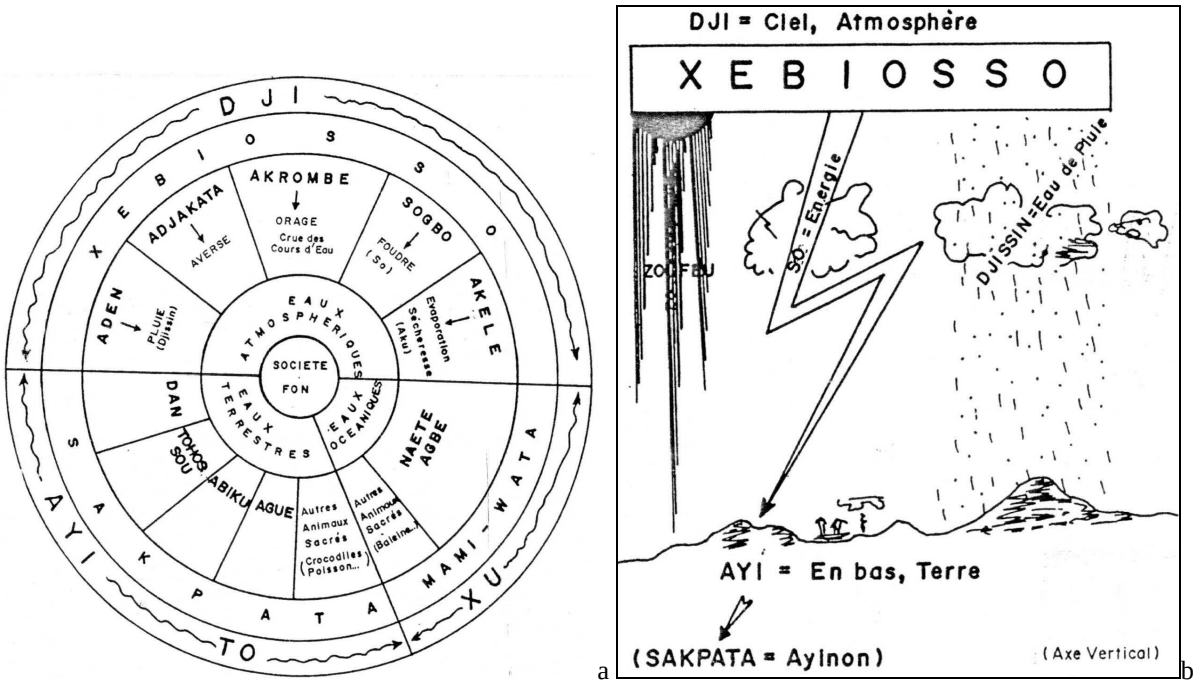


Figure 5.17 : Divinités de l'eau (a) et attributs de Xèbiosso dans la tradition Fon

***Source** : Pérard J. et al, (1991)*

Au regard de cette hiérarchie, les composantes du cycle de l'eau, conceptualisées dans les modèles scientifiques officiels (hydrologiques) se trouvent souvent en adéquation avec les représentations des modèles socio-psychologiques de gestion des relations climat-eau. Cette maîtrise empirique du fonctionnement du cycle de l'eau explique, par exemple, la manipulation des paramètres, en l'occurrence pluviogènes, du système climatique par les *Jidonto* (faiseurs de pluie) ou *Jiklonto* (empêcheurs de pluie) et le fondement de la *météorologie endogène*. Dans un scénario de climat sec, cette approche éthnoclimatologique, si elle peut s'appliquer à une région comme le bassin côtier du Bénin, pourrait permettre, par les pluies provoquées, de réduire les déficits de recharge des aquifères et de compenser les énormes volumes d'eau pompés.

Selon la météorologie moderne, la disponibilité en eau pluviale, superficielle ou souterraine est conditionnée par le fonctionnement régulier du système pluviogène de la mousson ouest-africaine. La météorologie endogène établit un lien entre la disponibilité en eau et un rapport harmonieux entre les humains et les divinités. Ainsi par exemple, la conception empirique de l'appartenance des puits traditionnels très profonds appelé *sɛtɔ* (niveau statique > 50), à des divinités oblige les populations à en consacrer des offrandes périodiques. Tel est, par exemple, le cas du puits échantillonné à Azovè Atchonhoué, situé selon le propriétaire à un ''carrefour hydrologique souterrain''. Ce puits, profond de 60 m, serait un don d'une divinité prenant corps dans une femme blanche et ayant quatre enfants. En conséquence, un culte lui ai

voué à travers le versement régulier d'une quelconque liqueur blanc en guise de sacrifice pour la pérennisation de l'écoulement de cette nappe et de la disponibilité en eau souterraine quelle que soit la crise climatique. Ainsi, les eaux pluviales, les eaux de surface et les eaux souterraines, sont régies par des règles coutumières et sont souvent liées à des divinités (Koudjrohèdé, 1996). L'eau a donc une dimension sociale et culturelle qui influence consciemment ou inconsciemment les processus de décisions et donc des priorités qui interviennent dans sa gestion. La foi en certains rites et cultes permet de considérer l'eau comme un don divin et les plans d'eau représentent généralement des temples de divinités (Hèdiblè, 2008).

Conclusion partielle

Les modes courants de gestion des eaux souterraines sont marqués par une augmentation de la demande et une forte pression sur la ressource dans un contexte climatique marqué par la baisse pluviométrique et l'augmentation des températures. La ville de Cotonou a mobilisé à elle seule 70 % des 28 millions de m^3 d'eau extraite des aquifères du bassin côtier du Bénin en 2007. L'augmentation de la demande entraîne une pression d'exploitation sur les eaux souterraines pour les usages domestiques, industriels et même agricoles, encore qu'il existe déjà une marge importante à satisfaire.

Au total, le système actuel de gestion des eaux souterraines dans le bassin côtier du Bénin, comporte des insuffisances du fait de la non application d'une réelle politique d'exploitation durable des ressources. Même la qualité des eaux souterraines semble être affectée par la combinaison des impacts du climat et des modes de gestion.

Chapitre VI

SENSIBILITE DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES A LA VARIABILITE DU CLIMAT ET DES MODES D'EXPLOITATION DANS LE BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN

L'évolution climatique et par conséquent hydrologique influerait sur les paramètres physiques chimiques et bactériologiques des eaux souterraines. La dynamique saisonnière de la qualité des eaux de puits, de forages et de sources a permis de déterminer les processus de minéralisation et contamination par les agents bactériens dont les plus importants retenus sont les coliformes totaux, *Escherichia coli* et streptocoques fécaux.

La qualité de l'eau douce est constamment dégradée par la pollution des agents pathogènes, des déchets organiques, des composés chimiques, des eaux usées et des eaux de ruissellement (Dejoux, 1988). Les sources naturelles ou anthropiques de dégradation des eaux souterraines sont caractérisées en relation avec le climat et les changements environnementaux dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. La qualité des eaux de quelques ouvrages d'exhaure (puits, forages et sources) est analysée au regard des normes 2006 de potabilité de l'Organisation Mondiale de la Santé (WHO, 2008), afin d'apprécier l'état de la ressource de ce point de vue.

6.1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines

6.1.1. Analyses statistiques classiques

Le tableau 6.I présente une analyse statistique descriptive classique des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines échantillonnées dans le bassin côtier du Bénin. Les températures des eaux varient entre 27,7 et 30,5 °C en octobre et de 26,5 et 31,7 °C en janvier. Elles sont plus élevées en saison sèche qu'en saison pluvieuse, excédant la norme de potabilité de l'OMS de 7 °C contre 6 °C. Au nombre des facteurs influençant la variation saisonnière de la température de l'eau, Alassane (2004) évoque la recharge de la grande saison pluvieuse, qui fait chuter les valeurs de ce paramètre. Elles augmentent certainement en saison sèche sous l'effet de l'élévation de la température ambiante. Mais, une mesure directe de la température dans les ouvrages pourrait permettre de confirmer ces phénomènes surtout dans les nappes profondes captées à travers les forages.

Tableau 6.I : Synthèse statistique des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines (puits, forages et sources) dans le bassin côtier du Bénin

Paramètres	Unité	Normes OMS (2008)	Saison pluvieuse (Octobre)				Saison sèche (Janvier)			
			Min	Max	Moy	Ecart-type	Min	Max	Moy	Ecart-type
T°C	°C	*25*	27,7	30,5	29,1	0,7	26,5	31,7	29,3	1,1
pH		*6,5 - 8,5*	3,9	8,6	5,9	1,0	3,7	8,6	6,0	1,1
Conductivité	µS/cm	*2000*	24,7	3630,0	444,7	785,9	22,0	1540,0	340,0	455,0
TDS	mg/L	*1000*	24,0	1476,0	295,0	396,0	14,0	1001,0	188,3	285,4
O_2	mg/L	*5*	2,1	8,8	4,3	1,5	1,1	5,0	3,1	1,1
Ca^{2+}	mg/L	*400*	1,5	83,2	16,7	20,9	1,2	145,6	23,4	32,7
Mg^{2+}	mg/L	*50*	0,1	16,2	2,9	4,0	0,3	39,2	7,8	10,3
Na^{+}	mg/L	*200*	0,6	132,0	21,6	32,9	0,1	178,3	27,5	46,9
K^{+}	mg/L	*12*	0,6	32,7	7,3	8,8	0,0	73,1	8,6	15,8
HCO_3^{-}	mg/L	-	0,0	190,0	48,8	52,9	2,2	240,0	49,3	60,8
F^{-}	mg/L	*1,5*	0,0	0,5	0,0	0,1	0,0	0,8	0,1	0,2
Cl^{-}	mg/L	*250*	0,0	301,5	16,9	60,8	0,0	423,8	47,0	104,2
SO_4^{2-}	mg/L	*250*	0,0	81,3	4,0	16,5	0,0	162,9	9,7	33,4
NO_3^{-}	mg/L	*50*	0,0	48,5	9,2	13,1	0,0	88,2	21,9	25,0
NO_2^{-}	mg/L	*3*	0,0	15,2	0,8	3,1	0,0	18,2	0,8	3,7
NH_4^{+}	mg/L	*0,5*	0,0	4,4	0,7	1,0	0,0	3,3	0,6	0,8
PO_4^{3-}	mg/L de P	*5*	0,0	11,0	1,1	2,3	0,0	49,4	5,1	13,7
Br^{-}	mg/L	*0*	0,0	1,0	0,1	0,3	0,0	0,3	0,0	0,1
Salinité	g/L	*0*	0,0	1,8	0,1	0,4	0,0	1,8	0,1	0,4
Turbidité	NTU	*5*	0,0	23,0	3,2	5,3	0,0	28,0	4,3	6,0
Couleur	PtCo	*15*	0,0	224,0	29,7	47,3	1,0	235,0	31,4	48,5

***Source** : Totin, octobre 2009 et janvier 2010*

Les écarts de températures au niveau de 70 % des puits de faible profondeur (Ladji, Ouando, Gbècon, Akammahoué et de Togba Ouéga) confirme l'influence du climat sur les eaux souterraines (figure 6.1).

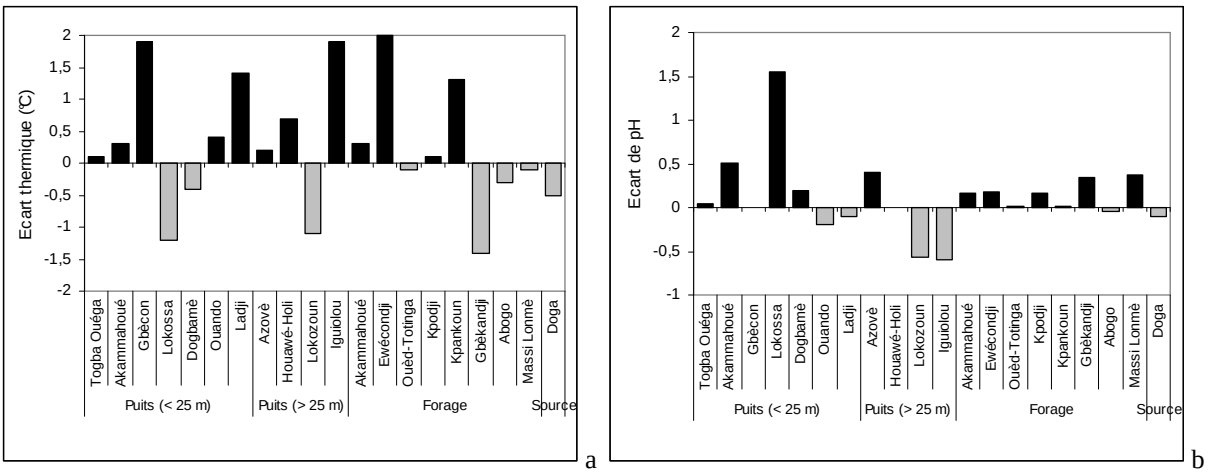


Figure 6.1 : Ecart thermique (a) et de pH (b) des eaux souterraines dans le bassin côtier

Quant au pH, dont les écarts saisonniers ne montrent pas de grandes variations, ses valeurs sont de 3,9 à 8,6 en saison pluvieuse et 3,7 à 8,6 en saison sèche avec une moyenne respective de 5,9 et 6,0. Les eaux présentent, au niveau de 80 % des ouvrages échantillonnés en saison sèche et 70 % en saison pluvieuse, un pH supérieur à la norme 6,5-8,5 de l'OMS. Les eaux des puits de faible profondeur sont neutres à basiques à Grand Popo (8,6), Lokossa (6,6 et 8,1), Ladji (7) et au niveau du forage de Grand Popo (7,9 et 8,1). Ils sont pour la plupart situés dans la plaine côtière à l'opposé des eaux à pH acides des plateaux du bassin (figure 6.2)

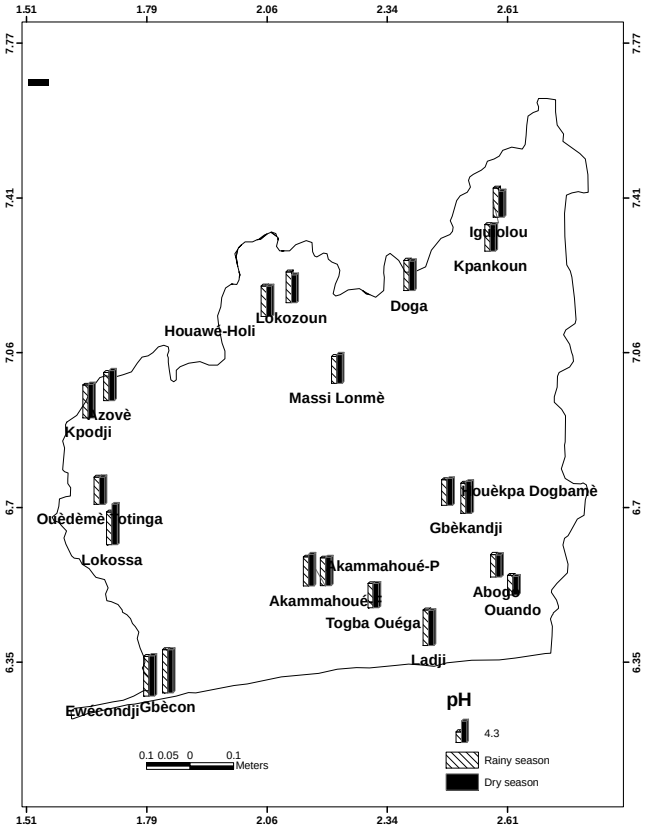


Figure 6.2 : Répartition spatiale de pH des eaux souterraines dans le bassin côtier du Bénin

Ces résultats sont conformes à ceux de Boukari (1998), et de Alassane (2004), pour qui la nature silicatée des réservoirs ou la dissolution de l'acide carbonaté issu du CO_2 atmosphérique peut expliquer ce caractère acide des eaux souterraines.

Les eaux des puits captant la nappe superficielle sont les plus minéralisées et plus en saison sèche qu'en saison pluvieuse avec une conductivité respective de 1100 à 3630 µS/cm à Gbècon (Grand Popo), 1540 à 1520 µS/cm à Lokossa, 1530 à 1353 µS/cm à Ladji et 520 à 509 µS/cm à Ewécondji (Grand Popo). Leur salinité est respectivement de 4 à 1,8 g/l, 0,6 g/l, 0,6 à 0,5 g/l, 0,2 g/l et 0 g/l pendant que le TDS est de 1477 à 1001 mg/l à Lokossa, 1320 à 1000 mg/l à Ladji et 492 à 340 mg/l à Ewécondji.

La forte salinité de l'eau de puits de Gbècon est liée à la proximité de l'ouvrage de l'océan et à l'influence de la marée. Ceci n'est pas le cas des puits de Lokossa, Ladji et de Ouando, situés plutôt en pleine agglomération urbaine. Quant au forage de Ewécondji, ses eaux contiennent des dérivés de produits phytosanitaires utilisés dans le périmètre maraîcher où il est implanté. Dans l'ensemble, les eaux souterraines de la plaine littorale (Grand Popo et Cotonou) sont plus minéralisées que celles des plateaux du bassin côtier. Alassane (2002), appuyé par Efe *et al.* (2005), explique que la grande période de sécheresse qui dure de décembre à avril peut favoriser les phénomènes d'évaporation probablement à l'origine de la forte minéralisation des eaux en cette période. Cette hypothèse est vérifiée au niveau de 50 % des ouvrages hydrauliques échantillonnés (essentiellement les puits à grand diamètre).

L'hydrodynamique des nappes est un facteur déterminant de la variation de la minéralisation des eaux souterraines. En effet, en saison pluvieuse, les flux d'eau vers les réservoirs souterrains entraînent le phénomène de dilution et une diminution du taux de minéralisation des eaux dans les ouvrages les plus sensibles à la variabilité climatique. Cependant, la minéralisation reste forte par rapport à la saison sèche (janvier) dans les eaux des puits profonds (60 m et plus) de Aplahoué-Azovè, Sodohomey-Lokozoun, Adjohoun-Gbèkandji, Allada-Donou et des forages de Tori Akammahoué, de Ouèdèmè Totinga, Oké Ola (Kétou) et des sources Abaya à Adjohoun et Tovo à Zagnanado.

Les ouvrages hydrauliques qui présentent cette particularité ont été classés en deux catégories par Boukari (1998) et Alassane (2002). Il s'agit : (1) - des ouvrages situés dans des secteurs où la recharge atteint tardivement la nappe, du fait de sa très grande profondeur ou de la présence d'une couche d'argile qui empêche l'infiltration verticale ; tout ceci se traduit par l'absence de phénomènes de dilution et l'augmentation de la minéralisation ; (2) - des ouvrages dans lesquels l'augmentation de la minéralisation en période de recharge peut être due soit à la dissolution des minéraux localisés à certains endroits des formations géologiques, soit à l'arrivée d'eaux usées dans ces secteurs de la nappe. Au regard de leur localisation dans le bassin hydrogéologique côtier, les puits et forages concernés se classent plus dans la première catégorie.

Dans tous les cas, il est à remarquer que, malgré l'élévation de la minéralisation en saison sèche dans les eaux de puits, de forages et de sources, pour les ions majeurs (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-} et NO_3^{-}), leurs concentrations globales demeurent, tout comme en saison pluvieuse, en dessous des normes OMS. Toutefois, elles sont plus fortes en saison sèche par rapport à la saison pluvieuse (figure 6.3).

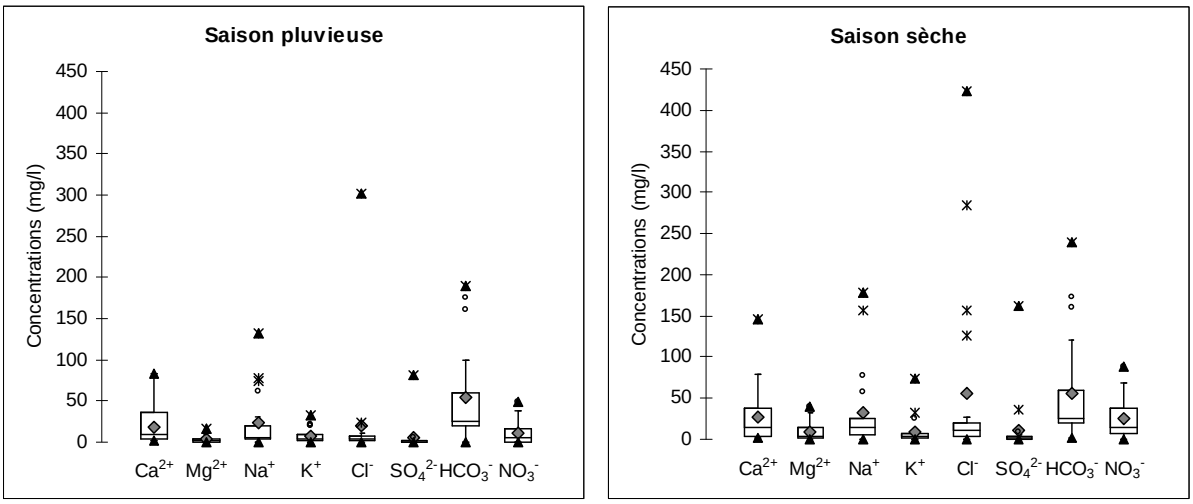


Figure 6.3 : Concentrations des ions majeurs dans les eaux souterraines du bassin côtier

Les teneurs des cations sont de 2 à 83 mg/l et 1 à 146 mg/l pour le calcium, 0,13 à 16 mg/l et 0,3 à 39 mg/l pour le magnésium, 0,6 à 132 mg/l et 0,05 à 178 mg/l pour le sodium, et 1 à 33 mg/l et 0 à 73 mg/l pour le potassium respectivement en saison pluvieuse et en saison sèche. Quant aux anions, ils présentent des teneurs de 0,02 à 81 mg/l et 163 mg/l pour les sulfates, 0 à 49 mg/l et 88 mg/l pour les nitrates, de 0 à 303 et à 424 mg/l pour les chlorures et de 0 à 190 et 2 à 240 mg/l pour les bicarbonates.

Les puits de Gbècon (Grand Popo), de Tchikomè (Lokossa), de Ouando (Porto Novo) et de Ladji (Cotonou) dont les eaux sont les plus minéralisées ont des valeurs supérieures à la concentration maximale admise pour la plupart des éléments chimiques. Ils présentent également les plus fortes teneurs en nitrates (NO_3^-) mais qui sont encore en dessous de la norme OMS, et probablement d'origine anthropique. Seule, l'eau du forage KFW/01644 FORAG 11-02 de Gbèkandji Kouhoué à Adjohoun, contenant des teneurs excessives de O_2 (5,8 mg/l), NH_4^- (1,06 mg/l) et de Br^- (1,02 mg/l) présente une certaine particularité physico-chimique en saison pluvieuse. Selon les populations, la qualité de cette eau, appréciée au goût (fade), à sa forte odeur du fer, à sa turbidité après un certain temps de prélèvement (huit bassines de 30 litres, soit environ 240 litres) et l'apparition d'un film à sa surface peu de temps après l'exhaure, est mauvaise en toute saison. Mais la variation de la turbidité, 13 NTU en saison pluvieuse et 8 NTU en saison sèche fait penser à une probable infiltration des eaux pluviales. La conséquence de cette situation est que, paradoxalement l'eau de ce forage est réservée pour la lessive, la vaisselle et la douche tandis que celle du puits sert essentiellement à la boisson et la cuisson. Ce forage ne règle donc pas le problème d'eau de la localité du fait de la qualité de la ressource.

En somme, l'abondance relative des cations et des anions en milliéquivalent par litre (meq/l) dans les eaux souterraines du bassin côtier du Bénin est représentée par la figure 6.4.

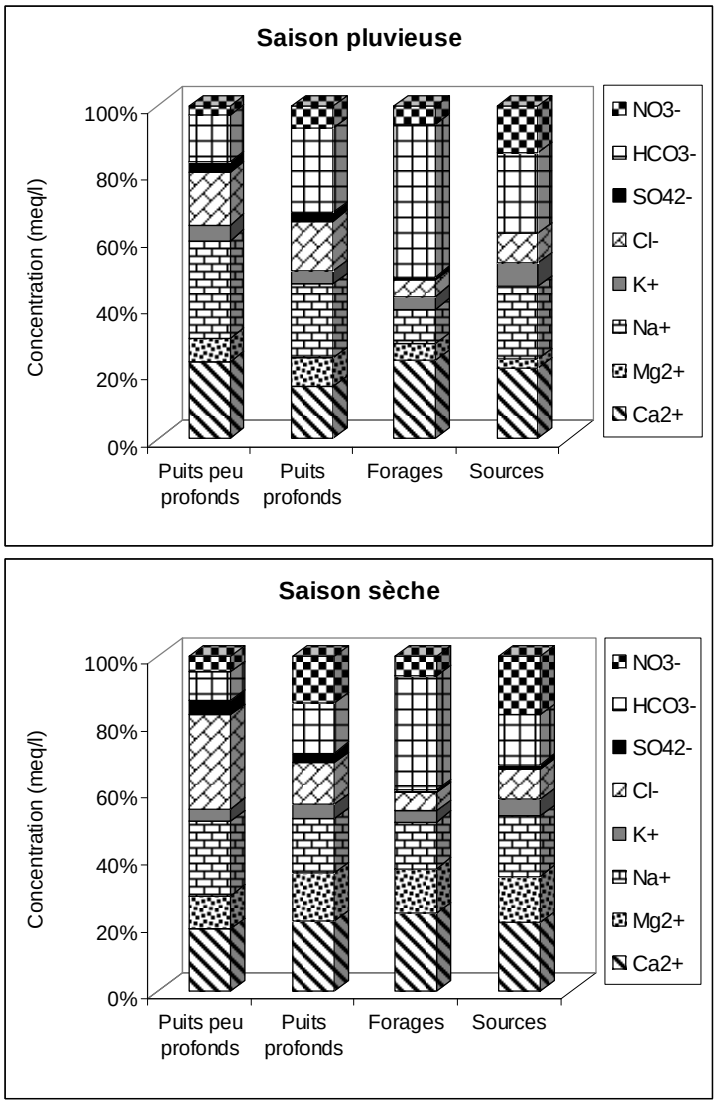


Figure 6.4 : Abondance relative des ions majeurs en saison pluvieuse et en saison sèche dans les eaux souterraines du bassin côtier du Bénin

L'analyse de la figure 6.4 montre que les eaux sont plus chargées en bicarbonates (HCO_3^-), sodium (Na^{2+}) et calcium (Ca^{2+}) au niveau des puits profonds, forages, sources en saison pluvieuse. Dans le même temps, les eaux de puits peu profonds (< 25 m) ont une dominance en Na^{2+}, Ca^{2+} et chlorure (Cl^-). Pendant la saison sèche, la charge ionique des eaux est dominée par Cl^-, Na^{2+} et Ca^{2+} dans les puits de faible profondeur, Ca^{2+}, Na^{2+}, HCO_3^- dans les eaux de puits profonds (> 25 m) et de la source. Quant aux eaux de forage, elles sont plus chargées en HCO_3^-, Ca^{2+} et Na^{2+}.

En général, les eaux analysées ont une abondance relative (valeur médiane) en cations dans l'ordre $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$ et en anions de $HCO_3^- > Cl^- > NO_3^- > SO_4^{2-}$ en saison

pluvieuse et $HCO_3^- > NO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$ en saison sèche. Ces indicateurs de qualité physico-chimique des eaux témoignent de la diversité des sources de contamination.

6.1.2. Sources des ions majeurs dominants dans les eaux

Les ions majeurs sodium, calcium, chlorure, bicarbonate et nitrate, qui dominent la charge ionique des eaux souterraines du bassin proviennent certainement de diverses sources, en rapport avec les facteurs climatiques et l'utilisation des terres.

- *Sodium (Na^+) et chlorure (Cl^-)*

La figure 6.5 montre, au regard de la distribution des points, l'influence du climat dans la variation saisonnière du sodium et des chlorures dans les eaux échantillonnées.

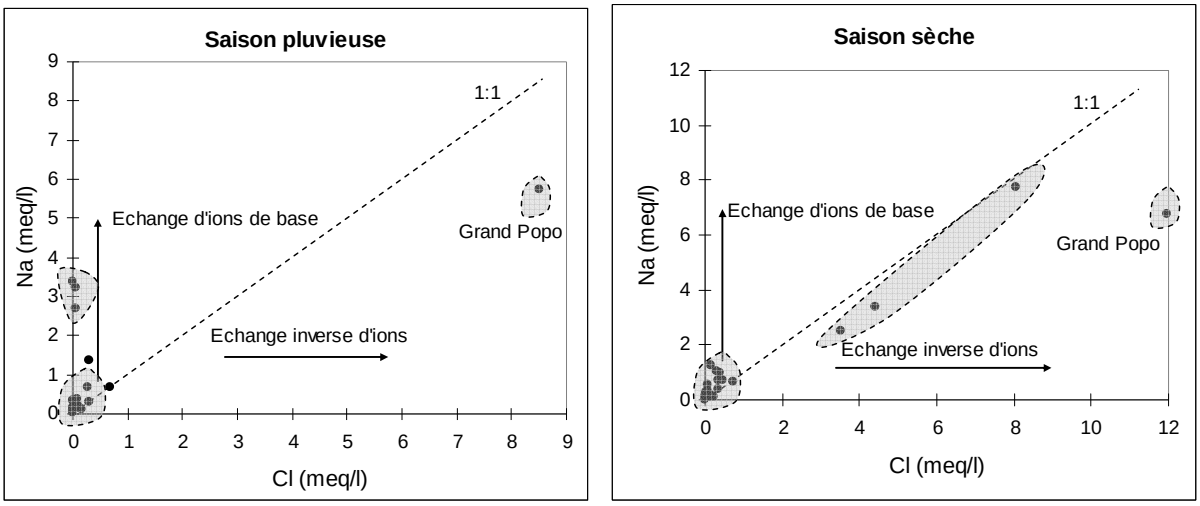


Figure 6.5 : Relation Na^+ versus Cl^- pour les eaux souterraines du bassin côtier du Bénin

Les nuages de points autour de 0 regroupent les ouvrages hydrauliques captant la nappe profonde (puits et forages) et dont l'eau est douce tant en saison pluvieuse qu'en saison sèche. La position quasi fixe de l'eau prélevée à Grand Popo presqu'à la limite eau de mer pendant les deux saisons confirme l'origine marine du sodium préalablement évoquée par Boukari (1998). Etant donné que $Cl^- > Na^+$, les chlorures proviendraient des réactions d'échanges inverses d'ions, de la dissolution du halite (Hounslow, 1995), des processus de concentration en saison sèche (Alassane, 2004). Ceci met en exergue une probable source polluante des eaux des puits de Ladji, de Lokossa et de Ouando par le Cl^-. Les autres sources de sodium pourraient être l'hydrolyse des feldspaths (Boukari, 1998), et pour les chlorures, la dissolution du halite quand le ratio $Na^+/(Na^+ + Cl^-)$ est approximativement égal à 0,5 (Hounslow, 1995 ; Kortatsi, 2007). Pour Yermani *et al.*, (2003), les teneurs en Na^+ et Cl^- participent significativement à la charge saline et sont probablement produits par la dissolution de halite.

- *Calcium (Ca^{2+})*

La figure 6.6 montre la relation Ca+Mg vs SO_4+HCO_3 pour les eaux étudiées dans le bassin côtier du Bénin. Quant à la droite 1:1, il met en évidence la dissolution du gypse, de l'anhydrite, de la calcite ou de la dolomite comme processus dominant de la composition chimique des eaux.

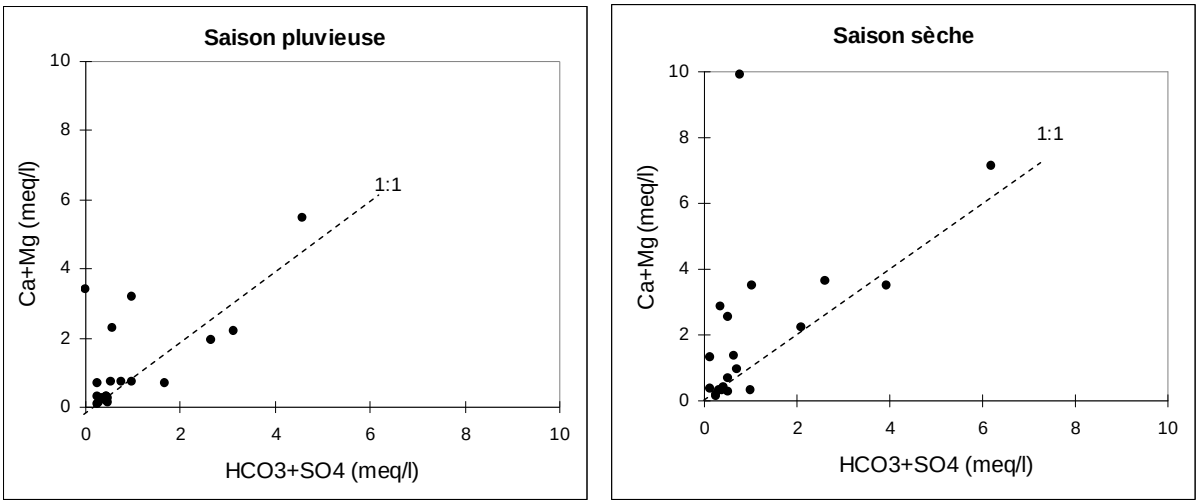


Figure 6.6 : Relation Ca^{2+}+Mg^{2+} versus HCO_3^-+SO_4^{2-} pour les eaux souterraines

La plupart des échantillons d'eau sont positionnés au-dessus de la droite de dissolution, traduisant un excès de Ca^{2+} comme l'a montré précédemment l'abondance relative des ions. Ce calcium aurait pour origine la dissolution de la calcite, des silicates, des carbonates, des feldspaths et du gypse (Boukari, 1998 ; Alassane, 2004). Au regard de la réaction de dissolution du gypse, $CaSO_4.2H_2O \rightarrow Ca^{2+} + SO_4^{2+} + 2H_2O$ (Freeze and Cherry, 1979), il devrait avoir autant d'ion calcium que d'ion sulfate. Mais le ratio Ca^{2+}-$SO_4^{2-} > 0$ (Hounslow, 1995) permet de conclure que la dissolution des silicates et carbonates, comme source de calcium prédominant dans la minéralisation des eaux étudiées, est la plus certaine.

- *Bicarbonates (HCO_3^-)*

Les bicarbonates (HCO_3^-) ont leur origine dans la dissolution des minéraux carbonatés Boukari (1998) et sont présents dans les eaux souterraines par suite d'une réduction des ions sulfates (SO_4^{2-}) (Hounslow, 1995). HCO_3^- contenus dans l'eau est normalement dérivé du CO_2 des sols et de la dissolution de la calcite et de dolomite. Etant donné l'importante présence de calcite et de dolomite dans presque tous les bassins sédimentaires, et du fait de la rapide solubilité de leurs minéraux en contact du CO_2 de l'eau souterraine, HCO_3^- est invariablement l'anion dominant dans les aires de recharge (Freeze and Cherry, 1979). La dominance de HCO_3^- dans la minéralisation des eaux à 56 % en saison pluvieuse contre 40 %

en saison sèche confirme ces sources de bicarbonates dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. De plus, 91 % des points d'eau échantillonnés en saison sèche et 95 % en saison pluvieuse montrent un ratio $HCO_3^-/SO_4^{2-} > 0$ prouvant une prédominance des bicarbonates lorsque les sulfates diminuent. Ce phénomène est le résultat d'une réduction biochimique du SO_4^{2-} (Freeze and Cherry, 1979) surtout dans le contexte du bassin sédimentaire du Bénin où les conditions bioclimatiques y sont très favorables.

- *Nitrates (NO_3^-)*

Les ratios $NO_3^-/\sum$anions, de 0,6 pour les eaux de puits de Ladji, Lokossa, Ouando, Akammahoué, Grand Popo captant la nappe phréatique contre 0,2 pour celles des puits profonds et 0,1 pour les forages, montrent leur niveau de sensibilité à la pollution par le nitrate. Freeze and Cherry (1979) expliquent que, dans la plupart des systèmes aquifères, NO_3^- prédomine dans les nappes superficielles et diminue en concentration au fur et à mesure que l'eau s'infiltre en profondeur. Les ouvrages très vulnérables à la pollution par le nitrate sont aussi mis en évidence par la figure 6.7 notamment en saison sèche où les phénomènes évaporatoires joueraient un certain rôle dans la concentration du NO_3^-.

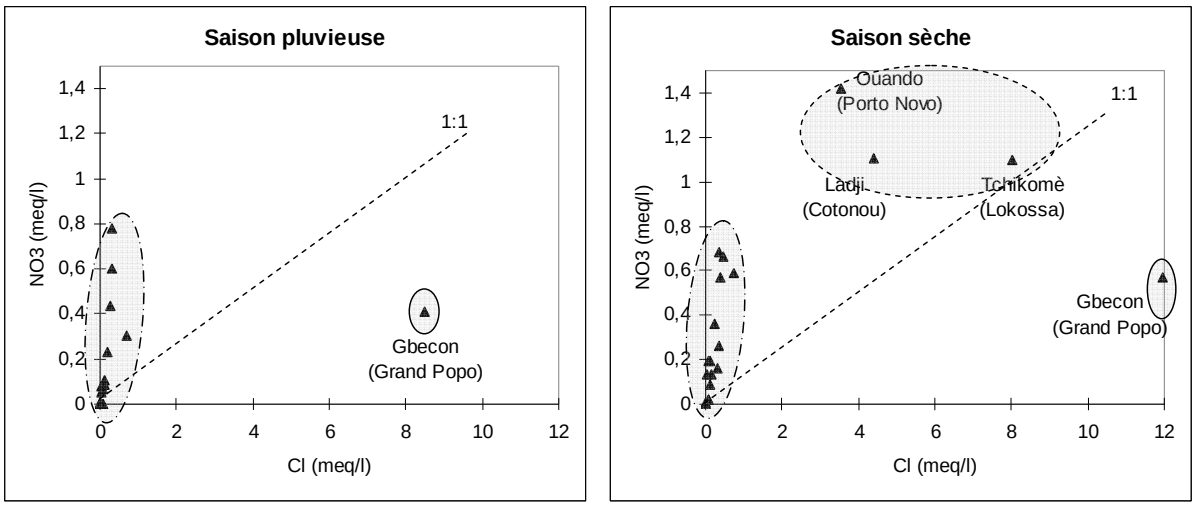


Figure 6.7 : Relation NO_3^- versus Cl^- pour les eaux souterraines du bassin côtier du Bénin

Le nitrate proviendrait de la décomposition de la matière organique en saison pluvieuse et probablement de la recharge induite (eaux usées et vannes) en saison sèche, étant donné la position de ces puits en pleine agglomération. Selon Kortatsi *et al.* (2007), NO_3^-, Cl^- et SO_4^{2-}, ensembles reflèteraient une pollution d'origine anthropique liée aux engrais inorganiques, aux latrines, aux déjections animales. Cela est appuyé par Iqbal *et al.* (1997), Katz *et al.* (1999), Oren *et al.* (2004) et Choi *et al.* (2007) qui lient la source du NO_3^- à une combinaison de fertilisants inorganiques et de déchets animaux/humains.

En vue de mettre en évidence les particularités de variation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines au niveau des ouvrages hydrauliques du bassin sédimentaire côtier, une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été appliquée aux données chimiques recueillies.

6.1.3. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'ACP des éléments physico-chimiques (figure 6.8) illustre mieux les particularités des eaux des ouvrages échantillonnés.

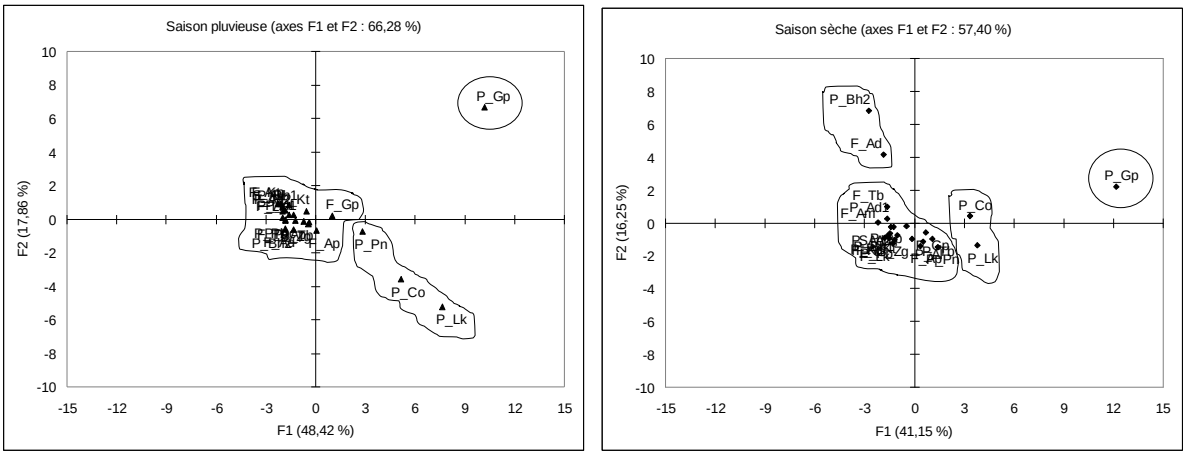


Figure 6.8 : Analyse en Composantes Principales (ACP) des ouvrages hydrauliques suivant les caractéristiques physico-chimiques des eaux

Les ACP montrent trois à quatre groupes d'ouvrages hydrauliques suivant la minéralisation de leurs eaux et sa variation saisonnière, confirmant dans une certaine mesure son origine telle qu'expliquée dans l'analyse des diagrammes binaires. Il s'agit : (1) des puits de Gbècon à Grand Popo (P_Gp), (2) ceux de Ouando à Porto Novo (P_Pn), de Ladji à Cotonou (P_Co) et de Tchikomè à Lokossa (P_Lk), et (3) le reste des points d'eau en saison pluvieuse. En saison sèche, ce sont : (1) le puits de Lokozoun à Bohicon (P_Bh2) et le forage Kouhoué à Adjohoun (F_Ad), (2) les puits de Ladji (P_Co) et de Tchikomé (P_Lk), (3) le puits de Gbècon (P_Gp) et, (4) le reste des ouvrages qui présentent une singularité en leur sein. Cette catégorisation montre que la variation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines est fonction de plusieurs facteurs dont la variabilité climatique, la profondeur de la nappe, les composantes environnementales, l'utilisation des terres, etc.

Pour mieux cerner cette variation de la qualité des eaux étudiées, les données d'analyse chimique ont été reportées sur le diagramme de Piper (figure 6.9) en vue de caractériser les faciès géochimiques dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin.

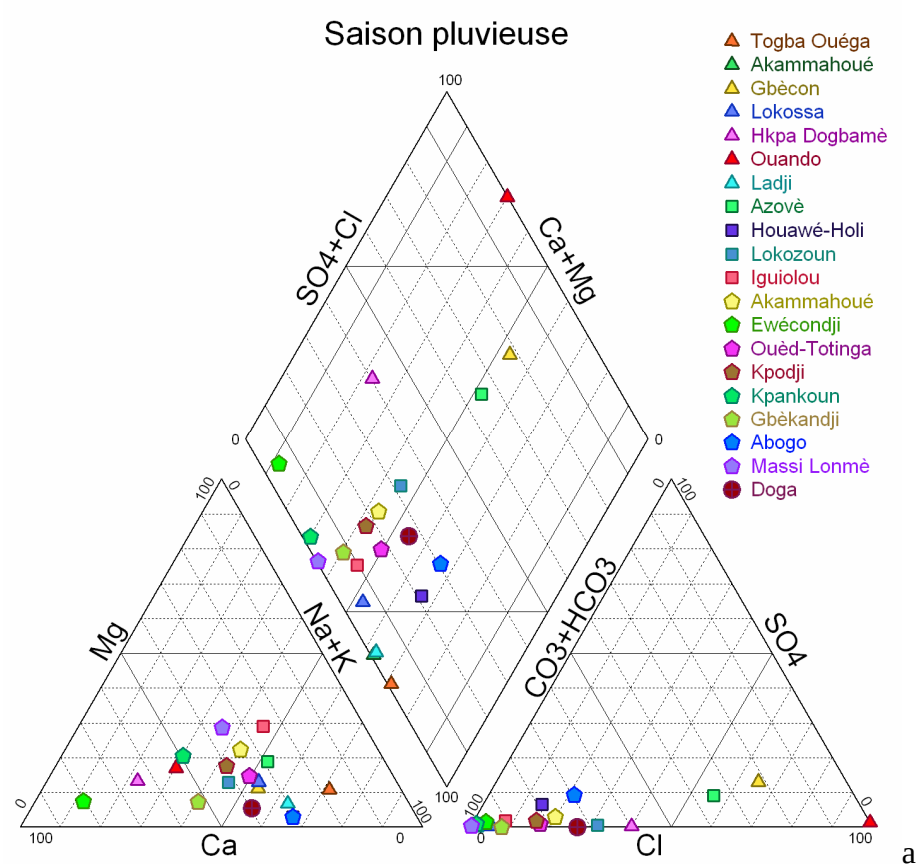
6.1.4. Caractéristiques des faciès géochimiques des eaux

En prélude au report des données sur le diagramme de Piper, leur balance ionique a été appréciée par rapport aux limites acceptables de 5 % à 10 %. Cette appréciation montre que 70 % des échantillons présentent une analyse fiable en saison pluvieuse contre seulement 25 % en saison sèche. Cela peut présager d'une variation saisonnière de composition chimique des eaux, liée certainement à la dynamique des facteurs climatiques, au cas où ce résultat n'est pas le fait d'erreur d'analyse.

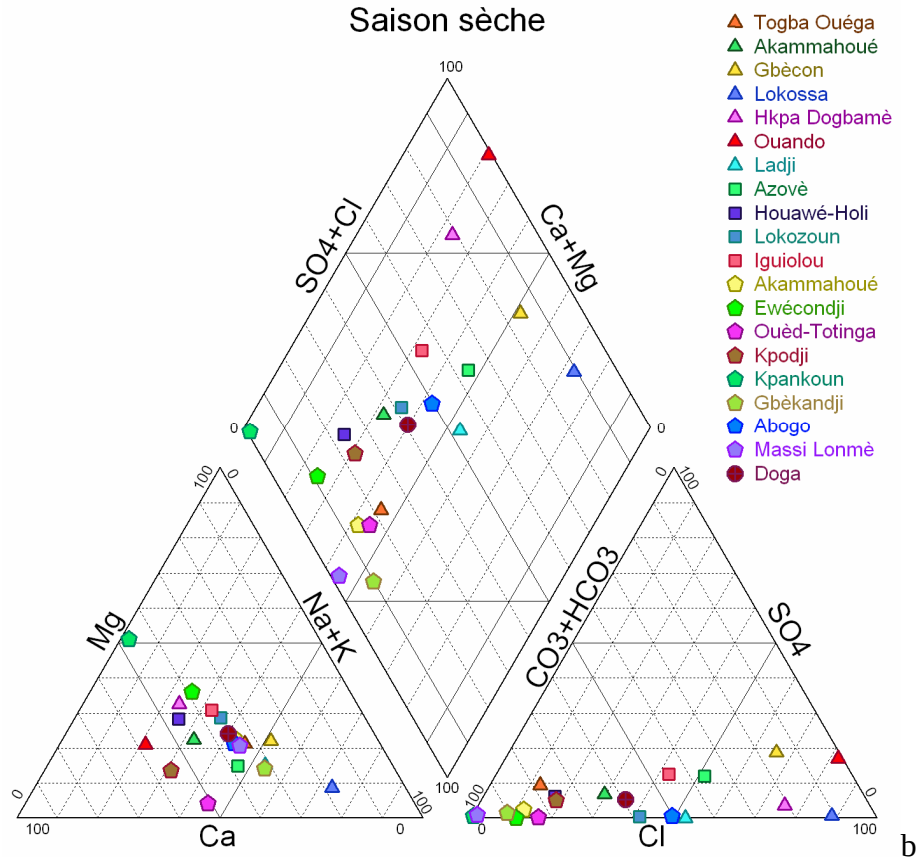
L'analyse de la figure 6.9 et des données du tableau 6.II fait ressortir les faciès géochimiques dominants selon les saisons. Ainsi, la saison pluvieuse est marquée par la prédominance de plusieurs faciès, à savoir les faciès bicarbonaté calcique, bicarbonaté calcique et magnésien, carbonaté sodique et potassique et carbonaté sodique, avec respectivement une proportion de 25 %, 20 %, 20 % et 15 % des eaux souterraines prélevées dans le bassin côtier. En saison sèche, les eaux sont majoritairement de type bicarbonaté calcique et magnésien (35 %), chloruré et sulfaté calcique et magnésien (30 %) et chloruré sodique et potassique (15 %). Selon Géohydraulique (1985a), les eaux du Continental terminal ont un faciès chimique du type bicarbonaté calcique à sodique vers le sud au contact des eaux salées. Les nappes du Quaternaire dans les cordons littoraux présentent majoritairement un faciès chloruré sodique (Sagbo, 2000), ce qui n'est pas surprenant pour des eaux d'une nappe côtière (Boukari et Alassane, 2007). L'extension des aires à faciès chloruré sodique confirme la tendance à l'intrusion saline (Boukari, 2002) comme le montre la position du puits de Grand Popo dans le diagramme de Piper en saisons pluvieuse et sèche et de celui de Ladji en saison sèche.

De la saison pluvieuse à celle sèche, s'observe une dynamique de faciès géochimique au niveau de 55 % des eaux (de puits essentiellement) alors qu'il reste inchangé pour 45 % des points d'eau comprenant en majorité des forages. Les changements de faciès sont observés au niveau des eaux de puits de Tchikomè, Ladji et Akammahoué ($\leq$ 3 m), de Ouéga Tokpa (19 m) et d'Iguiolou, Azovè, Houawé ($\geq$ 60 m). Les forages de Kouhoué-Gbèkandji, d'Abogo et d'Ewécondji et la source Tovo de Doga à Zagnanado connaissent aussi une variation de faciès.

Les eaux des puits de Ladji, Ouéga Tokpa et Akammahoué, de faible profondeur, sont, par exemple, passées du type carbonaté sodique (Na-HCO_3) en saison pluvieuse aux types chloruré sodique (Na-Cl-HCO_3) puis bicarbonaté calcique et magnésien en saison sèche (Ca-Mg-HCO_3) en saison sèche.



a



b

Figure 6.9 : Faciès géochimiques des eaux souterraines en saison pluvieuse (a) et saison sèche (b) dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin

Tableau 6.II : Faciès géochimiques saisonniers des eaux souterraines dans le bassin côtier du Bénin

Faciès géochimiques	Saison pluvieuse	Saison sèche
Chloruré calcique et magnésien ***(Cl-Ca-Mg)***	Puits de Houèkpa (Adjohoun)	- Puits de Houèkpa (Adjohoun) - Puits de Iguiolou (Kétou) - Puits de Lokozoun (Bohicon) - Puits de Azovè (Aplahoué) - Forage de Abogo (Apro-Missérété) - Source Tovo Doga (Zagnanado)
Bicarbonaté calcique et magnésien ***(Ca-Mg-HCO_3)***	- Puits de Houawé Holi (Bohicon) - Forage de Akammahoué (Tori Bossito) - Forage de Kpodji (Aplahoué) - Forage de Totinga Ouèdèmè (Lokossa)	- Puits de Akammahoué (Tori Bossito) - Puits de Ouéga Tokpa (Abomey-Calavi) - Puits de Houawé Holi (Bohicon) - Forage de Akammahoué (Tori Bossito) - Forage de Kpodji (Aplahoué) - Forage de Totinga Ouèdèmè (Lokossa) - Forage de Ewécondji (Grand Popo)
Bicarbonaté calcique ***(HCO_3-CO_3)***	- Puits de Iguiolou (Kétou) - Forage de Oké Ola (Kétou) - Forage de Massi Lonmè (Toffo) - Forage de Gbèkandji (Adjohoun) - Forage de Ewécondji (Grand Popo)	- Forage de Oké Ola (Kétou) - Forage de Massi Lonmè (Toffo)
Chloruré sodique ***(Na-Cl-HCO_3)***	- Puits de Gbècon (Grand Popo) - Puits de Azovè (Aplahoué)	- Puits de Gbècon (Grand Popo) - Puits de Ladji (Cotonou) - Puits de Tchikomè (Lokossa)
Carbonaté sodique et potassique ***(Na-K-HCO_3)***	- Puits de Lokozoun (Bohicon) - Puits de Tchikomè (Lokossa) - Forage de Abogo (Apro-Missérété) - Source Tovo Doga (Zagnanado)	Forage de Gbèkandji (Adjohoun)
Carbonaté sodique ***(Na-HCO_3)***	- Puits de Ouéga Tokpa (Abomey-Calavi) - Puits de Ladji (Cotonou) - Puits de Akammahoué (Tori Bossito)	
Hyper chloruré calcique ***(Cl-CO_3)***	Puits de Ouando (Porto Novo)	Puits de Ouando (Porto Novo)

Source : Totin, octobre 2009 et janvier 2010

Les eaux des puits profonds d'Iguiolou, Azovè, Lokozoun respectivement de type bicarbonaté calcique, chloruré sodique et potassique, et carbonaté sodique et potassique en saison de pluie sont passées aux faciès chloruré calcique et magnésien en saison sèche. Au niveau des forages de Gbèkandji, Abogo et de la source Tovo, l'eau initialement de faciès respectifs bicarbonaté calcique et carbonaté sodique et potassique, est devenue carbonatée sodique et chlorurée calcique et magnésien en saison sèche. Géohydraulique (1985a) explique que les eaux du Paléocène et du Crétacé sont bicarbonatées calciques, parfois magnésiennes. Au regard des catégories hydrochimiques du tableau 6.II, les forages, souvent captées dans ces aquifères confirment ce faciès bicarbonaté calcique ou magnésien. Pour Lallahem (2002), la composition chimique de l'eau qui s'écoule aux exutoires des aquifères, présente des variations au cours d'un cycle hydrologique. Ces variations sont attribuées par Mudry (1987) à la succession des événements hydrologiques (qui modifient la quantité et la qualité de l'eau contenue dans l'aquifère), auxquels peuvent s'ajouter d'autres processus internes au système (telles que les interactions physico-chimiques entre phases).

La modification des faciès hydrochimiques, de la saison pluvieuse à la saison sèche, illustre l'effet de la variabilité climatique, non seulement sur la recharge des nappes, mais aussi sur la concentration des éléments physico-chimiques. Pour savoir si ces effets concernent également la composition bactériologique des eaux étudiées, celles-ci ont fait l'objet d'une analyse minutieuse.

6.2. Contamination bactériologique des eaux souterraines : indicateurs et variation

Les nombres de germes bactériens présents dans les eaux de puits, de forages et de sources ont largement dépassé les normes OMS (WHO, 2008) de 0 UFC/100 ml tant en saison pluvieuse qu'en saison sèche.

6.2.1. Composition bactérienne des eaux de puits

Les puits sont les plus affectés par la contamination bactériologique (tableau 6.III). Les germes banals et les coliformes totaux sont innombrables dans la totalité des eaux. Elles présentent parfois des champignons, notamment dans les puits de faible profondeur comme à Ouéga Tokpa, Tori Akammahoué, Gbècon, Lokossa, Ouando et Ladji surtout en saison pluvieuse. Le nombre d'*Escherichia coli* excède aussi les normes de l'OMS et sont de 8 à 412 UFC/100 ml et 62 à 252 UFC/100 ml, voire innombrables, respectivement en saison pluvieuse et en saison sèche. Les streptocoques fécaux sont de 5 à 360 UFC/100 ml en saison pluvieuse et 0 à 160 UFC/100 ml en saison sèche. Les *Escherichia coli* ont augmenté de 64 % et les streptocoques fécaux ont diminué de 82 % dans les eaux des puits en saison sèche.

La position géographique des puits, en pleine agglomération ou sur les versants, en bas de pente, à proximité des bas-fonds, des décharges sauvages, des toilettes ou des latrines et leur profondeur, expliquent la densité de la charge bactérienne. Tel est le cas des puits de Tchikomè, de Houèkpa Dogbamè et de Ladji, dont l'architecture de la paroi interne, busée ou latéritique, souvent dégradées et la nature du sol accroissent les risques de contamination des eaux (photo 6.1).

Tableau 6.III : Caractéristiques bactériologiques des eaux de quelques puits en saisons pluvieuse et sèche

Commune	**Unité**	**VMA**	**Période**	Ab-Calavi	Tori Bossito	Grd Popo	Lokossa	Aplahoué	Bohicon	Bohicon	Kétou	Adjohoun	Porto Novo	Cotonou
Unité morphologique				Plateau d'Allada	Plateau d'Allada	Plaine côtière	Dépression de (Tchi)	Plateau d'Aplahoué	Plateau d'Abomey	Plateau d'Abomey	Plateau de Kétou	Plateau de Sakété	Plateau de Sakété	Plaine côtière
Lieu de prélèvement				Ouéga Tokpa	Tori Akamahoué	Gbècon	Lokossa Tchikomè	Azovè Atchohoué	Houawé-Holi	Sodohomey Lokozoun	Kétou Iguiolou	Houèkpa Dogbamè	Ouando	Ladji
Nature de l'échantillon				Eau de puits traditionnel à margelle	Eau de puits traditionnel à buses	Eau de puits traditionnel à margelle	Eau de puits traditionnel à buses	Eau de puits traditionnel semi busé	Eau de puits traditionnel semi busé	Eau de puits traditionnel semi busé	Eau de puits traditionnel à motopompe	Eau de puits traditionnel	Eau de puits traditionnel à margelle	Eau de puits traditionnel à margelle
Date et heure de prélèvement			Saison pluvieuse	24/10/2009 12h 15'	24/10/2009 15h 06'	24/10/2009 18h 45'	25/10/2009 09h 50'	25/10/2009 18h 45'	26/10/2009 10h 30’	26/10/2009 13h 28’	26/10/2009 18h 33’	27/10/2009 13h 00’	27/10/2009 16h 15’	27/10/2009 18h 50’
			Saison sèche	08/01/2010 10h 05’	08/01/2010 11 h 30’	08/01/2010 16 h 46’	09/01/2010 09 h 00’	09/01/2010 14 h 25’	09/01/2010 16 h 30’	10/01/2010 10 h 43’	10/01/2010 15 h 53’	11/01/2010 11 h 08’	11/01/2010 13 h 23’	11/01/2010 15 h 25’
Dénombrements des germes banals en 48h à 37°C	UFC/ml	50	Saison pluvieuse	In++ +01 chp	In++ +03 chp	In++ +01 chp	In++ +01 chp	In++	In++	In++	In++	In++	In++ +01 chp	In++
			Saison sèche	*In++*	*In++*	*In++*	*In++*	*In++*	*In++*	*In++*	*In++*	*In++*	*In++*	*In++*
Recherche présomptive des coliformes	(+) ou (-)	(-)	Saison pluvieuse	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
			Saison sèche	*(+)*	*(+)*	*(+)*	*(+)*	*(+)*	*(+)*	*(+)*	*(+)*	*(+)*	*(+)*	*(+)*
Dénombrement des coliformes totaux après 48h à 37°C	UFC / 100 ml	0	Saison pluvieuse	In++	In++	In++	In++	In++	In++	In++	In++	In++	160	In++
			Saison sèche	*In++*	*In++*	*In++*	*In++*	*In++*	*In++*	*In++*	*In++*	*In++*	*In++*	*In++*
Dénombrement des *Escherichia coli* après 48h à 44°C	UFC / 100 ml	0	Saison pluvieuse	8	36	97	263	311	147	In++	145	412	75	328
			Saison sèche	*In++*	*In++*	*In++*	*In++*	*142*	*62*	*86*	*In++*	*252*	*186*	*In++*
Dénombrement des streptocoques fécaux après 48h à 37°C	UFC / 100 ml	0	Saison pluvieuse	5	12	70	180	170	170	In++	84	360	40	192
			Saison sèche	*80*	*32*	*2*	*90*	*44*	*102*	*16*	*In++*	*160*	*156*	*86*
Dénombrement des Clostridium sulfito-réducteurs après 48h à 46°C	UFC / 20ml	0	Saison pluvieuse	2	In++	22	22	11	5	In++	9	0	3	In++
			Saison sèche	*In++*	*20*	*In++*	*72*	*0*	*16*	*20*	*10*	*4*	*In++*	*In++*
Conclusion	-	**Eau saine**	Saison pluvieuse	**Eau polluée**	**Eau très polluée**	**Eau polluée**	**Eau polluée**	**Eau polluée**	**Eau polluée**	**Eau très polluée**	**Eau polluée**	**Eau polluée**	**Eau polluée**	**Eau polluée**
Conclusion			*Saison sèche*	***Eau très Polluée***	***Eau Polluée***	***Eau Polluée***	***Eau Polluée***	***Eau Polluée***	***Eau Polluée***	***Eau Polluée***	***Eau très Polluée***	***Eau Polluée***	***Eau très Polluée***	***Eau très Polluée***

VMA: Valeur Maximale admise ; NG : Niveau Guide ; In++ : innombrable ; (-) : Négative, (+) : Positive ; chp = Champignon

Source : *Totin, octobre 2009 et janvier 2010*

Les *Escherichia coli* dénombrés sont de 263 UFC/100 ml à innombrables dans les eaux de puits à Tchikomè, 412 et 252 UFC/100 ml à Houèkpa Dogbamè et 328 UFC/100 ml à innombrables à Ladji à Cotonou dans la plaine côtière sableuse.



a b

Clichés Totin V.S.H., octobre 2009

Photo 6.1. Architecture des puits de faible profondeur à Tchikomè, Lokossa (a) et Houèkpa Dogbamè à Adjohoun (b)

Ils sont aussi innombrables dans les eaux de puits de faible profondeur de Ouéga Tokpa, de Tori Akammahoué et de Gbècon en saison sèche contre des valeurs respectives de 8 UFC/100 ml, 36 UFC/100 ml et 97 UFC/100 ml en saison pluvieuse. La charge de streptocoques fécaux est respectivement de 180 et 90 UFC/100 ml, 360 et 160 UFC/100 ml et 192 et 86 UFC/100 ml au niveau de ces mêmes points d'eau en saison pluvieuse et en saison sèche. Ces résultats montrent la sensibilité des eaux à la pollution microbienne en saison pluvieuse mais surtout en saison sèche au regard du dénombrement des *Escherichia coli*. Le tarissement des puits (diminution du volume d'eau), l'augmentation de la température et des éléments chimiques puis les mauvaises conditions d'hygiène autour des points d'eau expliqueraient la forte concentration bactériologique en saison sèche. Selon Coulibaly (2005), la diminution du nombre de coliformes pendant l'hivernage dans les puits est due à une plus forte dilution causée par la recharge de la nappe phréatique comme dans le cas des puits de faible profondeur dans le secteur d'étude.

Par ailleurs, les puits profonds ($\geq$ 50 m) présentent aussi de fortes concentrations de germes fécaux comme à Azovè, Houawé Holi et Lokozoun avec respectivement 311 et 142 UFC/100 ml, 147 et 62 UFC/100 ml, innombrables à 86 UFC/100 ml pour *Escherichia coli* ; 170 et 44 UFC/100 ml, 170 et 102 UFC/100 ml et innombrables à 16 UFC/100 ml pour les streptocoques fécaux en saison pluvieuse et en saison sèche.

Les eaux de puits profonds à l'exception de celui d'Iguiolou (Kétou) montrent une réduction de colonies *Escherichia coli* et des streptocoques fécaux en saison sèche. Cette variation de charge polluante illustre l'influence du climat sur la qualité des eaux étudiées. La température et la pluie (l'humidité) interviennent directement dans le processus bactériologique, de développement des agents pathogènes qui, par infiltration en saison pluvieuse, affectent moins les eaux souterraines du bassin sédimentaire à cause du substrat sableux ou sablo-argileux. Mais, l'insalubrité autour des puits et l'état hygiénique des moyens d'exhaure (puisette) et de transport (récipients, bidon), évoqués par Odoulami (2009), et illustrés par la photo 6.2., favorisent certainement la forte pollution bactériologique.



a b

Clichés Totin V.S.H., janvier 2010

Photo 6.2. Insalubrité autour des puits et état des moyens d'exhaure et de transport d'eau à Lokozoun à Bohicon (a) et à Tori Akammahoué (b)

L'eau des puits profonds est, en réalité contaminée par le biais des moyens d'exhaure notamment les puisettes qui, la plupart du temps sont laissées ou traînées dans la boue. Agbaire et Oyibo (2009) soulignent, à cet effet que la qualité des ressources en eau dépend de la gestion des points d'eau. Cette gestion est caractérisée au niveau de certains ouvrages hydrauliques du bassin côtier par une faible prise de conscience de la dépendance de la santé humaine de celle environnementale. Certains forages seraient même contaminés du fait des mauvaises pratiques hygiéniques des usagers.

6.2.2. Qualité bactériologique des eaux de forages

Les forages sont aussi affectés par la présence de germes bactériologiques tels que les coliformes totaux et *Escherichia coli* dans respectivement 75 % et 88 % des eaux analysées (tableau 6.IV). Les streptocoques fécaux sont détectés et leur nombre varie dans les eaux des forages de Kpodji à Aplahoué (3 à 26 UFC/100 ml) et de Ewécondji à Grand Popo (62 UFC/100 ml à innombrables).

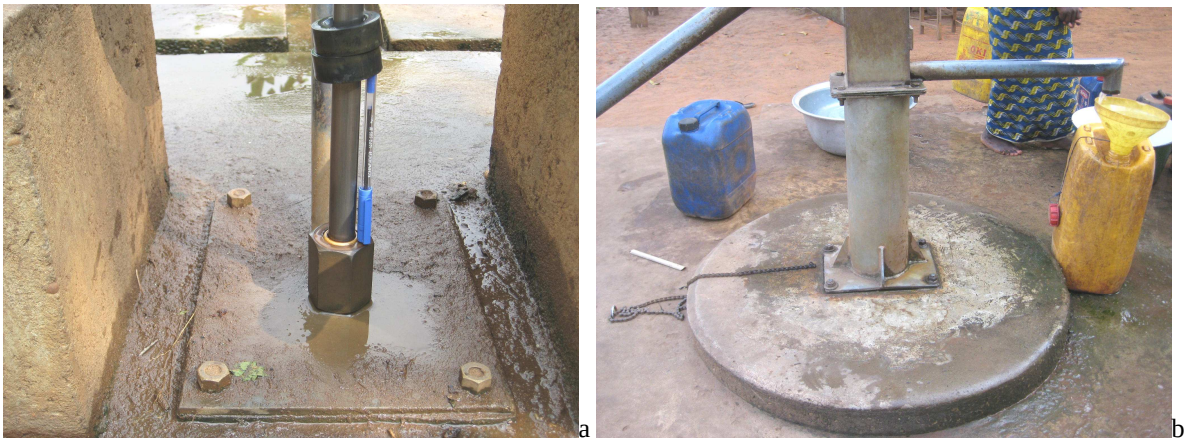
Tableau 6.IV : Caractéristiques bactériologiques de quelques forages en saisons pluvieuse et sèche

Commune	**Unité**	**NG**	**VMA**	**Période**	Tori Bossito	Grand Popo	Lokossa	Aplahoué	Kétou	Adjohoun	Missérété	Toffo
Unité morphologique					Plateau d'Allada	Plaine côtière	Dépression de Tchi	Plateau d'Aplahoué	Plateau de Kétou	Plateau de Sakété	Plateau de Sakété	Dépression de la Lama
Lieu de prélèvement					Tori Akammahoué	Ewécondji	Ouèdèmè Adja Totinga	Kpodji	Kpankoun Oké Ola	Gbèkandji Kouhoué	Abogo	Massi Lonmè
Nature de l'échantillon					Eau de forage pédestre	Eau de forage à motopompe	Eau de forage artésien	Eau de forage pédestre	Eau de forage manuel	Eau de forage pédestre	Eau de forage manuel	Eau de forage manuel
Date et heure de prélèvement				Saison pluvieuse	24/10/2009 à 14h 33'	24/10/2009 à 18h 05'	25/10/2009 à 12h 35'	25/10/2009 à 17'h 25'	26/10/2009 à 17h 42'	27/10/2009 à 12h 20'	27/10/2009 à 15h 26'	31/10/2009 à 17h 15'
				Saison sèche	*08/01/2010 11 h 10'*	*08/01/2010 16 h 09'*	*09/01/2010 10 h 50'*	*09/01/2010 13 h 30'*	*10/01/2010 15 h 20'*	*11/01/2010 10 h 14'*	*11/01/2010 12 h 45'*	*11/01/2010 18 h 10'*
Dénombrements des germes banals en 48h à 37°C	UFC/ml	0	50	Saison pluvieuse	13	In++	02 + 01chp	78	17	02 + 01chp	12	In++
				Saison sèche	*In++*	*In++*	*48*	*In++*	*15*	*10*	*0*	*11*
Recherche présomptive des coliformes	(+) ou (-)	(-)	(-)	Saison pluvieuse	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)
				Saison sèche	*(+)*	*(+)*	*(+)*	*(+)*	*(+)*	*(-)*	*(-)*	*(+)*
Dénombrement des coliformes totaux après 48h à 37°C	UFC/100 ml	0	0	Saison pluvieuse	0	180	0	10	0	0	0	60
				Saison sèche	*17*	*In++*	*16*	*42*	*10*	*2*	*0*	*4*
Dénombrement des *Escherichia coli* après 48h à 44°C	UFC/100 ml	0	0	Saison pluvieuse	0	103	0	0	0	0	0	0
				Saison sèche	*16*	*In++*	*4*	*20*	*6*	*2*	*0*	*2*
Dénombrement des streptocoques fécaux après 48h à 37°C	UFC/100 ml	0	0	Saison pluvieuse	0	62	1	3	0	0	0	0
				Saison sèche	*0*	*In++*	*0*	*26*	*0*	*0*	*0*	*0*
Dénombrement des Clostridium sulfito-réducteurs après 48h à 46°C	UFC/ 20 ml	0	0	Saison pluvieuse	0	0	0	1	0	0	0	0
				Saison sèche	*0*	*0*	*0*	*4*	*2*	*0*	*0*	*0*
		Eau saine	**Eau saine**	Saison pluvieuse	**Eau polluée**	**Eau polluée**	**Eau suspectée**	**Eau saine**	**Eau saine**	**Eau saine**	**Eau saine**	**Eau saine**
				Saison sèche	***Eau Polluée***	***Eau très Polluée***	***Eau polluée***	***Eau Polluée***	***Eau contaminée***	***Eau suspecte***	***Eau saine***	***Eau contaminée***

VMA: Valeur Maximale admise ; NG : Niveau Guide ; In++ : innombrable ; (-) : Négative, (+) : Positive ; chp = Champignon

***Source : Totin**, octobre 2009 et janvier 2010*

Le nombre de germes bactériens varie surtout au niveau des forages pédestres dont le système de tête de pompe (photo 6.3) serait un facteur important d'infiltration des eaux souillées, contaminées et d'accroissement de la charge polluante.



a b

Clichés Totin V.S.H., janvier 2010

Photo 6.3. Têtes de pompe de forage pédestre à Kouhoué Gbèkandji (a) et de forage manuel à Massi Lonmè (b)

Ces deux têtes de pompe de forage montrent clairement dans quelle mesure, le type d'ouvrage pourrait contribuer à la contamination des eaux souterraines surtout en saison sèche, période de forte fréquentation. Les coliformes totaux, inexistants en saison pluvieuse apparaissent en saison sèche dans l'ordre de 17 UFC/100 ml, 2 UFC/100 ml respectivement dans les eaux de forage de Tori Akammahoué et de Kouhoué Gbèkandji à Adjohoun. Ils sont passés de 10 à 42 UFC/100 ml au niveau de celle du forage de Kpodji Aplahoué.

Les *Escherichia coli* ont augmenté de 0 à 16 UFC/100 ml à Tori Akammahoué, 0 à 20 UFC/100 ml à Kpodji et 0 à 2 UFC/100 ml à Kouhoué Gbèkandji. En outre, ils sont de 2 à 4 UFC/100 ml dans l'eau de forage manuel. L'absence de germes bactériologiques en saison pluvieuse prétend que l'eau des forages à la source n'est pas contaminée et qu'elle l'est à travers l'insalubrité qui caractérise certains d'entre eux en saison sèche.

La singularité du forage de Ewécondji dont l'eau est la plus contaminée et la charge bactériologique très élevée (innombrable) serait en réalité liée au fait que l'ouvrage capte une nappe à 12 m, dans un substratum sableux et sur un site maraîcher. Selon les maraîchers, les planches de légumes reçoivent régulièrement des fertilisants organiques (fientes de volailles et de bétail), mais la dernière application datait de six mois avant le prélèvement d'échantillon d'eau analysée en saison sèche. En période de recharge, les polluants organiques (germes pathogènes) sont transférés vers la nappe à travers l'infiltration. Par contre, en saison sèche, l'évaporation accroît leur concentration dans l'eau. Selon Khan et Khan (1985) et Narayani

(1990) cette forte présence de germes en saison sèche se justifie par la hausse de la température qui accroît l'activité microbienne causant ainsi une production excessive de CO_2. La faible sensibilité des eaux de forage à la pollution bactériologique s'explique par la profondeur des nappes captées, les épaisses couches pédologiques et géologiques traversées (filtres anti-polluants) et le système de protection par tubage du puits et de dallage en béton à la surface.

6.2.3. Qualité bactériologique de l'eau de source

L'analyse de l'eau de la source Tovo de Doga à Zagnanado montre une pollution bactériologique plus élevée (tableau 6.V) par rapport à celle des forages.

Tableau 6.V : Composition bactériologique d'une eau de source en saisons pluvieuse et sèche

	Unité	**NG**	**VMA**	**Saison pluvieuse**	**Saison sèche**
Département / commune				**Zou** - Zagnanado	
Unité morphologique				Plateau de Zagnanado	
Lieu de prélèvement				Doga	
Nature de l'échantillon				Eau de source naturelle Tovo	
Date et heure de prélèvement				26/10/2009 15h 25'	*10/01/2010 13 h 25'*
Dénombrements des germes banals en 48 h à 37 °C	UFC/ml	0	50	107 + 01chp	*210*
Recherche présomptive des coliformes	(+) ou (-)	(-)	(-)	(+)	*(+)*
Dénombrement des coliformes totaux après 48 h à 37 °C	UFC/100 ml	0	0	28	*74*
Dénombrement des Escherichia coli après 48 h à 44 °C	UFC/100 ml	0	0	9	*24*
Dénombrement des streptocoques fécaux après 48 h à 37 °C	UFC/100 ml	0	0	2	*26*
Dénombrement des Clostridium sulfito-réducteurs après 48 h à 46 °C	UFC/20 ml	0	0	0	*16*
Conclusion	-	Eau saine		**Eau polluée**	***Eau polluée***

VMA: Valeur Maximale admise ; NG : Niveau Guide ; In++ : innombrable ; (-) : Négative, (+) : Positive ; chp = Champignon

Source : *Totin, octobre 2009 et janvier 2010*

L'eau de la source Tovo contient des germes trois fois plus élevés en saison sèche pour les coliformes totaux et *Escherichia coli* qu'en saison pluvieuse. Le nombre de streptocoques fécaux a varié de 2 à 26 UFC/100 ml entre octobre et janvier. Ce phénomène s'explique par le fait que cette eau proviendrait d'une nappe superficielle contaminée et dont l'évaporation en saison sèche met en évidence la concentration des germes bactériens diluée en saison pluvieuse. Le péril fécal affecte les eaux par les excréments, soit directement en contact avec la nappe phréatique par l'intermédiaire des latrines inadéquates, soit transitant indirectement par écoulement souterrain latéral ou par infiltration verticale.

En général, des études récentes (Baba-Moussa, 1994 ; Alassane, 2004 ; Coulibaly, 2005 ; McCarty, 2008 ; Totin *et al.*, 2008) ont montré que l'extension de la pollution, à partir d'un point de contamination (latrines, décharge sauvage, puits abandonnés et remblayés par des ordures, etc.) jusqu'aux eaux souterraines, dépend de la vitesse et la direction de circulation des eaux. Rodier (1975) explique que la pollution des eaux est principalement due à la nature des différentes roches traversées, aux matières organiques et aux substances humiques qui ont pour origine la décomposition des végétaux, des ordures ménagères et le déversement des eaux polluées à des endroits inappropriés. Pour Chippaux *et al.* (2002), la pollution générale des nappes souterraines est, à des degrés divers, fonction de la localisation et de la profondeur des aquifères. De plus, le développement de l'agriculture avec une utilisation excessive des pesticides, et l'essor de l'industrie agroalimentaire sont les grands risques d'une pollution agressive des eaux souterraines. La figure 6.10 montre comment cette charge pourrait s'étendre dans l'aquifère à partir du point d'impact de la pollution bactériologique ou chimique.

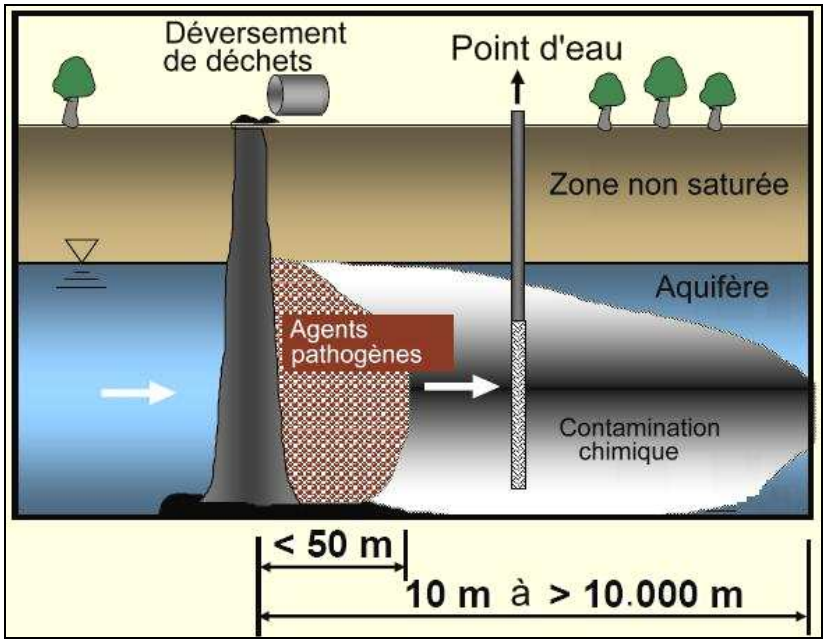


Figure 6.10 : Distance de diffusion d'une charge polluante bactériologique ou chimique dans un aquifère (*McCarty, 2005*)

La vitesse de progression de la charge polluante dépend elle-même de la structure physique du sol, de sa granulométrie, de l'hydrodynamique de la nappe souterraine. Mais, d'autres facteurs tels que la dynamique des états de surface influent sur la disponibilité tant quantitative qu'en terme de qualité des eaux souterraines.

Conclusion partielle

La qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines varie en fonction des événements climatiques et des modes de gestion des terres et surtout des points d'eau. Les eaux échantillonnées sont dominées sur le plan chimique par les ions sodium (Na^+), calcium (Ca^{2+}), bicarbonates (HCO_3^-), chlorures (Cl^-) et nitrates (NO_3^-). Elles sont en majorité de type bicarbonaté calcique et magnésien (Ca-Mg-HCO_3) et mixte (Na-Mg-Ca-HCO_3) en saison pluvieuse et chloruré sodique (Na-Cl ou Na-HCO_3-Cl) en saison sèche. La minéralisation des eaux est liée aux phénomènes de dilution, de précipitation, d'évaporation, d'échange d'ions de base ou d'échange inverse d'ions et même de décomposition des déchets organiques conditionnés par la dynamique du climat. La composition bactériologique montre une forte concentration d'agents polluants, souvent innombrables tels que les coliformes totaux, *Escherichia coli* (en période sèche) et streptocoques fécaux (en période humide). Les eaux souterraines sont globalement d'une bonne qualité naturelle au regard de leurs caractéristiques physico-chimiques mais très contaminées par les germes bactériologiques, surtout au niveau des puits de faible profondeur, les forages pédestres et les sources. Ces résultats sont conformes à ceux de Boukari (1998) sur le plateau d'Allada.

Au total, au regard de la vulnérabilité des aquifères à l'évolution du climat et aux changements environnementaux, il importe de développer des stratégies adéquates pour, d'une part, améliorer la disponibilité et l'approvisionnement des eaux souterraines, d'autre part, l'utiliser rationnellement en fonction du climat futur dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. De telles stratégies devront s'inscrire, comme développé dans le chapitre suivant, dans les principes de la GIRE.

Chapitre VII

STRATEGIES DE GESTION DURABLE DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES DANS LE BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER

Les variations hydroclimatiques récentes et projetées incitent, par principe de précaution, à des stratégies d'amélioration de la disponibilité et des systèmes de gestion pour une durabilité des ressources en eaux souterraines.

L'incapacité d'agir directement sur le système climatique impose tout au moins une amélioration des conditions de recharge des aquifères, surtout ceux à nappe libre, et une révision des modes de gestion des eaux souterraines dans le bassin.

7.1. Stratégies d'amélioration de la disponibilité des eaux souterraines

Les besoins d'amélioration de la disponibilité des ressources en eau impliquent un renforcement de l'emmagasinement des réservoirs souterrains, en développant des systèmes ou infrastructures de recharge naturelle ou artificielle des aquifères.

7.1.1. Processus d'amélioration de la recharge naturelle des aquifères

Le processus de recharge naturelle des aquifères s'intègre dans la dynamique du cycle de l'eau à l'échelle globale et celle du bassin sédimentaire côtier. La stratégie à mettre en œuvre consiste en la protection et l'entretien des aires de recharge des aquifères. La recharge naturelle dépend en fait du volume d'eau précipitée, des états de surface et des propriétés hydrauliques des profils au niveau de sols et des formations géologiques. Les aires de recharge sont en réalité les toposéquences au nord des plateaux et les zones humides perchées au-dessus des nappes de ces plateaux, bien que certaines drainent les nappes situées en amont (figure 7.1).

Les coupes hydrogéologiques de la figure 7.1 permettent de comprendre que le bassin est entaillé par de nombreuses vallées généralement plus ou moins en liaison avec les nappes souterraines qu'elles permettent de drainer ou de recharger. La recharge naturelle dépend donc de la capacité d'infiltration et de la structure lithologique de la zone non saturée.

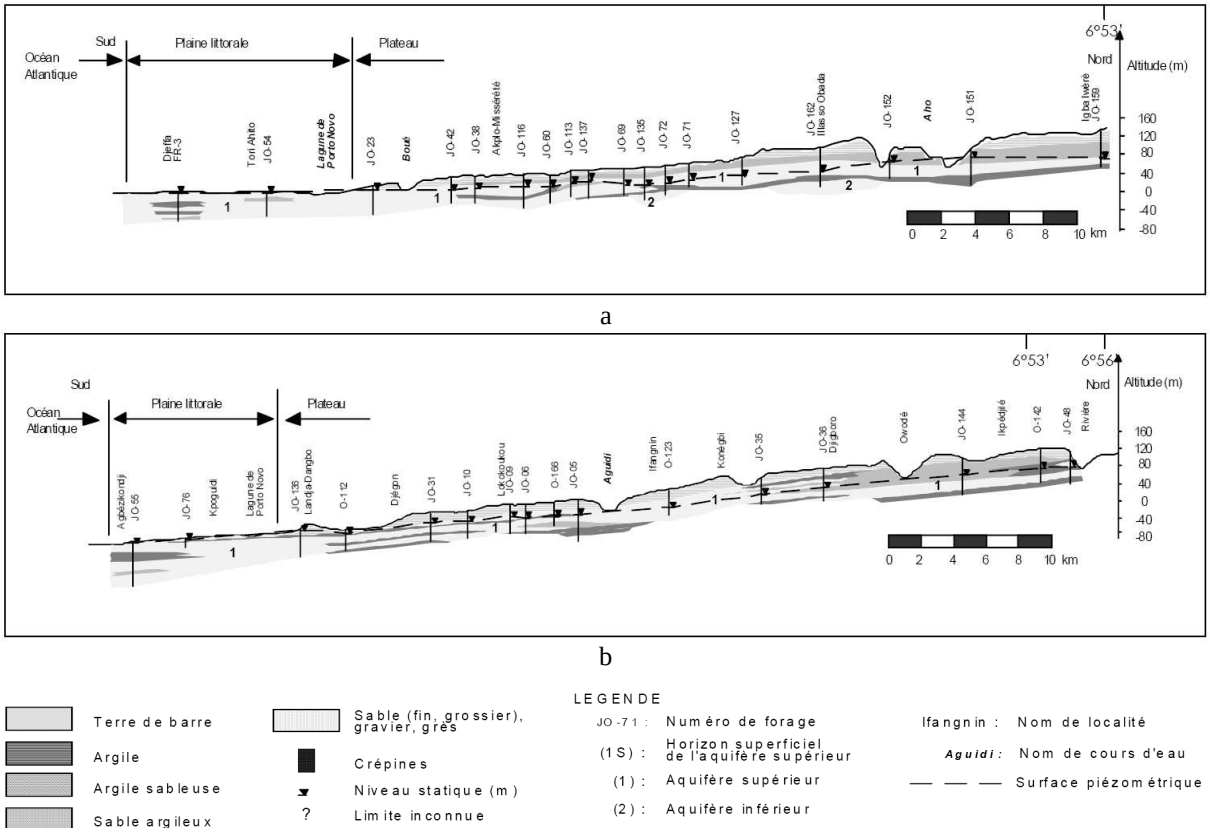


Figure 7.1 : Coupe hydrogéologique nord-sud du plateau de Sakété suivant les longitudes 2°35 Est (a) et 2°43 Est (b)

Source : Alassane (2004)

La nature argileuse et argilo-sableuse de la couche sous-jacente à la terre de barre, … a naturellement des implications négatives sur la réalimentation des nappes (Boukari, 1998 ; Alassane, 2004). En outre, cette contrainte lithostratigraphique peut constituer un écran de protection contre la pollution, surtout celle bactériologique des nappes d'eaux souterraines.

Par ailleurs, en matière d'occupation du sol, les bassins de masses d'eau fluviale, les dépressions fermées, les zones humides sont soumises à une exploitation agricole qui les dégrade, les comble et compromet leur capacité hydrodynamique. A cet effet, les aires de recharge confrontées à une mauvaise gestion des terres sont à protéger contre toute activité ayant un impact négatif sur les mécanismes de réalimentation des aquifères. Les secteurs nord des plateaux comme par exemple, Igba Iwèrè, Aho, Ikpédjilé, Owodé sur celui de Sakété peuvent être reboisés afin d'assurer leur fonction de recharge par la dynamisation de la perméabilité et de l'infiltration. De même les versants peuvent être protégés par des tapis végétaux herbacés pour éviter l'érosion de la couche meuble superficielle et ainsi réduire le ruissellement au profit de l'infiltration. De plus, il importe de rendre effectives et opérationnelles les trois zones de protection des forages d'extraction d'eau dans les champs

de captage. Il s'agit de : la zone immédiate, la zone rapprochée et la zone éloignée afin de contrer l'occupation des aires de recharge et réduire la contamination des nappes. Mais si l'action anthropique dégradante ou de perturbation des fonctions hydrodynamiques des réservoirs dépressionnaires de surface peut être contrôlée, même dans un contexte de conflits fonciers permanents, celle dégradante du climat semble être inévitable.

Il faudrait donc pour maximiser la recharge naturelle et réduire les risques de pollution, privilégier l'approche d'une gestion participative et concertée de ces sites. Ainsi, s'impose le recours aux dispositions légales prévues dans le cadre juridique et institutionnel du code de l'eau de septembre 1987 ou contenues dans le projet de loi sur la gestion de l'eau en République du Bénin. Selon le statut conféré à l'eau et au terme de l'article 3 du code, « le *domaine public naturel (de l'Etat)* inclut toutes les eaux superficielles - eaux des cours d'eau quels qu'ils soient, des lacs, étangs et sources, eaux stagnantes ou courantes, ainsi que les nappes d'eau souterraine et ''tous autres éléments assimilés à savoir : les bandes de terre sur vingt-cinq mètres au-delà de la limite des plus hautes eaux des cours d'eau avant débordement, les îles, les îlots, les bancs de sable et les atterrissements'' ». L'Administration publique de l'eau, notamment souterraine (SONEB, DG-Eau, etc.) devraient ainsi s'évertuer à appliquer les textes législatifs de protection des domaines publics pour conserver les aires de recharge naturelle et par conséquent optimiser la réalimentation des aquifères à nappe libre. Selon Kansakar (2006), la protection des aires de recharge a une importance capitale pour la gestion qualitative et quantitative des eaux souterraines. Bien qu'il y ait des difficultés d'application des textes, les périmètres des champs de captages devraient s'étendre à toutes les aires ayant une certaine influence sur la recharge des nappes.

Par ailleurs, le reboisement des versants, dénudés par les pratiques agricoles, l'exploitation sylvicole ou même les aménagements de voies, pourrait permettre de limiter le ruissellement et d'intensifier l'infiltration même si la topographie influe sur les transferts d'eau vers les nappes. Les systèmes de recharge naturelle n'exigent pas, outre mesure, de grands aménagements et de lourds investissements. Ils consistent simplement à renforcer, par une meilleure politique de gestion des terres, la capacité d'infiltration des sites identifiés comme zones de recharge des aquifères du bassin côtier du Bénin. Mais, aux systèmes de renforcement de la capacité de recharge naturelle peuvent s'ajouter ceux de la recharge artificielle dans une perspective de climat sec.

7.1.2. Stratégies de recharge artificielle des aquifères en scénario ‘’climat sec’’

Les raisons qui militent en faveur de la mise en œuvre d’une stratégie de recharge artificielle sont, entre autres, l’impact du réchauffement climatique et de la baisse pluviométrique, la réduction des aires de recharge naturelle sous l’influence de l’urbanisation et les modifications de l’occupation du sol. Eu égard à ces contraintes, la stratégie de recharge artificielle des aquifères constitue une solution susceptible d’augmenter les stocks d’eau souterraine. Si la période de recharge naturelle n’est qu’approximativement de trois mois (juin à août, voire octobre) dans le bassin et que l’exploitation des ressources dure toute l’année, l’option de recharge artificielle s’inscrit dans une politique de réalimentation additionnelle des nappes.

La recharge artificielle est une activité planifiée d’augmentation de la quantité d’eau disponible pour l’exploitation à travers des travaux définis pour accroître la réalimentation naturelle ou la percolation des eaux de surface vers les nappes d’eau souterraine… (http://www.unep.or.jp/ietc/publications/techpublications/techpub8e/artificial.asp).

Selon Asano (1985), la recharge artificielle est prioritairement utilisée pour préserver ou accroître les ressources en eaux souterraines ; elle contribue également à la maîtrise de l’intrusion saline, au stockage d’eau pour réduire les coûts de pompage, à la régulation temporaire des extractions d’eau, à l’amélioration de la qualité de l’eau par les systèmes de filtration. Cette technique est aussi utilisée pour la prévention de la subsidence des terres, l’augmentation de l’écoulement des cours d’eau, etc. (Oaksford, 1985).

Les techniques de recharge artificielle sont, entre autres, des trous, des tranchées, des bassins d’infiltration ou des puits de recharge, etc. qui permettent d’augmenter la percolation de l’eau pluviale et la charge hydraulique des aquifères tant superficiels que profonds.

- *Trous de recharge*

Les trous de recharge sont constitués d’ouvrages hydrauliques, construits pour alimenter les aquifères superficiels. Ils pourraient mesurer 1 à 2 m de large pour au moins 3 m de profondeur. Ils sont remplis suivant différentes couches de petits blocs rocheux, de graviers et de sable grossier. La portion de terre située entre la base de l’ouvrage et le toit de la nappe servira de filtre naturel supplémentaire bien que le risque de pollution ne soit pas totalement exclu dans le cas de transfert des eaux pluviales ruisselées.

Au regard de la variation de l'épaisseur des couches géologiques et de la situation des toits piézométriques, ces infrastructures sont à développer dans des secteurs où les niveaux statiques sont inférieurs à 20 m dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Les ouvrages d'exhaure situés dans les localités concernées sont essentiellement les puits de faibles profondeurs (moins de 10 m). Les trous de recharge artificielle peuvent être aménagés avec un système de gouttières connectées aux toits des maisons, surtout celles où le sol est imperméabilisé et où aucune infiltration naturelle n'est plus possible.

- *Puits de recharge*

Les puits de recharge, de diamètre (1 à 3 m) et de profondeur plus grands (pouvant atteindre 10 m) que les trous, sont généralement conçus pour réalimenter les aquifères profonds. Ils sont équipés d'un système de filtre malgré l'importance de l'épaisseur de la zone non saturée. Les formations géologiques intermédiaires forment dans une certaine mesure des écrans naturels anti-pollution. Les puits de recharge seront aménagés dans les secteurs du bassin où la profondeur du niveau statique varie entre 20 et 50 m et où les aquifères ne sont rechargés que si la pluviométrie dépasse à 1300 mm. A cet égard, ces ouvrages sont à développer intensément dans des secteurs qui, dans les conditions naturelles et surtout climatiques sèches, connaissent des difficultés de recharge.

- *Tranchées de recharge*

Les tranchées de recharge sont des ouvrages de largeur pouvant varier entre 0,5 et 1 m et de longueur d'environ 10 à 20 m, pour 1 à 1,5 m de profondeur. Des tranchées de récupération d'eau pluviale et de ruissellement, creusées le long des axes routiers (photo 7.1) peuvent servir d'ouvrages de réalimentation des aquifères.


a


b

Clichés : Totin V.S.H., mars 2008 et octobre 2009

Photo 7.1. Tranchées de dérivation d'eau de ruissellement le long des axes routiers Comè-Bopa (a) et Hêvié-Tori Avamè (b)

La fonction principale de ces ouvrages d'assainissement des eaux pluviales pourrait ainsi être détournée à des fins de recharge des aquifères, surtout superficiels. Une proportion importante de l'eau récupérée et temporellement stockée dans ces tranchées s'infiltre et échappe à l'évaporation surtout en période de pluies continues. Les tranchées peuvent être de grande profondeur (2 à 5 m) pour accroître leur capacité de mobilisation des eaux pluviales et augmenter les charges hydrauliques des aquifères dépendants.

- *Bassins d'infiltration*

Les bassins d'infiltration sont les plus grands ouvrages de récupération d'eau pluviale et de réalimentation des réservoirs souterrains. Ils sont créés sur des formations géologiques perméables ou semi-perméables. Ils forment des mares ou étangs artificiels où l'eau pourrait s'infiltrer à travers la zone non saturée et atteindre la couche aquifère. La percolation par la zone non saturée entraînerait une relative élimination de contaminants et permettrait d'éviter une forte pollution des eaux souterraines. Les bassins d'infiltration sont à aménager sous forme d'ouvrages hydrauliques bien dimensionnés surtout dans des secteurs où, dans les conditions naturelles, et selon Géohydraulique (1985) les nappes ne peuvent se recharger d'elles-mêmes. Ce sont des secteurs où la profondeur des niveaux statiques est supérieure à 50 mètres. Ils correspondent à des compartiments des plateaux d'Allada, d'Aplahoué, d'Abomey, de Kétou et le nord de celui de Sakété, où les aquifères sont supposés ne jamais se recharger. Au regard des coûts onéreux des infrastructures à aménager, les anciennes carrières de sable ou d'extraction de latérite (pour la construction ou le rechargement des voies) peuvent être transformées en bassins de recharge des aquifères (photo 7.2).


a b

Clichés : Totin V. S. H., août 2006 et novembre 2008

Photo 7.2. Bassins de recharge des aquifères : lac artificiel sur le site d'exploitation de sable jaune à Djrègbé (a) et ancienne carrière d'extraction de la latérite à Bonou (b)

Une grande partie des eaux récupérées artificiellement ou drainé vers ces bassins par ruissellement s'infiltre vers les formations aquifères avant d'être reprises par l'évaporation. En outre, les basses vallées des fleuves tels que l'Ouémé et le Mono constituent *a priori* les sites de recharge des aquifères du Quaternaire.

De plus, les retenues sur les petits axes de drainage des masses d'eau fluviale pourraient également constituer une technique de recharge. Mais au regard de leurs sources, situées pour la plupart dans la partie septentrionale du Bénin (bassin cotonnier), ces fleuves charrient des dérivés de pesticides et d'engrais minéraux intensément utilisés dans les agrosystèmes. Ces contaminants peuvent se retrouver dans les aquifères, suivant le principe de diffusion de la charge polluante chimique (McCarty, 2008) et constitués un risque détérioration de la qualité des eaux souterraines.

- *Sites potentiels de recharge*

Les plateaux du nord du bassin côtier du Bénin peuvent être aussi exploités comme sites potentiels pour l'aménagement des infrastructures de recharge artificielle. Cette proposition d'aménagement est fondée sur le fait qu'ils constituent le secteur de recharge naturelle des aquifères à nappe libre et même à nappe captif au sud du bassin. Les sites potentiels proposés de réalimentation des aquifères en fonction des lignes de faille sont illustrés par la figure 7.2.

Le volume d'eau mobilisable dépend du dimensionnement des ouvrages de collecte des eaux pluviales, implantés pour réalimenter à la fois les aquifères à nappes libres au nord et captives au sud (figure 2.5, p. 72). Les tranchées et les bassins d'infiltration peuvent être aménagés suivant les lignes de failles en fonction de leur lien avec les aquifères, étant donné que ces accidents géologiques commandent l'écoulement régional des eaux souterraines.

Les conditions préalables à toute opération de recharge artificielle sont, entre autres, les tests d'infiltration, la mesure de la conductivité électrique, l'analyse des échantillons d'eau à l'entrée des dispositifs de recharge et au niveau des nappes elles-mêmes, l'analyse du coût financier, etc. Ces précautions permettraient de s'assurer de la faisabilité et de la fiabilité des stratégies de recharge artificielle mises en place pour limiter les crises hydriques dans un scénario de climat sec.

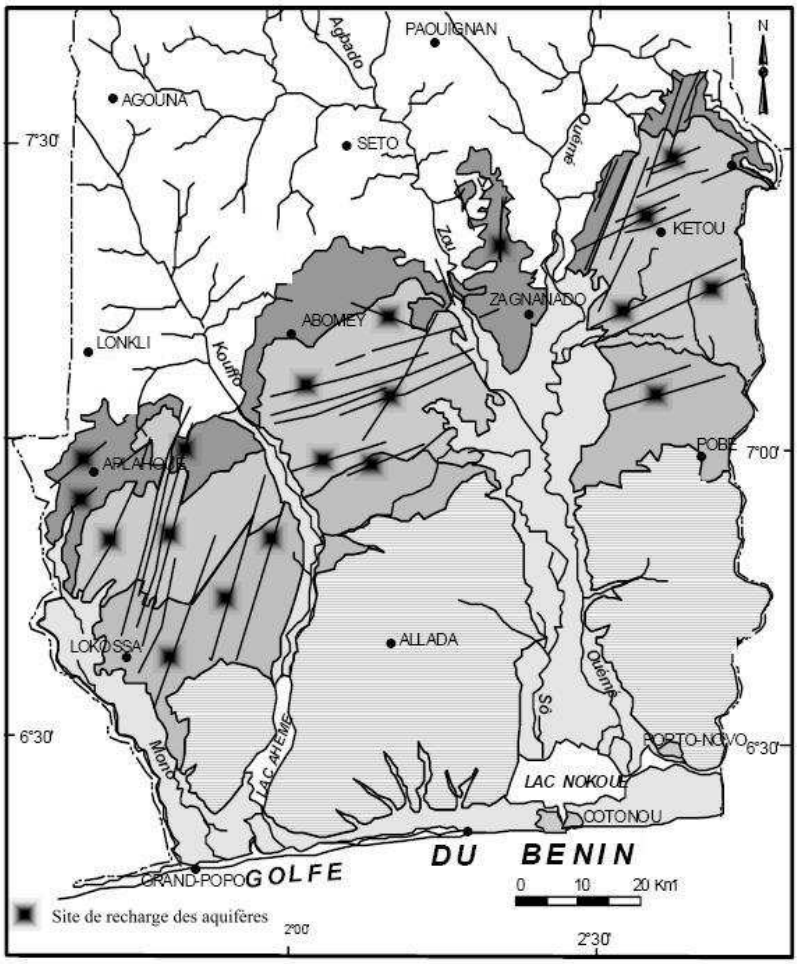


Figure 7.2 : Sites potentiels de recharge artificielle des aquifères basée sur le réseau de failles dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin

Somme toute, le système de recharge artificielle constitue une technique de forçage des processus d'infiltration et de percolation. Il permettrait d'élever le niveau de la surface piézométrique au-dessus de celui obtenu en condition de recharge naturelle. Dans le même ordre d'idée, cette approche vise à permettre de réaliser l'équation : taux de renouvellement supérieur au taux d'exploitation des eaux souterraines plus réserves. Il s'agit en réalité d'améliorer les fonctions de transfert hydrique et de maximiser le stockage des eaux dans les réservoirs souterrains en se fondant sur l'hypothèse que les aquifères à nappe libre se rechargent de façon continue tant que l'eau pluviale est disponible. La durabilité de la percolation au niveau des sites de recharge artificielle entraînerait une réalimentation continue des aquifères de mai à octobre et au-delà.

Une amélioration du régime piézométrique et les apports supplémentaires d'eau aideraient à parer à tout déficit de recharge et à favoriser l'approvisionnement durable des ressources souterraines dans le bassin. L'efficience du système de recharge artificielle dépend de la prise

en compte des facteurs climatiques, hydrogéologiques, environnementaux et même socioéconomiques. De plus, l'opérationnalisation de cette stratégie dépend de la disponibilité de l'expertise en matière de technologie de construction des ouvrages de recharge artificielle, de la mise en œuvre des outils institutionnels et de la disponibilité des ressources financières.

La gestion durable des eaux souterraines passe également par la récupération et l'utilisation des eaux pluviales selon les besoins et aussi par l'exploitation saisonnière des eaux de surface.

7.2. Mesure de gestion durable des ressources en eaux souterraines

Les nombreux indices perceptibles de changement environnemental et l'incertitude qui marque encore les projections de l'évolution pluviométrique imposent de prendre des précautions dans la gestion des eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier, en fonction des scénarios climatiques.

7.2.1. Mesures alternatives d'utilisation des eaux pluviales et superficielles

Le caractère précieux des ressources en eaux souterraines impose leur préservation et leur utilisation rationnelle, exclusivement pour des besoins qui requièrent une eau potable. Les autres besoins peuvent être satisfaits à partir des sources alternatives comme les eaux pluviales ou superficielles. Une telle recommandation se justifie pleinement dans la mesure où : (i) la grande partie des usages d'eau (plus de 2/3) ne nécessite pas l'eau potable, (ii) l'eau potable coûte de plus en plus cher, (iii) l'utilisation alternative d'eau pluviale permet de réduire les dépenses d'achat de l'eau (coût souvent prohibitif).

7.2.1.1. Mobilisation et utilisation des eaux pluviales

La récupération et l'utilisation des eaux pluviales permettent de réduire la consommation de l'eau potable et d'en éviter le gaspillage. De ce point de vue, il s'agit d'une stratégie d'atténuation des impacts négatifs du climat sur la recharge des aquifères dans un contexte de climat sec.

La mobilisation des eaux pluviales est une pratique très ancienne dans les civilisations du bassin sédimentaire côtier du Bénin. Cette technique est très répandue dans les parties centrale et septentrionale du bassin où les conditions hydrogéologiques (niveau statique à plus de 50 m) ne facilitent pas le forage des puits et le captage des eaux souterraines. Les citernes hors-sol ou sous-sol, souvent à ciel ouvert, d'une capacité variant entre 0,12 et 67,8 m^3 sont les plus développées (photo 7.3).



a b

Clichés Totin, février 2005 et janvier 2010

Photo 7.3. Citernes de récupération d'eau pluviale à Avakpa (a) et Sodohomey, Bohicon (b)

L'eau pluviale collectée dans ces citernes sert à tous les usages, même à la boisson bien que sa qualité soit douteuse, du fait de l'absence de dispositif d'élimination des éléments polluants chimiques et surtout bactériologiques. Mais, cette technique semble être, de plus en plus, délaissée surtout dans les agglomérations urbaines du fait de l'extension des réseaux d'adduction d'eau courante. La demande exponentielle en eau et l'enjeu écologique inquiétant lié au déficit de recharge et à l'intrusion saline dans les aquifères côtiers, justifient la nécessaire récupération et l'usage des eaux pluviales. Cette nouvelle stratégie recommandée, impose une réorganisation progressive des plans architecturaux des habitations tant en agglomérations urbaines que rurales. Il s'agira d'équiper toute habitation d'un double réseau d'alimentation en eau : un réseau d'eau potable (de la SONEB) et un autre d'eau pluviale (cuve ou citerne de récupération) à l'instar de celles des figures 7.3, 7.4 et 7.5.



1- Gouttières
2- Réservoir d'eau de pluie
3- Siphon du trop plein
4- Système de drainage du trop plein
5- Filtre
6- Câble électrique et tuyau d'adduction
7- Sur-presseur et pompe
8- Vanne
9- Lave linge
10- Sanitaire (WC)
11- Système d'évacuation d'eau

Figure 7.3 : Système de récupération d'eau de pluie avec une injection dans un réseau spécifique pour les toilettes, la machine à laver et le jardin

Source : *http://www.artemis-energies.fr/images/Eau-grise-avec-recup-eau-pluie.jpg*

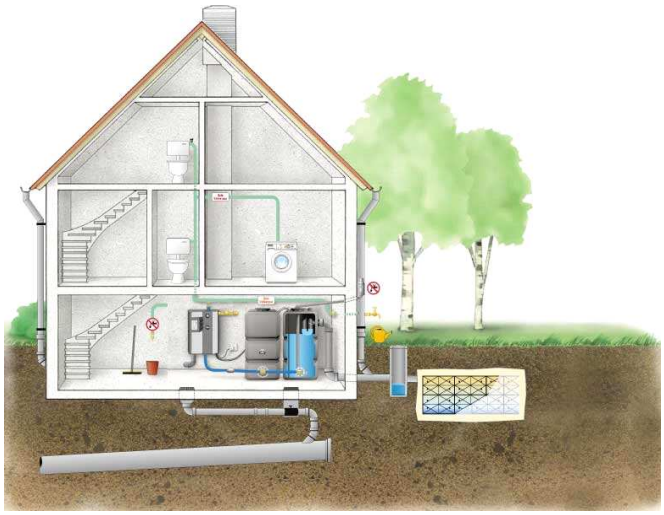


Figure 7.4 : Système de récupération d'eau de pluie avec une injection dans un réseau spécifique, cuve non enterrée

Source : *http://www.artemis-energies.fr/images/Eau-pluie-injection-reseau-non-enteree.jpg*

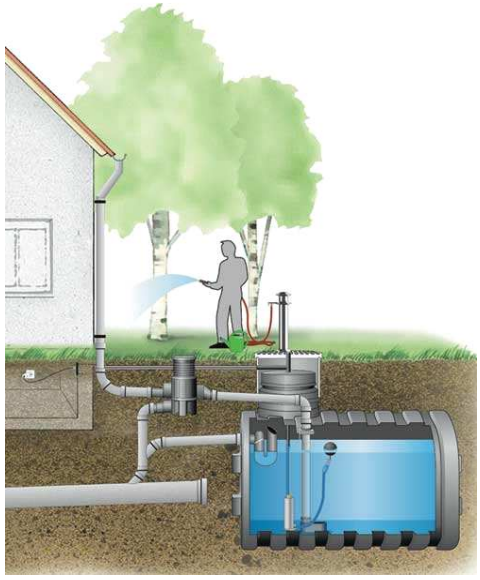


Figure 7.5 : Système de récupération d'eau de pluie pour l'arrosage avec cuve enterrée

Source : *http://www.artemis-energies.fr/images/Eau-pluie-jardin.jpg*

Ces infrastructures hydrauliques, inspirées des propositions de Artemis-énergies (*www.artemis-energies.fr*), peuvent être aussi bien adaptées au contexte du bassin sédimentaire côtier du Bénin, au regard de l'architecture des nouvelles constructions (photo 7.4).

Les systèmes hydrauliques de collecte d'eau pluviale sont constitués d'un raccordement de gouttières qui relient le toit de la maison à une cuve en plastique ou en béton (enterrée ou hors-sol). Ils sont également équipés d'un dispositif de filtration complet (anti-particules, anti-bactéries, anti-odeurs), d'une pompe et d'un réseau de distribution de l'eau, indépendant de

celui de l'eau potable. De plus, un mécanisme d'évacuation du trop-plein permettra de drainer le surplus d'eau vers un trou, un puits ou un bassin de recharge des aquifères.



Clichés Totin, février 2010

Photo 7.4. Habitations pouvant être équipées en système mixte d'eau potable et de récupération d'eau pluviale

Cette stratégie révèle le double intérêt économique et écologique des ouvrages hydrauliques de récupération de l'eau pluviale. Ces types d'habitations sont plus adaptés aux secteurs continentaux du bassin où les embruns marins n'auront pas d'influence sur la qualité des eaux pluviales collectées. L'eau potable servira aux usages domestiques alimentaires (boisson, préparation des aliments et lavage de la vaisselle) et selon les utilisateurs ceux concernant l'hygiène corporelle (lavabo, douche, bain et lavage du linge). Par contre, l'eau de pluie (non potable) sera notamment réservée aux chasses d'eau de toilettes, au lavage de véhicules, à l'arrosage des espaces verts et à la lessive, au bain/douche puis au lavage de linge selon les usagers). Les besoins journaliers estimés sont constitués par l'eau de chasse de WC (22 l), d'hygiène (48 l), de lavage de voiture (17 l), de lessive (24 l) et d'arrosage de jardin (30 l pour 2 m²). Le nombre de jours de réserve est fixé à 30, soit un mois avant le démarrage des nouvelles pluies. Considérant ainsi un volume d'eau pluviale annuel moyenne de 1136 litres (période de 1951-2005), une maison de 100 m² couverte de tuiles (Coefficient de perte : 0,75) et les besoins totaux en eau estimés à 186 l/jr/pers dans une habitation équipée, la citerne ou la cuve de récupération d'eau pluviale aura une capacité de 5,6 m^3. La disponibilité en eau par an, issue des systèmes hydrauliques de collecte d'eau pluviale dépend des événements pluvieux, de la surface de la toiture ou de la surface au sol de l'habitation (surface imperméabilisée) mais aussi des types d'utilisation d'eau.

La substitution de l'eau pluviale à l'eau potable pour certains usages présente l'avantage de réduire la pression sur les eaux souterraines et d'économiser en terme de coût et de ressource hydrique. Ceci constitue un atout pour la GIRE.

7.2.1.2. Mobilisation et utilisation des eaux de surface

Les sociétés de distribution d'eau pourraient aussi changer de stratégies d'approvisionnement en exploitant les eaux de surface. Dans ce cas, l'exploitation des eaux superficielles et souterraines peut être saisonnière. L'alimentation en eau potable en période humide pourrait être assurée à partir des eaux de surface traitées. Cette stratégie consisterait à suspendre ou limiter les pompages d'eaux souterraines dans les champs de captage afin de favoriser une recharge optimale des aquifères. Mais, la limite de cette mesure est que même en absence d'extraction, les aquifères sont soumis à un drainage naturel qui, peut les vider de leurs eaux. Les prélèvements intensifs d'eaux souterraines ne reprendront qu'en saison sèche où les réserves hydriques dans les bassins fluviaux ou lacustres sont en baisse. Cette approche de gestion des eaux superficielles offre un intérêt écologique mais elle nécessite des investissements dont l'analyse de l'efficacité-coût est réservée aux économistes. Il faudrait aussi tenir compte de ce que les eaux superficielles sont plus exposées aux sources de pollution (dérivés de pesticides, éléments métalliques traces, germes bactériologiques, etc.) que les eaux souterraines. Pour parer à la contrainte de la forte pollution des eaux de surface, l'option d'alimentation en eau potable à partir des aquifères profonds (eaux fossiles) peut être envisagée, bien qu'elle nécessite aussi plus d'investissement financière.

Cette forme de gestion des besoins en eau potable a un double intérêt : assurer la durabilité de la réalimentation optimale des aquifères et, limiter l'influence de l'avancée du front salin et l'intrusion saline dans les aquifères côtiers (figure 7.6).

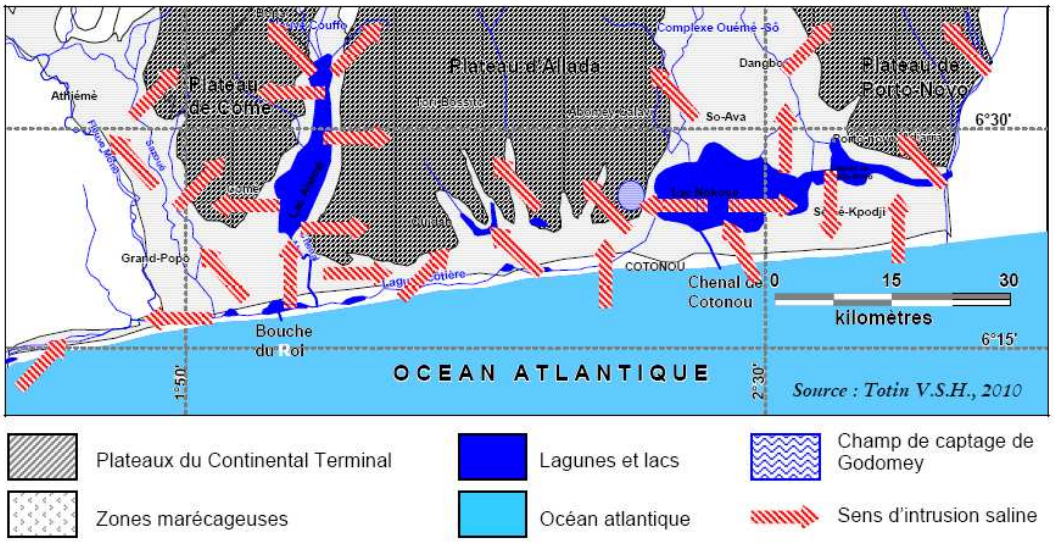


Figure 7.6 : Secteurs côtiers du bassin vulnérables à l'intrusion d'eaux marine et lagunaire

La hausse du niveau marin pourrait compromettre le réalisme de cette stratégie. Selon IGIP-GKW-GRAS (1989), avant la construction du barrage du canal de Cotonou, l'influence de l'eau salée s'étendait dans la Sô en période d'étiage jusqu'à 30 km en amont de l'embouchure dans le lac Nokoué et l'Ouémé, la limite entre l'eau salée et l'eau douce se trouvait à 25 km en amont de son embouchure dans ce lac.

Dans tous les cas, la limitation de la pression sur les eaux souterraines (recharge artificielle, récupération des eaux pluviales, exploitation saisonnière des eaux de surface) telle qu'envisagée permettra de réduire le déficit de recharge des aquifères. Ce qui contribuerait à augmenter le taux de recharge estimé par Azonsi et Dépraeterre (2004) à 500 m^3/ha/an soit une lame de 50 mm et d'assurer la fourniture en eau potable aux populations de façon durable. Ce scénario de gestion des ressources en eaux souterraines devrait être adapté aux contextes climatiques normal ou sec. Cette stratégie aiderait aussi à accroître la pression des nappes d'eaux douces côtières notamment et, par conséquent à repousser le front salin dont le risque de progression continentale est élevé avec le réchauffement climatique et l'élévation du niveau marin.

7.2.2. Gestion de la qualité des eaux souterraines

Une gestion efficiente de la qualité des eaux souterraines, essentiellement celle de puits et de forage, implique avant tout l'assainissement autour de ces derniers et la mise en place d'un Système d'Information Environnementale et Sanitaire (SIES). Cette mesure vise à améliorer la santé environnementale et, par conséquent, à réduire le risque de contamination des eaux souterraines. La protection des aquifères passe par l'aménagement d'infrastructures adéquates de gestion des excréta, des déchets solides et des eaux usées dans les agglomérations rurales et, surtout, urbaines du bassin côtier.

La bonne gestion des excréta nécessite l'utilisation de latrines collectives publiques ou individuelles étanches afin de réduire le risque hydrofécal et la contamination des nappes souterraines. Dans ce cadre, le respect des normes OMS d'installation des latrines est de mise, à savoir : (i) maintenir le fond de la latrine à 1,5 m au moins au-dessus de la nappe phréatique, (ii) garder une distance de 6 m entre les habitations et les cabinets à fosses et (iii) garder une distance de 15 m entre les sources d'eau et les latrines. Mais, la limite de ces normes de l'OMS est qu'au regard des fluctuations saisonnières de la surface piézométrique (1 à 3 m), le seuil de 1,5 m au-dessus de la nappe phréatique ne permettra pas de parer à la contamination des eaux souterraines, notamment dans la plaine côtière. De même, la distance de 15 m entre

les points d'eau et les latrines paraît insignifiante, considérant les résultats récents sur les processus de progression des contaminants dans les eaux souterraines (figure 6.10 p. 223 ; Mc Carty, 2008) et ceux d'analyses des eaux étudiées dans le cadre de ce travail.

Ces limites des normes OMS incitent à l'adoption d'une approche écosystémique de gestion des excréta et des hydrosystèmes souterrains. Pour ce faire, la construction de la latrine ECOSAN (photo 7.5) promue par le Centre Régional pour l'Eau Potable et l'Assainissement à faible coût (CREPA) semble être une solution des plus adéquates.


a



b

Clichés CREPA-Bénin, 2008

Photo 7.5. Latrines ECOSAN à double fosses munies de plaques chauffantes à Tohouè, Sèmè-Podji (a) et à quatre fosses munies de plaques chauffantes à Adjarra (b)

Cette latrine écologique est constituée de fosses d'aisance semi enterrées ou surélevées avec la particularité que les fèces sont séparées des urines (Konmy, 2005) et de ne pas communiquer avec le sol et la nappe. Elle empêche le rejet des excréta dans le sol et par conséquent vers les aquifères tout en diminuant le développement des agents polluants des eaux et réduit la pollution bactériologique.

Ces stratégies ne réussiront que si les populations sont impliquées et sensibilisées pour un changement de comportement à travers un SIES autour des points d'eau. Il est fondamental d'initier et conduire une étude diagnostique sur la salubrité autour des puits et des forages et sur les comportements inadéquats d'approvisionnement en eau. Dans la dynamique de la GIRE, les connaissances, attitudes, pratiques et croyances des communautés rurales et urbaines sont à prendre en compte. De même, le SIES sera focalisé sur les particularités

environnementales locales, hydrodynamiques et socioculturelles des agglomérations du bassin côtier du Bénin.

Considérant la vulnérabilité des forages pédestres à la pollution bactériologique, il importe que les programmes d'hydraulique villageoise de la DG-Eau et des promoteurs privés privilégient les forages manuels. En ce qui concerne les eaux déjà contaminées, les populations peuvent les bouillir avant toute consommation.

L'opérationnalisation des outils législatifs et institutionnels dans le secteur de l'eau constitue également le gage d'une gestion durable de la ressource souterraine.

7.2.3. Cadres juridique et institutionnel de la gestion des eaux souterraines

Des dispositions juridiques et institutionnelles ont été prises au Bénin, à travers le code de l'eau, pour une gestion efficiente des ressources en eau dont celles souterraines. Mais, un des problèmes majeurs auquel est confronté le secteur de l'eau en général, dans le bassin sédimentaire côtier, concerne l'application des textes législatifs et réglementaires. De plus, le fonctionnement des institutions à charge de la gestion de l'eau s'avère indispensable. Il importe de rendre opérationnel cette législation au regard du cadre général de la GIRE défini par le Global Water Partnership (2000).

La GIRE est définie par le Partenariat Mondial pour l'Eau (2000) comme : « un processus de promotion du développement et de la gestion coordonnée de l'eau, des terres et des ressources associées, en vue de maximiser, de manière équitable, le bien-être économique et social qui en résulte, sans pour autant compromettre la durabilité des écosystèmes vitaux ». Elle est ainsi un processus de changement positif de la gestion des ressources en eau. Donc, l'atteinte de cet objectif nécessite une mise en œuvre effective de la législation sur les ressources en eau et son appropriation par les populations.

Au Bénin, des lois spécifiques relatives à l'eau ont été votées et promulguées. Le code de l'eau du 21 septembre 1987 et le projet de loi portant gestion de l'eau en République du Bénin en sont une illustration. Souvent, le principal problème n'est pas l'absence d'une législation pertinente, mais bien le manque de volonté politique et de ressources humaines et financières notamment, pour assurer l'application des lois en vigueur.

Au regard des principes de la GIRE, la législation devrait satisfaire les conditions suivantes:

- ✓ être fondée sur une politique nationale reconnue relative à l'eau, portant sur l'ensemble des secteurs de l'eau et des parties prenantes, considérant l'eau en tant que

ressource et mettant l'accent sur la priorité pour la société qu'est la protection des besoins fondamentaux des êtres humains et des écosystèmes ;

- ✓ asseoir les droits (d'utilisation) de l'eau afin de stimuler les investissements et la participation du secteur privé et des collectivités en matière de gestion de l'eau ;
- ✓ réglementer l'accès monopolistique à l'eau et aux services d'eau, tout en évitant tout dommage aux tierces parties ;
- ✓ présenter un équilibre entre la mise en valeur des ressources à des fins économiques et la protection de la qualité de l'eau, des écosystèmes et des autres avantages sociaux ;
- ✓ faire en sorte que les décisions portant sur le développement soient fondées sur une évaluation économique, environnementale et sociale rationnelle ;
- ✓ faire en sorte qu'il soit possible d'avoir recours à des outils économiques et participatifs modernes, lorsque nécessaire et autant que faire se peut.

Ces directives constituent un défi de la gestion des ressources en eaux souterraines dans le bassin au regard de l'évolution des événements hydroclimatiques et de l'augmentation de la demande en eau. Le régime des prélèvements d'eaux souterraines, déterminé par les articles 8 à 16 du chapitre III, section I du code de l'eau de 1987 s'applique à des zones définies par arrêté ministériel (article 8). Cet article organise un régime d'autorisation et impose une déclaration pour les ouvrages existants. A cet effet, aux termes de l'article 8, 1er alinéa de l'autorisation s'impose à :

a) l'exécution de tout ouvrage de captage des eaux souterraines, puits, forages, galeries drainantes, devant être équipé d'un moyen d'exhaure mécanique ;

b) l'équipement nouveau en moyen d'exhaure mécanique d'ouvrages existants ;

c) tout prélèvement d'eau dans les nappes avec des moyens mécaniques.

L'alinéa 2 de ce même article précise que les ouvrages de captage non équipés de moyens de puisage mécanique ne sont pas soumis à autorisation. L'autorisation, lorsqu'elle est requise est accordé par le ministre chargé de l'hydraulique (aujourd'hui, ministre de l'eau) selon une procédure déterminée et détaillée dans les articles 11 à 14 (1er alinéa). En cas d'acceptation du dossier du déclarant, l'arrêté d'autorisation fixe le volume d'eau qui pourra être puisé annuellement et éventuellement, les modalités de puisage (article 14, 1er alinéa).

Selon Untermaier (2003), le régime d'autorisation s'apparente à une procédure étatique et ministérielle qui paraît en contradiction avec les principes de la décentralisation résultant des lois du 15 janvier 1999 au Bénin. Cette procédure ne comporte, par ailleurs, ni enquête publique, ni étude d'impact, ni implication de la population ; ce qui paraît en déphasage avec les principes législatifs de la GIRE.

De plus, les ouvrages de captages existants, équipés à l'aide de moyens mécaniques de puisage ou exploitant un aquifère, sont soumis à une « déclaration de propriété » déposée, selon l'article 10, auprès du Ministre chargé de l'Hydraulique. L'article 8, alinéa 3, confère au Ministre chargé de l'Hydraulique le pouvoir d'interdire « tout puisage particulier, même sans l'emploi de moyens mécaniques, dans certaines nappes bien délimitées », pour des motifs limitativement énumérés. Ces motifs sont :

a) ‘’nappe utilisée pour l'alimentation d'une agglomération et ayant des réserves limitées ;

b) nappe servant à l'alimentation humaine et qu'il est nécessaire de protéger contre les pollutions organiques ;

c) nappe déjà polluée et dont l'usage par la population contitue un danger pour la santé publique ;

d) toute autre cause d'intérêt général’’.

A l'analyse de l'alinéa 3 de l'article 8, cette interdiction ouvre aux déclarants des installations concernées un droit au « payement ou à la considération d'une juste et préalable indemnité » (Article 15). Quant à l'article 16, il contient des dispositions pénales à savoir, définitions des infractions, procédure de constatation, sanctions. Cet article prévoit également deux sanctions complémentaires : l'interdiction sans indemnité de puisage ou de rejet, laquelle semble découler ‘’automatiquement’’ de la constatation ou de la sanction d'une infraction, ainsi que l'interdiction de travaux.

Ce sont là autant de dispositions législatives susceptibles d'assurer une exploitation participative, rationnelle et durable des ressources en eaux souterraines dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Mais ces outils de réglementation de la gestion des hydrosystèmes souterrains ne semblent jamais être utilisés. A titre d'exemple, la gestion des eaux souterraines est marquée dans le bassin par une prolifération d'unités industrielles ou micro-industrielles d'exploitation et de vente non contrôlée et illégale des quantités importantes de ces ressources. Cette gestion peu rationnelle se fait au mépris des dispositions

légales prévues aux articles 8 à 16 du code de l'eau et ne respectent aucune logique de la GIRE. De même, les sites de recharge des aquifères sont illégalement occupés par les populations à l'image de l'environnement immédiat des forages dans le champ de captage de Godomey. Ces attitudes peu responsables ont des répercussions irréversibles sur la quantité et la qualité des eaux souterraines. Même si un des principes de la GIRE évoque la participation du secteur privé et des collectivités dans le processus de gestion de l'eau, le système d'exploitation de la ressource en cours dans le bassin mérite une profonde révision, surtout en prévision des scénarios climatiques.

A cet effet, il est urgent, vu également la vulnérabilité des ressources en eaux souterraines, telle que montrée précédemment, que les pouvoirs publics étatiques ou décentralisés œuvre pour l'application de la législation dans ce secteur. Les textes législatifs et réglementaires existants ne prennent pas en compte les préoccupations relatives aux changements environnementaux et climatiques. Le projet de loi portant gestion de l'eau en République du Bénin, pourrait peut-être permettre de corriger leurs insuffisances liées à la gestion des eaux souterraines, notamment dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Par exemple, une gestion durable de ces ressources impose l'appropriation par les populations de l'intérêt de la durabilité écologique (objectif final de la GIRE). Cette gestion durable passe avant tout par la création d'un cadre de concertation comme le Partenariat National de l'Eau (PNE) et le partage de l'information relative à la gestion des ressources en eaux souterraines.

7.2.4. Approche communicationnelle et éducationnelle sur l'eau

L'éducation, la formation, et la prise de conscience constituent des possibilités de changement social important (GWP, 2003). La Déclaration de Rio sur la durabilité mettait déjà l'accent sur le besoin d'informations précises en vue de faciliter les processus décisionnels dans la gestion des ressources en eau. Il s'agit d'élaborer un cursus d'éducation sur la gestion de l'eau tel que prévu dans les lignes directives de la GIRE. Selon GWP (2003), l'objectif de cet outil est d'inclure des sujets liés à la gestion durable de l'eau dans les cursus primaires, secondaires, ou universitaires. L'atteinte de cet objectif implique une collaboration entre les gestionnaires de l'eau souterraine (SONEB, DG-Eau, populations, etc.) et les tenanciers du système éducatif. Dans ce cursus s'inscrit également les programmes d'apprentissage sur sites (zones humides et sites de recharge des aquifères, champs de captages, stations de pompage, exutoires des aquifères, etc.) comme outils d'éducation. Le renforcement de l'éducation environnementale permettra d'inciter à un comportement de préservation des ressources en

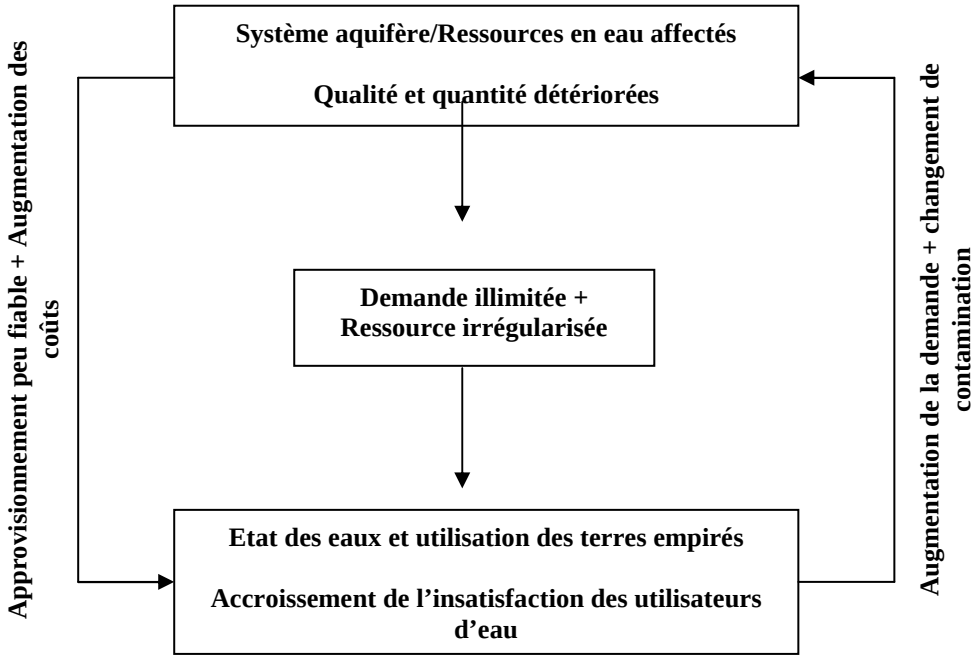
eaux souterraines et leur gestion durable. La version 2 du ToolBox de IWRM (Gestion Intégrée des Ressources en Eau).

La mise en place d'un SIG et d'un système d'alerte sur les risques de gestion des ressources en eaux souterraines s'impose également. Les facteurs pouvant permettre d'optimiser les échanges d'informations sur la gestion des ressources en eaux souterraines dans le cadre de la communication avec les parties prenantes sont : l'adéquation, l'accessibilité, l'équité (GWP, 2002).

L'article 31 du projet de loi sur la gestion de l'eau en République du Bénin, prévoit la création, auprès du ministère, d'un organe dénommé agence nationale de gestion de l'eau. A ce titre, l'agence assure la production et la gestion de l'information sur l'eau, l'assistance pour la préparation des outils de gestion de l'eau, et l'appui aux comités de bassin et aux collectivités territoriales.

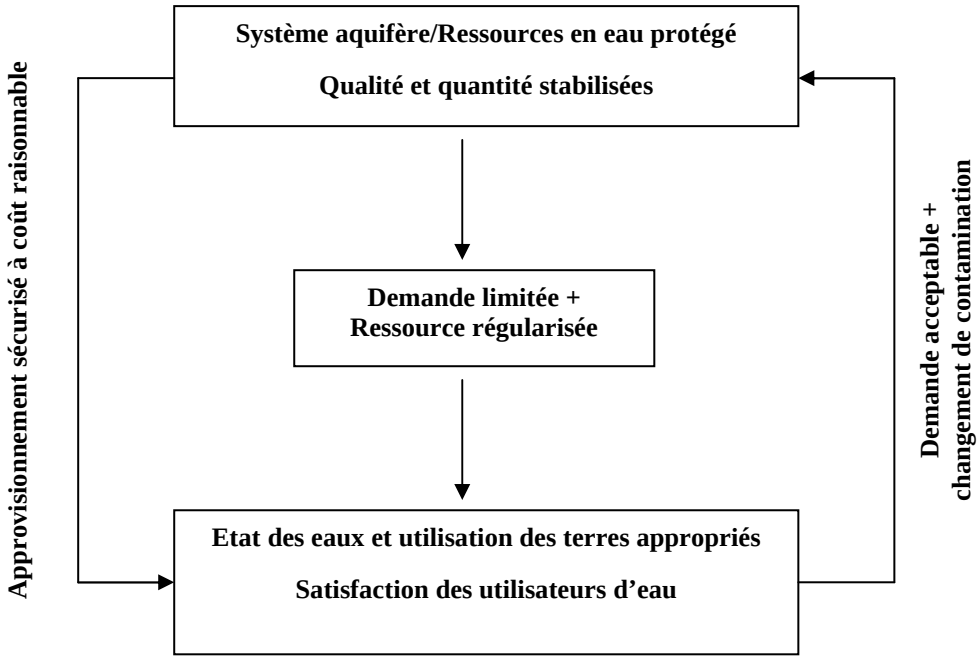
Les questions relatives à l'information concernant la qualité et le prix de l'eau distribuée et les responsables chargés de la diffusion sont traités à l'article 76 de ce projet de loi. Si cette loi est adoptée et appliquée, elle permettra une gestion des ressources en eaux souterraines suivant un « cercle vertueux » contrairement au « cercle vicieux » (figure 7.7).

La gestion intégrée des ressources en eaux ne sera opérationnelle que si elle prend en compte les limites des modes courants de gestion et que les impondérables climatiques, hydrologiques, socioéconomiques, culturelles et politiques sont mieux considérées. Cette vision multidimensionnelle transparaît déjà dans les recommandations de la ‘’Vision Eau Bénin 2025’’ dont la stratégie d'intervention est une *approche participative intégrale*. La conditionnalité de cette approche est *l'adhésion et la mobilisation massives de toutes les couches sociales pour la réalisation de tous les programmes de mise en valeur des ressources* en eau. Ainsi se fonde l'option d'une gestion durable des eaux souterraines dans un contexte hydroclimatique difficile, de changements de l'occupation des terres, d'augmentation de la population et de demande croissante de cette ressource.



Cercle vicieux de gestion intégrée des ressources en eaux souterraines

(a)



Cercle vertueux de gestion intégrée des ressources en eaux souterraines

(b)

Figure 7.7 : Gestion hasardeuse (a) versus gestion intégrée (b) des ressources en eaux souterraines

(*Adapté de : Tuinhof et al., 2003 et GW-MATE, 2004*)

Conclusion partielle

La gestion durable des eaux souterraines implique une forte et constante disponibilité quantitative qui peut être possible grâce à la mise en œuvre d'une série de stratégies de recharge naturelle et artificielle des aquifères. La réduction de l'impact des événements hydroclimatiques extrêmes et de la pression humaine sur les eaux souterraines nécessite l'amélioration de la recharge naturelle par la protection des aires d'alimentation des aquifères.

L'exploitation alternative des eaux pluviales et ou superficielles constitue une approche envisagée pour une gestion rationnelle et durable des ressources en eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier du Bénin. En outre, la transformation des eaux marines en eau douce serait également une stratégie de satisfaction des besoins des populations. Mais, elle n'est pas encore envisagée étant donné que trois hydrosystèmes (pluvial, superficiel, souterrain) restent aujourd'hui exploitables à l'échelle du bassin.

Il faudrait, dans l'optique d'une gestion réellement intégrée des ressources en eau, tenir compte des croyances populaires et développer un système législatif, éducationnel et d'anticipation opérationnel.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail est une contribution à l'amélioration des connaissances sur l'état et les tendances climatiques dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin et sur la sensibilité des ressources en eaux souterraines et les modes de gestion dans ce bassin. Pour atteindre l'objectif ainsi visé, l'étude a été conduite selon plusieurs méthodes d'analyse statistique et de modélisation hydroclimatique en rapport avec la dynamique des ressources en eaux souterraines. Ces méthodes sont :

- l'analyse statistique des chroniques de pluies, de températures et d'évapotranspiration disponibles (1951-2005) et la simulation climatique du bassin côtier du Bénin (2070-2089) à l'aide du modèle PRECIS sur ECHAM4, SRES A2 ;
- l'examen de la corrélation entre événements climatiques et piézométriques dans le secteur du champ de captage de Godomey, le calcul du bilan d'eau souterraine à l'aide du modèle modifié de Thornthwaite ainsi que l'évaluation des volumes d'eau mobilisés par les aquifères de versants ;
- l'analyse statistique classique des paramètres physico-chimiques et bactériologiques des eaux de puits, forages et sources comparés à la normes de potabilité de l'OMS, l'étude hydrochimique des eaux analysées à travers le diagramme de Piper et les diagrammes binaires ;
- la caractérisation des modes courants de gestion des eaux souterraines et la conception et proposition de stratégies de gestion durable visant à réduire la dégradation quantitative et la détérioration de la qualité de ces eaux.

Les résultats obtenus peuvent être synthétisés en quatre points :

Evolution récente et future du climat dans le bassin sédimentaire côtier

De façon synthétique, ce travail a montré que la pluviométrie demeure le principal élément de subdivision climatique du bassin sédimentaire côtier du Bénin. Le champ pluviométrique moyen est de 93,9 mm/mois et de 1126,4 mm/an sur la période 1951-2005. Le zonage hydroclimatique met en évidence les trois champs de pluie suivant : le champ humide, le semi-humide et le champ sec. Ils sont respectivement organisés autour de la station de Porto Novo (1332,9 mm), d'Abomey (1095,9 mm) et de Grand Popo (963,6 mm).

Les ruptures intervenues dans les années 1970 ont entraîné une sécheresse dont la particularité est sa persistance (1970-2005) et sa sévérité (déficits importants). Le déficit pluviométrique post-rupture a atteint alors des valeurs comprises entre 50 et 75 %, pendant les mois de novembre à janvier. Il est de 30 à 49 % de février à août, voire à octobre, incluant la période de la recharge des réservoirs souterrains. La baisse de la pluviométrie annuelle de 17 % dans le bassin et de 9 à 30 % à l'échelle stationnelle sur la période 1951-2005 affecte plus les champs initialement sec et humide du bassin. A cet effet, les isohyètes 900 mm et 1210 mm initialement localisés à l'ouest du bassin s'étendent vers le centre et l'est où étaient enregistrées respectivement 1100 à 1200 mm et 1610 mm de pluie.

La projection du climat futur révèle pour le bassin sédimentaire côtier du Bénin, un champ pluviométrique humide avec un relèvement moyen de 43 % et une variation spatiale de -18 à 87 % selon le scénario A2 du modèle PRECIS ECHAM4 en 2070-2089, par rapport à la période 1961-1990. Le climat humide que projette le modèle PRECIS pour le bassin semble confirmer les événements pluvieux extrêmes qui s'observent en Afrique de l'Ouest en général et au Bénin en particulier depuis la fin des années 1990. L'augmentation des pluies annuelles, bien qu'hypothétique, au regard des incertitudes sur les projections pluviométriques, conduirait au rétrécissement et au confinement de la diagonale de sécheresse vers l'extrême sud-ouest en raison de l'extension du champ sud-est de forte pluviométrie.

La variation pluviométrique est doublée d'un réchauffement climatique caractérisé par une augmentation de la température moyenne de 26,7 °C dans les années 1950 à 28 °C en 2005 avec une augmentation de 1,8 °C. A l'horizon 2070-2089 et comparativement à la période de référence 1961-1990 (25,8 à 27 °C), les températures moyennes varieront de 29,9 à 31 °C selon les stations, soit une augmentation de 2,4 à 3,5 °C. Le secteur nord du bassin, plutôt continental est et sera plus affecté par le réchauffement que le secteur sud, côtier sous l'influence de la brise de mer.

L'évolution du climat dans le bassin côtier du Bénin n'est pas sans conséquence l'hydrodynamique des réservoirs souterrains déjà sous une forte pression humaine.

Comportement hydrodynamique des aquifères du bassin sédimentaire côtier

L'impact du climat sur les ressources en eaux souterraines est illustré par l'évolution cyclique des niveaux piézométriques, concordant avec les différentes phases climatiques. Ainsi, les remontées piézométriques de l'ordre de 2 à 3 m, voire 5 m correspondent à des séquences climatiques humides et traduisent une amélioration de la recharge des aquifères. Par contre,

les épisodes secs induisent une récession piézométrique pouvant même atteindre des valeurs en dessous du niveau 0 de la mer au niveau des nappes côtières. Ce phénomène les expose à l'intrusion saline sous la pression additionnelle des extractions massives d'eau. La recharge moyenne est d'environ 300 mm/an pour les aquifères à nappe libre superficielle et 60 mm/an pour ceux à nappe libre profonde respectivement une porosité effective de 0,26 (texture sable moyen) et 0,07 (texture argilo-sableux). A l'échelle du bassin, la réalimentation des nappes, selon le bilan d'eau de Thornthwaite est en moyenne de de 104 mm/an et 50 mm/an ; soit un taux de 10 % et de 5 % du cumul de pluie annuelle de 1080 mm avec respectivement RU = 100 mm et RU > 100 mm.

L'analyse physico-chimique et bactériologique des eaux des ouvrages échantillonnés révèle une plus grande sensibilité de leur qualité au changement hydroclimatique. Les puits de faible profondeur sont les plus vulnérables, comparés au puits profonds et aux forages. La minéralisation des eaux souterraines du bassin est liée à une abondance relative en cations dans l'ordre $Ca^{2+} > Na^{+} > Mg^{2+} > K^{+}$ et en anions de $HCO_3^{-} > Cl^{-} > NO_3^{-} > SO_4^{2-}$ en saison pluvieuse et $HCO_3^{-} > NO_3^{-} > Cl^{-} > SO_4^{2-}$ en saison sèche. Elles sont en majorité de faciès bicarbonaté calcique et magnésien (Ca-Mg-HCO_3) et mixte (Na-Mg-Ca-HCO_3) en saison pluvieuse et chloruré sodique (Na-Cl ou Na-HCO_3-Cl) en saison sèche. La variation hydrochimique au niveau des puits, des forages et des sources est liée à des phénomènes de dilution, de précipitation, d'évaporation, d'échange d'ions de base ou d'échange inverse d'ions conditionnés par la variabilité climatique à différentes échelles de temps.

Sur le plan bactériologique, les eaux analysées contiennent une concentration considérable d'agents polluants dont les plus présents, voire innombrables sont les coliformes totaux, les *Escherichia coli* (en période sèche) et les streptocoques fécaux (en période humide). La variabilité hydroclimatique, le type des ouvrages hydrauliques et leur localisation dans les agglomérations et notamment les mauvaises conditions d'hygiène et d'assainissement expliquent la forte détérioration bactériologique des eaux souterraines.

En général, les eaux souterraines du bassin côtier du Bénin sont d'une bonne qualité naturelle au regard de leurs paramètres physico-chimiques encore en dessous de la norme de potabilité de l'OMS mais très contaminées par les germes bactériens, surtout au niveau des puits de faible profondeur, les forages pédestres et les sources.

Mode actuel de gestion des eaux souterraines

La pression de prélèvement des eaux souterraines pour les usages domestiques, industriels et agricoles, en rapport avec l'accroissement de la demande augmente les risques dégradation progressive de ces ressources. Les modes actuels de gestion de l'eau souterraine dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin sont marqués par une utilisation irrationnelle, abusive et le gaspillage ; le défaut de mise en oeuvre d'une législation pour l'exploitation durable de ces ressources. Au regard de leur très grande vulnérabilité à l'évolution du climat et à la multiplication des sources de pollution, l'augmentation des systèmes individuels (non autorisés et non contrôlés) de pompage et de vente de l'eau constitue une menace sur la durabilité des ressources en eaux souterraines. Un tel mode de gestion ''non planifiée'' des eaux conduit à un taux d'exploitation supérieur au taux de recharge et, si rien n'est fait, à l'irréversibilité de cette tendance, dans le scénario de climat sec. C'est pourquoi, la gestion intégrée des ressources en eaux est la seule alternative crédible pour assurer la durabilité de l'exploitation de celles souterraines.

Gestion durable des eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier du Bénin

L'exploitation durable des eaux souterraines implique la révision des modes courants et le développement de stratégies visant à accroître leur disponibilité. A cet effet, une politique de protection et de conservation des aires de recharge naturelle des aquifères, de recharge artificielle et de suivi de la qualité des eaux mérite d'être mise en oeuvre. De plus, il importe de réduire la pression sur cette ressource par une stratégie alternative de récupération et d'utilisation des eaux pluviales ou d'exploitation des eaux superficielles. Ces stratégies ne peuvent réussir que si les outils juridiques, institutionnels et informatifs opérationnels existent afin d'assurer une gestion intégrée fondée réellement sur l'efficience économique, l'équité sociale et la durabilité écologique.

Les limites à ce travail sont :

- le climat seul ne pourrait permettre d'expliquer la variation spatio-temporelle de la disponibilité quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraines. La prise en compte des autres composantes environnementales a rendu complexe cette étude au point où l'influence réelle du climat sur la sensibilité des hydrosystèmes souterrains n'a pas été très bien élucidée.
- la non couverture de tout le bassin sédimentaire côtier du Bénin par les données piézométriques disponibles. Ce qui a réduit le champ d'application de la méthode de

fluctuations piézométriques au secteur sud-est du plateau d'Allada. En effet, a été nécessaire le recours à l'utilisation de la méthode du bilan d'eau souterraine de Thornthwaite pour estimer une recharge potentielle des aquifères ;

- le traitement des données et l'analyse des résultats menées essentiellement au moyen d'outils statistiques et non de modélisation. Or, cette dernière en tant qu'approche conceptuelle, si elle est bien conduite, pourrait permettre de mieux appréhender les phénomènes étudiés.
- les résultats d'analyses bactériologiques pourraient, dans une certaine mesure, dépendre de la qualité des échantillons et non la qualité de l'eau à la source compte tenu des risques de contamination du matériel de prélèvement.
- l'analyse de la variation saisonnière de la qualité des eaux souterraines en octobre (fin de la saison pluvieuse) et en janvier (cœur de la grande saison sèche) a été faite sur un échantillon réduit au regard de l'étendu du bassin. Mais elle aurait dû être faite sur les quatre saisons qui caractérisent le climat subéquatorial du bassin sédimentaire côtier du Bénin ;
- cette étude s'est révélée complexe du fait que l'élaboration des stratégies de gestion durable des ressources en eaux souterraines devrait tenir compte, non seulement du climat, mais aussi des autres facteurs naturels et humains dont dépend la variation hydrologique et hydrochimique au niveau des hydrosystèmes ;
- enfin l'incertitude qui caractérise les projections pluviométriques et les changements que connaîtront les systèmes écologique, socioéconomique, sociopolitique, socioculturel peuvent compromettre les stratégies de gestion durable des ressources en eaux souterraines dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin.

Eu égard au diagnostic de l'environnement hydroclimatique et de la sensibilité des hydrosystèmes souterrains établi dans ce bassin et aux insuffisances du présent travail, les perspectives de continuation de cette recherche sont, entre autres :

1. reprendre la modélisation du climat du bassin sédimentaire côtier du Bénin et les projections notamment pluviométriques à l'aide du Modèle Climatique Régional PRECIS dans différentes conditions limites notamment ECHAM5 scénarios A2 et B2, à faible résolution horizontale 0,22°x0,22° (25kmx25km) et aux échelles temporelles réduites (2020 ; 2030 ; 2040, etc.) ;

2. procéder à la modélisation de la dynamique du système aquifère du bassin sédimentaire côtier du Bénin en tenant compte des changements environnementaux globaux (notamment les modifications du système climatique, l'élévation du niveau marin, l'utilisation des terres, l'accroissement démographique, l'évolution de la demande en eau) ;
3. caractériser, sur la base d'un nombre important d'échantillons d'eau de puits, de forages et de sources, les faciès hydrochimiques et la composition bactériologique des eaux souterraines au cours des quatre saisons du climat subéquatorial dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin ;
4. élaborer des scénarios de gestion durable des ressources en eaux au regard des nouvelles données de modélisation climatique, d'analyse de la qualité physico-chimique et bactériologique, des paramètres socioéconomiques et de l'évolution démographique.

Ces aspects scientifiques, qui permettront au présent travail d'être complet, devraient être pris en compte pour une gestion intégrée des ressources en eaux du bassin sédimentaire côtier du Bénin en particulier, de l'ensemble du Bénin en général.

BIBLIOGRAPHIE

Ababou R., 2004. Eléments d'hydrologie souterraine. Manuel de cours. INPT/ENSEEIHT-IMFT, Toulouse, France, 314 p.

ABE, 2001. Profil des potentialités et activités industrielles dans la zone littorale au Bénin : situation et perspectives d'aménagement. Note technique de gestion sur l'industrie : Etat des lieux, Préconisations du SDAL, Rapport, LIFAD, Cotonou, 87 p.

Adékambi E.C., Adamou B.Z., 2000. Contribution à la gestion des excréta, à l'approvisionnement en eau dans la ville de Cotonou en temps normal et en période d'inondation. Mém. de Maîtrise de Géographie, Université d'Abomey-Calavi. Cotonou, Bénin, 76 p.

Adjamossi P., 1994. Qualité de l'eau des puits et problèmes de santé à Cotonou. Mém. de Maîtrise de Géographie, Université d'Abomey-Calavi. Cotonou, Bénin, 107 p.

Adjovi C.L., 1991. Analyse statistique des précipitations dans le bas-Bénin : Etude de tendance et de persistance. Mémoire de maîtrise de Géographie, Université Nationale du Bénin, Abomey-Calavi, Bénin, 94 p.

Afouda A., Ould Baba Sy M., Gaye A.T., Cabral A., Nazoumou Y., Compaoré J.A., Sanoussi R., 2007. Impacts du changement et de la variabilité climatiques sur les ressources en eau des bassins versants Ouest Africains : Quelles perspectives ? In : *Adaptation aux changements climatiques et gestion des ressources en eau en Afrique de l'ouest*. Rapport de synthèse de Writeshop, Dakar 21-24 février, 23–31.

Afouda F., 1990. L'eau et les cultures dans le Bénin central et septentrional : étude de la variabilité des bilans de l'eau dans leurs relations avec le milieu rural de la savane africaine. Thèse de Doctorat, Institut de Géographie, Université Paris IV (Sorbonne), France, 428 p.

Agbaire O.P., Oyibo P.I., 2009. Seasonal variation of some physico-chemical properties of borehole water in Abraka, Nigeria. *African Journal of Pure and Applied Chemistry*, **3**(6), 116–118.

Ahoussinou A.S., 2003. Pollution fécale de la nappe phréatique et comportement des populations à Cotonou. Mémoire de Maîtrise de Géographie, Université d'Abomey-Calavi. Cotonou, Bénin, 92 p.

Aka A.A., Lubes H., Masson J.M., Servat E., Paturel J.E., Kouame B., 1997. Analyse de l'évolution temporelle des écoulements en Côte d'lvoire. Approche statistique et caractérisation des phénomènes. In : *PHI-V*, Documents Techniques en Hydrologie 1, UNESCO **16**, 47–63.

Akhtar M., Ahmad N., Booij M.J., 2008. The impact of climate change on the water resources of Hindukush-Karakorum-Himalaya region under different glacier coverage scenarios. *Journal of Hydrology*, doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.03.015.

Akindélé A.A., 2009. Interprétation socio-anthropologique des indicateurs environnementaux de la dynamique du climat dans le département du Plateau. Mémoire de maîtrise de Géographie, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 65 p.

Akpiti S., Clauer N., Houessou A., Lang J., Tisserant D., 1985. Datation isotopique K-Ar d'un niveau de sable glauconieux à la limite Paléocène-Eocène dans le bassin côtier béninois (Afrique de l'Ouest). *Journal of African Earth Sciences*. **3**(4), 487–490.

Alassane A., 2000. Contribution à l'étude hydrochimique de l'aquifère du Continental Terminal du plateau de Sakété dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Mémoire de DEA, Université Cheick Anta Diop, Dakar, Sénégal, 88 p. + annexes.

Alassane A., 2004. Etude hydrogéologique du Continental terminal et des formations de la plaine littorale dans la région de Porto-Novo (Sud du Bénin) : Identification des aquifères et vulnérabilité de la nappe superficielle. Thèse de Doctorat du 3ème cycle. Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal, 145 p. + annexes.

Albergel J., 1987. Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface : application aux petits bassins du Burkina-Faso. *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrology Regime and Water Resources* (Proc. Vancower Symposium). IAHS Publ. **168**, 355–365.

Allain S., 2006. Négocier la régulation territoriale du domaine de l'eau. Colloque Eau et Territoires, Atelier 3 - Tensions, partages et conflits, Lyon France, 4 p.

Allen G.R., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO, - 372 p.

Amani A., 2001. Assessment of Precipitation and Resources Variability across the Sahelian region. In: Gash, J.H.C., Odada, E.O., Oyebande, L., Schulz, R.E. *Report of the International Workshop on Africa's Water Resources*, Nairobi, 26-30 October 1999 (BAHC), 67–72.

Amoussou E., 2005. Variabilité hydro-climatique et dynamique des états de surface dans le bassin versant du Couffo. Mémoire de DEA, Université d'Abomey-Calavi, Bénin 105 p.

Amoussou E., 2010. Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, Dijon, France, 315 p.

Amran O., 1996. Régionalisation du bilan hydrique à l'aide de mesures satellitaires pour l'étude du fonctionnement des écosystèmes d'Afrique de l'Ouest. *Thèse de Doctorat*, Université Paul Sébatier de Toulouse, France, 221 p.

Ardoin-Bardin S., 2004. Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat Universté Montpellier II. 440 p.

Ardoin-Bardin S., Dezetter A., Servat E., Paturel E.J., Mahé G., Niel H., Dieulin C., 2009. Using general circulation model outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa. *Hydrological Sciences Journal*. **54**(1), 77–89.

Asano T., 1985. Artificial Recharge of Groundwater. Butterworth Publishers, Boston, Massachusetts, 69–127.

Azonsi F., 2002. Utilisation des aquifères du bassin sédimentaire côtier entre le Bénin et le Togo dans un contexte de variabilité climatique ; problèmes émergeants. *Managing Shared Aquifer Resources in Africa (ed. by Bo Appelgren)*, Proc. Int. Workshop, Tripoli, 2-4 June 2002. *IHP-VI*, Series on groundwater, **8**, 69–74.

Azonsi F., Dépraeterre C., 2004. Aspects prospectifs généraux sur la gestion intégrée des ressources en eau au Bénin et quelques pays limitrophes. *L'eau, patrimoine mondial commun*. 217–261.

Azontondé H.A., 1991. Propriétés physiques et hydrauliques des sols au Bénin. Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone. *Proceedings of the Niamey Workshop*, IAHS Publication., **199** : 249–258.

Ba M.I., 2005. Hydrogéochimie des elements majeurs, mineurs et traces dans les eaux de la nappe du Saloum. Thèse de Doctorat de 3ème cycle. Université Cheick Anta Diop, Dakar, Sénégal, 114 p.

Baba-Moussa A., 1994. Etude de la pollution bactériologique de la nappe phréatique à partir de d'une latrine en Afrique subtropicale. Thèse de Doctorat ès Sciences techniques. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausane, Suisse, 252 p.

Baglo M., Guèdègbé O.B., 2002. Faisabilité de la création des réserves biologiques dans les zones humides du sud-Bénin, Rapport principal PAZH, Cotonou, Bénin, 63 p.

Bahuchet S., 1997. Ethnoécologie, (http://lucy.ukc.ac.uk/Sonja/RF/Divdocs/Ethnoecologie.html) Consulté le 31 mars 2008.

Baillargeon S., 2005. Le krigeage : revue de la théorie et application par l'interpolation spatiale de données de précipitations. Mémoire pour l'obtention du grade de Maître es-sciences. Université Laval Québec, 137 p.

Bakalowicz M., 1979. Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse de Doctorat ès sciences, Paris VI, 269 p.

Barcelona M., Gibb J.P., Helfrich J.A., Garske E.E., 1985. Practical guide for groundwater sampling. Illinois State Water Survey (ISWS) Contrast Report, 374 p.

Barry B., Obuobie E., Andreini M., Andah W., Pluquet M., 2005. The Volta River Basin: Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. Comparative study of river basin development and management. Study Report. IWMI, 198 p.

Barry D.A., Parlange J.-Y., Haverkamp R., 1994. Short Communication, Falling-Head Ponded Infiltration with Evaporation - Comment. *Journal of Hydrology*, 162 : 211–213.

Bates B.C., Kundzewicz Z.W., Wu S., Palutikof J.P., éd., 2008. Le changement climatique et l'eau, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève, 236 p.

BCEOM/SOGREAH/ORSTOM, 1993. Évaluation hydrologique de l'Afrique subsaharienne. Rapport de pays: Bénin.

Bear J., 1972. Dynamics of fluids in porous media. Dover Publications, Inc., New York, 764 p.

Beltrando G., 2000. La climatologie : une science géographique. *L'Information géographique*, **64**(3), 241–261.

BGR Hannover/UNESCO, 2006. Groundwater Resources of the World. Transboundary aquifer systems Map. 1:50 000 000. Special edition 4th World Water Forum, Mexico City.

Bharati L., Lee K. H., Isenhart T. M., Schultz R.C., 2002. Soil-water infiltration under crops, pasture, and established riparian buffer in Midwestern USA. *Agroforestry Systems*, **56**: 249–257.

Böhlke J.-K., 2002. Groundwater recharge and agricultural contamination. *Hydrogeological Journal*, **10**,153-179.

Bois Ph., Obled Ch., Zin I., 2007. Introduction au traitement de données en hydrologie. Manuel de cours, Institut National Polytechnique de Grenoble. 7ème édition revue et complétée. Grenoble, France, 265 p.

Boko M., 1975. La plaine côtière du Dahomey à l'Ouest de Cotonou ; Thèse de Doctorat de 3ème cycle de Géographie Tropicale, Université de Dijon, 231 p.

Boko M., 1988. Climats et communautés du Bénin : Rythmes climatiques et rythmes de développement. *Thèse de Doctorat d'Etat* ès Lettres et Sciences Humaines. Université de Bourgogne, Dijon. 2 volumes, 608 p.

Boko M., 2001. Recherche en écologie urbaine à Cotonou : Cas des quartier périphériques du lac Nokoué entre Mènontin et le chenal. *Rapport final*, Cotonou, Bénin, 163 p.

Boko M., 2004. Religions, croyances et perceptions de l'environnement. Guide de séminaire de Tronc Commun, EDP, Université d'Abomey-Calavi, 16 p.

Bokonon-Ganta E. B., 1987. Les climats de la région du Golfe du Bénin (Afrique de l'ouest), Thèse de Doctorat de 3ème cycle. Université de Paris IV, Sorbonne, 248 p. + annexes.

Bonta V.J., Müller M., 1999. Evaluation of the Glugla method for estimating evapotranspiration and groundwater recharge. *Hydrological Sciences Journal*, **44**(5), 743–761.

Boukari M., 1998. Fonctionnement du système aquifère exploité pour l'approvisionnement en eau de la ville de Cotonou sur le littoral béninois. Impact du développement urbain sur la qualité des ressources. Thèse Doctorat ès-Science. Université Cheick Anta Diop de Dakar, Sénégal, 278 p. + annexes.

Boukari M., 2002. Réactualisation des connaissances hydrogéologiques relatives au bassin sédimentaire côtier du Bénin. Direction de l'Hydraulique, Cotonou, 134 p. + annexes.

Boukari M., 2007. Hydrogéologie de la République du bénin (Afrique de l'ouest). *Africa Geoscience Review*, **14**(3), 303–328.

Boukari M., Alassane A., 2007. Les ressources en eau du bassin sédimentaire côtier de la République du Bénin. *Africa Geoscience Review*, **14**(3), 283–301.

Boukari M., Alassane A., Dovonou F.A.L., Tossa A., Zogo D., 2006. Groundwater pollution from urban development in Cotonou City, Benin. Ed. Yongxin Xu, Brent Usher, In: *Groundwater pollution in Africa.* 125-138.

Boukari M., Viaene P., Azonsi F., 2008. Three-dimensional modelling of a coastal sedimentary basin of southern Benin (West Africa). In: *Applied Groundwater Studies in Africa*. Edited by Segun Adelana, Alan MacDonald. IAH selected papers on hydrogeology, **13**, 437–456.

Boukari, M., Moussa, O., Azonsi, F., Viaene, P., 2005. Model for the groundwater flow in the aquifers of the Continental Terminal and the littoral Quaternary of the coastal sedimentary basin of Benin (West Africa). In: *Integrated Water Resource Management of the Tropical River Basin (Proc. Conf.: Cotonou, Benin)*, p 28.

Boursin J.-L., Duru G., 1995. Statistique : Cours - Méthodes - Exercices. Vuibert, Paris,

Bouzid M., 1967. Données hydrogéologiques sur le bassin sédimentaire côtier du Dahomey. Projet FS/FAO-256 DAH ‘’Utilisation des eaux souterraines’’. *Rapport d’étude*, Cotonou, 28 p.

Bricquet J. P., Bamba F., Mahé G., Touré M., Olivry J. C., 1997. Variabilité des ressources en eau de l’Afrique Atlantique. *PHI-V*, **6**, 83–95.

Bricquet J.P., Mahé G., Bamba F., Olivry J.C., 1996. Changements climatiques récents et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali). *L’Hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement* (Actes de conférence de Paris, mai 1995). IAHS Publication. **238**, 157–166.

BRL/GERSAR-BETURE, 1995. Alimentation en eau potable : Plan d’investissement dans les villes de Cotonou, Porto Novo et Djougou. Tome 1 : Cotonou. SBEE, Cotonou.

Brunet R., Ferras R., Théry H., 1992. Les mots de la géographie, dictionnaire critique. Collection Dynamique du territoire. Montpellier-Paris : RECLUS – La documentation Française, 70 p.

Brunet-Moret Y., 1969. "Etude de quelques lois statistiques utilisées en hydrologie" *Cahiers ORSTOM série hydrologie*. **6**(3), 3–100.

Brunet-Moret Y., 1971. Etude de l'homogénéité de séries chronologiques de précipitations annuelles par la méthode des doubles masses. *Cahiers ORSTOM série hydrologie*, **VIII**(4), 3–31.

Brunet-Moret Y., 1979. Homogénéisation des précipitations. *Cahiers ORSTOM série hydrologie*, **16**(3-4), 147–170.

Burgeap, 1965. Etude hydrogéologique préliminaire pour l’alimentation en eau de Cotonou. Rapport d’étude, Ministère de la Coopération, Cotonou, 41 p.

Burgeap-BRGM, 1994. Projet d’alimentation en eau potable des zones lacustres des Départements de l’Atlantique et de l’Ouémé. Rapport final, Direction de l’Hydraulique, Cotonou, Bénin, 64 p.

Burton J., 2001. La gestion intégrée des ressources en eau par basin. Manuel de formation, Institut de l’énergie et de l’environnement de la Francophonie (IEPF). 260 p.

Calder I.R., 1993. Hydrologic effects of land-use change, in: *Handbook of hydrology*, edited by: Maidment D.R., McGraw-Hill, New York, USA, 13.1–13.50.

Callède J., Boulvert Y., Thiébaux J.P., 1992. Le bassin de l’Oubangui. *Coll. Monographies Hydrologiques*, ORSTOM, Paris.

Calow R., MacDonald A.M., 2009. What will climate change mean for groundwater supply in Africa? Background Note, Overseas Development Institute, 8 p.

Carter C.R., Parker A., 2009. Climate change, population trends and groundwater in Africa. *Hydrological Sciences Journal*, **54**(4), 676–689.

Casanova J., Brach M., Millot R., Négref Ph., Petelet-Giraud E., 2004. Projet PALEOHYD II – Paléohydrologie et géoprospectives: modèles conceptuels et processus d’acquisition de la chimie

des eaux dans les massifs granitiques. Rapport d'avancement. Rapport BRGM/RP-52880-FR. 66 p., 33 figures, 3 tableaux.

Casenave A., Valentin C., 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration, ORSTOM, Paris, Didactiques, 230 p+ 196 photos.

Casenave A., Valentin G., 1991. Influence des états de surface sur l'infiltration en zone sahélienne. *Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone* (Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991). IAHS Publication, **199**, 99–108.

Casenave A., Valentin G., 1996. Etats de surface et transposition des données hydrologiques. *L'hydrologie tropicale: géoscience et outil pour le développement* (Actes de la conférence de Paris, mai 1995). IAHS Publication, **238**, 225–233.

Cassou C., Guilyardi E., 2007. Modes de variabilité et changement climatique : Synthèse du quatrième rapport d'évaluation. *La Météorologie* – **59**, 22–30.

Castany G., 1963. Traité pratique des eaux souterraines. Paris : Dunod, 657 p.

Castany G., 1982. Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Ed. Dunod Université - Bordas, Paris, 238 p.

Castany G., Margat J., 1977. Dictionnaire français d'hydrogéologie. BRGM, Service Géologique National, 249 p.

Charbeneau R.J., Asgian R.G., 1991. Simulation of the Transient Soil Water Content Profile for a Homogeneous Bare Soil. *Water Resources Research*, **27**(6), 1271–1279.

Chen Z., Grasby S., Osadetz K., 2004. Relation between climate variability and groundwater levels in the upper carbonate aquifer, southern Manitoba, Canada. *Journal of Hydrology*, **290**(1–2), 43–62.

Chippaux J.-P., Houssier S., Gross P., Bouvier C., Brissaud F., 2002. Étude de la pollution de l'eau souterraine de la ville de Niamey, Niger. *Bull Soc Pathol Exot*, **94**(2), 119-123.

Choi W.J., Han G.H., Lee S.M., Lee G.T., Yoon K.S., Choi S.M., Ro H.M., 2007. Impact of land-use types on nitrate concentration and $\delta^{15}N$ in unconfined groundwater in rural areas of Korea. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **120**, 259-268.

Christensen J.H., Hewitson B., Busuioc A., Chen A., Gao X., Held I., Jones R., Kolli R.K., Kwon W.T., Laprise R., Magaña Rueda V., Mearns L., Menéndez C.G., Räisänen J., Rinke A., Sarr A., Whetton P., 2007. Regional Climate Projections. In: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds), *Climate Change 2007*: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.

Cissé Faye S., Sow N.R., Dieng N.M., Kaba M., Diouf O.C., Bocoum O., Faye S., 2008. Impact of land use on groundwater quality in the Thiaroye unsewered suburb (Dakar Senegal): Remote Sensing and GIS approach. *Coupling Sustainable Sanitation & Groundwater Protection.* Symposium, 14-17 October 2008 Hannover, Germany, Abstract Book, and Poster

Claasen H.C., 1982. Guidelines and techniques for obteining waters amples that accurately represent the water quality for an aquifer. US Geological Survey open file report 82-1024 49 p.

Coes L.A., Spruill T.B., Thomasson M.J., 2007. Multiple-method estimation of recharge rates at diverse locations in the North Carolina Coastal Plain, USA. *Hydrogeology Journal*, 15(4) : 773–788.

Cole S. 1981. Methods of analysis for long-term development issues. *UNESCO. Methods for Development Planning*. Paris: UNESCO Press.

Comlanvi F. M., 1995. Amélioration de la qualité des eaux de puits dans la ville de Cotonou : Cas de quelques quartiers. Mém. de Maîtrise de Géographie, Université d'Abomey-Calavi. Cotonou, Bénin, 77 p. + annexes.

Cool K.H., Vizy E.K., 2006. Coupled model simulations of the west African monsoon system: 20th century simulations and 21st century predictions. *Journal of Climate*, **19**, 3681–3703.

Cornevin R., 1962. Histoire du Dahomey. Ed. Berger Levrault, Paris, 568 p

Corradini C., Melone F., Smith R.E., 1994. Modelling infiltration during complex rainfall sequences. *Water Resources Research*, **30**(10), 2777–2784.

Cosgrove W., Rijsberman F.R., 2002. World Water Vision: Making Water Everybody's Business, Earthscan Publications Limited, London, 108 p.

Coulibaly K., 2005. Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau des puits de certains quartiers du district de Bamako. Thèse de Doctorat de Pharmacie. Université de Bamako, Mali, 69 p.

Coulibaly K.M., 1997. Evaluation du bilan hydrologique, de la variabilité climatique et du tarissement des cours d'eau par l'application de méthodes mathématiques dans le bassin versant du fleuve Sassandra (région de Buyo en Côte d'Ivoire). Mémoire de DEA en Sciences de l'Environnement, Université Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 80 p.

Crosbie R., Binning P., Kalma J., 2005. A time series approach to inferring groundwater recharge using the water table fluctuation method. *Water Resources Research* **41**(1), 1-9.

Dams J., Woldeamlak T. S., Batelaan O., 2008. Predicting land-use change and its impact on the groundwater system of the Kleine Nete catchment, Belgium. *Hydrology and Earth System Science*, **12**, 1369–1385.

Dejoux C., 1988. La pollution des eaux continentales africaines, Edition de l'ORSTOM, Paris, *Coll. Init. Doc. Tech.* N° 44 Tome I., 1-389.

Delin G., Healy R., Lorenz D., Nimmo J. 2007. Comparison of local- to regional-scale estimates of ground-water recharge in Minnesota, USA: *Journal of Hydrology*. **334**(1-2), 231–249.

Delin G.N., Falteisek J.D., 2007, Ground-Water Recharge in Minnesota: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2007-3002, 6 p.

Delin G.N., Healy R.W., Lorenz D.L., Nimmo J.R., 2007. Comparison of local- to regional-scale estimates of ground-water recharge in Minnesota, USA: *Journal of Hydrology*, **334**(1-2), 231-249.

Demarée R.G., Nicolis C., 1990. Onset of the Sahelian drought viewed as a fluctuation induced transition. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* **16**, 221–238.

Desrivières EV., Trystram EN., 1997. Evolution du trait de côte et impacts sur le littoral béninois. Ecole Navale et Groupe des Ecoles du Poulmic, Rapport de fin d'étude. 49 p.

Dhonneur G., 1974. Nouvelle approche des réalités météorologiques de l'Afrique occidentale et centrale. *Publications de l'ASECNA*, Dakar, 385–472.

Dione O., 1996. Evolution climatique récente et dynamique fluviale dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Thèse doct. Université Lyon III, Lyon, 415 p.

Diop Ngom F., Malou R., Dacosta H., Mendy A., 2002. Contrainte climatique des nappes d'eaux souterraines en zone soudano-séhélienne: cas de la nappe phréatique du bassin de la néma dans la région du sine au centre ouest du sénégal. *African Journal of Science and Technology (AJST).* Science and Engineering Series, **3**(1), 44-50.

Diop S., Rekacewicz P., 2003. Atlas Mondial de l'eau, une pénurie annoncée. Ed. Autrement. 60 p.

Direction de l'Hydraulique, 2000. Vision Eau 2025 Bénin. Rapport technique, Cotonou, Bénin, 28 p.

Donou T.B., 2007. Dynamique pluvio-hydrologique et manifestation des crues dans le bassin du fleuve Ouémé à Bonou. Mémoire de maîtrise de géographie. Université d'Abomey-Calavi, Bénin. 104 p.

Dounias E., 2006. Introduction à l'étude des ethnosciences : Définitions, champs d'application, bibliographie. Montpellier, 35 p.

Dray M., Giachello L., Lazzarotto V., Mancini M., Roman E., Zuppi G.M., 1989. Etude isotopique de l'aquifère crétacé du bassin côtier béninois. *Hydrogéologie* **3**, 167–177.

Efe S.I., Ogban F.E., Horsfall M. Jnr., Akporhonor E.E., 2005. Seasonal Variations of Physico-chemical Characteristics in Water Resources Quality in Western Niger Delta Region, Nigeria. *J. Appl. Sci. Environ. Mgt.*, **9**(1) : 191–195.

El-Ouafi M., 1993. Tarissement et vidange des réservoirs de la Liane (Nord de la France). *Hydrologie continentale*, **8**(2), 103-112.

Eltahir A.B., Gong C., 1996. Dynamics of wet and dry years in West Africa. *Journal of Climate*, **9**, 1030–1042.

Fakorèdé A.I.M., 2002. La gestion des ressources en eau par les communautés rurales de la sous-préfecture de Ouessè. Mémoire de maîtrise de Géographie., Université d'Abomey-Calavi, Benin, 122 p.

Falkenmark M., 1989. The massive water scarcity threatening Africa-why isn't it being addressed. *Ambio*, **18**(2), 112-118.

Falkenmark M., Widstrand C., 1992. Population and Water Resources, A Delicate Balance, *Population Bulletin*, **47**(3), 1-36.

FAO, 2009. ET_0 calculator. Land and Water Digital Media Series N° 36. Rome, Italy. *http://www.fao.org/nr/water/ET_0.html*.

Faye S., Diaw M., Ndoye S., Malou R., Faye A., 2008. Groundwater recharge and salinization in Senegal coastal semiarid regions: Implication of climate change. *Groundwater and Climate in Africa* (Proceedings of the Kampala Conference, June 2008) IAHS Publication. ***334-21***, 163–173.

Feddema J.J., 1998. Estimated impacts of soil degradation on the African water balance and climate. *Climate Research*, **10**, 127–141.

Ferrand A., 1965. Prospection hydrogéologique de la bordure nord du bassin sédimentaire du bas Dahomey. Rapport d'étude, Service de l'Hydraulique, 27 p.

Fetter C.W., 1988. Applied Hydrogeology. Merril Publishing Co., Columbus, Ohio. 592 p.

Fiorentino M., Gabriele S., 1984. A correction for the bias of maximum likelihood estimators of Gumbel parameters *Journal of Hydrology*, **73**, 39–49.

Fontaine B., Janicot S., 1993. L'évolution des idées sur la variabilité interannuelle récente des précipitations en Afrique de l'Ouest. *La Météorologie*, **8**(1), 28–53.

Fontaine B., Janicot S., Moron V., 1995. Rainfall anomaly patterns and wind field signals over West Africa in August (1958-1989). *Journal of Climate*, **8**, 1503–1510.

Foster S.S.D., 1990. Impacts of Urbanization on Groundwater. *IAHS Publication*, **198**, 187–207.

Frécault R., Pagney P., 1983. Dynamique des climats et de l'écoulement fluvial. Ed. Masson, Paris, 240 p.

Frécaut R., 1982. Eléments d'hydrologie et de dynamique fluviales. Tome 1 : Hydrologie et dynamique fluviales des régions chaudes et humides des basses latitudes. Publication Université Nancy II, Nancy, France, 147 p.

Freeze R.A., Cherry A.J., 1979. Groundwater. Prentice- Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J., 604 p.

Freyberg D.L., Reeder J.W., Franzini J.B., Remson I, 1980. Application of the Green-Ampt Model to Infiltration Under Time-Dependent Surface Water Depths. *Water Resources Research*, **16**, 517–528.

Fritsch J.-M., 1995. Occupation des sols et regimes hydrologiques : les enseignements des basins-versants guyanais. *Annales de Géographie*. **104**(581), 26–63.

Gaborit E., 2008. Modélisation Hydrologique du Bassin-versant de la rivière Saint-Charles. Mémoire de Master 2. Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris & École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts. Université Laval, Québec, Canada, 50 p.

Gadelle F., 1995. Le monde manquera t-il bientôt d'eau ? *Sécheresse* **1**(6), 9–14.

Gallopin G., Hammond A., Raskin P., Swart R., 1997. Branch Points: Global Scenarios and Human Choice. Stockholm Environment Institute, *PoleStar Series report* No. 7. Stockholm, Sweden, 55 p.

Gandaho P.S., 1994. Problème de pollution de la nappe phréatique de Cotonou : Etude comparative et perspectives d'aménagement. Mém. de Maîtrise de Géographie, Université d'Abomey-Calavi. Cotonou, Bénin, 84 p.

Gaye C.B., 1990. Etude isotopique et géochimique du mode de recharge par les pluies et de décharge des aquifères libres sous climat semi aride au Nord du sénégal. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal.

Géohydraulique, 1985a. Notice explicative de la carte hydrogéologique à 1/200 000 du bassin sédimentaire côtier du Bénin. Direction de l'Hydraulique, Cotonou, 23 p.

Géohydraulique, 1985b. Hydraulique villageoise dans les provinces de l'Atacora, du Mono et de l'Ouémé. Rapport final 1, Direction de l'Hydraulique, Cotonou, Bénin, 236 p.

Géohydraulique-BURGEAP, 1988. Projet d'hydraulique villageoise BOAD-Atlantique. *Rapport final* 2.052, Direction de l'Hydraulique, Cotonou, Bénin, 185 p.

GIEC, 2007. Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse. *www.ipcc.ch*.

GIEC, 2007. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, …, 103 p.

GIGG, 1987. Ville de Cotonou – Plan directeur : Alimentation en eau potable. Tome I. Les ressources en eau. Rapport d'étude. Cotonou, Bénin, 90 p. + Annexes.

Gnaha E.F.C., Adjadji A.Ch., 2001. Evolution quantitative et qualitative des eaux souterraines captées dans le périmètre de pompage intensif de Godomey : Impact sur l'approvisionnement en eau potable de l'agglomération de Cotonou. Université d'Abomey-Calavi.

Gonzalez-Hidalgo J.C., De Luis M., Raventos J., Sanchez J.R., 2001. Spatial Distribution of Seasonal Rainfall Trends in A Western Meditarranean Area. *International Journal of Climatology*, **21**, 843–860.

Gordon C., Cooper C., Senior C.A., Banks H., Gregory J.M., Johns T.C., Mitchell J.F.B., Wood R.A., 2000. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, **16**, 147–168.

Goula A.T.B., Kouassi W.F., Fadika V., Kouakou E.K., Kouadio G.B., Koffi K., Bamory K., Inza D., Savane I., 2009. Impacts du changement et de la variabilité climatiques sur les eaux souterraines en zone tropicale humide: Cas de la Côte d'Ivoire. *Groundwater and Climate in Africa* (Proceedings of the Kampala Conference, June 2008), IAHS Publication, **334**-21, 190–202.

Goula B.T.A., Konan B., Brou Y.T., Savane I., Fadika V., Srohourou B., 2007. Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale: Cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois lognormale et de Gumbel. *Hydrological Sciences Journal*, **52**(2), 49–67.

Goula B.T.A., Savane I., Konan B., Fadika V., Kouadio G.B., 2006. Impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau des bassins du N'zo et du N'zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide). VertigO - La revue en sciences de l'environnement, **7**(1), 1–12.

Gourcy L., 1994. Fonctionnement hydrogéochimique de la cuvette lacustre du fleuve Niger (Mali). Thèse Doct. Sciences, Université Paris XI, Orsay, 271 p.

Guillaumet J.L., 1967. Recherches sur la végétation et la flore de la région du bas-Cavally (Côte d'Ivoire). Mémoire de l'ORSTOM, Paris, France, 20 p.

GW-MATE, 2004. Briefing Note Series, on Sustainable Groundwater Management: Concepts and Tools, World Bank, Global Water Partnership Associate Program.

GWP, 2000. La gestion intégrée des ressources en eau, comité technique consultatif. TAC Background, paper n° 4, 78 p.

GWP, 2002. Partager la connaissance pour une gestion durable des ressources en eau équitable efficace et durable - Les outils. Sri Lanka / Stockholm, Sweden, 120 p.

GWP, 2003. Partager l'information sur la gestion intégrée des ressources en eau. IWRM Toolbox, Stockholm, Suède, 130 p.

Hafmann N., Mortsch L., Donner S., Dunacan K., Kreutzwiser R., Kulshreshtha S., Piggott A., Shellenberg S., Schertzer B., Slivizky M., 2000. Climate change and variability: impacts on Caanadian water. Environmental Adaptation Research Group, Environment Canada, University of Waterloo, 120 p.

Hall D., Risser D., 1993. Effects of agricultural nutrient management on nitrogen fate and transport in Lancaster County, Pennsylvania. *Water Resources Bulletin*, **29**, 55-76.

Harr R.D., McCorison F.M., 1979. Initials effects of clearcut logging on size an timing of peak flows in a small watershed in Western Oregon. *Water Resources Research*, **15**(1), 90–94.

Healy W.R., Cook G.P., 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, **10**, 91–109.

Heath R.C., 1994. Groundwater Recharge in North Carolina. Prepared for the Groundwater Section Division of Environmental Management North Carolina Department of Environment, Health, and Natural Resources, 57 p.

Hèdiblè S.C., 2007. Perceptions et stratégies d'adaptation des communautés rurales du département de l'Atlantique face à la dégradation de la qualité de l'eau de consommation. *Thèse de doctorat*, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 215 p.

Henriksen A., Kirkhusmo L.A., 2000. Effects of clear-cutting of forest on the chemistry of a shallow groundwater aquifer in southern Norway. *Hydrology and Earth System Sciences*, **4**, 323–331.

Heppner C.S., Nimmo J.R., 2005. A computer program for predicting recharge with a master recession curve: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5172, 8 p.

Hirschboeck K.K., 1988. Flood climatology. V.R. Baker et al. (eds), *Flood Geomorphology*. New York: John Wiley & Sons, 27–49.

Hiscock K., Tanaka Y., 2006. Potential impacts of climate change on groundwater resources: from the high plains of the U.S. to the flatlands of the U.K. *National Hydrology Seminar 2006*, 19–26.

Holtan H.N., 1961. A Concept for Infiltration Estimates in Watershed Engineering. USDA-ARS 41-51.

Horton R.E., 1940. An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Science Society of America Proceedings* **5**, 399–417.

Houessou A., Lang J., 1978. Contribution à I'étude du Continental terminal dans le Bénin méridional. *Bull. Sri. Géol.* **31,** 137–149.

Houndénou C., 1992. Variabilité pluviométrique et conséquences socio-écologiques dans les plateaux du Bas-Bénin (Afrique de l'ouest). Mémoire de DEA, Université de Bourgogne, Dijon, 90 p. + annexes.

Houndénou C., 1999. Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide. L'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation. Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne, Dijon, France, 390 p.

Houndjahoué C.N., 1999. Contribution cartographique à l'étude des climats du Bénin. Mémoire de maîtrise de Géographie. FLASH/UNB, 60 p. + annexe.

Houndji S., Togonou Z. C., 1992. Les eaux souterraines : pollution des puits artisanaux et modernes : cas du cordon littoral de l'Est du chenal de Cotonou. Mémoire de Maîtrise de Géographie, Université d'Abomey-Calavi. Cotonou, Bénin, 78 p. + Annexes.

Hounkannounon J., 1979. Les précipitations en République Populaire du Bénin (d'après la période de 1961-1970). Mémoire de maîtrise de Géographie. Université Nationale du Bénin, Abomey-Calavi, Bénin 47 p. + annexes.

Hounslow W.A., 1995. Water quality data. Analysis and Interpretation. Lewis Publishers, New York, United States, 397 p.

Hountondji P.J, Mètèhoué G.P., Adandé A.B., dah-Lokonon G.B., Tchitchi T.Y., 1994. Les savoirs Endogènes – Pistes pour une recherche. Edition Karthala, Paris, 345 p.

Houssou S.C., 1998. Les bioclimats humains de l'Atacora et leurs implications socio-économiques dans le Nord-Ouest du Bénin. Thèse de Doctorat de Géographie. Université de Bourgogne, Dijon, France, 336 p.

Hubert P., Bendjoudi H., 1998. A propos de la distribution statistique des cumuls pluviométriques annuels : Faut-il en finir avec la normalité ? *Revue des Sciences de l'Eau*, **11**(4), 617-630

Hubert P., Carbonnel J.P., Chaouche A., 1989. Segmentation des séries hydrométriques. Application à des séries de précipitations et de débits d'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, **110**, 349–367.

Hudson D.A., Jones R.G., 2002. Regional climate model simulations of present-day and future climates of Southern Africa. Technical Notes No. 39. UK Met Office Hadley Centre, Bracknell, 42 p.

Hughes R.M., Larsen D.P., 1988. Ecoregions: an approach to surface water protection. *Journal of Water Pollution Control Federation* **60**(4), 486–493.

IGIP-GKW-GRAS, 1989. Plans directeurs et étude d'ingénierie pour l'alimentation en eau potable et l'évacuation des eaux pluviales, des eaux usées et déchets solides: ville de Cotonou. Rapport final, SBEE, Cotonou, Bénin, 90 p.

IMPETUS, 2005. Benin Atlas-Research results version 0.7. IMPETUS, Remote Sensing Research Group, University of Bonn, Bonn.

IPCC, 1996. Climate Change 1995, Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific-technical analyses, London, Cambridge Uni. Press.

IPCC, 1998. The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability, London, Cambridge University Press.

IPCC, 2001. Incidences de l'évolution du climat dans les régions : Rapport spécial sur l'Evaluation de la vulnérabilité en Afrique. Island Press, Washington. 53 p.

IPCC: Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., and Miller, H. L., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 996 p.

Iqbal M.Z., Krothe N.C., Spalding R.F., 1997. Nitrogen isotope indicators of seasonal source variability to groundwater. *Environmental Geology* **32**, 210–218.

IRB (Instituto Recerche Breda), 1987. Etude de la cartographie géologique et prospection minière de reconnaissance au sud du 9ème parallèle. Rapport technique, OBEMINES, Cotonou, Bénin, 80 p. + annexe.

Janicot S., 1989. Variabilité des précipitations en Afrique de l'Ouest et circulations quasi-stationnaires durant une phase de transition climatique. Thèse de Doctorat. Université de Paris VI, 600 p.

Janicot S., 1992. Spatiotemporal variability of West African Rainfall. Part I: Regionalization and typings. *Journal of Climate*, **5**(5), 489–497.

Janicot S., 2002. La mousson d'Afrique de l'Ouest. Des téléconnexions à la variabilité synoptique. Synthèse d'activité scientifique. Thèse HDR, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), 104 p.

Janicot S., Fontaine B., 1993. L'évolution des idées sur la variabilité interannuelle récentes des précipitations en Afrique de l'Ouest. *La Météorologie*, **8**(1), 28–53.

Jensen J.R., 1996. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. Prentice Hall Series in *Geographic Information Science*. Upper Saddle River, New Jersey: Keith C. Clarke, second edition.

Johnson A.I., 1967. Specific yield – compilation of specific yields for various materials. US Geological Survey, Water Supply Paper 1662-A, 60 p.

Joly M., Voldoire A., Douville H., Terray P., Royer J.-F., 2006. African monsoon teleconnections with tropical SSTs in a set of IPCC AR4 coupled models. *Climate Dynamic*, 29, 1-20, DOI:10.1007/s00382-006-0215-8.

Jones, R.G., Noguer, M., Hassell, D.C., Hudson, D., Wilson, S.S., Jenkins, G.J. and Mitchell, J.F.B., 2004. Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS, Met Office Hadley Centre, UK, 44 p

Kansakar R. D., 2006. Understanding Groundwater for Proper Utilization and Management in Nepal. *Groundwater Research and Management: Integrating Science into Management Decisions*. IWMI, pp 95–104.

Katz, B.G., Hornsby H.D., Bohlke J.K., Mokray M.F., 1999. Sources and chronology of nitrate contamination in spring waters, Suwannee River Basin, Florida. U.S. Geological Survey Water Resources Investigative Report 99-4252. Tallahassee, FL.

Khan I.A., Khan A.A., 1985. Physico-chemical conditions in Seikha Jheel at Aligarh. *Journal of Environment Ecology*, **3**, 269–274.

Klassou S.D., 1996. Evolution climato-hydrologique récente et conséquences sur l'environnement : l'exemple du basin versant du fleuve Mono (Togo-Bénin). Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux III, France, 472 p.

Konmy R. D., 2005. Les latrines écologiques, une nouvelle approche de gestion des excréta : Cas de Communes de Cotonou et d'Abomey-Calavi. Mémoire de maîtrise de Géographie, Université d'Abomey-Calavi. Cotonou, 91 p.

Korkmaz N., 1988. The estimation of groundwater recharge from water level and precipitation data. *Journal of Islamic Academy of Sciences* **1**(2), 87–93.

Kortatsi K.B., 2007. Hydrochemical framework of groundwater in the Ankobra basin, Ghana. *Aquat. Geochem.*, **13**, 41–74.

Kortatsi K.B., Anku A.S.Y., Anornu K.G., 2007. Characterization and appraisal of facets influencing geochemistry of groundwater in the Kulpawn sub-basin of the White Volta Basin, Ghana. *Environmental Geology*. DOI 10.1007/s00254-008-1638-9.

Kortatsi K.B., Tay C., Hayford E., Dartey G., Anornu G., 2008. Hydrogeochemical evaluation of groundwater in the Lower Offin Basin of Ghana. *Environmental Geology Journal*. **53**(8), 1651–1662.

Kostiakov A.N., 1932. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for the purposes of amelioration. *Trans. Com. Int. Soc. Soil Sci*. 6th Moscow A: 17–21.

Kouamé K. F., Bernier M., Gone D.L., Saley B.M., Lefèbvre R., Soro N., Koudou A., 2007. Intégration de données géospatiales dans un modèle hydrologique distribué pour la simulation des écoulements des eaux en milieu tropical humide de côte d'ivoire (Afrique de l'ouest). *Revue Télédétection*, 2007, **7**(1-2-3-4), 217–235.

Kouchadé M.O., 2002. Evaluation de la pollution organique et bactériologique due aux excréta, aux eaux usées et aux déchets solides dans la lagune de Cotonou. Mém. de Maîtrise de Géographie, Université d'Abomey-Calavi. Cotonou, Bénin, 66 p.

Koudjrohèdé L., 1996. Gestion des ressources en eau sur les sites urbains et péri-urbains de Porto-Novo, Mémoire de Maîtrise de Géographie, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 153 p.

Kumar C.P., 1993. Estimation of Ground Water Recharge due to Rainfall by Modelling of Soil Moisture Movement. National Institute of Hydrology, Technical Report No. TR-142, 1992-93, 66 p.

Kundzewicz W.Z., Döll P., 2009. Will groundwater ease freshwater stress under climate change? *Hydrological Sciences Journal*, **54**(4), 665–675.

L'Hôte Y., Mahé G., Somé B., Triboulet J.P., 2002. Analysis of a Sahelian annual rainfall index updated from 1896 to 2000; the drought still goes on. *Hydrological Sciences Journal*, **47**(4), 563–572.

Lacombe G., 2003. Compréhension des stratégies d'adaptation à la variabilité des pluies en riziculture inondée par la modélisation : Cas du bassin versant de la Lam Dom Yaï, région Nord-est de la Thaïlande. Mémoire de DEA, Science de l'Eau, Montpellier II, France, 104 p.

Laffly D., 2006. Régression multiple : principes et exemples d'application. UMR 5 603 CNRS, Université de Pau et des Pays de l'Adour. France, 33 p.

Laibi R.A., Affognon A., 2001. Les formations réservoirs gréseux du bassin sédimentaire du Bénin en offshore. Mémoire de maîtrise, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 52 p.

Lakognon M.H., 2000. Contraintes d'approvisionnement en eau potable des populations d'une région hydrogéologiquement difficile : La sous-préfecture de Toffo dans le Bénin Méridional. Rapport de fin de Maîtrise ès-Sciences de la nature, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 40 p.

Lallahem A., 2002. Structure et modélisation hydrodynamique des eaux souterraines: Application à l'aquifère crayeux de la bordure nord du bassin de Paris. Thèse de Doctorat. Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 219 p.

Lamachère J.M., Puech C., 1995. Télédétection et régionalisation de l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration des sols en Afrique sahélienne et Nord-soudanienne. *Régionalisation en hydrologie, application au développement.* Edit. Scient. L. Le Barbé et E. Servat. Actes des VIIIes journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, 22-23 septembre 1992; ORSTOM Editions, colloques et séminaires, 205–228.

Lamb, P.J., 1982. Persistence of Subsaharan drought. *Nature*, London, **299**: 46-47.

Lambin E., Baulies X., Bockstael N., Fischer G., Krug T., Leemans R., Moran E.F., Rindfuss R.R., Skole D., Turner II B.L., Vogel C., 1999. Land-Use and Land-Cover change: implementation strategy, IGBP Report n° 48/IHDP Report N°.10, IGBP.

Lang J., Kogbé C., Alidou S., Alzouma K., Bellion C., Dubois D., Durand A., Guiraud Houessou A., de Klasz I., Roman E., Salard-Chelboldaeff M., Trichez J., 1990. The Continental Terminal in West Africa. *Journal of African Earth Sciences*, **10**(1/2), 79–99.

Lang J., Kogbé C., Alidou S., Alzouma K., Dubois D., Houessou A., Trichet J., 1986. Le Sidéolitique du Tertiaire ouest-africain et le concept du Continental terminal. *Buil. Soc. Géol.* France, **8**(t. II, 4), 605–622.

Lang J., Paradis. O., Oyédé L.M., 1988. Le domaine margino-littoral du Bénin (Golfe de Guinée - Afrique de l'Ouest) : Age holocène et mise en place marine des "sables jaunes". *J.A.E.S.*, **7**(5/6), 829–833.

Laporte N., 1990. Etude de l'évolution spatio-temporelle de la végétation tropicale : Utilisation des données satellitaires NOAA/AVHRR sur l'Afrique de l'Ouest. Thèse de 3ème cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse.

Lavelle P., 1983. The soil fauna of tropical savannas. II. The Earthworms. *Tropical savannas*, Bourlière Edn, Elsevier, 485–504.

Le Barbé L., Alé G., Millet B., Texier H., Borel Y., Gualde R., 1993. Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin. Edition ORSTOM, 540 p.

Le Barbé L., Lebel T., 1997. Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990. *Journal of Hydrology*, **188**-189, 43-73.

Le Barbé L., Lebel T., Tapsoba D., 2002. Rainfall variability in West Africa during the years 1950-90. *Journal of Climate*, **15**, 187-202.

Le Goulven P., Aleman M., 1992. Régionalisation climatique (pluie et ETP) dans les Andes équatoriennes, méthodologie, résultats et application. *Régionalisation en hydrologie, Application au développement*, 8° Journées hydrologiques de l'ORSTOM, 59-83.

Lebel T., Didhiou A., Laurent H., 2003. Seasonal cycle and interannual variability of the Sahelian rainfall at hydrological scales. *J. Geoph. Res.*, **108**(D8), 8389, doi:10.1029.

Ledoux E., 2003. Modèles mathématiques en hydrogéologie. Module de cours, Centre d'Informatique Géologique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 133 p.

Lee A.F.S., Heghinian S.M., 1977. A shift of the mean level in sequence of independent normal random variables: A bayesian approach. Technometrics, **19**(4): 503–506.

Lefebvre R., 2003. Ecoulement dans les milieux poreux saturés et les aquifères. In Ecoulement multiphasique en milieux poreux. Module de cours, Université Laval, Canada, 44 p.

Legates D.R., Mather J.R., 1992. An evaluation of the average annual global water balance. *Geographical Review*, **82**, 253–267.

Lerner D.N, Issar A.S., Simmers I., 1990. Groundwater recharge: A guide to understanding and estimating natural recharge. *International Contributions to Hydrogeology*, 8, Heise, Germany.

Leroux M., 1980. Le climat de l'Afrique tropicale. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Dijon 4T, 427 p.

Lévêque C., Van der Leeuw S. 2003. Quelles natures voulons-nous ? Pour une approche socio-écologique du champ de l'environnement. (Coll. Environnement). 328 p.

Liénou G., Mahé G., Paturel J.E., Servat E., Sighomnou D., Ekodeck G.E., Dezetter A., Dieulin C., 2008. Evolution des régimes hydrologiques en région équatoriale camerounaise: un impact de la variabilité climatique en Afrique équatoriale? *Journal des Sciences Hydrologiques.* **53**(4): 1–13.

Lillesand T.M, Kiefer R.W., 2000. Remote sensing and image interpretation. Wiley, 4e Edition.

Lincoln M.A, Marengo J., 2009. Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modelling system over South America. *Theor. Appl. Climatol.*, doi: 10.1007/s00704-009-0165-2.

Liu J.Y., 2000. Study of spatial-temporal feature of modern land-use change in China: Using remote sensing techniques. *Quaternary Sciences*, **20**(3), 229–239.

Liu J.Y., Liu M.L., Zhuang D.F., Zhang Z.X., Deng X.Z., 2003. Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995–2000. *Science in China* (D) **46**, 373–384.

Lotspeich F.B., 1980. Watersheds as the basic ecosystem: this conceptual framework provides a basis for natural classification system. *Water Resources Bulletin* **16**(4), 581–586.

Lu X., 2006. Guidance on the Development of Regional Climate Scenarios for Application in Climate Change Vulnerability and Adaptation Assessments within the Framework of National Communications from Parties not Included in Annex I to the United Nations Framework Convention on Climate Change, National Communications Support Programme, UNDP-UNEP-GEF New York, USA, 42 p.

Lubès H., Masson J-M., Raous P., Tapiayu M., 1994. Logiciel de calculs statistiques et d'analyse fréquentielles adapté à l'évaluation du risque en hydrologie. Manuel de calcul. ORSTOM, Paris, 140 p.

Macdonald M.A., Calow C.R., Macdonald J.M.D., Darling G.W., Dochartaigh O.E.B., 2009. What impact will climate change have on rural groundwater supplies in Africa? *Hydrological Sciences Journal*, **54**(4), 690–703.

Mahé de Boislandelle H., 1998. Dictionnaire de gestion : Vocabulaire, concepts et outils. Economica ; Paris, 517 p.

Mahé G., Citeau J., 1993. Relation océan-atmosphère-continent dans l'espace africain de la mousson Atlantique; Schéma général et cas particulier de 1984. *Veille Climatique*, **94**, 34–54.

Mahé G., L'Hôte Y., Olivry J.C., Wotling G., 2001. Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa - 1951-1989. *Hydrological Sciences Journal*, **46**(2), 211–226.

Mahé G., Olivry J.C., 1995. Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'ouest et centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, **6**(1), 109–17.

Maïga S.A., 2005. Qualité organoleptique de l'eau de consommation produite et distribuée par l'EDM.SA dans la ville de Bamako : Evaluation saisonnière. Thèse de Doctorat en Pharmacie, Université de Bamako, Mali, 77 p.

Maître V., Jenni R., 2007. Etude bibliographique sur la relation forêt-eaux souterraines. Forum broyard de la forêt et du bois, Projet-pilote. Fribourg, Suisse, 18 p.

Maliki A.R., 1993. Etude hydrogéologique du littoral béninois dans la région de Cotonou et ses environs. Thèse de Doctorat de 3ème cycle. Université Cheick Anta Diop, Dakar, Sénégal, 116 p. + annexes.

Malou R., Mudry J., Saos J.L., 1991. Recharge pluviale de l'aquifère superficiel de la vallée de Baïla (Basse Casamance, Sénégal). *Hydrogéologie*, **2**, 107–116.

Mama V.J., Orekan O.A.V., Houndagba C.J., Azontondé A., Toni E., Akpassonou P., Adambiokou-A.J., Hounmènou A., 1998. La Gestion de l'Information sur les Sols et les Eaux pour la Sécurité Alimentaire au Bénin. Atelier sous-régional sur la gestion de l'information des sols et des eaux pour la sécurité alimentaire, FAO/CENATEL, Rapport technique, Cotonou, 45 p.

Mannerkoski H., Finer L., Piirainen S., Starr M., 2005. Effect of clear-cutting and site preparation on the level and quality of groundwater in some headwater catchments in eastern Finland. *Forest Ecology and Management*, **220**, 107–117.

Marengo J.A., Jones R., Alvesa B.L.M., Valverdea M.C., 2009. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modelling system. *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.1863.

Marsily G., 1986. Quantitative hydrogeology. Academic Press, San Diego, CA, 440 p.

Masson J.M., Lubès H., 1991. Méthodes des moments de probabilité pondérés: application à la loi de Jenkinson. *Hydrologie Continentale* Ed. ORSTOM **6**(1), 67-84.

Mather J.R., 1991. A history of hydroclimatology. *Physical Geography*, **12**, 260–273.

McCabe G.J.Jr., Wolock D.M., 1992. Effects of climatic change and climatic variability on the Thornthwaite moisture index in the Delaware River Basin. *Climatic Change*, **20**, 143–153.

McCarty P.L., 2008. The Insidious Nature of Groundwater Contamination Groundwater Contamination - The Great Need for Protection: The Great Need for Protection. *Coupling Sustainable Sanitation & Groundwater Protection*. Symposium, 14-17 October 2008 Hannover, Germany, Conference presentation. 35 p.

Mdaghri-Alaoui A., Eugster W., 2001. Field determination of the water balance of the Areuse River delta, Switzerland. *Hydrological Sciences Journal*, **46**(5) 747–760.

Meddi H., Meddi M., 2004. Sécheresse et spatialisation des précipitations dans le nord ouest de l'Algérie. *Coll Intern. Terre et eau. Annaba* : Centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides (CRSTRA).

Mileham L., Taylor G.R., Todd M., Tindimugaya C., Thompson J., 2009. The impact of climate change on groundwater recharge and runoff in a humid, equatorial catchment: sensitivity of projections to rainfall intensity. *Hydrological Sciences Journal*, **54**(4), 727–738.

Milville F., 1985. Méthodes d'évaluation de la recharge en zone semi-aride. Etude bibliographique. Mémoire de DEA, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France, 63 p.

MMEE, 2006. Etude des systèmes de gestion / utilisation de l'eau et définition des actions prioritaires de valorisation locale des ressources eau dans une approche gire au Bénin. Volume 1 - Etat des lieux de la gestion des ressources en eau du Bénin. Rapport technique, Cotonou, 121 p.

MMEH, 2003. Etat des lieux du cadre juridique et institutionnel du secteur de l'eau. Programme AGRE, Direction de l'Hydraulique/DANIDA, Document-Guide d'atelier, Cotonou 75 p.

Mondjannagni C.A., 1969. Contribution à l'étude des paysages végétaux du bas-Dahomey. *Annales de l'Université d'Abidjan.* Série G. Tome 1, Fascicule 2. Ed. Université d'Abidjan, 186 p.

Morel-Seytoux H.J., 1984. From Excess Infiltration to Aquifer Recharge: A Derivation Based on the Theory of Flow of Water in Unsaturated Soils. Water Resources Research, **20**(9), 1230–1240.

Moron V., 1994. Guinean and Sahelian rainfall anomaly indices at annual and monthly scales (1933-1990). *International Journal of Climatologie*, **14**, 325–341.

Moron V., 1996. Régionalisation et évolution des précipitations tropicales annuelles (1946-1992), *Sécheresse / Changements planétaires*, **7**, 25–32.

Mudry J., 1987. Apports du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés. Thèse de Doctorat ès sciences naturelles, Université Besançon, Paris.

Naiman R.J., Lonzarich D.G., Beechie T.J., Ralph S.C., 1992. General principles of classification and the assessment of conservation potential in rivers. In: *Rivers Conservation and Management*. Boon P., Calow P. & Petts G. eds., Wiley & Sons, 93–123.

Nakicenovic N. (ed.), 2000. Global Greenhouse Gas Emissions Scenarios: Five Modelling Approaches. Technological Forecasting and Social Change, **63**(1-2), 105–371.

Narayani N., 1990. Seasonal changes in abiotic parameters of eutrophic wetlands (lower lake, Bhopal). *Advances in Environmental Biopollution*. (Ed.) Shula, A.C.; Vandana, A., Trivedi, P.S. and Pandey, S.N. A.P.H. publishing Corporation, New Delhi, 155–163.

Nazoumou Y., 2002. Impact des barrages sur la recharge des nappes en zone aride : étude par modélisation numérique sur le cas de Kairouan (Tunisie centrale). Thèse de Doctorat, ENIT, Tunisie, 221 p.

Nazoumou Y., 2002. Impact des barrages sur la recharge des nappes en zone aride : étude par modélisation numérique sur le cas de Kairouan (Tunisie centrale). Thèse de Doctorat, ENIT, Tunisie, 221 p.

Ndione J.A., Bicout D.J., Mondet B., Lancelot R., Sabatier P., Lacaux J.P., Ndiaye M., Diop C., 2005. Conditions environnementales associées à l'émergence de la fièvre de la vallée du Rift (FVR) dans le delta du fleuve Sénégal en 1987. *Environnement, Risques & Santé* − **4**(2), 5–10.

Newcomer R.D., Thornton C.E., Liikala T. L., 2002. Groundwater Chemistry and Hydrogeology of the Upper Saddle Mountains Basalt-Confined Aquifer South and Southeast of the Hanford Site. U.S. Department of Energy, Washington, US, 65 p.

Ngounou N. B., Mudry J., Sarrot R. J., 2007. Groundwater recharge from rainfall in the Southern Border of Lake Chad in Cameroon. World Applied Sciences Journal **2**(2), 125–131.

Nicholson S.E., 2000. The nature of rainfall variability over Africa on time-scales of decades to Millenia. *Global and Planetary Change*, **26**, 137–158.

Nicholson S.E., Kim J., 1997. The relationship of the El Niño-Southern oscillation to African rainfall. *International Journal of Climatology*, **17**, 117–135.

Oaksford E.T., 1985. Artificial Recharge: Methods, Hydraulics, and Monitoring. In: Asano T. (ed) *Artificial Recharge of Groundwater*. Butterworth Publishers, Boston, Massachusetts, 69–127.

Odekunle T.O., Eludoyin A.O., 2008. Sea surface temperature patterns in the Gulf of Guinea: their implications for the spatio-temporal variability of precipitation in West Africa. *International Journal of Climatology*. Published online in Wiley InterScience DOI: 10.1002/joc.1656.

Odoulami L., 2009. La problématique de l'eau potable et la santé humaine dans la ville de Cotonou (République du Bénin). Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 230 p.

Ogolo E.O., 2007. A comparative method of estimation energy limited evaporation over a Tropical Humid station in Ibadan, Nigeria. *Journal of Engineering and Applied Sciences* **2**(5): 897–903.

Ogouwalé E., 2006. Changements climatiques dans le Bénin méridional et central : indicateurs, scénarios et prospective de la sécurité alimentaire. Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 302 p.

Olivry J.C., 1993. De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies. Actes des journées hydrologiques - Centenaire Maurice Pardé; Grenoble, 22-24 sept.1993. *Les dossiers de la revue de géographie alpine*. **12**, 101-112

Olivry J.C., 1996. Etudes régionales sur les basses eaux : les effets durables du déficit des précipitations sur les étiages et les tarissements en Afrique de l'ouest et du centre. XII*èmes* Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, 14 p.

Olivry J.C., 1997. Long-term effects of rain shortage: the ill rivers of Werstern and Central Africa. In: *FRIEND troisième rapport : 1994-1997*. UNESCO-IHP, 158–62.

Olivry, J.C., Bricquet, J.P., Mahé, G., 1998. Variability of flood strength over the great streams of intertropical Africa and incidence of the fall of the basic runoffs over the past two decades. *Proc. Int. Conf. of Abidjan on the Variability of Water Resources in Africa in 20th Century*, IAHS Publ. **252**, 189–197.

OMM, 1983. Guide des Pratiques Hydrologiques - Vol. II : *Analyse, prévision et autres applications. Organisation Météorologique mondiale*. Publi. N° 168 Genève, Suisse.

OMM, 1992. Vocabulaire météorologique international. Deuxième édition, N° 182. Genève, Suisse, 784 p.

OMM, 2006. Hydrologie. Vol. III, Document de base N° 2, Genève Suisse, 104 p.

Opoku-Ankomah Y., Amisigo B.A. 1998. Rainfall and runoff variability in the southwestern river system of Ghana. *Variability of Water Resources in Africa in the 20th Century*, International Conference Proceeding, Abidjan, IAHS Publication, **252**, 307–314.

Orange D., 1992. Hydroclimatologie du Fouta Djalon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique. Sciences Géologiques, Mémoire No.93, Strasbourg, 198 p.

Orange D., Feizouré C., Wesselink A., Callède J., 1995. Variabilités hydrologiques de l'Oubangui à Bangui au cours du XXème siècle. *Proc. Journées scientifiques de Friend-AOC*. UNESCO, Paris.

Orékan, V.O.A., 2007. Inventaire Forestier National – Elaboration de la carte forestière, Rapport final pour DFS-CENATEL-MAPS GEOSYSTEMS dans le cadre du projet bois de feu, phase 2, PBF II, 52 p.

Oren O., Yechieli Y., Bohlke J.K., Dody A., 2004. Contamination of groundwater under cultivated fields in an arid environment, central Arava Valley, Israel. *Journal of Hydrology* **290**, 312–328.

Ouédraogo M., 1996. Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit autour des années 1970 en Côte d'Ivoire. Mémoire de DEA Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental, Université de Montpellier, 56 p.

Ouedraogo M., 2001. Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, France 257 p.

Ouédraogo M., Servat E., Paturel J.E., Lubès-Niel H., Masson J.M., 1998. Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit autour des années 1970 en Afrique de l'ouest et centrale non-sahélienne. *Variability of Water Resources in Africa in the 20th Century* International Conference Proceeding, Abidjan, IAHS Publication, **252**, 315–321.

Oyédé L.M., 1991. Dynamique sédimentaire actuelle et messages enregistrés dans les séquences quartenaires et néogènes du domaine margino littoral du Bénin (l'Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat en Géologie sédimentaire, nouveau régime. Université de Bourgogne, Dijon, France, 302 p.

Pallas P., 1988. Contribution à l'étude des ressources en eaux souterraines du bassin côtier du Bénin : Confrontation ressources-besoins. Rapport d'étude, Direction de l'Hydraulique, Cotonou, Bénin, 29 p.

Paturel J.E., Servat E., Delattre M.O., Lubès-Niel H., 1998. Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrological Sciences Journal*, **43**(6), 937–946.

Paturel J.E., Servat E., Kouamé B., Lubès H., Masson J.M., Boyer J.F., Travaglio M., Marieu B., 1997a. Variabilité pluviométrique en Afrique humide le long du golfe de Guinée. Approche régionale intégrée. *PHI-V*, Documents Techniques en Hydrologie *1 UNESCO*, **16**, 1–31.

Paturel J.E., Servat E., Kouamé B., Lubès H., Ouedraogo M., Masson J.M., 1997b. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea Part II: an integrated regional approach. *Journal of hydrology*, **191**(1997), 16–36.

Paturel J.E., Servat E., Vassiliadis A., 1995. Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data - case of the GR2M model. *Journal of Hydrology*, **168**, 11–125.

Pérard J., Boko M., Bokonon-Ganta E.B., 1991. Contraintes climatiques et croyances en Afrique Tropicale : *Essai d'ethnoclimatologie, actes du 3ème Colloque AIC*, Lannion, 163–171.

Pérard J., Bokonon-Ganta E., Boko M., Toffi M., 1992. Eaux et société en pays fon. *Actes de colloque-l'eau mythes et réalités*, Dijon, 18-21 novembre 1992, centre Gaston Bachelard, pp 53-68.

Perrin C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, CENAGREF, 291 p.

Picouet C., 1999. Géodynamique d'un hydrosystème tropical peu anthropisé : Le Bassin supérieur du Niger et son delta intérieur. Thèse de Doctorat. Université de Montpellier II, Montpellier, France, 469 p.

PNUE, 2002. L'avenir de l'environnement en Afrique : le passé, le présent et les perspectives d'avenir. Nairobi, Kenya, 422 p.

Poulovassilis A. Kerkides P., Elmaloglou S., Argyrokastritis I., 1991. An investigation of the relationship between ponded and constant flux rainfall infiltration. *Water Resources Research*, **27**(7), 1403–1409.

Prasad S.N., Romkens M.J.M., 1982. An approximate integral solution of vertical infiltration under changing boundary conditions. *Water Resources Research*, **18**(4), 1022-1028.

Protopapas A.L., Bras R.L., 1991. Analytical Solutions for Unsteady Multidimensional Infiltration in Heterogeneous Soils. *Water Resources Research*, **27**(6), 1029–1034.

Rai S.N., Manglik A., Singh R. N., 1994. Water table fluctuation in response to transient recharge from a rectangular basin. *Water Resources Management*, **8**, 1–10.

Raskin P., Chadwick M., Jackson T., Leach G., 1996. The sustainability transition: Beyond conventional development. Stockholm: Stockholm Environment Institute.

Ravi V., Williams J.R., 1998. Estimation of infiltration rate in the vadose zone: compilation of simple mathematical models: Volume I. EPA/600/R-97/128a, United States, 26 p. + appendix.

Richard Y., Camberlin P., Beltrando G., 1998. Recherche de structures spatio-temporelles en climatologie : l'exemple de la variabilité pluviométrique en Afrique orientale. *L'Espace géographique*, **27**, 31–40.

Richard Y., Camberlin P., Fauchereau N., 2002. Cohérence intrasaisonnière de la variabilité pluviométrique interannuelle en Afrique du Sud. *Espace géographique 1*, Tome 31 - ISSN 0046 2497 - ISSN numérique, 63–72.

Rodier J., Geoffray Ch., Kovacsik G., Laporte J., Verneaux J., Vial J., 1975. L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer – Chimie, physico-chimie, bactériologie, biologie ; Tome 1 ; 5e éd. Edition Dunod, 629 p.

Roeckner E., Arpe K., Bengtsson L., Brinkop S., Dumenil L., Esch M., Kirk E., Lunkeit F., Ponater M., Rockel B., Suase R., Schles U., Schubert S., Windelband M., 1992. Simulation of the present-day climate with the ECHAM4 model: impact of model physics and resolution. Max-Planck Institute for Meteorology, Report No.93, Hamburg, Germany, 1992, 171 p.

Rogers F.C., Wasson J.G., 1997. Cadrage géographique de la structure et de la dynamique physique des hydrosystèmes du bassin rhodanien français : l'approche hydro-écorégions. Communication présentée au séminaire G.I.P. Hydrosystèmes « Journée du Rhône » 8 p.

Rupa Kumar K., Sahai A.K., Krishna Kumar K., Patwardhan S.K., Mishra P.K., Revadekar J.V., Kamala K., Pant G.B., 2006. High-resolution climate change scenarios for India for the 21st century. *Current Science*, **90**, 334–345.

Rutledge A.T., 1993. Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow records: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 93-4121, 45 p.

Rutulis M., 1989. Groundwater drought sensitivity of southern Manitoba. *Canadian Water Resources Journal*, **14**, 18–33.

Sagbo O.M., 2000. Pollution des nappes alimentant la ville de Cotonou en eau de consommation: vulnérabilité et urgence des mesures de protection des aquifères. Mémoire de DESS, Université Nationale du Bénin, Cotonou, Bénin, 69 p.

Salvucci G.D., 1993. An approximate solution for steady vertical flux of moisture through an unsaturated homogeneous soil. *Water Resources Research*, **29**(11), 3749–3753.

Salvucci G.D., Entekhabi D., 1994. Explicit Expressions for Green-Ampt (Delta Function Diffusivity) Infiltration Rate and Cumulative Storage. *Water Resources Research*, **30**(9), 2661–2663.

Savane I., Coulibaly K.M., Gioan P., 2001. Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région sémi-montagneuse de Man. *Sécheresse*, **12**(4), 231–237.

Scanlon B.R., Healy R.W., Cook P.G., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, **10,** 18–39.

Scanlon B.R., Reedy C.R., Stonestromw A.D., Prudic E.D., Dennehy F.K., 2005. Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US. *Global Change Biology*, **11**, 1577–1593.

Schwartz P. 1991. The Art of the Long View. New York: Currency Doubleday.

Scozzafava M., Tallini M., 2001. Net infiltration in the Gran Sasso massif of central Italy using the Thornthwaite water budget and curve-number method. *Hydrogeological Journal*, **9**, 461–475.

Servat E., Dezetter A., 1991. Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modelling in a sudanese savannah area. *Hydrological Sciences Journal*, **36**(4), 307–331.

Servat E., Dezetter A., 1992. Modélisation de la relation pluie-débit et estimation des apports en eau dans le nord-ouest de la Côte d'Ivoire. *Hydrologie Continentale*, **7**(2), 129–142.

Servat E., Paturel J.E., Kouamé B., Travaglio M., Ouédraogo, Boyer J-F., Lubès-Neil H., Fritsh J-M., Masson J-M., Marieu B. 1998. Identification, characterisation and consequences of a hydrological variability in West and Central Africa. *Variability of Water Resources in Africa in the 20th Century*, International Conference Proceeding Abidjan, IAHS Publication, **252**, 323–337.

Servat E., Paturel J.E., Lubes-Niel H., Kouame B., Masson J.M., Travaglio M., Marieu B., 1999. De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne. *Revue des Sciences de l'Eau,* **12**(2), 363–387.

SGI, 1981. Etude de la nappe aquifère de Godomey. SBEE/BOAD, Cotonou, p.

Shelton M.L., 1998. Seasonal hydroclimate change in the Sacramento River Basin, California. *Physical Geography*, **19**, 239–255.

Sigha-Nkamdjou L., Sighomnou D., Lienou G., Ayissi G., Bedimo J.P., Naah E. 1998. Variability of the hydrological regimes of rivers over the southern band of southern Cameroon plateau. *Variability of Water Resources in Africa in the 20th Century*, International Conference Proceeding Abidjan, IAHS Publication, **252**, 215–222.

Sighomnou D., 2004. Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau. Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sciences, Université de Yaoundé I, Cameroun, 290 p.

Sighomnou D., Sigha L.N., Liénou G., Dezetter A., Mahé G., Servat E., Paturel J.E. Olivry J-C., Tchoua F., Ekodeck G.E., 2005. Impacts des fluctuations climatiques sur le régime des écoulements du fleuve Sanaga au Cameroun, prospectives pour le XXIème siècle. Communication Séminaire international AOC sur *Impacts climatiques et anthropiques sur la variabilité des ressources en eau*, 10 p.

Sikazwe K., 2008. The Impact of Land Use Change on Karst Goundwater Quantity in Shenton Spring Basin, Shanxi Province, China. *Environmental Research Journal*, **2**(5), 232–237.

Simmers J., 1988. Estimation of Natural Groundwater Recharge. *NATO ASI Series* C, Vol. 222, Reidel Publ. Co., Dordrecht, 510 p.

Sircoulon J., 1987. Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'ouest depuis le début du vingtième siècle. *The Influence of Climate Changeand Climatic Variability on the Hydrologie Regime and Water Resources* (Proc. Vancouver Symp., August 1987) (ed. by Solomon S.I., Beran M., Hogg W.), IAHS Publ., **168**, 13–25.

Six M., 1998. Croyances traditionnelles et gestion de l'espace dans la sous préfecture d'Allada (Bénin), Mémoire de maîtrise de géographie, Université de Paris IV Sorbonne, France, 133 p + annexes.

Slansky M., 1962. Contribution à l'étude du bassin sédimentaire côtier du Dahomey et du Togo. Mémoire du Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Edition Technip, Paris 7e, 223 p.

Slimani M., 1985. Etude des pluies de fréquences rares à faible pas de temps sur la région Cévennes - Vivarais: estimation, relation avec le relief, et cartographie synthétique. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.

Smith R.E., Corradini C., Melone F., 1993. Modelling Infiltration for Multistorm Runoff Events. *Water Resources Research*, **29**(1), 133–144.

Smouse P.E., Long J.C., Sokal R.R., 1986. Multiple regression and correlation extension of the Mantel test of matrix correspondence. *Systematic Zoology*, **35**, 627–632.

Sophocleous A.M., 1991. Combining the soilwater balance and water-level fluctuation methods to estimate natural groundwater recharge: practical aspects. *Journal of Hydrology*, **124**(1991), 229–241.

Sultan B., Janicot S., 2004. La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles intra-saisonnières. 1ère partie : Analyse diagnostique de la mise en place de la mousson et de la variabilité intra-saisonnière de la convection, *Sécheresse*, **15**(4), 321–330.

Swartzendruber D., Hogarth W.L., 1991. Water Infiltration into Soil in Response to Ponded-Water Head. *Soil Sci. Soc. of Am. J.*, **55**(6), 1511–1515.

Tabacchi E., 1995. Identification des écorégions hydrologiquement homogènes du territoire national. Etude Agence de l'Eau Rhin-Meuse vol.1, p.23 + annexes.

Tabeaud M., Kergomard C., 1990. Quelques remarques sur les interrelations climat-océan à petite échelle. *Annales de Géographie*, **553**, 291–304.

Tacher L., 1992. SPHINX: un logiciel de simulation en hydrogéologie appliquée. Un exemple de configuration, orientée vers la recherche d1eau en milieu a porosité d'interstice. Thèse de Doctorat. Université de Neuchâtel, Centre d'Hydrogéologie (CHYN), 197 p.

Tadross M, Jack C, Hewitson B., 2005. On RCM-based projections of change in southern African summer climate. *Geophysical Research Letters* 32: L23713, DOI:10.1029/2005GL024460.

Taheri Tizro A., Voudouris S.K., Eini M., 2007. Groundwater balance, safe yield and recharge feasability in a semi-arid environment: A case study from Western part of Iran. *Journal of Applied Sciences*, **7**(20), 2967–2976.

Tay C., Kortatsi K.B., 2007. Groundwater Quality Studies, A case Study of the Densu Basin, Ghana. *West African Journal of Applied Ecology*, **12**, 81–99

Taylor C.J., Alley W.M., 2001. Ground-Water-Level Monitoring and the Importance of Long-Term Water-Level Data. U.S. Geological Survey Circular 1217, Denver, Colorado, 77 p.

Taylor G.R., 2006. Assessing the impacts of climate change and variability on water resources in Uganda: developing an integrated approach at the sub-regional scale. START /PACOM Grant Report, Project number 202 457 5859, 40 p.

Taylor G.R., Koussis A.D., Tindimugaya C., 2009. Groundwater and climate in Africa – a review. *Hydrological Sciences Journal*, **54**(4), 655–664.

Taylor M.A., Centella, A., Charlery J., Borrajero I., Bezanilla A., Campbell J., Rivero R., Stephenson T.S., Whyte F., Watson R., 2007. Glimpses of the Future: A Briefing from the PRECIS Caribbean Climate Change Project. Belize:Caribbean Community Climate Change Centre, Belmopan, 24 p.

Taylor R., Tindimugaya C., Owor M., Shamsudduha M., 2009. Groundwater and climate in Africa. *IAHS Publication 334*, 272 p.

Thornthwaite C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geol. Rev.*, **38**, 55–94.

Thornthwaite C.W., Mather J.R., 1955. The Water Balance. *Publications in Climatology*, **8**(1), 1–104.

Thornthwaite C.W., Mather J.R., 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publications in Climatology*, **10**(3): 181–311.

Toffi M., 2008. Le climat, l'homme et la dynamique des écosystèmes dans l'espace littoral du Bénin. Thèse de Doctorat unique. Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 390 p.

Totin V.S.H., 2005. Tendances hydroclimatiques et scénarios de gestion des ressources en eau sur les plateaux du Sud Bénin. Mémoire de DEA, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 83 p.

Totin V.S.H., 2010. Assessment of Global Change Impacts on Groundwater in the Coastal Sedimentary Basin of Benin (West Africa). Report for Africa Global Environmental Change Research Grant. Global Change SysTem for Analysis, Research and Training (START) 61 p.

Totin V.S.H., Boko M., Edorh A.E., 2008. Groundwater Pollution in Shantytowns of Cotonou: Which Strategies to Limit Waterborne Diseases Risks? Coupling Sustainable Sanitation & Groundwater Protection. Symposium, 14-17 October 2008 Hannover, Germany, Abstract Book, p. 46 and Poster.

Totin V.S.H., Boukari M., Boko M., 2006. Adaptation à la vulnérabilité des ressources en eaux souterraines au changement climatique dans le sud du Bénin. *Association Internationale de Climatologie*. 520–525.

Totin V.S.H., Boukari M., Boko M., 2009. Groundwater Recharge Mechanisms and Water Management in the Coastal Sedimentary Basin of Benin (West Africa). *Groundwater and Climate in Africa*. Proceedings of the Kampala Conference, June 2008 IAHS Publ. **334**-21, 127–134.

Totin V.S.H., Clédjo P., Afouda A., Boko M., 2009. Variabilité pluviométrique et bilan climatique dans le bassin de la volta au Bénin. *Climat et Développement*, **8**, 81–94.

Totin V.S.H., Orékan V., Alassane A., Boukari M., Faye S., Boko M., 2010. Climate and Land Use Change Impacts on Groundwater Quality in the Beninese Coastal Basin of the Transboundary Aquifer System Benin-Nigeria-Togo. *Transboundary Aquifers: Challenges and New Directions*. Proceedings of UNESCO-IHP, ISARM and PCCP International Conference, 6-8 December 2010, IAHS Publ. (Under press).

Tripet J.P., 1972. Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois). Thèse de Doctorat, Université de Neuchâtel, Helioprint AG, Zürich, 189 p.

Tsutsumi A., Jinno K., Berndtsson R. 2004. Surface and subsurface water balance estimation by the groundwater recharge model and a 3-D two-phase flow model. *Hydrological Sciences Journal*. **49**(2), 205–226.

Turkpak-International, 1991. Inventaire des resources en eaux souterraines au Bénin. Rapport final, Tunis, Tunisie, 611 p. + annexe.

U.N. (United Nations), 1990. Plan directeur d'utilisation des ressources en eau du Bénin. Rapport, PNUD, Projet BEN 85/004, Cotonou, Bénin.

UN/WWAP (United Nations/World Water Assessment Programme), 2006. UN World Water Development Report 2: Water a shared responsibility. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, France and Berghahn Books, New York, USA, 600 p.

UNB-UQAM, 1987. Aquifère du Quaternaire côtier du Bénin. Projet CRDI (1ère phase). N°3-P-84-1056-03.

UNESCO, 2006. Groundwater Resources Assessment under the Pressures of Humanity and Climate Changes (GRAPHIC). IHP, Paris, France. 22 p.

Untermaier J., 2003. Code de l'eau du 21 septembre 1987 : Analyse générale. In : Etat des lieux du cadre juridique et institutionnel du secteur de l'eau. Programme AGRE, Cotonou, 25–35.

van Genuchten M.T., Leij F.J., Yates S.R., 1991. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. U.S. EPA, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, EPA/600/S2-91/065.

Vissin E.W., 2007. Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne, Dijon, France, 280 p.

Vissin E.W., Amoussou E., Houssou C.S., 2007. Variabilité de la pluviométrie et des écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger. *Climat et Développement*, Université d'Abomey-Calavi, **3**, 22–32.

Vissin E.W., Boko M., Pérard J., Houndénou C., 2003. Recherche de ruptures dans les séries pluviométriques et hydrologiques du bassin béninois du fleuve Niger (Bénin, Afrique de l'Ouest). *Publication de l'AIC*, Besançon. **15**, 368–376.

Volkoff B., Willaime P., 1963. Notice explicative de la carte des sols au 1/1 000 000 de la République du Dahomey. *Rapport annuel 1962*, Centre ORSTOM de Cotonou, mult., 1622–1626.

Vörösmarty C., Lettenmaier D., Leveque C., Meybeck M., Pahl-Wostl C., Alcamo J., Cosgrove W., Grassl H., Hoff H., Kabat P., Lansigan F., Lawford R., Naiman R., 2004. Humans transforming the global water system. *Eos*, **85**, 509-520.

Voudouris S.K., Lambrakis J.N., Papatheothorou G., Daskalaki P., 1997. An Application of Factor Analysis for the Study of the Hydrogeological Conditions in Plio-Pieistocene Aquifers of NW Achaia (NW Peloponnesus, Greece). Mathematical Geology, **29**(I), 43-59.

Warrick A.W., 1991. Traveling front approximations for infiltration into stratified soils. *Journal of Hydrology*, **128**, 213-222.

Warrick A.W., 1993. Inverse estimations of soil hydraulic properties with scaling: one-dimensional infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57**(3), 631-636.

Warry N.D., Hanau M., 1993. The use of terrestrial ecoregions as a regional-scale screen for selecting representative reference sites for water quality monitoring. *Environnemental Management*, **17**(2), 267–276.

Wasson J.G., 1996. Structures régionales du basin de la Loire. *La Houille Blanche* **6**(7), 25-31.

Wesselink A.J., Orange D., Feizoure C.T., Randriamiarisoa, 1995. Les régimes hydroclimatiques et hydrologiques d'un bassin versant de type tropical humide : l'Oubangui (République Centrafricaine). *L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement*. IAHS Publ, **238**, 179–194.

Whitehead G.P., Wilby L.R., Battarber W.R., Kernan M., Wade J.A., 2009. A review of the impacts of climate change on surface water quality. Hydrological Sciences Journal, **54**(1), 101–123.

WHO, 2008. Guidelines for drinking-water quality: Incorporating 1st and 2nd addenda, Vol.1, Recommendations. – 3rd ed., Geneva, 668 p.

Wigmosta M.S., Guensch G.R., 2005. Potential groundwater recharge from the infiltration of surface runoff in cold and dry Creeks. U.S. Department of Energy, United States, 19 p.

Wilson S., Hassell D., Hein D., Jones R., Taylor R., 2005. Installing and using the Hadley Centre regional climate modelling system, PRECIS. Version 1.3., UK Met Office Hadley Centre, Exeter, 131 p.

Winter T.C., Harvey J.W., Franke O.L., Alley W.M., 1998. Ground water and surface water - a single resource: *U.S. Geological Survey Circular* 1139, 79 p.

Wolock D.M., McCabe G.J.Jr., 1999. Explaining spatial variability in mean annual runoff in the conterminous United States. *Climate Research*, **11**, 149-159.

Xu C.-Y., Chen D., 2005. Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. *Hydrological Processes*, DOI: 10.1002/hyp.5853.

Xu Y., Huang X., Zhang Y., Lin W., Lin E., 2006. Statistical Analyses of Climate Change Scenarios over China in the 21st Century. *Adv. Clim. Change Res.*, 2006, **2**(1), 50–53.

Yangambi, 1956. C.S.A. Specialist Meeting on Phytogeography/Réunion de spécialistes du C.S.A. en matière de phytogéographie. Scientific Council for Africa South of the Sahara, YANGAMBI, 28th July – 8th August 1956, Publication n°22, CCTA, 35 p.

Yates D.N., 1997. Approaches to continental scale runoff for integrated assessment models. *Journal of Hydrology*, **201**, 289–310.

Yermani M., Zouari K., Michelot L.J., Mamou A., Moumni L., 2003. Approche géochimique du fonctionnement de la nappe profonde de Gafsa Nord (Tunisie centrale). *Journal des Sciences Hydrologiques*, **48**(1), 95–108.

Zimmermann E., 2006. Bayesian approach to daily rainfall modelling to estimate monthly net infiltration using the Thornthwaite water budget and curve number methods. *Hydrogeol. Journal.*, **14**, 648-656.

Zogo D., 2000. Etude diagnostique de la pollution azotée des eaux souterraines exploitées par la SBEE dans les Départements du Mono et du Couffo: Stratégie pour l'amélioration de la qualité. Mémoire de DESS, Université Nationale du Bénin., Cotonou, 104 p.

Sites web

http://www.unep.or.jp/ietc/publications/techpublications/techpub8e/artificial.asp

http://www.artemis-energies.fr

http://rdb.eaurmc.fr

www.brs.gov.au/shop

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure 1.1 : Réseaux d'observations climatologiques, hydrométriques et piézométriques dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin 30
Figure 1.2 : Fonction polynomiale du troisième degré adaptée au régime piézométrique 46
Figure 1.3 : Cycle de recharge des nappes d'eaux souterraines 47
Figure 1.4 : Méthode graphique de détermination de la charge hydraulique 48
Figure 1.5 : Sites de prélèvement d'échantillon et d'analyse in situ d'eau dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin 56
Figure 1.7 : Cadre général de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) 64

CHAPITRE II

Figure 2.1 : Localisation du bassin sédimentaire côtier du Bénin 68
Figure. 2.2 : Carte géologique du bassin sédimentaire côtier du Bénin avec la position des coupes hydrogéologiques du bassin et celle des coupes lithostratigraphiques du Continental terminal du Plateau de Sakété 69
Figure 2.3 : Colonnes lithostratigraphiques des domaines onshore et offshore du bassin sédimentaire côtier du Bénin 71
Figure 2.4 : Colonne hydrogéologique du bassin sédimentaire côtier du Bénin 72
Figure 2.5 : Coupe hydrogéologique du bassin sédimentaire côtier du Bénin selon les directions nord-ouest et sud-est (Aplahoué-Ouidah) 72
Figure 2.6 : Unités hydrogéologiques du bassin sédimentaire côtier du Bénin 76
Figure 2.7 : Composantes pédologiques du bassin sédimentaire côtier du Bénin 79
Figure 2.8 : Réseau hydrographique du bassin sédimentaire côtier du Bénin 84
Figure 2.9 : Profil longitudinal du bassin du Couffo 85
Figure 2.10 : Relief et géométrie du bassin du Couffo 86
Figure 2.11 : Schéma transversal de la vallée du Mono au niveau du hameau Kpatchakpodji 87
Figure 2.12 : Cycle de la mousson en Afrique de l'Ouest 89
Figure 2.13 : Schéma des types de temps saisonniers en fonction de leur position par rapport au front intertropical (FIT) 89
Figure 2.14 : Régimes pluviométriques caractéristiques du bassin sédimentaire côtier du Bénin 91
Figure 2.15 : Taux d'accroissement intercensitaire des communes du bassin côtier du Bénin 93
Figure 2.16 : Projections démographiques aux horizons 2025 et 2050 population (a) et densité (b) 94

CHAPITRE III

Figure 3.1 : Régimes pluviométriques mensuels moyens régionalisés (a) et extrêmes stationnels (b) sur le bassin côtier du Bénin (1951-2005) 100
Figure 3.2 : Champs de pluie mensuels moyens (1951-2005) dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin 101
Figure 3.3 : Evolution des températures moyennes de surface de mer sur la période 1950-1998 dans le golfe de Guinée 102
Figure 3.4 : Champs de pluie saisonniers moyens du bassin côtier du Bénin (1951-2005) 103
Figure 3.5 : Variation spatiale des champs de pluie annuelle moyenne (a) et des coefficients de variation (b) dans le bassin côtier du Bénin 105
Figure 3.6 : Pluviométries annuelles extrêmes dans le bassin côtier du Bénin (1951-2005) 106
Figure 3.7 : Rupture de stationnarité dans l'évolution de la pluviométrie annuelle moyenne dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin 108
Figure 3.8 : Variation du régime pluviométrique mensuel moyen du bassin côtier (a) et de ses stations (b) entre les périodes 1951-1970 et 1971-2005 109
Figure 3.9 : Variation spatiale post-rupture des précipitations mensuelles sur la période 1951-2005 110
Figure 3.10 : Variation des pluies saisonnières post-rupture sur la période 1951-2005 111
Figure 3.11 : Evolution tendancielle des pluies annuelles moyennes du bassin côtier du Bénin (a) et des anomalies pluviométriques des stations (b) 112
Figure 3.12 : Variation des pluies annuelles moyennes dans le bassin côtier du Bénin 112
Figure 3.13 : Régimes thermométriques moyens et extrêmes (1951-2005) dans le bassin côtier du Bénin 114
Figure 3.14 : Variabilité interannuelle des températures à Cotonou et à Bohicon 115
Figure 3.15 : Anomalies thermométriques dans le bassin sédimentaire côtier (1951-2005) 116
Figure 3.16 : Relation entre le pouvoir évaporant de l'air (en mm/an) et la température annuelle (en 117

°C) en climats tropicaux
Figure 3.17 : Relation entre la demande évaporatoire de l'air et la température moyenne annuelle 118
Figure 3.18 : Variation mensuelle de la demande évapotranspiratoire mensuelle moyenne et extrêmes (1951-2005) dans le bassin côtier du Bénin 118
Figure 3.19 : Bilan climatique mensuel moyen (1951-2005) dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin 120
Figure 3.20 : Représentation schématique des facteurs humains de l'évolution du climat, des effets sur le changement climatique et des réponses apportées, ainsi que de leurs corrélations (GIEC, 2007) 122
Figure 3.21 : Émissions mondiales de GES (en Gt équiv.-CO2) en l'absence de politiques climatiques (a) et projections relatives au réchauffement à la surface du globe selon plusieurs modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan (b) 123
Figure 3.22 : Variations de la température de l'air en surface pendant la période 1970-2004 124
Figure 3.23 : Variations relatives du régime des précipitations (%) pour la période 2090-2099, par rapport à la période 1980-1999 (GIEC, 2007). 126
Figure 3.24 : Précipitations journalières observées et simulées sur la période 1961-1990 128
Figure 3.25 : Corrélation entre les pluies mensuelles simulées et observées (1961-1990) à Aplahoué, Bohicon, Niaouli et Pobè 130
Figure 3.26 : Corrélation entre les pluies mensuelles simulées et observées (1961-1990) à Grand Popo et à Sèmè 131
Figure 3.27 : Corrélation entre températures mensuelles simulées et observées (1961-1990) 131
Figure 3.28 : Pluies mensuelles observées (1961-1990) et simulées à l'horizon 2070-2089 132
Figure 3.29 : Champs de pluie mensuelle moyenne à l'horizon 2070-2089 134
Figure 3.30 : Pluviométrie moyenne annuelle de la normale 2070-2089 du bassin sédimentaire côtier du Bénin (a) et zones climatiques de l'Afrique (b) 135
Figure 3.31 : Température moyenne annuelle de 1961-1990 (a) et de 2070-2089 (b) 136

CHAPITRE IV
Figure 4.1 : Variation spatiale de la piézométrie dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin 139
Figure 4.2 : Localisation des piézomètres FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD dans le sud-est du plateau d'Allada 140
Figure 4.3 : Relation pluie-niveau piézométrique de FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD 141
Figure 4.4 : Régimes de pluie, de l'ETR et de niveaux piézométriques de FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD 142
Figure 4.5 : Evolution interannuelle des niveaux piézométriques sur la période 1991-2007 144
Figure 4.6 : Tendances interannuelles des niveaux piézométriques moyens et extrêmes de FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD 146
Figure 4.7 : Recharge estimée dans le secteur du champ de captage de Godomey 149
Figure 4.8 : Variation de la recharge mensuelle dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin 151
Figure 4.9 : Variation spatiale l'ETR, de la pluie et de la recharge annuelles moyennes (1964-2005) dans le bassin côtier du Bénin 152
Figure 4.10 : Profondeur des niveaux statiques et seuils pluviométriques d'alimentation des aquifères superficiels dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin 153
Figure 4.11 : Coupe lithologique synthétique du Continental Terminal du plateau d'Allada et du Quaternaire littoral suivant la direction NNE – SSE 154
Figure 4.12 : Décrue et coefficient de tarissement dans les bassins de l'Ouémé, du Mono, du Zou et du Couffo de 1951 à 2005 158
Figure 4.13 : Volumes d'eau mobilisés par les nappes de versant dans le bassin côtier du Bénin 161
Figure 4.14 : Coupe lithologique transversale du Continental Terminal suivant la direction W-E sur le bassin sédimentaire côtier du Bénin 163
Figure 4.15 : Coupe hydrogéologique montrant la zone stérile (''biseau sec'') du Turonien-Coniacien au niveau du plateau d'Abomey 163
Figure 4.16 : Occupation du sol et utilisation des terres dans le bassin côtier du Bénin 167
Figure 4.17 : Evolution de la superficie des unités paysagiques dans le bassin côtier du Bénin entre 1973 et 2005 et variation des termes du bilan d'eau suivant les sous périodes 1951-1973 et 1973-2005 168
Figure 4.18 : Evolution saisonnière de la salinité dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin 171

CHAPITRE V

Figure 5.1 : Evolution du nombre d'Equivalent Point d'Eau de 1996 à 2007 176
Figure 5.2 : Tendance interannuelle dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin (a) et répartition par Département (b) du taux de desserte en eau de 2002 à 2007 178
Figure 5.3 : Volumes d'eau réellement fournis et besoins potentiels en eau en 2007 dans les Départements du bassin sédimentaire côtier du Bénin 179
Figure 5.4 : Evolution des volumes d'eau pompée dans les champs de captages et de la pluviométrie dans le Département de l'Atlantique 180
Figure 5.5 : Evolution des volumes d'eau pompée et de la pluviométrie dans le champ de captage de Porto Novo 181
Figure 5.6 : Evolution des volumes d'eau pompée et de la pluviométrie dans les champs de captage des différentes agglomérations urbaines secondaires du Département de l'Ouémé 181
Figure 5.7 : Evolution des quantités d'eau pompée dans les champs de captage de Kétou, Pobè, Sakété et Ifangni et variabilité pluviométrique sur le plateau de Sakété 182
Figure 5.8 : Evolution des volumes d'eau pompée dans les champs de captage et de la pluviométrie dans les localités du Département du Couffo 183
Figure 5.9 : Evolution comparée des volumes d'eau pompée dans les champs de captage et variabilité pluviométrique dans le Département du Mono 184
Figure 5.10 : Evolution des extractions d'eau dans les champs de captage et variabilité pluviométrique dans le Département du Zou 185
Figure 5.11 : Régime d'extraction d'eau à Cotonou et à Godomey 186
Figure 5.12 : Régime d'extraction d'eau souterraine dans les parties nord et centrale du bassin sédimentaire côtier du Bénin 187
Figure 5.13 : Régime de pompage d'eau souterraine à Adjohoun et Sô-Ava 188
Figure 5.14 : Régime de pompage d'eau à Comè/Grand Popo et Sèmè Kpodji 188
Figure 5.15 : Répartition de quelques sources dans certaines régions hydrogéologiques du bassin sédimentaire côtier du Bénin 190
Figure 5.16 : Destination de l'eau fournie par la SONEB et la DG-Eau utilisée pour les besoins domestiques dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin 195
Figure 5.17 : Divinités de l'eau (a) et attributs de Xèbiosso dans la tradition Fon 201

CHAPITRE VI

Figure 6.1 : Ecart thermique (a) et de pH (b) des eaux souterraines dans le bassin côtier 204
Figure 6.2 : Répartition spatiale de pH des eaux souterraines dans le bassin côtier du Bénin 205
Figure 6.3 : Concentrations des ions majeurs dans les eaux souterraines du bassin côtier 207
Figure 6.4 : Abondance relative des ions majeurs en saison pluvieuse et en saison sèche dans les eaux souterraines du bassin côtier du Bénin 208
Figure 6.5 : Relation Na^+ versus Cl^- pour les eaux souterraines du bassin côtier du Bénin 209
Figure 6.6 : Relation $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ versus $HCO_3^-+SO_4^{2-}$ pour les eaux souterraines 210
Figure 6.7 : Relation NO_3^- versus Cl^- pour les eaux souterraines du bassin côtier du Bénin 211
Figure 6.8 : Analyse en Composantes Principales (ACP) des ouvrages hydrauliques suivant les caractéristiques physico-chimiques des eaux 212
Figure 6.9 : Faciès géochimiques des eaux souterraines en saison pluvieuse (a) et saison sèche (b) dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin 214
Figure 6.10 : Distance de diffusion d'une charge polluante bactériologique ou chimique dans un aquifère 223

CHAPITRE VII

Figure 7.1 : Coupe hydrogéologique nord-sud du plateau de Sakété suivant les longitudes 2°35 Est (a) et 2°43 Est (b) 226
Figure 7.2 : Sites potentiels de recharge artificielle des aquifères basée sur le réseau de faille dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin 232
Figure 7.3 : Système de récupération d'eau de pluie avec une injection dans un réseau spécifique pour les toilettes, la machine à laver et le jardin 234
Figure 7.4 : Système de récupération d'eau de pluie avec une injection dans un réseau spécifique, cuve non enterrée 235
Figure 7.5 : Système de récupération d'eau de pluie pour l'arrosage avec cuve enterrée 235
Figure 7.6 : Secteurs côtiers du bassin vulnérables à l'intrusion d'eaux marine et lagunaire 237
Figure 7.7 : Gestion hasardeuse (a) versus gestion intégrée (b) des ressources en eaux souterraines 245

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau 1.I : Synthèse statistique de 17 études sur la porosité utile 49
Tableau 1.II : Réserves utiles des sols dans quelques localités du bassin côtier du Bénin 52
Tableau 1.III : Protocole d'analyse bactériologique des eaux de puits, de forages et de sources prélevés dans le bassin côtier du Bénin 59
Tableau 1.IV Unités d'occupation de sol dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin 61

CHAPITRE II

Tableau 2.I. : Unités stratigraphiques du bassin sédimentaire côtier du Bénin 70
Tableau 2.II : Caractéristiques générales de chacune des 27 unités hydrogéologiques du bassin sédimentaire côtier du Bénin 77

CHAPITRE III

Tableau 3.I : Pluies annuelles moyennes et extrêmes des stations du bassin côtier (1951-2005) 105
Tableau 3.II : Périodes de retour des pluies moyennes (mm) du bassin côtier du Bénin (1951-2005) 107
Tableau 3.III : Années de rupture des séries de pluies stationnelles entre 1951 et 2005 107
Tableau 3.IV : Bilan thermique mensuel du bassin côtier du Bénin sur la période 1951-2005 115
Tableau 3.V : Projections des valeurs moyennes du réchauffement en surface et de l'élévation du niveau de la mer à la fin du XXIe siècle, à l'échelle du globe 125
Tableau 3.VI : Erreurs absolues et relatives des simulations de précipitations mensuelles sur la période 1961-1990 129
Tableau 3.VII : Erreurs absolues (°C) de simulations des températures mensuelles sur la période 1961-1990 129
Tableau 3.VIII : Analyse statistique des températures moyennes projetées sur la période 2070-2089 dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin 136

CHAPITRE IV

Tableau 4.I : Niveaux piézométriques hebdomadaires extrêmes sur la période 1991-2007 145
Tableau 4.II : Tests de significativité (corrélation sur rang de Spearman) de la tendance des niveaux piézométriques en fonction des événements pluviométriques 147
Tableau 4.III : Recharge moyenne (1991-2007) estimée par la méthode de fluctuation piézométriques des nappes suivies 148
Tableau 4.IV : Termes moyens (1964-2005) du bilan d'eau (RU = 100 mm et RU > 100 mm à saturation) dans le bassin côtier du Bénin 150
Tableau 4.V : Variation des termes du bilan hydrologique dans les sous-bassins du bassin sédimentaire côtier du Bénin. 155
Tableau 4.VI : Coefficients de tarissement mensuels moyens (1951-2005) dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin 159
Tableau 4.VII : Bilan et amplitude de variation de l'occupation du sol dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin de 1973 à 2005 166

CHAPITRE V

Tableau 5.I : Ratios d'alimentation en eau des populations rurales 175
Tableau 5.II : Equipement en ouvrages d'hydraulique rurale par Département en 2007 176
Tableau 5.III : Volumes d'eau nécessaires pour fabriquer une tonne de produits industriels 198

CHAPITRE VI

Tableau 6.I : Synthèse statistique des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines (puits, forages et sources) dans le bassin côtier du Bénin 204
Tableau 6.II : Faciès géochimiques saisonniers des eaux souterraines dans le bassin côtier du Bénin 215
Tableau 6.III : Caractéristiques bactériologiques des eaux de quelques puits en saisons pluvieuse et sèche 217
Tableau 6.IV : Caractéristiques bactériologiques de quelques forages en saisons pluvieuse et sèche 220
Tableau 6.V : Composition bactériologique d'une eau de source en saisons pluvieuse et sèche 222

Liste des photos

CHAPITRE I

Photo 1.1. Prélèvement d'échantillons d'eau (a) et analyse in situ au forage artésien de Totinga à Ouèdèmè Adja (Lokossa) (b) 57

Photo 1.2. Dispositif d'analyse physico-chimique (Chromatographe ionique DIONEX ICS 1000 en blanc) utilisé 58

CHAPITRE II

Photo 2.1. Nappe captive et jaillissante de Totinga à Ouèdèmè Adja (Lokossa) 73

Photo 2.2. Quelques aspects du couvert végétal dans le bassin côtier du Bénin 82

Photo 2.3. Morpho-structure partielle du bassin hydrologique de l'Ouémé à Bonou à l'étiage 86

Photo 2.4. Petite irrigation sur le périmètre maraîcher de Ewécondji à Grand Popo 94

Photo 2.5. Ouvrages piscicoles traditionnels à Couffonou (a) et à Nazoumè (b) 95

CHAPITRE III

Photo 3.1. Masse d'eau lagunaire à Djègbadji (a) et végétation marécageuse à Tori-Avamè (b), deux systèmes ouverts à l'évaporation 119

CHAPITRE IV

Photo 4.1. Etat hydrologique du bassin de l'Ouémé à Bonou en novembre 2008 158

Photo 4.2. Deux aspects hydrodynamiques diffférents du bassin du Couffo : à Lon Agonmè (Allada) (a) dans le bassin sédimentaire et à Gougouta, Djidja (b) hors du bassin, les deux localités distantes d'environ 110 km suivant le profil de la masse d'eau 160

Photo 4.3. Dalles de cuirasse superficielles sur le plateau de Sakété, entre Bonou et Adjohoun 164

Photo 4.4. Sol imperméabilisé : cour de maison (a) et place publique (b) à Aplahoué 168

CHAPITRE V

Photo 5.1. Postes Autonomes d'Eau à Avrankou (a) et à Kétou Iguiolou (b) 177

Photo 5.2. Ouvrages d'exhaure et approvisionnement en eau à Bohicon Sodohomey Lokozoun (a), Tori Bossito (b) et à Aplahoué Kpodji (c) 189

Photo 5.3. Aménagements inadéquats d'un forage artésien à Bopa Possotomè (a) et de la source Abaya à Adjohoun Hêkpa Dogbamè (b) 190

Photo 5.4. Source semi-aménagée à faible débit à Atchabita (a) et Massavi à Doga (b) 191

Photo 5.5. Ouvrages de mobilisation et de distribution des eaux des nappes artésiennes : citerne à ciel ouvert à Bopa (a) et citerne hors sol sur l'ancien site artésien de Massi (b) 192

Photo 5.6. Approvisionnement en eau d'usages domestiques en saison sèche dans les lits mineurs du fleuve Couffo à Lon-Agonmè (a) et à Adjaralla à Aplahoué (b) 193

Photo 5.7. Double forage sur le site maraîcher de Grand Popo (a) et trou d'eau captant la nappe phréatique à Houéyiho, Cotonou (b) 197

CHAPITRE VI

Photo 6.1. Architecture des puits de faible profondeur à Tchikomè, Lokossa (a) et Houèkpa Dogbamè à Adjohoun (b) 218

Photo 6.2. Insalubrité autour des puits et état des moyens d'exhaure et de transport d'eau à Lokozoun à Bohicon (a) et à Tori Akammahoué (b) 219

Photo 6.3. Têtes de pompe de forage pédestre à Kouhoué Gbèkandji (a) et de forage manuel à Massi Lonmè (b) 221

CHAPITRE VII

Photo 7.1. Tranchées de dérivation d'eau de ruissellement le long des axes routiers Comè-Bopa (a) et Hêvié-Tori Avamè (b) 229

Photo 7.2. Bassins de recharge des aquifères : lac artificiel sur le site d'exploitation de sable jaune à Djrègbé (a) et ancienne carrière d'extraction de la latérite à Bonou (b) 230

Photo 7.3. Citernes de récupération d'eau pluviale à Avakpa (a) et Sodohomey, Bohicon (b) 234

Photo 7.4. Habitations pouvant être équipées en système mixte d'eau potable et de récupération d'eau pluviale 236

Photo 7.5. Latrines ECOSAN à double fosses munies de plaques chauffantes à Tohouè, Sèmè-Podji (a) et à quatre fosses munies de plaques chauffantes à Adjarra (b) 239

Table des matières

Dédicace *3*
Sommaire *5*
Sigles et acronymes *7*
Avant-propos *9*
Résumé *13*
Abstract *14*

INTRODUCTION **15**

PREMIERE PARTIE : DEMARCHE METHODOLOGIQUE ET CARACTERISTIQUES GEOGRAPHIQUES DU BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN **21**

Chapitre I : CONCEPTS, DONNEES ET METHODES D'ETUDE **23**

1.1. Clarification des concepts et données d'étude 23
1.1.1. Clarification des concepts 23
1.1.1.1. Bassin sédimentaire côtier : une vaste entité morphostructurale 23
1.1.1.2. Hydrosystème souterrain : un réservoir d'eau exploitable 24
1.1.1.3. Disponibilité et gestion des ressources en eau 25
1.1.1.4. Evolution du climat : moteur de dynamique hydrologique 26
1.2. Méthode d'analyse climatique et de la dynamique des eaux souterraines 29
1.2.1. Données utilisées : Nature, distribution spatiale, échelle temporelle, sources et pertinence 29
1.2.1.1. Réseau d'observations hydrométéorologiques 29
1.2.1.2. Données climatologiques 30
1.2.1.3. Données hydrogéologiques 31
1.2.1.4. Données hydrologiques 31
1.2.1.5. Documents cartographiques 32
1.2.1.6. Données démographiques et socioéconomiques 32
1.2.1.7. Analyse critique et reconstitution des données hydrométéorologiques manquantes 33
1.2.1.8. Observations directes et enquêtes socio-anthropologiques 34
1.2.2. Méthode d'analyse de la dynamique climatique 35
1.2.2.1. Analyse de la variabilité des pluies mensuelles et saisonnières 36
1.2.2.2. Analyse de la variation climatique 36
1.2.2.2.1. Détection de rupture de stationnarité et de la variation hydroclimatique 37
1.2.2.2.2. Détermination de l'évolution tendancielle des ressources hydroclimatiques 39
1.2.2.2.2.1. Tendance hydroclimatique linéaire et séquentielle 39
1.2.2.2.2.2. Test de significativité des tendances 40
1.2.2.3. Calcul du bilan climatique 41
1.2.2.4. Analyse fréquentielle des événements hydroclimatiques 41
1.2.2.4.1. Détermination des événements moyens et extrêmes 41
1.2.2.4.2. Modèle fréquentiel de Gumbel 42
1.2.3. Simulation et projection climatiques à l'aide du Modèle PRECIS / ECHAM4-A2 43
1.2.3.1. Présentation, utilité et intérêt du modèle PRECIS 43
1.2.3.2. Vérification de la simulation climatique par le modèle PRECIS 45
1.2.3.3. Projections des précipitations et de la température moyenne à l'horizon 2070-2089 45
1.2.4. Sensibilité des systèmes d'eaux souterraines à la dynamique du climat 46
1.2.4.1. Analyse de l'impact direct du climat sur les eaux souterraines 46
1.2.4.2. Méthode des fluctuations piézométriques ou Water-Table Fluctuation (WTF) method 48
1.2.4.3. Estimation de la recharge des aquifères par la méthode du bilan d'eau de Thornthwaite-Mather modifiée 50
1.2.4.4. Estimation des volumes d'eau des nappes de versant par la méthode de l'hydrogramme 54
1.2.4.5. Analyse de la dynamique de la qualité des eaux souterraines 56
1.2.4.5.1. Sites et prélèvements d'échantillons d'eaux souterraines 56
1.2.4.5.2. Analyses hydrochimiques et bactériologiques 57
1.3. Evaluation de la dynamique des états de surface 60
1.4. Evaluation du système de gestion des eaux souterraines 62
1.4.1. Analyse des mécanismes actuels d'exploitation des eaux souterraines 62
1.4.2. Approche de gestion durable des ressources en eaux souterraines 64
Conclusion partielle 65

Chapitre II : CADRES PHYSIQUE ET HUMAIN DU BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN **67**

2.1. Situation géographique et cadre physique 67
2.1.1. Localisation du bassin sédimentaire côtier du Bénin 67
2.1.2. Contexte géologique et morpho-structural du bassin côtier du Bénin 67
2.1.3. Caractéristiques hydrogéologiques du bassin côtier du Bénin 71
2.1.4. Caractéristiques pédologiques du bassin sédimentaire côtier du Bénin 78
2.1.5. Caractéristiques hydrodynamiques du couvert végétal 81
2.1.6. Etat de la dynamique des hydrosystèmes superficiels dans le bassin sédimentaire côtier 83
2.1.7. Facteurs climatiques de la dynamique des eaux souterraines 87
2.2. Populations et activités socioéconomiques : deux éléments de pression sur les ressources en eaux souterraines 91
2.2.1. Mosaïque sociolinguistique d'une population en forte croissance 92
2.2.1.1. Groupes sociolinguistiques 92
2.2.1.2. Etat de la population : croissance et densité 92
2.2.2. Activités socioéconomiques organisées autour des hydrosystèmes 94
Conclusion partielle 95

DEUXIEME PARTIE : ETAT, TENDANCE, SCENARIOS CLIMATIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DES NAPPES SOUTERRAINES DANS LE BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN **97**

Chapitre III : TENDANCES ET SCENARIOS CLIMATIQUES DANS LE BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN **99**

3.1. Variabilité et tendance climatique dans le bassin sédimentaire côtier 99
3.1.1. Variabilité pluviométrique 99
3.1.1.1. Champs de pluie mensuels, saisonniers et annuels du bassin côtier 99
3.1.2. Rupture de stationnarité, variation et tendances pluviométriques 107
3.1.3. Evolution des températures et du bilan climatique 114
3.1.3.1. Variabilité et tendances thermométriques 114
3.1.3.2. Pouvoir évaporatoire de l'air et bilan climatique 117
3.2. Scénarios climatiques futurs dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin 121
3.2.1. Evolution du climat à l'échelle mondiale et ouest africaine 121
3.2.2. Modélisation du climat actuel et futur dans le bassin côtier du Bénin 126
3.2.2.1. Performance du modèle PRECIS/ECHAM4-A2 127
3.2.2.2. Projection climatique dans le bassin côtier du Bénin à l'horizon 2070-2089 132
Conclusion partielle 137

Chapitre IV : DYNAMIQUE DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES DANS LE BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN **139**

4.1. Dynamique hydroclimatique des eaux souterraines 140
4.1.1. Régime pluvio-piézométrique des forages FR4-2, FR5-2, FE1, F2, SH et F2PNUD 141
4.1.2. Evolution tendancielle des ressources en eau souterraine 143
4.1.3. Estimation de la recharge des nappes d'eau souterraine 148
4.1.3.1. Recharge estimée par la méthode de fluctuation piézométrique 148
4.1.3.2. Recharge estimée par la méthode de bilan d'eau de Thornthwaite 150
4.1.4. Transferts hydriques entre systèmes aquifères et bassins versants 155
4.1.4.1. Bilan hydrologique moyen annuel dans les sous-bassins 155
4.1.4.2. Evaluation des volumes d'eau mobilisés par les sous-bassins 157
4.2. Influence des états de surface sur l'hydrodynamique du bassin 162
4.2.1. Variation des états de surface ''continentale'' du bassin sédimentaire côtier du Bénin et son influence sur les eaux souterraines 162
4.2.2. Dynamique côtière et vulnérabilité des eaux souterraines 170
Conclusion partielle 172

TROISIEME PARTIE : MODES D'EXPLOITATION, QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE ET BACTERIOLOGIQUE ET STRATEGIES DE GESTION DURABLE DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES **173**

Chapitre V : MODE ACTUEL D'EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES DANS LE BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN **175**

5.1. Mobilisation des ressources hydriques 175
5.1.1. Equipement en ouvrages d'hydraulique villageoise 175
5.1.2. Indicateurs de l'approvisionnement en eau potable en milieu rural 178
5.1.3. Indicateurs de l'approvisionnement en eau potable en milieu urbain 179
5.1.3.1. Evolution des quantités d'eau pompées sur les sites de captage 179
5.1.3.2. Variabilité des volumes d'eau mensuels et saisonniers pompés 186
5.1.4. Ouvrages hydrauliques d'exploitation des eaux souterraines 189
5.2. Usages des ressources en eaux souterraines dans le bassin côtier du Bénin 193
5.2.1. Principales fonctions socioéconomiques des eaux souterraines 194
5.2.1.1. Usages domestiques de l'eau souterraine 194
5.2.1.2. Usages agricoles de l'eau souterraine dans le bassin côtier du Bénin 196
5.2.1.3. Usages industriels de l'eau souterraine 197
5.2.1.4. Autres formes d'usages des eaux souterraines 198
5.3. Croyances empiriques et gestion des ressources en eau 199
Conclusion partielle 202

Chapitre VI : SENSIBILITE DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES A LA VARIABILITE DU CLIMAT ET DES MODES D'EXPLOITATION DANS LE BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER DU BENIN **203**

6.1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines 203
6.1.1. Analyses statistiques classiques 203
6.1.2. Sources des ions majeurs dominants dans les eaux 209
6.1.3. Analyse en Composantes Principales (ACP) 212
6.1.4. Caractéristiques des faciès géochimiques des eaux 213
6.2. Contamination bactériologique des eaux souterraines : indicateurs et variation 216
6.2.1. Composition bactérienne des eaux de puits 216
6.2.2. Qualité bactériologique des eaux de forages 219
6.2.3. Qualité bactériologique de l'eau de source 222
Conclusion partielle 224

Chapitre VII : STRATEGIES DE GESTION DURABLE DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES DANS LE BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER **225**

7.1. Stratégies d'amélioration de la disponibilité des eaux souterraines 225
7.1.1. Processus d'amélioration de la recharge naturelle des aquifères 225
7.1.2. Stratégies de recharge artificielle des aquifères en scénario ''climat sec'' 228
7.2. Mesure de gestion durable des ressources en eaux souterraines 233
7.2.1. Mesures alternatives d'utilisation des eaux pluviales et superficielles 233
7.2.1.1. Mobilisation et utilisation des eaux pluviales 233
7.2.1.2. Mobilisation et utilisation des eaux de surface 237
7.2.2. Gestion de la qualité des eaux souterraines 238
7.2.3. Cadres juridique et institutionnel de la gestion des eaux souterraines 240
7.2.4. Approche communicationnelle et éducationnelle sur l'eau 243
Conclusion partielle

CONCLUSION GENERALE **247**

BIBLIOGRAPHIE **253**

Liste des figures 275
Liste des tableaux 278
Liste des photos 279
Table des matières 281