



HAL
open science

Évaluation quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraines de la région des Lacs (centre de la Côte d'Ivoire) : Hydrogéologie et Hydrochimie des aquifères discontinus du district de Yamoussoukro et du département de Tiébissou.

Gbombélé Soro

► To cite this version:

Gbombélé Soro. Évaluation quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraines de la région des Lacs (centre de la Côte d'Ivoire) : Hydrogéologie et Hydrochimie des aquifères discontinus du district de Yamoussoukro et du département de Tiébissou.. Sciences de l'environnement. université Felix Houphouët-Boigny, 2010. Français. NNT : . tel-04233840

HAL Id: tel-04233840

<https://auf.hal.science/tel-04233840v1>

Submitted on 9 Oct 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

République de Côte d'Ivoire

Année Universitaire 2009-2010

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de
la Recherche Scientifique



Université de Cocody



Laboratoire des Sciences et
Techniques de l'Eau et de
l'Environnement (LSTEE)



UFR des Sciences de la
Terre et des Ressources
Minières

N° d'ordre : 661/2010

THÈSE

Présentée à l'UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières
de l'Université de Cocody-Abidjan

Pour obtenir le titre de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE COCODY
EN SCIENCES DE LA TERRE**

Spécialité : HYDROGEOLOGIE & HYDROCHIMIE

Par

SORO Gbombélé

Maître ès Sciences et Techniques de l'Eau

THÈME

ÉVALUATION QUANTITATIVE ET QUALITATIVE DES RESSOURCES EN EAUX
SOUTERRAINES DANS LA REGION DES LACS (CENTRE DE LA CÔTE D'IVOIRE) :
HYDROGEOLOGIE ET HYDROCHIMIE DES AQUIFÈRES DISCONTINUS DU DISTRICT DE
YAMOISSOUKRO ET DU DEPARTEMENT DE TIEBISSOU.

Soutenue publiquement le **19 juin 2010** devant le jury composé de :

AKA Kouamé.	<i>Professeur Titulaire,</i> Université de Cocody	Président du jury
SORO Nagnin.	<i>Maître de conférences,</i> Université de Cocody	Directeur de thèse
JOURDA Jean Patrice R.	<i>Maître de conférences,</i> Université de Cocody	Rapporteur
TROKOUREY Albert	<i>Maître de conférences,</i> Université de Cocody	Rapporteur
BIEMI Jean.	<i>Professeur Titulaire,</i> Université de Cocody	Examineur

DEDICACE

À toi mon père **SORO Fanagatien**, qui as suivi les conseils de la grande Royale de l'Aventure Ambiguë de Cheick Amidou Kane, en envoyant ton premier fils à l'école des Blancs en dépit de toutes les médisances les plus acerbes.

À ma mère **TUO Tiénégnon**, si douce, tu as accepté que ton fils aille loin de toi à des centaines de kilomètres. Trouve dans ce travail les motifs de ton courage, de ta patience et de ton amour pour moi.
Ce travail est le votre, puisse Dieu combler le reste de vos jours de bonheur.

À toi ma chérie **YEO Natenin**, qui a bien voulu partager avec moi le meilleur et le pire, toi qui durant ces nombreuses années de traversé de désert a dû consommer tout le pire. Dans les moments les plus durs tu m'as apporté amour, affection et encouragements. Ma chérie, mon amie, ma confidente et bientôt mon épouse, je te dédie ce travail et aussi à nos deux adorables filles, **SORO Tiénégnon et SORO Tchérégnimín** qui ont souffert de mes absences répétées de la maison. Que Dieu vous bénisse.

AVANT-PROPOS

Les remerciements sont le moyen de montrer qu'un mémoire de thèse est le résultat d'un travail d'équipe qui aboutit uniquement parce qu'un grand nombre de personnes y ont contribué. C'est pourquoi, au terme de ce travail de mémoire qui a été long et fastidieux, il nous plait de témoigner notre reconnaissance et nos remerciements aux personnes qui d'une manière ou d'une autre ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Nos premiers mots sont destinés au **Professeur SORO Nagnin**, Maître de conférences et Directeur du Département des Sciences et Techniques de l'Eau et du Génie de l'Environnement et Directeur de cette thèse. Depuis notre inscription au DEA, vous nous avez inculqué la rigueur scientifique que doit acquérir un chercheur. Votre disponibilité, vos conseils et vos encouragements, lorsque l'horizon paraissait sombre, ont été très précieux durant toutes ces années. Et si la réalisation de ce mémoire dont vous êtes l'initiateur a pu arriver à son terme, c'est toujours à vous. Merci cher maître pour votre confiance en nous acceptant dans votre équipe de recherche.

Notre reconnaissance et notre gratitude à l'endroit du **Professeur BIEMI Jean**, Doyen de l'UFR STRM, qui nous a recruté au troisième cycle. Depuis notre première année universitaire à Abobo-Adjamé, votre charisme et votre passion pour l'hydrogéologie nous ont sans aucun doute orientés vers cette carrière d'hydrogéologue. Merci Cher Professeur et cher Maître pour cette flamme que vous avez allumé en nous.

Nous remercions le Professeur **TROUKOUREY Albert**, Directeur du laboratoire de chimie physique de l'UFR SSMT et Vice-Doyen de la dite UFR, qui a accepté d'instruire cette thèse malgré ses nombreuses charges et d'avoir donné son accord pour cette soutenance.

Nos remerciements vont également à l'endroit des responsables académiques de l'UFR STRM, notamment le **Professeur AKA Kouamé**, Responsable de la Commission scientifique, le **Professeur JOURDA Jean Patrice Roger**, Vice-Doyen chargé de la recherche et instructeur de cette thèse, le **Professeur SOMBO Boko**, vice-doyen chargé de la pédagogie, le **Professeur DIGBEHI Zeli Bruno**, Responsable du Troisième cycle, le **Professeur AFFIAN Kouadio**, Directeur du Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), le **Professeur MONDE Sylvain**, Responsable de la filière de Géologie marine, au **Docteur**

AGHUI N'guessan, Directeur du laboratoire de pédologie et de géologie appliquée et enfin au **Docteur SALEY Mahaman Bachir**, Responsable de la commission examen qui a accepté de lire ce mémoire malgré ses nombreuses charges à la commission des examens. Vos remarques et vos suggestions ont été fort utiles dans la finalisation de ce travail.

Nous remercions particulièrement le **Professeur COULIBALY Yacouba**, Directeur du département Géologie du socle et métallogénie qui a accepté de lire ce mémoire et faire des suggestions pour son amélioration et qui très souvent, nous a soutenus financièrement et moralement.

Nous aimerions ensuite adresser toute notre gratitude aux membres du Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement, maintenant Département des Sciences et Techniques de l'Eau et du Génie de l'Environnement de l'UFR STRM. Au **Docteur LASM Théophile**, avec qui nous avons eu du plaisir à travailler sur l'analyse statistique des transmissivités. Au **Docteur KOUAME Koffi Fernand** pour ses conseils et ses encouragements chaque fois que nous avons l'occasion d'échanger avec lui. Au **Docteur KOUASSI Amani Michel**, cher camarade et cher ami, merci d'avoir accepté de lire et d'apporter des suggestions pour l'amélioration de ce mémoire. Je remercie également les **Docteurs OGA YEI Marie Solange, KOUADIO Emmanuel, KOUASSI Dongo, KOUAME Kan Jean, KOFFI Yao Blaise, YOUAN TA Marc, ADJA Miessan Germain, AKE Gabriel** tous enseignants-chercheurs et membres du Département, vos conseils et votre disponibilité m'ont été fort utiles dans la réalisation de ce mémoire.

Aux enseignants-chercheurs de l'UFR et plus particulièrement aux Docteurs **KOUAMELAN Alain, ALLIALY Marc Ephrem, DJAGOUE Eric Valère, ETTIEN Djetti, KOUADIO Hyppolite**, merci pour vos conseils et encouragements.

Un grand merci à **FOSSOU Kouadio Jean-Luc Hervé**, Doctorant à l'UFR, cher ami et frère ton apport, sur le terrain en géologie générale, a contribué à rendre effective cette étude.

Au **Docteur AHOUSI Kouassi Ernest**, que vais-je te dire que tu ne saches déjà cher frère. Mais l'écriture des remerciements signe la fin de ce travail, aussi permet moi de te dire que j'ai partagé avec toi une expérience fort enrichissante et plaisante depuis le DEA jusqu'à ce jour.

Que Dieu fasse qu'ensemble, nous puissions toujours partager beaucoup de joie, dans la santé et le succès familial et professionnel.

Au Docteur **KOUADIO Clément** et à tous les doctorants de l'UFR STRM, **LOUKOU Nicolas, SORO Tanina, AMANI Mireille, KONE Bintou, BAKA Derving, ADJIRI Oi Adjiri, KOUASSI Evelyne et TOURE Baba** merci pour tous vos encouragements et soutiens indéfectibles.

Nous tenons à remercier tout le personnel non enseignant de l'UFR STRM pour leur disponibilité à notre égard.

A mes amis depuis la première année universitaire, les **Docteurs NEUBA Danho et OUSSOU Kouamé Raphaël**, enseignants chercheurs à l'université d'Abobo-Adjamé, **N'GUESSAN Kadio Clément Narcisse**, Ingénieur agro-alimentaire, **ZADE Sompohi Guy Pacôme, N'DRI Gervais** Doctorants à l'UFR STRM, merci pour tous les moments de joie et de galère que nous avons partagé ensemble.

Nous exprimons toute notre reconnaissance à Monsieur **SORO Métongo Bernard**. Votre disponibilité et votre soutien moral et matériel ont été très importants depuis le DEA jusqu'à la thèse.

Ce travail n'a été possible qu'avec le soutien logistique de la Direction de l'Hydraulique Humaine. C'est pourquoi, nous tenons à remercier Monsieur **TCHIMOU Ngbocho**, anciennement Directeur de ladite structure ainsi que tout le personnel. Nos remerciements vont également à l'endroit de Monsieur **KOBENAN Kouassi**, Directeur Territorial de l'Hydraulique à Yamoussoukro ainsi qu'à tous ses collaborateurs. Nous remercions particulièrement Monsieur **TOURE Tonlieumy** anciennement Responsable du service de l'Hydraulique Villageoise Améliorée (HVA) au sein de ladite structure et qui a bien voulu nous accompagner lors de nos missions avec son véhicule de service.

Lors de nos différentes missions à Yamoussoukro, nous avons bénéficié de la compréhension et de l'esprit d'ouverture de certaines personnes que nous tenons à remercier sincèrement pour leur accueil chaleureux et leur disponibilité. C'est le cas particulièrement du chef de Village de Koffi Agokro (S/P Tiébissou), le responsable des jeunes ainsi que tous les habitants à qui nous tenons à dire un grand merci..

Nos remerciements au **Commandant BOLI Djédjé**, anciennement **Sous-Préfét** de Tié-N'dièkro pour son accueil chaleureux et ses informations sur l'histoire de la région des Lacs.

Nous ne saurions continuer sans remercier **Monsieur N'GUESSAN André**, Sous-directeur de l'Assainissement au District de Yamoussoukro.

Nous exprimons toute notre gratitude à messieurs **KONE Lamine, OUATTARA Lazéni, TUO Yalamoussa, KONE Méthieoulé, SORO Nakoudjaga, SORO Dognimon, KONATE Wossanri, OUATTARA Souleymane, KONE Kagnenegué Charles, les Docteurs SORO Senan Paul, SORO Dogniméton, SORO Dofara et YEO Kolo** tous enseignants-chercheurs à l'Université d'Abobo-Adjamé, pour leur aide et leur soutien moral au cours de cette thèse.

A tous nos parents qui m'ont soutenu depuis l'école primaire à Napié (EPP Napié I, sous-préfecture de Korhogo) jusqu'à la fin de ce mémoire de thèse. Tout particulièrement **Monsieur KOULIBALI Kouana Grégoire** « notre Père » et sa famille, le **Docteur TUHO Zanga Moïse et famille, Messieurs COULIBALY Karim et SILUE Lofoloh** recevez nos remerciements.

A la **famille SORO Nambegué** qui nous a accueilli à Abidjan depuis notre première année universitaire jusqu'au terme de cette thèse. Nous vous restons redevable pour tous ce que vous avez fait.

Aux frères de la Fraternité Jéricho du Campus de Cocody qui nous ont accueilli au sein de la communauté et apporté soutien moral et spirituel. Dans le même élan, à tous mes frères et sœurs de l'Eglise St Jean BOSCO de Korhogo.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont été, à leur manière, proches de moi pendant tout mon travail et dont le soutien nous ont été fort précieux. En bref, merci à tous

TABLE DES MATIERES

DEDICACE	i
AVANT-PROPOS	ii
TABLE DES MATIERES	vi
LISTE DES SIGLES & ACRONYMES	xi
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES TABLEAUX	xv
LISTE DES PLANCHES	XVII
RESUME	xviii
ABSTRACT	xx
INTRODUCTION GENERALE	1
PREMIERE PARTIE : MILIEU NATUREL ET HUMAIN	7
CHAPITRE 1 : CONTEXTE PHYSIOGRAPHIQUE ET SOCIO-ECONOMIQUE DE LA REGION DES LACS	8
1.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE	8
1.2. GEOMORPHOLOGIE, SOLS ET VEGETATION	9
1.2.1. Géomorphologie	9
1.2.2. Sols	10
1.2.3 Végétation	10
1.3 CLIMAT.....	12
1.3.1. Aperçu sur le climat de l'Afrique de l'Ouest.....	12
1.3.2 Aperçu sur le climat de la Côte d'Ivoire	13
1.3.3 Aperçu du climat de la zone d'étude	13
1.4. RESSOURCES ET BESOINS EN EAU DE CONSOMMATION	13
1.4.1. Ressources en eau de surface	13
1.4.2. Ressources en eau souterraine	15
1.4.3. Besoins en eau	15
1.4.4. Assainissement et drainage	17
1.4.5. Hydrographie.....	17
1.4.5.1. Structure du réseau hydrographique	17
1.4.5.2. Densité de drainage	18
1.4.5.3. Régime des cours d'eau	18
1.4.5.4. Variations saisonnières des écoulements.....	18
1.4.5.5. Pente moyenne des cours d'eau.....	20
1.5. ENVIRONNEMENT HUMAIN ET SOCIO-ECONOMIQUE.....	21
1.5.1 Environnement humain	21
1.5.2. Environnement socio – économique	22
1.5.2.1. Agriculture.....	22
1.5.2.2. Elevage et ressources halieutiques	22
1.5.2.3 Tourisme.....	23
1.5.2.4. Ressources minières	23
CONCLUSION PARTIELLE.....	23

CHAPITRE 2 : CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE.....	24
2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE.....	24
2.1.1. Histoire géologique de la Côte d’Ivoire	24
2.1.1.1. Formations libériennes	25
2.1.1.2. Formations éburnéennes	25
2.1.2. Géologie du secteur d’étude	26
2.1.2.1. Roches magmatiques	27
2.1.2.2. Roches métamorphiques birimiennes.....	27
2.1.3. Aspect à l’affleurement des granitoïdes	28
2.1.4. Etude macroscopique des granites observés	32
2.1.5. Altération et formations superficielles	32
2.1.6. Profils d’altération.....	35
2.1.7. Coupe géologique de la zone d’étude.....	37
2.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE.....	38
2.2.1. Acquis sur l’hydrogéologie du socle en Afrique de l’Ouest	38
2.2.2. Etudes hydrogéologiques dans la région des lacs	39
2.2.2.1. Aquifère des altérites	39
2.2.2.2. Aquifère de fissures	40
CONCLUSION PARTIELLE.....	40
CHAPITRE 3 : ORIGINE DE LA MINERALISATION DES EAUX SOUTERRAINES... 41	41
3. 1. INTRODUCTION.....	41
3.2 MINERALISATION NATURELLE DES EAUX SOUTERRAINES	41
3.2.1. Origine des éléments majeurs des eaux souterraines	41
3.2.2. Facteurs influençant la minéralisation.....	47
3.3. RISQUES LIES AUX NITRATES, AU FER ET AU MANGANESE	47
3.3.1. Nitrates	47
3.3.2. Fer et Manganèse	49
3.4. CLASSIFICATION DES EAUX SOUTERRAINES EN FONCTION DES LEUR MINERALISATION.....	50
CONCLUSION PARTIELLE.....	50
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES 51	51
CHAPITRE 4 : DONNEES ET MATERIELS..... 52	52
4.1. DONNEES	52
4.1.1 Données hydroclimatiques	52
4.1.1.1. Elaboration d’une base de données des précipitations	52
4.1.1.2. Analyse critique de la base de données initiale-crédation de la base de données finale	53
4.1.2. Données de forages	54
4.1.3. Données cartographiques et images satellitaires	54
4.1.4. Données physico-chimiques.....	56
4.2. MATERIEL DE TRAITEMENT	56
4.2.1. Matériel de terrain	56
4.2.2. Matériel informatique.....	56
CONCLUSION PARTIELLE.....	58

CHAPITRE 5 : METHODES	59
5.1. METHODOLOGIES D'ETUDE HYDROCLIMATOLOGIQUE	59
5.1.1. Caractérisation de la variation spatio-temporelle des précipitations.....	59
5.1.1.1. Variables statistiques interannuelles des séries de pluies	59
5.1.1.2. Etude du régime saisonnier	60
5.1.1.3. Etude des paramètres influençant la répartition spatiale de la pluviométrie	60
5.1.2. Caractérisation de la variabilité hydroclimatique dans la région des Lacs	61
5.1.2.1. Méthodes des indices pluviométriques.....	62
5.1.2.2. Test statistique de détection de rupture	64
5.1.3. Caractérisation du bilan hydrologique	65
5.1.4. Caractérisation hydrologique du bassin versant du Kan	67
5.1.4.1. Calcul de la lame d'eau écoulée (EMA).....	67
5.1.4.2. Calcul du coefficient de tarissement : loi de Maillet.....	67
5.1.4.3. Construction de la courbe de tarissement	68
5.1.4.4. Evaluation du volume mobilisé par les aquifères.....	68
5.2. METHODOLOGIE D'ETUDE DE LA DYNAMIQUE D'OCCUPATION DU SOL	69
5.2.1. Estimation de la précision de l'interprétation des images.....	71
5.2.2. Evaluation de la dynamique de l'occupation du sol.....	72
5.2.3. Notion d'indice de la capacité de rétention des classes d'occupation du sol.....	73
5.3. METHODOLOGIE D'ETUDE DES PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES ET DES PARAMETRES DE PRODUCTIVITE DES AQUIFERES DE FISSURES	74
5.3.1. Introduction	74
5.3.2. Essais de pompage de courte durée ou essais de puits.....	74
5.3.3. Présentation de la méthode d'interprétation choisie et conditions d'applications ...	75
5.3.3.1. Fondement théorique de la méthode de Jacob (1947).....	76
5.3.3.2. Conditions d'application de la méthode	76
5.3.3.3. Détermination graphique de la transmissivité à la remontée.....	77
5.3.4. Estimation de la transmissivité à partir du débit spécifique à travers une relation empirique.....	78
5.3.5. Distribution des fréquences de transmissivité et de débit spécifique.....	79
5.3.6. Approche probabiliste de l'influence de l'épaisseur des altérites sur la productivité des forages.....	80
5.3.7. Caractérisation des aquifères par l'imagerie satellitaire.....	80
5.3.7.1. Corrections géométriques, mosaïque et extraction de la zone d'étude.....	81
5.3.7.2. Rehaussement des discontinuités	81
5.3.7.3. Extraction des linéaments	82
5.3.7.4. Validation de la carte linéamentaire	82
5.4. METHODOLOGIES DE L'ETUDE HYDROCHIMIQUE	83
5.4.1. Introduction	83
5.4.2. Analyse statistique des données physico-chimiques.....	83
5.4.3. Typologie des eaux (hydrofaciès)	84
5.4.4. Méthodologie de l'étude de l'âge relatif des eaux souterraines	84
5.4.4.1. Principe du système calco-carbonique	85
5.4.4.2. Définition de la pCO ₂ et origine du CO ₂ dissous dans le sol.....	88
5.4.5. Notions de système ouvert et fermé : utilisation du Diagramme pH-HCO ₃	91
5.4.6. Qualité des eaux souterraines et risque pour la santé.....	92

5.4.7. Cartographie hydrochimique.....	92
5.5. METHODOLOGIE DES TRAITEMENTS STATISTIQUES.....	94
5.5.1. Présentation de l'Analyse en composantes principales.....	94
5.5.2. Application de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) à l'étude de la variabilité spatiale des précipitations.....	94
5.5.3. Caractérisation de la productivité des aquifères à partir de l'Analyse en composantes principales normées (ACPN).....	95
5.5.4. Traitement des données hydrochimiques par les analyses statistiques multivariées.....	96
5.5.4.1. Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN).....	96
5.5.4.2. Cluster analysis ou Analyse en Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)	97
CONCLUSION PARTIELLE.....	98
 TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION	99
 CHAPITRE 6 : VARIABILITE HYDROCLIMATOLOGIQUE DANS LA REGION DES LACS.....	100
6.1. PARAMETRES CLIMATIQUES	100
6.1.1. Température	100
6.1.2. Humidité relative	101
6.1.3. Insolation.....	101
6.2. ETUDE DE LA VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS.....	102
6.2.1. Caractéristiques statistiques des pluies.....	102
6.2.2. Etude de la saisonnalité	102
6.2.3 Variations spatiales des précipitations annuelles	105
6.2.3.1. Déplacement des isohyètes dans la zone d'étude	105
6.2.3.2. Etude de la dynamique spatiale des précipitations par l'ACP	108
6.3. FLUCTUATION INTERANNUELLE DE LA PLUVIOMETRIE	109
6.3.1. Analyses des indices pluviométriques	109
6.3.2. Examen de l'homogénéité des séries	114
6.4. BILAN HYDROLOGIQUE	115
6.5. TARISSEMENT ET VOLUME MOBILISE PAR LES AQUIFERES DU KAN.....	117
6.6. DISCUSSION DES RESULTATS DE L'ETUDE HYDROCLIMATIQUE.....	121
CONCLUSION PARTIELLE.....	126
 CHAPITRE 7 : DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES SOLS DANS LA REGION DES LACS.....	127
7.1. EVALUATION DE LA PRECISION DE LA CLASSIFICATION	127
7.2. DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL DANS LA REGION DES LACS.....	128
7.2.1. Analyse de l'occupation du sol	128
7.2.2. Evaluation de la dynamique de l'occupation du sol de 1986 à 2002.....	132
7.3. EVALUATION DE L'IMPACT DE L'ANTHROPISATION SUR LES ECOULEMENTS.....	134
7.4. DISCUSSION DES RESULTATS DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL.....	134
CONCLUSION PARTIELLE	138
 CHAPITRE 8 : CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE DES AQUIFERES FISSURES DE LA REGION DES LACS	139

8.1. CARACTERISATION DES PROPRIETES DES FORAGES	139
8.1.1. Paramètres quantitatifs	139
8.1.2. Influence de l'épaisseur des altérites sur la productivité des forages	143
8.1.3. Paramètre qualitatif : Débit de production	143
8.2. CARACTERISATION DES PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES DES RESERVOIRS.....	146
8.2.1 Analyse et interprétation du débit spécifique et de la transmissivité	146
8.2.2. Etude statistique du débit spécifique et de la transmissivité	148
8.2.3. Relation entre transmissivité, débit spécifique et type de roche	151
8.2.4. Coefficient d'emménagement (S)	153
8.3. CARACTERISATION DE LA PRODUCTIVITE DES FORAGES PAR L'ACP	154
8.3.1. Analyse de la matrice de corrélation	154
8.3.2. Pourcentage de variance exprimée par les axes factoriels.	154
8.3.3. Analyse dans les plans factoriels F1-F2 et F1-F3 dans l'espace des variables.....	155
8.4. CARACTERISATION DE LA FRACTURATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	156
8.4.1. Analyse statistique des réseaux de linéaments.....	156
8.4.2. Discrimination des familles de linéaments.....	157
8.5. DISCUSSION DES RESULTATS DE LA CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUES DES AQUIFERES ET DE LA PRODUCTIVITE DES OUVRAGES	158
CONCLUSION PARTIELLE	166
CHAPITRE 9 : CARACTERISATION HYDROCHIMIQUE ET POTABILITE DES EAUX SOUTERRAINES DANS LA REGION DES LACS.....	168
9.1. RESULTATS	168
9.1.1. Présentation des résultats physico-chimiques des eaux	168
9.1.1.1. Paramètres physiques (mesurés <i>in situ</i>)	168
9.1.1.2. Paramètres chimiques	175
9.1.2. Potabilité des eaux et impact sur la santé publique.....	183
9.1.3. Classification des eaux et notion d'hydrofaciès	187
9.1.4. Rapports caractéristiques des ions	188
9.1.4.1. Sodium, potassium et chlore	188
9.1.4.2. Indice d'échange de base	189
9.1.5. Caractérisation des mécanismes chimiques des eaux souterraines par l'analyse multivariée	190
9.1.5.1. Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN)	190
9.1.5.2. Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)	197
9.1.5.3. Origine de la minéralisation – Corrélation entre les ions.....	198
9.1.5.4. Origine de l'acidité des eaux souterraines.....	204
9.1.6. Étude de l'âge relatif des eaux	205
9.1.6.1. Pressions partielles de CO ₂ équilibrant (pCO ₂)	205
9.1.6.2. Indices de saturation des minéraux	209
9.2. DISCUSSION.....	214
CONCLUSION PARTIELLE	229
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	231
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	238
ANNEXES.....	255

LISTE DES SIGLES & ACRONYMES

ACP : Analyse en Composantes Principales
AEP : Alimentation en Eau Potable
AFD : Agence Française de Développement
AVB : Aménagement pour la Vallée du Bandama
BOAD: Banque Ouest Africaine pour le Développement
CFD : Caisse Française de Développement
CE : Conseil de l'Entente
CHA : Classification hiérarchique Ascendante
CURAT : Centre Universitaire de Recherches et d'Application en Télédétection
DHH : Direction de l'Hydraulique Humaine
DTH : Direction Territoriale de l'Hydraulique
EM: Equateur Météorologique
ETM: Enhanced Thematic Mapper.
ETP : Evapotranspiration potentielle
ETR : Evapotranspiration réelle
FAO : Fonds des Nations Unies pour l'agriculture et l'Alimentation
FED : Fonds Européen de Développement
FIT : Front Intertropical
FNE : Fonds National de l'Eau
FRAR : Fonds Régionaux d'Aménagement Rural
GPS: Global Positioning System
HVA : Hydraulique Villageoise Améliorée
HV : Hydraulique Villageoise
IEB : Indice d'Echange de Base
INS : Institut National de Statistique
ISD : Indice de saturation en Dolomie
ISC : Indice de saturation en Calcite
LANEMA : Laboratoire National d'Essais de Qualité, de Métrologie et d'Analyses
LSTEE : Laboratoire des Sciences et techniques de l'Eau et de l'Environnement
LPA : Laboratoire Privé d'Analyses d'Abengourou
MNA: Modèle Numérique d'Altitude.
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
ORSTOM : Office de Recherche Scientifique des Territoires d'Outre-Mer
PADER-LACS : Plan d'Aménagement de la Région des Lacs
PNHV : Programme National d'Hydraulique Villageoise
SIG : Système d'Information Géographique
SODECI : Société de Distribution d'Eau en Côte d'Ivoire
SODEPRA : Société de Développement de la Production Animalière
SODEXAM : Société de Développement et d'Exploitation Aéroportuaire et Maritime.
STRM : Sciences de la Terre et des Ressources Minières
SRTM: Shuttle Radar Topography Mission
TM: Thematic Mapper
UFR : Unité de Formation et de Recherche
UNICEF : Fonds des Nations unies pour l'enfance
UTM: Universal Transversal Mercator
ZCIT : Zone de Convergence InterTropicale

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude.....	8
Figure 2 : Carte du modèle numérique d'altitude (MNA) de la zone d'étude.....	10
Figure 3 : Le V baoulé (d'après W. Verheye, 1972 <i>in</i> Leblond, 1984).....	11
Figure 4 : Schéma des principaux flux de masses d'air en Afrique de l'Ouest et coupe Nord-Sud de la troposphère avec la localisation des zones pluvieuses au sol.....	12
Figure 5 : Carte de répartition spatiale de plus de 500 petits barrages construits entre 1970 et 1985 (Brou <i>et al.</i> , 2009).....	14
Figure 6 : Réseau hydrographique de la zone d'étude.....	19
Figure 7: Histogramme des débits du Kan à la station de Dimbokro. Période de 1970 à 1995.....	19
Figure 8 : Carte géologique de la Côte d'Ivoire (modifiée par Kouamélan (1996)).....	25
Figure 9 : Carte géologique de la zone d'étude.....	27
Figure 10 : Profil d'altération sur schiste et granite (Kouassi, 2004).....	36
Figure 11 : Représentation schématique de la répartition des diverses formations géologiques et végétales dans la zone d'étude (Leblond, 1984).....	37
Figure 12 : Cycle de l'azote (Débieche, 2002).....	45
Figure 13 : Devenir des nitrates, nitrites et composés N-nitroso dans l'organisme (Source : Ratel, 1992).....	48
Figure 14 : Composition colorée des canaux 2,3 et 1 des scènes Landsat ETM+ du 20 janvier 2002 et localisation de quelques retenues dans la région des Lacs et environs.....	55
Figure 15: Carte des points d'échantillonnage des eaux souterraines.....	57
Figure 16 : Représentations graphiques du rabattement en fonction du temps corrigé.....	78
Figure 17: Diagramme des relations pH réel-Teneurs en bicarbonates (courbe théorique) 25°C et pour une force ionique de 10^{-3} mol/L).....	92
Figure 18 : Synthèse de la méthodologie de réalisation de la cartographie thématique des paramètres hydrochimiques.....	93
Figure 19 : Coupe schématique d'un forage dans le socle et définition des paramètres hydrogéologiques (Mbonu, 1991, modifié).....	95
Figure 20 : Exemple de dendrogramme.....	98
Figure 21 : Variation mensuelle des paramètres climatiques à Yamoussoukro.....	101
Figure 22 : Diagramme ombro-thermique à la station de Yamoussoukro (1975-1997).....	104
Figure 23 : Diagramme ombro-thermique à la station de Tiébissou (1986-1995).....	104
Figure 24: Dynamique spatio-temporelle des isohyètes dans le V baoulé (1966-2000).....	106
Figure 25 : Carte des isohyètes de 1966-2000 dans le V Baoulé et environs.....	107
Figure 26 : Couplage pluies et coordonnées géographiques : relation pluie/latitude.....	107
Figure 27: Espace des variables (stations pluviométriques) dans le plan F1-F2.....	109
Figure 28. Evolution interannuelle de la pluviométrie à Yamoussoukro :.....	111
Figure 29. Evolution interannuelle de la pluviométrie àTiébissou :.....	112
Figure 30: Evolution spatiale des indices pluviométriques décennaux de 1966 à 2000 dans le « V » Baoulé.....	113

Figure 31: Fluctuations couplées de la variable U de Pettitt et de la pluviométrie station de Yamoussoukro.....	114
Figure 32: Fluctuations couplées de la variable U de Pettitt et de la pluviométrie station de Tiébissou.....	115
Figure 33: Exemple de courbes de tarissement du Kan à Dimbokro.....	119
Figure 34: Evolution du coefficient de tarissement et du volume mobilisé par le Kan (1970-1995).....	120
Figure 35 : Variation interannuelle du volume mobilisé par les aquifères du Kan (1970-1995).....	120
Figure 36 : Variation des cotes de la retenue d'eau du barrage de Kossou de 1965 à 2000.....	123
Figure 37: Images de la classification supervisée de la zone d'étude en 1986 et 2002.....	131
Figure 38 : Evolution temporelle du pourcentage de l'occupation du sol.....	133
Figure 39: Distribution des profondeurs totales des forages en fonction des épaisseurs des altérites.....	141
Figure 40: Graphe des gros débits en fonction de l'épaisseur des altérites.....	141
Figure 41 : Histogramme de distribution des niveaux statiques.....	141
Figure 42 : Histogramme des fréquences d'observation de la première venue d'eau.....	142
Figure 43 : Influence du réservoir capacitif sur le débit.....	144
Figure 44 : Influence du réservoir capacitif sur le débit spécifique.....	144
Figure 45 : Histogramme des fréquences de débits observés dans la région des Lacs.....	145
Figure 46 : Carte de répartition spatiale des débits.....	145
Figure 47 : Comportement des arrivées d'eau en fonction de la profondeur.....	145
Figure 48 : Distribution des débits spécifiques dans la région des Lacs.....	146
Figure 49 : Distribution spatiale des transmissivités dans la région des Lacs.....	147
Figure 50: Distribution des fréquences de transmissivité.....	149
Figure 51 : Distribution des fréquences des logT. Ajustement à la loi normale.....	150
Figure 52 : Distribution de la transmissivité (m ² /h) et dans un diagramme lognormal.....	150
Figure 53 : Distribution du débit spécifique (m ² /h) dans un diagramme log-normal.....	150
Figure 54: Distribution de la transmissivité en fonction du débit spécifique.....	151
Figure 55 : Distribution de LogT en fonction de Log Q/s.....	152
Figure 56 : Analyse en composantes principales dans les plans factoriels F1-F2 et F1-F3.....	156
Figure 57 : Carte des linéaments.....	157
Figure 58: Histogramme de distribution des orientations des linéaments.....	158
Figure 59 : Histogramme des effectifs de classes de température des eaux souterraines de la région des Lacs.....	169
Figure 60 : Carte de répartition spatiale des températures des eaux souterraines de la région des Lacs.....	170
Figure 61: Histogramme des effectifs de classes de CE des eaux souterraines de la région des Lacs.....	171
Figure 62 : Carte de répartition spatiale des conductivités dans les eaux souterraines de la région des Lacs.....	172
Figure 63: Histogramme des effectifs de classes de pH des eaux souterraines de la région des Lacs.....	173

Figure 64 : Carte de répartition spatiale du pH dans les eaux souterraines de la région des Lacs.....	174
Figure 65: Histogrammes des fréquences de distribution des anions dans les eaux souterraines.....	178
Figure 66: Histogrammes des fréquences de distribution des cations majeurs dans les eaux souterraines.....	181
Figure 67: Histogramme des effectifs de classes de Fer dans les eaux souterraines.....	183
Figure 68 : Evolution des cas de maladies hydriques de 2000 à 2003 dans la région des Lacs.....	185
Figure 69: Représentation des eaux de la région des Lacs dans le diagramme de Piper.....	188
Figure 70 : ACP des eaux souterraines de la région des lacs (plan factoriel F1-F2).....	194
Figure 71 : ACP des eaux souterraines de la région des Lacs (plan factoriel F1-F3).....	196
Figure 72: Dendrogramme de la classification ascendante hiérarchique des paramètres chimiques.....	198
Figure73: Corrélation : entre Conductivité et HCO_3^-	200
Figure 74 : Corrélation entre Conductivité et TDS.....	200
Figure 75: Corrélation entre TDS et Ca + Mg.....	200
Figure 76:Corrélation Ca^{2+} en fonction de $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$	200
Figure 77: Diagramme de $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ en fonction de $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$	200
Figure 78 : Carte de répartition spatiale des nitrates couplée avec les grands centres urbains...	202
Figure 79: Carte de répartition spatiale des teneurs en fer en fonction de la géologie dans la région des Lacs.....	203
Figure 80: Distribution de la dureté totale en fonction de l'alcalinité des eaux souterraines dans la région des Lacs.....	204
Figure 81: Fréquence de distribution des valeurs de $\log \text{pCO}_2$	206
Figure 82 : Relation entre $\log \text{PCO}_2$ et la teneur en HCO_3^-	207
Figure 83 : Diagramme $\text{pH}_{\text{réel}}-\text{HCO}_3^-$ des eaux souterraines dans la région des Lacs.....	207
Figure 84: Carte de distribution spatiale des $\log \text{pCO}_2$ dans la région des Lacs.....	208
Figure 85 : Corrélation entre TDS indice de saturation en aragonite.....	209
Figure 86 : Diagramme ISD en fonction d'ISC des eaux souterraines dans la région des Lacs.....	210
Figure 87: Carte de répartition spatiale des ISC couplée avec les teneurs en nitrates.....	212
Figure 88: Corrélation TDS-indices de saturation des minéraux sulfatés dans la région des Lacs.....	213

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Données cartographiques de quelques affluents du Bandama et du Kan	20
Tableau II : Reconstitution géomorphologique du V Baoulé (D'après Avenard et <i>al.</i> , (1971))....	34
Tableau III: Teneurs en nitrates et activités ou occupation du sol (source : Ratel, 1992).	45
Tableau IV : Signes et symptômes liés à la méthémoglobinémie (Fewtrell, 2004 : modifié)	48
Tableau V : Stations pluviométriques de la base donnée initiale.....	53
Tableau VI: Coefficients de capacité de rétention pour chacune des classes d'occupation des sols. (Cecchi et <i>al.</i> , 2009).....	73
Tableau VII: Filtrés directionnels de Sobel 7X7.....	82
Tableau VIII : Principaux équilibres du système calco-carbonique dans les eaux souterraines et expressions de leurs constantes dans les trois phases.....	87
Tableau IX: Expressions analytiques des constantes d'équilibre (<i>in</i> Biémi, 1992).....	87
Tableau X: Statistique des paramètres climatiques mesurés à la station de Yamoussoukro.	100
Tableau XI: Paramètres statistiques des précipitations aux stations de Tiébissou et Yamoussoukro.....	102
Tableau XII : Valeurs propres et pourcentages de variance exprimée.....	108
Tableau XIII: Bilan hydrique à la station de Yamoussoukro (Période 1975-1995).....	115
Tableau XIV : Résumé du bilan hydrique dans la zone d'étude.....	116
Tableau XV : Paramètres statistiques caractéristiques du Kan	118
Tableau XVI: Résultats de l'infiltration calculée selon Thornthwaite dans certaines régions de la Côte d'Ivoire.....	124
Tableau XVII: Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat TM (1986)	127
Tableau XVIII: Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat ETM ⁺ (2002)	127
Tableau XIX : Evolution de l'occupation des sols entre 1986 et 2002.....	128
Tableau XX: Taux d'évolution des classes de l'occupation du sol.....	132
Tableau XXI : Evolution des coefficients de rétention (Cr) dans la zone d'étude entre janvier 1986 et janvier 2002.....	134
Tableau XXII : Caractéristiques statistiques des paramètres hydrogéologiques	139
Tableau XXIII: Résultats statistiques des débits en fonction des classes du CIEH.....	143
Tableau XXIV: Statistiques élémentaires de la transmissivité (m ² /h) et du débit spécifique (m ² /h).....	146
Tableau XXV: Classe des transmissivités dans la région des Lacs	147
Tableau XXVI : Résumé statistique de la perméabilité déduite au niveau des aquifères de la région des Lacs.....	148
Tableau XXVII : Résultats des tests statistiques appliqués à la transmissivité	148
Tableau XXVIII : Résultats des tests statistiques appliqués au débit spécifique.....	148
Tableau XXIX : Transmissivité en fonction des types de roches dans la région des Lacs	152
Tableau XXX : Variation des valeurs de transmissivité en fonction du type de roches dans certaines régions de la Côte d'Ivoire.....	153
Tableau XXXI : Matrice de corrélation des paramètres de forage	154
Tableau XXXII : Valeurs propres	154
Tableau XXXIII : Statistiques élémentaires de la température (°C) des eaux souterraines de la région des Lacs.....	168

Tableau XXXIV: Résumé des statistiques élémentaires de la conductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$	170
Tableau XXXV : Résumé des statistiques élémentaires du pH (unité pH) et Eh (mV) dans les eaux souterraines de la région des Lacs.	172
Tableau XXXVI : Résumé des statistiques élémentaires de l' O_2 dissous (OD) en mg/L dans les eaux souterraines dans la région des Lacs.....	175
Tableau XXXVII : Statistiques élémentaires des composés azotés (nitrate, nitrite et l'ammonium) en mg/L dans les eaux souterraines de la région des Lacs.	175
Tableau XXXVIII: Statistiques élémentaires des anions (phosphate, bicarbonate, chlorures et sulfate) en mg/L dans les eaux souterraines dans la région des Lacs.....	176
Tableau XXXIX: Statistiques élémentaires des concentrations des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) en mg/L dans les eaux souterraines dans la région des Lacs.....	179
Tableau XL: Statistiques élémentaires des concentrations Fe et Mn (mg/L) dans les eaux souterraines dans la région des Lacs.	182
Tableau XLI : Seuils de classe qualité pour les nitrates pour les eaux de consommation humaine appliqués à la région des Lacs.....	183
Tableau XLII: Statistiques épidémiologiques des maladies liées à l'eau dans la région des Lacs.....	184
Tableau XLIII : Rapports caractéristiques de quelques points d'eau avec ieb; ($\text{m}\text{éqL}^{-1}$).	188
Tableau XLIV : Matrice de corrélation entre les éléments chimiques des eaux souterraines de la région des Lacs.....	190
Tableau XLV : Valeurs propres et pourcentage de variance exprimée.....	191
Tableau XLVI : Vecteurs propres (coefficients de corrélation des variables centrées réduites avec les facteurs).....	192
Tableau XLVII : Résumé statistique des indices de saturation (Is) des carbonates secondaires, des minéraux ferreux, du gypse et de l'anhydrite.	205

LISTE DES PLANCHES

Planche 1 : Photos de quelques types de retenues d'eau dans la région des Lacs.....	14
Planche 2 : Différents types d'ouvrages de captage des eaux souterraines dans la région des Lacs.	16
Planche 3 : Affleurement en blocs de granite dans le lit du Bandama à Zambakro d'une dalle de granite dans une retenue d'eau.....	30
Planche 4 : Quelques types d'affleurements rencontrés dans la région des Lacs.....	31
Planche 5 : Fractures créées dans les affleurements par l'action des végétaux	33
Planche 6 : Mesure des paramètres physico-chimiques in situ d'un puits de la ville de Yamoussoukro (Quartier Dioulakro).....	57
Planche 7 : Différents modes d'occupation du sol dans la région des Lacs.....	130
Planche 8 : Exemple d'ouvrages hydrauliques mal entretenus dans la région des Lacs, sources potentielles de pollution. (photos Soro G.).....	186
Planche 9 : Chenal d'écoulement des eaux usées et du lixiviat issu des ordures ménagères dans le quartier Dioulabougou de Yamoussoukro (Photos G. Soro).....	215

RESUME

Titre : « *Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraines de la région des Lacs (centre de la Côte d'Ivoire) : Hydrogéologie et Hydrochimie des aquifères discontinus du district de Yamoussoukro et du département de Tiébissou* »

Le district de Yamoussoukro et le département de Tiébissou dans la Région des Lacs subissent les effets pervers des changements climatiques relevés en Afrique et en Côte d'Ivoire. L'influence de ces changements sur la quantité et la qualité des ressources en eau et le mode d'occupation du sol est encore mal connue. Dans cette zone où l'agriculture est la principale activité économique, les seules ressources hydriques sûres et disponibles pour l'Alimentation en eau potable des populations rurales sont celles des aquifères d'altérites et de fissures. La présente étude vise donc à une meilleure connaissance de ces aquifères au plan quantitative et qualitative. Pour ce faire, plusieurs techniques, parmi lesquelles, l'hydroclimatologie, l'occupation du sol, l'hydrodynamique, l'hydrochimie et la qualité des eaux ont été utilisées.

L'étude de la dynamique spatio-temporelle des précipitations a mis en évidence un gradient pluviométrique de direction SW-NE. Celui-ci est en constance variation dans le sens de la baisse pluviométrique dans la zone d'étude. Le déficit hydrologique est de 38,80% avec des effets très néfastes relevés au niveau des installations hydroélectriques. Les volumes mobilisés par les aquifères du bassin du Kan sont faibles. Ils sont compris entre 0,048 et 0,491 km³ avec une moyenne de 0,158 km³. Ces volumes traduisent une baisse des réserves en eau souterraine des aquifères. On a pu observer au cours des années 1980 et 1985 des pics qui se sont traduits au niveau des coefficients de tarissement par une baisse.

L'analyse diachronique d'images satellitaires (TM et ETM⁺) a mis en évidence une modification spatio-temporelle de l'occupation du sol. Cette dynamique est marquée par la régression de la savane arborée au profit des sols nus ou dégradés et des cultures. Parallèlement, on observe une progression de la forêt. Les coefficients de rétention calculés sont faibles et rendent compte d'une forte anthropisation de la zone.

Les paramètres hydrodynamiques des aquifères sont très dispersés et s'étendent en général sur quatre ordres de grandeurs. Cette forte dispersion rend compte de la forte hétérogénéité au niveau des aquifères discontinus. Les transmissivités varient entre $1,15 \cdot 10^{-6}$ et $4,48 \cdot 10^{-4}$ m²/s. avec une moyenne de $4,95 \cdot 10^{-5}$ m²/s. Les débits spécifiques évalués varient de 0,008 à 2,03 m²/h/m avec une moyenne de 0,19 m²/h/m. Les perméabilités déduites sont comprises entre $1,54 \cdot 10^{-8}$ et $1,87 \cdot 10^{-5}$ m/s une moyenne de $1,35 \cdot 10^{-6}$ m/s. Une relation empirique

de forme puissance entre la transmissivité et le débit spécifique avec un bon coefficient de régression ($R^2 = 0,8$) a été déterminée. Elle permet d'estimer les valeurs de la transmissivité là où elles font défaut en prévision d'une étude de modélisation hydrodynamique.

Les linéaments cartographiés dans la zone ont pour direction d'orientation majoritaire N-S avec des directions secondaires N90-100, N20-30, N40-50, N60-70, N85, N140 et N150-160.

Le faciès bicarbonaté calcique est commun à la plupart des eaux souterraines de la région des Lacs, signe d'une continuité hydraulique des aquifères. Les eaux présentent dans leur ensemble une minéralisation moyenne avec des valeurs extrêmes de $1097 \mu\text{S}/\text{cm}$ dans les nappes de fissures et $1285 \mu\text{S}/\text{cm}$ dans celles des altérites. Cette minéralisation eaux est acquise par hydrolyse acide des minéraux des roches encaissantes après l'infiltration des eaux de pluies enrichies en CO_2 du sol. Les eaux sont récentes et évoluent dans un système ouvert au CO_2 de l'atmosphère du sol. Elles ont une bonne vitesse de circulation caractéristique de la bonne perméabilité des aquifères. Au plan qualitatif, les eaux sont chimiquement aptes à la consommation humaine par rapport aux normes OMS. Toutefois, certains points d'eau présentent des teneurs en nitrates et en fer dépassant la norme OMS. La pollution due aux nitrates est d'origine anthropogénique tandis que l'excès de fer dans les eaux est d'origine géologique et est lié à une minéralisation naturelle des eaux.

Mots clés : Région des lacs, aquifères discontinus, gradient pluviométrique, occupation du sol, paramètres hydrodynamiques, minéralisation, pollution, anthropogénique.

ABSTRACT

Title “*Quantitative and qualitative assessment of groundwater resources in lakes’ region (centre of Côte d’Ivoire): Hydrogeology and hydrochemistry of heterogeneous aquifers of Yamoussoukro and Tiébissou districts*”

Yamoussoukro and Tiébissou districts in the lakes region underwent the perverse effects of the climatic variability’s raised in West Africa. Its impacts on the quantitative and qualitative groundwater resources and the land cover conditions are unknown. In this area, where agriculture is the main economic activity, the only available sure water resources for food and drinking water of the farming populations are those of the alterites and cracks aquifers. The present survey aims therefore to a better knowledge of these aquifers at the qualitative and quantitative level. In this way, many techniques’, among which, hydroclimatology, land cover, hydrodynamic, hydrochemistry and waters quality have been used.

The survey of the dynamic spatio-temporal of the rain has discovered a gradient of SW-NE direction of rain-fall in constancy variation in the sense of decrease in the area. The hydrologic deficit is 38.8% with very ominous effects noted to the level of the hydroelectric facilities. The volumes mobilized by the aquifers of the Kan are estimated between 0.048 and 0.491 km³ with 0.158 km³ as average. These volumes are weak and show a decrease of the groundwater reserves.

Satellite images (TM and ETM⁺) diachronic analysis has found the evident space-time modification of the land cover. This is situated by the decrease of the savanna raised to the profit of naked soils or damaged and the farms. The increase of forest is notice. The zone is also marked by the falling percentage of water keeping and that explain an important anthropization.

The hydrodynamic parameters of aquifers are spread most of time on four sides presenting strong heterogeneous aquifers. The transmissivities vary from $1.15 \cdot 10^{-6}$ to $4.48 \cdot 10^{-5}$ m²/s with an average of $4.95 \cdot 10^{-5}$ m²/s. Specifics capacity evaluated vary from 0.008 to 2.03 m²/h/m with 0.19 m²/h/m in average. The permeabilities are situated between $1.54 \cdot 10^{-8}$ and $1.87 \cdot 10^{-5}$ m/s average of $1.35 \cdot 10^{-6}$ m/s. An empiric relation of shape power between the transmitivity and the specific capacity with a well coefficient decrease ($R^2 = 0.8$) has been determined. It permits to estimate the transmissivity values where they make defect in forecasting of survey hydrodynamic modeling. Cartographied lineaments in this area have as main orientation N-S with secondary’s orientations N90-100, N20-30, N40-50, N60-70, N85, N140 and N150-160. The calcic bicarbonate facies is common to most waters in the Region des Lacs sign of a hydraulic

continuity. Waters have been mineralized in average with some tops values of 1097 $\mu\text{s}/\text{cm}$ in the cracks and 1285 $\mu\text{s}/\text{cm}$ in the alterites. That mineralization of water is acquired by acidic hydrolysis of minerals of the casing rocks after the infiltration of rain water enriched in CO_2 of soil. Waters are recent and evolve in a system opened to the CO_2 of the atmosphere of the soil. Concerning the qualitative levels, waters are chemically acceptable for human consumption comparing to the WHO's norms. However some points of water deserve a particular attention, because they have holding in nitrate and in iron overcoming WHO's norms. This chemical pollution of nitrate is from anthropogenic.

Key words: Lakes Region, heterogeneous aquifers, rain fall gradient, land cover, hydrodynamic parameters, mineralization, pollution, anthropogenic.

INTRODUCTION GENERALE

Le poète Grec Pindare décrivait en 500 AV. JC dans ses odes que « l'eau était la matière la plus précieuse de tous les biens ». L'accès à cette matière a toujours guidé l'installation des communautés humaines dans un espace géographique donné. Il en est de même pour la réalisation des projets de développement car l'homme ne peut vivre sans cette ressource. L'illusion de l'abondance de cette ressource naturelle considérée comme inépuisable a entraîné son gaspillage provoquant une pénurie hydrique accentuée par une forte pression démographique et une demande de plus en plus forte au niveau de l'agriculture et de l'industrie. Cet état de fait est source de conflits entre les différents utilisateurs de l'eau. En Afrique, on assiste à des conflits permanents entre agriculteurs et éleveurs. D'aucuns pensent que la troisième guerre mondiale sera celle de l'eau. En effet, l'inégale répartition de l'eau sur la planète a fait d'elle un enjeu politique qui dans certaines parties du monde est utilisé comme une arme géopolitique.

Dans les pays en voie de développement, l'évolution démographique entraînant avec elle une forte urbanisation et l'avènement d'une industrie naissante vont accentuer la pression sur les ressources en eau (superficielle et souterraine). Tout ceci pourrait compromettre le développement durable, la sécurité alimentaire et l'industrialisation. C'est en somme tout l'écosystème dans toutes ses composantes qui serait menacé. En effet, en Afrique, l'accès à un point d'eau de qualité est encore problématique quelle que soit l'aire géographique. Environ 62 % des Africains avaient un accès à un point d'eau de qualité, en 2000 (OMS et UNICEF, 2000 *in* Anonyme, 2008). Dans les zones urbaines, l'approvisionnement est meilleur, et 85 % des citadins ont accès à de l'eau de bonne qualité. Par contre, en milieu rural, les africains passent encore beaucoup de temps à aller chercher de l'eau, et 28 % de la population qui, dans le monde, n'a pas accès à un point d'eau de qualité, vivent en Afrique. Les femmes sont particulièrement touchées par ce phénomène car ce sont elles qui vont chercher l'eau pour leur famille. La médiocrité de l'approvisionnement en eau et de l'assainissement peuvent également être à l'origine de la contamination des eaux de surface et des eaux souterraines avec des effets secondaires sur les hommes.

Ainsi, le mauvais approvisionnement en eau potable et l'absence de moyens d'hygiène expliquent la prévalence élevée de maladies liées à l'eau telles que l'ascaridiase, le choléra, la diarrhée, la dracunculose, la dysenterie, les infections oculaires, l'ankylostomiase, la gale, la bilharziose et le trachome. A l'aube du 21^{ème} siècle, 80 % des maladies sont encore d'origine hydrique d'où l'importance de la qualité de l'eau pour la santé publique. En 1998, 72 % de tous les cas signalés de choléra, dans le monde, concernaient l'Afrique. La Côte d'Ivoire n'a pas échappé à cette épidémie. En effet, depuis octobre 2000, la Côte d'Ivoire est frappée par

des épidémies récurrentes de choléra qui se sont propagées régulièrement pour atteindre toutes les régions du pays. Au total, 10 550 cas ont été signalés entre 2001 et 2002 avec 492 cas de décès (Anonyme, 2003 a). Face à ce triste constat, les organismes internationaux et les gouvernements locaux ayant pris conscience de l'ampleur du non respect du droit d'accès à une eau potable pour les peuples, ont lancé de vastes programmes d'hydraulique humaine avec pour objectif de freiner cette autre catastrophe.

C'est dans cette optique que la Côte d'Ivoire a lancée dans les années 1973 son Programme National d'Hydraulique Villageoise (PNHV) dont l'objectif était d'offrir 10 à 15 L/jour/habitant, soit un point d'eau pour 100 habitants. Ces besoins ont été revus à la hausse à partir des années 80 avec 15 à 20 L/jour/habitant (Anonyme, 2001). En 1990, un nouveau système a été introduit. L'hydraulique villageoise améliorée (HVA) qui est une mini-adduction d'eau potable intermédiaire entre l'hydraulique urbaine et l'hydraulique villageoise. C'est un système adapté aux localités de 1000 à 4000 habitants avec pour objectif de fournir au minimum 20 L/jour/habitant. Quel est le bilan de toutes ces politiques au plan national ?

Constats

A la date du 31 janvier 2001, 19 437 points ont été réalisés pour un montant global de 99 milliards de FCFA. Sur ce total, 4 467 points d'eau sont abandonnés pour diverses raisons (pannes mécaniques, tarissement, qualité de l'eau, etc....) et 14 970 sont en exploitation, ce qui donne un taux de couverture national de 77 %. Les besoins à satisfaire s'élèvent à 6 806 nouveaux points d'eau. L'exploitation des eaux souterraines s'est imposée comme solution pour pallier les difficultés d'approvisionnement en eau dans les zones rurales et urbaines. L'amélioration de la qualité reste encore un objectif à atteindre. De plus, le taux d'échec souvent élevé lors de l'implantation des forages impose une meilleure connaissance du mode de recharge et d'exploitation des aquifères de socle (Soro, 2002).

Au plan local, plusieurs financements (BOAD, AVB, CE, AFD, FRAR, FED, FNE, Présidence de la République, etc....) ont permis de réaliser 1 176 points d'eau (forages et puits modernes). Mais le constat est amer, en effet, sur ces 1176 ouvrages, 538 sont abandonnés pour diverses raisons (panne mécanique, tarissement, qualité de l'eau, etc....) et 128 ont été déclarés négatifs car n'ayant pas atteint un débit minimum de 1 m³/h pour être déclaré positif, ce qui fait un total de 766 ouvrages abandonnés, soit 65 %. Ce constat est alarmant et interpelle les scientifiques vu les sommes colossales que l'Etat ivoirien et les bailleurs de fonds investissent. De plus, 8 245 nouveaux points d'eau sont à créer par l'état par rapport à l'agrandissement des villages. C'est fort de ce constat que la présente étude,

dans la région des Lacs, vient compléter celles précédentes de **Faillat et Leblond (1982)**, de **Leblond (1984)** et de **N'guessan (1985)** qui ont permis de comprendre le fonctionnement des aquifères de fissures.

Intérêts de l'étude

Le transfert effectif de la capitale politique à Yamoussoukro qui se manifeste physiquement par la construction des locaux des différentes institutions de l'Etat va sans aucun doute accroître les besoins en eau. De plus, le taux élevé d'ouvrages abandonnés dans la région qui a un grand potentiel en ressources d'eau de surface (retenues d'eau, lacs etc....) suscite beaucoup d'intérêts sur le plan scientifique pour une région qui est à cheval entre la forêt et la savane.

De même l'impact des changements climatiques intervenus ces dernières années a eu pour effet de créer des déficits pluviométriques chroniques qui entraînent une baisse des niveaux des rivières et des forages (Soro et *al.*, 2006 ; Kouassi et *al.*, 2007). Le secteur d'étude à l'instar de toutes les autres régions de Côte d'Ivoire, souffre d'un manque cruel d'eau potable depuis un certain nombre d'années. Cette situation est certes liée au mauvais choix des sites d'implantation des forages entraînant des dénoyages fréquents des nappes mais elle est surtout soutenue et amplifiée par des variations du climat observées en Afrique de l'Ouest depuis 1973. De plus, la dégradation de la couverture végétale a une influence sur les régimes climatiques (Brou, 2005) et donc sur les régimes hydrologiques. L'importance des types d'occupation des sols sur les réponses des bassins versants en termes d'écoulement est connue (Cecchi et *al.* 2009). Cette situation a pour conséquence directe d'agir sur les apports en ressources en eau au niveau des retenues d'eau dans la zone d'étude et aussi au niveau des nappes phréatiques. Ainsi, Soro et *al.* (2007), ont relevé au niveau du barrage de Kossou une réduction d'environ 40% de sa superficie depuis la mise en service de celui-ci en 1972.

Par ailleurs, les aquifères exploités ne sont connus que de façon sommaire et leurs caractéristiques géométriques et hydrodynamiques sont encore mal connues (Faillat et Leblond, 1982 ; Leblond, 1984, N'guessan, 1985). Dans les villages et campagnes, les puits traditionnels et les eaux de surface (rivière, marigots, sources) demeurent encore les points traditionnels d'approvisionnement en eau. Pendant la saison sèche, ces populations doivent parcourir de longues distances pour avoir accès aux points d'eau. La vulnérabilité des eaux de surface, des nappes phréatiques, des sources et des ouvrages de captage (forages et puits) reste une donnée qui n'est pas prise en compte par les différents utilisateurs (pesticides, engrais,

fumier, etc.) dans cette région à vocation agricole. Il apparaît donc impérieux de développer les connaissances sur les ressources en eau souterraine de la région.

Le nombre de forages restant à réaliser dans la zone est d'environ 203. A cela, il faut ajouter les ouvrages à restaurer. Si les études antérieures ont mis en évidence les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères du sol dans un périmètre expérimental. Cette étude n'a pas prise en compte les paramètres chimiques et physico-chimiques des eaux dans la zone. C'est pourquoi, il s'avère nécessaire pour nous de faire une étude d'évaluation de la quantité et de la qualité des eaux souterraines à travers l'outil hydrochimique et les paramètres hydrodynamiques de ces aquifères. Les objectifs visés par cette étude sont multiples et variés.

Objectifs

Le transfert effectif de la capitale entrainera dans cette région beaucoup de bouleversements tant au plan économique que social. Cet état de fait aura sans aucun doute une forte pression sur le mode d'occupation des sols de même que sur la quantité et la qualité des ressources hydriques. C'est donc pour donner une esquisse de solutions à cette situation que le thème de cette thèse s'intitule comme suit « ***Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraines de la région des Lacs (centre de la Côte d'Ivoire) : Hydrogéologie et Hydrochimie des aquifères discontinus du district de Yamoussoukro et du département de Tiébissou*** »

L'objectif général de cette étude est d'aboutir, à partir des données hydroclimatiques, satellitaires, hydrogéologiques et hydrochimiques, à la connaissance de la structure et du fonctionnement des aquifères de la région des Lacs. En effet, une meilleure connaissance de ces aquifères, de même qu'une maîtrise des modes d'occupation du sol devraient permettre d'entreprendre une gestion durable des ressources en eau souterraine. Au total, tout cela pourra aider les gestionnaires à établir des actions concrètes en matière de gestion, de protection préventive et de conservation de l'environnement en général et des ressources en eau en particulier.

Les objectifs spécifiques de cette étude sont au nombre de quatre :

- **évaluer, analyser et caractériser les paramètres hydroclimatiques** (pluviométrie et débit) dans la zone à partir de la dynamique spatiale des précipitations, du bilan

hydrologique et de la loi de Maillet; étudier leur impact sur l'évolution des ressources en eau dans la zone ;

- **caractériser la dynamique de l'occupation du sol** : sur la base d'une analyse diachronique d'images satellitaires, cette étude devrait permettre de comprendre l'évolution de l'occupation des sols (déforestation, augmentations des surfaces nues ou dégradées, etc.) et son l'impact sur les modifications de l'environnement et les coefficients d'écoulement dans la zone ;
- **déterminer les caractéristiques hydrogéologiques** des réservoirs aquifères, les paramètres qui influencent la productivité des ouvrages et le rôle que joue la fracturation du socle dans la productivité des ouvrages à l'aide de l'interprétation des essais de pompage et du traitement numérique d'images satellitaires Landsat TM ;
- **étudier l'hydrochimie des aquifères** afin de caractériser l'hydrodynamisme de ces aquifères par les méthodes hydrochimiques et les anomalies hydrochimiques en éléments majeurs, traces et évaluation des principaux polluants et la qualité des eaux de consommation conformément aux normes OMS.

Ce travail est structuré en trois grandes parties et comprend neuf (9) chapitres :

- la première partie traite des généralités concernant la zone d'étude. Les différents aspects géographiques, physiographiques, humains, hydroclimatiques, géomorphologiques, géologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques y sont abordés ;
- la deuxième partie traite du matériel et méthodes utilisés pour effectuer cette étude, le mode d'acquisition des données et les traitements statistiques ;
- la troisième partie présente les résultats obtenus, leur interprétation et leurs discussions.

Une conclusion générale qui fait la synthèse des principaux résultats obtenus suivie des perspectives qu'ouvrent cette étude et une bibliographie complète ce document.

P REMIERE PARTIE :
MILIEU NATUREL ET HUMAIN

CHAPITRE 1 : CONTEXTE PHYSIOGAPHIQUE ET SOCIO-ECONOMIQUE DE LA REGION DES LACS

1.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE

La zone concernée est située dans la région des Lacs au centre de la Côte d'Ivoire. Elle comprend le District de Yamoussoukro (Didiévi, Attiégoakro, Tié-N'dièkro) et le département de Tiébissou (Figure 1). Elle est limitée au Sud par le département de Toumodi, à l'Ouest la région du Fromager et celle de la Marahoué, à l'Est la région du N'zi Comoé et au Nord la région de la Vallée du Bandama. Elle couvre une superficie d'environ 6000 km² avec une population estimée à 413 900 habitants en 2000 (INS, 2001). Située entre 6°30 et 7°35 de latitude Nord et 4°40 et 5°40 de longitude Ouest, cette zone est dotée d'un réseau routier dense avec de nombreuses routes bitumées.

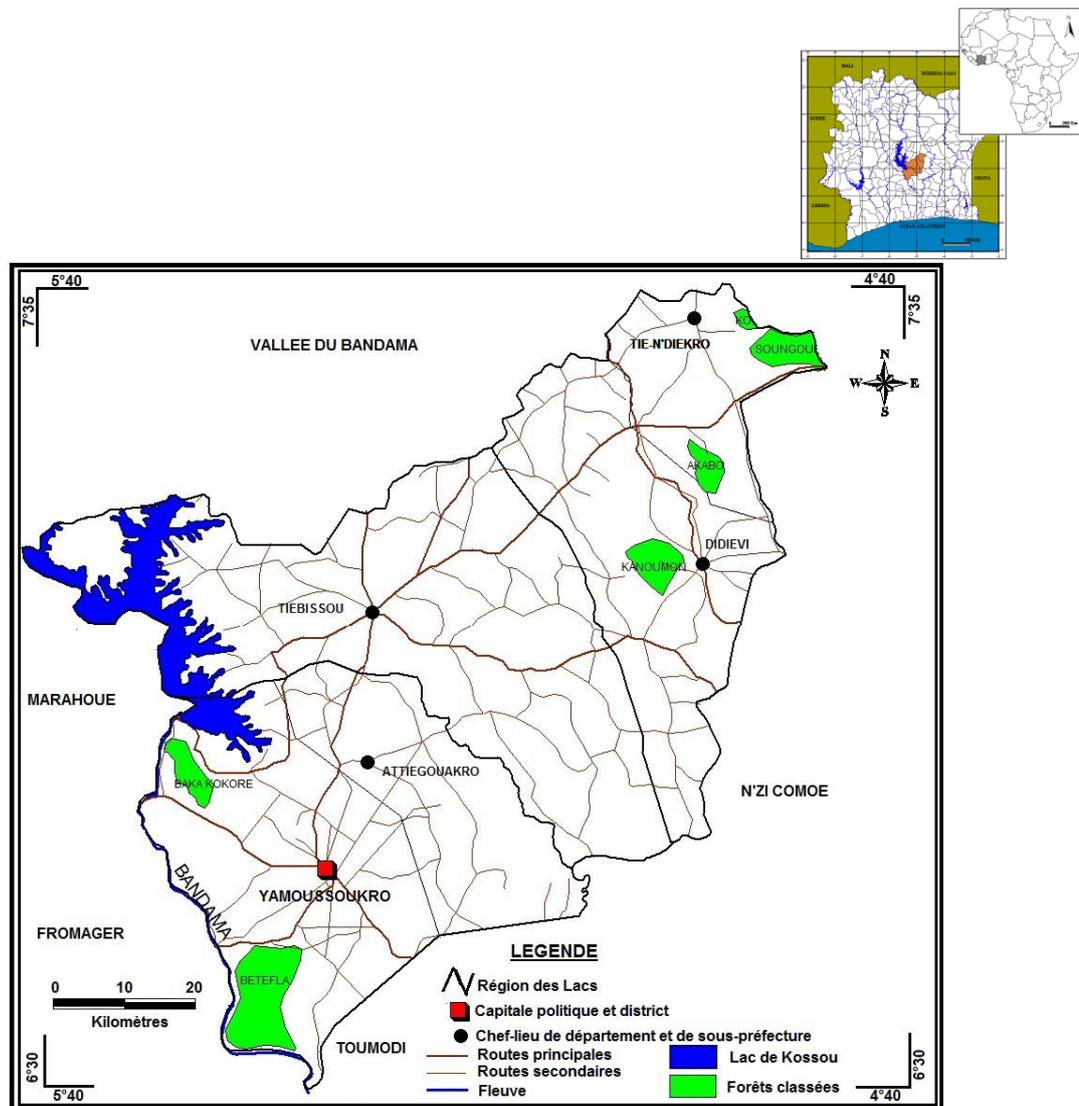


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude.

1.2. GEOMORPHOLOGIE, SOLS ET VEGETATION

1.2.1. Géomorphologie

La région est une large pénéplaine entourée par les monts du Yaouré au Nord-Ouest et la chaîne de Fétékro au Sud Est, qui culminent respectivement à 623 m à l'Ouest du barrage de Kossou et à 646 m au Sud Est de Yamoussoukro (Leblond, 1984). L'altitude moyenne de la région comprise entre ces deux massifs est de 200 m, la plaçant ainsi à la limite méridionale de la zone dite « des plateaux » (200 et 500 m). Les altitudes les plus élevées sont voisines de 240 m. L'analyse en fréquence cumulée des altitudes de villages par N'guessan (1985) a montré une distribution normale obéissant à la loi de Galton, indiquant ainsi l'existence d'une seule famille de relief caractérisant le plateau.

En somme, le paysage est constitué d'un ensemble de collines à profil peu élevé, séparé par des vallées peu profondes avec des versants ayant de faibles pentes : l'amplitude maximum des reliefs y est de l'ordre d'une cinquantaine de mètres et la pente moyenne est rarement supérieure à 4 %.

Sur ce plateau, le réseau hydrographique dessine des interfluves de formes diverses plus ou moins régulières et de tailles variables. Les interfluves jouent un grand rôle dans l'occupation des sols. En effet, les villages sont bâtis sur les collines et les plateaux et l'on rencontre les puits traditionnels et les puisards dans les thalwegs.

Le relief de la zone d'étude est mis en évidence par un modèle numérique d'altitude (MNA) acquis en format Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) et fourni par un site Internet américain (<ftp://eosrp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version1/Africa>) (figure 2).

Le MNA a une résolution de 90 m. Une analyse du MNA de la figure 2 montre que le relief de la zone est peu accidenté confirmant ainsi les analyses faites ultérieurement par Léblond (1984) et N'guessan (1985). Toute la zone est dominée par les altitudes de 100 à 200 m et 200 à 300 m. Cependant, cette monotonie est perturbée en quelques endroits. Dans la partie Est de la zone, on rencontre la chaîne des collines de Fétékro d'orientation SSO-NNE. C'est le domaine des hauts plateaux. De même au Sud du barrage de Kossou, on trouve des altitudes supérieures à 600 m.

On remarque donc que la zone d'étude est caractérisée par une monotonie des reliefs. Cette monotonie va favoriser une stagnation des eaux qui auront tendance à s'infiltrer et/ou s'évapotranspirer selon les conditions de perméabilité du substratum et l'intensité des activités évapotranspiratoires (Kouassi, 2007).

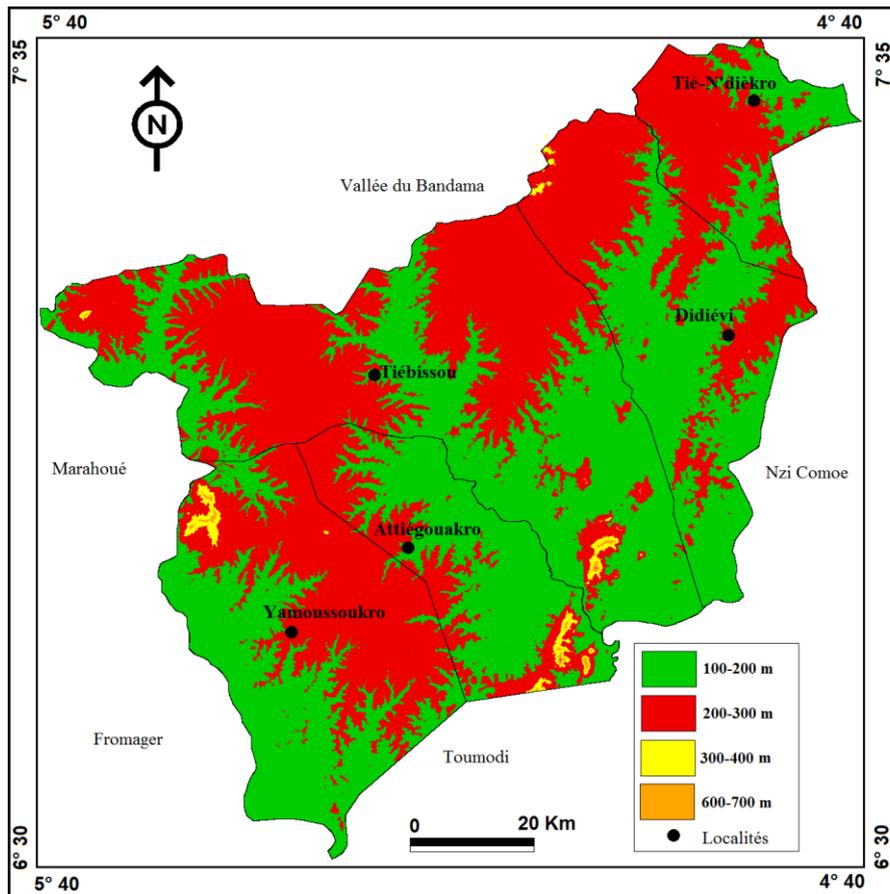


Figure 2 : Carte du modèle numérique d'altitude (MNA) de la zone d'étude.

1.2.2. Sols

Les sols de la région sont homogènes. Ce sont en général des sols ferrallitiques moyennement ou fortement desaturés et des sols brunifiés au niveau des plateaux et reliefs. On note aussi la présence de sols peu évolués, des sols hydromorphes dans les plaines et les bas-fonds. Selon Leblond (1984), le rôle joué par la géologie sur la répartition spatiale des sols n'est que secondaire. On observe cependant une augmentation de leur épaisseur moyenne et de leur teneur en argiles lorsqu'on passe des granites et des roches acides aux schistes et aux roches volcaniques basiques. Malgré cette homogénéité des sols, on constate dans la région une nette hétérogénéité dans la répartition du couvert végétal.

1.2.3 Végétation

La végétation est constituée de forêt mésophile, de forêts-galeries, de savanes arbustives ou de savanes à rôniers. La limite de la grande forêt équatoriale et de la grande savane subtropicale traverse la partie Sud de la région étudiée. La savane s'enfonce dans la

forêt suivant un golfe célèbre en forme de V appelée le « V baoulé » (Verheye, 1972 *in* Leblond, 1984) (Figure 3).

Elle est composée de hautes graminées parmi lesquelles, on distingue des arbres et arbustes de dimensions variables et des forêts galeries densément boisées autour des cours d'eau. Au sud de cette limite, il y a le secteur mésophile caractérisé par la forêt dense humide semi décidue de type *Celtis spp.* et *Triplochiton scleroxylon* et type à *Aubrevillea kerstingii* (Géomines, 1982a ; N'guessan, 1990). A l'Ouest, on a une végétation arborée relativement homogène, sans limite apparente entre les forêts galeries et les interfluves boisés. Vers l'Est, la végétation des interfluves est très clairsemée et est représentée par une savane arbustive ou une savane à rôniers (*Borassus aethiopum*). On rencontre également dans la région, des zones de reboisement à espèce unique de *Tectona grandis*, à Raviart au nord et à Zambakro au sud de la zone. La région des Lacs compte six forêts classées totalisant 22 310 hectares. Elles sont régulièrement menacées par les feux de brousse et les coupes clandestines.

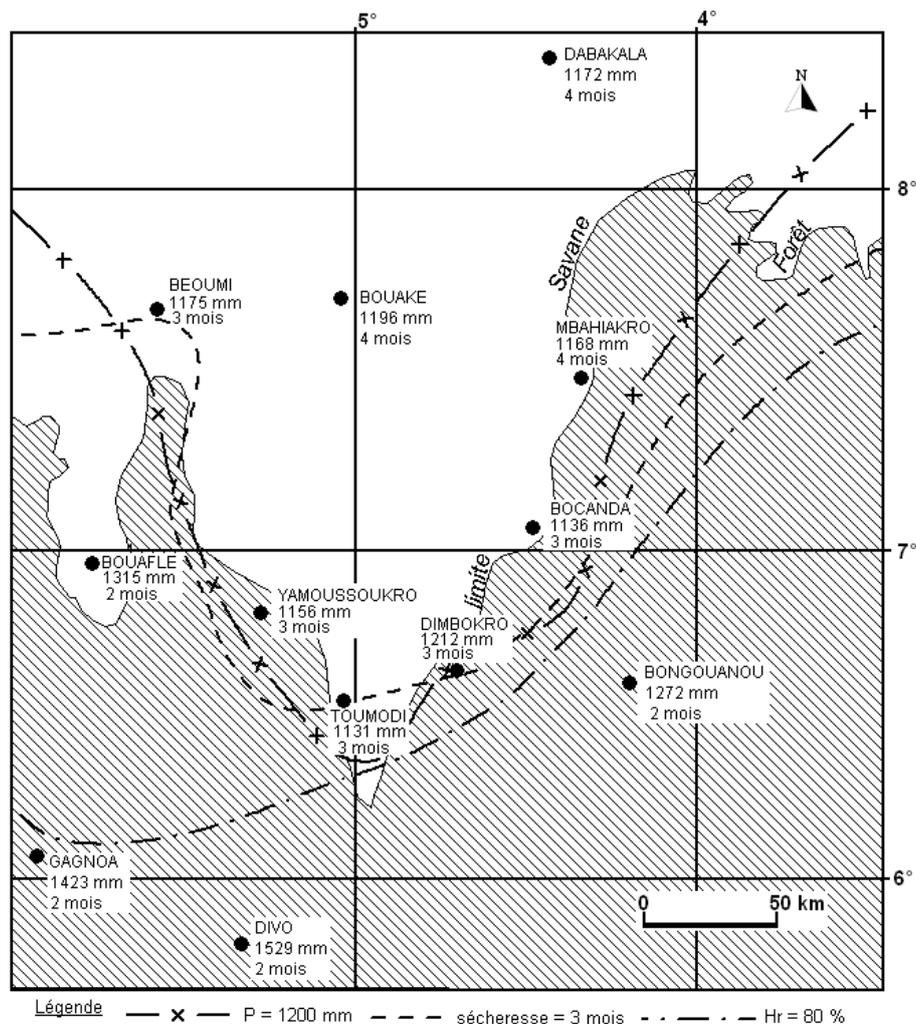


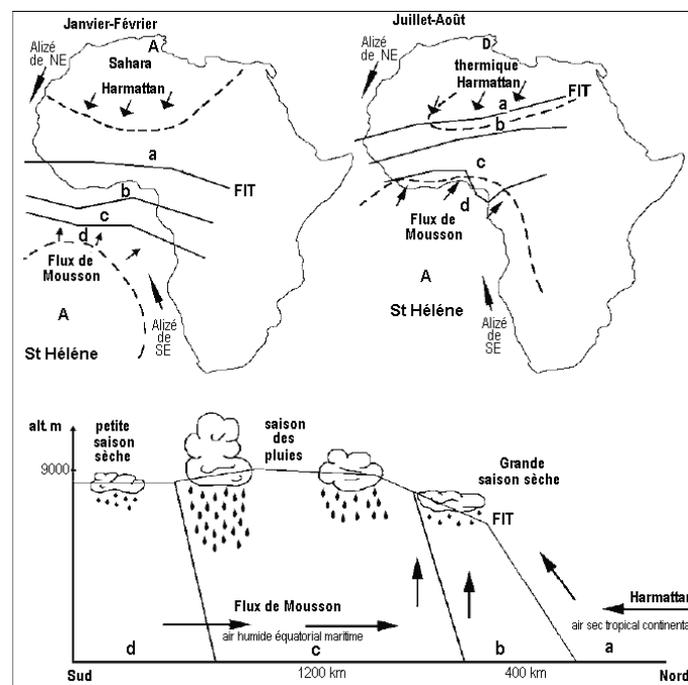
Figure 3 : Le V baoulé (d'après W. Verheye, 1972 *in* Leblond, 1984).

1.3 CLIMAT

1.3.1. Aperçu sur le climat de l'Afrique de l'Ouest

Les changements saisonniers, en particulier l'évolution des régimes pluviométriques sont la conséquence du déplacement de l'Equateur Météorologique (EM) ou Zone Inter-Tropicale de Convergence (ZITC). L'EM constitue la branche ascendante de la cellule de Hadley et correspond au contact dynamique des circulations atmosphériques des deux hémisphères. La circulation méridienne s'effectue selon la direction pôle-équateur. Les masses d'air tropical continental engendrent des vents secs nord-est (harmattan) et les masses d'air équatorial maritime engendrent des vents humides sud-ouest (mousson). Le moteur de cette circulation est la convection équatoriale. L'EM présente une structure en front, de pente très inclinée, s'abaissant de l'équateur vers le Nord, appelée également Front Inter Tropical (FIT). La migration de ce front varie en fonction du développement de l'anticyclone de Sainte Hélène qui favorise la remontée du flux de mousson (Figure 4).

En juillet-août, l'EM occupe sa position la plus septentrionale avant de migrer vers le Sud en janvier-février. Le passage au sol du FIT détermine la saison des pluies (Figure 4), celle-ci est d'autant plus tardive et brève que l'on se déplace vers le Nord. Dans cette zone, les principaux utilisateurs de l'humidité sont les lignes de grain responsables en partie de la très forte variabilité spatiale et temporelle des précipitations.



a- zone sans pluie ; b- zone avec des orages isolés ; c- zone où dominant les lignes de grain et les « pluies de mousson » ; d- zone avec des pluies réduites

Figure 4 : Schéma des principaux flux de masses d'air en Afrique de l'Ouest et coupe Nord-Sud de la troposphère avec la localisation des zones pluvieuses au sol (d'après Olivry et al. 1996 ; Roche 1980 in Massuel (2001)).

1.3.2 Aperçu sur le climat de la Côte d'Ivoire

Le climat de la Côte d'Ivoire est déterminé par deux masses d'air principales que sont l'harmattan et la mousson. L'harmattan, vent chaud et sec de direction Nord-Est, souffle pendant la saison sèche. La mousson de direction Sud-Ouest, en provenance de l'Atlantique est poussée vers le Nord pendant la saison des pluies. La confluence de ces deux masses d'air est appelée Front Intertropical (FIT) ou Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT). C'est une ligne instable dont les déplacements entre le Nord et le Sud déterminent les différents types de climats de la Côte d'Ivoire.

1.3.3 Aperçu du climat de la zone d'étude

La zone d'étude est soumise au climat équatorial de transition atténué (climat baouléen), entre les climats de type guinéen et de type soudanien (Leblond, 1984 ; N'guessan, 1990). Il est caractérisé par quatre saisons :

- une grande saison des pluies ;
- une petite saison des pluies ;
- une grande saison sèche ;
- une petite saison sèche.

Ce découpage peut être ramené à deux saisons. Ainsi, on a une saison sèche de novembre à avril marquée par la présence de l'harmattan et une saison des pluies (mai à octobre) avec deux maxima pluviométriques en juin et en septembre. Ces saisons sont sous l'influence de la mousson du Sud-Ouest et de l'harmattan. La hauteur des précipitations de la zone varie de 1200 à 1600 mm/an avec un déficit hydrique cumulé allant de 205 mm à 450 mm (N'guessan, 1990).

1.4. RESSOURCES ET BESOINS EN EAU DE CONSOMMATION

1.4.1. Ressources en eau de surface

La région du Centre tout comme celle du Nord est dominée par de nombreuses petites retenues d'eau, de nature diverse, édifiées pour la plupart en 1970 et 1985 lors des différents programmes d'aménagements ruraux (Figure 5). Cependant, ces aménagements sont beaucoup plus orientés vers l'agro-pastorale et notamment la riziculture. En effet, le département de Yamoussoukro est une zone principalement rizicole avec d'importantes superficies exploitées représentant 25 % des superficies totales exploitées sur le territoire national. Ainsi, dénombre-t-on dans la région 38 retenues d'eau couvrant 2 350 ha de superficies aménagées dont 22 à vocation agricole et seulement un pour l'alimentation en eau

potable, 4 pour la pisciculture, 3 pastoraux et 8 mixtes (Planche 1) Le volume total d'eau stocké dans la région est estimé à $276,8.10^9 \text{ m}^3$ annuellement du fait de la présence du barrage hydro-électrique de Kossou construit en 1972 (Anonyme, 1996). L'alimentation en eau potable des grandes villes de la région est assurée par la Société de Distribution d'eau en Côte d'Ivoire (SODECI) à partir des eaux de surface. Yamoussoukro est desservie à partir d'une prise d'eau sur le Bandama non loin de Zambakro et Tiébissou, par un barrage dont la production est de $341 \text{ m}^3/\text{jour}$.

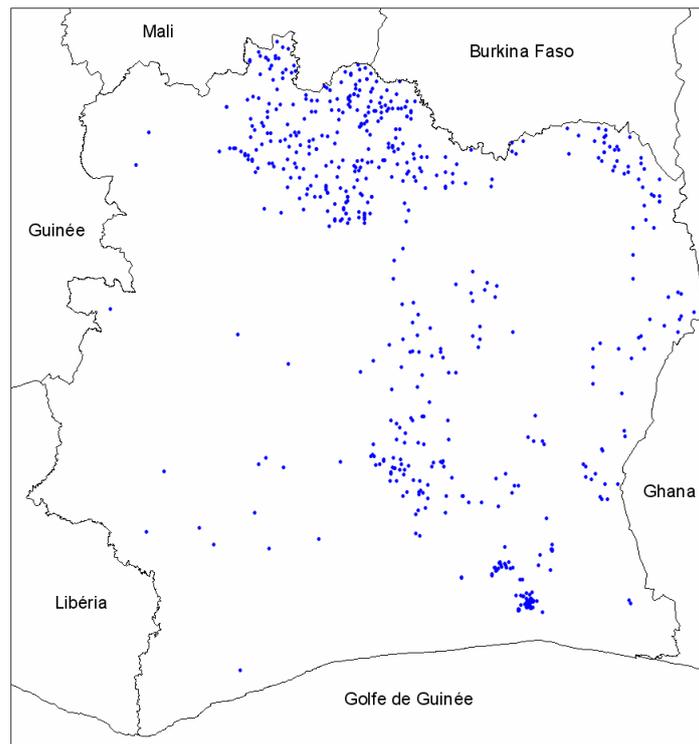


Figure 5 : Carte de répartition spatiale de plus de 500 petits barrages construits entre 1970 et 1985 (Brou et al., 2009).



Retenue d'eau agropastorale (photo in Brou et al., 2009)



Vue d'une retenue d'eau (photo Soro G.)

Planche 1 : Photos de quelques types de retenues d'eau dans la région des Lacs.

1.4.2. Ressources en eau souterraine

En dehors de l'agglomération de Yamoussoukro, Tiébissou et les différentes sous-préfectures qui sont alimentées en eau potable par le biais des eaux de surface, les zones rurales sont desservies par les eaux souterraines. Ces eaux souterraines sont captées à partir de puits modernes ou de forages munis d'une pompe à motricité humaine ou par des puits traditionnels faits par les puisatiers où les moyens d'exhaure sont des puisettes portées souvent sur simples poulies (Photo A, Planche 2). Ces différents ouvrages sont creusés soit dans les altérites pour ce qui est des puits ou forés dans la roche fissurée pour les forages. Ces aquifères captés fournissent des débits dont la moyenne ne dépassant pas les $3,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (Leblond, 1984). Ces débits ne servent donc qu'à la consommation quotidienne des populations rurales dans le cadre des systèmes d'hydraulique villageoise (HV) ou de celui de l'hydraulique villageoise améliorée (HVA) destiné aux localités ayant une population comprise entre 1000 et 4000 habitants.

1.4.3. Besoins en eau

Le taux de satisfaction des besoins en hydraulique villageoise du département de Yamoussoukro était moins de 50 % au dernier inventaire de la Direction de l'Hydraulique Humaine (DHH) en 1999 (Anonyme a, 2001, Anonyme b, 2001).

Au niveau local, les besoins en eau sont énormes dans cette région malgré les nombreux ouvrages hydrauliques présents. Les besoins en eau en milieu rural sont chiffrés à 20 L/habitant/jour par la DHH. Toutefois, les besoins les plus importants en eau restent entièrement domestiques et varient en fonction des saisons (saisons sèches et saisons pluvieuses) et du milieu naturel. Selon un rapport interne de la Direction Territoriale de l'hydraulique (DTH) de Yamoussoukro en 2002, il faut 83 nouveaux points d'eau pour le département de Tiébissou dont le taux de couverture des besoins en eau est estimé à environ 66 %. Au moins 203 nouveaux forages sont nécessaires pour le département de Yamoussoukro dont le taux de couverture des besoins est estimé à 56%.

Cet état de fait est en partie la conséquence directe de la mauvaise implantation des ouvrages. En effet, la majorité des forages tombés en désuétude ont été réalisés par le service « Forages de la Présidence » basé à Kossou. Ce service qui a réalisé la quasi-totalité des ouvrages de Yamoussoukro et de Tiébissou n'a fait aucune étude préalable et ne donne aucune fiche technique des ouvrages. La conséquence directe est le tarissement des ouvrages en saison sèche et aussi la mauvaise qualité de l'eau provoquant ainsi l'abandon des points d'eau par les populations. Il convient d'ajouter à tous ces problèmes les pannes techniques des pompes.



Photo A : Puits traditionnel avec poulie



Photo B: Puits traditionnel



Photo C : Puits moderne dont la pompe a été emportée



Photo D : Puits moderne équipé d'une pompe de type ASM



Photos : E et F : Forages équipés d'une pompe à motricité humaine type Vergnet à pédale

Planche 2 : Différents types d'ouvrages de captage des eaux souterraines dans la région des Lacs.

1.4.4. Assainissement et drainage

Dans la zone d'étude, on assiste à deux systèmes d'évacuations des eaux usées. Ces deux systèmes se juxtaposent sur l'ensemble de l'agglomération de Yamoussoukro. Le mode d'assainissement le plus courant est de type individuel : fosses septiques, puits perdus et latrines traditionnelles (fosses sèches) ou améliorées selon le type de quartier. En effet, dans certains quartiers, les eaux usées sont directement répandues à même le sol. Le réseau d'assainissement collectif n'existe que dans les zones d'habitats récents (une soixantaine de km).

Pour le traitement de ces eaux, 18 stations d'épuration ont été construites. En juin 1996, sur les 18 stations, seules 5 étaient en fonctionnement. En dehors de la ville de Yamoussoukro, les autres villes (Tiébissou, Didiévi et Tié-N'dièkro) et villages n'ont recours qu'au premier type d'assainissement qui a été privilégié à travers des technologies à faible coût (Anonyme, 1997). Le drainage des eaux pluviales est quant à lui assuré par des caniveaux construits sur un côté ou les deux côtés de la chaussée. Souvent, ils ne sont pas couverts et servant ainsi de dépotoir d'ordures ménagères ou d'évacuation des eaux usées. Cet état de fait est souvent à l'origine de la prolifération des moustiques et d'odeurs nauséabondes dans les quartiers.

1.4. 5. Hydrographie

1.4.5.1. Structure du réseau hydrographique

Dans l'ensemble, le réseau hydrographique de la zone d'étude présente un aspect polygonal caractéristique des zones à substratum granitique (Leblond, 1984 ; Faillat, 1987) (Figure 6). Cet aspect est plus marquant dans les zones de savane que dans les zones forestières. Le drainage de la région se fait vers deux directions que sont le Sud-Ouest et le Nord-Est. Une moitié est drainée vers le Sud-Ouest en direction du Bandama dont le niveau moyen se situe à la côte +140 m. Celle-ci se compose des rivières tributaires du Bandama dont les plus importantes sont Godiliba, Tanonzue Nord, Koffi, Adjidoba, Tanonzue Sud, Diaba et Yoara. Les eaux de la moitié orientale s'écoulent vers le Nord Est, en direction du Kan, affluent du N'zi qui se jette dans le Bandama dans la région de Tiassalé à 100 Km au Sud Est de Yamoussoukro. Toutes ces eaux proviennent des affluents du Kan que sont : Languira, Nanizué, Bagbariba, Koubékié, Bétrikan, Kongoulo.

1.4.5.2. Densité de drainage

Les valeurs de densité de drainage données par la littérature varient de 0,8 à 2,03 km/km² avec une moyenne de 1,22 km/km². Les valeurs les plus élevées correspondent aux zones à relief tourmenté : la chaîne de Fétékro au Sud-Est et le massif du Yaouré au nord-ouest. A part ces deux secteurs, les valeurs de densité de drainage du Kan sont en général plus élevées que celles obtenues sur le Bandama (0,94 km/km²) avec une moyenne de 1,29 km/km². Cette différence témoigne du comportement variable des sols sous deux types de couvert végétal : tendance au ruissellement et à l'érosion sous savane arbustive, à l'infiltration sous couvert forestier. Cette observation va influencer l'alimentation des nappes sous les deux types de couvert végétal.

1.4.5.3. Régime des cours d'eau

Le régime de l'écoulement des eaux est un régime de transition entre le type équatorial et tropical. Il est caractérisé pour les cours d'eau d'ordre supérieur, par des pointes de hautes eaux correspondant aux périodes pluvieuses. Le pic de septembre-octobre est plus accentué que celui de juin-juillet et le crochet de la petite saison sèche est peu profond (Leblond, 1984 ; Géomines, 1982a ; Géomines, 1982b). Les débits sont extrêmement variables du fait de l'intensité des averses les plus violentes. Ils passent de 0 m³/s en période d'étiage à près de 200 m³/s pour la crue décennale sur le Kan à Dimbokro, pour un bassin versant de 5000 km². Tous les cours d'eau d'ordre inférieur ont un débit d'étiage nul. Les coefficients d'écoulement moyen dans la zone varient de 0,4 % à 15 % pour des bassins versants de superficies très diverses (25 km² à 5000 km²) (Leblond, 1984).

1.4.5.4. Variations saisonnières des écoulements

La variation saisonnière des écoulements s'est faite au travers de débits du Kan dont la station de mesure est située à Dimbokro. Ce cours d'eau et ses affluents drainent à eux seuls environ 95 % de la zone d'étude. Le régime du Kan reflète en général le climat baouléen (Géomines, 1982b). L'analyse de l'hydrogramme du Kan révèle (Figure 7) :

- l'existence de deux périodes de crues, une crue maximale observée en septembre et octobre et petite crue en juin et juillet ;
- une période d'étiage de décembre à avril et qui correspond à la saison sèche.

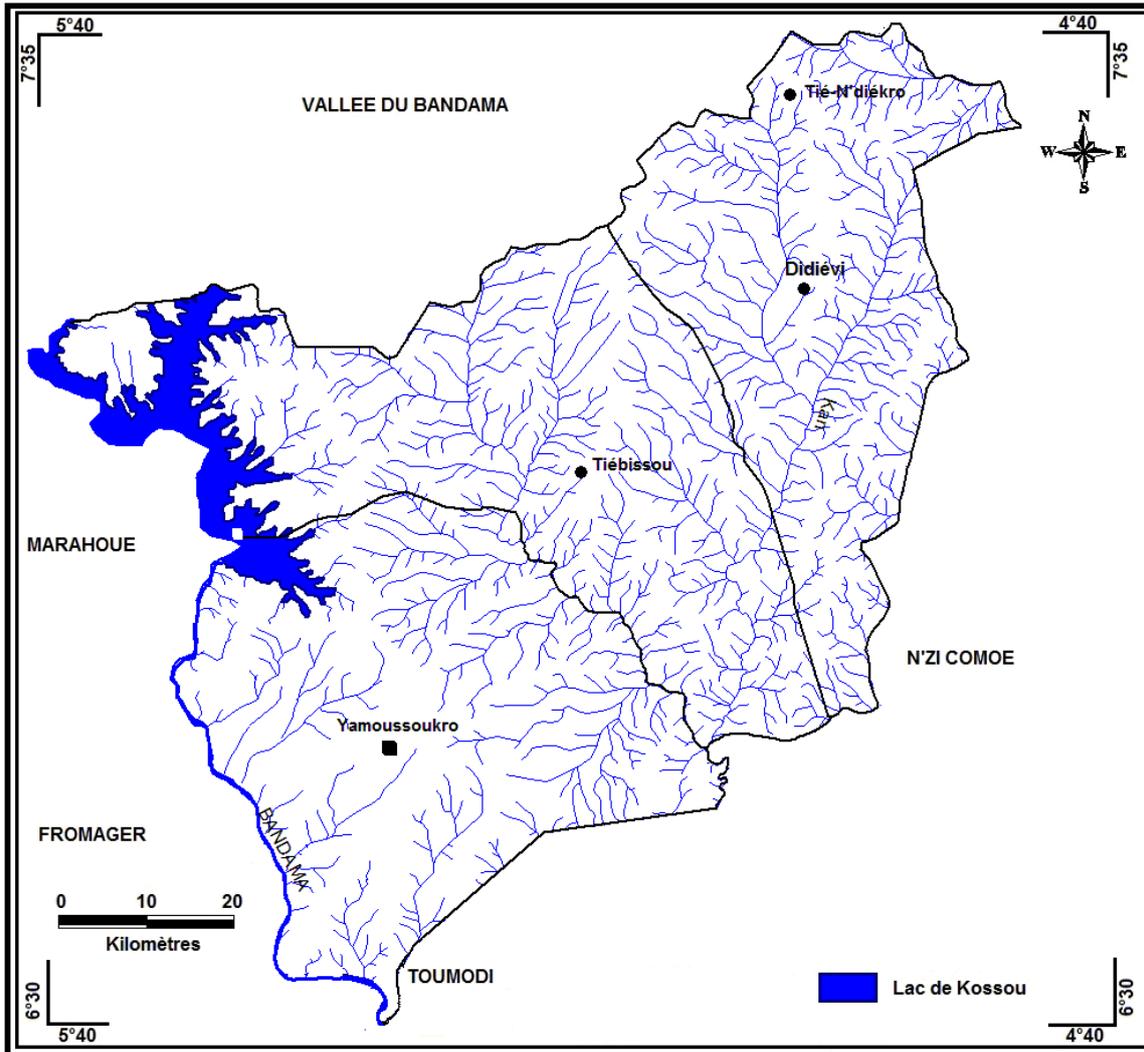


Figure 6 : Réseau hydrographique de la zone d'étude.

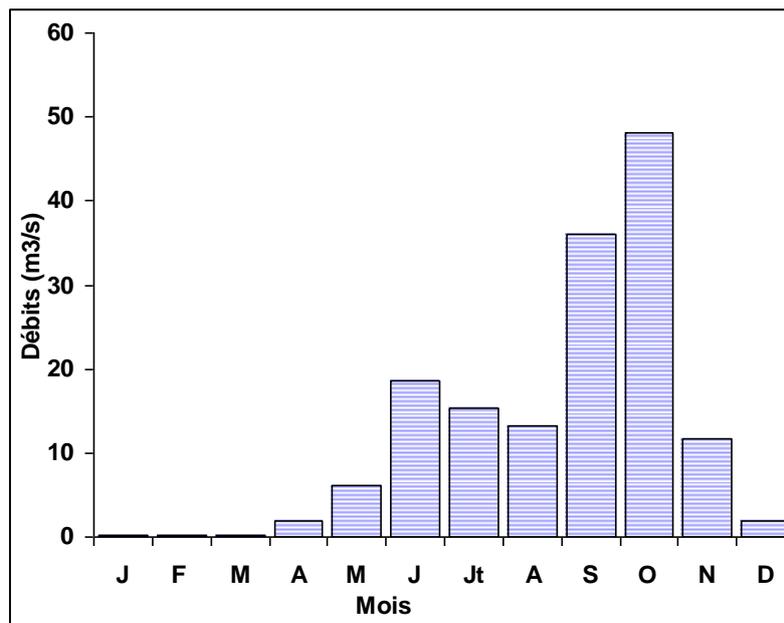


Figure 7: Histogramme des débits du Kan à la station de Dimbokro. Période de 1970 à 1995.

1.4.5.5. Pente moyenne des cours d'eau

La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Cette variable influence donc le débit maximal observé. Une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de s'infiltrer, entièrement ou en partie, dans le sol. Nous remarquons ici que seules les rivières Koffi et Languira présentent une pente longitudinale très accentuée entre 12 % et 14 % (Leblond, 1984) (Tableau I). On peut conclure que sur ces deux rivières, le ruissellement est très fort occasionnant ainsi une faible infiltration des eaux dans le sol. Les cours d'eau qui circulent sur les granitoïdes ont une pente très faible, comprise entre 3 % et 6 %. Pour les onze autres cours d'eau du fait des valeurs faibles, l'écoulement de surface sera ralenti favorisant ainsi une infiltration importante des eaux avant leur arrivée à l'exutoire. Ces observations seront utiles dans l'étude de l'alimentation de la nappe.

Tableau I : Données cartographiques de quelques affluents du Bandama et du Kan
(Leblond, 1984)

Nom	BV	L (km)	Niveau de base (m)	Côte source (m)	Pente moy %	Pente moy en enlevant 20 % amont et 20 %aval	Substratum
Godiliba	B	13	140	220	6,2	4,7	Granitoïdes
Tanonzue N	B	22	139	220	3,7	3,3	Granitoïdes
Koffi	B	19,5	145	380	12,1	5,6	Granitoïdes
Adjidoba	B	24	142	240	3,8	2,6	Granitoïdes
Tanonzue S	B	26	139	240	3,9	2,6	Granitoïdes
Diaba	B	26,5	142	240	3,6	1,7	Granitoïdes
Yoara	B	27,5	142	260	4,3	2,6	Granitoïdes
Languira	K	19,5	127	400	14,0	4,8	Birimien
Nanizué	K	20,5	127	200	3,6	1,7	Granitoïdes
Bagbriba	K	21,5	127	200	3,4	2,3	Granitoïdes
Koubékié	K	24,5	127	220	3,8	1,9	Granitoïdes
Bétrikan	K	25,5	138	220	3,2	2,8	Granitoïdes
Kongulo	K	28,5	127	220	3,3	1,8	Granitoïdes

B : Bandama ; K : Kan

1.5. ENVIRONNEMENT HUMAIN ET SOCIO-ECONOMIQUE

L'influence anthropique sur le réseau hydrographique de la zone d'étude est très importante du fait de la construction du barrage hydroélectrique de Kossou sur le Bandama et l'aménagement de nombreuses retenues d'eau sur ses affluents. Ces différents aménagements ont pour conséquence l'amélioration des conditions de vie des populations riveraines mais aussi, ils provoquent un changement dans le régime des cours d'eau. Tout ceci peut entraîner une forte prévalence de certaines maladies hydriques.

1.5.1 Environnement humain

La région des lacs fait partie de l'aire traditionnelle des Baoulés qui sont un sous-groupe des Akan. On distingue quatre tribus : les Akouê, les Nanafouê, les N'zikpli, les Nghan. A côté de cette population autochtone, on note la présence de populations d'origines diverses. Avec une population urbaine d'environ 275 000 habitants, le taux d'urbanisation du District est de l'ordre de 55 % contre 45 % de population vivant en milieu rural. Le taux d'accroissement annuel observé sur la période de 1988-1998 est de 2,6% (INS, 2001).

Celui-ci pourrait augmenter considérablement avec le transfert effectif de la capitale administrative et politique.

La région des Lacs compte environ 477 156 habitants au dernier recensement de 1998 répartis comme suit 210 300 habitants pour la population rurale et 266 806 pour la population urbaine (INS, 2001). La population du district est estimée à 300 000 habitants pour une superficie totale d'environ 3500 km² donnant une densité de 86 habitants par km², bien supérieure à la moyenne nationale estimée à 50 habitants au km², et un taux d'urbanisation de 55 %. La population de Tiébissou est de 71 337 habitants.

Du point de vue des infrastructures routières, l'on peut dire que la région est très bien fournie avec les grands axes qui sont tous bitumés et de nombreuses pistes carrossables qui sont relativement en bon état.

La présence de la Basilique Notre Dame de la Paix, des lacs et du parc animalier d'Abokouamékro constitue des pôles d'attraction pour les touristes. Le plan d'Aménagement de la Région des Lacs (PADER-LACS) va ouvrir des perspectives nouvelles pour le développement de la région des lacs et notamment celui du département de Yamoussoukro. Avec tous ces atouts, cette région constituera sans nul doute un pôle attractif pour de nouveaux migrants.

1.5.2. Environnement socio – économique

1.5.2.1. Agriculture

La région des Lacs est une zone agricole à l'instar des autres régions du pays. L'agriculture représente l'activité économique la plus importante. Les investissements réalisés ont été particulièrement importants par des aménagements hydro-agricoles contribuant ainsi à un développement de la riziculture. La superficie totale aménagée en riziculture en double culture annuelle est estimée à 2 260 hectares (Anonyme, 1996). L'activité agricole est assez variée : café, cacao, différentes cultures vivrières (igname, maïs, riz irrigué, manioc, banane plantain, etc....), maraîchères (carotte, salade, etc.....) et des légumes (tomate, gombo, etc.....) (Anonyme, 1997).

Toute cette dynamique a pour conséquence l'augmentation drastique des besoins en eau des populations à tous les niveaux. La recherche de nouvelles ressources en eau en quantité et en qualité s'avère être primordiale afin de subvenir à tous ces besoins.

1.5.2.2. Elevage et ressources halieutiques

A l'instar des autres régions de la Côte d'Ivoire, un certain nombre de projets de développement de l'élevage ont été mis en œuvre dans la région des Lacs et particulièrement dans la sous-préfecture de Yamoussoukro. Globalement, ces projets ont impulsé à l'élevage, un rythme de croissance soutenu. Il s'agit :

- du Ranch d'Abokouamékro, créé en 1962 et qui a constitué le point de départ du développement de l'élevage ivoirien. Ce ranch est aujourd'hui transformé en parc animalier ;
- de Projet SODEPRA-CENTRE, démarré en 1976, a permis l'encadrement de nombreux éleveurs de la région. Il en est de même pour le projet de développement de l'élevage phase II.

A côté de ces projets d'élevage, on note aussi un développement des ressources halieutiques.

En effet, la région des lacs dispose d'importantes retenues hydro-agricoles et d'un barrage hydroélectrique couvrant des milliers d'hectares en plan d'eau stable et facilement aménageable pour la pêche. L'exploitation dans la région de Yamoussoukro du plan d'eau du barrage hydroélectrique estimé à 15 000 hectares produit plus de 1000 tonnes de poissons frais par an. A cela, il convient d'ajouter les 60 retenues d'eau à vocation hydro-agricoles disséminés dans la région et dont les caractéristiques générales de plans d'eau sont favorables à la pêche.

1.5.2.3 Tourisme

La région des Lacs, notamment le district de Yamoussoukro regorge d'importants sites et attractions touristiques. Toutes ces potentialités font de cette région l'une des principales destinations touristique du pays. En outre, l'aéroport international de Yamoussoukro constitue la porte d'entrée de nombreux touristes. Parmi ces nombreux sites on peut citer entre autres, la réserve de faune d'Abokouamékro avec plus de 20 430 hectares ; la Basilique Notre Dame de La Paix ; la fondation Félix Houphouët-Boigny pour la recherche de la « paix » ; les lacs aux crocodiles et le barrage hydro-électrique de Kossou.

1.5.2.4. Ressources minières

Plusieurs indices d'or ont été découverts dans cette région mais l'exploitation minière dans la région, est essentiellement artisanale. L'encadrement des petits exploitants miniers par la direction des mines, pourrait mieux être plus profitable à la population.

Dans la région, cinq carrières d'exploitation de granite et une carrière de production de sable éluvial sont identifiées. Ces exploitations sont étroitement liées aux activités du secteur du bâtiment et des travaux publics. On note aussi la présence de la mine d'or d'Angovia qui est située dans la région de la Marahoué près du barrage de Kossou.

CONCLUSION PARTIELLE

La région des Lacs a un climat de type tropical humide de transition, entre les climats de type guinéen et soudanien. L'année est scindée en quatre saisons avec une prépondérance des saisons pluvieuses sur les saisons sèches. C'est une zone qui bénéficie de la présence d'un réseau routier très dense, d'infrastructures touristiques très importantes et surtout de la présence de nombreuses retenues d'eaux construites sur les différents cours d'eau qui drainent la zone permettant la pratique d'une agriculture continue. La dynamique de développement que prend la région du fait du transfert effectif de la capitale va entraîner la migration d'une forte population. Cet état de fait va augmenter très fortement la demande en eau dans les années à venir.

CHAPITRE 2 : CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE

2.1.1. Histoire géologique de la Côte d'Ivoire

Plusieurs auteurs ont contribué à mieux cerner la géologie de la Côte d'Ivoire (Roques, 1968 ; Arnould, 1961 ; Tagini, 1971 ; Yacé, 1976, 2002 ; Casanova, 1973 ; Bessoles, 1977 ; Camil, 1984 ; Pothin, 1988 ; Kouamélan, 1996 ; Djro, 1998 ; Yao, 1998 ; Touré, 2007).

L'histoire géologique de la Côte d'Ivoire s'inscrit dans celle du craton ouest africain. C'est une vaste étendue de 4 500 000 km² constituée par des formations précambriennes. Ce craton est limité à l'Est par la zone mobile de l'Afrique centrale et à l'Ouest par des chaînes polyorogéniques panafricaines et hercyniennes : Mauritanides et Rockélides. Il est masqué par des bassins du Protérozoïque supérieur et du Paléozoïque : bassin de Tindouf au nord, bassin de Taoudéni au centre et bassin voltaïque au Sud.

Le craton ouest africain affleure dans deux dorsales :

- la dorsale Réguibat au Nord entre les bassins de Tindouf et de Taoudéni ;
- la dorsale de Man ou Léo au sud, et dans des fenêtres situées à l'Est des Mauritanides : fenêtre de Kayes et fenêtre de Kéniéba (Bessoles, 1977).

La Côte d'Ivoire est formée de deux unités de surfaces très inégales : un socle ancien qui couvre 97,5 % du pays et un bassin sédimentaire récent âgé de moins de 140 Ma (crétacé –quaternaire) et qui forme une mince frange littorale (2,5% du territoire) (Figure 8). Le socle appartient au vieux bouclier précambrien de l'Afrique de l'Ouest constitué de roches éruptives et métamorphiques datant du Précambrien inférieur ou Archéen et du Précambrien moyen.

Les études géochronologiques y ont permis de distinguer un domaine archéen daté de 3000 à 2 500 M.a. modelé par les cycles orogéniques léonien et libérien et un domaine protérozoïque inférieur et moyen daté de 2 500 à 1 800 M.a. et structuré par le cycle orogénique éburnéen. Le Birimien constitue une période du cycle éburnéen daté de 2100-1800 Ma. En Côte d'Ivoire, le Birimien se confond pratiquement avec l'Eburnéen pour ce qui est des affleurements habituellement étudiés (Yacé, 2002). Selon Yacé (2002), l'accident ou faille dite du Sassandra correspond à une grande discontinuité nord-sud, matérialisé sur presque toute sa longueur par le cours moyen et supérieur du fleuve Sassandra, partage la Côte d'Ivoire en deux zones géologiques différentes. Ainsi à l'ouest, nous avons le domaine archéen et à l'est se trouve le domaine protérozoïque.

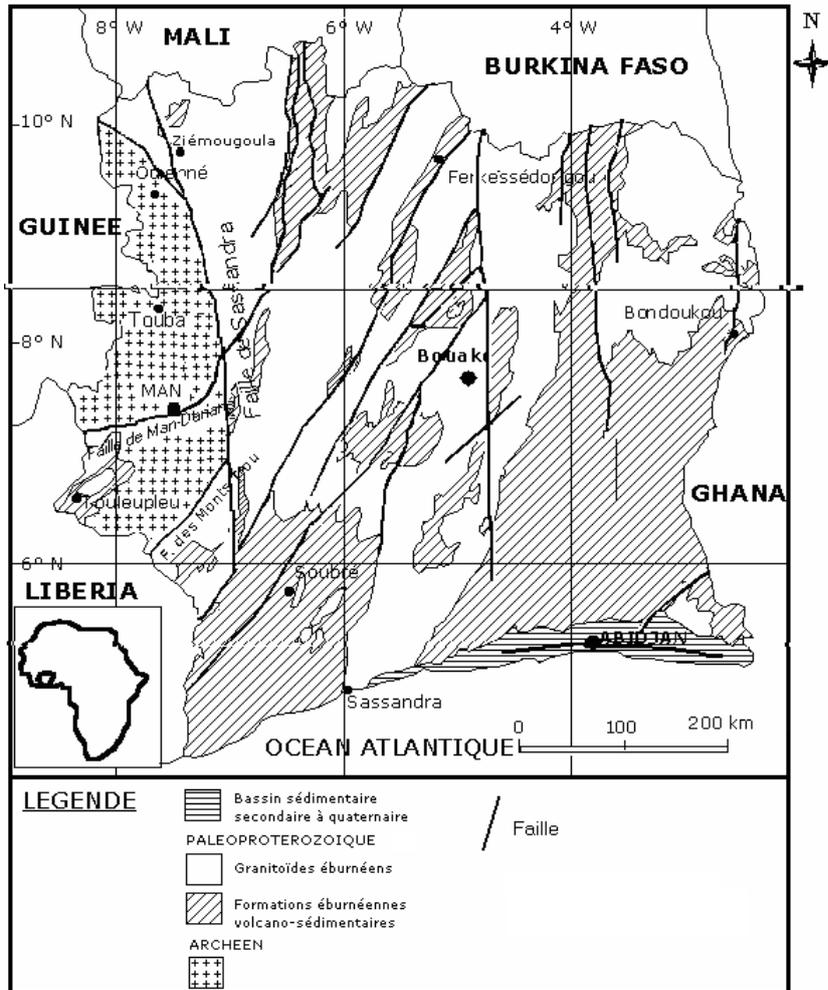


Figure 8 : Carte géologique simplifiée de la Côte d'Ivoire (Kouamelan, 1996 *in* Pothin *et al.*, 2000)

2.1.1.1. Formations libériennes

Elles sont à dominance charnockitique à l'Ouest (région de Man) et migmatique au Sud-Ouest (région de Sassandra) (Yacé, 2002). Ces formations sont constituées de deux grands ensembles :

- un ensemble de roches métamorphiques : gneiss, amphibolo-pyroxénites, itabirites, charnockites et migmatites ;
- un ensemble de roches plutoniques : granites et granodiorites gneissifiés.

2.1.1.2. Formations éburnéennes

La superficie couverte par la chaîne éburnéenne représente environ 73 % du territoire ivoirien. C'est un ensemble dominé par deux types pétrographiques, à savoir, les roches métamorphiques et les granitoïdes (Yacé, 2002) :

- roches basiques : gabbros, dolérites, basalte et andésites métamorphisés ;
- roches acides : rhyolites, dacites métamorphisées ;
- roches métamorphiques d'origine exogène : schistes divers et quartzites ;
- granitoïdes : granites, tonalites ;
- roches plutoniques et volcaniques basiques métamorphisées (roches vertes).

On y note la présence de sillons volcano-sédimentaires où sont localisés la plupart des minéralisations. Dans la région concernée, on peut citer les sillons de Bouaflé et de Bouaké (Yacé, 2002) :

- **Sillon de Bouaflé**

Il suit l'axe Bouaflé-Vavoua-Zuénoula-Kossou-Tiébissou. On note la présence de granites calco-alcalins, hyperalcalins à biotite et de granodiorites ; de schistes, des quartzites, de metabasites, métarhyolites. Dans ce sillon, les schistes et les quartzites sont dominants.

- **Sillon de Bouaké-Est**

C'est un sillon qui suit l'axe Bouaké-Toumodi-Féttékro. Il est dominé par les schistes et quartzites mais avec des roches acides intermédiaires et basiques. Le fait le plus notable dans ce sillon est la présence de la granodiorite de Toumodi qui selon Yacé (2002) peut être considéré avec le granite de Séguela, comme la granodiorite et le granite discordants de sillon les plus étendus de Côte d'Ivoire. Le secteur d'étude se situe dans les unités géologiques du Birimien.

2.1.2. Géologie du secteur d'étude

La région des lacs et particulièrement la zone d'étude appartient au domaine protérozoïque de la dorsale de LEO. Elle est en outre située dans le domaine Birimien de la Côte d'Ivoire. La synthèse bibliographique sur la géologie de notre zone d'étude s'appuie sur les travaux de Yacé (1976, 2002), de Leblond (1984), de N'guessan (1985) et de Yao (1998) et aussi des observations faites sur le terrain. On rencontre dans le secteur d'étude deux principales formations géologiques : les roches magmatiques : les granitoïdes éburnéens (granites à biotite, granites à deux micas, migmatites, granodiorites concordants, pegmatites) et les roches métamorphiques (volcano-sédimentaires) du Birimien (figure 9). Selon Yao (1998), on note dans la région des Lacs, un massif appelé massif de Yamoussoukro avec une étendue de 1800 km² et de forme allongée associé à plusieurs plutons : le massif de Bongo qui est de type granitique porphyroïdique à deux micas du Nord-Est et le massif de Fondi, granitique aplitique au Sud-Est.

2.1.2.1. Roches magmatiques

Elles sont composées dans leur ensemble de granitoïdes éburnéens, les migmatites et les gneiss. Elles dominent le secteur d'étude et affleurent sous plusieurs aspects. Ces formations apparaissent sous les deux formes homogènes et hétérogènes. On y distingue des granites alcalins ou subalcalins à biotite (amphibole et/ou muscovite), des granodiorites et une large prédominance de granites calco-alcalins à deux micas. Toutes ces roches appartiennent au complexe éburnéen et à l'archéen pour ce qui est des granites migmatitiques.

2.1.2.2. Roches métamorphiques birimiennes

Elles sont représentées par des schistes (ardoisiers), des quartzites et des roches vertes. En général, les schistes se rencontrent dans les zones proches des étendues d'eau comme le lac de Kossou, le Kanou, le Bandama, etc.

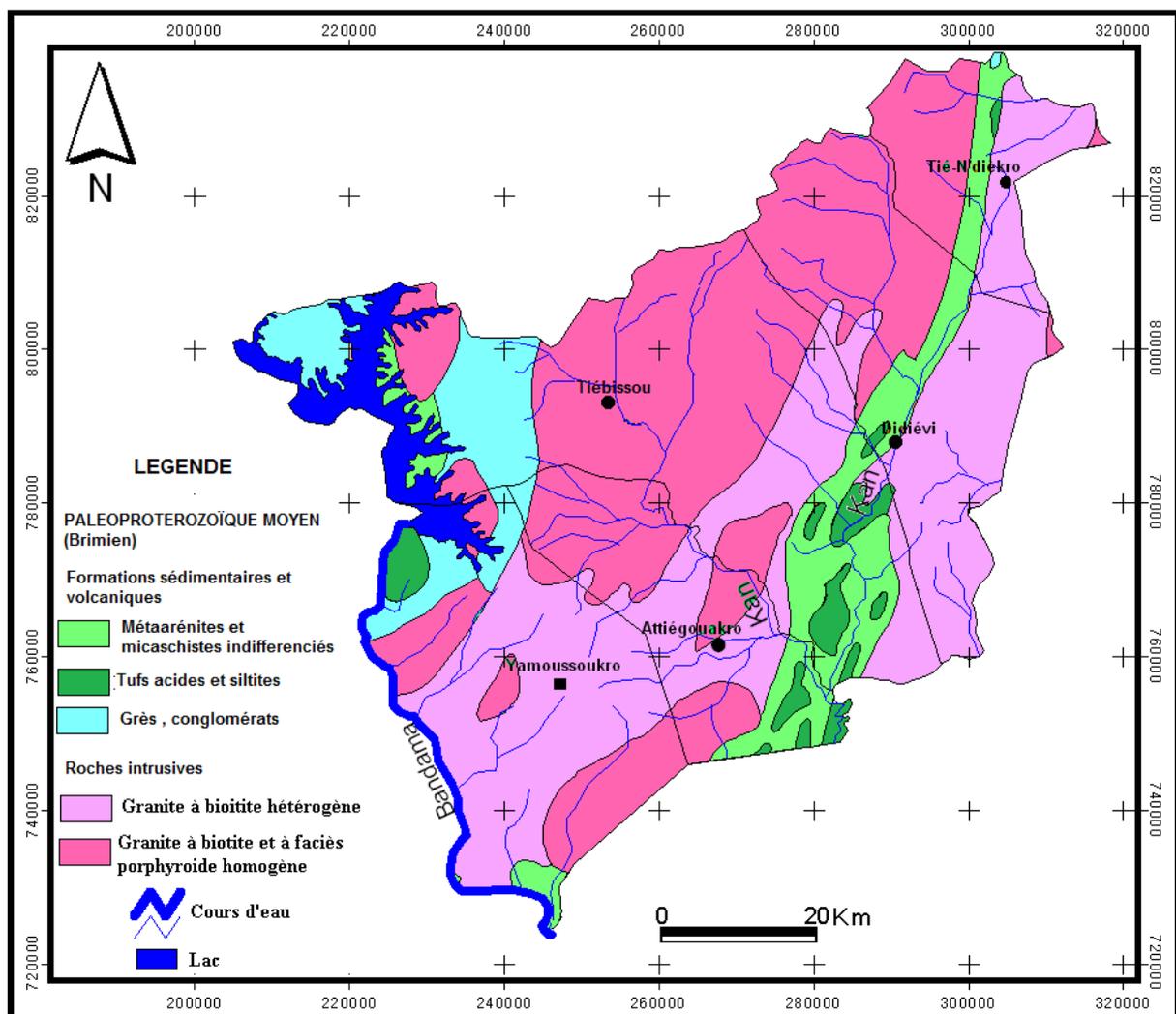


Figure 9 : Carte géologique de la zone d'étude.

2.1.3. Aspect à l’affleurement des granitoïdes

Les affleurements dans la région se présentent essentiellement sous cinq formes différentes :

- pierres volantes au sein des altérites ou dans les colluvions ;
- chaos ou amoncellement de blocs de dimensions métriques à décamétriques ;
- « dos de baleine » ou affleurements étroits et allongés ;
- dalles, grands affleurements à surface subhorizontale ;
- inselbergs : ce sont les affleurements les plus importants mais également les plus rares dans la région.

-

Sur le terrain, nous avons observé des affleurements qui se présentent en forme de dalles et chaos très souvent altérés parcourus de filonnets de quartz et des fractures.

Dans la sous/préfecture de Didiévi, entre les villages d’Akakouamékro et Boli sur l’axe Tiébissou-Didiévi, on a relevé deux types d’affleurements. L’affleurement d’une granodiorite à grain moyen avec une texture grenue constituée de biotite, de quartz et de feldspaths (Photo A, Planche 3).

Sur le même axe, nous avons observé une dalle granitique fracturée avec des directions N85, N140, N20 dans le cimetière de Boli (Photo B, Planche 3). Sur cet affleurement, les observations macroscopiques suivantes ont été faites :

- la présence d’une intrusion constituée de feldspaths roses ;
- la présence d’une enclave basique ;
- la présence de filonnets de quartz et de pegmatites.

La photo C présente un granite affleurant altéré traversés un filon de quartz et de fractures. Sur la photo D prise dans les environs du village de Boli (Sous-préfecture de Didiévi), on observe l’affleurement d’une dalle granitique exploitée comme carrière à gravier.

Dans le département de Tiébissou, aucun affleurement n’a pu être observé pour cause d’insécurité.

A Yamoussoukro, au niveau du barrage de Kossou, nous avons observé des quartzites parcouru par des filons de quartz (Photo E ; Planche 3).

Plusieurs types d'affleurements de roches notamment des granitoïdes ont été rencontrés sur l'axe Yamoussoukro-Sinfra. Ces affleurements se présentent le plus souvent sous forme de blocs comme c'est le cas à Zambakro dans le lit du Bandama (Planche 3) ou en dalles altérées avec des fractures ouvertes et la présence de géodes d'altération signes visibles du phénomène d'altération (Photo F, Planche 4). On observe également beaucoup d'affleurements rocheux dans le cours du fleuve Bandama et aussi dans certaines retenues d'eau.

La sous-préfecture de Tiebissou est scindée en deux entités par l'axe routier international Abidjan- Ouagadougou. Du côté ouest, on trouve des schistes en général qui occupent cette zone. Aux abords du lac de Kossou, on rencontre également des schistes ardoisiers. Cette zone se caractérise par une forte épaisseur d'altération. Par endroits, des granites intrusifs sont signalés (Do Sakassou). Du côté est, s'étend une grande zone de granites concordants. Mais, au Sud-Est, la présence de la chaîne de collines Kounyé fait apparaître des schistes et des roches vertes (Adikro, Pranoua, Ninkro).



Planche 3 : Affleurement en blocs de granite dans le lit du Bandama à Zambakro à la prise d'eau de la SODECI (A) et d'une dalle de granite dans une retenue d'eau (B).

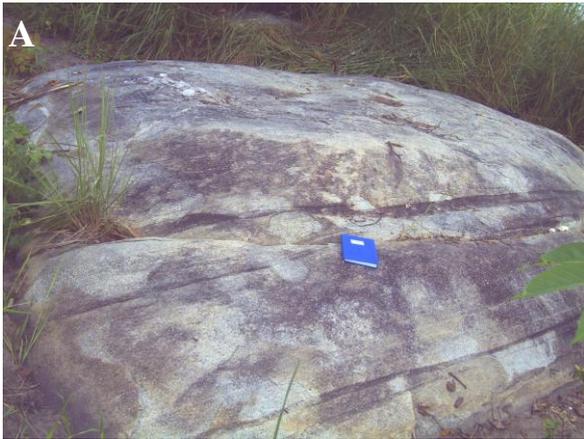


Photo A : Dalle Granitique altérée avec fracture ouverte occupée par des sédiments. (Village Akakouamékro S/P de Didiévi)



Photo B : Affleurement d'une dalle granitique avec présence de filonnets de quartz (Boli s/p de Didiévi)



Photo C : Granite affleurant altéré traversé par un filon de quartz et de fractures



Photo D : Dalle granitique exploitée comme carrière à gravier (Boli s/p de Didiévi)

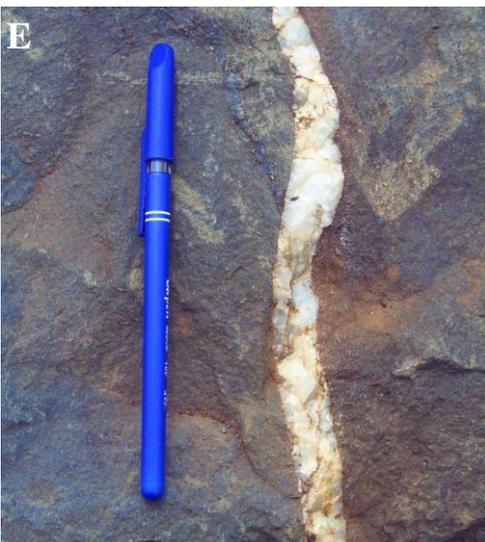


Photo E : Quartzite traversé par un filon de quartz (Barrage de Kossou s/p de Yamoussoukro)



Photo F : Granite affleurant avec fissure ouverte et géodes d'altération (Axe Yamoussoukro-Sinfra, carrefour de Kékrenou)

Planche4 : Quelques types d'affleurements rencontrés dans la région des Lacs.

2.1.4. Etude macroscopique des granites observés

Cette étude des granites est une synthèse des travaux de Leblond (1984). Elle a permis de mettre en évidence cinq principaux faciès :

1. **des granites à biotites** à grain moyen dont les micas sont parfois légèrement orientés avec de grands cristaux de feldspaths. Les biotites y sont petites inférieures, à 1 mm. Ces granites dans lesquels les biotites sont inégalement réparties, leur donnant ainsi un aspect nébuleux, ont été qualifiés d'hétérogènes.
2. **des granites à biotite**, à grain moyen, orienté où l'ensemble des minéraux présente une orientation commune sur toute la surface de l'affleurement. Cette orientation peut prendre localement l'aspect d'une foliation. Les biotites sont généralement de grande taille (> 1 mm).
3. **les granites porphyroïdes à biotite** dans lesquels les phénocristaux de feldspaths potassiques peuvent atteindre 5 à 6 cm ; les autres minéraux ayant une taille de l'ordre du millimètre.
4. **les granitogneiss** : sous ce terme a été regroupé un ensemble de roches présentant sur l'ensemble d'un même affleurement, un aspect nettement feuilleté. De grain moyen, les minéraux essentiels sont le quartz, les feldspaths potassiques, les plagioclases et la biotite.
5. **les granites à deux micas** : renferment de la biotite et de la muscovite de façon égale dans l'ensemble de l'affleurement. De grain moyen, ils ne présentent pas d'orientation et sont généralement riches en oxydes et en sulfures, disséminés dans la roche.

2.1.5. Altération et formations superficielles

Sous climat tropical humide, l'altération est le résultat de deux principaux facteurs que sont la température et la pluie. A ces deux facteurs, il faut ajouter la prédisposition de la roche mère à l'altération due aux phénomènes tectoniques que subit la roche en place. Les fractures, les filons de quartz et de pegmatites créent ainsi des zones de contact de faibles résistances favorables à la pénétration de l'eau. L'action des plantes fracturophyles telles que les ficus (Biémi, 1992) crée également au sein de la roche mère, de larges fractures (Planche 5). Ces différentes fissures et fractures sont le front de l'altération. Elles se laissent pénétrées facilement par l'eau qui par hydrolyse désagrège la roche en libérant ainsi les différents éléments qui vont former les différents horizons du sol. Le secteur d'étude est une zone de contact forêt/savane avec des conditions climatiques relativement homogènes. On peut donc

penser que l'épaisseur des altérites sur un profil donné dépend de la solubilité des différents constituants de la roche-mère, de son degré de fissuration et de la topographie du toit de substratum. Selon Leblond (1984), les profils actuels de l'altération sont le résultat de l'action des agents de la géodynamique externe pendant le Quaternaire. Une étude de l'Office de la Recherche Scientifique dans les Territoires d'Outre-Mer (OSTORM) (Avenard et *al*, 1971) donnant un résumé des principales phases climatiques dans la région du contact forêt-savane en Côte d'Ivoire permet de faire une reconstitution de la géomorphologie du V Baoulé (Tableau II).



Planche 5: Fractures créées dans les affleurements par l'action des végétaux.

Tableau II : Reconstitution géomorphologique du V Baoulé (D'après Avenard et al. (1971)).

PERIODES IMPORTANTES	CLIMAT SUPPOSE	PRINCIPAUX PHENOMENES MORPHOGENETIQUES
Mio-pliocène		Mise en place des reliefs intermédiaires
	Chaud et humide puis plus contrasté	Altération puis cuirassement
Mindel	Sec, saison des pluies courtes	Façonnement du haut glacis, de la haute terrasse le long des rivières
Interglaciaire	Chaud et humide	Altération
		Cuirassement du haut glacis
	Sec, saison des pluies de courte durée	Erosion du haut glacis et de la haute terrasse. Redistribution des matériaux sous forme de paquets hétérométriques
Interglaciaire	Chaud et humide	Altération
		Carapace dans les matériaux mis en place au cours de la phase érosive précédente
Würm ancien (60.000 ans B.P.)	Sec et contrasté	Entaille de la moyenne terrasse et des formations superficielles. Mise en place à la base des versants de placages sableux et d'une basse terrasse le long des rivières
Interstade (Inchirien supérieur 31.000ans B.P.)	Chaud	Altération puis carapacement de la basse terrasse
Würm principal Post Inchirien 30.000 à 20.000 B.P.)	Sec et érosif	Graviers sous berge. Entaille dans les petites vallées à travers les sables jusqu'à la roche en place. Tapis de graviers prélevés à celle-ci ou aux formations supérieures.
Sub-actuel et actuel	Réhumidification progressive	Création de la plaine alluviale le long des rivières par-dessus les graviers sous berge. Remblaiement de l'entaille dans les petits thalwegs par des produits de ruissellement diffus. Peut-être rémission sèche expliquant les sols prismatiques.

2.1.6. Profils d'altération

Les formations issues de ce processus en région granitique et schisteuse sont constituées essentiellement de sables, d'argiles et d'arènes dont les superpositions, sont décrites selon les coupes interprétatives établies par la Direction Territoriale de l'Hydraulique de Yamoussoukro (figure 10) (Kouassi, 2004). Le profil d'altération sur les formations granitiques sous climat tropical humide se présente de façon classique comme suit de haut en bas :

- sol actuel : couche peu épaisse, humifère sous couvert forestier, plus lessivé et latéritique en zone de savane arbustive ;
- carapace ou cuirasse latéritique de couleur brune, riche en oxyde de fer et d'aluminium pouvant évoluer vers une bauxite ou s'enrichir en oxyde de manganèse ;
- argile latéritique épaisse de quelques mètres renfermant des grains de quartz résiduels. C'est une zone de forte activité biologique ;
- arène granitique : fortement kaolinisée au sommet. Elle devient grenue lorsqu'on se rapproche de la roche saine. Les minéraux sont de mieux en mieux conservés (quartz, feldspaths, micas) mais présentent un aspect de surface altéré ;
- roche-mère : l'altération commence à atteindre les minéraux les plus sensibles qui présentent un aspect terne mais conservent une cohésion importante.

Le profil d'altération sur schiste présente également une terre arable et des niveaux argileux, mais les sables et les arènes grenues y sont absentes. Les schistes sont des roches métamorphiques de faible intensité. Le profil-type présente comme suit :

- sable argileux (terre arable) ;
- argile latéritique ;
- argile ocre ;
- argile violacée ;
- argile brune ;
- argile verte ;
- argile jaune ;
- schiste altéré (front d'altération actif) ;
- schiste sain, redressé à la verticale.

L'épaisseur des profils d'altération liés aux granitoïdes est relativement faible: environ 20 m en Afrique de l'Ouest et 50-60 m dans certaines régions de la Côte d'Ivoire. Le maximum d'épaisseur du profil d'altération est enregistré sur les schistes avec une moyenne de 50 m pour

l'Afrique de l'Ouest et 80 m pour la Côte d'Ivoire où elle atteint 100 m dans la boucle de cacao (Biémi, 1992).

A l'heure actuelle, les profils d'altération constituent de grands réservoirs d'eau souterraine: ce sont les nappes des altérites exploitées par les nombreux puits à gros diamètres. Au-dessous de celles-ci, existent les nappes de fractures ou de fissures dans les granites et qui sont captées par les forages profonds de petit diamètre. Dans la région de Yamoussoukro, l'épaisseur moyenne des altérites est de l'ordre de 25 m, avec les valeurs extrêmes de 0 m et 60 m (Leblond, 1984).

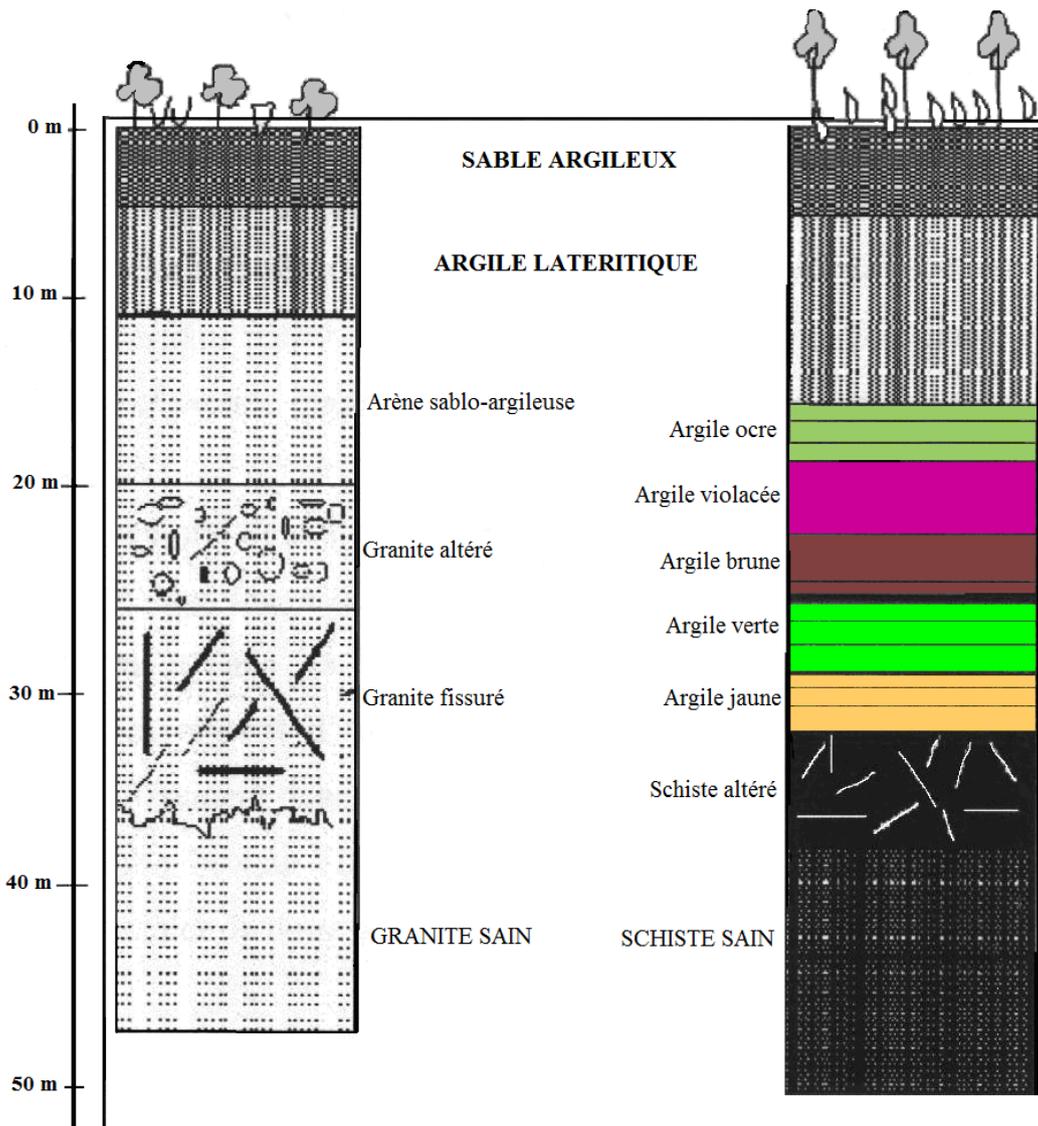


Figure 10 : Profil d'altération sur schiste et granite (Kouassi, 2004).

2.1.7. Coupe géologique de la zone d'étude

Les sondages réalisés dans la zone d'étude ont permis de réaliser une coupe géologique dans le secteur d'étude (figure 11) (Leblond, 1984). Sur cette coupe géologique, on constate que :

- le profil complet d'altération existe essentiellement sur les zones topographiquement élevées. Le sol est alors propice à l'implantation d'un couvert forestier ;
- dans les zones de forêt dégradée ou de savane, le sol est enlevé et laisse apparaître la cuirasse ou des éléments de dimension moyenne (graviers latéritiques) ;
- les arènes grenues ou le socle légèrement altéré peuvent être mis à jour en n'importe quel point, du fait de l'existence de zones plus résistantes dans les granitoïdes. Le sol formé est de type sableux propice au développement de savane herbacée, colonisé par les palmiers et rôniers ;
- dans les bas-fonds, le socle cristallin est très peu profond. Les sols sont de type hydromorphes et propices à l'implantation de forêts-galerie ou d'une savane herbeuse.

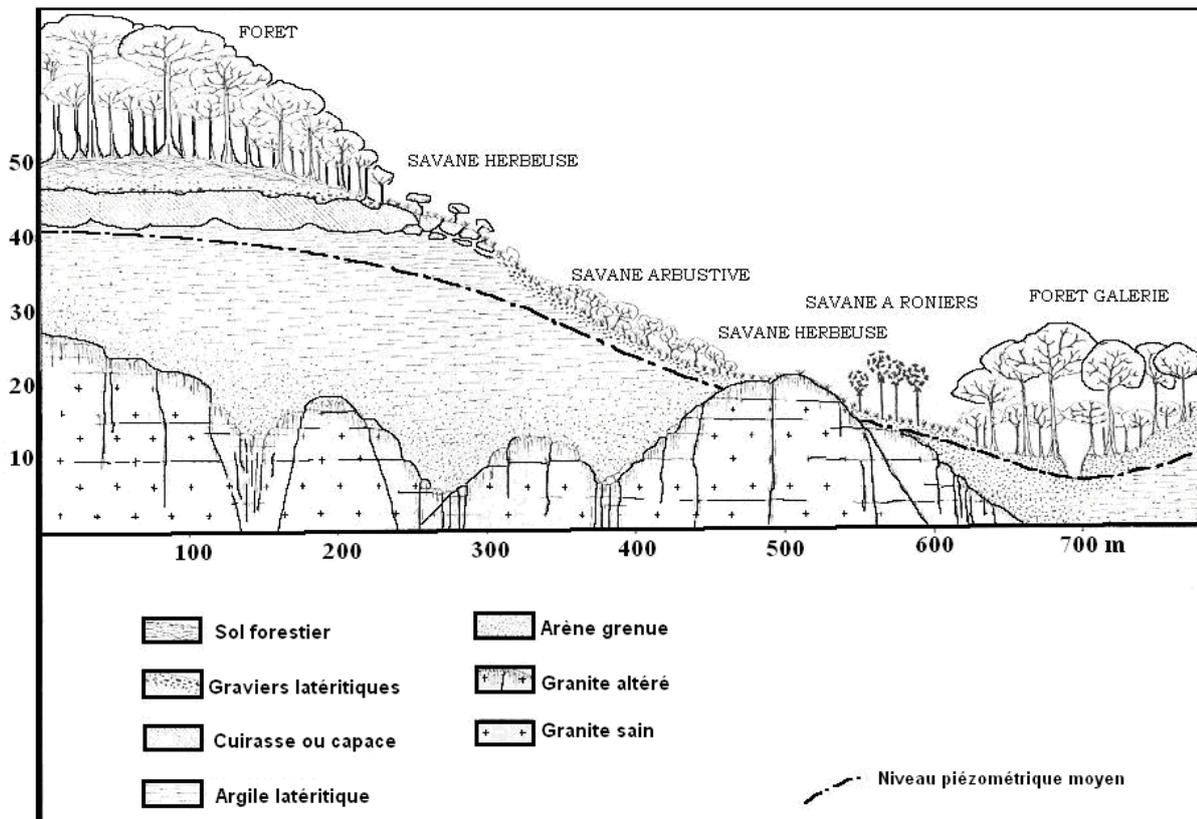


Figure 11 : Représentation schématique de la répartition des diverses formations géologiques et végétales dans la zone d'étude (Leblond, 1984).

2.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

2.2.1. Acquis sur l'hydrogéologie du socle en Afrique de l'Ouest

Les premières études hydrogéologiques en Afrique de l'Ouest remontent à une plusieurs dizaines d'années (Archambault, 1960). De nombreux auteurs tels que Guerin-Villeaubreil (1962), Biscaldi (1967), Guiraud (1976), Guiraud et Lenck (1975), CIEH (1978), Engalenc (1978), Collectif (1991), BRGM et AQUATER (1986), Faillat (1986a, 1986b), Detay (1987), etc. ont défini les grands traits hydrogéologiques du socle cristallin et cristallophyllien sous climat chaud et humide. La plupart de ces études concernent de vastes régions contrastées au plan géologique et climatique. Une étude dans des zones restreintes s'avère plus représentative des caractères du milieu du fait de l'hétérogénéité du socle ouest africain (Mbonu, 1991). C'est dans cette perspective que se situent les travaux du CIEH (1978) à Mogtédou (Burkina Faso), de Haubert (1977) dans la boucle du cacao (Côte d'Ivoire), de Savadogo (1984) à Sissili (Burkina Faso), de Léblond (1984) à la station expérimentale de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire), de N'guessan (1985) dans le centre de la Côte d'Ivoire, de Traoré (1985) dans les plateaux mandingues (Mali), de Faillat (1986a) à Yamoussoukro (Côte d'Ivoire), de Soro (1987, 2002) respectivement dans le Sud-Est et le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire, de Yaméogo (1988) dans le plateau mossi (Burkina Faso), de Biémi (1992) dans la haute Marahoué (Côte d'Ivoire), de Savané (1997) dans le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire, de Kouamé (1999), de Lasm (2000), de Saley (2003) dans l'Ouest montagneux (Côte d'Ivoire) ; de Jourda (2005) à Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire), de Youan Ta (2008) dans le Nord Est de la Côte d'Ivoire, de Ahoussi (2008) dans la région Abidjan-Agboville et d'Adiaffi (2008) dans la zone de contact "socle-bassin sédimentaire" du Sud-Est de la Côte d'Ivoire.

Tous ces auteurs sont unanimes sur l'existence dans le socle cristallin et cristallophyllien de deux types d'aquifères :

- **un aquifère d'altérites** doté d'un pouvoir capacitif important mais, à faible perméabilité alimenté par la surface et surmontant un aquifère de fissures ou de fractures (Detay et *al.*, 1989). Il a une épaisseur moyenne de 10 à 20m dans les granito-gneiss et de 15 à 40m dans les schistes. La tranche de cet aquifère varie en fonction des saisons, des zones climatiques, de la lithologie et de la topographie. Ces réservoirs sont généralement captés par les puits paysans appelés encore puisards. Généralement, ces puisards ne résistent pas en saison sèche parce que le niveau piézométrique est sous l'influence saisonnière (Biémi, 1992). Selon Engalenc (1978),

la plupart des études réalisées en Afrique de l'Ouest, il y a quelques années portaient essentiellement sur l'hydrogéologie des altérites.

Le problème de l'hydrogéologie des altérites se ramène à un positionnement des ouvrages (puits et forages) dans les zones ayant une hauteur d'eau pouvant assurer un débit pérenne à cause de la faiblesse des débits obtenus ;

- **un aquifère de fissure et de fracture** captif, drainant la couverture, à fonction essentiellement conductrice (Engalenc, 1978). Son épaisseur est mal connue mais il est estimé à 40 voire 50m dans les formations cristallines et cristallophylliennes.

L'hydrogéologie des milieux fissurés a connu durant ces dernières années un grand essor grâce à l'utilisation de nouveaux matériels de foration notamment le marteau fond de trou. La productivité des ouvrages hydrauliques varie de manière aléatoire. Il apparaît toutefois qu'elle est influencée par le faciès lithologique, la présence ou non d'altérites, la connectivité hydraulique des fractures recoupées par les ouvrages (De Marsily *in* M'bonu, 1991). La variation du volume sollicité en fonction des paramètres hydrauliques de l'aquifère est due à l'existence d'un effet d'échelle à cause de l'hétérogénéité du milieu. Le volume auquel ces paramètres deviennent stables est appelé le Volume Élémentaire Représentatif (V.E.R.) (CEFIGRE, 1990). Le VER peut varier en fonction de la durée de sollicitation de l'aquifère.

2.2.2. Etudes hydrogéologiques dans la région des lacs

Les différentes études réalisées dans cette région sont celles de Guerin-Villaubreuil (1962) ; Leblond (1984), N'guessan (1985) et Faillat (1986b). Ces auteurs ont noté dans la région des lacs, l'existence des deux principaux aquifères qui sont captés par les différents ouvrages existants dans la zone d'étude.

2.2.2.1. Aquifère des altérites

C'est un aquifère qui a une porosité totale d'interstice élevée mais avec une faible porosité efficace et une très faible perméabilité. Les zones les plus perméables se trouvent soit en surface, soit dans la masse des altérites (lentilles sableuse) soit dans la transition existante au contact altérites socle. Du fait de leur teneur élevée en minéraux argileux, ces terrains fournissent des eaux de qualité médiocre et des débits très peu élevés de 1,3 m³/h en moyenne avec exceptionnellement 10 m³/h, pour des rabattements de 2 à 6m. Il fut pourtant le premier

aquifère à être utilisée par les autorités ivoiriennes pour l'alimentation en eau des villages par le biais de puits modernes d'au moins 1m de diamètre jusqu'en 1975.

Le socle était, considéré comme imperméable. Le niveau de l'eau est généralement compris entre 10 et 12 m. De nombreux puits villageois qui captent ces altérites existent dans les bas-fonds où le niveau de l'eau se situe, fréquemment, entre 1 m et 2 m sous le sol. Ces puits subissent l'influence des saisons. Ainsi, pour faire face à cette situation et aussi au risque élevé de contamination de ces ouvrages, les techniciens forent plus en profondeur à l'aide de nouveaux moyens techniques.

2.2.2.2. Aquifère de fissures

Il est capté par des forages qui sont des ouvrages à petit diamètre grâce à l'avènement de la technique du marteau fond-de-trou dans la recherche des eaux souterraines en milieu de socle. Cet aquifère a une bonne perméabilité dans les zones à forte densité de fracturation. La transmissivité est très inégale d'un point à un autre du fait des variations très rapides de l'épaisseur de la zone fracturée. Le débit moyen calculé par Leblond (1984) est de l'ordre de 3,5 m³/h dans les granitoïdes aux environs de Yamoussoukro pour un rabattement moyen de 24 m environ. Le niveau statique moyen se situe vers 12 m sous le sol avec des valeurs extrêmes de 0 à 20 m. Actuellement c'est l'aquifère le plus exploité pour l'alimentation en eau potable dans le cadre de l'hydraulique villageoise et de l'hydraulique villageoise améliorée.

CONCLUSION PARTIELLE

La région des Lacs est dominée du point de vue géologique par les formations magmatiques que sont les granitoïdes éburnéens. On y rencontre également des formations métamorphiques birimiennes. Dans les formations métamorphiques tendres, l'épaisseur d'altération est plus élevée que sur les granitoïdes qui sont plus résistants. Du point de vue hydrogéologique, la présence de deux types d'aquifères est à noter. L'aquifère d'altérite exploité par des puits modernes ou villageois et l'aquifère de fissure ou de fracture capté par les forages dans le cadre des programmes d'approvisionnement en eau potable des localités.

CHAPITRE 3 : ORIGINE DE LA MINERALISATION DES EAUX SOUTERRAINES

3. 1. INTRODUCTION

L'eau, au contact des terrains qu'elle rencontre, se charge en divers éléments qui vont influencer sur sa qualité. Certains de ces éléments sont présents naturellement dans le sol, et vont définir la qualité « naturelle » de l'eau brute. Ainsi l'eau à l'état naturel peut contenir :

- des matières organiques,
- des matières dissoutes provenant des terrains traversés (calcium, magnésium, sodium, potassium, bicarbonates, sulfates, chlorures, métaux lourds, ...),
- des particules en suspension.

D'autres éléments sont d'origine anthropique et vont contribuer à la pollution des eaux souterraines. La qualité des eaux continentales est dépendante d'un certain nombre de paramètres, dont la quantité en présence (concentration en éléments traces) va définir l'état de la qualité de l'eau. La minéralisation traduit donc la teneur globale en sels minéraux dissous, tels que carbonates, bicarbonates, chlorures, sulfates, calcium, sodium, potassium, magnésium.

3.2 MINERALISATION NATURELLE DES EAUX SOUTERRAINES

L'eau de pluie est légèrement acide du fait de sa teneur en CO_2 dissous. Au cours de son infiltration dans le sol et le sous-sol, elle se charge en ions et acquiert des propriétés physiques et chimiques qui caractérisent l'eau de la nappe qu'elle forme. Les eaux souterraines sont plus ou moins minéralisées en fonction de la nature des roches traversées et des minéraux rencontrés au cours de l'infiltration; du temps de contact de l'eau avec les minéraux, donc de la vitesse de percolation de l'eau dans le sous-sol et du temps de renouvellement de l'eau de la nappe par l'eau d'infiltration. Cette signature géochimique des eaux souterraines provient essentiellement des interactions de l'eau avec les minéraux hydrothermaux lorsqu'elle circule dans les fractures.

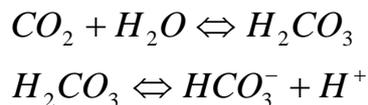
3.2.1. Origine des éléments majeurs des eaux souterraines

- *Cas du CO_2 ; HCO_3^- et H^+*

La principale source de production du gaz carbonique (CO_2) dans le sol est constituée par les phénomènes de combustion biologique et chimique des matières organiques par les micro-organismes et notamment par l'oxydation. Le CO_2 du sol provient également de l'air et de la respiration des plantes et des micro-organismes. Les eaux de précipitations s'enrichissent de

ces gaz et les entraînent en profondeur. C'est pourquoi les eaux profondes riches en CO₂ sont généralement les eaux d'infiltration récente. La présence du CO₂ dans le sol contribue à l'accélération des réactions chimiques qui aboutissent à la destruction des minéraux et des roches.

Ce gaz, lorsqu'il est dissous dans l'eau donne naissance à plusieurs corps: acides carboniques; bicarbonates (HCO₃⁻), carbonates (CO₃²⁻) et protons H⁺. En Côte d'Ivoire, les carbonates CO₃²⁻ n'existent généralement pas dans les eaux naturelles, parce que le pH de celles-ci ne dépasse jamais 8,3 pour permettre l'apparition des carbonates. C'est pourquoi partout, les eaux naturelles ne contiennent que les ions bicarbonates HCO₃⁻ (Biémi, 1992). La production de ces éléments chimiques à partir du CO₂ du sol se fait à partir de trois principales réactions chimiques que sont la dissolution, l'hydratation et la dissociation du CO₂ et de l'acide carbonique (H₂CO₃) selon les réactions suivantes :



L'ion H⁺ et HCO₃⁻ confèrent respectivement aux eaux souterraines l'essentiel de leur acidité et alcalinité. L'acidité des eaux souterraines est due à un processus biogéochimique ou anthropogénique. Ce processus est régi par le CO₂ du sol généré à travers la respiration des racines des plantes et de la décomposition de la matière organique (Kortatsi, 2006 ; Kortatsi, 2007 ; Kortatsi et *al.*, 2008). En outre en milieu tropical, l'acidité des eaux souterraines résulte de la somme de plusieurs facteurs (Grimaldi, 2004) :

- les minéraux primaires facilement altérables ont disparu. La solution du sol restante a donc une alcalinité négative ;
- pour des pH inférieurs à 4,5, les acides organiques et carboniques ne sont pas dissociés. Ils ne jouent aucun rôle tampon pour limiter l'acidité de la solution ;
- le phénomène est ensuite accentué par la forte transpiration de la forêt qui accroît le caractère négatif de l'alcalinité et diminue donc encore le pH.

Le CO₂ peut également provenir d'autres sources à des degrés moindres. Parmi celles-ci, nous pouvons citer :

- la remontée du magma le long des plans de faille produit du CO₂.

Les ions H^+ , peuvent également provenir de la dissociation des acides carboniques produits par les plantes lors de la décomposition des feuilles mortes.

Le bicarbonate est l'élément le plus présent dans les eaux souterraines. En milieu de socle, la présence de HCO_3^- dans les réservoirs est due essentiellement à l'altération des minéraux silicatés, par conséquent, sa teneur dans une eau peut nous renseigner sur le degré d'évolution et donc du temps de séjour relatif de l'eau dans l'aquifère au moment de l'échantillonnage.

L'oxydation des sulfures tels que la pyrite, qui produit de l'oxyde de fer et de l'acide sulfurique est également une source de production de CO_2 .

Ces aspects seront développés dans l'étude de la typologie des eaux et celui du système calco-carbonique.

- **Cas des cations : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+**

Les ions calcium, magnésium, sodium et potassium proviennent tout comme le bicarbonate de l'altération des roches. Les attaques acides des roches par le gaz carbonique, les acides organiques et les acides sécrétés par les micro-organismes jouent un rôle important dans la mise en solution de ces éléments dans les eaux. Les eaux d'infiltration ainsi acidifiées rentrent en contact avec les roches encaissantes et vont provoquer un ensemble de réactions qui aboutiront à la destruction progressive de la maille cristalline avec pour conséquence la mise en solution de ces ions. La nature et la quantité de ces ions sont fonction de la nature pétrographique de la roche. L'origine atmosphérique et florisitique des cations est également à noter. En effet, les eaux de pluie ont une influence considérable dans la production des ions tels que N^+ et K^+ (Biémi, 1992, Soro, 1998).

- **Cas des ions chlorures (Cl^-) et sulfates (SO_4^{2-})**

- ✓ **Ions chlorures**

Dans les zones côtières comme c'est le cas d'Abidjan, les apports océaniques en chlorures sont importants. Pour des zones éloignées des mers, il faut considérer d'autres origines de cet élément dans les eaux souterraines. Les ions chlorures peuvent être issus de certains minéraux présents dans les roches volcaniques. Toutefois, il est rare de trouver des minéraux dans lesquels le chlore est l'élément de base. Il est donc présent généralement sous forme d'impuretés dans les feldspathoïdes $[Na_8(Cl_2(AlSiO_4)_6)]$ et dans

l'apatite $[Ca_5(Cl, F, OH)(PO_4)_3]$. Les concentrations sont donc en faible quantité. Selon Savadogo (1984), les concentrations exceptionnelles en chlorures sont liées à la présence d'un recouvrement argileux sur le substratum. Ce recouvrement rend difficile les circulations d'eau en leur sein, et même dans les parties fissurées du «bed-rock» qu'il colmate, d'où une surconcentration des chlorures.

✓ Sulfates

La dissolution des formations gypseuses est la source de production des ions sulfates dans l'eau selon la réaction suivante :



Mais en Côte d'Ivoire, cette origine est peu probable. De ce fait, les sulfates peuvent provenir de l'oxydation des minéraux sulfureux tels que la pyrite. L'apport du réservoir floristique est également une source de production des ions sulfates issus de l'activité biologique.

Les sulfates donnent un gout amer, un gout médical à l'eau s'ils dépassent la concentration de 250 mg/L. Cela rend désagréable la consommation de l'eau et peut provoquer des diarrhées.

▪ Cas des nitrates

L'origine des nitrates dans les eaux souterraines est fort discutée dans la littérature scientifique (Savadogo, 1984 ; Faillat, 1986 ; Biémi, 1992 ; Soro, 2002 ; Ahoussi, 2008). Un tel intérêt est dû au fait que les nitrates ont des effets sanitaires très graves sur les nourrissons et les femmes enceintes. Ils sont à l'origine de la méthémoglobinémie. Les nitrates présents dans les eaux peuvent provenir d'une minéralisation naturelle des roches, de l'épandage d'engrais, de polluants domestiques (anthropique) et des apports par les sols et la végétation.

Le processus naturel de transfert de l'azote dans les eaux se fait selon les conditions d'oxydoréduction et les réactions biologiques présentées par la **figure 12**.

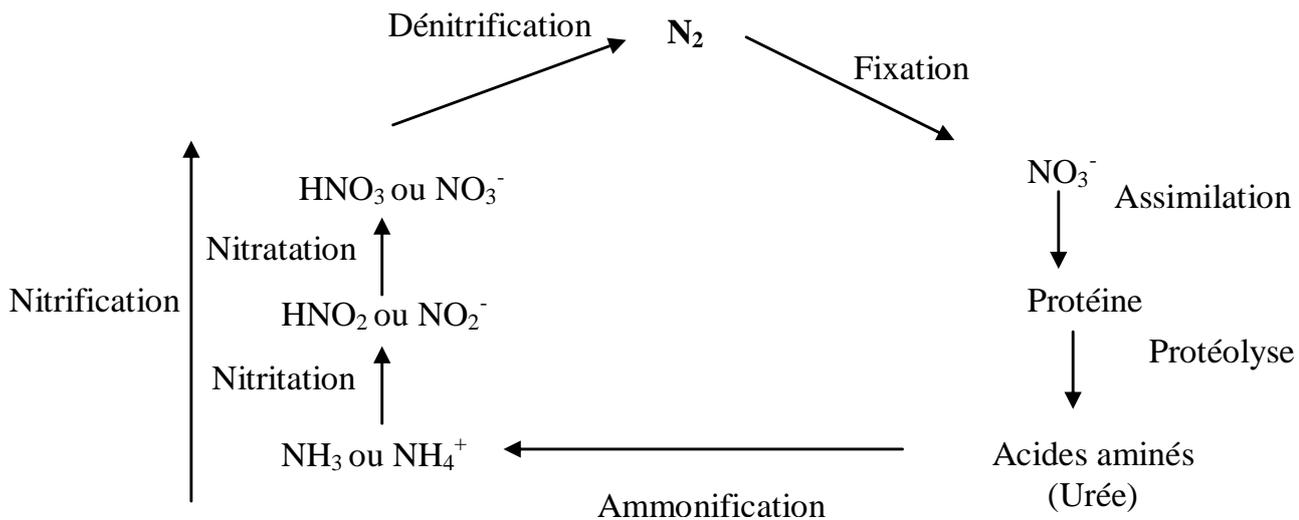


Figure 12 : Cycle de l'azote (Débieche, 2002).

La nature éruptive et métamorphique de roches constituant le socle précambrien est peu favorable à la présence de composés azotés. Par ailleurs, les biotites de certains schistes ou gneiss peuvent avoir des teneurs notables en NH_4^+ (in Goné, 2001). Les teneurs naturelles en nitrates dans les eaux souterraines dépendent de la géologie, et du type de sol. Aux États-Unis, les concentrations naturelles en nitrate sont comprises entre 4 et 9 mg/L, elles augmentent avec les activités agricoles pour atteindre dans certaines régions des niveaux élevés (100 mg/L) (Fewtrell, 2004). Au Québec, dans des conditions naturelles, la teneur en nitrite-nitrates dans les eaux souterraines est généralement inférieure à 0,05 mg/L (Paradis et al, 1991). En France, selon Ratel, (1992), à l'état naturel en l'absence de pollution, les concentrations n'excèdent pas 3 à 5 mg/L dans les eaux superficielles et quelques mg/L dans les eaux souterraines. Les teneurs élevées en nitrates dans les eaux souterraines sont fonction des activités qui ont lieu dans la zone. Dans ces travaux, Ratel (1992), donne une distribution relative des teneurs en nitrates en fonction de l'occupation du sol (Tableau III).

Tableau III: Teneurs en nitrates et activités ou occupation du sol (source : Ratel, 1992).

Teneurs	Activités et occupation des sols
Très élevées et croissantes	Occupation urbaine et industrielle dense et/ou agriculture intensive.
Moyennes	Agriculture traditionnelle moyennement intensive, habitat rural dispersé
Faibles	Forêt et zone d'élevage intensif avec des prairies permanentes peu fertilisées

Au Canada, particulièrement à Québec, une concentration égale ou supérieure à 3 mg/L-N est attribuée à une influence indéniable des activités humaines se déroulant en surface (Chartrand et *al.*, 1999). La zone d'étude est une zone agricole dans laquelle, l'utilisation des engrais chimiques n'est pas encore trop répandue du fait de la pratique d'une agriculture de subsistance. De même, le faible pouvoir d'achat des paysans ne leur permet pas d'en acheter régulièrement. L'apport des nitrates dans les eaux souterraines issus de l'épandage d'engrais est donc négligeable. Cependant, la proximité des dépôts d'ordure avec les villages peut être un risque de pollution des nappes phréatiques pendant la saison pluvieuse. De même, la mauvaise gestion des périmètres de protection immédiate des points d'eau où stagnent les eaux putrides qui s'infiltrent dans la nappe peut être aussi une source de développement de germes pathogènes et des nitrates. L'apport des nitrates par le réservoir floristique a également été confirmé. Ainsi, la mise en culture des zones forestières après défrichage et brûlis peut entraîner une décroissance de l'azote total. Selon Faillat et Blavoux (1989), dans les nappes de fissures de Côte d'Ivoire, le type de végétation agit sur la présence de nitrates dans les eaux. Dans de nombreuses régions de la Côte d'Ivoire, les cultures de riz, d'igname, de manioc et de maïs après brûlis, de même que les feux de brousse pourraient expliquer en partie les fortes teneurs en nitrates dans les eaux souterraines de certains villages.

▪ **Cas des éléments métalliques en traces : Fer et Manganèse (Mn^{2+})**

Ces deux éléments sont souvent rencontrés ensemble dans la nature sous une forme bivalente. Le fer est le quatrième élément dans l'écorce terrestre et le premier parmi les métaux lourds. La présence de fer dans l'eau peut avoir diverses origines : naturelle par le lessivage des terrains argileux riche en magnétite, sidérite, goethite, hématite et limonite ; ou industrielle. On le trouve surtout sous forme de Fe (II) ou de Fe (III). La concentration de ces deux éléments est souvent faible dans les eaux bien aérées. En revanche dans les eaux peu aérées (nappe captive) ; c'est-à-dire en milieu réducteur, on peut trouver des concentrations élevées. Dans les conditions habituelles, où le pH varie entre 4,5 et 9, le fer soluble présent est généralement à l'état ferreux. Dans les eaux souterraines, si le milieu est réducteur, le fer ferreux peut atteindre des teneurs élevées. Le manganèse peut apparaître dans l'eau à un potentiel Redox, plus élevé que celui du fer. Le fer peut être en solution vraie, à l'état colloïdal, plus ou moins combiné à la matière organique, sous forme de complexes organiques ou minéraux ou sous forme de particules en suspension. Schématiquement, le fer total peut se trouver à l'état de (Lallahem, 2002) :

- fer en suspension (à l'état ferrique principalement) ;
- fer dissous : fer à l'état ferrique solubilisé et fer à l'état ferreux.

3.2.2. Facteurs influençant la minéralisation

La minéralisation des nappes d'eau souterraine dépend tout d'abord des roches traversées. Les eaux souterraines profondes ont une minéralisation plus stable dans le temps et plus importante que les eaux peu profondes. La minéralisation des eaux souterraines est sous l'influence de certains facteurs qui jouent un rôle de catalyseur. L'effet de la température sur la minéralisation des eaux est connu. En effet, lorsque la température augmente, la solubilité et la cinétique augmentent également. De même, une élévation de la pression partielle de CO₂ entraîne une augmentation de la dissolution. A ces facteurs, qu'on peut nommer exogènes, il convient d'y ajouter les paramètres hydrodynamiques de la matrice et la nature de la roche aquifère (roche mère). Les échanges entre la phase liquide et la matrice sont favorisés par l'hétérogénéité ou l'homogénéité de la surface de contact et la vitesse d'écoulement des eaux. Ainsi, la présence de fissures et d'une porosité intragranulaire sont des agents catalytiques qui facilitent les échanges. Lorsque dans un aquifère, la vitesse d'écoulement est lente, il se produit plus d'échanges entre celui-ci et l'eau. Cette faible vitesse de l'eau a pour conséquence l'augmentation du temps de séjour. En somme, la présence de minéraux solubles dans la matrice rocheuse et la perméabilité de l'aquifère jouent un rôle prépondérant dans la minéralisation des eaux.

3.3. RISQUES LIÉS AUX NITRATES, AU FER ET AU MANGANESE

3.3.1. Nitrates

Les nitrates ne sont pas toxiques en eux-mêmes. Cependant, lorsqu'ils sont transformés en nitrites et en composés nitrosés (nitrosamines et nitrosamides), ils peuvent alors devenir dangereux pour l'organisme. La toxicité des nitrates survient lorsqu'il y a une ingestion massive ou lorsqu'ils sont transformés en nitrites (NO₂⁻) dans l'organisme. En somme, ce sont les nitrites qui sont dangereux pour l'homme, car ils sont à la base de deux types de maladies. Le métabolisme des nitrates chez l'homme se déroule comme l'illustre la **figure 13**. Lorsque l'on ingère de fortes quantités de nitrates, ceux-ci sont soit excrétés par l'organisme, soit transformés en nitrites (dans l'estomac ou dans la salive), soit absorbés. Les nitrites peuvent alors entraîner la formation de méthémoglobine ou de composés N-nitrosés (Ratel, 1992).

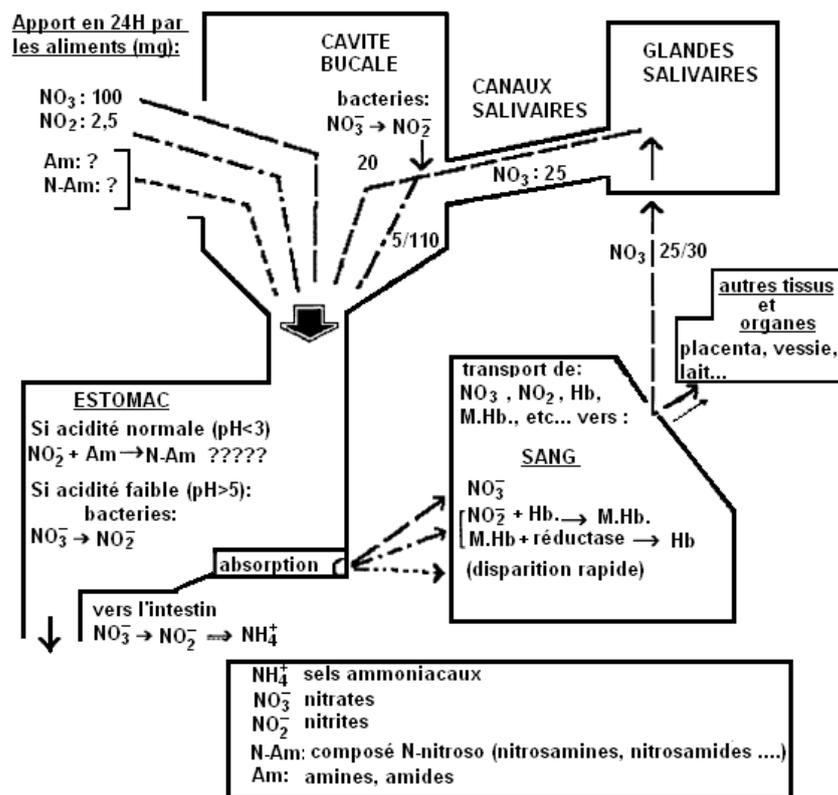


Figure 13 : Devenir des nitrates, nitrites et composés N-nitroso dans l'organisme (Source : Ratel, 1992).

- **Origine de la méthémoglobinémie**

Dans la littérature, il est prouvé que les nitrates une fois dans le corps, se transforment en ions nitreux, qui réagissent avec l'hémoglobine (Hb) pour former la méthémoglobine. La méthémoglobine se forme quand, les nitrites oxydent les ions ferreux de l'hémoglobine en ions ferriques (Fan et al, 1987). Les premiers signes apparaissent lorsque le taux de méthémoglobine (MetHb) atteint 10% ou plus. Le tableau IV donne les différents signes et symptômes en relation avec les concentrations en MetHb. Le premier cas d'enfant atteint de méthémoglobinémie lié aux nitrates dans l'eau de consommation a été signalé en 1945 aux Etats-Unis d'Amérique par Hunter Comly (Fewtrell, 2004).

Tableau IV : Signes et symptômes liés à la méthémoglobinémie (Fewtrell, 2004 : modifié)

MetHb concentration (%)	Signes cliniques
10-20	Cyanose des membres et du tronc
20-45	Dépression au niveau du système nerveux central (maux de tête, vertige, fatigue, léthargie), trouble de la respiration (dyspnée).
45-55	Coma, commotion, convulsions, etc...
>60	Risque élever de mortalité

Les nourrissons de moins de 4 mois sont principalement les plus prédisposés. Ce groupe d'âge est le plus sensible à cause de la combinaison de plusieurs facteurs (Ayebo et *al.*, 1997) qui sont :

- un pH gastrique élevé, favorisant l'invasion d'une flore bactérienne dans l'estomac capable de transformer les nitrates en nitrites ;
- une grande consommation d'eau relative à leur poids corporel ;
- une proportion élevée en hémoglobine fœtale qui se transforme plus rapidement en méthémoglobine que celle des adultes ;
- une déficience en enzyme transformant la méthémoglobine en hémoglobine.

Des travaux antérieurs ont également montré qu'aucun signe de méthémoglobinémie n'a été observé chez des sujets consommant de l'eau dont la concentration en nitrate était inférieure à 10 mg/L de NO₃-N (nitrate azoté). En général, les cas de méthémoglobinémie apparaissent quand les taux de nitrates dans l'eau de consommation dépassent 100 mg/L (Fewtrell, 2004).

La norme de potabilité de 50 mg/L dans l'eau de boisson a été établie afin de prévenir la méthémoglobinémie infantile (Fewtrell, 2004). C'est l'équivalent de 11,3 mg/L de NO₃-N.

3.3.2. Fer et Manganèse

La proportion du fer dans l'eau potable a été fixée à 0,3 mg/L, ceci pour des raisons de qualité esthétique ou organoleptique. Au plan sanitaire, le fer présente des effets bénéfiques et toxiques pour l'homme. L'excès de fer dans les eaux peut tacheter la lessive et attaquer les appareils de plomberie et donner un goût déplaisant aux boissons qui paraissent impropres à la consommation. De même, la précipitation du fer en excès donne à l'eau une couleur rouge brun désagréable. Cette situation a pour inconvénient le rejet de l'eau des forages au profit d'autres sources d'approvisionnement par le consommateur. En outre, la précipitation du fer peut également stimuler la croissance des ferrobactéries, qui sont des organismes qui tirent leur énergie de l'oxydation du Fe (II) en Fe (III). Ce phénomène aboutit au dépôt d'une pellicule biologique dans les conduites qui peut abaisser graduellement le débit comme on le constate sur les vieux ouvrages. Tout comme le fer, la présence de manganèse est gênante car elle peut donner à l'eau une couleur noirâtre, provoquer des dépôts d'hydroxyde, lui conférer un goût métallique désagréable et tacher le linge.

3.4. CLASSIFICATION DES EAUX SOUTERRAINES EN FONCTION DE LEUR MINÉRALISATION

Cette classification se fait en 5 classes selon le type d'utilisation préférentielle:

1. **eau très peu minéralisée (< 250 mg/L)** ne pouvant convenir à la distribution publique sans un apport de sels dissous. C'est une eau minérale naturelle. C'est l'exemple des eaux du Continental Terminal distribuées par la SODECI;
2. **eau peu minéralisée (250 à 500 mg/L)** pouvant servir à la distribution publique d'eau potable;
3. **eau normalement minéralisée (500 mg/L à 1000 mg/L)** correspondant aux normes des eaux potables;
4. **eau non conforme aux normes de potabilité (1000 à 1500 mg/L)**, mais pouvant être utilisée pour l'irrigation et pour abreuver les animaux ;
5. **eau trop salée (> 1500 mg/L)**, impropre en dehors d'un usage balnéaire.

Une minéralisation excessive donne un goût salé et peut avoir des effets laxatifs et donc important au plan médical.

CONCLUSION PARTIELLE

La minéralisation des eaux souterraines est sous le contrôle de trois phases : la phase gazeuse constituée par le gaz carbonique CO_2 , la phase liquide représentée par l'eau elle-même et la phase solide qui comprend la roche encaissante et les produits d'altération. La minéralisation des eaux souterraines est sous l'influence de certains facteurs qui jouent un rôle de catalyseur. Ainsi, la température augmente la solubilité et la cinétique des réactions. De même, une élévation de la pression partielle de CO_2 entraîne une augmentation de la dissolution. A ces facteurs, il faut ajouter le rôle joué par les paramètres hydrodynamiques dont la vitesse d'écoulement et la perméabilité de l'aquifère. Plus cette vitesse est lente, plus les échanges entre l'eau et la matrice seront importants. En dehors des anions, dont l'origine est diverse, les cations sont issus de la minéralisation des eaux souterraines sous l'action de l'hydratation du CO_2 qui hydrolyse les roches encaissantes. Cette minéralisation est naturelle car elle est liée à la nature géologique des aquifères. Par contre, la minéralisation des eaux due aux activités humaine est une pollution. Cette dernière peut avoir des effets négatifs sur la santé du consommateur.

D EUXIEME PARTIE :
MATERIEL ET METHODES

CHAPITRE 4 : DONNEES ET MATERIELS

L'évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans la région des lacs nécessite l'utilisation de nombreuses données diverses et un matériel conséquent. L'objet de ce chapitre est donc de présenter le matériel de collecte des données de même que celui utilisé pour les traiter.

4.1. DONNEES

4.1.1 Données hydroclimatiques

Toutes les données climatiques dont nous disposons sont fournies par la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire et Météorologique (SODEXAM). Le réseau des mesures pluviométriques comporte deux stations météorologiques principales sur l'ensemble de la zone d'étude (Yamoussoukro et Tiébissou), ce nombre est négligeable eu égard à la superficie environ 6000 km². Les deux chroniques de précipitations n'ont pas la même taille. Elles vont de 1951 à 2000 à la station de Tiébissou et de 1966 à 2000 pour celle de Yamoussoukro.

Une chronique de débit allant de 1970 à 1997 a été obtenue auprès de la sous-direction de l'hydrologie de la Direction de l'Hydraulique Humaine (DHH). Elle concerne la station du Kan à Dimbokro qui est la plus proche de la zone d'étude.

4.1.1.1. Elaboration d'une base de données des précipitations

Nous avons intégré dans la base de données les stations situées aux environs du cadre d'étude vu la superficie couverte par la zone d'étude et la présence d'un nombre restreint de stations. Ce choix se justifie par le fait que pour une bonne étude de la variabilité spatiale des précipitations de la région, il faut avoir un effectif de stations très représentatif. La zone d'étude étant localisée dans un espace géographique appelé « V baoulé », le choix s'est donc porté sur les données fournies par les postes pluviométriques qui y sont localisés. La ville de Yamoussoukro a été retenue comme station de référence de même que la période allant de 1966 à 2000. En effet, cette chronique présente des données régulières pour toutes les stations situées dans cet espace. L'inventaire des stations pluviométriques localisées dans le « V » Baoulé a permis de prendre en compte 13 postes de mesure pour la base de données initiale avant toute analyse critique. La liste de ces stations figure dans le tableau V.

Tableau V : Stations pluviométriques de la base donnée initiale.

<i>Stations</i>	<i>longitude</i>	<i>latitude</i>	<i>X (m)</i>	<i>Y (m)</i>	<i>Altitude (m)</i>	<i>Pm (1966-2000) (mm)</i>
Béoumi	-5,57	7,66	216462,89	847505,01	223	1107,92
Bocanda	-4,52	7,07	332118,46	781711,66	116	1077,04
Bongouanou	-4,20	6,65	367351,48	735172,03	220	1121,36
Bouafle	-5,75	6,98	196129,40	772375,64	187	1193,62
Bouake	-5,07	7,73	271689,33	854949,89	376	1084,83
Dabakala	-4,43	8,38	342546,96	926535,64	258	981,80
Dimbokro	-4,70	6,65	312067,71	735334,09	92	1135,54
Divo	-5,37	5,83	237556,66	644923,02	152	1330,17
Gagnoa	-5,95	6,13	173457,85	678430,24	205	1263,34
M'bahiakro	-4,33	7,45	353230,87	823663,97	181	1041,33
Tiébissou	-5,22	7,15	254815,26	790872,18	190	1081,62
Toumodi	-5,05	6,58	273329,05	727738,32	120	1140,29
Yamoussoukro	-5,35	6,90	240311,14	763285,87	196	1131,44

Pm : précipitation moyenne annuelle.

4.1.1.2. Analyse critique de la base de données initiale-création de la base de données finale

Les données pluviométriques peuvent présenter deux types d'erreurs fréquentes (Gérigne, 1998) :

- erreurs aléatoires (erreurs de mesures, erreurs de transcription de données) ;
- erreurs systématiques (changement d'appareil ou de station à partir d'une date donnée, obstacles).

Ces erreurs peuvent être à l'origine de la non-homogénéité des séries pluviométriques des différentes stations analysées. Ainsi, pour mettre en évidence d'éventuelles ruptures d'homogénéité dans les séries pluviométriques, Devred (1989) cité par Gérigne (1998) préconise l'emploi de la méthode des doubles cumuls sur les données pluviométriques annuelles. C'est à la suite de cette analyse critique qu'une base de données finale pourra être constituée. On n'observe aucune rupture sur les graphes de double cumul entre les données des différentes stations (Annxe I). Par ailleurs, tous les points sont alignés sur la droite d'ajustement et le coefficient de détermination au niveau des graphiques est très significatif ($R = 99\%$). Par conséquent, on admettra une homogénéité entre les valeurs annuelles des pluies enregistrées au niveau de la station de Yamoussoukro avec les autres stations dans le « V » baoulé. De plus, cette très bonne corrélation confirme que les pluies tombées à Tiébissou et Yamoussoukro pourraient être régies par un phénomène commun et de la même séquence pluviogène.

4.1.2. Données de forages

Les données utilisées proviennent de la campagne d'hydraulique villageoise réalisée dans la zone en 1998 dans le cadre du projet Caisse Française de Développement/Conseil de l'Entente phase 3 (CFD/CE3). Elles nous ont été fournies par la Direction Territoriale de l'Hydraulique (DTH) de Yamoussoukro qui a en charge la dite zone. Une exploitation de ces données a permis de constituer une base de données de 105 fiches techniques de forages. Ces fiches comportent parfois les coupes géologiques des forages sur lesquelles il est possible d'évaluer les épaisseurs des altérites, la profondeur du forage et la profondeur des arrivées d'eau (AE) de même que les débits respectifs.

Pour ce qui concerne les fiches des essais de pompage, il est important de souligner qu'il s'agit des essais de puits effectués sur des forages isolés. Les rabattements disponibles sont ceux de l'ouvrage de pompage faute de piézomètre d'observation. Le nombre de paliers réalisés au cours de ces essais est généralement de 3 et très rarement 4. Chaque palier de pompage est réalisé à débit constant durant 2 heures et une pseudo stabilisation suivie de 2 heures de remontée. L'objectif de ces essais de puits est donc la détermination de la transmissivité de l'aquifère, l'évaluation des pertes de charges, l'étude du comportement du puits et le calcul de l'efficacité du puits et son équipement.

4.1.3. Données cartographiques et images satellitaires

Plusieurs cartes ont été nécessaires pour mener à bien notre étude. Les cartes topographiques et géologiques au 1/200 000 des degrés carrés qui couvrent la région des Lacs obtenues auprès du Centre de Cartographie et de Télédétection (CCT) et les cartes géologiques établies par Géomines (1982a et 1982b). La zone d'étude s'étend sur deux scènes qui sont la scène 196/055 et 197/055. Pour réaliser la carte des linéaments, les images satellitaires de type Landsat TM de 1986 ont été acquises à partir d'un site Internet américain (<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>).

Pour réaliser les cartes de la dynamique d'occupation du sol, des images mosaïquées Landsat TM (1986) du 16/01/1986 et Landsat ETM⁺ (2002) du 20/01/2002 ont été utilisées. L'image de la scène 196/055 est inexploitable du fait des nuages. Pour cette raison, elle a été abandonnée dans l'étude de l'occupation du sol. Néanmoins, elles ont servi à cartographier les retenues d'eau artificielles et naturelles réparties sur la zone d'étude (Figure 14). Seules les scènes 197/055 de 1986 et 2002 respectivement composées de 7 bandes pour Landsat TM et de 6 bandes pour Landsat ETM⁺ ont été retenues. La résolution de ces images est de 28,5 m. Le prétraitement des images a été déjà fait (corrections radiométriques et géométriques).

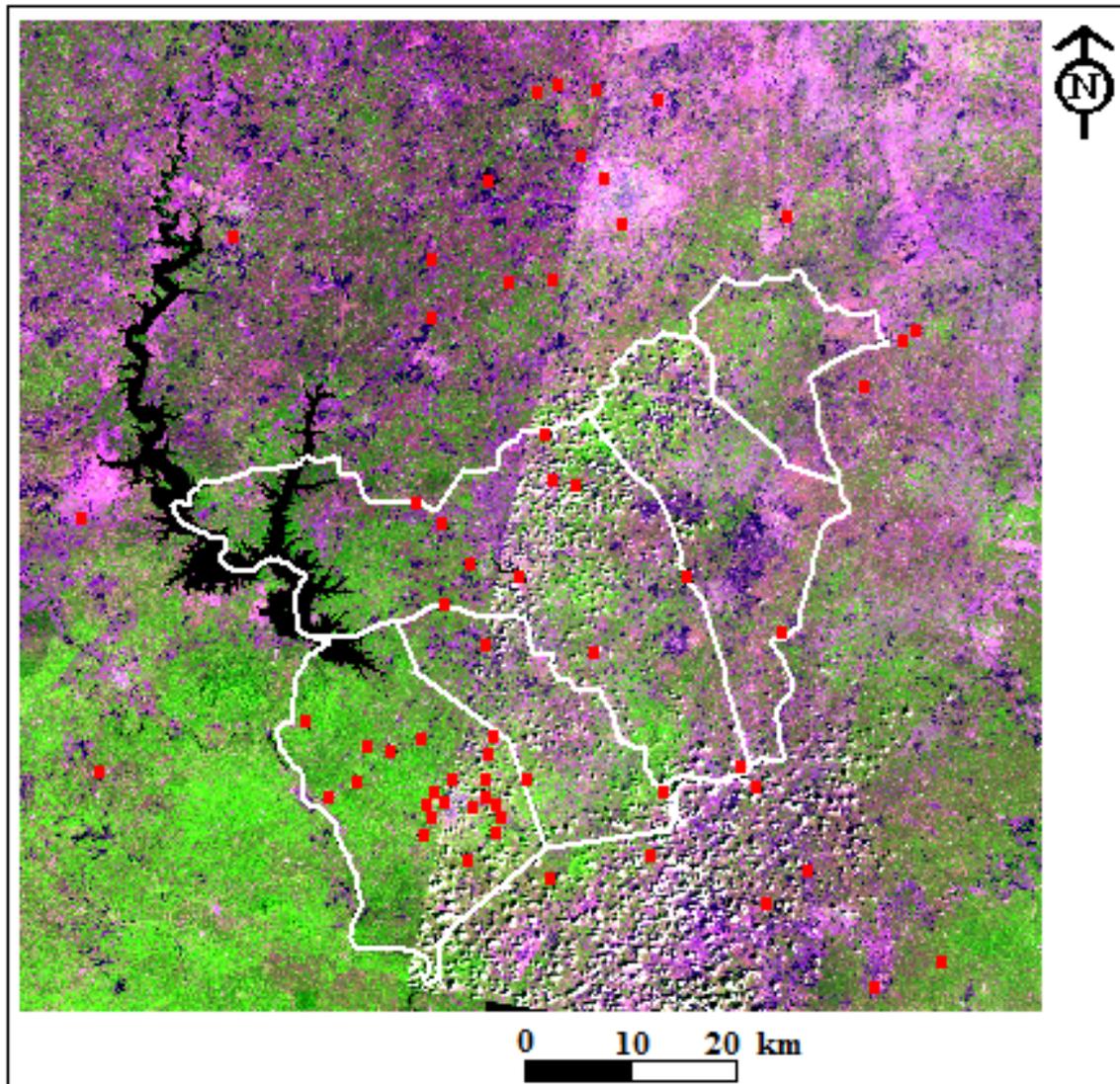


Figure 14 : Composition colorée des canaux 2,3 et 1 des scènes Landsat ETM+ du 20 janvier 2002 et localisation de quelques retenues dans la région des Lacs et environs.

4.1.4. Données physico-chimiques

Les données dont nous disposons pour cette étude nous ont été fournies par la Direction Territoriale de l'Hydraulique (DTH) de Yamoussoukro. Ce sont des analyses faites sur les eaux de nouveaux forages réalisés dans la zone d'étude dans le cadre du projet Caisse Française de Développement / Conseil de l'Entente phase 3 (CFD/CE3) en 1998 et 2000. Les échantillons ont été analysés par un laboratoire sis à Abengourou nommé LPA avec un DR 3000 HACH. Certains échantillons proviennent des laboratoires du LANEMA et de la SODECI.

Les éléments concernés sont : la température de l'eau (T°C), le pH, la conductivité électrique (CE), les éléments majeurs (bicarbonates (HCO_3^-), calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le potassium (K^+), le sodium (Na^+), les nitrates (NO_3^-), les sulfates (SO_4^-), le fer (Fe), le manganèse (Mn), les chlorures (Cl), les phosphates (PO_4), ...). La balance ionique calculée est satisfaisante dans l'ensemble toute chose qui permet d'utiliser ces données chimiques.

La mission géologique et hydrogéologique que nous avons réalisée dans la région du 26 octobre 2006 au 03 novembre 2006 a permis de faire des mesures *in situ* dans les ouvrages visités de la région (Planche 7). Les paramètres concernés sont le pH, la conductivité électrique (CE), le potentiel d'oxydoréduction (Eh) et la température.

4.2. MATERIEL DE TRAITEMENT

4.2.1. Matériel de terrain

Un conductimètre et un pHmètre de marque Hanna Instruments (HI 9033 Multi-range) ont servi à faire ces mesures. Deux GPS de type 12 Garmin, 12 channel et Gecko, ont servi à localiser les ouvrages visités. La carte d'échantillonnage est donnée par la figure 15. Au total 60 ouvrages ont été visités.

4.2.2. Matériel informatique

Le stockage, la gestion des données ainsi que leur manipulation font appel à plusieurs outils informatiques. L'outil informatique utilisé dans ce cas se compose d'un ordinateur Pentium IV. L'entrée des données cartographiques s'est faite grâce à l'utilisation d'un Scanner. Enfin, pour accéder aux résultats obtenus à la suite de diverses manipulations, nous avons eu recours à une imprimante. Le traitement des données et leur analyse ont été réalisés grâce aux différents logiciels de SIG suivants : **ArcView 3.2**, **Map Info 6.5**, **Surfer 8.0**. Le logiciel **Envi 4.1** a été utilisé pour le traitement des images satellitaires pour la cartographie des linéaments de même que la carte d'occupation du sol.

Le logiciel **LINWIN** a permis d'analyser la carte linéamentaire. L'analyse statistique a été faite avec les logiciels **Statistica 6.1** StatSoft France (2003), **Kronostat 1.01**, **Grapher**, et le tableur Excel de Microsoft 2003. La modélisation hydrochimique a été réalisée à l'aide du programme thermodynamique PCWATEQ (Plummer et *al.*, 1976) du logiciel libre **DIAGRAMMES version 2.0** (Simler, 2004) téléchargeable sur le site du laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Avignon (France) <http://www.lha.univ-avignon.fr>. Les constantes thermodynamiques utilisées sont celles compilées par Plummer et *al.*, 1976 in Soro, (2002).



Planche 6: Mesure des paramètres physico-chimiques *in situ* d'un puits de la ville de Yamoussoukro (Quartier Dioulakro).

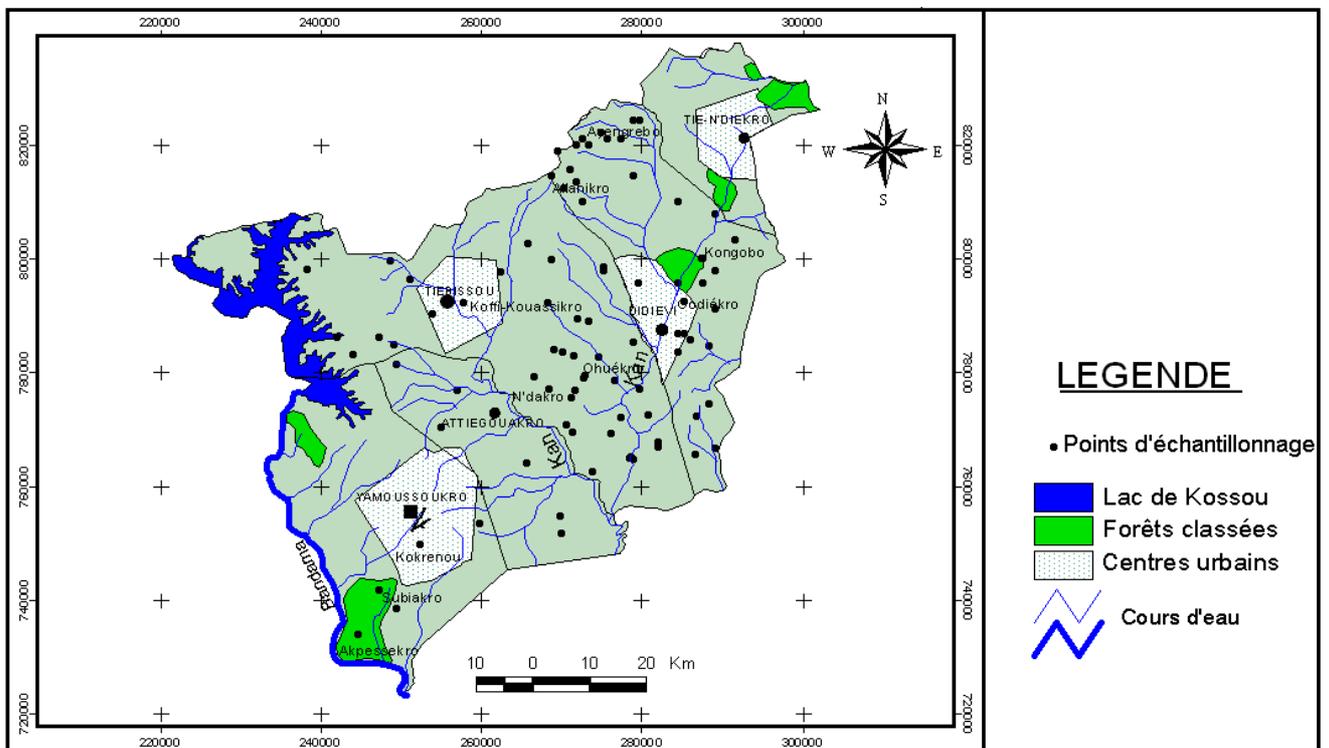


Figure 15: Carte des points d'échantillonnage des eaux souterraines.

CONCLUSION PARTIELLE

Les données pluviométriques appartiennent à la période 1951-2000 à la station de Tiébissou et à la période 1966-2000. L'extension de l'étude hydroclimatique au « V baoulé » a nécessité la prise en compte d'une dizaine de stations. Le test de double cumul a montré qu'il n'existe pas de rupture dans la période choisie par rapport à la station de référence. La base de données obtenue est donc homogène. La chronique des débits est celle du kan à Dimbokro appartenant à la période de 1970 à 1997.

La balance ionique satisfaisante des données chimiques collectées montre que les analyses effectuées sont plus ou moins acceptables. Elles peuvent donc être utilisées pour l'étude hydrochimique des eaux souterraines dans la région.

Les données hydrogéologiques relevées sur les fiches techniques des forages de même que le dépouillement des essais de pompage vont servir à cerner les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères de la zone.

L'analyse diachronique des images satellitaires des scènes 197/055 de Landsat TM de l'année 1986 et de Landsat ETM⁺ de l'année 2002 va permettre de comprendre la dynamique de l'occupation des sols.

Les outils de traitement utilisés pour l'exploitation des différentes données sont nombreux. De ce fait, un usage adéquat de ces données et outils requiert l'utilisation de méthodes claires et concises.

CHAPITRE 5 : METHODES

Dans ce chapitre, nous exposons les différentes méthodes utilisées pour atteindre les objectifs spécifiques de ce travail. La diversité des méthodes est due au fait qu'une telle étude nécessite beaucoup de données dont le traitement statistique diffère.

5.1. METHODOLOGIES D'ETUDE HYDROCLIMATOLOGIQUE

La connaissance de l'évolution pluviométrique est importante pour comprendre et mieux interpréter les mécanismes de fonctionnement des nappes. En effet, l'évolution du niveau des nappes dépend des précipitations qui contribuent à la recharge des aquifères mais également d'un certain nombre de paramètres qui régissent le ruissellement et l'évapotranspiration. L'objectif de ce chapitre est de présenter les méthodes classiques utilisées pour l'étude hydroclimatique. A ces différentes méthodes, nous avons ajouté d'autres méthodes qui ne sont pas statistiques, à savoir la cartographie des indices pluviométriques et le calcul des variations moyennes. Toutes ces méthodes ont été appliquées après un contrôle d'homogénéité appliqué sur l'ensemble des données pluviométriques.

5.1.1. Caractérisation de la variation spatio-temporelle des précipitations

5.1.1.1. Variables statistiques interannuelles des séries de pluies

La fluctuation autour de la pluie moyenne interannuelle est appréciée par les paramètres statistiques que sont l'intervalle de variation, l'écart à la moyenne, l'écart type et le coefficient de variation.

- **Ecart à la moyenne (E_i)**

L'écart à la moyenne correspond à l'excédent ou au déficit des précipitations de l'année considérée rapporté à la moyenne. Cet écart est calculé par l'équation (1) suivante:

$$E_i(\%) = (P_i - P_n / P_n) \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec:

E_i : écart à la moyenne

P_n : module pluviométrique moyen

P_i : total de l'année considérée.

- **Coefficient de variation (C.V.)**

C'est le rapport entre l'écart type et la moyenne. Il permet de dégager l'existence ou non de forte variation dans les données. Lorsqu'il est inférieur à 100, il traduit une faible dispersion des données. Par contre une valeur du Cv > 100 signifie qu'il existe une forte variation dans les

données. Dans ce cas, on peut penser à la présence d'une hétérogénéité. Son expression mathématique est donnée par l'équation 2 selon la formule suivante :

$$CV = \frac{\sigma}{X} \times 100 \quad (\text{Eq. 2}).$$

5.1.1.2. Etude du régime saisonnier

La répartition mensuelle des précipitations et ses fluctuations conditionnent, avec la température, l'écoulement saisonnier, le régime des cours d'eau, l'érodabilité des sols et le transport des matériaux en suspension. Cependant, si le phénomène de variabilité des précipitations mensuelles ou saisonnières se prête facilement à l'analyse, vu son caractère tranché dans les bassins, il est néanmoins, malaisé de définir des saisons pluviométriques spatialement homogènes et ce, en raison des différences de régimes de précipitations déterminés eux-mêmes par des variantes à la fois géographiques et météorologiques.

L'une des méthodes qui permet de bien préciser et confirmer la durée des saisons est le diagramme ombro-thermique de Baagnouls et Gaussen (1953) *in* El Morjani (2002). Ce diagramme a donc été utilisé pour caractériser les différentes saisons dans la zone d'étude. Il permet de fixer le début et la fin d'une période sèche à l'intersection de la courbe des valeurs mensuelles de la pluviométrie et de la température. Un mois est considéré comme sec lorsque la courbe de la température moyenne (T) est supérieure à la moitié de celle du total mensuel des précipitations (P) ($P = 2T$).

5.1.1.3. Etude des paramètres influençant la répartition spatiale de la pluviométrie

- **Tracé des isohyètes**

Les isohyètes ont été calculées sur la période de référence retenue pour la sélection des stations dans le V Baoulé (1966-2000). De même, une cartographie des isohyètes sur les périodes 1966 à 1975 ; 1976 à 1985 ; 1986 à 1995 et enfin 1996 à 2000 a été réalisée. L'analyse de ces isohyètes permettra de comprendre la dynamique spatiale de la pluie dans le « V » baoulé et dans la zone d'étude. Dans cette étude, les 13 stations de la base de données ont été prises en compte. De même, un graphe de régression entre la pluviométrie à ces stations et leur altitude permettra de comprendre le rôle joué par la topographique sur la répartition spatiale de la pluie.

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode qui permet d'expliquer la répartition spatiale des pluies dans une zone donnée. Elle a été utilisée ici dans le but de rechercher des descripteurs qui pourraient influencer la répartition spatiale des pluies.

5.1.2. Caractérisation de la variabilité hydroclimatique dans la région des Lacs

- **Définition de la variabilité**

La variabilité climatique décrit la fluctuation des valeurs saisonnières ou annuelles des paramètres climatiques par rapport aux moyennes temporelles de référence (Servat *et al.*, 1999). Les paramètres concernés sont généralement les précipitations, les températures, l'écoulement de surface, l'écoulement souterrain au niveau des nappes, etc. Il existe deux types de variabilités :

- la variabilité interannuelle ou temporelle ou saisonnière : elle se traduit par une oscillation de l'un des paramètres définis précédemment par rapport à la normale ;
- la variabilité spatiale, qui se traduit par une variation des valeurs saisonnières ou annuelles des paramètres climatiques d'un lieu à un autre, d'une zone subissant le même type climatique.

La combinaison de ces deux variabilités donne la variabilité spatio-temporelle. La variabilité climatique est un effet des conditions naturelles alors que les changements climatiques sont le fait des conditions naturelles et des activités humaines.

- **Approches statistiques et analyses des séries pluviométriques**

De nombreux auteurs ont situé le début de la sécheresse en Afrique de l'Ouest et Centrale autour de 1969-1970 (Hubert *et al.*, 1989 et 1998 ; Nicholson, 1993 ; Servat *et al.*, 1998 et 1999 ; Paturel *et al.*, 1996a, b, Paturel, *et al.*, 1997a, b ; Paturel *et al.*, 1998 ; Paturel *et al.*, 2002).

Malgré l'intérêt constant et soutenu pour ces régions, peu d'études ont été menées sur la période postérieure à 1990 (Ardoin *et al.*, 2003). A l'échelle nationale, plusieurs travaux ont fait état de cette sécheresse et de ses conséquences sur la disponibilité des ressources en eau et sur les activités humaines (Biemi, 1992 ; Savané, 1997 ; Kouamé, 1999 ; Brou *et al.*, 1998 ; Pene et Assa, 2003 ; Saley, 2003 ; Kouassi, 2007 ; Soro *et al.*, 2006. Soro *et al.*, 2007). Or selon Paturel *et al.* (1996a), la perturbation dans le régime des pluies et des écoulements peut avoir des conséquences non négligeables voire tragiques. Ainsi, la persistance ou non de la sécheresse est de première importance pour les pays et pour les habitants. En effet, l'impact de ces changements qualifiés *a priori* climatique pénalise très souvent les projets de développement liés surtout à l'agriculture et nuit au bon fonctionnement des aménagements hydrauliques réalisés antérieurement. On peut aussi ajouter les pénuries récurrentes en eau de consommation.

Dans cette partie de l'étude, l'objectif est de préciser la variabilité hydroclimatique sur notre zone d'étude et ses environs en mettant surtout l'accent sur la décennie 90.

Selon Ardoin et *al.* (2003), cette décennie est considérée comme une reprise de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest. La littérature consacrée à l'approche statistique des séries chronologiques de variables hydroclimatiques est particulièrement abondante. Très souvent, il s'agit de trouver par le biais de traitement statistique une tendance et de détecter des changements brusques des caractéristiques de loi de distribution des variables dans une série chronologique donnée. Certains tests de détection de rupture n'identifient qu'une seule rupture dans les séries chronologiques (Paturel et *al.*, 1996a,b et 1998 ; Lubès et *al.*, 1998). La variabilité hydroclimatique sera également analysée par le biais d'autres outils non statistiques, comme le calcul des déficits, le tracé et la cartographie des isohyètes et des indices pluviométriques.

5.1.2.1. Méthodes des indices pluviométriques

Ces méthodes permettent de découper les séries chronologiques de chaque station pluviométrique en années excédentaires ou déficitaires et d'en connaître les grandes tendances. Elles permettent en outre de mettre en évidence l'hypothèse d'une variabilité climatique sur le bassin d'étude. Nous avons utilisé pour notre étude deux méthodes que sont : l'indice pluviométrique de Nicholson et celui des moyennes mobiles pondérées appelé encore filtre passe bas de Hanning d'ordre 2.

○ Indice pluviométrique de Nicholson

C'est un indice qui permet de mesurer l'écart par rapport à une moyenne établie sur une longue période en se référant aux données des stations. L'indice pluviométrique annuel est défini comme une variable centrée réduite. Il est obtenu par calcul à l'aide de la formule de l'équation 3 selon Lamb (1982) :

$$Ip = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \quad (\text{Eq.3})$$

Avec

X_i : Pluviométrie de l'année i , \bar{X} : Pluviométrie moyenne interannuelle sur la période de référence, σ : Écart type de la pluviométrie interannuelle sur la période de référence ; Ip : Indice pluviométrique.

L'indice pluviométrique traduit ainsi un excédent ou un déficit pluviométrique pour l'année considérée par rapport à la période de référence. On retient, par décennie, une valeur moyenne

de l'indice pour chacun des postes pluviométriques considérés. La cartographie des courbes d'isovaleurs qui en résulte est une cartographie de l'intensité de déficit ou d'excès pluviométrique. En vue de suivre l'évolution spatiale des indices pluviométriques, nous avons cartographié les moyennes des indices sur les périodes 1966-1985, 1986-1995 et 1996-2000 dans le « V » Baoulé.

- **Filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 (« moyennes mobiles pondérées »)**

C'est une méthode qui permet d'éliminer les variations saisonnières dans une série chronologique donnée. Le calcul des totaux pluviométriques pondérés est effectué au moyen des équations (4 à 9) recommandées par Tyson et *al.* (1975) cité par Assani (1999) qui permettent d'estimer chaque terme de la série :

$$x(t) = 0,06x_{(t-2)} + 0,25x_{(t-1)} + 0,38x_{(t)} + 0,25x_{(t+1)} + 0,06x_{(t+2)} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$\text{Pour } 3 \leq t \leq (n-2)$$

Où $X_{(t)}$ est le total pluviométrique pondéré du terme t ; $X_{(t-2)}$ et $X_{(t-1)}$ sont les totaux pluviométriques principaux observés des deux termes qui précèdent immédiatement le terme t . $X_{(t+2)}$ et $X_{(t+1)}$ sont les totaux pluviométriques observés des deux termes qui suivent immédiatement le terme t .

Les totaux pluviométriques pondérés des deux premiers [$X_{(1)}$, $X_{(2)}$] et des deux derniers [$X_{(n-1)}$, $X_{(n)}$] termes de la série sont calculés au moyen des expressions suivantes (n étant la taille de la série) :

$$X_{(1)} = 0,54X_{(1)} + 0,46X_{(2)} \quad (\text{Eq.5})$$

$$X_{(2)} = 0,25X_{(1)} + 0,5X_{(2)} + 0,25X_{(3)} \quad (\text{Eq.6})$$

$$X_{(n-1)} = 0,25X_{(n-2)} + 0,5X_{(n-1)} + 0,25X_{(n)} \quad (\text{Eq.7})$$

$$X_{(n)} = 0,54X_{(n)} + 0,46X_{(n-1)} \quad (\text{Eq.8})$$

Pour mieux visualiser les périodes de déficit et d'excédent pluviométrique les moyennes mobiles ont été centrées et réduites au moyen de la formule (9) suivante :

$$Y'_t = \frac{(X(t) - m)}{\sigma} \quad (\text{Eq. 9})$$

Où m est la moyenne de la série des moyennes pondérées et σ est l'écart type de la série des moyennes mobiles pondérées. Cette méthode paraît plus efficace car, elle permet de découper de façon perceptible les séries.

5.1.2.2. Test statistique de détection de rupture

Nous nous sommes intéressés à la détection d'un changement brusque de la moyenne annuelle. Une rupture doit être comprise comme un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu (Lubès-Niel et *al.*, 1994).

Plusieurs méthodes statistiques de détection de rupture existent : test de Pettitt (1979) cité par Servat *et al.* (1998) et celui de la segmentation (Hubert et *al.* 1989), procédure bayésienne et la statistique U de Buishand. L'approche retenue dans cette étude est celle de Pettitt (1979) pour sa puissance et robustesse.

○ Test de Pettitt (1979)

Ce test réputé pour sa robustesse, est non-paramétrique et dérive de la formulation du test de Mann-Whitney. L'absence d'une rupture dans la série (X) constitue l'hypothèse nulle H_0 . Pettitt définit la variable $U_{t,N}$ par la formule (10) suivante :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (\text{Eq.10})$$

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

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

A partir de la théorie des rangs, Pettitt montre que si k désigne la valeur de K_N prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur k est donnée approximativement par: $\text{Prob}(K_N > k) \approx 2 \exp(-6 k^2 / (N^3 + N^2))$

Pour un risque α de première espèce donnée, si la probabilité de dépassement estimée est inférieure à α , l'hypothèse nulle est rejetée. Dans ce cas, la série comporte une rupture dont la date est donnée par l'instant t définissant le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$.

○ Calcul de variations moyennes

Pour les variables hydroclimatiques dont la série chronologique présente une rupture, Ardoin (2004) propose de calculer les variations moyennes de part et d'autre de la rupture, en appliquant la formule (11) suivante :

$$D = \frac{\overline{X_j}}{\overline{X_i}} - 1 \quad (\text{Eq.11})$$

Où D est le déficit hydroclimatique ; $\overline{X_j}$ la moyenne sur la période après rupture et $\overline{X_i}$ la moyenne sur la période avant rupture.

5.1.3. Caractérisation du bilan hydrologique

Dans les pays en voie de développement en général et en Côte d'Ivoire en particulier et plus spécifiquement pour la région des lacs dont l'économie repose très largement sur le secteur agricole, l'estimation des ressources en eau disponible s'avère être un problème très capital. En effet, l'estimation et la gestion des ressources en eau à long terme sont indispensables tant pour l'amélioration de la sécurité alimentaire que pour assurer le bon fonctionnement des aménagements réalisés et leur pérennité.

Pour une région qui regroupe près de 80% des aménagements hydro agricoles, les enjeux liés à la persistance ou non de la sécheresse deviennent très primordiaux pour les habitants. Et c'est pour apporter un élément de réponse à cette problématique que nous avons fait une évaluation du bilan hydrologique. L'évaluation du bilan hydrologique d'un bassin donné donne une réponse satisfaisante à cette préoccupation majeure. La quantification du bilan hydrologique requiert la connaissance de l'évapotranspiration qui est le facteur clé dans les échanges d'eau entre la plante et l'atmosphère.

Pour le calcul de l'évapotranspiration, nous pouvons utiliser l'une des méthodes suivantes :

- la méthode de Thornthwaite ;
- la méthode de Penman ;
- la méthode de Turc.

▪ Méthode de Thornthwaite (1948)

L'analyse de l'alimentation verticale d'une nappe par la pluie efficace ou infiltration efficace repose sur les hypothèses de Turc et de Thornthwaite. Les données nécessaires sont représentées par les précipitations brutes, les températures, les humidités relatives de l'atmosphère, les durées d'insolation et les états de remplissage du réservoir considéré. La méthode de Thornthwaite basée sur les données fournies et utilisées dans plusieurs études notamment en Côte d'Ivoire (Biémi, 1992 ; Lasm, 2000 ; Soro, 2002 ; Saley, 2003) fournit de bons résultats. Selon Saley (2003), elle est efficace par rapport à celle de Turc puisqu'elle

permet de donner un intervalle de grandeurs des différents paramètres intervenant dans l'estimation des réserves du sol et avec peu de moyens. De même, cette formule est particulièrement intéressante car le terme de température est normalisé par un terme moyen de température. Cette normalisation de la température permet de différencier l'impact des fortes températures en milieu chaud et en milieu froid (Oudin, 2004).

A la lumière de tout ce qui précède, nous avons utilisé dans le cadre de cette étude la méthode de Thornthwaite. Le bilan est calculé à partir des valeurs moyennes : température moyenne mensuelle (moyenne des températures maximales et minimales de chaque jour du mois aux stations de Yamoussoukro et de Tiébissou), lame mensuelle précipitée, évapotranspiration potentielle mensuelle. L'ETP selon Thornthwaite est calculée à partir de la formule (12) donnée comme suit :

$$ETP (mm/mois) = 1,6 \times \left(\frac{10T}{I} \right)^\alpha \times F(\lambda) \quad (\text{Eq.12})$$

Avec :

T : température moyenne du mois considéré (en °C) ;

α : fonction complexe de l'indice I ;

$$\alpha = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,49239 ;$$

I : Indice thermique annuel (somme des douze indices thermiques mensuels (i) calculés par la formule) :

$$I = \sum_1^{12} i_i \quad \text{Avec } i = (T/5)^{1,514}$$

i_i et **T_i** : indice et température moyenne mensuels.

F (λ) : facteur correctif, fonction de la latitude du lieu considéré et du mois. Il est lu sur les tables de Brochet et Gerbier.

▪ Calcul de l'infiltration

Le bilan hydrologique d'un bassin versant permet d'évaluer les apports et sorties d'eau, sur une période de temps déterminée, qui correspond à une année hydrologique complète. Il sert à vérifier la cohérence de l'ensemble des données recueillies et calculées : mesure de précipitation, calcul d'évapotranspiration, mesure de l'écoulement moyen. Le calcul du bilan est nécessaire pour la connaissance du milieu géographique, pour mieux définir les besoins globaux et chiffrés du milieu et essentiellement pour l'évaluation du volume des ressources en eau souterraine (infiltration) et de surface (ruissellement). Le bilan hydrologique d'un bassin peut se traduire par l'équation (13) suivante :

$$P = ETR + R + I + \Delta W \quad (\text{Eq. 13})$$

Avec **P**: Précipitation moyenne annuelle en mm ; **ETR**: Evapotranspiration réelle moyenne en mm ; **R**: ruissellement moyen annuel en mm ; **I**: infiltration moyenne annuelle en mm ; **ΔW**: Variation des réserves du sol. Pour une longue période d'observation, ce terme est nul.

L'infiltration est le paramètre qui de loin intéresse l'hydrogéologue dans l'évaluation du bilan hydrologique d'une région donnée. En effet, c'est l'infiltration qui alimente les nappes d'eau souterraine. De ce fait, son estimation permet d'avoir une idée sur la recharge des aquifères de la région. Elle est déduite de l'équation (13) du bilan hydrologique et donnée par la formule (14) suivante:

$$I = P - (ETR + R) \quad (\text{Eq. 14})$$

Le coefficient de ruissellement retenu dans cette étude est de 4,3 %. Il correspond à la valeur moyenne pour des bassins ayant une superficie allant de 80 à 55 000 km² (Leblond, 1984).

5.1.4. Caractérisation hydrologique du bassin versant du Kan

5.1.4.1. Calcul de la lame d'eau écoulée (EMA)

Le module interannuel est de 12,78 m³/s et le débit spécifique est de 2,56 10⁻³ m³/s/km² sur la période d'observation. La lame d'eau écoulée (EMA) pour le Kan à Dimbokro a été calculée à partir de la formule de l'équation (15)

$$E = \frac{Q \times 31,6 \cdot 10^6}{S(Km^2)} \quad (\text{Eq.15})$$

avec Q débit moyen du cours d'eau et S la superficie du bassin versant en km². Pour une superficie(S) du bassin de 5000 km². Le coefficient de ruissellement est obtenu par la formule de l'équation 16

$$R(\%) = \frac{E}{P} \times 100 \quad (\text{Eq. 16})$$

Où E est la lame d'eau écoulée et P, la pluviométrie moyenne tombée sur le bassin.

5.1.4.2. Calcul du coefficient de tarissement : loi de Maillet

Le calcul de ce coefficient par dichotomie tel que proposé par Savané *et al.* (2003) a été utilisé. L'expression mathématique du tarissement s'écrit selon l'équation 17 :

$$Q_t = Q_0 e^{-kt} \quad (\text{Eq. 17})$$

avec Q_t , le débit à l'instant t donné ; Q_0 le débit initial (débit au début du tarissement) et k le coefficient de tarissement de Maillet.

On obtient par calcul le débit Q_t en m^3/s à l'instant t , en fonction du débit Q_0 au début du tarissement. Dans la résolution dichotomique, la courbe annuelle de tarissement est l'expression de la vidange du réservoir souterrain.

De ce fait, la quantité d'eau récupérée à la station de jaugeage correspond exclusivement aux volumes dynamiques (V) mobilisés par l'ensemble des aquifères du bassin.

Dans ce cas, le coefficient de tarissement (k) s'obtient à l'aide de la formule suivante (équation 18):

$$\frac{e^{-kt}}{k} + \frac{V}{Q_0} - \frac{1}{k} = 0 \quad (\text{Eq. 18})$$

5.1.4.3. Construction de la courbe de tarissement

Cette courbe est tracée à partir des débits journaliers sur toute l'année à la station du Kan. La représentation se fait en allant du débit journalier le plus élevé de l'année (Q_0) et on reporte en abscisse les débits mesurés avec un pas de 10 jours, jusqu'à ce qu'ils remontent de façon significative. Le choix du pas de temps de 10 jours est guidé par l'obtention de bons résultats dans certaines études réalisées en Côte d'Ivoire (Savané et *al.*, 2001 ; Savané et *al.*, 2003 ; Saley, 2003, Kouassi, 2007 ; Ahoussi, 2008). Les courbes de tarissement vont correspondre aux périodes pendant lesquelles le débit décroît de façon plus ou moins régulière (régime non influencé), c'est-à-dire en absence de toute précipitation.

5.1.4.4. Evaluation du volume mobilisé par les aquifères

En intégrant l'équation 19 de 0 à $+\infty$, on obtient le volume mobilisé par l'ensemble des aquifères du bassin versant soit :

$$V_{\text{mobilisé}} = \int_0^{+\infty} Q_0 e^{-kt} dt = \frac{Q_0}{k} \quad (\text{Eq. 19})$$

Où Q_0 est exprimé en m^3/s et k en jours^{-1} . Q_0 est multiplié par 86 400 pour la compatibilité des unités.

5.2. METHODOLOGIE D'ETUDE DE LA DYNAMIQUE D'OCCUPATION DU SOL

L'exploitation de ces données satellitaires va donc permettre de mettre en évidence, comprendre et analyser la dynamique de l'occupation du sol en général et en particulier le couvert végétal dans la région des Lacs. En effet, l'occupation du sol se définit comme étant la distribution (qualitative et quantitative) et l'organisation spatiale des formations naturelles ou humaines sur une surface donnée (Kangah, 2006 cité par Kouassi, 2007).

L'occupation des terres est une variable fondamentale pour la planification régionale ainsi que pour l'étude et la compréhension de l'environnement (Foody, 2002 cité par Ouattara et *al.*, 2006). L'importance des types d'occupation des sols sur les réponses des bassins versants en termes d'écoulement a été avérée (Dezetter et Servat, 1995 cités par Cecchi et *al.*, 2009). Cette influence est particulièrement exacerbée dans le cas de bassins-versants de petite taille et fortement anthropisés (cultures, parcours, etc.). De plus, l'occupation des sols a des effets sur le cycle biogéochimique et le réchauffement planétaire, sur l'érosion des terres et le développement durable, ainsi que sur la biodiversité (Ouattara et *al.*, 2006). Paradoxalement, tandis que les séries pluviométriques se caractérisent par une diminution nette des apports, on observe par endroits et simultanément une augmentation des coefficients de ruissellement des bassins-versants (Mahé et *al.*, 2005). Le comportement hydrologique des bassins soudanosahéliens paraît de fait en pleine mutation : l'effet direct d'un changement climatique, l'évolution des couverts végétaux, des états de surface et d'occupation des sols sur les bassins versants ou encore la perturbation des réseaux hydrographiques par la multiplication d'ouvrages de prise et de stockage sont autant d'éléments susceptibles d'interagir (Cecchi et *al.*, 2009). En effet, selon Kouassi (2007), l'occupation du sol influence les quantités d'eau disponibles pour l'écoulement de surface et l'infiltration selon la nature des végétaux (forêts, savanes, mosaïques). Ainsi, dans les régions savaniques du Nord du bassin, le ruissellement sera prépondérant sur l'infiltration, Alors que dans les régions forestières du Sud, l'infiltration prendra de la prépondérance sur le ruissellement. L'importance de chaque phénomène (ruissellement et infiltration) est liée aux conditions climatiques subies par le bassin.

Cette importance de l'occupation des sols en fait une thématique incontournable dans la plupart des inventaires cartographiques et de suivi des phénomènes environnementaux, Cette thématique peut être obtenue par le biais de plusieurs techniques et méthodes, dont la télédétection, Cependant, obtenir une bonne cartographie de l'occupation des terres par télédétection demeure un problème délicat (Ouattara et *al.*, 2006). C'est fort de tout ceci que l'étude de l'occupation des sols dans la région des lacs a été réalisée. Elle a pour but de cerner

la dynamique d'occupation du sol au niveau de cette région qui se trouve à cheval entre la savane et la forêt et son influence sur l'évolution des indices de rétention dans cette zone pourvue en un nombre important de retenues d'eau. Les images satellites de 1986 et de 2002 ont été utilisées pour faire une classification thématique de la dynamique de l'occupation du sol dans la région des Lacs. Deux scènes Landsat TM et Landsat ETM⁺ (résolution 28,5 m), centrées sur la ville de Yamoussoukro et acquises à seize ans d'intervalle (16 janvier 1986 pour la première et 20 janvier 2002 pour la deuxième), ont été utilisées. Plusieurs analyses en composantes principales ont été réalisées dans le but d'associer les canaux véhiculant le maximum d'informations : la composition colorée issue de l'association des canaux 4-3-7 a finalement été retenue pour l'image Landsat TM (1986). En ce qui concerne l'image ETM⁺ (2002), c'est la composition colorée issue des canaux 3-2-1 qui a donné le meilleur résultat.

- **Délimitation de la zone test**

Une zone test comprise entre les longitudes 5°13'37,98"W et 5°43'9,91"W et les latitudes 6°32'8,71"N et 7°20'57,51"N a été retenue. C'est sur cette zone test que la classification a été réalisée. A l'issue de l'interprétation des compositions colorées, six (6) classes ont été retenues :

- eau, sols nus et dégradés, forêt, savane arborée, cultures, cultures irriguées.

- **Méthode de classification**

La classification non supervisée et la classification supervisée sont les deux principales méthodes de classification existant dans la littérature (Kouassi, 2007). La classification non supervisée est une classification automatique qui permet de regrouper des ensembles de pixels similaires du point de vue radiométrique en classes à partir d'une composition colorée. Quant à la classification supervisée ou classification dirigée, elle consiste à affecter des pixels aux échantillons les plus proches, selon une distance dite bayésienne qui se fonde sur la probabilité que dispose un pixel à appartenir à une classe donnée (*in* Kouassi, 2007). Dans ce travail, la classification supervisée a été utilisée avec l'aide des données cartographiques (occupation du sol, topographiques, etc. à l'échelle 1/200 000). Cette technique fournit en général de bons résultats dans la production des documents cartographiques. Selon Kouassi, (2007), la classification supervisée est la technique plus répandue et la plus utilisée dans la cartographie de l'occupation du sol par télédétection satellitaire. Des parcelles d'entraînement ont été choisies sur les images issues des compositions colorées pour chaque classe. Les parcelles d'entraînement sont des échantillons représentatifs des types d'occupation des sols identifiés

sur une image. Elles contiennent des informations spécifiques qui sont fournies à l'entrée de la classification et constituent ainsi les éléments de base d'une classification supervisée.

Une dizaine d'échantillons (parcelles d'entraînement) a été sélectionnée au niveau de chaque thème ou classe à cartographier. Après le choix des parcelles d'entraînement, nous avons retenu la méthode de la classification supervisée que nous avons expliquée précédemment. Dans cette classification, on définit au préalable le nombre et la nature des classes. Plusieurs algorithmes existent au sein de la classification supervisée (classification par distance minimum, classification hypercube, classification par le maximum de vraisemblance, etc.). Tous ces algorithmes ont pour fonction de reproduire au mieux la réalité de terrain perçue à travers les images satellitaires (Kouassi, 2007). Dans cette kyrielle d'algorithmes, nous avons opté dans le cadre de cette étude pour la classification par le « maximum de vraisemblance ». Ce dernier est très utilisé dans les classifications supervisées et est considéré comme le plus performant des algorithmes dans la production des cartes thématiques dans le domaine de l'occupation du sol (Kouassi, 2007).

5.2.1. Estimation de la précision de l'interprétation des images

La précision de la classification de l'occupation du sol réalisée à partir des données de 1986 et 2002 a été mesurée à l'aide d'outils statistiques que sont la matrice de confusion et l'indice Kappa.

La matrice de confusion révèle non seulement les erreurs générales commises au niveau de chaque classe lors de l'interprétation mais aussi les erreurs dues aux confusions entre les classes de l'occupation du sol. La diagonale de la matrice de confusion représente les pourcentages des pixels bien classés. Les valeurs de pourcentage hors de la diagonale sont des pixels mal classés. En effet, un pixel bien classé peut se définir comme un pixel affecté à une classe « i » par la classification et qui appartient effectivement à cette classe « i » sur le terrain. Un pixel mal classé est un pixel affecté à une classe « i » par la classification mais qui en réalité appartient à un autre thème sur le terrain. La précision cartographique est l'expression de la validité du traitement ou le pourcentage de pixels bien classés pour un thème défini. Plus cette valeur se rapproche de 100%, plus le traitement est valide. La précision globale de la classification traduit le rapport entre le nombre total de pixels bien classés et le nombre total de pixels dans une image. Selon N'da (2007), ce rapport statistique réalisé sur la base des parcelles de contrôles (parcelles n'ayant pas servi d'entraînement) permet d'évaluer la capacité des images satellitaires à discriminer les différentes classes de végétation retenues.

L'indice de Kappa a été utilisé pour apprécier la précision de la classification adoptée. D'après Pontius (2000), l'indice de Kappa (k) est utilisé pour valider et estimer la précision dans le schéma de la classification de la végétation. Sa formule est donnée par l'équation 20 suivante :

$$\frac{P_0 - P_c}{P_p - P_c} \quad (\text{Eq. 20})$$

Dans cette équation, P_0 est égal au pourcentage réel obtenu de la classification des éléments de l'occupation du sol ; il est égal au quotient de la somme des chiffres de la diagonale de la matrice avec le total du nombre d'observations. P_c est l'estimation de la probabilité d'obtenir une classification correcte ; pour calculer P_c , on procède de la façon suivante : on réalise les produits marginaux des valeurs des colonnes et des rangées au niveau de chaque cellule de la matrice, puis la somme des valeurs de la diagonale est divisée par le total des produits de chaque cellule de la matrice ; pour une classification correcte, la valeur de P_c est en général inférieure à P_0 . P_p est le pourcentage obtenu lorsque la classification est parfaite c'est-à-dire bonne à 100%. De ce qui précède, l'équation 20 peut s'écrire selon la formule de l'équation 21 suivante :

$$K = \frac{P_0 - P_c}{1 - P_c} \quad (\text{Eq.21})$$

Selon Pontius (2000), dans une étude de l'occupation du sol, lorsque l'indice de Kappa évalué dans les opérations de classification est compris entre 50 et 75%, la classification adoptée est valable et les résultats peuvent être judicieusement utilisés.

5.2.2. Evaluation de la dynamique de l'occupation du sol

En raison de la couverture nuageuse qui ne permet pas une étude étendue sur toute la zone d'étude, un découpage a donc été effectué. C'est au niveau de cette nouvelle carte que les études diachroniques ont été réalisées. Un des objectifs visés par la réalisation de l'étude diachronique de l'occupation du sol est de dégager les grands changements intervenus dans le temps et dans l'espace. Les données obtenues de l'interprétation de chaque image Landsat TM (1986) et Landsat ETM⁺ (2002) ont été analysées et comparées. Ainsi, pour chaque unité d'occupation du sol ou classe, le taux dévolution annuel est calculé selon la formule de l'équation 22 ci-après (Mama et Oloukoi, 2003) :

$$T_{\text{annuel}} = \frac{V_{i2002} - V_{i1986}}{100 \times P} \quad (\text{Eq. 22})$$

où V_{i2002} représente la valeur de la statistique de la strate i en 2002 ; V_{i1986} est la valeur des statistiques de la strate i en 1986 et P est la durée de la période d'observation entre 2002 et 1986 qui est de 16 ans. Cette formule permet de faire une analyse diachronique de la dynamique d'occupation des sols sur la zone étudiée.

5.2.3. Notion d'indice de la capacité de rétention des classes d'occupation du sol

Afin d'évaluer l'impact de la dynamique de l'occupation du sol sur les écoulements, un indice représentant la capacité de rétention en eau au niveau de chaque classe d'occupation du sol pour l'année considérée a été calculé. Si l'on appelle p_i le pourcentage en superficie de la zone d'étude occupée par la classe d'occupation du sol i et a_i un coefficient de pondération représentant la capacité de rétention en eau effective de la classe i , alors, Cr est obtenu selon Cecchi et *al.*, (2009) par la formule de l'équation 23 suivante :

$$Cr = \sum_i P_i \times a_i \quad (\text{Eq. 23})$$

Les a_i ont été définis pour chaque classe entre 0 et 2 (rétentions nulle et maximale, respectivement ; tableau VI) (Cecchi et *al.*, 2009). Partant de cette définition, le coefficient Cr , compris entre 0 et 200, est utilisable sur des bassins de taille suffisante pour discriminer avec efficacité les différentes classes d'occupation des sols par télédétection (c'est-à-dire $> 25 \text{ km}^2$). Dans ce cas, les valeurs fortes (> 100) correspondraient alors à des bassins encore sauvages dotés d'une importante couverture végétale, d'une forte capacité de rétention et donc peu propices à l'intensification des écoulements, tandis que les valeurs faibles correspondraient à des bassins anthropisés, voire dégradés, dotés d'une faible capacité de rétention et donc, à l'inverse des précédents, propices à d'importants écoulements.

Tableau VI: Coefficients de capacité de rétention pour chacune des classes d'occupation des sols. (Cecchi et *al.*, 2009).

<i>Classe d'occupation du sol</i>	<i>ai</i>
Habitat	0
Sols nus ou dégradés	0
Cultures	1
Savanes faiblement cultivées	1
Savanes arbustives	1
Savanes arborées	2
Cultures irriguées	2
Forêts	2

5.3. METHODOLOGIE D'ETUDE DES PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES ET DES PARAMETRES DE PRODUCTIVITE DES AQUIFERES DE FISSURES

5.3.1. Introduction

La détermination des paramètres hydrauliques se fait au moyen des essais de pompage réalisés sur les ouvrages. Un pompage d'essai a deux buts principaux (CEFIGRE, 1990 ; Kruseman et De Rider, 1974 ; 1991 ; Detay, 1993). Dans un premier temps, il permet de déterminer la géométrie et les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère sollicité. Dans ce cas, on utilise les pompages de longue durée appelés encore « essais de nappe ». Cependant, un pompage d'essai peut aussi avoir pour but d'évaluer les caractéristiques du puits. Ici, c'est la courbe caractéristique du puits $s = f(Q)$ et le débit caractéristique Q_c qui permettent de mesurer la productivité du puits avec le calcul du débit spécifique, d'estimer le coût du pompage et le type de pompe à utiliser. L'essai de pompage est donc fait par palier de courtes durées sans piézomètre et l'essai est baptisé « essai de puits » parce que l'on teste davantage le puits que la nappe. En Afrique de l'Ouest en général et en Côte d'Ivoire en particulier, ce sont les essais de puits qui sont faits sur les forages destinés à l'hydraulique villageoise ceci en raison des coûts élevés des pompages et des crédits limités. A l'heure actuelle, on assiste de plus en plus à des essais de pompage de durée relativement longue (≤ 24 heures) sur des forages destinés aux programmes d'hydraulique villageoise améliorée où les débits recherchés dépassent souvent les $10 \text{ m}^3/\text{h}$.

5.3.2. Essais de pompage de courte durée ou essais de puits

L'interprétation des données d'essais de pompages (remontées ou descentes) pour la détermination des paramètres hydrauliques des aquifères repose sur les expressions hydrodynamiques en régime transitoire de Theis (1935) et de Jacob (1947). En général, ces méthodes s'appliquent pour les pompages de longue durée, mais plusieurs auteurs ont montré dans leurs travaux qu'à partir des essais de courtes durées, à condition d'atteindre un palier au cours de chaque cycle, qu'on pouvait calculer ces paramètres (Lasm, 2000). Ces essais de courtes durées permettent surtout de calculer la transmissivité. L'absence de piézomètres ne permet de déterminer le coefficient d'emménagement (CEFIGRE, 1990, Detay, 1993). Ainsi, plusieurs auteurs en Afrique de l'Ouest ont utilisé ces essais de puits pour estimer les paramètres hydrauliques des aquifères notamment la transmissivité (Engalenc, 1978 ;

N'guessan, 1985 ; Traoré, 1985 ; Faillat, 1986 ; Soro, 1987, 2002 ; Yaméogo, 1988 ; Biémi, 1992 ; Savané, 1997 ; Lasm, 2000 ; Jourda, 2005 ; Youan Ta, 2008 ; Ahoussi, 2008).

5.3.3. Présentation de la méthode d'interprétation choisie et conditions d'applications

L'évaluation des paramètres hydrauliques d'un aquifère se fait avec les seules observations faites sur le forage faute de piézomètre d'observation. Ainsi le calcul de la transmissivité ne se fait qu'avec ces seules données de rabattements disponibles sur l'ouvrage aussi bien pendant la descente lors du pompage ou après l'arrêt du pompage à la remontée. Dans le premier cas, le manque d'un piézomètre d'observation peut biaiser les mesures et le fait que c'est le forage qui sert d'observation peut entraîner des erreurs dans l'estimation de la transmissivité. En effet, lors de la descente, le niveau dans le forage est perturbé par les pertes de charges quadratiques qui apparaissent à la traversée des fentes de la crépine du puits et même dans les premiers décimètres de terrains entourant le puits (Detay, 1993 ; De Marsily, 1994). Dans ce cas, le niveau dynamique dans le puits représente mal la charge dans la nappe au voisinage du puits biaisant ainsi les valeurs de transmissivité. Par contre, pendant la remontée, tous ces phénomènes sont annulés, et l'on observe véritablement le niveau de la nappe dans le puits, ce qui permet une bonne interprétation. L'intérêt des courbes de remontée est très grand pour les essais de débits où l'on ne dispose pas de piézomètres, le seul point d'observation de la nappe étant le forage lui-même comme c'est le cas pour cette étude. Selon Detay (1993), l'analyse des courbes de remontée donne des résultats aussi sûrs, sinon meilleurs que ceux tirés de l'observation de la descente. Il existe deux méthodes d'interprétation d'une courbe de remontée :

- la méthode Houpert-Pouchan *in* De Marsily (1994) : ici on suppose que le pompage a duré assez longtemps pour que l'on puisse au moins au début de la remontée penser qu'un régime permanent avait été atteint avant l'arrêt. On interprète donc la courbe de remontée comme une courbe de descente, par la méthode de Jacob ou celle de Theis ;

- la méthode en $\log\left(1 + \frac{t_p}{t}\right)$: on trace s en fonction de $\log\left(1 + \frac{t_p}{t}\right)$ (t_p =durée du pompage,

t = temps compté après l'arrêt du pompage) sur un diagramme sémi-log : la pente de la droite que l'on doit obtenir permet de calculer la transmissivité selon la méthode de Jacob. La méthode d'interprétation de Jacob (1947) a été retenue pour la présente étude.

5.3.3.1. Fondement théorique de la méthode de Jacob (1947)

La méthode de Jacob (1947) repose sur l'approximation logarithmique de la formule de Theis (1935) dite encore formule de Theis-Jacob donnée par l'équation (24).

En effet, en partant de la formule de Theis

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-v}}{v} dv \quad (\text{Eq.24})$$

En intégrant l'équation (24), on obtient la formule (25)

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[\ln(v) - v + \frac{v^2}{2,2!} - \frac{v^3}{3,3!} + \frac{v^4}{4,4!} \pm \dots \right]_u^{+\infty} \quad (\text{Eq.25})$$

On démontre que $u \rightarrow \infty$, la série entre crochets tend vers -0,577 (constante d'EULER) et d'autre part si u est très petit, la série entre crochets est équivalente à $\ln u$.

Il s'en suit que lorsque u est très petit, on peut remplacer l'intégrale exponentielle de Theis par son approximation logarithmique donnée par l'équation (25) par la formule de l'équation (26 et 27) :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(\text{Log} \frac{4Tt}{r^2 S} - 0,577216 \right) \quad (\text{Eq.26})$$

D'où

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \text{Log} \frac{2,25Tt}{r^2 S} \quad (\text{Eq.27})$$

Soit, après solution numérique et logarithmes décimaux, l'équation (27) s'écrit sous la forme plus connue (équation 28) :

$$s = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,25Tt}{r^2 S} \quad (\text{Eq.28})$$

Avec :

S : rabattement mesuré en un temps t , exprimé en m ;

T : la transmissivité exprimée en m^2/s ;

S : coefficient d'emmagasinement sans dimension ;

t : temps écoulé depuis le début du pompage, exprimé en s

Q : le débit de pompage en m^3/s

5.3.3.2. Conditions d'application de la méthode

Elles reposent sur les hypothèses de base des formules de Theis et de Jacob :

- le milieu est infini, homogène, isotrope et d'épaisseur constante sur toute la zone influencée par le pompage ;

- le diamètre du puits est négligeable ;
- le puits est parfait ;
- l'aquifère est captif ;
- l'écoulement vers le puits est transitoire.

Cette méthode n'est applicable que si la valeur de $u < 0,01$

Selon Kruseman et *al.* (1974) et Kruseman et De Rider (1991) toutes ces conditions ne se rencontrent pas souvent lors des essais de pompage dans la nature. Mais, il est important d'en tenir compte lors de l'interprétation de ces pompages car, les résultats obtenus quand les conditions réelles sont voisines des conditions théoriques permettent d'avoir une idée sur les paramètres hydrauliques des aquifères.

5.3.3.3. Détermination graphique de la transmissivité à la remontée

Cette méthode repose sur l'application du principe de superposition. Soit t le temps écoulé depuis le début du pompage jusqu'au moment de l'arrêt et t' le temps compté à partir de cet arrêt. Le rabattement s' dû à la poursuite fictive du pompage au débit est donné par la formule (29) :

$$s' = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,25T(t+t')}{r^2S} \quad (\text{Eq. 29})$$

La remontée s'' due à l'injection fictive du débit $-Q$ est donnée par l'équation (30) :

$$s'' = -\frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,25Tt'}{r^2S} \quad (\text{Eq.30})$$

D'où le rabattement observé après l'arrêt du pompage, ou rabattement résiduel s qui est mesuré est la somme algébrique de $s'+s''$ (équation 31)

$$s = s'+s'' = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,25T(t+t')}{r^2S} - \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,25Tt'}{r^2S} \quad (\text{Eq. 31})$$

En simplifiant l'équation (31), on obtient l'équation (32) :

$$s = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{t+t'}{t'} \quad (\text{Eq. 32})$$

L'expression $(t+t')$ est remplacé par la moyenne logarithmique pondérée du temps (\bar{t}) (temps corrigé) qui représente le temps auquel se serait produit le rabattement dans un certain piézomètre si le débit pompé était resté constant depuis le début et égal au débit réel au temps t .

Le temps réel t_n est donc remplacé par le temps pondéré corrigé \bar{t} . Ainsi, si l'on porte s le

rabattement résiduel en ordonnée arithmétique et $\log\left(\frac{\bar{t}}{t}\right)$ en abscisses logarithmiques, la pente b permet de déterminer T. Il est important de noter que tous ces calculs ont été effectués avec Excel. La figure 16 montre la représentation du rabattement en fonction du temps corrigé.

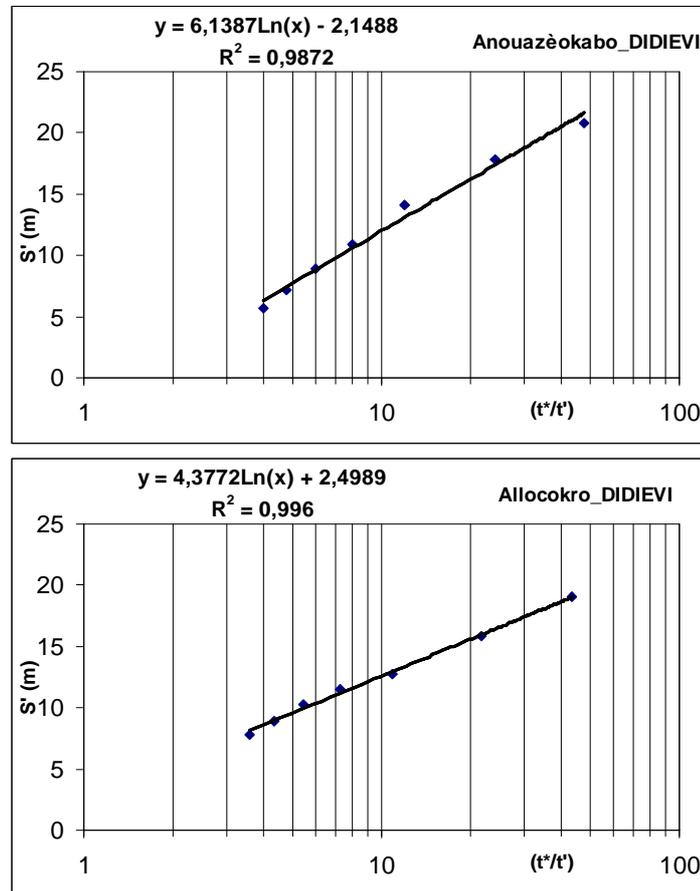


Figure 16 : Représentations graphiques du rabattement en fonction du temps corrigé.

5.3.4. Estimation de la transmissivité à partir du débit spécifique à travers une relation empirique

Pour pallier le manque de données de transmissivité dans certaines zones, certains auteurs ont eu recours à une relation analytique empirique entre la transmissivité et le débit spécifique. Cette relation basée sur la méthode de régression des moindres carrés permet de reproduire un champ de transmissivités avec des erreurs minimales là où les données font défaut. Les valeurs de débit spécifique (Q/s) et de transmissivité (T) sont reportées dans un diagramme bi-logarithmique. Si le nuage des points résultant s’aligne suivant une droite, l’équation de celle-ci est déterminée ainsi que son coefficient de détermination qui traduit la qualité de l’ajustement. Cette relation est souvent très significative lorsque les valeurs de T et

de Q/s s'étendent sur plusieurs ordres de grandeurs. Une large revue des travaux portant sur l'identification d'une telle relation dans la littérature est donnée par Razack et Huntel, (1991) cités par Jalludin et Razack, 2004 ; Razack et Lasm, 2006, Yidana et *al.*, 2007). Tous ces travaux indiquent que la relation entre la transmissivité et le débit spécifique dépend des conditions géologiques qui prévalent en chaque site. Les relations suivantes ont été proposées ces dernières années dans différents aquifères fracturés d'Afrique. Dans les plaines de l'Afram dans le Sud du bassin de la Volta au Ghana, Acheampong et Hess (1998) en utilisant 28 paires de données de transmissivité et de débit spécifique ont trouvé l'équation (33) suivante :

$$T = 20Q / s^{1,02} \quad (R^2 = 0,69) \quad (\text{Eq.33})$$

Où la transmissivité et le débit spécifique sont tous deux mesurés en m²/jour.

Récemment dans la même région, Yidana et *al.* (2007) proposent la relation (34) suivante :

$$T = 0,769.Q / s^{1,075} \quad (R^2 = 0,83) \quad (\text{Eq. 34})$$

Jalludin et Razack (2004) ont trouvé la relation (35) suivante pour les puits captant les aquifères des basaltes fracturés en République de Djibouti :

$$T = 2,990.Q / s^{0,938} \quad (R^2 = 0,82) \quad (\text{Eq. 35})$$

Ces auteurs estiment qu'une correction du débit spécifique des pertes de charges dues à la turbulence de l'écoulement, pourrait améliorer la relation empirique entre T et Q/s.

Dans les aquifères cristallin et métamorphique fracturés de la région de Man-Danané, ouest de la Côte d'Ivoire, Razack et Lasm (2006) proposent pour 118 paires (T et Q/s), la relation (36) suivante :

$$T = 0,89.Q / s^{1,30} \quad (R^2 = 0,88) \quad (\text{Eq.36})$$

La différence entre ces équations serait probablement due à des rabattements mesurés différemment, à la profondeur d'équipement, au temps d'observation, à la lithologie de l'aquifère et à la pénétration partielle du puits. Ces différentes formules ci-après sont très utiles car, elles permettent d'estimer l'un ou l'autre de ces paramètres de manière analytique. Malgré leurs limites, elles sont indispensables pour la modélisation.

5.3.5. Distribution des fréquences de transmissivité et de débit spécifique

La distribution des fréquences des valeurs transformées (logT et log Q/s) suivant un diagramme de log-probabilité a été réalisée afin de mettre en évidence le caractère log-normal de ces deux variables. La validation de l'ajustement a été effectuée par le test de Khi-deux au

seuil de signification de 10%. Le Khi-deux évalue les écarts entre les effectifs théoriques et empiriques sur des observations données (Vo-Khac, 1969). Un ajustement statistique est satisfaisant lorsque le Khi-deux théorique observé est supérieur au Khi-deux calculé au seuil de probabilité que l'on s'est fixé et avec le nombre de degré de liberté donné. Dans ce cas, les fréquences empiriques et théoriques sont similaires.

5.3.6. Approche probabiliste de l'influence de l'épaisseur des altérites sur la productivité des forages

Le modèle utilisé mis en place par Detay et *al.*(1989), est un modèle probabiliste qui permet de déterminer l'influence de l'épaisseur du réservoir capacitif d'altérites sur le débit, le débit spécifique, et la probabilité de trouver un débit minimal fixé (infra-débit). Dans la présente étude, nous nous limiterons aux deux premiers paramètres cités (Débit et le débit spécifique).

- **Influence de Ea sur le débit**

Le débit, exprimé en m^3/h , a été étudié à partir des pompages d'essai réalisés sur 219 forages. L'équation 37 a permis d'interpoler par une fonction rationnelle irrégulière $Q(Ea)$ (Detay et *al.*, 1989) :

$$Q(Ea) = \frac{(1,07Ea + 0,2)}{(0,325Ea + 1,3)} \quad (\text{Eq. 37})$$

- **Influence de Ea sur le débit spécifique**

Le débit spécifique a été interpolé par la fonction rationnelle régulière donnée par l'équation 38 par Detay et *al.* (1989) et Detay (1991) in Savané (1997) en utilisant 90 valeurs de débits spécifiques :

$$Q_s(Ea) = \frac{(0,76Ea + 0,34)}{(0,0075E^3a - 0,145E^2a + 2,68Ea + 2,34)} \quad (\text{Eq.38})$$

5.3.7. Caractérisation des aquifères par l'imagerie satellitaire

L'étude de la fracturation dans cette zone ne saurait être occultée car la fracturation joue un rôle prépondérant dans la caractérisation des aquifères de socle. L'objectif de cette partie est donc de cartographier les structures linéaires afin de dégager les grandes fractures qui contrôlent la géométrie des aquifères de la zone. Une connaissance de l'état de fracturation de la zone va contribuer à une meilleure compréhension des conditions d'alimentation des nappes. La télédétection est par excellence, l'outil qui permet le mieux d'étudier la fracturation. Elle demeure la plus utilisée dans différentes études du socle en Côte d'Ivoire (Biémi, 1992 ; Savané, 1997 ; Kouamé, 1999 ; Saley, 2003 ; Jourda, 2005 ; Ahoussi, 2008 ; Youan-Ta, 2008).

Nous présentons ici un résumé des différentes méthodes utilisées pour traiter les images (Biémi, 1992 ; Savané, 1997 ; Kouamé, 1999 ; Jourda, 2005).

5.3.7.1. Corrections géométriques, mosaïque et extraction de la zone d'étude

Avant tout traitement, les images doivent être corrigées radiométriquement. La correction géométrique (rééchantillonnage par le plus proche voisin de degré 1) et le redressement par rectification polynomiale ont été utilisés. La zone d'étude est couverte par deux images de scènes différentes (196-55 et 197-56). Ces images ont donc été géoréférencées et pour extraire la zone d'étude, une mosaïque des deux scènes a été réalisée.

5.3.7.2. Rehaussement des discontinuités

Le rehaussement est une technique qui permet d'accentuer l'observation des discontinuités contenues dans l'image. Parmi les techniques de rehaussement couramment utilisées, on a le filtrage spatial qui accentue les données de l'image. Les filtres directionnels permettent d'accentuer les discontinuités lithologiques et structurales sur une image donnée. Plusieurs types de filtres existent, mais ce sont les filtres de types Sobel qui ont été retenus. Ces filtres ont donné de bons résultats dans des études antérieures (Jourda, 2005 ; Youan Ta, 2008).

- ***Transformée de Hotelling***

Pour améliorer la perception visuelle des images, nous avons réalisé la transformée de Hotelling plus connue sous le nom d'analyse en composantes principales. Cette technique, permet de rehausser les images et de réduire le nombre de bandes à traiter en comprimant les informations selon une hiérarchie. Ainsi, nous avons réalisé l'analyse en composantes principales sur sept canaux à savoir ETM⁺¹, ETM⁺², ETM⁺³, ETM⁺⁴, ETM⁺⁵, ETM⁺⁶, ETM⁺⁷. Cette méthode a permis de retenir la deuxième composante (ACP2) pour le filtrage en vue de rechercher les discontinuités- images qui donne la meilleure qualité visuelle (Jourda, 2005 ; Jourda et al., 2006).

- ***Filtrage spatial***

Pour cette étude, comme nous l'avons souligné plus haut, les filtres directionnels de types Sobel ont été retenus. Ils permettent d'obtenir quatre (4) principales directions : N-S ; E-W ; NE-SW ; SE-NW. Ils sont représentés dans le tableau VII.

Tableau VII: Filtres directionnels de Sobel 7X7

1	1	1	2	1	1	1
1	1	2	3	2	1	1
1	1	3	4	3	2	1
0	0	0	0	0	0	0
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1
-1	-1	-2	-3	-2	-1	-1
-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1

-1	-1	-1	0	1	1	1
-1	-1	-2	0	2	1	1
-1	-2	-3	0	3	2	1
-2	-3	-4	0	4	3	2
-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-1	-2	0	2	1	1
-1	-1	-1	0	1	1	1

0	1	1	1	1	1	2
-1	0	2	2	2	3	1
-1	-2	0	3	4	2	1
-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-2	-4	-3	0	2	1
-1	-3	-2	-2	-2	0	1
-2	-1	-1	-1	-1	-1	0

2	1	1	1	1	1	0
1	3	2	2	2	0	-1
1	2	4	3	0	-2	-1
1	2	3	0	-3	-2	-1
1	2	0	-3	-4	-2	-1
1	0	-2	-2	-2	-3	-1
0	-1	-1	-1	-1	-1	-2

A l'issue du filtrage, qui permet en outre d'accentuer ou de désaccentuer des structures visuelles sur l'image, nous obtenons les images filtrées N-S, E-W, NE-SW, NW-SE.

5.3.7.3. Extraction des linéaments

L'extraction des linéaments s'est faite de façon manuelle car la méthode automatique reste encore difficile à appliquer. Cette difficulté réside dans la définition des paramètres caractérisant les linéaments (Kouamé, 1999). On entend par linéament toute trace linéaire, topographique ou de tonalité, simple ou composite et dont les différentes parties sont en relation rectilinéaire ou légèrement curvilinéaire reconnu sur une image (Kouamé, 1999).

5.3.7.4. Validation de la carte linéamentaire

Après la cartographie des linéaments, une étude de terrain appuyée d'une carte photogéologique permet de confirmer l'existence des segments observés.

Dans notre cas, compte tenu de la situation de guerre qui prévalait dans la zone, lors des différentes missions, la mesure de fractures sur le terrain n'a pas été possible. Néanmoins, les mesures faites par certains auteurs ayant travaillé dans la région des Lacs, nous ont permis d'avoir une idée sur les familles de fractures dominantes. Ainsi, pour valider cette carte nous nous sommes appuyés sur l'étude de Yao (1998) dans les formations birimienues de Toumodi-Fettekro.

5.4. METHODOLOGIES DE L'ETUDE HYDROCHIMIQUE

5.4.1. Introduction

L'hydrochimie des eaux souterraines est sous le contrôle de facteurs naturels et anthropogéniques. En dehors de l'impact anthropogénique, la composition chimique des eaux souterraines est sous la dépendance de plusieurs facteurs que sont la composition chimique des précipitations, la minéralogie des eaux d'infiltration et des aquifères, du climat et de la topographie. La combinaison de tous ces facteurs dans un système complexe crée plusieurs types d'eau qui évoluent aussi bien dans l'espace que dans le temps. L'hydrochimie constitue donc un excellent outil d'investigation de la structure et du fonctionnement des aquifères. De ce fait, l'hydrochimie apparaît comme un moyen d'étude de l'hydrodynamisme des aquifères. En effet, le contenu chimique des eaux souterraines est sous la dépendance étroite des conditions hydrodynamiques (Lallahem, 2002). Au cours de l'infiltration et de leur transit dans le réservoir, les eaux acquièrent leur minéralisation par interaction avec l'encaissant rocheux. A l'émergence, certaines propriétés chimiques acquises lors du transit profond seront conservées et constituent donc des moyens de traçages et de prospection de ces circulations (Lallahem, 2002). Dans ce cas, les paramètres physico-chimiques et chimiques sont alors utilisés comme des traceurs naturels destinés à révéler l'organisation et le fonctionnement du système hydrogéologique étudié (Faillat et Drogue, 1993). Dans ce paragraphe, les méthodes hydrochimiques qui permettent de comprendre le fonctionnement des aquifères (ΔpH , ISC etc.) seront appliquées. Une analyse multivariée comprenant une analyse en composantes principales et une classification hiérarchique ascendante seront faite en vue de terminer les affinités entre les différents éléments et aussi les processus qui sont à l'origine de la mise en solution de ces ions. Une étude de la qualité des éléments par rapport aux normes en vigueur sera également faite. Enfin, une cartographie hydrochimique des eaux de la zone d'étude sera réalisée à partir des coordonnées géographiques des forages et des teneurs des différents éléments en vue d'analyser leur répartition spatiale.

L'ensemble de ces méthodes a pour but de suivre l'évolution du chimisme du système aquifère, la discussion de l'origine des éléments en solution dans les eaux souterraines de la région et la qualité de ces eaux pour l'alimentation en eau potable.

5.4.2. Analyse statistique des données physico-chimiques

Une analyse statistique sommaire a permis de faciliter l'exploitation des données hydrochimiques. Elle a consisté à étudier les valeurs extrêmes (minima et les maxima), les

valeurs centrales notamment la moyenne et les paramètres de dispersion de ces valeurs (écart type, CV). Des graphes de corrélation entre les rapports caractéristiques ont été utilisés pour étudier le chimisme des eaux.

5.4.3. Typologie des eaux (hydrofaciès)

L'étude de la typologie des eaux a été faite à l'aide du diagramme de Piper. Il permet de faire une classification des points d'eau par faciès. Il existe d'autres diagrammes qui permettent d'étudier les hydrofaciès. Parmi eux on peut citer :

- Le diagramme de Schoeller-Berkalof ;
- Le diagramme rayonnant ;
- Le diagramme de Durov ;
- Le diagramme Radial ;
- Le diagramme de Stiff, etc....

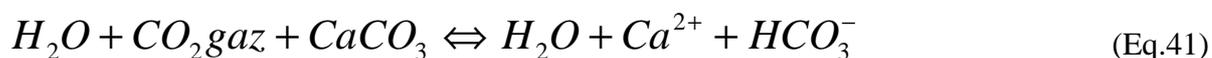
Les méthodes de Stiff, de Radial et de Schoeller ne sont pas pratiques pour un nombre élevé d'échantillons. De plus, ces méthodes sont considérées par certains chercheurs comme subjectives (Güler et *al.*, 2002 cités par Hussein, 2004). De ce fait, l'utilisation de ces méthodes graphiques pour le regroupement des échantillons n'est pas suffisante et peut produire des résultats biaisés. Ces différentes méthodes sont généralement utiles uniquement pour présenter une carte des hydrofaciès des eaux.

5.4.4. Méthodologie de l'étude de l'âge relatif des eaux souterraines

L'approche de l'âge relatif des eaux souterraines est abordé ici par l'étude des différents paramètres qui régissent le système calco-carbonique. Cette méthode permet d'étudier l'évolution chimique de l'eau en fonction de son état d'équilibre ou de déséquilibre vis-à-vis des minéraux primaires et néoformés de la roche-réservoir. Ces états d'équilibre et de déséquilibre sont régis par les lois de la thermodynamique qui fixent le sens des évolutions. C'est ainsi que nous avons calculé l'activité des espèces aqueuses dans l'eau, la pression partielle en CO₂ (pCO₂) et les produits d'activité ioniques (PAI). Les indices de saturation par rapport à certains minéraux (calcite, dolomite, aragonite, etc.) ont également été calculés.

5.4.4.1. Principe du système calco-carbonique

L'importance de l'étude du système calco-carbonique des eaux souterraines issues de roches non carbonatées n'a pas pour objectif d'étudier les carbonates dans les eaux ou dans les formations encaissantes elles-mêmes ; mais plutôt de déterminer l'âge relatif des différentes familles d'eau dans l'aquifère. Les eaux d'infiltration entraînent toujours avec elles en profondeur, un flux de gaz carbonique plus ou moins important généralement responsable de l'agressivité des eaux souterraines. Cette agressivité due au CO₂ dissous présent dans l'eau, provoque la dissolution de l'encaissant. Ce phénomène de dissolution eau-roche est le résultat de la coexistence de trois phases dans la matrice : solide (roche), liquide (eau) et gazeuse (CO₂). La coexistence de ces trois phases constitue un système chimique régi par huit équations d'équilibre appelée système calco-carbonique. L'étude du système calco-carbonique est régie par deux groupes de variables : d'une part, la pression partielle en CO₂ (pCO₂) et le CO₂ dissous et, de l'autre le pH d'équilibre, et les indices de saturations de l'eau par rapport à différents carbonates (Biémi et *al.*, 1995). L'utilisation de la relation indice de saturation vis-à-vis de la calcite (IS calcite) et la pression partielle de CO₂ (pCO₂) donne une idée de l'état d'équilibre de la solution avec l'encaissant. En effet, l'étude de la pCO₂ et de l'indice de saturation est particulièrement adaptée à une première approche hydrodynamique des systèmes étudiés. De façon simplifiée, le système calco-carbonique est présenté par l'équation d'équilibre (41) suivante et de façon plus rigoureuse dans le tableau VIII.



Ce système est gouverné par la réversibilité et l'inertie des équilibres, ce qui se traduit par un taux de saturation dépendant de l'histoire de l'eau. En fin de compte, deux (2) variables rendent complètement compte de l'histoire de l'eau, solvant de la roche carbonatée :

- la pCO₂, pression partielle de CO₂ rendant compte des concentrations observées en Ca, HCO₃ et Mg ;
- l'indice de saturation ISC de l'eau vis-à-vis de la calcite, minéral carbonaté le plus courant et précipitant le premier.

Les définitions relatives à ces deux seront traitées dans le paragraphe suivant ainsi que les différentes méthodes de calcul. Les huit équilibres chimiques donnent huit constantes d'équilibre avec les variables chimiques et la réaction d'électroneutralité de l'eau, neuf équations à dix inconnues. Ces constantes d'équilibre sont estimées par la relation (42) (*in* Biémi, 1992) :

$$\log k = a + \frac{b}{T} + c \times T + d \times T^2 \quad (\text{Eq.42})$$

T, température de la solution en °K

Les coefficients a, b, c et d sont des constantes connues dont les valeurs figurent dans le tableau IX.

▪ Notion d'activité ionique

Le traitement des relations entre minéraux et entre minéraux et solution (eau), par calcul thermodynamique, emploie l'activité comme expression de la concentration. L'activité tient principalement compte de l'attraction électrostatique entre les ions. Pour une solution idéale (pure), l'activité est égale à la concentration.

Dans le cas réel, un coefficient d'activité γ appelé coefficient d'activité, mesure la déviation par rapport à l'état idéal ($a_i = \gamma m_i$). Avec m_i = concentration mesurée en mol.l⁻¹ et γ_i = coefficient d'activité de l'ion i. Il est donné par la formule (43) de Debye Huckel et n'est valable que pour les eaux à force ionique négligeable ($\mu < 0,1$ mol.l⁻¹) :

$$\log \gamma_i = - \frac{AZ_1^2 \sqrt{I}}{1 + a_i^0 B \sqrt{I}} \quad (\text{Eq.43})$$

A et B sont des coefficients empiriques en fonction de la température (t °c).

$$A (t^\circ\text{c}) = 0,000920t + 0,4850$$

$$B (t^\circ\text{c}) = 0,000162t + 0,3241$$

a_i^0 = désigne le rayon d'influence de l'ion i en angstroem. C'est une grandeur expérimentale fonction du diamètre effectif de l'ion i.

I est la force ionique, définie en fonction de la molalité (m_i) et la charge Z_i de la somme des ions en solution. Son expression est donnée par la formule (44) suivante :

$$FI(\text{mol.l}^{-1}) = \frac{1}{2} \sum_0^n m_i Z_i^2 \quad (\text{Eq. 44})$$

Tableau VIII : Principaux équilibres du système calco-carbonique dans les eaux souterraines et expressions de leurs constantes dans les trois phases.

Réactions d'équilibre	Equations thermodynamique liées aux constantes de dissociation et/ou d'équilibres
1) Entre phase liquide et phase gazeuse : + Dissolution ou évaporation du CO ₂ (1) (CO ₂) _g ⇌ (CO ₂) _l	K ₀ : constante de Henry pour le CO ₂ $K_0 = (CO_2)_l / (pCO_2)$
2) Dans la phase liquide : + Hydratation du CO ₂ et ionisations (2) (CO ₂) + nH ₂ O ⇌ (CO ₂ , nH ₂ O) (2bis) (CO ₂ , H ₂ O) + pH ₂ O ⇌ (HCO ₃ ⁻ + H ₃ O ⁺ + (n + p - 2)H ₂ O) (3) HCO ₃ ⁻ + H ₂ O ⇌ CO ₃ ²⁻ + H ₃ O ⁺ + Formation des paires d'ions (4) HCO ₃ ⁻ + Me ²⁺ ⇌ MeHCO ₃ ⁻ (5) CO ₃ ²⁻ + Me ²⁺ ⇌ MeCO ₃ ⁰ + Dissociation de l'eau (6) 2H ₂ O ⇌ H ₃ O ⁺ + OH ⁻ + Formation de paires d'ion avec SO ₄ ²⁻ (7) Me ²⁺ + SO ₄ ²⁻ ⇌ MeSO ₄ ⁰	$K_1 = (HCO_3)(H_3O^+) / (CO_2)$ $K_2 = (CO_3^-)(H_3O^+) / (HCO_3^-)$ $K_3 = (MeHCO_3^-) / (HCO_3^-)(Me^{2+})$ $K_4 = (MeCO_3^0) / (CO_3^{2-})(Me^{2+})$ $K_e = (H_3O^+)(OH^-) = 10^{-14}$ $K_5 = (MeSO_4^0) / (Me^{2+})(SO_4^{2-})$
3) Entre phase liquide et phase solide + Dissociation ou précipitation du carbonate (8) MeCO ₃ ⇌ CO ₃ ²⁻ + Me ²⁺	$K_s = (Me^{2+})(CO_3^{2-}) / (MeCO_3)$
4) Electroneutralité de la solution : (9) 2mCO ₃ ²⁻ + mHCO ₃ ⁻ + 2mSO ₄ ²⁻ = 2mCa ²⁺ + mH ₃ O ⁺ + mMeHCO ₃ ⁻ Avec mMe _{tot} = mMe ²⁺ + mMeHCO ₃ ⁻ + mMeCO ₃ ⁰ + mMeSO ₄ ⁰ mHCO ₃ _{tot} = mHCO ₃ ⁻ + mMeHCO ₃ ⁻ mCO ₃ _{tot} = mCO ₃ ²⁻ + mMeCO ₃ ⁰ mSO ₄ _{tot} = mSO ₄ ²⁻ + mMeSO ₄ ⁰ Les concentrations totales (m _{tot}) sont données par l'analyse Me représente tous les cations divalents associés aux carbonates : Ca, Mg, Sr	

Tableau IX: Expressions analytiques des constantes d'équilibre (in Biémi, 1992)

	Me ²⁺	a	b	c	d
K ₀	-	-14,0184	2385,73	0,015264	0
K ₁	-	14,5435	-3404,71	-0,032786	0
K ₂	-	6,498	-2902,39	-0,02379	0
K ₃	Ca ²⁺	2,95	0	-0,0133	0
K ₃	Mg ²⁺	-2,319	0	0,011056	2,3.10 ⁻⁵
K ₄	Ca ²⁺	27,393	-4,114	-0,05617	0
K ₄	Mg ²⁺	-0,991	0	-0,0066	0
K _s	calcite	13,870	-3059,0	-0,04035	0

5.4.4.2. Définition de la pCO₂ et origine du CO₂ dissous dans le sol

La pression partielle en CO₂ équilibrante est la pCO₂ d'une phase gazeuse fictive associée à la solution pour laquelle on suppose atteint l'équilibre entre la phase gazeuse et le liquide, aux valeurs de pH et de HCO₃⁻. En effet lorsqu'une eau est à l'équilibre avec les phases gazeuse et liquide, il est possible de calculer, à partir des équations thermodynamiques, sa teneur en CO₂ dissous, et donc sa pression partielle en CO₂ (pCO₂), porteuses des renseignements sur la phase gazeuse associée à l'eau souterraine (Bakalowicz, 1979 *in* Biémi, 1992). Une relation de cause à effet existe entre l'évolution de la pCO₂ du sol et celle des eaux souterraines. En effet, le CO₂ du sol arrive dans l'aquifère grâce à l'action des eaux d'infiltration. La consommation de CO₂ est le fait de processus de natures diverses. L'altération des minéraux (dissolution de calcite ou bien dissolution de feldspaths et précipitation de silicates en feuillés) conduit à une production d'alcalinité qui consomme du CO₂ selon la réaction (45):



Ce CO₂ servira à la dissolution des roches. Pour des eaux d'altération de roches de type granite ou pegmatite avec peu de matière organique (eaux d'horizons profonds de sols sur granite, ..) la pCO₂ peut être très faible.

Les origines du CO₂ sont multiples et l'on peut distinguer en autres *in* Soro (2002) :

- le CO₂ atmosphérique ;
- le CO₂ du sol ;
- le CO₂ provenant de l'attaque des calcaires ;
- le CO₂ dégagé des eaux souterraines ;
- le CO₂ d'origine métamorphique ;
- le CO₂ d'origine volcanique.

La pression partielle en CO₂ (i.e. pCO₂) des eaux naturelles varie fortement.

Si l'on considère, par exemple, les eaux d'une nappe, la valeur de pCO₂ va dépendre de la balance entre plusieurs vitesses :

- vitesse de production ou de consommation de CO₂ d'une part ;
- et vitesse de diffusion du CO₂.

La diffusion du CO₂ est très faible pour le CO₂ aqueux. La diffusion du CO₂ est surtout le fait du CO₂ gazeux dans l'atmosphère du sol ou du sous-sol. La diffusion du gaz s'effectue lorsque la porosité grossière, siège de l'atmosphère des sols, est vide d'eau. Ainsi, dans les milieux saturés, cette diffusion de CO₂ est lente. Les échanges gazeux entre eau du sol et

atmosphère sont faibles et la pCO_2 sera plutôt élevée. En revanche, dans les milieux sous-saturés en eau, la diffusion du CO_2 est plus importante et donc la pCO_2 sera plus faible. Ainsi pour les eaux en équilibre avec l'atmosphère, la pression partielle de CO_2 est de $10^{-3,5}$ atmosphère ($\log(pCO_2) = -3,5$). La production de CO_2 est principalement due à l'activité biologique. Dans certains cas, l'influence thermique avec des eaux carbogazeuses peut conduire à une forte source de CO_2 . Lorsque le milieu contient beaucoup de matière organique, comme par exemple dans les horizons superficiels des sols abritant des nappes perchées, ou bien pour les milieux tourbeux, l'oxydation de la matière organique conduit à une forte production de CO_2 et donc à une pCO_2 élevée. Les valeurs élevées de pCO_2 seraient donc liées à des vitesses d'infiltration rapides correspondant à un état de d'évolution chimique des solutions par rapport à l'équilibre. Ces eaux seraient donc récentes dans l'aquifère. Pour des eaux d'altération de roches de type granitique ou pegmatite avec peu de matière organique (eaux thermales non carbogazeuses, eaux d'horizons profonds de sols sur granites, ..) la pCO_2 peut être très faible. Ce qui veut dire que les quantités de CO_2 dissous présentes dans l'aquifère sont épuisées et que les solutions sont à l'état de saturation en carbonates ou en équilibre chimique. Ce phénomène se traduit donc par un temps de séjour prolongé des eaux dans l'aquifère. Enfin, le fonctionnement hydrique du milieu joue un rôle capital. Si l'eau se trouve dans un milieu à porosité fine, perméabilité faible, gradient piézométrique ou hydrique faible avec des écoulements lents (eau stagnante), alors les échanges gazeux sont faibles et la pCO_2 est plutôt élevée. A l'opposé, dans les matériaux graveleux ou caillouteux, à porosité grossière, avec des écoulements rapides, la pCO_2 est faible.

▪ **Calcul de la pression partielle en CO_2 (pCO_2)**

La pCO_2 équilibrante correspond à la pCO_2 d'une phase associée à la solution pour laquelle on suppose que tous les équilibres du **tableau VIII** sont atteints. Elle est obtenue par calcul à partir des valeurs du pH et des teneurs en bicarbonates selon la relation (46) suivante

$$: \log pCO_2 = \log aHCO_3^- - pH - \log K_0 - \log K_1 \quad (\text{Eq.46})$$

Où a désigne l'activité des ions HCO_3^- , K_0 la constante de dissolution du CO_2 dans l'eau et K_1 la première constante d'acidité de H_2CO_3 .

D'où on a la pression partielle de CO_2 qui est donnée par l'expression (47):

$$pCO_2(atm.) = \frac{aHCO_3^- \cdot aH^+}{K_0 K_1} \quad (\text{Eq. 47})$$

La méthode de la pression partielle de CO₂ utilisée ici pour la détermination de l'âge relatif des eaux présente quelques difficultés. En effet, la production du CO₂ est sous la dépendance de plusieurs facteurs. Les quantités de CO₂ varient dans l'espace et dans le temps en raison de l'insuffisance de la vie microbienne et la litière dans certains sols.

La zone d'étude étant à cheval entre la forêt et la savane, il peut se trouver qu'une eau récente soit pauvre en CO₂. Pour s'affranchir de cet obstacle, le pH d'équilibre et les indices de saturation des eaux par rapport à la calcite et à la dolomite ont été utilisés pour déterminer l'âge relatif des eaux dans la zone d'étude. Selon Biémi et *al.* (1995), en milieu cristallin d'Afrique de l'Ouest, les eaux récentes sont facilement reconnaissables par leurs indices de saturations souvent assez négatifs, en rapport avec une agressivité importante de l'eau, même quand la production du CO₂ dans le sol, l'hydrolyse et les quantités de Ca et Mg qui en résultent sont naturellement négligeables.

▪ Notion d'indice de saturation

Les indices de saturation nous renseignent sur l'état d'équilibre des systèmes, donc sur les conditions d'écoulement existant dans le milieu. L'indice de saturation (I_s) pour un minéral donné est défini selon l'équation (48) (Kortatsi et *al.*, 2008) suivante :

$$I_s = \log \frac{PAI(T)}{Ks(T)} \quad (\text{Eq.48})$$

Avec

PAI (T) : Produit d'activité ionique (à la température de l'échantillon)

Ks (T) : constante d'équilibre du minéral considéré (à la température de l'échantillon).

L'eau est en équilibre avec un minéral lorsque I_s = 0, elle est sous-saturée lorsque I_s < 0 ce qui signifie que la réaction est en faveur de la dissolution, par contre lorsque I_s > 0, la solution est sursaturée.

Dans ce cas, la précipitation est thermodynamiquement favorable en dépit de la lenteur de la vitesse de réaction qui peut inhiber la précipitation. Il est important de noter que l'indice de saturation dépend directement de la validité des mesures de teneurs ioniques et de la mesure du pH dans certains cas, en particulier pour la saturation vis-à-vis des minéraux carbonatés. Ainsi, les imprécisions des mesures de pH dues aux appareils de mesure, la variation de ce paramètre lors de la remontée de l'eau en surface et l'erreur sur les analyses chimiques se traduisent par une imprécision sur le calcul d'I_s.

Par conséquent, il est recommandé de considérer que la saturation est obtenue dans un domaine plus large tel que -1 < I_s < +1.

5.4.5. Notions de système ouvert et fermé : utilisation du Diagramme pH-HCO₃

Un système est dit ouvert sur un réservoir si les échanges de matière et d'énergie sont possibles avec celui-ci et à condition qu'il soit considéré comme infini vis-à-vis de l'élément considéré (Garry, 2007). Ici, nous parlerons de système ouvert ou fermé vis-à-vis d'une phase gazeuse (CO_{2 g} du sol ou de l'atmosphère) car il peut aussi bien s'agir d'un élément de la phase solide ou de la phase gazeuse (Clark and Fritz, 1997). Dans le cas d'un système dit ouvert sur le CO_{2 g}, l'évolution chimique des eaux a lieu sous une pression partielle de CO₂, variable dans l'espace et dans le temps. La pression partielle du CO₂ dans la phase liquide (pCO₂) est égale à la pression partielle du CO₂ de la phase gazeuse, la loi d'Henry fixant la valeur de l'équilibre (Garry, 2007). Cette pression se produit dans la zone non saturée (zone d'aération des sols et des réservoirs) qui est le siège des écoulements diphasiques où la phase gazeuse, associée à l'eau favorise une réalimentation interrompue de l'aquifère en CO₂. Dans un tel système, le stock du CO₂ est conservé et le pH varie très peu.

Un système est dit fermé sur un réservoir lorsqu'il n'y a plus aucun échange de matière possible avec celui-ci (Clark and Fritz, 1997). Toutefois, il convient de ne pas confondre système fermé et système isolé. En effet, dans système isolé, tout échange de matière ou d'énergie est impossible (Garry, 2007), alors qu'un système fermé sur le CO_{2g} du sol n'interdit par les échanges ente les phases liquides et solide, puisque le système n'est pas fermé vis-à-vis de la matrice solide de l'aquifère. Dans un tel système, l'absence de la phase gazeuse ne permet plus une réalimentation en CO₂ de la nappe. L'alimentation de la nappe par infiltration à travers la zone non saturée est arrêtée.

Dans ce cas, il pourrait donc s'agir d'une nappe captive parce que la fracturation n'est plus suffisante pour permettre une alimentation directe décelable chimiquement (Gallo, 1979 cité par Biémi, 1992). La relation entre le pH et les teneurs en bicarbonate peuvent permettre de définir la présence d'un système fermé ou ouvert à l'atmosphère dans un milieu cristallin. Cette méthode a donné des résultats intéressants au Brésil dans la région de Ribeirra Preto (*in* Biémi, 1992) et en Côte d'Ivoire, dans le bassin de la Marahoué (Biemi, 1992), dans la région de Dabou (Tapsoba, 1995), dans la région de l'Agneby (Ahoussi, 2008). Le diagramme de Gallo (Figure 17) qui repose sur ces différentes hypothèses (*in* Biémi, 1992) va donc nous permettre d'étudier l'hydrodynamisme des aquifères de la région des lacs vis-à-vis du CO₂.

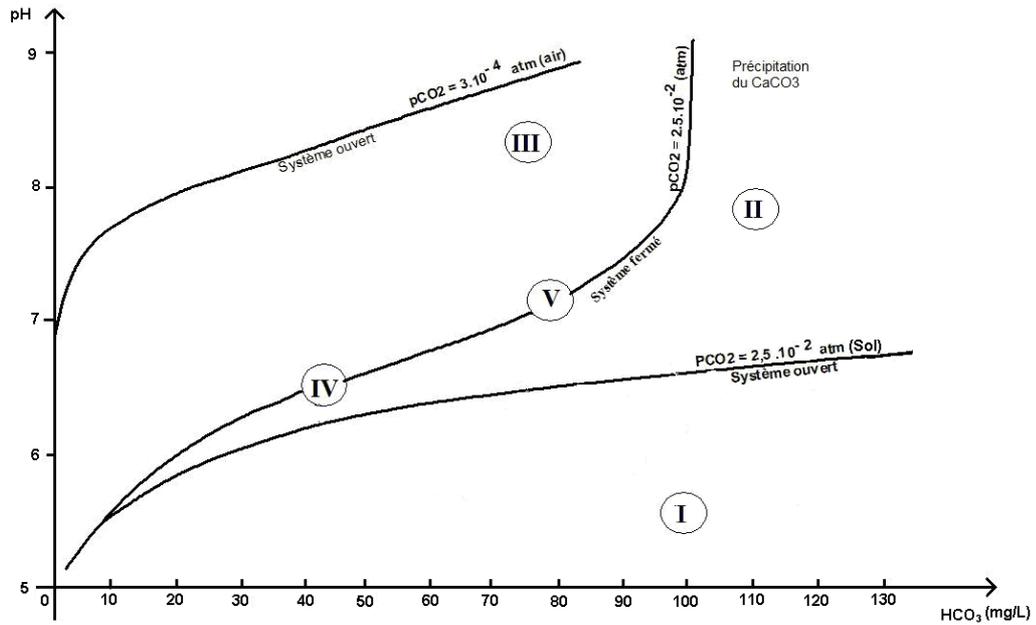


Figure 17: Diagramme des relations pH réel-Teneurs en bicarbonates (courbe théorique) 25°C et pour une force ionique de 10^{-3} mol/L).

5.4.6. Qualité des eaux souterraines et risque pour la santé

L'étude de la qualité des eaux de consommation est basée sur l'analyse des éléments de la pollution des eaux (éléments majeurs, éléments mineurs naturels, éléments métalliques en trace) et les paramètres physico-chimiques mesurés *in situ*. Elle va consister dans un premier temps à comparer les valeurs des éléments physiques et chimiques de l'eau par rapport aux normes de références établies par l'OMS (1992) pour les eaux destinées à la consommation humaine. Ces données sont présentées sous forme de graphique où la norme pour chaque élément est mise en évidence. Dans un deuxième temps, il sera question d'évaluer les impacts potentiels de ces éléments sur la santé.

5.4.7. Cartographie hydrochimique

La cartographie hydrochimique permet d'étudier la répartition spatiale des éléments chimiques dans la zone d'étude. Pour ce faire, l'on doit disposer d'une carte de la zone d'étude, d'un GPS Garmin (ou Global Positioning System). Lorsque les localités dont les points d'eau seront échantillonnés lors de la campagne sont identifiées sur la carte, l'étape suivante consiste à un repérage en coordonnées (X, Y) Lambertiennes ou Universal Transversal Mercator (UTM) des points d'eau sur le terrain à l'aide du GPS. Les analyses chimiques concernent plusieurs éléments du même point d'eau ce qui nous a permis de dresser une base de données des points

d'eau avec les coordonnées géographiques. Cette base de données a été saisie sous le tableur Excel et convertie en table attributaire sous format reconnu par ArcView 3.2. La carte de la zone d'étude à l'échelle 1/200 000 est scannée, géoreferencée et numérisée sur MapInfo 6.5 et transférée sur ArcView 3.2. Sur ArcView 3.2, la table attributaire des éléments chimiques est interpolée pour générer la carte de répartition spatiale des différents éléments. Enfin, on superpose la carte interpolée avec celle des localités et on obtient la carte thématique finale. Cette méthode est résumée dans l'organigramme de la figure 18.

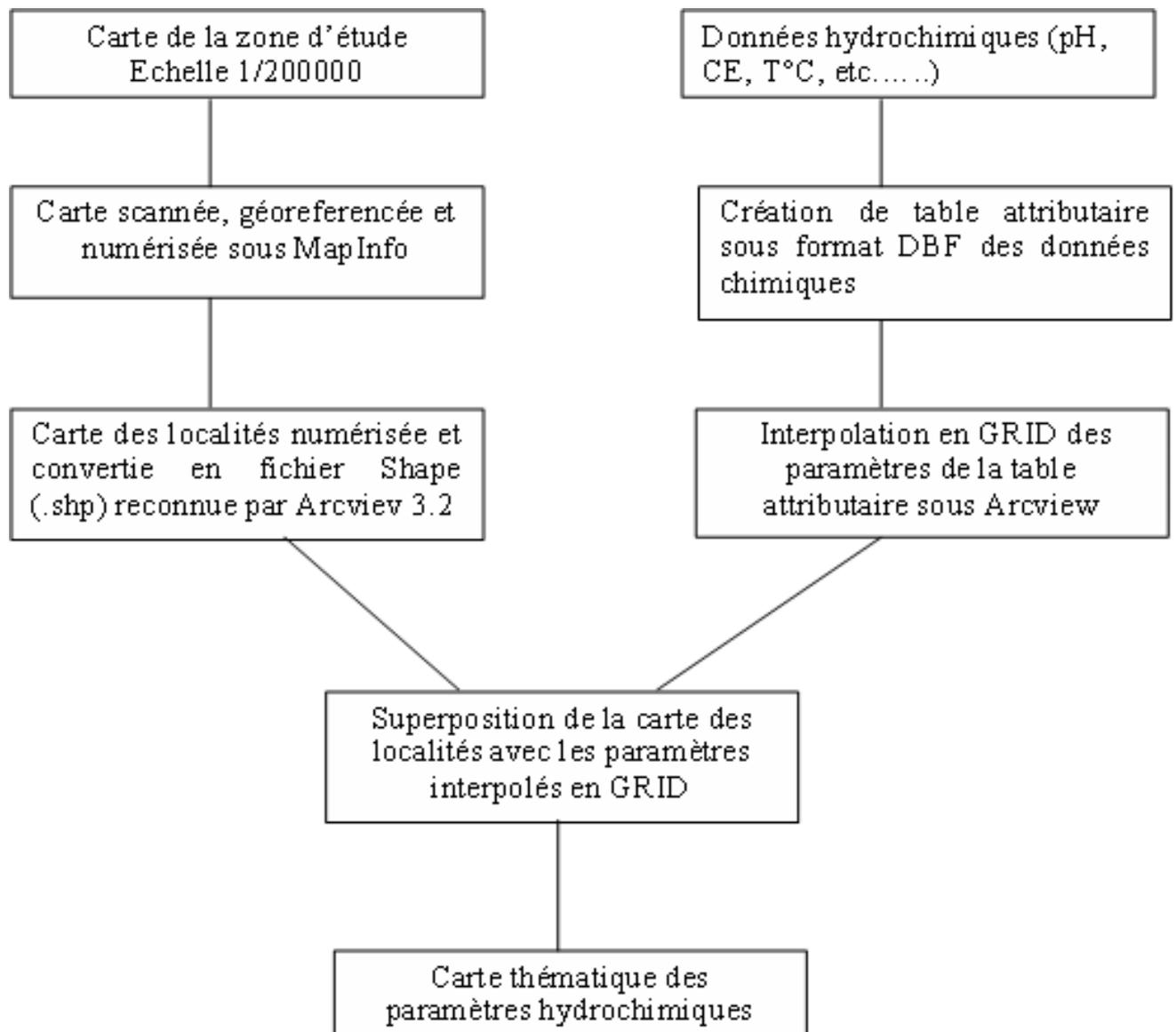


Figure 18 : Synthèse de la méthodologie de réalisation de la cartographie thématique des paramètres hydrochimiques.

5.5. METHODOLOGIE DES TRAITEMENTS STATISTIQUES

5.5.1. Présentation de l'Analyse en composantes principales

La description de cette méthode est largement exposée dans de nombreux travaux (Caillez et Pages, 1976 ; Biémi, 1992). Dans ce paragraphe, nous nous contenterons d'évoquer simplement l'objectif et le principe de cette méthode. Dans un espace hypothétique à n dimensions, correspondant aux n variables, le nuage de points des observations ne permet pas de mettre en évidence une structure particulière. La transformation linéaire de ces n variables initiale par la méthode de l'analyse en composantes principales (ACP), définit de nouvelles variables appelées composantes. Ces composantes principales, expliquent le maximum de l'information initiale. Chaque composante explique un certain pourcentage de la variance des observations, lequel diminue avec le rang de la composante. Par conséquent, les points d'observations peuvent être représentés dans un espace réduit à p dimensions. Dans ce nouvel espace, les coordonnées des points d'observations correspondent aux coefficients de corrélation entre chaque axe et chaque variable initiale. Cette représentation graphique permet, s'il y a lieu, de regrouper les variables initiales en groupes homogènes vis-à-vis du phénomène observé.

5.5.2. Application de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) à l'étude de la variabilité spatiale des précipitations

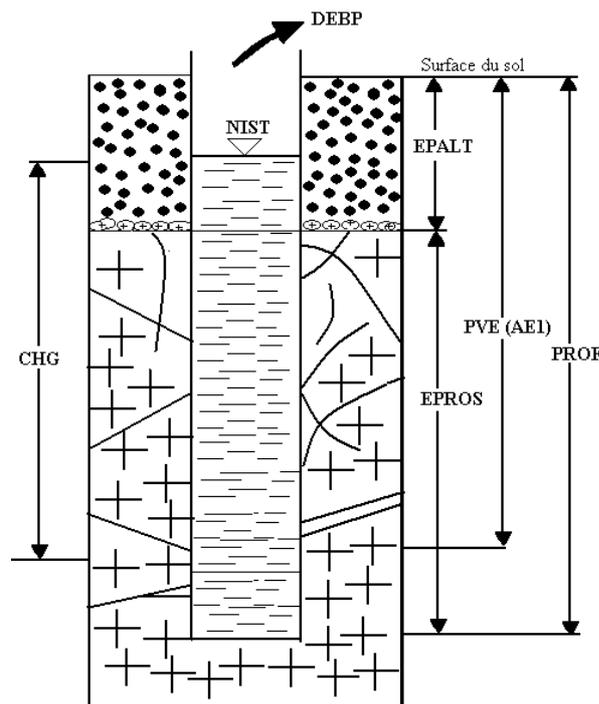
L'objectif recherché est la description et la mise en évidence de l'existence éventuelle des sous-populations pouvant préciser le gradient pluviométrique mis en évidence par le tracé des isohyètes. Cette méthode a déjà été utilisée dans plusieurs études pluviométriques ou hydrométriques dans l'optique d'optimiser un réseau de mesures hydropluviométriques mais surtout dans le but d'éliminer systématiquement des stations déjà existantes et non d'en ajouter (Rasmussen et *al.*, 1997). El Morjani (2002) a également utilisé l'ACP pour chercher des paramètres qui influencent la répartition des pluies.

Pour appréhender la variation spatiale des pluies dans la région des lacs, les stations pluviométriques ont été considérées comme variables et les précipitations comme observations (Cemagref, 1981). Dans le but de mettre en évidence des sous-groupes dans les variables en considérant le maximum de l'information, chaque variable est projetée sur un cercle de rayon unité de telle manière que la norme de chaque vecteur soit égale au coefficient de corrélation entre la station considérée et le premier axe factoriel. Ainsi, les précipitations annuelles ont été prises en compte pour ce traitement statistique. Ce traitement a été effectué en considérant 12

variables à savoir les 12 postes pluviométriques retenues après critique de la base de données initiale, et 35 observations ou années qui correspondent à la période allant de 1966 à 2000.

5.5.3. Caractérisation de la productivité des aquifères à partir de l'Analyse en composantes principales normées (ACPN)

Nous avons appliqué l'ACP sur les paramètres hydrogéologiques des forages dans le but de déterminer les paramètres qui ont une influence sur la productivité des forages. Cette analyse a été réalisée sur 87 échantillons constitués par les forages et 8 variables statistiques ont été prises dont la profondeur totale du forage (Prof.), l'épaisseur des altérites (EPALT), l'épaisseur de la roche saine pénétrée par l'ouvrage (EPROS), Niveau piézométrique représenté ici par le niveau statique (NIVP), la Charge hydraulique (CHG), le débit de foration ou de production (DEBP), le Débit spécifique (DEBSP) et la profondeur de la première venue d'eau (PVE). La figure 19 présente ces différents paramètres tels que définis par Mbonu (1991).



DEBP=Débit de production, soit débit au pompage, soit débit à l'air lift.

NIVP=Profondeur de la nappe à partir de la surface (ou niveau piézométrique).

EPALT= Epaisseur d'altérites.

PVE (AE1) = Profondeur de la première arrivée d'eau dans le forage à partir de la surface du sol.

CHG = Charge hydraulique.

EPROS = Epaisseur de la roche saine pénétrée par le forage.

PROF = Profondeur totale du forage.

Figure 19 : Coupe schématique d'un forage dans le socle et définition des paramètres hydrogéologiques (Mbonu, 1991, modifié).

5.5.4. Traitement des données hydrochimiques par les analyses statistiques multivariées

5.5.4.1. Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN)

Le traitement des données par Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode statistique multidimensionnelle permettant de synthétiser les informations dans le but de comparer les systèmes entre eux. L'ACP est particulièrement utilisée et adaptée (Biémi, 1992 ; Blavoux *et al.*, 1992 ; Savané, 1997 ; Oga, 1998 ; Soro, 2002 ; Hussein, 2004 ; Yidana *et al.*, 2006 ; Garry, 2007 ; Ahoussi, 2008 ; Ahoussi *et al.*, 2008) pour expliquer d'une part les ressemblances chimiques entre les différentes eaux et/ou les différents pôles d'acquisition de la minéralisation et d'autre part les variables qui gouvernent ces mécanismes. En effet, c'est une technique qui permet de prendre en compte un grand nombre de variables et d'échantillons. Etant une technique linéaire optimisant un critère quadratique, l'ACP ne tient pas compte d'éventuelles liaisons non linéaires et présente une forte sensibilité aux valeurs extrêmes (Garry, 2007). La disparité des gammes de chaque descripteur (par exemple la conductivité : 11,2 à 1097 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et les sulfates : 0 à 30 mg/L), nous impose de travailler sur des données centrées réduites pour leur donner le même poids afin de ne pas discréditer les variables dont les valeurs sont faibles.

L'analyse a porté sur 13 paramètres ou variables : T°C, Conductivité, pH, TAC, THT, Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, NO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, Mn et Fe. Au total 94 échantillons ou individus (unités statistiques) ont été retenus. Les résultats sont présentés soit en tableaux soit en diagrammes. Les tableaux nécessaires pour l'analyse sont les suivants :

- la matrice de corrélation ;
- les valeurs propres des facteurs ;
- les vecteurs propres ;
- les vecteurs de saturation ;
- les coefficients de corrélations multiples ;
- les composantes des individus.

L'ACPN d'une étude donnée n'est valable que lorsque les plans factoriels étudiés donnent plus de 70 % d'informations (Biémi, 1992). En dessous de cette limite, on considère que l'étude n'a pas tenu compte d'une grande quantité d'informations utiles qui restent cachées.

5.5.4.2. Cluster analysis ou Analyse en Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)

L'analyse de classification (Cluster Analysis) comprend un ensemble de techniques statistiques qui sont utilisées pour déterminer des groupes statistiques naturels ou des structures dans les données. Selon Hussein (2004), l'application de cette méthode en géologie a été introduite par Davis en 1986. Mais, c'est Erikson en 1985, qui donna l'information nécessaire de son application en hydrochimie. Cette méthode est donc couramment utilisée pour analyser les données hydrochimiques des eaux et vient en appoint de l'ACP (Hussein, 2004) ; Yidana et al., 2007). C'est un outil puissant pour l'analyse des données chimiques des eaux compte tenu de la complexité des systèmes hydrochimiques et des difficultés que l'on rencontre lors de leur interprétation.

Nous présentons ici le fondement mathématique de la méthode tel que proposé par Hussein (2004). Elle est basée sur le calcul de la distance euclidienne entre les individus ou observations dans un espace à n -dimensions. Premièrement, les données doivent être normalisées par le calcul de leurs moyennes à l'aide la formule 39

Soit :

$$K_{ij} = \frac{(X_{ij} - X)}{S_{ic}} \quad (\text{Eq.39})$$

où K_{ij} est la valeur normale de X_{ij} pour la $i^{\text{ème}}$ variable du $j^{\text{ème}}$ individu, X est la moyenne de la $i^{\text{ème}}$ variable et S_{ic} l'écart type.

La procédure adoptée donne un poids égal à chaque variable. Ainsi, la mesure de similarité est tout simplement la distance définie dans un espace euclidien (Hussein, 2004).

La distance entre deux individus (j, k) est donnée par la relation 40 suivante :

$$d_{ij} = \left[\sum_{i=1}^N (K_{ij} - K_{ik})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{Eq. 40})$$

Où K_{ik} représente la $K^{\text{ème}}$ variable mesurée sur l'objet i , et K_{jk} la $K^{\text{ème}}$ variable mesurée sur l'objet j .

Le résultat est donné sous forme d'un dendrogramme horizontal ou vertical (Figure 20) qui classe les observations ou variables par groupes ou sous-groupes ayant le même poids ou les mêmes caractéristiques. Cette méthode permet donc de faire un regroupement des observations ou variables en fonction des similarités qui existent entre celles-ci ou non.

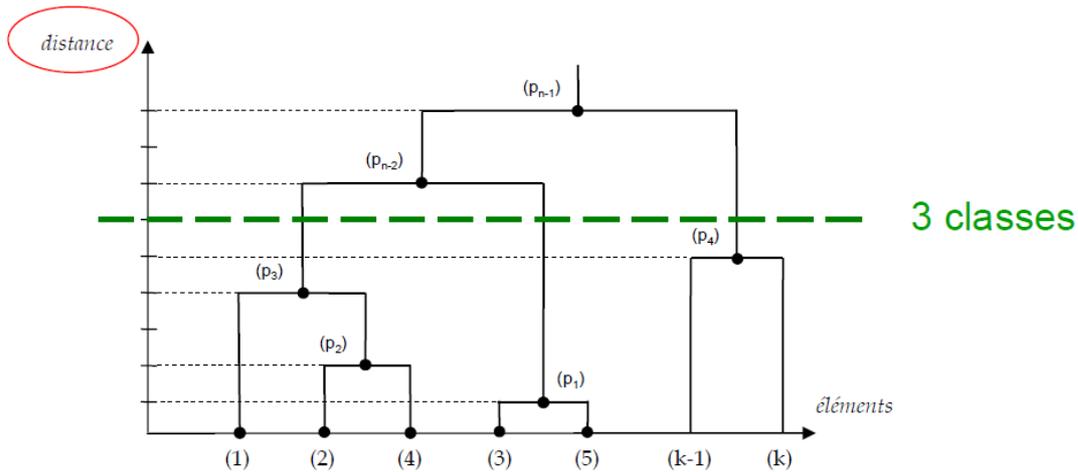


Figure 20 : Exemple de dendrogramme.

CONCLUSION PARTIELLE

L'étude hydroclimatique et la dynamique des modes d'occupation du sol ne pouvaient être occultées. Car elle permettra de comprendre les variations climatiques qui ont affectées la région des lacs afin de pouvoir la situer dans un contexte régional. De même, l'évolution spatio-temporelle des modes d'occupation du sol va permettre de mieux appréhender les effets de ces variations climatiques. En effet, la variabilité hydroclimatique et les modes d'occupation du sol ont très souvent un impact considérable sur les ressources en eau souterraine et de surface d'une région donnée.

La caractérisation des paramètres hydrodynamiques des aquifères de même que la fracturation de la zone d'étude vont permettre de mettre en évidence la qualité des réservoirs de fissures que captent les forages.

Les différentes méthodes d'étude hydrochimique appliquées dans ce chapitre permettront de caractériser la chimie des eaux souterraines de la zone d'étude. L'étude de la pression partielle du CO₂, des indices de saturation va apporter des informations capitales sur l'âge relatif des eaux dans les réservoirs de même que les conditions de circulation et d'alimentation des nappes. Ces techniques permettront de comprendre l'hydrodynamisme des aquifères et vont aider à la gestion durable des ressources.

Toutes ces méthodes ont permis d'obtenir des résultats. L'analyse de ces résultats ainsi que leur discussion feront l'objet de la troisième partie de ce travail.

**TROISIEME PARTIE :
RESULTATS ET DISCUSSION**

CHAPITRE 6 : VARIABILITE HYDROCLIMATOLOGIQUE DANS LA REGION DES LACS

6.1. PARAMETRES CLIMATIQUES

Les caractéristiques moyennes mensuelles et annuelles : amplitude, maximum et minimum de la température, de l'humidité et de l'insolation sont résumées dans le tableau X.

Tableau X: Statistique des paramètres climatiques mesurés à la station de Yamoussoukro.

Temperature	Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Annuelle
(75-97) (°C)	Min	23,8	26	26,4	26,5	25,7	24,2	24	23,8	24,3	24,8	24,3	22,5	24,7
	Max	26,9	28,3	29,1	28,6	27,1	26,3	25,7	25,4	25,8	26,3	26,3	25,8	26,8
	Amplitude	3,1	2,3	2,7	2,1	1,4	2,1	1,7	1,6	1,5	1,5	2	3,3	2,1
	Moy.	25,2	27,3	27,6	27,2	26,4	25,5	24,5	24,6	25,1	25,4	25,4	24,5	25,7
Sunstroke (91-95) (h/j)	Min	157	191	168	190	158	133	72	77	95	127	157	136	138,4
	Max	227	204	252	228	236	167	148	134	138	201	217	208	196,7
	Amplitude	70	13	84	38	78	34	76	57	43	74	60	72	58,3
	Moy.	204	198,8	206,4	208,4	208,6	153,8	108	93,2	118	165,8	181,8	181,6	169,0
Humidity (91-95) (%)	Min	56	61	67	72	75	77	80,1	75	75	75	73	63,4	70,8
	Max	66	66	72	75,3	78	80	83	81	80	78	78	71,2	75,7
	Amplitude	10	5	5	3,3	3	3	2,9	6	5	3	5	7,8	4,9
	Moy.	60,6	64,4	69,8	74,22	76,8	78,68	80,84	78,54	77,8	76,6	75,74	69,34	73,6

6.1.1. Température

La température moyenne annuelle est égale à 25,7 °C avec des écarts mensuels qui restent inférieures à 3 °C. La température maximale mensuelle est atteinte au début de la saison des pluies dans le mois de mars avec une valeur de 29 °C.

Nous disposons des données de températures moyennes mensuelles et annuelles à la station de Yamoussoukro avec les minima et les maxima (Tableau X).

La figure 21(a) permet de déceler trois saisons thermiques:

- une saison sèche qui s'étend de février à mai, mois pendant lesquels les températures mensuelles sont supérieures à la moyenne annuelle ;
- une saison humide qui part de juin à janvier. Le maximum de température est atteint en mars avec une moyenne de 27,7 °C, alors que le minimum d'environ 22,5 °C se situe en décembre.

L'amplitude thermique annuelle est maximale pour le mois de décembre (3,3) et minimale pour le mois de mai (1,4).

6.1.2. Humidité relative

L'humidité relative varie de 22 % à 68 % pour les valeurs minimales et de 92 % à 99 % pour les valeurs maximales mensuelles avec une moyenne annuelle de l'ordre de 73 % (Tableau X et Figure 21(b)). L'amplitude varie de 3 % à 10 %. Elle est très importante pendant les mois de décembre et janvier qui correspondent au début de l'harmattan où le vent est chaud et sec et entraîne une réduction importante du taux d'humidité dans l'atmosphère. Les forts taux d'humidité correspondent à la période des pluies. A cette période, l'atmosphère est saturée du fait de la saison de pluies.

6.1.3. Insolation

C'est un facteur qui joue un rôle très important dans la variabilité climatique d'une zone donnée. La figure 21(c) montre la variation mensuelle sur la période de 1991 à 1995. Nous constatons qu'elle évolue dans le même sens que la température. Ainsi, les fortes valeurs sont relevées au mois d'avril et mai qui correspondent au début de la saison des pluies tandis que les faibles valeurs s'observent en pleine saison des pluies où le pic est atteint en août. La durée moyenne annuelle de l'insolation à la station de Yamoussoukro est de 2028,4 h.an⁻¹ soit une durée moyenne journalière de 5 heures et demi

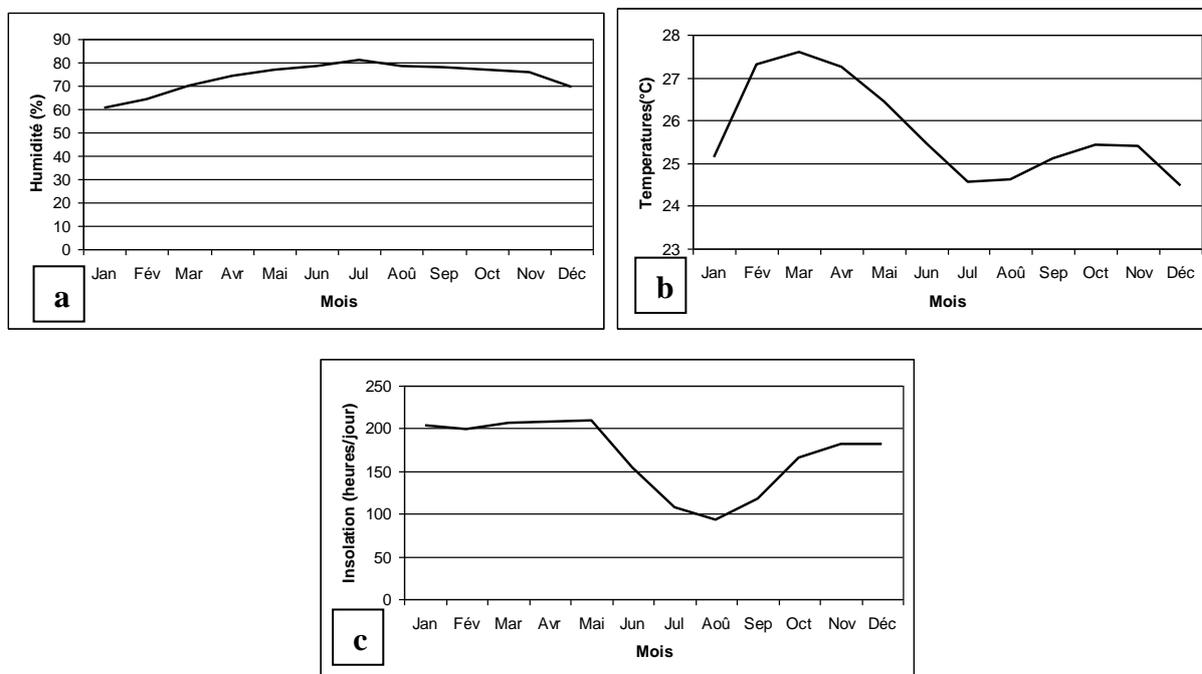


Figure 21 : Variation mensuelle paramètres climatiques à Yamoussoukro (a-Humidité (1991-1995) ; b-Température (1975-1997) ; c-insolation (1991-1995)).

6.2. ETUDE DE LA VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS

6.2.1. Caractéristiques statistiques des pluies

Les résultats des caractéristiques des précipitations aux stations de Tiébissou et de Yamoussoukro sont résumés dans le tableau XI.

Tableau XI: Paramètres statistiques des précipitations aux stations de Tiébissou et Yamoussoukro

Stations	PMoy. (mm)	Nombre d'années	PM (mm)	Pm (mm)	C.V	Ecart- type	PM/P m	Ei (%) PM	Ei (%) Pm
Tiébissou	1031	49	1424 (1984)	670 (1979)	17,53	181	2,12	38,08	-40,79
Yamoussoukro	1131	35	1439 (1984)	856 (1983)	13,97	158	1,68	27,18	-24,30

PM : Pluie maximale ; Pm : Pluie minimale ; Ei : Ecart à la moyenne

La pluie moyenne à Yamoussoukro sur la chronique de 35 ans (1966-2000) est de 1131,40 mm. La pluie maximale est de 1439 mm en 1984 et la plus faible hauteur de précipitations est de 856 mm en 1983. À la station de Tiébissou, les précipitations varient de 670 mm (1979) à 1424 mm (1984) avec une moyenne de 1031mm sur une chronique de 49 ans. Le coefficient d'irrégularité du régime des précipitations annuelles : rapport du module de l'année la plus humide P_M à celui de l'année la plus sèche P_m est en moyenne de 1,68 à la station de Yamoussoukro et de 2,12 à celle de Tiébissou. Ceci traduit une faible irrégularité dans le régime pluviométrique de la zone d'étude. Le phénomène de variabilité inter annuelle des modules pluviométriques est donné par le coefficient de variation (C_v). Les valeurs du CV aux stations de Yamoussoukro et de Tiébissou sont respectivement de 13,97 % et de 17,53 %. Ces coefficients sont inférieurs à 100 traduisant une faible variabilité dans les précipitations. On remarque que ce coefficient varie dans le même sens que celui du coefficient d'irrégularité confirmant ainsi la faible variabilité inter annuelle des précipitations dans la zone d'étude. L'étude de la variabilité sera abordée dans la suite de ce chapitre à partir d'autres méthodes.

6.2.2. Etude de la saisonnalité

La distribution temporelle des pluies à l'échelle annuelle a été étudiée à partir des précipitations moyennes mensuelles calculées respectivement sur la période 1974-2000 pour la station de Yamoussoukro et 1986-1995 pour Tiébissou. Les diagrammes ombrothermique de

Baagnouls et Gausson utilisés pour caractériser le début et la durée des saisons sont représentés par les figures 22 et 23. L'analyse de ces graphes montre que le régime pluviométrique aux stations de Yamoussoukro et de Tiébissou est de type bimodal. A la station de Yamoussoukro (figure 22), certaines remarques sont à relever :

- de janvier à mars, la température et la pluviométrie augmentent avec un léger déphasage entre les deux paramètres ;
- d'avril à juillet les deux paramètres évoluent en sens inverse, l'augmentation des précipitations s'accompagne d'une baisse des températures ;
- d'octobre à décembre, la baisse des précipitations s'accompagne par une baisse de la température. Cette situation est due à l'harmattan qui souffle en saison sèche, entraînant par la même occasion la baisse des températures.

Le constat précédent est valable à la station de Tiébissou (Figure 23). En effet, on note dans la zone une saison sèche qui dure quatre mois et qui part de novembre à février avec une pluviométrie inférieure à 50 mm par an et une température faible inférieure à 25° due notamment au vent frais et sec de l'harmattan. Les mois de janvier, février novembre et décembre sont secs car la précipitation est inférieure ou égale à deux fois la température. Ainsi, dans la zone d'étude la période sèche s'étale sur 4 mois contre 8 pour la période humide (mars à octobre). Cependant, cette période humide n'est pas continue en termes de pluviosité. On peut donc la découper deux périodes:

- une première période qui dure quatre mois et qui part de mars à juillet avec un pic en juin. Cette période pourrait être qualifiée de grande saison des pluies ;
- la deuxième période qui part d'août à octobre avec un pic en septembre et qui dure trois mois. La deuxième période correspond à la petite saison des pluies.

Cependant, si le phénomène de variabilité des précipitations mensuelles ou saisonnières se prête facilement à l'analyse, vu son caractère tranché dans les bassins, il est néanmoins, malaisé de définir des saisons pluviométriques spatialement homogènes. En effet, le régime des précipitations est déterminé par des variantes à la fois géographiques et météorologiques.

En somme, dans la zone étudiée, on peut regrouper les saisons en trois périodes :

- une grande saison des pluies qui va de mars en juillet ;
- une petite saison des pluies d'août à octobre ;
- une saison sèche de novembre à février.

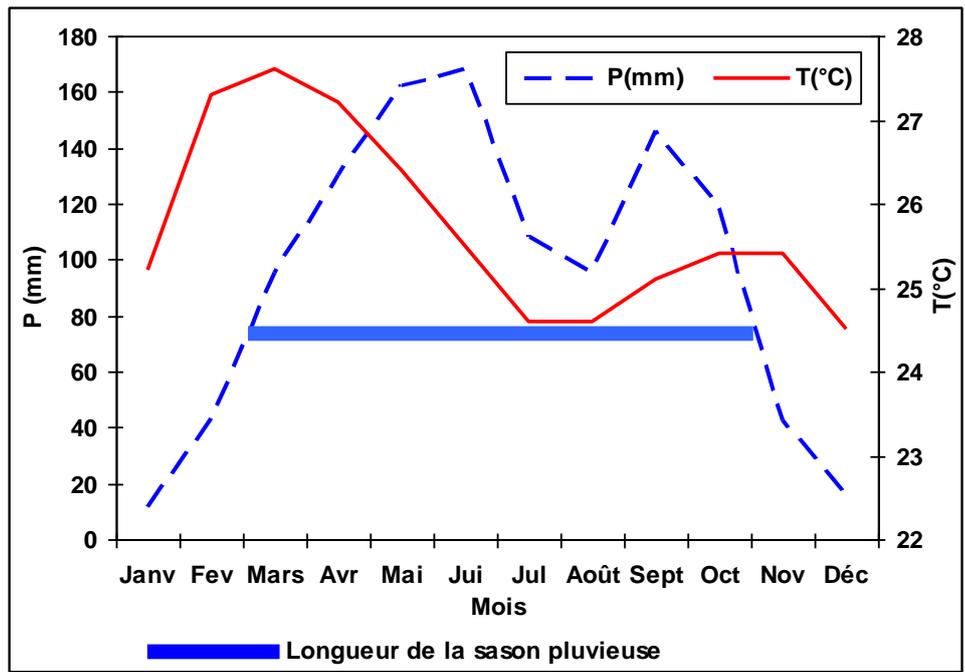


Figure 22 : Diagramme ombro-thermique à la station de Yamoussoukro (1975-1997).

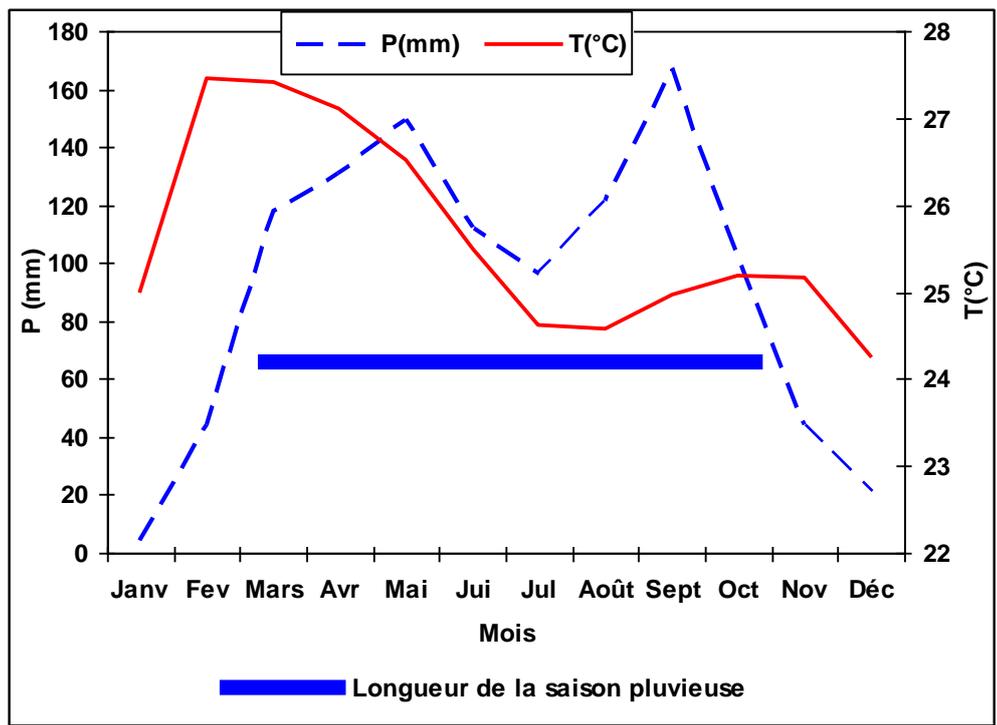


Figure 23 : Diagramme ombro-thermique à la station de Tiébissou (1986-1995).

6.2.3 Variations spatiales des précipitations annuelles

6.2.3.1. Déplacement des isohyètes dans la zone d'étude

L'analyse du déplacement des isohyètes de 1966 à 2000 a été effectuée en découpant la série en quatre périodes (Figure 24). La première période qui va de 1966 à 1975 montre que les stations de Yamoussoukro et de Tiébissou sont comprises entre les isohyètes 1100 et 1200. De 1976 à 1985, l'isohyète 1200 s'est éloignée de Yamoussoukro et Tiébissou laissant place à l'isohyète 1100. Si la station de Yamoussoukro se situe encore entre les isohyètes 1100 et 1200, ce n'est pas le cas pour la station de Tiébissou. Cette station est comprise entre les isohyètes 1100 et 1000. Au cours de la période 1986-1995, on assiste à une dominance de l'isohyète 1100 sur la partie nord de la zone d'étude au détriment de l'isohyète 1200. Cette situation semble cependant évoluer fortement dans la dernière période (1996-2000). En effet, l'isohyète 1200 est remontée jusqu'à atteindre Béoumi plus au Nord. Quant à l'isohyète 1100, son aire de répartition s'est considérablement réduite par rapport à la période précédente. En somme, les isohyètes fluctuent selon les périodes, mais les isohyètes 1200 et 1100 caractérisent la zone d'étude. La figure 25 présente la synthèse des isohyètes interannuelles de 1966 à 2000 dans le « V » baoulé. On remarque qu'au Sud de la zone, les isohyètes sont élevées et elles diminuent au fur et à mesure que l'on monte en latitude. Et la zone d'étude est comprise entre les isohyètes 1200 et 1000. On assiste à une évolution décroissante de la pluviométrie entre 1966 et 2000 selon un gradient SW-NE qui traverse le « V » Baoulé et ses environs dans le sens de la direction des vents dominants (la mousson SW et l'Harmattan NE). Ce comportement des isohyètes par rapport à la latitude nous amène à étudier la relation pluie et coordonnées géographiques. Dans cette étude, nous avons retenu la latitude au détriment de l'altitude compte du fait que cette zone est relativement homogène. La figure 26 montre la relation pluie/latitude dans le « V » baoulé. La pente de la droite de régression est négative et proche de zéro. On observe également un coefficient de détermination significatif ($r = 0,7205$) entre la latitude et la pluviométrie. Cette analyse nous amène à faire deux remarques. Le fait que la pente soit négative traduit une décroissance du taux pluviométrique lorsqu'on part du Nord au Sud. On a donc un gradient Nord-Sud. Par ailleurs, la qualité du coefficient de régression montre qu'il existe dans le « V » baoulé en général et dans la zone d'étude en particulier une relation entre latitude et répartition spatiale des précipitations. Ce résultat montre que la latitude agit à un fort degré sur la variabilité spatiale de la pluviométrie dans la zone.

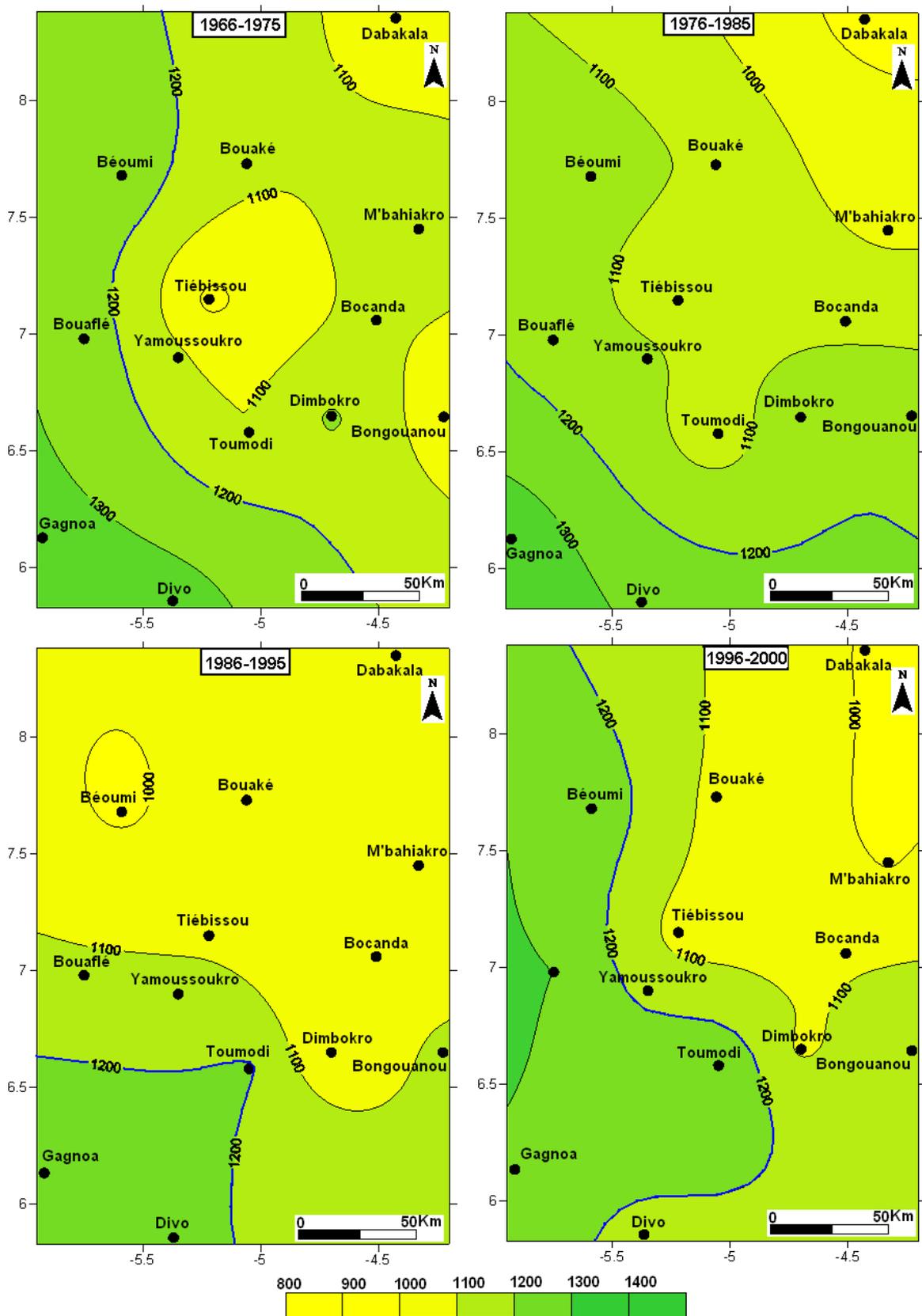


Figure 24: Dynamique spatio-temporelle des isohyètes dans le V baoulé (1966-2000).

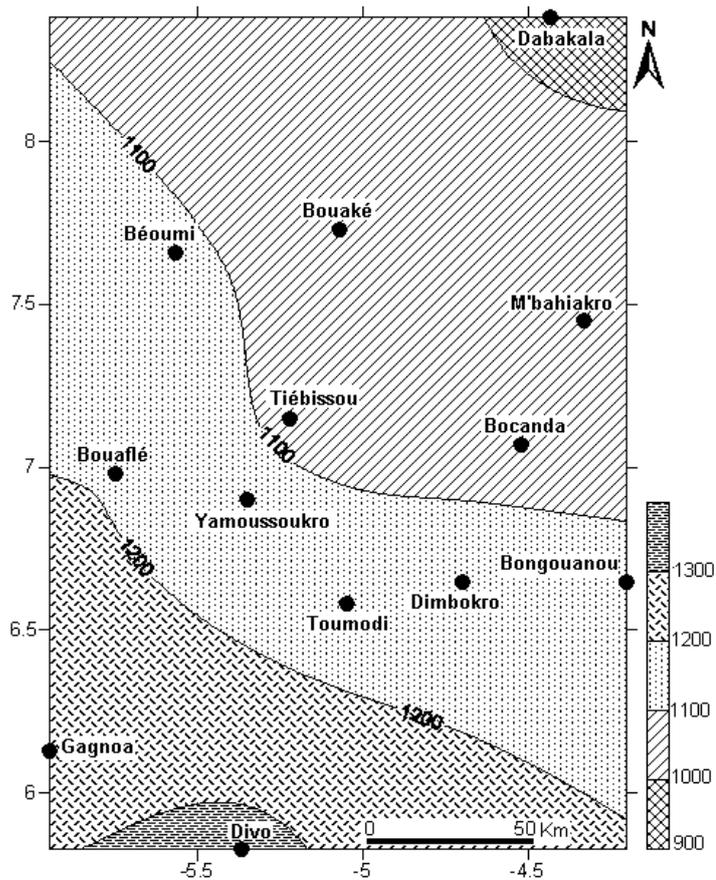


Figure 25 : Carte des isohyètes de 1966-2000 dans le V Baoulé et environ.

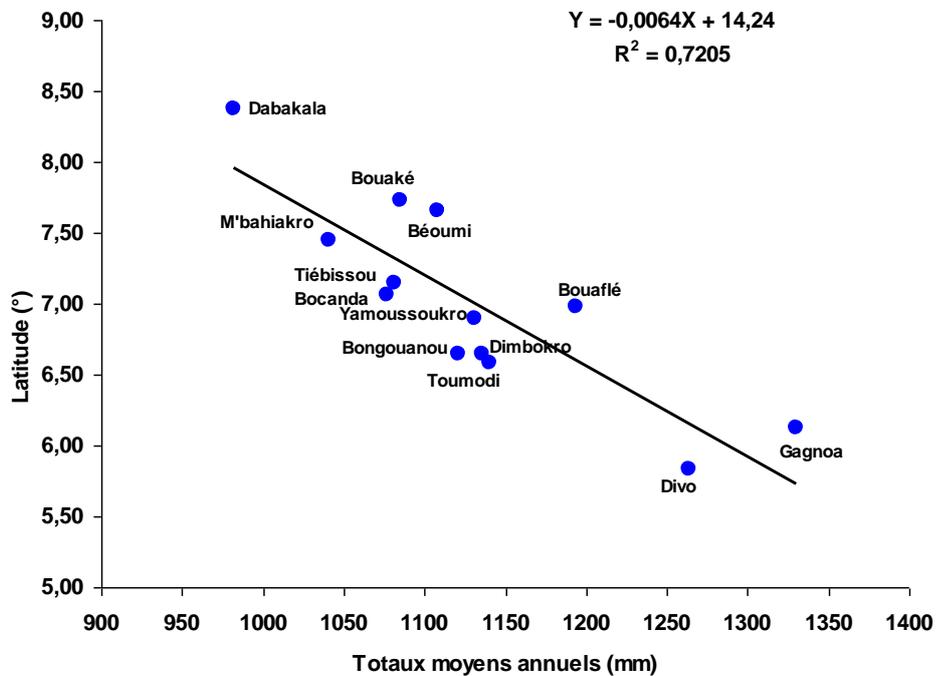


Figure 26 : Couplage pluies et coordonnées géographiques : relation pluie/latitude.

6.2.3.2. Etude de la dynamique spatiale des précipitations par l'ACP

L'analyse des résultats montre que la somme des trois premières composantes explique 70,4 % (Tableau XII) de la variance exprimée. En d'autres termes, les trois premiers facteurs regroupent à eux seuls l'essentiel de l'information recherchée.

Tableau XII : Valeurs propres et pourcentages de variance exprimée

<i>Facteurs</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Valeurs propres	5,99	1,46	1,00	0,88	0,60
Pourcentage exprimé	49,95	12,20	8,30	7,34	4,97
Pourcentage cumulé	49,95	62,15	70,45	77,79	82,76

o *Contribution du premier facteur*

Le premier axe factoriel F1 explique plus de 49,95 % de la variance ; autrement dit, la part de l'information expliquée par F1 par rapport à la totalité de l'information apportée par les douze variables est telle que les coefficients de corrélation entre F1 et chaque variable sont élevés, très proches les uns des autres. Ce fort pourcentage traduit une redondance entre tous les postes pluviométriques. La représentation dans le plan des coefficients de corrélation entre les douze variables, que sont les douze stations de mesure, et le premier puis le second axe factoriel est donné par la figure 27. L'analyse de cette figure montre que dans le plan factoriel F1-F2, le regroupement des variables se présente en deux sous populations.

o *Contribution du deuxième facteur*

Le premier groupe de variables composé des stations (groupe A : Dabakala, M'bahiakro, Bocanda, Bongouanou, Dimbokro, Toumodi), présente des valeurs positives de r_{F2} , coefficient de corrélation de l'axe factoriel F2 avec les différentes variables. Ces stations de mesures sont localisées au Nord-Est de Yamoussoukro.

Le deuxième groupe (Groupe B : Bouaké, Béoumi, Bouaflé, Divo, Gagnoa) présente des valeurs de r_{F2} négatives. Les stations de Divo et Gagnoa sont situées au Sud-Ouest de la ville de Yamoussoukro et celles de Bouaké, Béoumi et Bouaflé au Nord.

En conclusion, le facteur F2 met en évidence le gradient pluviométrique qui traverse la zone d'étude. Les résultats de L'ACP confirment le gradient pluviométrique défini par les isohyètes.

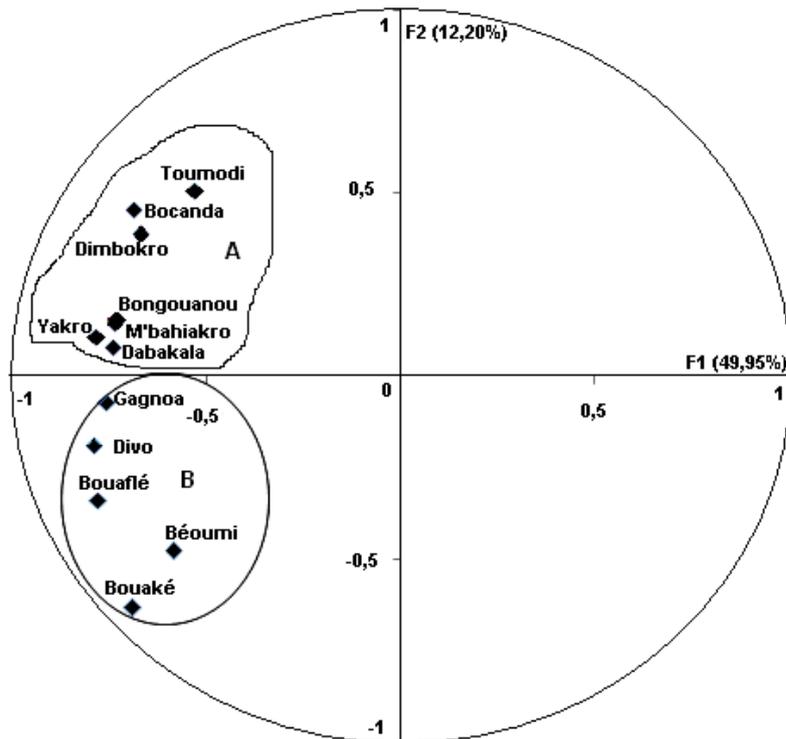


Figure 27: Espace des variables (stations pluviométriques) dans le plan F1-F2.

6.3. FLUCTUATION INTERANNUELLE DE LA PLUVIOMETRIE

6.3.1. Analyses des indices pluviométriques

La variabilité interannuelle des précipitations a été abordée avec deux méthodes différentes en vue de déterminer les périodes déficitaires et excédentaires. Le tableau des indices pluviométriques calculés est consigné dans un tableau en annexe II.

Les figures 28A et 29A montrent que l'évolution interannuelle des précipitations respectivement à la station de Yamoussoukro et Tiébissou. Après le filtrage des données, la variabilité reste encore relativement importante (figures 28B et 29B). Néanmoins, cette méthode permet de faire apparaître plus ou moins nettement les périodes d'excédent et de déficit pluviométriques.

La fluctuation interannuelle de la pluviométrie à Yamoussoukro se caractérise par trois principales périodes. Une période déficitaire allant de 1966 à 1979 avec une hauteur moyenne annuelle de 1108,69 mm et une période normale qui va de 1980 à 1989 avec une hauteur moyenne annuelle de 1134 mm. Enfin de 1990 à 2000, on constate une période globalement humide avec 1156,48 mm de pluie moyenne annuelle.

La moyenne de cette période est supérieure à la moyenne observée sur toute la période d'observation qui est de 1131mm de hauteur de pluie. Cette période humide a connu trois années de sécheresse dont la plus forte est située entre 1991 et 1992.

Au niveau de la station de Tiébissou, nous pouvons distinguer quatre périodes :

- de 1951 à 1959 une période humide (1260 mm);
- de 1960 à 1970 une période normale (1186 mm) ;
- de 1971 à 1994 une période sèche (1034 mm) avec trois années pluvieuses qui sont 1983, 1984 et 1985;
- et de 1995 à 2000 (1086 mm) on constate une reprise de la pluviométrie sur les trois premières années de 1995 à 1997 suivie par une chute de la pluviométrie.

A la lumière de ce qui précède, nous pouvons dire qu'il y a une baisse de la pluviométrie dans la zone d'étude. Cette baisse est observée dans toute l'Afrique de l'Ouest et dans le Golfe de Guinée se traduisant par une sécheresse dont l'impact est fortement ressenti sur le régime des cours d'eau. La cartographie des indices pluviométriques de 1966 à 2000 est donnée par la figure 30. A l'analyse de cette figure, on remarque que durant la période 1966-1975, la zone d'étude évolue globalement dans une phase d'humidité. Le front d'humidité est plus fort à l'Est de la zone. Il diminue au fur et à mesure qu'on avance vers l'Ouest. Au cours de la période 1976-1985, le front d'humidité diminue selon un gradient Sud-Est Nord-Ouest.

Les stations de Yamoussoukro et de Tiébissou, dans lesquelles on ressentait déjà à la période précédente un déficit pluviométrique connaissent une légère baisse de ce déficit. La période 1986-1995 se traduit au niveau de Yamoussoukro et de Tiébissou par une phase d'humidité mais toutefois celle-ci n'est pas très forte. Par contre, à la période 1996-2000, on assiste à une phase de déficit à ces stations. On note qu'au cours de la période 1966-2000, la zone d'étude est sous l'influence constante d'une variation d'épisodes secs et pluvieux.

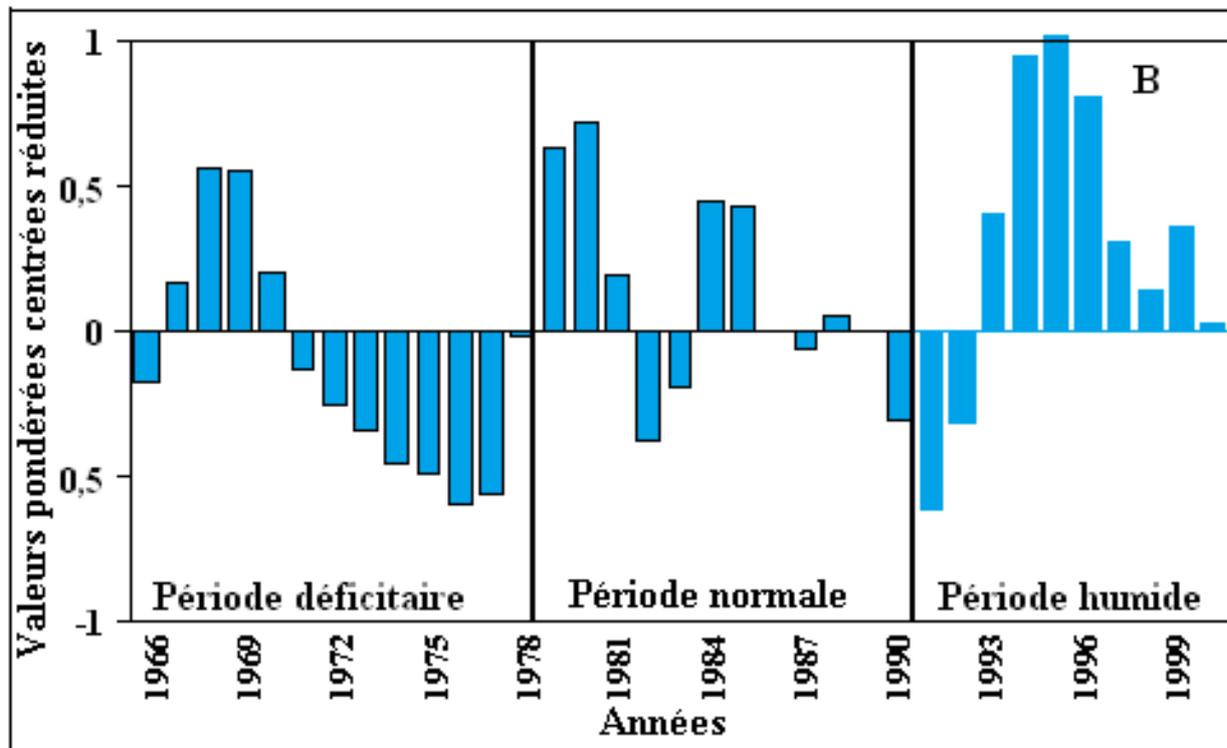
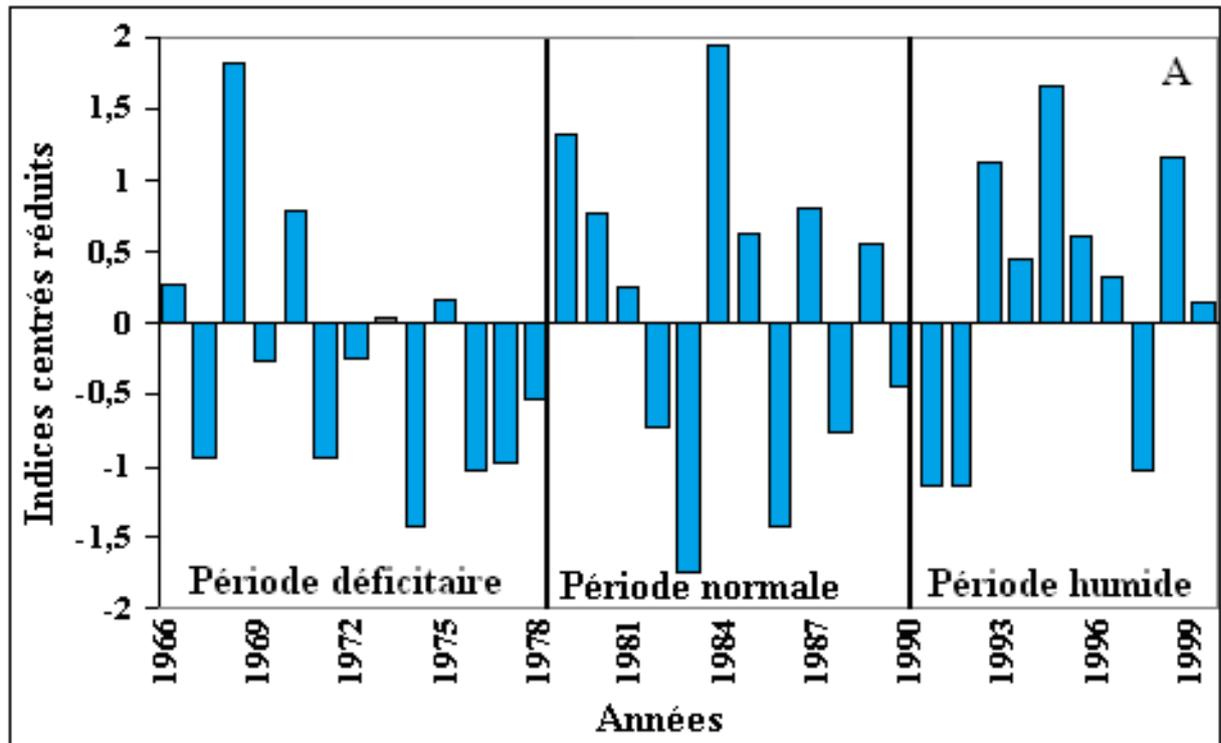


Figure 28. Evolution interannuelle de la pluviométrie à Yamoussoukro :
 A-indices centrés réduits et B-valeurs pondérées centrées réduites.

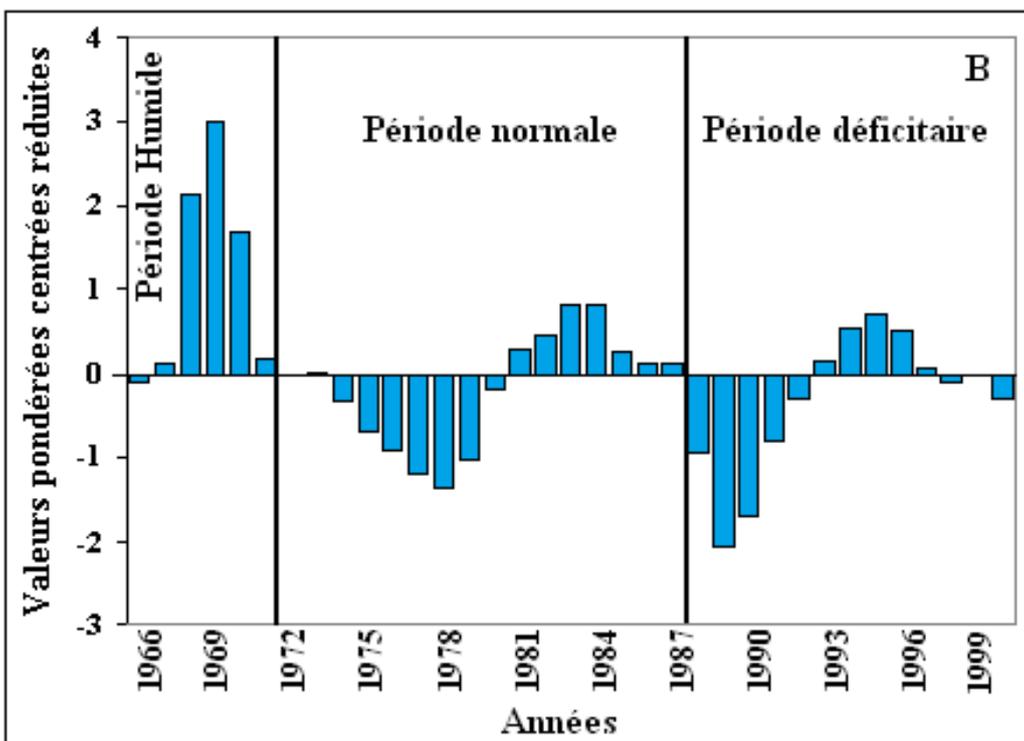
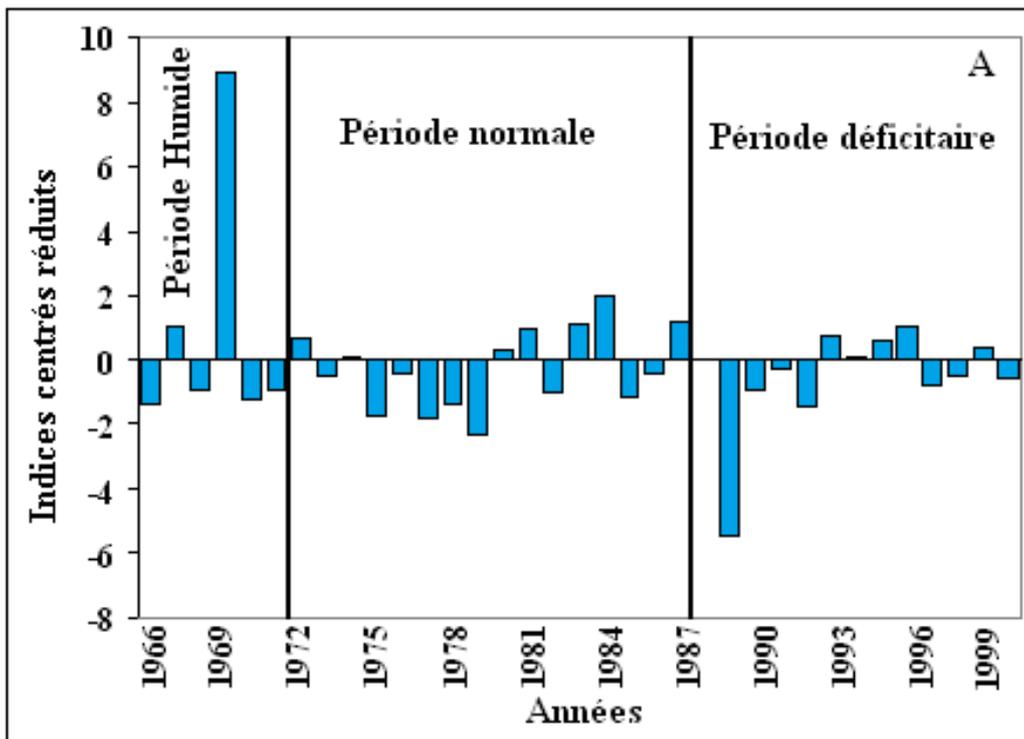


Figure 29. Evolution interannuelle de la pluviométrie à Tiébissou :
 A-indices centrés réduits et B-valeurs pondérées centrées réduites

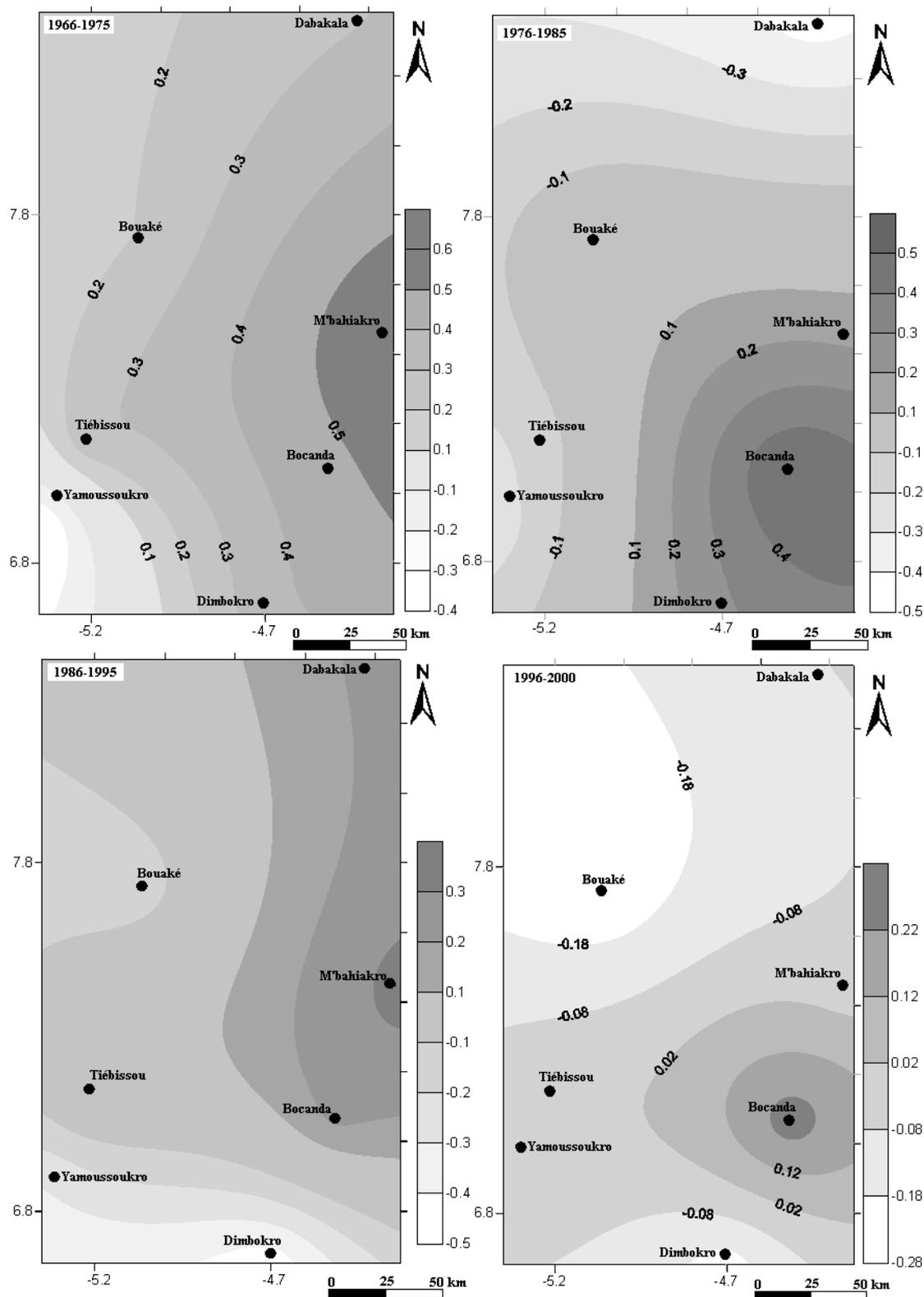


Figure 30: Evolution spatiale des indices pluviométriques décennaux de 1966 à 2000 dans le « V » Baoulé.

6.3.2. Examen de l'homogénéité des séries

La détection des moments probables de rupture dans les séries annuelles vise à confirmer les schémas déjà décrits. L'utilisation du test de Pettitt nous a permis d'avoir une idée sur cette période. Les figures (31 et 32) suivantes montrent la représentation graphique de la variable U de Pettitt pour les deux stations de notre zone d'étude couplée avec les précipitations annuelles.

A la station de Yamoussoukro, une rupture s'est opérée en 1970 et elle est caractérisée par une diminution des précipitations. A la station de Tiébissou, la rupture s'est opérée en 1963 et elle se traduit également par une diminution de la pluie. Comme nous l'avons souligné plus haut, on constate donc qu'il y a une diminution du déficit pluviométrique et donc l'effet contraire semble vraisemblablement être une tendance à l'augmentation des précipitations après la décennie 90. Par ailleurs, la probabilité de dépassement de la valeur critique du test de Pettitt est environ égale à 90 % pour les deux séries observées. De ce fait, les ruptures détectées ne sont pas trop significatives. Statistiquement, ceci indique que l'on a des séries homogènes et que la moyenne des hauteurs annuelles de pluie n'a subi aucun changement significatif.

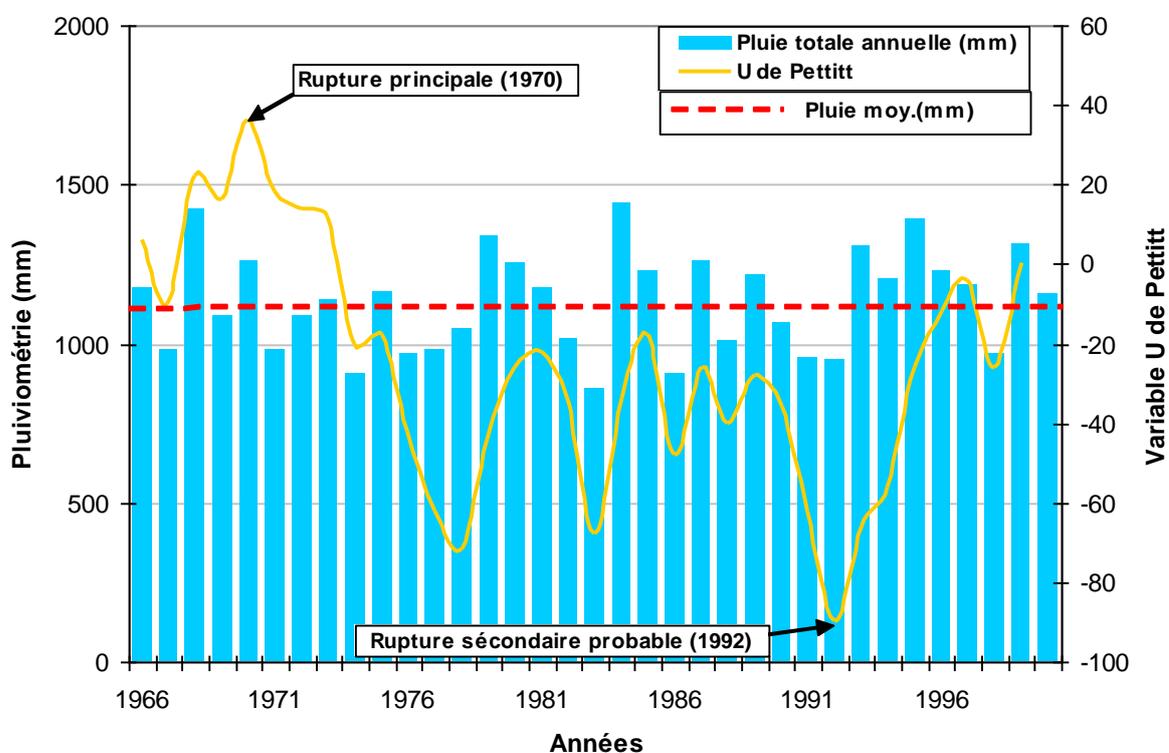


Figure 31: Fluctuations couplées de la variable U de Pettitt et de la pluviométrie station de Yamoussoukro.

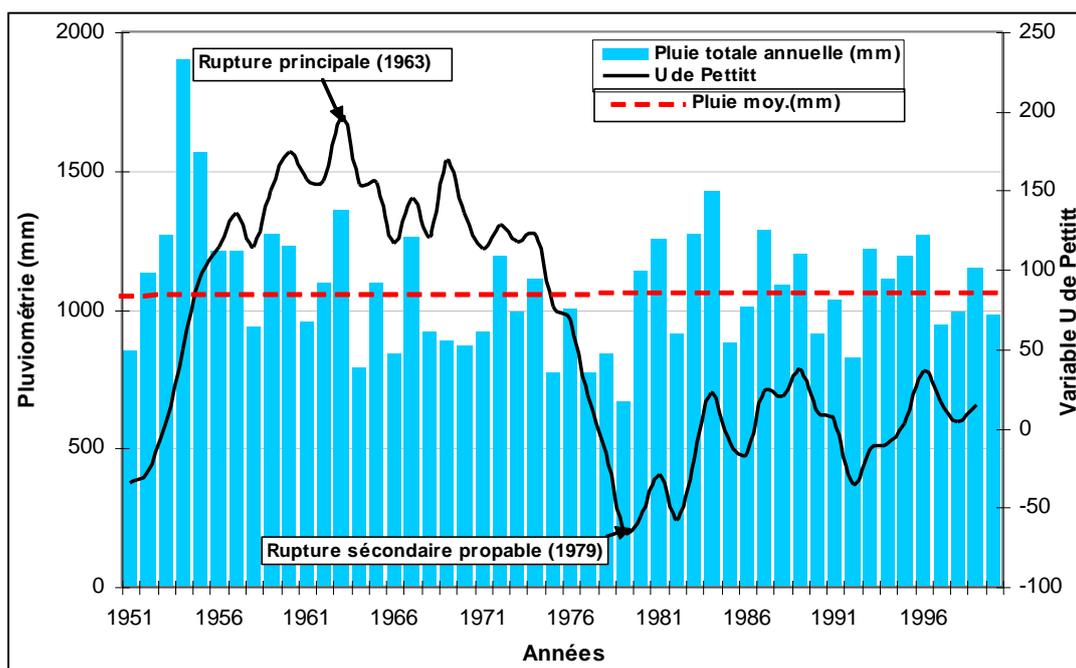


Figure 32: Fluctuations couplées de la variable U de Pettitt et de la pluviométrie station de Tiébissou.

6.4. BILAN HYDROLOGIQUE

Le bilan hydrologique selon Thornthwaite a été établi avec les données climatiques de la station de Yamoussoukro (Tableau XIII). La période choisie va de 1975 à 1995. Cette période est complète au niveau des données de température pour les deux stations. La valeur 100 mm a été retenue pour la RFU compte de la nature argilo-sableuses des terrains (Biémi, 1992 ; Soro, 2002 ; Saley, 2003 ; Jourda, 2005). Le mois de mai a été choisi comme le mois de départ de l'année hydrologique. La synthèse du bilan hydrologique de la zone d'étude est résumée dans le tableau XIV.

Tableau XIII: Bilan hydrique à la station de Yamoussoukro (Période 1975-1995).

Parameters (mm)	<i>J</i>	<i>F</i>	<i>M</i>	<i>A</i>	<i>M</i>	<i>J</i>	<i>Jt</i>	<i>A</i>	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>D</i>	<i>Total</i>
<i>P</i>	11	43	95	130	162	178	108	96	145	118	42	16	1144
ETP	110	130	155	151	118	122	106	108	111	117	113	102	1443
ETR	11	43	95	130	118	122	106	108	111	117	113	45	1119
RFU (Ri)	0	0	0	0	44	100	100	88	100	100	29	0	561
Δ RFU	0	0	0	0	44	56	0	-12	12	0	-71	-29	0
Deficit agricole	99	87	60	21	0	0	0	0	0	0	0	57	324
Excédent du bilan	0	0	0	0	0	0	2	0	22	1	0	0	25
Ecoulement	1	0	0	0	0	0	1	1	10	7	3	2	25

Tableau XIV : Résumé du bilan hydrique dans la zone d'étude.

Parameters	Quantities
P (mm)	1122
ETP (mm)	1469,00
ETR (mm)	1033,00
Excess (mm)	89,00
Deficit (mm)	435,80
(E+I) (mm)	89,00
I (mm)	40,73
Volume infiltré (m ³)	2,44.10 ⁹

A la fin du mois de mai, la réserve d'eau épuisée depuis le mois d'avril, a reçu 44 mm, les précipitations étant nécessairement supérieures à l'ETP, l'évapotranspiration se réalise normalement. Le mois de juin a une disponibilité de $178-122 = 56$ mm portant ainsi la réserve souterraine à 100 mm.

- Excédent du bilan

Les mois de mai, juin et septembre correspondent respectivement à la grande et à la petite saison des pluies. Les précipitations sont supérieures à l'ETP. Dans ce cas, l'évapotranspiration se réalise sans difficulté ($ETP = ETR$) et la RFU sous-saturée en mai (44 mm), va atteindre la saturation au mois de juin et juillet ($RFU = 100$). Au mois septembre et octobre, on observe également une saturation. Ces mois représentent les périodes de recharge des nappes profondes. L'excédent du bilan est de 103 mm à la station de Yamoussoukro et de 89 mm pour l'ensemble de la zone d'étude. Il représente la pluie efficace ou « water surplus » de Thornthwaite et, correspond à la quantité disponible pour l'alimentation de surface et des nappes profondes. Cet excès va s'écouler vers les cours d'eau de surface et dans les zones inondables des plaines, il pourra également servir à alimenter les aquifères par le phénomène de l'infiltration en empruntant les failles et les fractures qui constituent des drains privilégiés des nappes.

- Déficit du bilan

Lorsque la RFU est épuisée, de décembre à avril qui correspond à la période de la saison sèche, l'ETP ne peut être satisfaite entièrement ($P \ll ETP$). La différence entre l'ETP et l'ETR calculée, constitue le déficit d'eau (water deficiency de Thornthwaite) que l'on appelle le « déficit agricole ». A la station de Yamoussoukro, le déficit agricole qui constitue les

besoins en eau d'irrigation s'élèvent à 429 mm. Pour l'ensemble de la zone d'étude, il est de 435,80 mm soit 38,80 %.

- Déficit d'écoulement

La hauteur moyenne des précipitations sur l'ensemble de la zone d'étude au cours de la période de 1975 à 1995 est de 1122 mm (Tableau XIV). On remarque que l'ETR est de 1033 mm soit environ 97,8 % des précipitations. Seulement 2,2 % seront destinées à l'infiltration et au ruissellement. L'évapotranspiration est donc très importante dans la zone d'étude, toutefois, cette perte est compensée par une saison de pluie qui dure huit mois.

- Alimentation des nappes souterraines

Le ruissellement moyen calculé pour l'ensemble de la zone d'étude est de 49,2 mm et la quantité d'eau infiltrée est estimée à 40,73 mm (Tableau XIV). Cette lame d'eau infiltrée correspond à un volume d'eau disponible pour la recharge des aquifères de la région pour une superficie de 6000 km². Ce volume d'eau est estimé à 2 443 800 000 m³ ou 24 438 10⁵ m³.

6.5. TARISSEMENT ET VOLUME MOBILISE PAR LES AQUIFERES DU KAN

La lame d'eau d'écoulée sur le bassin versant du Kan est de 80,77mm pour un débit moyen évalué sur la sur la période 1970 à 1995. Le coefficient de ruissellement déduit est de 7,21%. Les résultats des valeurs caractéristiques du coefficient de tarissement et du volume mobilisé par les aquifères sont représentés dans le tableau XV et la figure 32 montre l'évolution du coefficient annuel sur la période de 1970 à 1995. L'analyse du tableau XV montre que les coefficients de tarissement varient de $2,21 \cdot 10^{-2}$ à $1,02 \cdot 10^{-1} \text{ J}^{-1}$ avec une moyenne de $5,93 \cdot 10^{-2} \text{ J}^{-1}$. Le faible coefficient de variation ($39\% < 100\%$) indique que les valeurs sont très peu disparates et qu'elles se concentrent autour de la moyenne. Les volumes mobilisés par les aquifères sont compris entre 0,048 et 0,491 km³ avec une moyenne de 0,158 km³. Tout comme le coefficient de tarissement, le coefficient de variation indique que les volumes mobilisés sont également très peu dispersés.

Tableau XV : Paramètres statistiques caractéristiques du Kan

Paramètres	MIN	MAX	Moyenne	Ecart-type	CV (%)
Coefficient de tarissement (J^{-1})	$2,21 \cdot 10^{-2}$	$1,02 \cdot 10^{-1}$	$5,93 \cdot 10^{-2}$	$2,33 \cdot 10^{-2}$	39,306
Volume (Km^3)	0,048	0,491	0,158	0,101	63,653

Le régime du tarissement est établi à partir de courbes de tarissement réalisées en utilisant les débits journaliers enregistrés à la station du Kan (figure 33). La durée moyenne du tarissement varie entre 120 jours (4 mois) et 150 (5 mois). Les courbes présentent souvent des ondulations qui peuvent être interprétées comme l'influence de pluies locales, toutefois, le tarissement au niveau du Kan est régulier de façon générale.

La courbe d'évolution du tarissement combinée avec celle du volume mobilisé (Figure 34) montre une augmentation du tarissement contrairement au volume mobilisé qui tend à décroître. De même, on remarque que les faibles volumes mobilisés correspondent à des tarissements élevés des nappes. Au fort coefficient de tarissement correspondent des volumes mobilisés faibles et vice-versa. En dehors de 1980 et 1985 où les volumes mobilisés sont élevés, tout le reste de la période présente de faibles volumes mobilisés par les aquifères. Ces années correspondent également à de faibles coefficients de tarissement.

L'analyse de la figure 35 montre que de 1970 à 1979, les indices des volumes mobilisés fluctuent très peu. En 1980, on assiste à un pic qui correspond à la recharge des nappes. Cependant, entre 1981 et 1984, on assiste à une vidange subite des nappes surtout en 1982 et 1983. Cette situation a entraîné des étiages extrêmes. En 1985, un nouveau pic de recharge des nappes se produit suivi par une nouvelle période de vidange de celles-ci. La baisse des volumes mobilisés serait liée à une réduction de la pluviométrie et probablement aux prélèvements agricoles qui ont lieu à travers les retenues d'eau. En effet, la zone d'étude regorge une grande partie des retenues d'eau à usage multiples de la Côte d'Ivoire.

La caractérisation du tarissement et des volumes mobilisés par les aquifères montrent que le bassin versant du Kan subit l'impact de la variabilité hydroclimatique. En effet, on assiste à une hausse des coefficients de tarissement et une baisse des volumes mobilisés par les aquifères. Cette étude a permis de confirmer que la faible contribution des écoulements de base, du fait d'apports réduits des nappes phréatiques, est un phénomène durable.

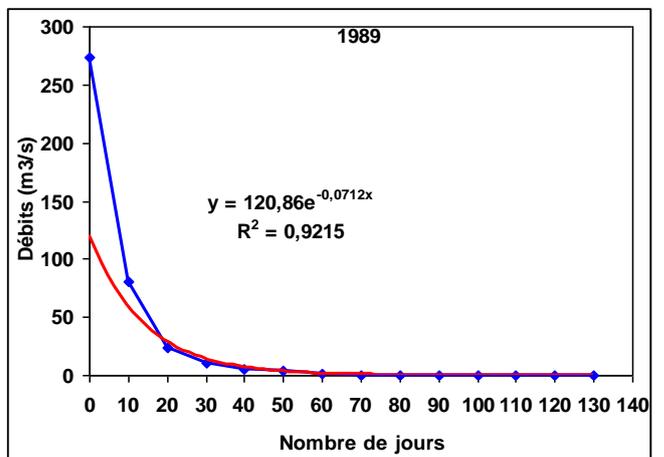
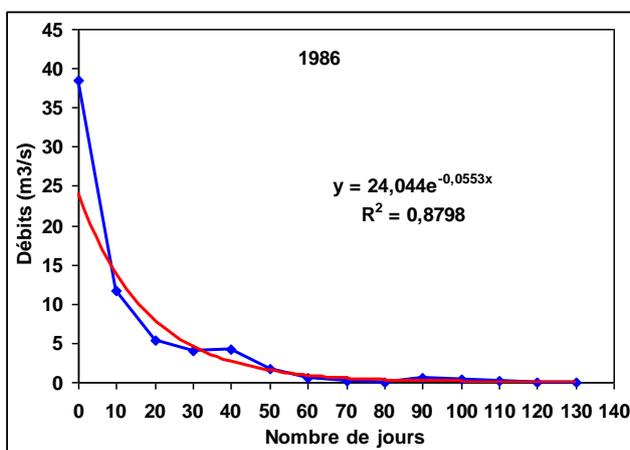
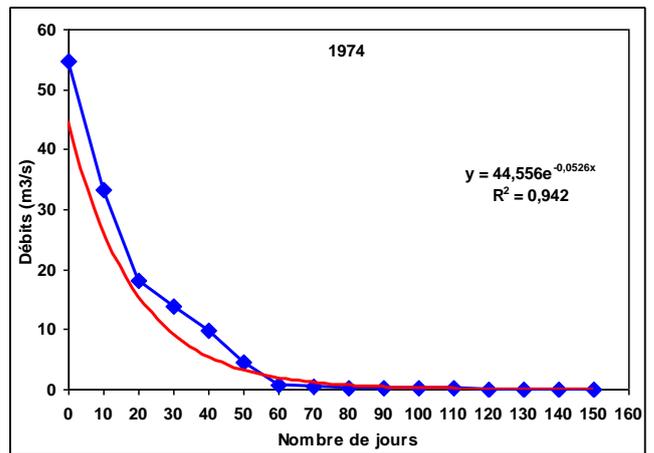
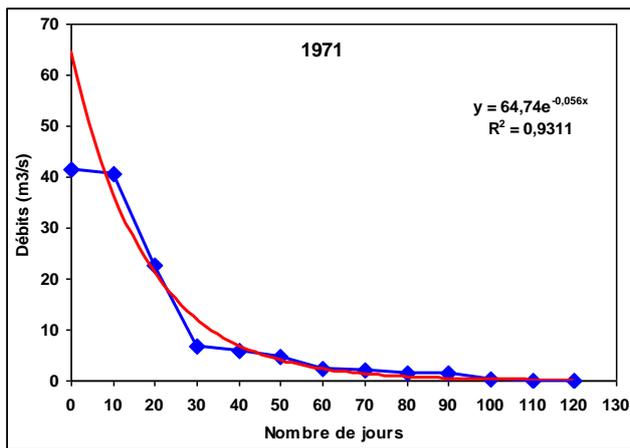


Figure 33: Exemple de courbes de tarissement du Kan à Dimbokro.

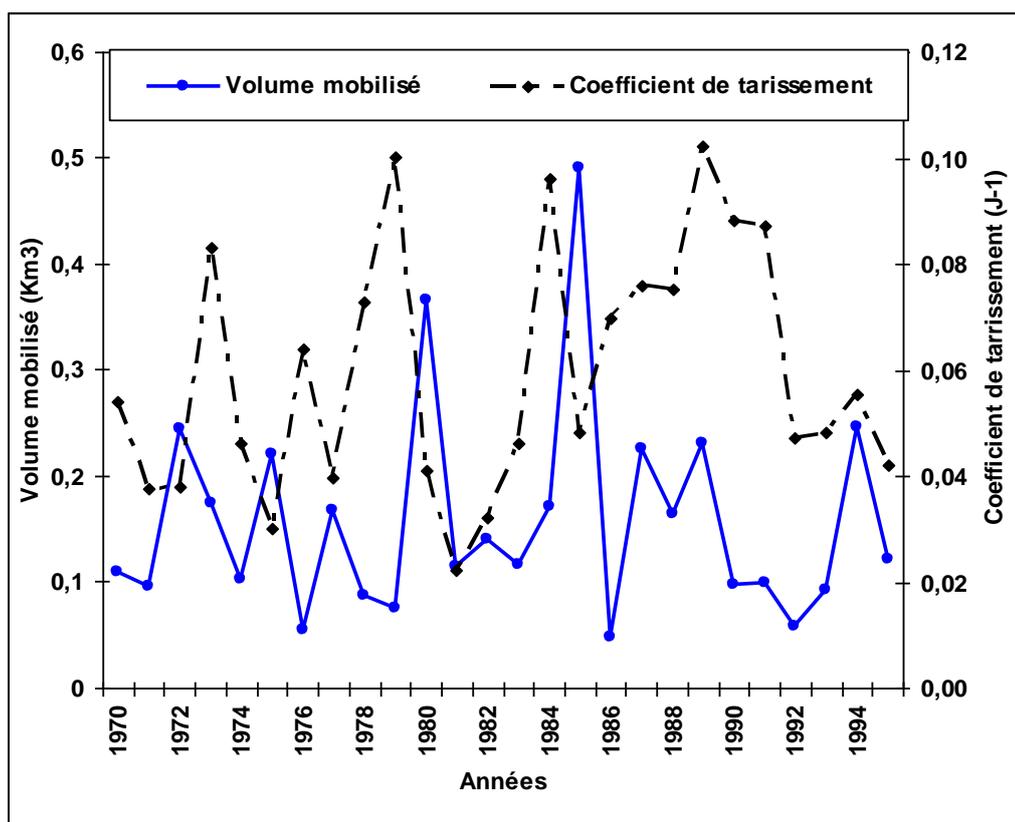


Figure 34: Evolution du coefficient de tarissement et du volume mobilisé Kan (1970-1995).

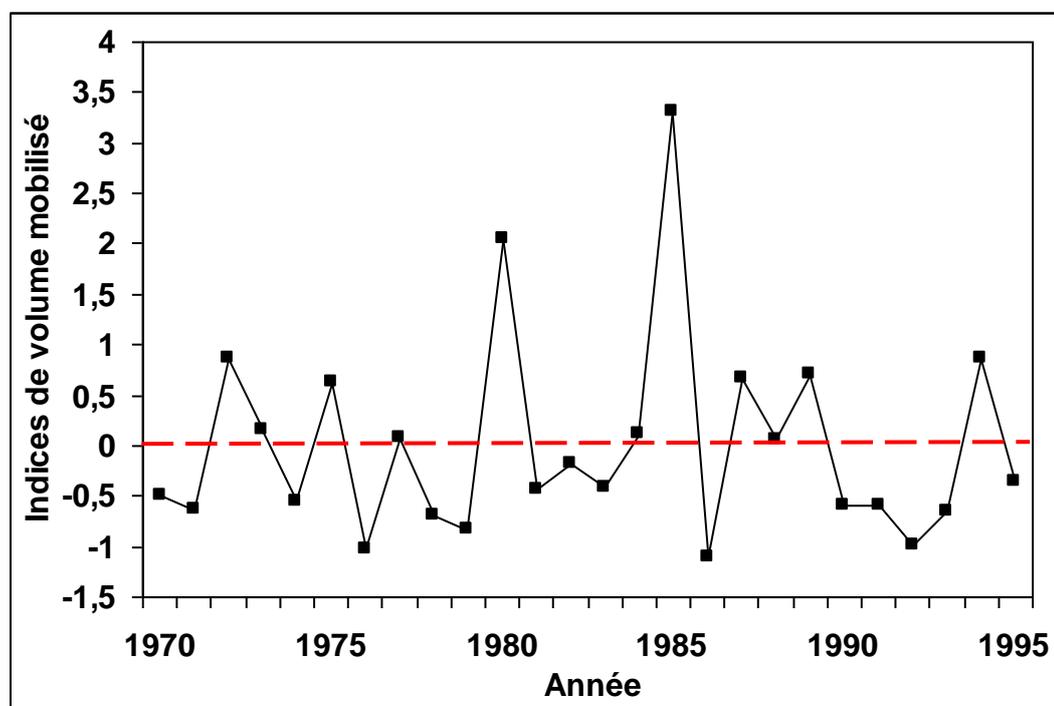


Figure 35 : Variation interannuelle du volume mobilisé par les aquifères du Kan (1970-1995).

6.6. DISCUSSION DES RESULTATS DE L'ETUDE HYDROCLIMATIQUE

La division de l'année en saisons thermiques, mise en évidence par une détermination des mois biologiquement humides et secs, n'est pas sans conséquence sur le comportement hydrologique et hydrogéologique des bassins (Bouanami, 2006). Car, les grandes oscillations mensuelles durant les mois les plus froids s'accompagnent d'importants phénomènes tels que les baisses brutales de températures, entraînant des épisodes pluvieux générateurs de crues qui agissent directement sur l'écoulement fluvial, l'érosion et le transport solide dans les bassins. De même, les effets de la saison chaude ne sont pas sans conséquences. Ainsi, la stagnation des masses d'air de la mousson provoque souvent un déficit pluviométrique et une forte évapotranspiration.

L'étude de la variation spatiale des précipitations est fondée sur l'effet de continentalisation des pluies. En effet, en absence de toute végétation, les quantités de pluies décroissent régulièrement sur le continent, en liaison avec la pénétration progressive des flux d'origine maritime (Brou et *al.*, 1998). En Côte d'Ivoire, cette réduction est faible au-dessus du sud forestier ivoirien avec l'avancée du FIT. A l'intérieur du continent peu boisé, on constate un appauvrissement de la masse d'air porteuse d'humidité en vapeur d'eau (Brou et *al.*, 1998). Les hauteurs pluviométriques sont alors de plus en plus faibles. Cette situation générale semble s'appliquer parfaitement à la zone d'étude qui est à cheval entre la zone forestière et la savane préforestière (Soro et *al.*, 2007). En effet, la zone d'étude subit non seulement les effets de continentalisation mais aussi l'impact de la destruction des îlots forestiers et galeries au profit des cultures intensives. De ce fait, si les fluctuations naturelles du climat expliquent probablement la plus grande partie de la baisse de la pluviométrie observée en Afrique de l'Ouest et Centrale depuis plus de vingt-cinq ans, les activités anthropiques et en, particulier la déforestation liée à la mise en cultures intensives, y contribuent également de leur côté (Paturel et *al.*, 1997 ; Brou et *al.*, 1998 ; Bigot et *al.*, 2005).

Les années humides que l'on constate après la décennie 90 ne sont pas statistiquement parlant et ne sauraient être qualifiées d'un retour vers des conditions climatiques plus favorables de façon persistante. En effet, rien ne permet d'affirmer aujourd'hui que la sécheresse est en rémission ou en voie de l'être. Cela ne sera possible qu'en prenant en compte les années à venir sur une longue période (Ardoin, 2004). Dans la période normale, on constate que le caractère déficitaire de la décennie 80 se fait ressentir.

En effet, cette décennie marque le début de la deuxième période sèche qui a sévi en Afrique de l'Ouest et dont les conséquences sont encore perceptibles de nos jours (baisse du niveau des nappes, variation des régimes des cours d'eau, etc.....).

La période qui commence de 1996 à 2000 apparaît comme la plus humide. Elle est excédentaire dans son ensemble, ponctuée de périodes déficitaires. Cette période correspond à ce que l'on pourrait qualifier d'une reprise de la pluviométrie dans notre zone (Soro et al., 2007). En dehors de cette période, les trois autres sont déficitaires. Le caractère déficitaire constaté autour des années 69 et 70 semble s'être maintenu et prolongé pour atteindre la sécheresse de 80.

La rupture constatée en 1970 au niveau de la station de Yamoussoukro sur la chronique de 1966-2000, s'est opérée dans le sens de la diminution des précipitations. Cette année de rupture (1970) s'insère bien dans la période de rupture relevée dans la majorité des stations pluviométriques en Côte d'Ivoire qui se situe selon Paturel et al. (1997), Servat et al. (1999) entre 1966 et 1971. Elle correspond à la décennie de la sécheresse qui a commencé vers la fin de la décennie 60 et le début de la décennie 70 en Afrique de l'Ouest. Goula et al. (2006) ont relevé dans leurs travaux la même rupture de 1969 à Dimbokro, situé dans le « V » baoulé.

Ces ruptures montrent que cette zone géographique est sous l'influence de la fluctuation du régime pluviométrique observée à la fin des années 1960 et au début des années 1970 en Afrique de l'Ouest et centrale sahélienne comme non sahélienne (Hubert et Carbonnel, 1987 ; Hubert et al., 1989 ; Mahé et Olivry, 1995 ; Paturel et al., 1997 ; Servat et al., 1999 ; Makanga et Samba, 1997 in Goula et al., 2006). Quant à celle constatée au niveau de la station de Tiébissou en 1963 sur la chronique de 1951-2000, elle s'intègre également dans la période de sécheresse.

L'apparition d'années humides à partir de 1994, a été relevé en Côte d'Ivoire sur d'autres stations (Man, Dimbokro, Agboville) (Saley, 2003 ; N'Go et al., 2005 ; Goula et al., 2006) et même en zone soudano-sahélienne sur le bassin du Niger à Koulikoro avec un excédent de 15 % et celui du Bani à Douna avec un excédent de 7 % par rapport à la moyenne de 1922 à 1997 (Mahé et al., 2000). Cette rupture traduit donc une tendance à l'augmentation de la pluviométrie. Le déficit pluviométrique calculé en comparant les moyennes de part et d'autre de la rupture dans la série est très faible de l'ordre de 2 %. Cette valeur est inférieure à celles obtenues dans les études précédentes qui varie entre 16 et 27% (Servat et al., 1999 ; Ardoin, 2004).

Les résultats du bilan hydrologique mettent en évidence un déficit hydrique important dans la zone d'étude (3 8,80 %).

Cette situation est due à une évapotranspiration très importante dans la région. Toutefois, cette perte est comblée par la régularité des pluies. En effet, l'existence de deux saisons de pluie dont la durée cumulée est de huit mois contribue à atténuer la forte évaporation. Cependant, ce déficit a entraîné de nombreuses défaillances dans le fonctionnement des aménagements hydroélectriques en Côte d'Ivoire (Olivry, 1996). L'une des conséquences visible de cette situation est observable au niveau du lac de Kossou. Au départ, ce lac couvrait une superficie estimée à 1500 km² pour une cote de 184 mm (Figure 36), actuellement, il ne couvre qu'une superficie de 900 km² (Fabio et al., 2002). Cette réduction de la superficie d'environ 40% serait selon Soro et al. (2007) imputable à la forte évaporation qui a lieu dans la zone et dont l'effet immédiat est ressenti au niveau de l'écoulement de surface.

La reconstitution des réserves du sol se fait principalement à partir du mois de mai. L'infiltration calculée (40,73 mm) pose ainsi le problème d'alimentation des nappes profondes. Cette faible recharge des nappes a également été relevée par Kouassi et al. (2007). Les auteurs ont noté une réduction de la recharge des nappes dans le bassin versant du N'zi dont l'un des affluents le Kan couvre une grande partie de la zone d'étude. De nombreux travaux en Côte d'Ivoire ont utilisé la méthode de Thornthwaite pour évaluer le bilan hydrologique. Le tableau XVI donne une synthèse des résultats de ces auteurs.

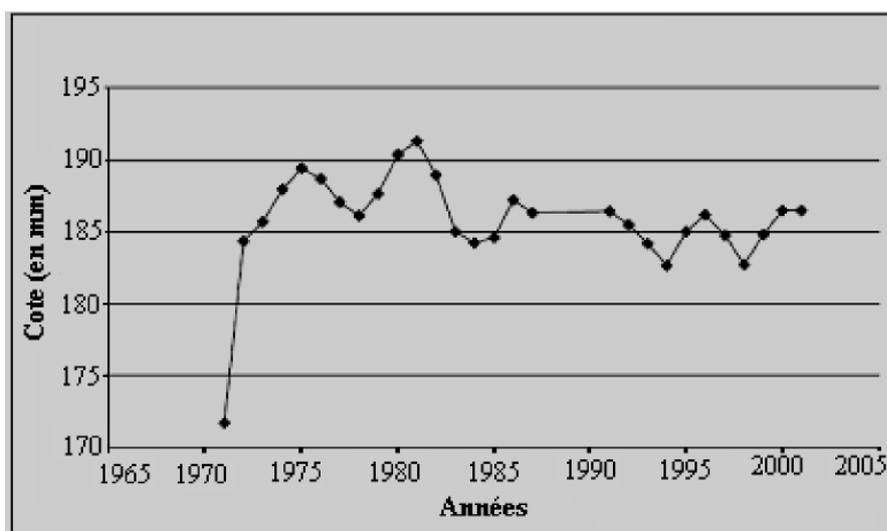


Figure 36 : Variation des cotes de la retenue d'eau du barrage de Kossou de 1972 à 2000 (Fabio et al., 2002 in Soro et al., 2007).

Tableau XVI: Résultats de l'infiltration calculée selon Thornthwaite dans certaines régions de la Côte d'Ivoire.

Authors and place of the survey	Infiltration (method of Thornthwaite) (mm)
Soro (1987), Basin pouring the Mé	43
Biémi (1992), in the Marahoué	46
Savané (1997), Region of Odiénné	77
Kouamé (1999), (Man and Danané)	74 (Man) 168 (Danané)
Saley (2003), (Man)	375
Jourda (2005) Korhogo	139
Region of the lakes	40,73

La valeur de recharge obtenue dans la région des Lacs (mm) est inférieure aux estimations avancées par les études antérieures. La valeur obtenue au niveau de la région des Lacs s'approche de celle de Soro (1987) dans la Mé et de Biémi (1992) dans la Marahoué, mais elle reste nettement inférieure à celles avancées dans les autres travaux. La pluviométrie est certes régulière mais le taux pluviométrique n'est pas élevé comparé à celui de certaines régions. Cependant, une interrogation persiste quant à la méthode du bilan hydrologique de Thornthwaite. La synthèse des différents résultats nous montre que dans une même zone, de grandes fluctuations au niveau de la recharge peuvent se produire. Ainsi, dans l'Ouest montagneux notamment à Man, Kouamé (1999) trouve une recharge de 74 mm tandis que, Saley (2003) dans la même région obtient une valeur de 375 mm. Le même constat peut être fait à Odiénné. Dans cette région, Savané (1997) avance une valeur de 77 mm alors que Kouadio (2005) trouve par la même méthode une valeur de 350 mm comme infiltration efficace. En effet, l'estimation des composantes du bilan hydrologique est entachée d'incertitudes importantes, puisqu' aucune mesure ne nous permet, dans l'état actuel des choses, de faire le partage entre l'évapotranspiration et la recharge de la nappe (*in* Kouassi, 2007). De même, la méthode de répartition de l'excédent entre les écoulements de surface et l'infiltration semble confuse car, elle ne prend pas en compte de nombreux facteurs environnementaux, morphologiques, géologiques et climatiques (Kouamé, 1999). Malgré toutes ces limites, cette méthode reste efficace car elle donne un intervalle de grandeur des paramètres intervenant dans l'estimation des réserves du sol et avec peu de moyens (Saley, 2003).

Les coefficients de tarissement évalués au cours de cette étude varient entre $2,21 \cdot 10^{-2} j^{-1}$ et $1,02 \cdot 10^{-1} j^{-1}$ sur la période de 1970 à 1995. On note une augmentation des coefficients de tarissement sur le bassin versant du Kan entre 1970 et 1995. Cette situation a déjà été observé en Afrique notamment sur le Bani à Douna, où Olivry *et al.* (1998) ont relevé une augmentation du coefficient de tarissement à partir de 1969. Pour Mahé *et al.* (1998), cette augmentation correspond à une vidange précoce et plus rapide des nappes souterraines. Ce phénomène a été décrit pour d'autres cours d'eau de l'Afrique tropicale par Olivry (1996), Olivry *et al.* (1998) et Bricquet *et al.* (1997). En Côte d'Ivoire, les travaux de Savané *et al.* (2001), de Saley (2003) et de Kouassi (2007) ont également mis en évidence ce phénomène sur certains cours d'eau. Il s'agit du Drou à Man et du Cavally à Flampleu (Savané *et al.*, 2001), du Kô, du N'zo et du Bafing à Man (Saley, 2003), du N'zi (Kouassi, 2007) et de l'Agnéby (Ahoussi, 2008).

La moyenne des coefficients de tarissement est de $5,93 \cdot 10^{-2} J^{-1}$ au niveau du bassin du Kan. Cette valeur montre que le tarissement est plus important au niveau du Kan qu'au niveau du Cavally, du Dou et du N'Zi, où ces auteurs ont obtenu respectivement des coefficients de l'ordre de $5,7 \cdot 10^{-2} j^{-1}$, $3,6 \cdot 10^{-2} j^{-1}$ et $3,36 \cdot 10^{-2} j^{-1}$. Selon Olivry (1996), l'augmentation des coefficients de tarissement depuis l'observation des sécheresses récentes traduit un appauvrissement durable des nappes phréatiques et d'une manière très significative dans l'écoulement général des fleuves. L'auteur attribue également cette augmentation essentiellement à une réduction de l'extension des aquifères et par conséquent de la largeur des nappes de versant.

Les volumes mobilisés par les aquifères fluctuent entre 0,048 et 0,49 1 Km^3 et sont dans l'ensemble faibles en dehors de 1980 et 1985 où la recharge des nappes du Kan a eu lieu. Globalement, les volumes mobilisés par les aquifères connaissent donc une baisse liée à la baisse de la pluviométrie et probablement aux prélèvements anthropiques.

Cet appauvrissement durable des apports de l'écoulement de base est lié à une réduction du volume d'eau dans les aquifères (Kouassi, 2007). En effet, on assiste à une diminution considérable des réserves souterraines qui devraient normalement assurer l'alimentation des cours d'eau en période de tarissement. Ces fluctuations du volume d'eau mobilisé par les aquifères seraient liés à une régression considérable des réserves souterraines due à la forte ampleur de la récente sécheresse sur les écoulements. De ce fait, un effet de mémoire de la sécheresse se serait donc inscrit dans l'évolution des réserves souterraines (Olivry, 1996). Cependant, seule des études isotopiques couplées d'une piézométrie pourraient nous situer sur cette fluctuation des réserves souterraines.

Sur le Drou (Man), les travaux de Savané *et al.* (2001) ont montré une baisse marquée des volumes mobilisés par les aquifères à partir de 1970. Dans le bassin versant du N'zi, Kouassi (2007), a montré également que les volumes d'eau mobilisés par les aquifères étaient faibles. Les résultats obtenus au niveau du Kan sont donc en accord avec ceux des auteurs précédents. Ainsi, la baisse des volumes mobilisés par les aquifères serait donc liée à l'impact de la variabilité climatique au niveau de la région des Lacs à l'instar de toutes les régions de la Côte d'Ivoire.

CONCLUSION PARTIELLE

L'étude hydroclimatique de la zone d'étude ne pouvait être occultée à cause de l'impact de la dynamique pluviométrique sur les ressources en eau de la région donnée. Les principaux résultats obtenus sont :

- la température moyenne annuelle est égale à 25,7 °C avec des écarts mensuels qui restent inférieures à 3 °C. La moyenne pluviométrique de la période (1966-2000) est de 1131mm pour Yamoussoukro et de 1081mm pour Tiébissou. ;
- la pluviométrie diminue selon un gradient SW-NE qui évolue dans le sens des deux grandes masses d'air qui soufflent sur la Côte d'Ivoire. Par ailleurs, il existe une très forte variabilité interannuelle dans le régime des pluies de la zone se traduisant également par une baisse de la pluviométrie ;
- l'étude du bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite sur la période 1975 à 1997, pour une pluviométrie moyenne de 1122 mm sur la zone d'étude a donné une infiltration de 40,73 mm, soit un volume d'eau infiltré de $2,44.10^9$ m³ représentant 3,63 % de la pluviométrie et 1033 mm pour l'évaporation soit 92 % de la pluviométrie. Il ressort de cette étude que la région des Lacs subit un très fort déficit hydrique. Cette situation a des repercussions sur les rendements des installations hydroélectriques et agricoles;
- l'étude du tarissement du Kan montre que les coefficients de tarissement estimés varient entre $2,21.10^{-2} j^{-1}$ et $1,02.10^{-1} j^{-1}$ avec une moyenne de $5,93 10^{-2} J^{-1}$. Les volumes mobilisés par les aquifères sont compris entre 0,048 et 0,49 1 Km³ avec une moyenne de 0,158 Km³.

Cette étude montre qu'il existe des problèmes d'eau réels au niveau de la zone d'étude dus à l'impact de la variation de la pluviométrie. Quelle pourrait être la conséquence de cette situation sur le mode d'occupation du sol de la zone ? Le chapitre qui suit va nous éclairer sur cette question.

CHAPITRE 7 : DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES SOLS DANS LA REGION DES LACS

7.1. EVALUATION DE LA PRECISION DE LA CLASSIFICATION

De l'analyse des images, six classes d'occupation du sol ont été identifiées. Des matrices de confusion ont été élaborées pour évaluer la précision de la classification (Tableaux XVII et XVIII).

Tableau XVII: Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat TM (1986)

Classes	Ea	Snd	Fo	Sa	Cs	Cis
Ea	96,55	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
Snd	0,16	91,42	0,08	3,40	1,59	0,12
Fo	0,40	0,00	94,85	2,14	0,00	0,00
Sa	0,40	0,73	5,07	81,17	25,02	0,29
Cs	0,56	7,30	0,00	6,58	73,39	0,06
Cis	1,92	0,54	0,00	6,68	0,00	99,54
Total	100	100	100	100	100	100

Ea : eau ; Snd : sols nus ou dégradés ; Fo : forêts ; Sa : savane arborée ; Cs : cultures ; Cis : cultures irriguées ; Kappa = 85,84% ; Précision globale 88,47%

Tableau XVIII: Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat ETM+ (2002)

Classes	Ea	Snd	Fo	Sa	Cs	Cis
Ea	99,58	0,00	0,00	0,42	0,00	2,03
Snd	0,00	97,68	1,65	3,82	0,60	1,35
Fo	0,00	0,29	91,49	0,48	4,81	0,41
Sa	0,25	1,35	0,90	88,54	13,48	9,32
Cs	0,00	0,39	5,96	5,97	81,11	1,35
Cis	0,17	0,29	0,00	0,77	0,00	85,54
Total	100	100	100	100	100	100

Ea : eau ; Snd : sols nus ou dégradés ; Fo : forêts ; Sa : savane arborée ; Cs : cultures ; Cis : cultures irriguées ; Kappa (2002) = 88 % ; Précision globale 90,46%

Il ressort de cette analyse que les deux images présentent une bonne précision globale pour l'ensemble de la zone d'étude. Ainsi, l'image Landsat TM (1986) a une précision globale de 88,47% avec un indice de Kappa évalué à 85,84% alors que cette précision est de 90,46% pour celle de Landsat ETM⁺ (2002) avec un Kappa de 88 %.

Au niveau des différentes classes la précision n'est pas identique. Certaines classes d'occupation du sol sont classifiées avec plus de précision que d'autres. De même, les classes de la matrice de confusion de l'image Landsat ETM⁺ sont mieux classifiées que celles de l'image Landsat TM.

Sur l'image Landsat TM (Tableau XVII), toutes les classes d'occupation retenues ont une précision cartographique supérieure à 70%. La classe Cultures irriguées a une précision

de 99,54 %. Elle est suivie de la classe Eau, ensuite viennent les classes Forêts, Sols nus ou dégradés, Savane arborée et enfin la classe Cultures. La plus faible précision a été observée au niveau de cette classe. On remarque en outre qu'elle présente une confusion de 25, 02% avec la classe Savane arborée. Cette confusion peut être due à la présence de cultures industrielles qui se comporteraient comme des savanes arborées. Au niveau de la matrice de confusion de l'image Landsat ETM⁺ (Tableau XVIII), la précision est supérieure à 80% pour toutes les classes. De plus, on remarque que la confusion entre la classe cultures et savane arborée a diminué, elle est passée de 25% à 13,48%.

Dans l'ensemble, les valeurs des différents indicateurs de précision de la classification supervisée analysés pour les différentes images, rendent compte d'une part, de la bonne qualité des échantillons et d'autre part, de la bonne correspondance entre le résultat de la classification et la réalité spatiale contenue dans les images. L'indice de Kappa calculé est supérieur à 80%. Les différents résultats d'évaluation des images classifiées par la méthode de la classification supervisée sont donc validés.

7.2. DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL DANS LA REGION DES LACS

7.2.1. Analyse de l'occupation du sol

Les méthodes utilisées de même que les différentes classes obtenues ont été validées par les matrices de confusion et également par les coefficients de Kappa. Les différentes cartes élaborées ici ne couvrent pas la totalité de la zone d'étude. Néanmoins, les fenêtres retenues permettent de suivre l'évolution du couvert végétal pendant seize ans (1986 à 2002). L'examen des cartes (Figure 37) et du tableau XIX associé à ces figures montre une modification de l'occupation du sol en général et du couvert végétal entre 1986 et 2002.

Tableau XIX : Evolution de l'occupation des sols entre 1986 et 2002.

Classes	Janvier 1986 (%)	Janvier 2002 (%)
Eau	11,73 (572,5km ²)	9,11(444,4km ²)
Sols nus ou dégradés	6,23 (303,8km ²)	17,41(849,3km ²)
Forêts	20,62 (1006km ²)	25,21(1230,2km ²)
Savane arborée	44,05(2149,3km ²)	27,04(1319,4km ²)
Cultures	9,72(474,1km ²)	17,28(843,1km ²)
Cultures irriguées	7,65(373,5km ²)	3,95(192,8 km ²)

Superficie totale traitée : 4979,2 km² ; Tan : taux d'évolution moyen annuel de 1986 à 2002 ; Tb : taux d'évolution au sein de la même classe de 1986 à 2002

Ainsi, on constate une réduction de la savane arborée en seize ans. Celle-ci est passée de 44,05% en 1986 à 27,04% en 2002. Par contre, on note une forte extension de la forêt de 20,62 % en 1986, elle est passée à 25,21% en 2002. Quant aux sols nus ou dégradés, leur superficie est passée de 6,23% à 17,41% soit une augmentation de plus du double. Ce constat est également valable pour les cultures. La superficie de ces cultures a presque doublé en l'espace de seize ans.

L'augmentation des superficies des cultures et des sols nus ou dégradés pourrait être due en grande partie à la pression humaine qui provoque de plus en plus une anthropisation des zones naturelles. En effet, autour des centres urbains se développent de plus en plus une agriculture dite périurbaine qui utilise de grandes superficies. Au contraire de ces augmentations, on note une diminution au niveau des classes eau et cultures irriguées.

Les plans d'eau ont subi de même que les cultures irriguées une réduction. Celle-ci pourrait être due soit aux prélèvements d'eau dans les retenues d'eau, soit à une forte évaporation créant ainsi un déficit d'alimentation ou à une diminution des écoulements de surface liée à une baisse de la pluviométrie. Au total, plus de 60% de la zone d'étude est couverte par la savane arborée et la forêt. Finalement, à la suite de cette analyse diachronique des images Landsat TM de 1986 et Landsat ETM⁺ de 2002, on remarque qu'en seize ans (16), les modifications de l'occupation du sol sont assez nettes et se traduisent de façon qualitative et quantitative par les changements dans l'espace géographique et l'évolution des superficies. Les photos de la planche 8 montrent quelques modes de l'occupation du sol dans la région des Lacs.



*Vue panoramique de trois types d'occupation du sol
(plan d'eau, affleurement, forêt)*



*Lac artificiel fortement eutrophisé dans la ville
de Yamoussoukro*



*Vue panoramique de la savane (après la digue du
barrage de Kossou en allant à la mine d'Angovia)*



*Champ de maïs à la décharge de Kokrenou
(Yamoussoukro)*

Planche 8: Différents modes d'occupation du sol dans la région des Lacs.

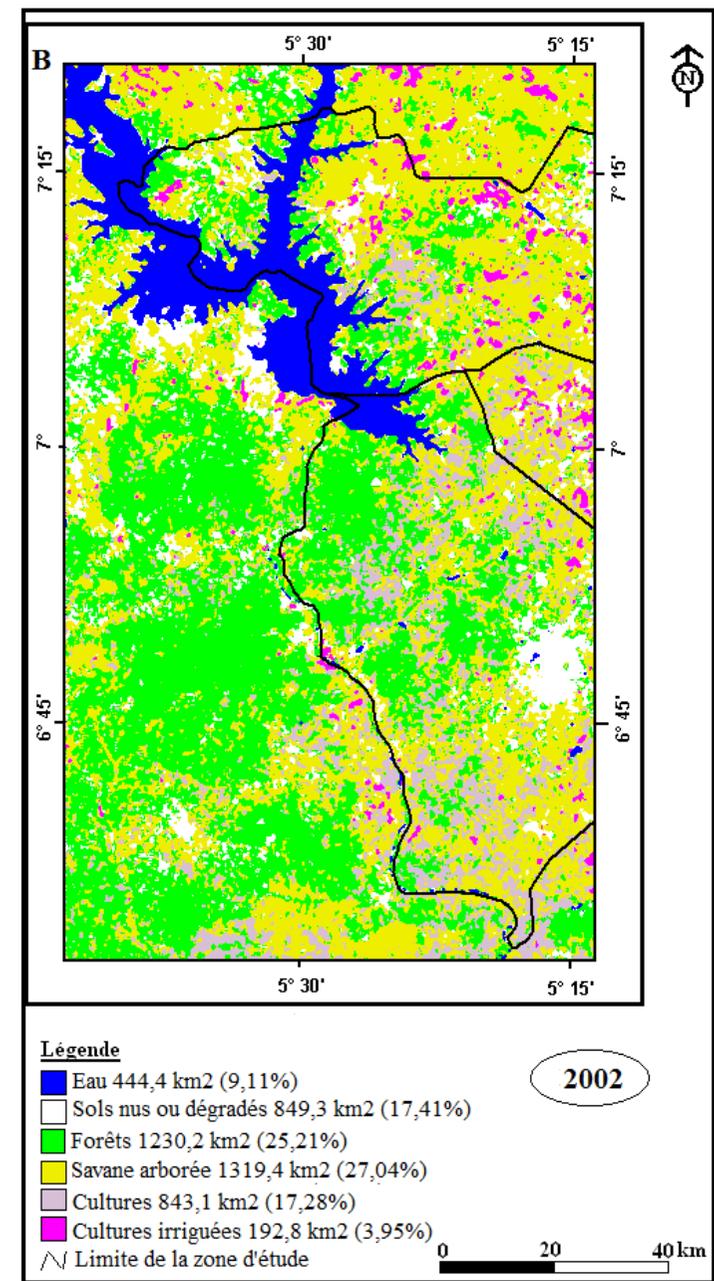
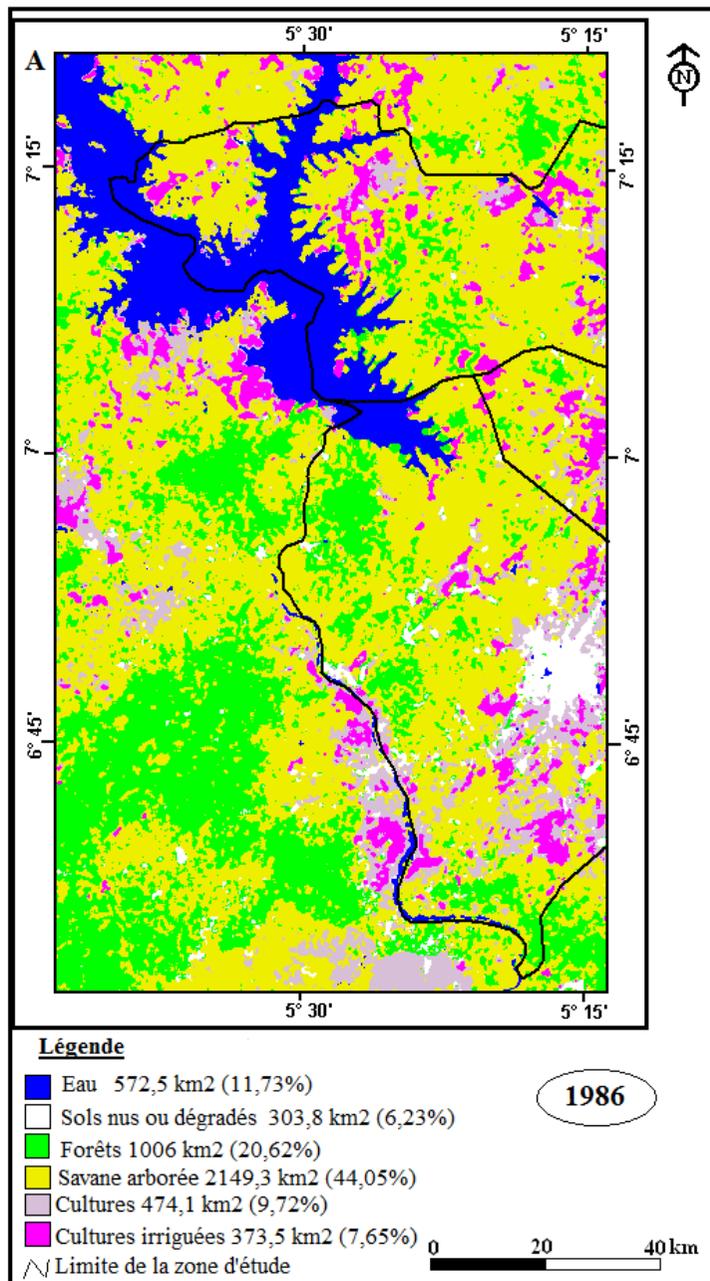


Figure 37: Images de la classification supervisée de la zone d'étude en 1986 et 2002.

7.2.2. Evaluation de la dynamique de l'occupation du sol de 1986 à 2002

Les résultats de l'interprétation des images satellitaires de 1986 et 2002 révèlent de façon générale une tendance à l'augmentation de la forêt, des sols nus ou dégradés et des cultures. Parallèlement, on assiste à une régression de la savane arborée, des plans d'eau et des cultures irriguées. L'analyse de la figure 38, présente la dynamique de l'occupation du sol des la zone étudiée entre 1986 et 2002 révèle de profonds changements au niveau de la végétation. Afin de mieux apprécier ces changements, des taux d'évolution des unités d'occupation du sol ont été déterminés et présentés dans le tableau XX.

Tableau XX: Taux d'évolution des classes de l'occupation du sol.

<i>Classes</i>	<i>Tb (%)</i>	<i>Tan (%)</i>
Eau	-2,62	-0,164
Sols nus ou dégradés	+11,18	0,699
Forêts	+4,59	0,287
Savane arborée	-17,01	-1,063
Cultures	+7,56	0,473
Cultures irriguées	-3,7	-0,231

Tan : taux d'évolution moyen annuel de 1986 à 2002 ; Tb : taux d'évolution au sein de la même classe de 1986 à 2002

L'analyse de ce tableau permet de faire les remarques suivantes :

- les taux d'évolution au sein d'une même classe varient avec une grande amplitude d'une classe à une autre ; les plus grandes variations ont été observées sur les classes savane arborée et sols nus ou dégradés suivie de la classe cultures en valeur absolue ;
- les taux d'évolution par rapport à l'ensemble de la zone étudiée varient d'une classe à une autre ; on constate que ces taux sont largement inférieurs aux valeurs relatives aux taux d'évolution par rapport aux classes.

Une analyse plus pointue au niveau de chaque classe permet d'apprécier plus la dynamique entre 1986 et 2002.

1. **Eau :** cette classe a un taux d'évolution moyen annuel négatif ; les plans d'eau ont régressé de 0,164%.
2. **Sols nus ou dégradés :** le taux d'évolution moyen annuel de cette classe est évalué à 0,699%. Cette classe regroupe en son sein les habitats, les sols indurés, les cuirasses latéritiques, les inselbergs et les affleurements rocheux. L'évolution de cette classe s'est faite au détriment de la savane arborée.
3. **Forêts :** tout comme les sols nus ou dégradés, cette classe a connu une augmentation de

0,287%.

4. **Savane arborée** : cette classe a le taux de régression le plus élevé en valeur absolue (1,063%). Ici, la savane semble laisser de plus en plus de place aux cultures et aux sols nus ou dégradés.
5. **Cultures** : cette classe a un taux d'évolution moyen annuel positif de 0,473%.
6. **Cultures irriguées** : un taux de régression de 0,231% est révélé dans cette classe. Cette baisse est probablement liée aussi à la réduction des plans d'eau ; il semble donc exister une corrélation entre la réduction des plans d'eau et les superficies irriguées.

L'étude des taux d'évolution des classes montre que la classe savane arborée présente le plus fort taux de régression tandis que les sols nus ou dégradés ont le taux de progression le plus élevé. Parallèlement, on note aussi une progression des superficies de forêt et des cultures alors que les plans d'eau et les cultures irriguées connaissent une régression. On remarque également l'impact de la pression humaine sur la dynamique d'occupation du sol qui provoque une anthropisation des zones naturelles. Quel pourrait être l'impact de l'anthropisation des milieux sur les écoulements dans la zone d'étude ?

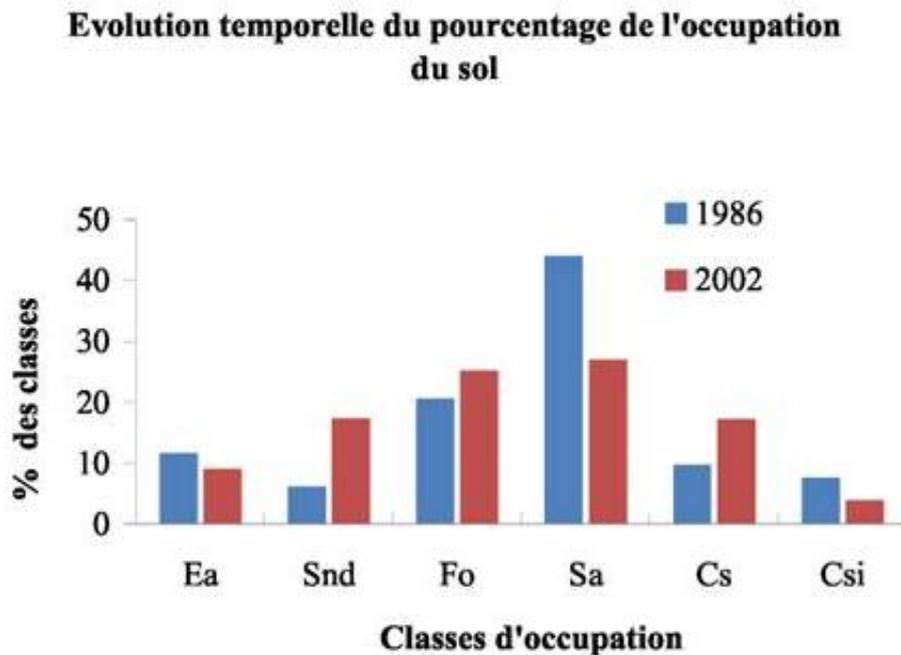


Figure 38 : Evolution temporelle du pourcentage de l'occupation du sol.

7.3. EVALUATION DE L'IMPACT DE L'ANTHROPISATION SUR LES ECOULEMENTS

Dans l'objectif de quantifier l'impact de l'anthropisation sur les écoulements de surface dans la zone, les coefficients de rétention ont été calculés. Le tableau XXI présente les résultats obtenus au niveau des classes étudiées. A l'analyse du tableau, on constate que tous les coefficients de rétention sont inférieurs à 100 pour toutes les classes retenues. La zone d'étude est de ce fait une zone propice aux écoulements de surface avec son corolaire de développement intense de l'érosion. De même, ces faibles valeurs rendent compte d'une forte anthropisation voire d'une dégradation au niveau de la zone. Cette prépondérance à l'anthropisation a déjà été relevée au niveau de l'étude de la dynamique et du taux d'évolution de l'occupation du sol.

Tableau XXI : Evolution des coefficients de rétention (Cr) dans la zone d'étude entre janvier 1986 et janvier 2002.

	<i>Forêts</i>	<i>Savane arborée</i>	<i>Cultures</i>	<i>Cultures irriguées</i>
Cr (janvier 1986)	41,24	88,1	9,72	15,3
Cr (janvier 2002)	50,42	54,08	17,28	7,9

La zone d'étude connaît donc une tendance à l'anthropisation. Ainsi, les zones naturelles font place aux cultures et sols nus ou dégradés. Cet état de fait pourrait influencer sur les écoulements de surface avec une probable augmentation de l'érosion hydrique des sols dans la zone. Cependant, on note également une tendance à la régénérescence de la forêt qui semble perdre de la place par rapport à la savane arborée.

7.4. DISCUSSION DES RESULTATS DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL

La classification de l'occupation du sol résultant de l'analyse des images TM et ETM⁺ a donné une précision globale respective de 88,47% et 90,46%. Cependant, si les résultats de cette étude sont acceptables, il est important de relever les contraintes rencontrées lors de l'analyse des images utilisées. En effet, l'analyse des scènes couvrant toute la zone d'étude n'a pu être effectuée à cause de la présence d'une couverture nuageuse importante sur la scène 196-56. Ainsi, seule la scène 196-55 des images TM et ETM⁺ a été utilisée, mais celle-ci ne couvre pas toute la zone d'étude.

Par ailleurs, on note la confusion dans la discrimination de certaines classes en l'occurrence la classe culture et savane arborée et dans un degré moindre la classe cultures irriguées. L'indice de Kappa a donné des valeurs de 85,84% pour l'année 1986 et 88 % pour 2002. On peut conclure que les résultats de cette analyse sont statistiquement acceptables. D'après, Pontius (2000), dans une étude de l'occupation des sols, lorsque l'indice de Kappa évalué dans les opérations de classification est compris entre 50 et 75 %, la classification adoptée est valable et les résultats peuvent être judicieusement utilisés.

Les classes cultures, savanes arborées et cultures irriguées montrent quelques erreurs de confusion. La difficulté à discriminer visuellement ces classes peut être due à des signatures spectrales similaires. C'est ce qui explique que les cultures se confondent avec la savane arborée et souvent avec les cultures irriguées. La savane est dite arborée quand la densité de la strate arborescente varie entre 2 et 20% (N'guessan, 1990). Cette classe se retrouve dans toute la zone d'étude du Nord au Sud. De même, les plantations vieillissantes (café cacao, etc.) peuvent être associées à cette classe (Kouassi, 2007). Ceci explique les erreurs de confusion qui existent entre les deux classes (culture et savane arborée).

Cependant, les valeurs des erreurs de confusion enregistrées sont faibles. En effet, en dehors des 25 % de confusion qui existe entre les cultures et la savane arborée, aucune autre erreur n'excède les 20%. Ces erreurs sont donc acceptables dans la mesure où aucune de ces erreurs n'est au-dessus de 70% qui est la valeur limite (Mama et Olouko, 2003).

L'analyse de la dynamique de l'occupation du sol entre 1986 et 2002 montre que les sols nus ou dégradés, les forêts et les cultures augmentent de façon significative, par opposition aux plans d'eau, cultures irriguées et savane arborée qui régressent nettement. Cette analyse est importante dans la mesure où elle permet de comprendre les divers changements intervenus dans l'occupation du sol, d'une part, et les causes qui en sont à l'origine d'autre part.

Les taux de régression constatés au niveau des plans d'eau (-2 ,62%) et des cultures irriguées (-3,7%) sont les plus bas contrairement à celui relevé au niveau de la savane arborée (-17 ,01%). Les taux de régression moyens annuels calculés au niveau de ces classes donnent -0,164% pour les plans d'eau, -1,063% pour la savane arborée et -0,231% pour les cultures irriguées. Parallèlement, à ces différentes régressions, on constate que la savane laisse de plus

en plus de place aux sols nus ou dégradés avec un taux moyen annuel d'évolution de 0,699% et de même qu'aux cultures. De ce qui précède, on peut conclure que cette dégradation serait due aux phénomènes naturels (variabilité climatique) et /ou aux activités anthropiques (feux de brousse, cultures sur brulis, exploitation abusive du bois, création de nouvelles plantations, etc.) (Kouassi, 2007). Cette thèse paraît plausible dans la mesure, où on constate une augmentation de la classe culture avec un taux moyen annuel d'évolution de 0,473% au profit de la savane arborée.

Le même constat est valable pour les sols nus ou dégradés. Cecchi et *al.*, (2009) ont fait le même constat dans la partie nord de la Côte d'Ivoire. Ces auteurs ont remarqué dans cette région du pays entre 1986 et 1994, une réduction de la savane arborée au profit des cultures et des sols nus et dégradés. Une fois de plus, c'est la pression humaine qui en est la cause. De plus la réduction des plans d'eau semble être liée à l'impact de la variabilité climatique qui se manifeste directement au niveau de la superficie des terres irrigables. En effet, la baisse des superficies irrigables serait la conséquence soit d'un déficit en écoulement de surface soit à des prélèvements trop intenses au niveau des retenues d'eau.

Dans la zone d'étude, la savane arborée, les lambeaux de forêts et les forêts galeries constituent la végétation la plus largement représentée. Selon N'guessan, (1990) qui a travaillé dans le « V » baoulé, la surface des forêts denses dans cette région a connu une forte régression. Ainsi, les superficies couvertes qui étaient de 233 430 en 1971 sont passées à 18 114 ha en 1984 (N'guessan, 1990). Cependant, on constate dans la présente étude, une augmentation de la forêt. Le taux d'évolution moyen annuel est de 0,287%. On peut donc conclure à une tendance à la régénérescence de la forêt. Ce constat semble corrélé aux comportements climatiques mettant en évidence une normalisation des précipitations depuis le début de la décennie 1990 (1992-1993) (Kouassi, 2007). Cette tendance peut aussi s'expliquer par le renforcement des mesures de protection et de consécration des aires végétales (reboisement, etc.) (Sylla, 2002). Cette explication nous paraît judicieuse, dans la mesure où dans la zone d'étude, on note la présence de forêts classées au nord et au sud de la zone (Betefla, Baka Kokore, Sougourou, etc.).

De même, on note la présence de forêts issues des projets de reboisement en grande partie constituée d'espèce unique comme *Tectona grandis* communément appelé tec.

Ainsi, sur l'axe Yamoussoukro-Sinfra à la lisière de Zambakro, de même que sur l'axe Tiébissou-M'bahiakro dans les environs de Raviart, on peut observer ces différentes forêts de tec.

Cette régénérescence de l'espace naturel a également été relevée dans le Nord-Est de la Côte d'Ivoire, dans le bassin versant du N'Zi et dans le département de Korhogo (Coulibaly, 2003 ; Sylla, 2002). Selon Grégoire et Ferrari, (1990) cités par Kouassi, (2007), les modifications affectant la couverture végétale d'un territoire donné, qu'elles soient d'origine anthropique ou naturelle, ont une influence plus ou moins directe sur la relation existant entre les précipitations et les écoulements de surface. En effet, la nature du couvert intervient sur l'intensité de cinq processus fondamentaux dans le cycle de l'eau à la surface : interception, évaporation directe après interception, infiltration dans le sol, évapotranspiration et ruissellement de surface (*in* Kouassi, 2007).

Quelle est l'ampleur de l'anthropisation ou de la régénérescence de la forêt sur les coefficients d'écoulements dans la zone d'étude ? Faute d'études plus poussées pour évaluer ce coefficient, un indice de rétention a été calculé. Les résultats sont compatibles avec les résultats obtenus précédemment dans l'étude diachronique de l'occupation du sol. Ils mettent en évidence une forte anthropisation et une dégradation de la zone d'étude. En effet, tous les indices de rétention au niveau des différentes classes sont inférieurs à 100. Selon Cecchi et *al.*, (2009), lorsque ces indices sont en dessous de 100, les bassins étudiés sont anthropisés ou dégradés. Dans ce cas, ils sont dotés d'une faible capacité de rétention. Par conséquent, l'écoulement de surface est important et les phénomènes d'érosion hydrique auront tendance à se développer. Dans le bassin versant du Lafigué au Nord de la Côte d'Ivoire, Cecchi et *al.*, (2009) dans leur travaux ont également observé une évolution perceptible.

CONCLUSION PARTIELLE

Une analyse diachronique d'images satellitaires Landsat TM et ETM⁺ sur une période de 16 ans de 1986 à 2002 a été réalisée en vue d'évaluer la dynamique de l'occupation du sol et son impact sur les écoulements. La méthode de la classification supervisée a permis de discriminer six (6) classes d'occupation du sol dans la zone. Les précisions globales obtenues sont de 88,47% (1986) et de 90,46% (2002). L'indice de Kappa de la matrice de confusion est de 85,84% pour l'année 1986 et 88 % pour 2002. Cette étude a permis de mettre en place six (6) classes à savoir l'eau, la forêt, la savane arborée, les sols nus ou dégradés, les cultures et les cultures irriguées. Les cartes élaborées pour l'année 1986 et 2002 permettent d'identifier une évolution temporelle et spatiale de l'occupation du sol dans la zone d'étude. Les taux d'évolution moyens annuels calculés montrent une régression des plans d'eau (-0,164), des cultures irriguées (-0,231) et de la savane (-1,063). Par contre, on remarque une tendance à l'évolution pour la forêt (0,287), les cultures (0,473) et les sols nus ou dégradés (0,699). De même, on observe de très faibles coefficients de rétention avec de valeurs en dessous de 100 pour les deux années d'étude. Au total, la zone d'étude est marquée par une forte anthropisation et une dégradation des conditions pluviométriques. Cette étude montre également l'importance de l'analyse des images satellitaires dans la compréhension des modifications profondes de l'occupation du sol et de ses impacts sur les ressources en eau dans une zone où l'activité principale est l'agriculture.

CHAPITRE 8 : CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE DES AQUIFERES FISSURES DE LA REGION DES LACS

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats et discussion trouvés à la suite de l'analyse statistique des paramètres hydrauliques dits quantitatifs et qualitatifs (transmissivité, débit spécifique) des forages. Il s'agit ici des paramètres obtenus lors de la foration et après l'essai de pompage. Le tableau XXII donne les statistiques des paramètres hydrogéologiques quantitatifs. Le tableau de l'annexe III donne la synthèse des différents paramètres de forages.

Tableau XXII : Caractéristiques statistiques des paramètres hydrogéologiques

<i>Nom</i>	<i>Efectif</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart-type</i>
<i>PR OF (m)</i>	219	28,00	100,00	68,54	14,95
<i>EPROS (m)</i>	219	0,50	77,40	19,57	15,19
<i>EPALT (m)</i>	219	8,10	95,00	48,97	20,57
<i>PVE (m)</i>	219	10,00	86,00	43,76	16,97
<i>CHG (m)</i>	219	-8,60	76,58	32,09	17,34
<i>NIST(m)</i>	219	0,70	33,60	11,67	6,76
<i>DEBP (m³/s)</i>	219	0,12	14,40	2,37	2,16

8.1. CARACTERISATION DES PROPRIETES DES FORAGES

8.1.1. Paramètres quantitatifs

• Profondeur totale des forages (PROF)

Sur les 219 données que nous avons traité, on peut noter que les profondeurs totales varient de 28 à 100 m avec une moyenne de 68,54 m et que 56 % des forages (123) ont une profondeur inférieure ou égale à 70 m contre 44 % qui sont compris entre 70 et 108 m. Sur granites, 182 forages ont été analysés, La profondeur moyenne atteinte est égale à celle trouvée pour l'ensemble des 219 forages (68,54 m). Dans les schistes, elle est de 69,56 m pour 33 forages. Pour les quatre autres, la nature géologique n'a pu être identifiée.

• **Profondeur des forages, épaisseurs moyennes des altérites**

La moyenne de l'épaisseur des altérites est de 48,97 m, elle est comprise entre 8 m et 95m (Tableau XXII). Les moyennes calculées seront très importantes pour les praticiens en hydraulique villageoise. En prenant en compte ces deux paramètres, ces derniers pourront se faire une idée du nombre de mètres linéaires à forer et aussi une idée du prix du forage. Le graphe de la figure 39 montre qu'il n'y a pas de corrélation significative entre la profondeur totale du forage et l'épaisseur des altérites. Aussi, avons-nous essayé de voir s'il existe un lien entre l'épaisseur des altérites et les débits maximum. La figure 40 montre qu'il n'existe aucune corrélation entre l'épaisseur des altérites et le débit. Le débit le plus élevé est de 14,4 m³/h a été obtenu pour une épaisseur d'altération de 34 m à Niamiekro (Tiébissou), alors qu'à Konankro (Tiébissou), pour une épaisseur d'altération de 70,70 m, on a un débit de 6,78 m³/h. L'obtention d'un débit élevé avec une forte ou une faible épaisseur d'altération semble donc relever du domaine de la probabilité. Le paragraphe suivant présente les résultats de l'étude probabiliste de l'épaisseur d'altération en fonction du débit et du débit spécifique.

○ **Niveau statique (NivSta)**

La figure 41 présente l'histogramme de fréquence des niveaux statiques relevés à la fin de la foration. Ces niveaux correspondent en fait au niveau statique des forages. Pour le besoin de cette étude, nous avons adopté le terme de niveau piézométrique. On constate que 88% des forages ont leur niveau d'eau situé dans les vingt premiers mètres à partir de la surface. En plus, on remarque que les 219 ouvrages ont leur niveau statique localisé dans les formations d'altérites. Ce constat est vérifié même dans le cas où la première venue d'eau se rencontre dans les fissures. Ce fait est très important, car il montre la mise en charge de l'eau de l'aquifère de fissures et confirme l'interconnexion des aquifères de fissures et d'altérites.

○ **Epaisseur de la roche saine pénétrée (EPROS)**

En général, la poursuite de la foration dans la roche saine dépend du débit recherché, ainsi, si le manteau altéré est régulièrement épais (plateau, haut glacis), il est inutile de forer quarante mètres de roche dure. Car très souvent, les débits recherchés sont fournis par l'altération et la zone fissurée. Aussi, la recherche de débits élevés par accroissement de la profondeur entraîne-t-elle une augmentation exponentielle du coût de l'ouvrage posant ainsi une contrainte économique. Dans cette zone, tous les forages se sont poursuivis dans les roches saines.

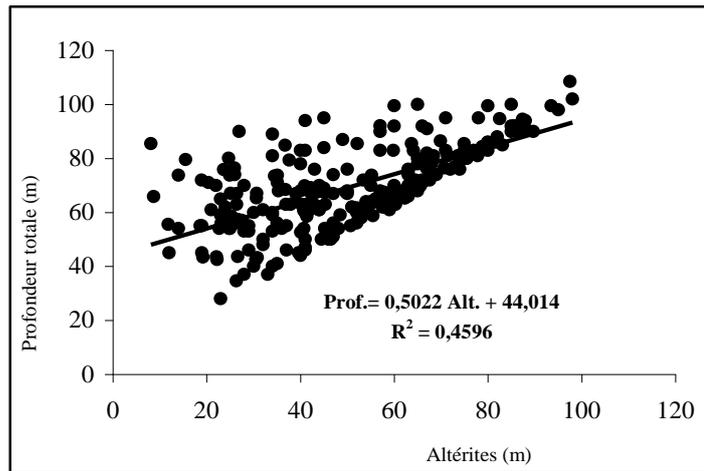


Figure 39: Distribution des profondeurs totales des forages en fonction des épaisseurs des altérites.

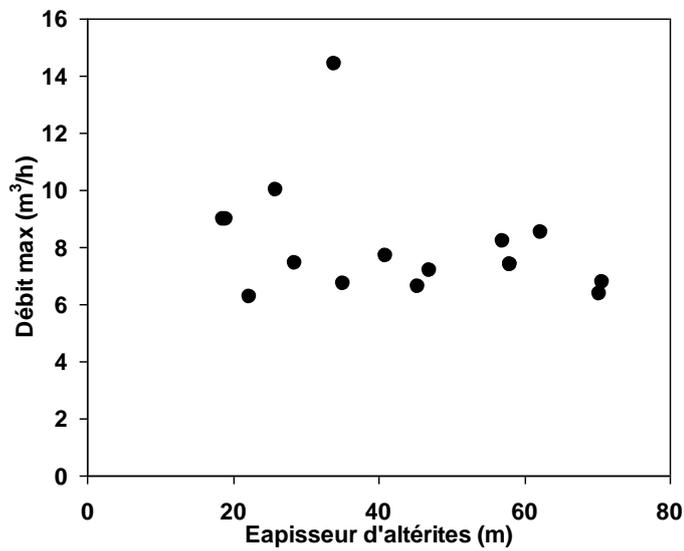


Figure 40: Graphe des gros débits en fonction de l'épaisseur des altérites.

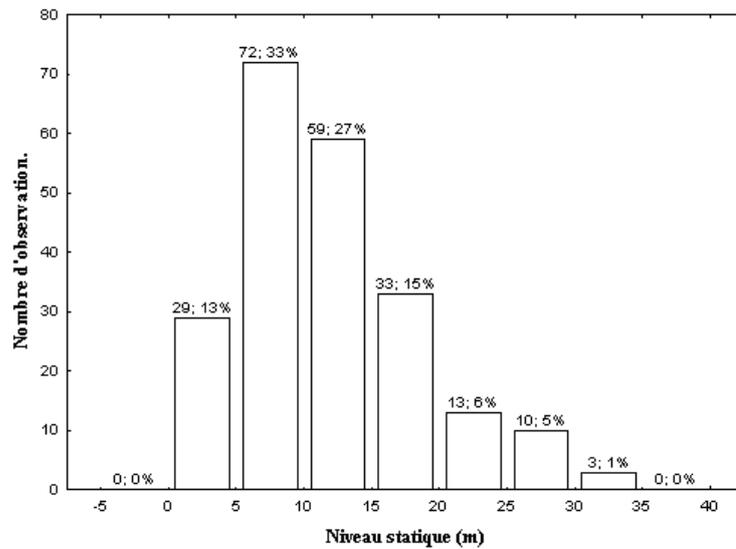


Figure 41 : Histogramme de distribution des niveaux statiques.

○ Première venue d'eau

En hydrogéologie quantitative, la productivité d'un ouvrage dépend du nombre des arrivées d'eau et de leur débit. Dans la base de données de la DTH de Yamoussoukro, le nombre des AE est de deux. Sur les fiches techniques que nous avons exploitées, on a eu à relever au maximum quatre arrivées d'eau dans certains ouvrages. Cependant, ces différentes arrivées ne sont pas toutes équivalentes du point de vue productivité. Les premières venues d'eau observées sur les 219 ouvrages sélectionnés se situent entre 10 et 86 m avec une moyenne de 43,76m. La figure 42 présente l'histogramme de distribution des fréquences des profondeurs des premières venues dans la région des Lacs. Il montre que 69% des venues d'eau se situent entre 0 et 50m soit 152 forages sur 219 et représentent les plus productives.

○ Charge hydraulique

La charge hydraulique ou hauteur du niveau piézométrique correspond à la remontée d'eau vers la surface à partir de la cote de la première venue d'eau dans un forage. Cette remontée reflète l'équilibre entre la pression d'eau au niveau de l'aquifère et la pression atmosphérique. En Côte d'Ivoire, notamment dans l'ancienne boucle du cacao, dans les formations birimiennes, l'eau est en charge dans les bancs de grès avec une remontée de 3 1m à Kouandikro (CIEH, 1978). Ce niveau d'eau peut souvent monter à plus de 10 m induisant ainsi très souvent certains foreurs en erreur qui arrêtent prématurément les sondages pensant que la hauteur d'eau sera suffisante (Engalenc, 1978).

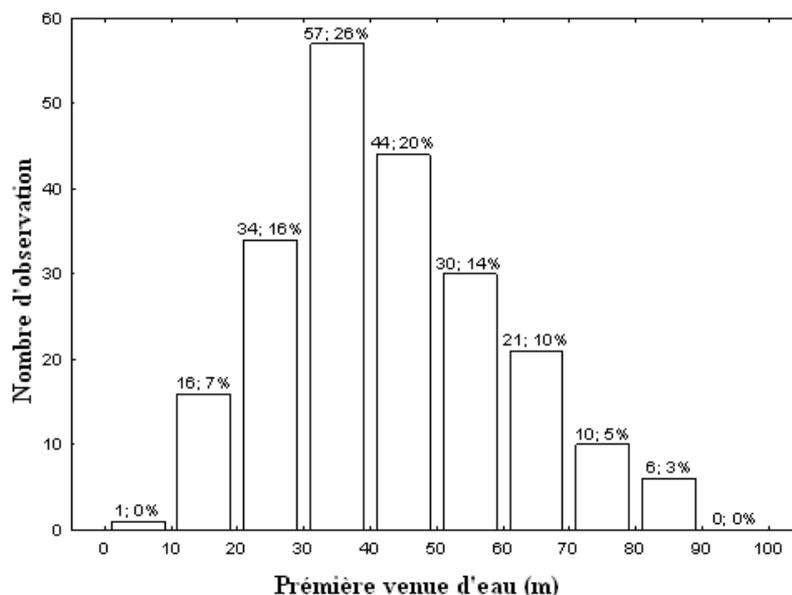


Figure 42 : Histogramme des fréquences d'observation de la première venue d'eau.

8.1.2. Influence de l'épaisseur des altérites sur la productivité des forages

Les résultats obtenus par le modèle Detay *et al.* (1989) dans la région des lacs sont représentés par les figures 43 et 44.

• *Influence de l'épaisseur d'altération (Ea) sur le débit*

Le débit, exprimé en m³/h, a été étudié à partir des pompages d'essai réalisés sur 219 forages. La courbe Q (Ea) (figure 43) met en évidence une relation positive entre l'augmentation de Ea et le débit. Sur la courbe, on constate que le débit augmente de façon logarithmique dans les 20 premiers mètres puis tend à se stabiliser au-delà de 30 m d'épaisseur de réservoir.

• *Influence d'Ea sur le débit spécifique*

La courbe Qs(Ea) (figure 44) déterminée à partir de 90 mesures, montre une augmentation linéaire dans les 13 premiers mètres avant de chuter (seuil critique) pour tendre vers des valeurs inférieures à 0,1 m³/h/m au-delà de 35 m de couverture d'altérites. Le domaine de validité des fonctions Q(Ea) et Qs(Ea) est donné par des débits inférieurs à 10 m³/h, débits spécifiques inférieurs à 1 m³/h/m et une épaisseur d'altération inférieure à 60m (Detay *et al.*, 1989).

8.1.3. Paramètre qualitatif: Débit de production

Les valeurs des débits rencontrés dans la zone sont comprises entre 0,12 et 14,40m³/h avec une moyenne de 2,37m³/h. Les débits des ouvrages dans la région des Lacs ont été répartis selon les classes définies par le CIEH dans le tableau XXIII. On remarque que les classes les plus représentées sont celle ayant des débits inférieurs ou égal 1(Q 1) qui comprend 71 ouvrages et celle dont les débits sont compris entre 1 et 2,5. Cette dernière classe regroupe 79 ouvrages. L'ensemble de ces deux classes représente 67,5% de l'effectif contre 20,5% pour les débits dits moyens et seulement 12% pour les débits forts.

Tableau XXIII: Résultats statistiques des débits en fonction des classes du CIEH

Classes	Debit (m ³ /h)	Nombre de forages	Fréquences	Prof. moyennes (m)	Ep. Moy. Altérites (m)
1 ^e classe	≤ 1	71	32,42	72,04	54,80
2 ^e classe	1-2,5	79	36,07	66,75	46,84
3 ^e classe	2,5-5	41	18,72	69,90	46,52
4 ^e classe	>5	28	12,78	62,72	43,77

Ce constat est bien illustré par l’histogramme des fréquences des classes de la figure 45. Une carte de répartition spatiale des débits a été établie à partir de ce tableau (Figure 46). Les débits moyens sont repartis de manière homogène sur l’ensemble de la carte. Nous pouvons donc dire que les débits obtenus lors des différentes campagnes de forage dans la région des lacs et notamment à Yamoussoukro, Tiébissou, Didiévi et Tié-N’diékro sont faibles et ne peuvent servir qu’aux besoins des populations rurales. Ils se situent donc dans la fourchette des débits recherchés lors des différentes campagnes d’hydrauliques villageoise. Le graphe de la figure 47 montre le comportement des débits moyens pour chaque classe en relation avec leur profondeur d’arrivée. A l’analyse de ce graphe, on constate que le débit moyen augmente avec la profondeur et atteint son maximum pour une profondeur supérieur à 70 m. Au-delà de cette valeur, le débit chute lorsque la profondeur augmente.

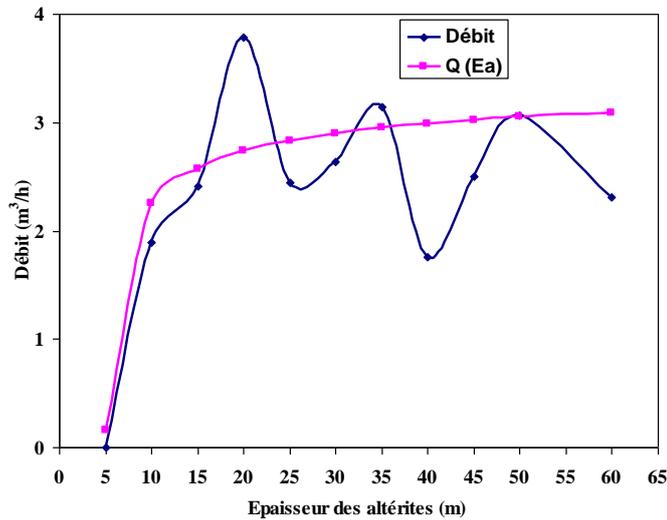


Figure 43 : Influence du réservoir capacitif sur le débit spécifique.

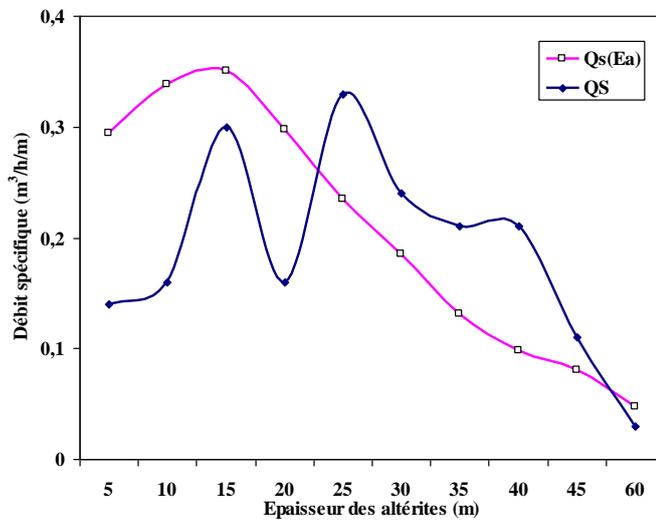


Figure 44 : Influence du réservoir capacitif sur le débit spécifique.

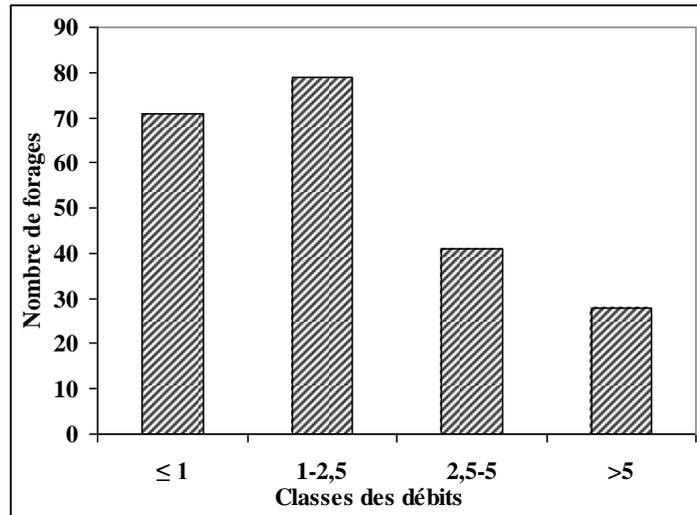


Figure 45 : Histogramme des fréquences de débits observés dans la région des Lacs.

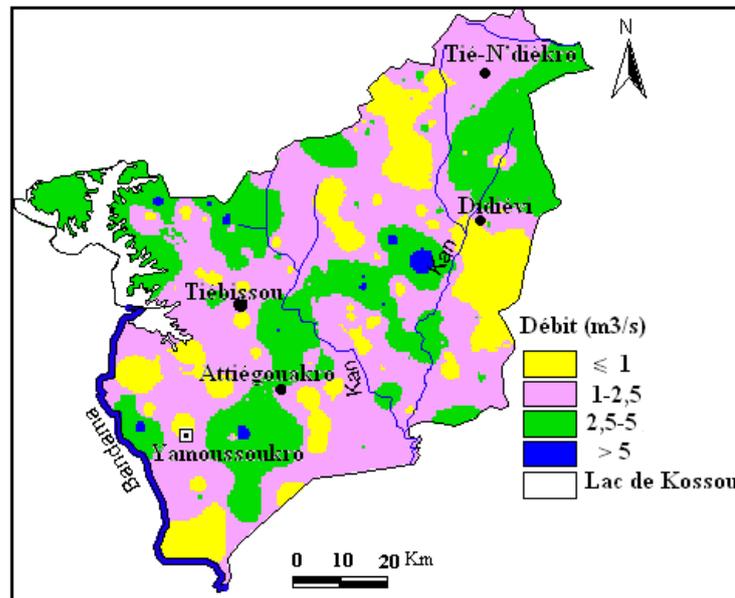


Figure 46 : Carte de répartition spatiale des débits

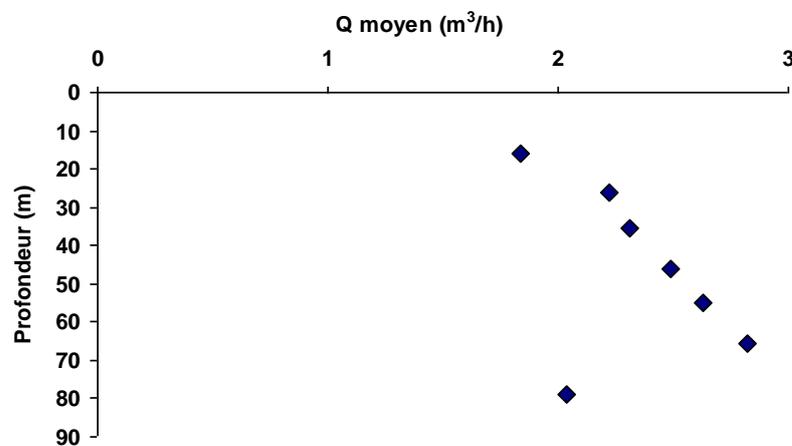


Figure 47 : Comportement des arrivées d'eau en fonction de la profondeur

8.2. CARACTERISATION DES PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES DES RESERVOIRS

8.2.1 Analyse et interprétation du débit spécifique et de la transmissivité

Les différents résultats obtenus sont consignés en annexe III.

- **Débit spécifique**

Dans le secteur d'investigation, les valeurs de débits spécifiques varient entre 0,008 et 2,03 m³/h/m avec une moyenne de 0,19 m³/h/m (Tableau XXIV). Sur les 105 données que nous avons traitées, seuls deux forages ont un débit spécifique supérieur à 1 soit 2% de l'effectif. Les valeurs élevées des coefficients de variation indiquent une forte dispersion au niveau des valeurs. On remarque à partir de la carte de répartition spatiale (Figure 48) que les valeurs de débits spécifiques supérieures à 0,5 m³/h/m sont très faiblement représentées. Par contre, plus de 90% de la zone est représentée par des valeurs inférieures ou égales à 0,05 m³/h/m.

Tableau XXIV: Statistiques élémentaires de la transmissivité (m²/h) et du débit spécifique (m³/h).

	<i>Effectif</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Moyenne</i>	<i>E.S.M.</i>	<i>C. V. (%)</i>
<i>T (m²/h)</i>	105	0,0083	2,0284	0,1867	0,025	136
<i>Q/s (m³/h)</i>	105	0,0041	1,6123	0,1784	0,030	173

N = 105 ; ESM : Erreur Standard sur la moyenne ; CV : Coefficient de variation

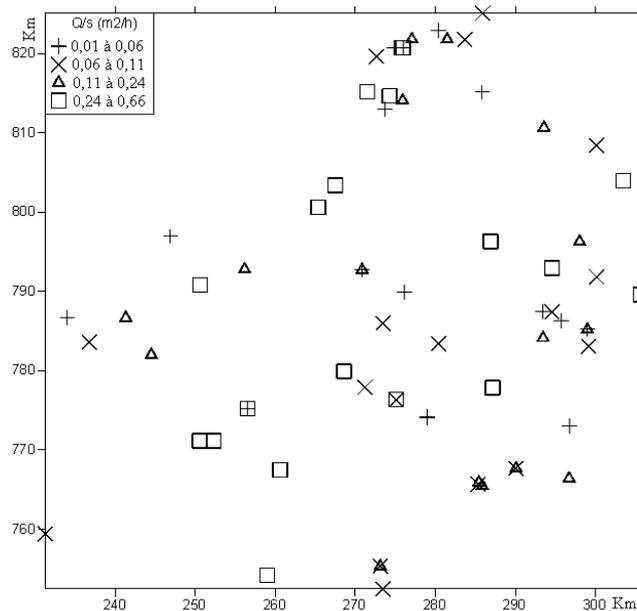


Figure 48 : Distribution des débits spécifiques dans la région des Lacs.

• **Transmissivité**

Les valeurs de transmissivités sont reportées en IV. Les valeurs extrêmes sont comprises dans l'intervalle $[1,15.10^{-6} ; 4,48.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}]$ avec une moyenne de $4,95.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, le coefficient de variation élevé ($Cv > 100$) traduit une forte dispersion des valeurs ce qui témoigne d'une certaine hétérogénéité des formations (Tableau XXIV). Les transmissivités ont été réparties selon trois classes en fonction des valeurs extrêmes rencontrées dans la zone. Ces classes sont reportées dans le tableau XXV et illustrées par la carte de la figure 49. La classe forte ($>10^{-4} \text{ (m}^2/\text{s)}$) représente 13,33% de l'effectif soit 14 forages sur les 105 retenus dans ce cas, l'aquifère exploité est très fissuré. La classe moyenne ($10^{-5} \leq T \leq 10^{-4} \text{ (m}^2/\text{s)}$) comprend 48,57% des forages. Ici les forages ont sans doute été implantés sur une roche dont la fracture ouverte est bien développée. Enfin, la classe faible ($10^{-6} \leq T \leq 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{s)}$) compte 38,1% des forages. Ceux-ci semblent capter des aquifères faiblement à moyennement fissurés. Dans l'ensemble, 61,90% des forages exploités ont des transmissivités supérieures à $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Tableau XXV: Classe des transmissivités dans la région des Lacs.

Class des Transmissivités	Effectif	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
$10^{-6} \leq T \leq 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{s)}$	40	$1,15. 10^{-6}$	$9,70. 10^{-6}$	$5,08. 10^{-6}$	$2,84.10^{-6}$
$10^{-5} \leq T \leq 10^{-4} \text{ (m}^2/\text{s)}$	51	$1,04.10^{-5}$	$9,73. 10^{-5}$	$3,45. 10^{-5}$	$2,51.10^{-5}$
$T > 10^{-4} \text{ (m}^2/\text{s)}$	14	$1,02. 10^{-4}$	$4,48. 10^{-4}$	$2,31. 10^{-4}$	$1,18.10^{-4}$

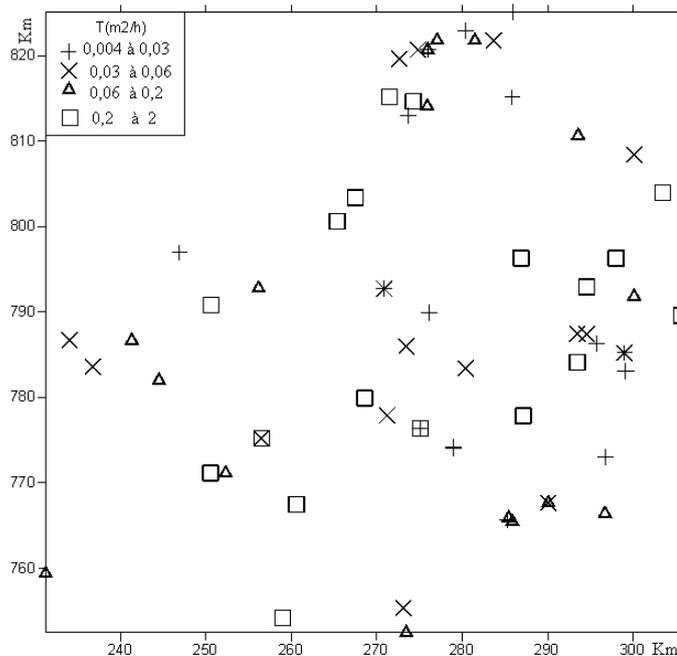


Figure 49 : Distribution spatiale des transmissivités dans la région des Lacs.

- **Perméabilités déduites**

Elles ont été obtenues à partir de la relation $T = K \times e$, où T est la transmissivité et e l'épaisseur mouillée de la nappe calculé à partir des logs de forages. Les résultats sont consignés en annexe IV. Les paramètres statistiques caractéristiques sont reportés dans le tableau XXVI.

Tableau XXVI : Résumé statistique de la perméabilité déduite au niveau des aquifères de la région des Lacs.

Paramètre	Effectif	Kmin	Kmax	K moy.	Ecart type	Cv (%)
k (m/s)	90	$1,54 \cdot 10^{-8}$	$1,87 \cdot 10^{-5}$	$1,35 \cdot 10^{-6}$	$2,69 \cdot 10^{-6}$	198,76

Les perméabilités des aquifères dans la région des Lacs sont faibles. Elles varient de $1,54 \cdot 10^{-8}$ à $1,87 \cdot 10^{-5}$ (m/s) avec une moyenne de $1,35 \cdot 10^{-6}$ (m/s). L'écart type élevé de même que le coefficient de variation rendent compte d'une forte dispersion au niveau de ce paramètre. Cette forte dispersion est sans aucun doute liée à l'hétérogénéité du milieu fissuré.

8.2.2. Etude statistique du débit spécifique et de la transmissivité

Dans ce paragraphe, le débit spécifique et la transmissivité ont été soumis à plusieurs tests d'ajustement statistiques (exponentielle, log-normale, normale, etc...) qui ont été validés par le test du Khi-deux (χ^2). Les résultats des tests statistiques appliqués à la transmissivité au débit spécifique sont reportés dans les tableaux XXVII et XXVIII.

Tableau XXVII : Résultats des tests statistiques appliqués à la transmissivité.

Loi de distribution	Paramètre	χ^2 calculé ($\alpha = 10\%$)	χ^2 théorique	Degré de liberté
Log-normale	T	2,05	2,71	1
Exponentielle	T	4,95	2,71	1
Normale	LogT	3,91	12,00	7

Tableau XXVIII : Résultats des tests statistiques appliqués au débit spécifique.

Loi de distribution	Paramètre	χ^2 calculé ($\alpha = 10\%$)	χ^2 theorique	Degré de liberté
Log-normale	Qsp	1,07	2,71	1
Exponentielle	Qsp	17,12	2,71	1
Normale	LogQsp	5,89	9,24	5

Les figures 50 et 51 présentent graphiquement ces résultats. La loi de distribution exponentielle présente un Khi-deux calculé supérieur au Khi-deux observé au seuil de 10%, de ce fait, elle est rejetée au profit de la loi log-normale. Pour vérifier, l'ajustement de la transmissivité à une loi log-normale, nous avons transformé les valeurs de T en $\log T$. A cet effet, il faut retenir que du point de vue théorique, un paramètre donné qui obéit à une distribution log-normale voit ses valeurs transformées obéir à la loi normale. La figure 51 montre que la distribution des fréquences des valeurs logarithmiques présente une forme symétrique semblable à la courbe de Gauss et de plus, le test du Khi-deux a confirmé cette hypothèse. Nous pouvons donc dire que du point de vue statistique, les fréquences observées ne diffèrent pas des fréquences théoriques. En outre, la distribution des logs de transmissivité dans un diagramme de probabilité log-normal (Figure 52) atteste nos conclusions. En somme, la transmissivité varie dans l'espace avec une loi de distribution log-normale et une corrélation spatiale assez forte. Tous, comme la transmissivité, le débit spécifique est distribué suivant la loi log-normale. Le graphe de la figure 53 rend compte effectivement de la validité de cette loi aux valeurs log du débit spécifique. Le fait que ces deux paramètres soient distribués suivant la loi de probabilité log-normale peut suggérer une relation possible entre eux. Dans le paragraphe qui suit, nous allons étudier la corrélation entre le débit spécifique et la transmissivité.

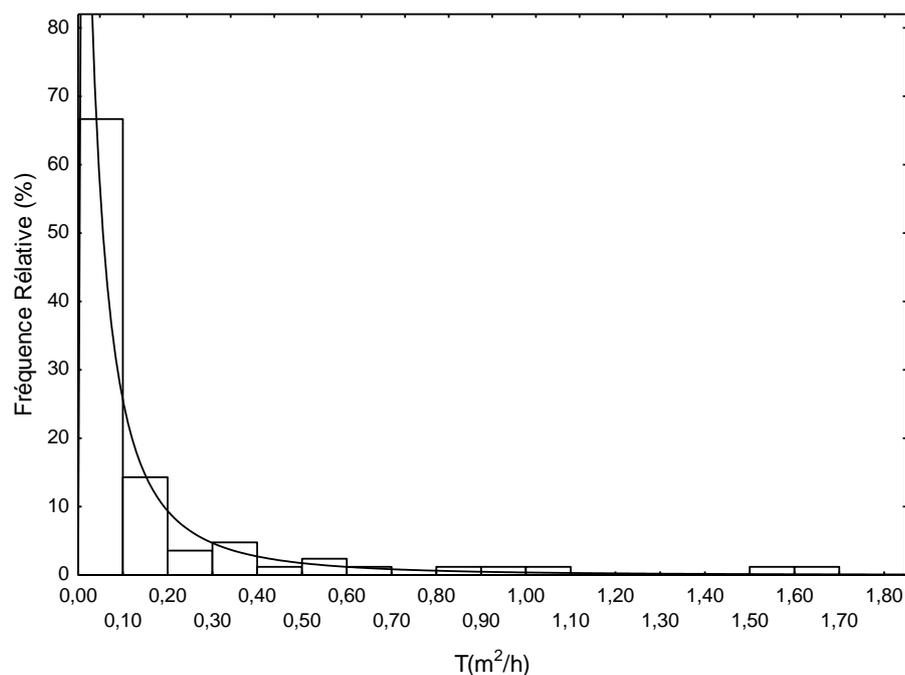


Figure 50: Distribution des fréquences de transmissivité.

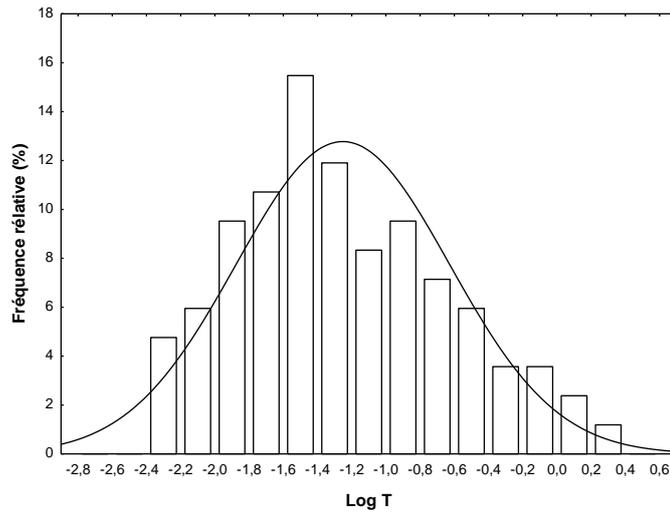


Figure 51 : Distribution des fréquences des logT. Ajustement à la loi normale.

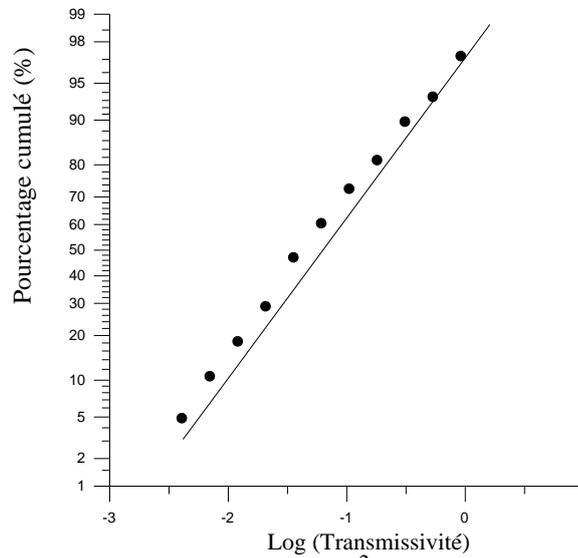


Figure 52 : Distribution de la transmissivité (m^2/h) et dans un diagramme lognormal.

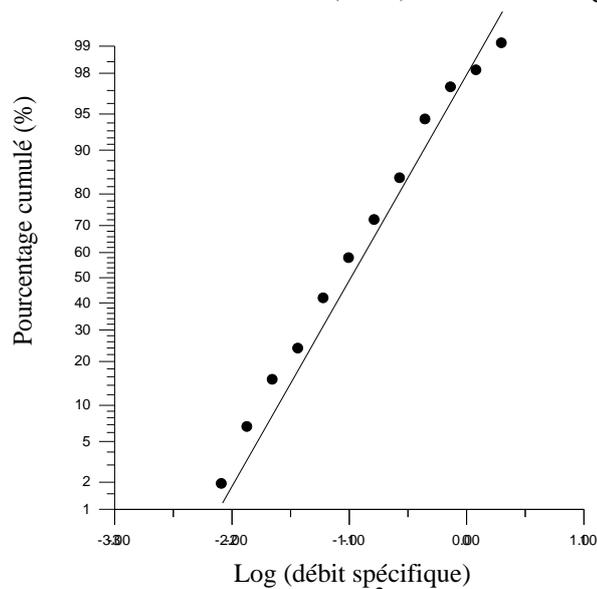


Figure 53 : Distribution du débit spécifique (m^2/h) dans un diagramme log-normal.

8.2.3. Relation entre transmissivité, débit spécifique et type de roche

- *Transmissivité et débit spécifique*

Dans ce graphe bi-logarithmique de la Figure 54, on remarque que la valeur théorique de la transmissivité est sous-estimée. Le faible coefficient de détermination ($R^2 = 0,32$) traduit l'absence de lien très significatif entre ces deux variables. Par contre, le graphe de la figure 55 donne un ajustement à la fonction puissance dans un diagramme bi-logarithmique des valeurs de transmissivité et de débits spécifiques en logarithme de base 10. Une relation empirique entre la transmissivité et le débit spécifique en utilisant la régression log-log a ainsi été établie. Ces deux opérations ont permis d'avoir un coefficient de détermination significatif ($R^2 = 0,8$). Ainsi, pour le premier nous obtenons une fonction puissance qui relie la transmissivité au débit spécifique dont l'expression est donnée par l'équation (49) :

$$T = 1,10.Q_{sp}^{1,266} \quad (\text{Eq.49})$$

Où T et Qsp sont exprimés en m²/h.

La formule de l'équation 49 confirme le caractère lognormal du débit spécifique et de la transmissivité. Le coefficient de détermination trouvé ici ($R^2 = 0,8$), indique que 80% des valeurs de transmissivité dans la zone d'étude dépendent du débit spécifique. Par ailleurs, la taille de l'échantillon est assez significative. De ce fait, ce modèle peut être appliqué dans la région des lacs et partout où la géologie est similaire.

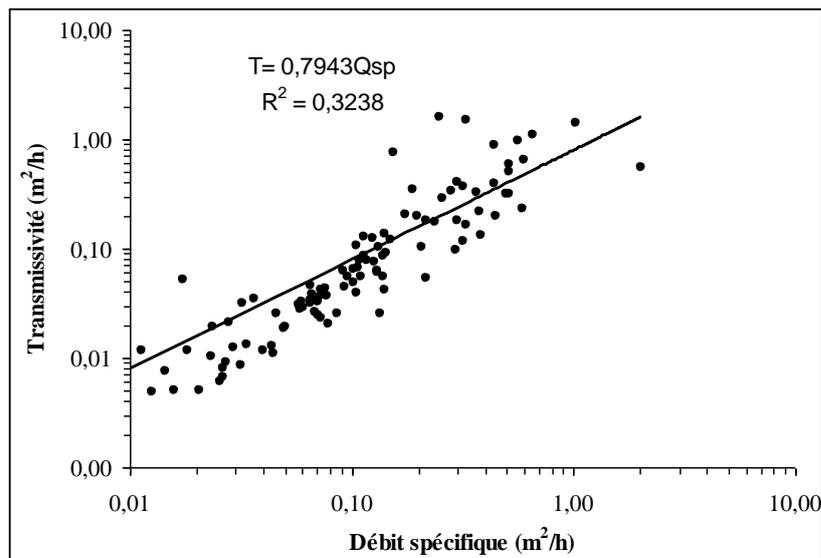


Figure 54: Distribution de la transmissivité en fonction du débit spécifique.

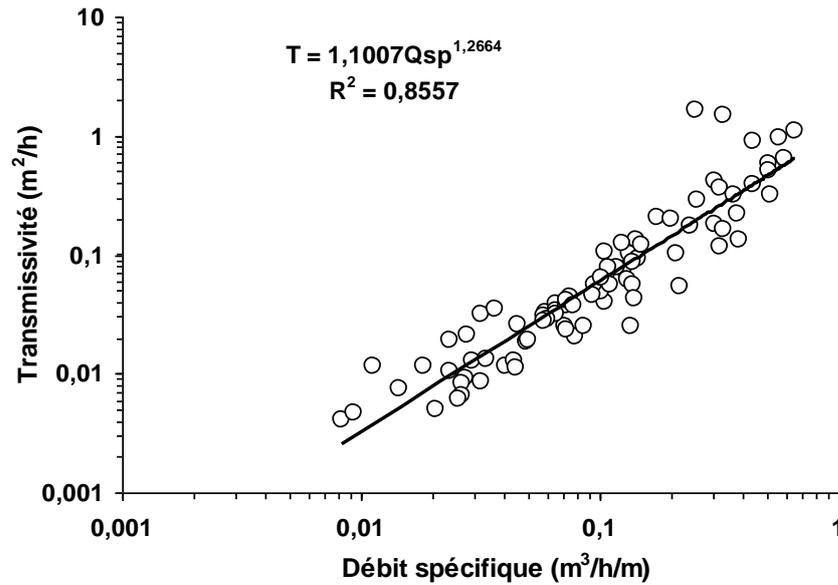


Figure 55 : Distribution de LogT en fonction de Log Q/s.

- **Transmissivité et type de roche**

Les transmissivités calculées ont été réparties en fonction de la nature géologique de l'aquifère (Tableau XXIX). Les forages sont implantés sur deux principales formations géologiques que sont les granites dans leur majorité et les schistes. En outre le tableau XXX donne une synthèse des différentes valeurs de transmissivité en relation avec la nature pétrographique du réservoir.

Sur les granites, les transmissivités varient de $1,15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ à $4,48 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ avec une moyenne de $4,96 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ et sur schistes, elle oscille entre $3,49 \cdot 10^{-6}$ et $1,13 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ avec une moyenne de $2,57 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Ces valeurs s'étendent sur trois ordres de grandeur qui sont 10^{-4} , 10^{-5} et 10^{-6} ce qui montre que les aquifères captés ne sont pas homogènes. La valeur moyenne sur granite bien qu'étant dans le même de grandeur que celle des schistes est la plus élevée.

Tableau XXIX : Transmissivité en fonction des types de roches dans la région des Lacs.

<i>Transmissivité (m²/s)</i>	<i>Schistes birimien (volcano-sédimentaire)</i>	<i>Granites (géosynclinal, à micas, à biotite, discordant)</i>
<i>Effectif</i>	8	72
<i>Maximum (m²/s)</i>	$1,13 \cdot 10^{-4}$	$4,48 \cdot 10^{-4}$
<i>Minimum (m²/s)</i>	$3,49 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-6}$
<i>Moyenne (m²/s)</i>	$2,57 \cdot 10^{-5}$	$4,96 \cdot 10^{-5}$
<i>Ecart-type (m²/s)</i>	$3,73 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$

Tableau XXX : Variation des valeurs de transmissivité en fonction du type de roches dans certaines régions de la Côte d'Ivoire.

Types de roches	Effectif	Transmissivité (m ² /s)
Biémi (1992) Haute Marahoué		
Gneiss	3	3,23.10 ⁻⁵
Migmatites	4	3,33.10 ⁻⁵
Granite	66	6,08.10 ⁻⁵
Syénite	2	6,10.10 ⁻⁵
Diorite	1	1,03.10 ⁻⁵
Quartzite	2	2,10.10 ⁻⁵
Amphibolite	1	1,9.10 ⁻⁵
Boucle de cacao (Faillat, 1986 Biémis in, 1992)		
Sandstone	60	5.10 ⁻⁵
Shales	231	5.10 ⁻⁵
Granite	31	3.10 ⁻⁵
Soro (2002) Sud-Ouest		
Socle cristallin granitique	25	2,08.10 ⁻⁴
Métasédiments and métavolcanite	7	1,0.10 ⁻⁴
Bassin sédimentaire côtier	7	95,9.10 ⁻⁴
Lasm (2000) Region des montagnes		
Gneiss gris	82	1.10 ⁻⁴
Migmatites	22	4,52.10 ⁻⁵
Charnockites	38	2,68.10 ⁻⁴
Ortho Gneiss	27	6,91.10 ⁻⁵
Amphibolo-Pyroxénites	3	1,17.10 ⁻⁵

8.2.4. Coefficient d'emménagement (S)

Du fait de l'absence de piézomètre d'observation, les mesures ont été effectuées directement dans le puits de pompage. C'est pourquoi pour cette étude, nous retenons les valeurs de Faillat (1986) sur le site expérimental de Yamoussoukro. Le coefficient d'emménagement dans la zone serait donc compris entre 10⁻⁴ et 10⁻³. Cet intervalle correspond aux valeurs pour les réservoirs fracturés des régions à substratum éruptif et métamorphique.

8.3. CARACTERISATION DE LA PRODUCTIVITE DES FORAGES PAR L'ACP

8.3.1. Analyse de la matrice de corrélation

La matrice de corrélation multiple des paramètres pris en considération est présentée dans le tableau XXXI.

Tableau XXXI : Matrice de corrélation des paramètres de forage

	<i>NIVP</i>	<i>CHG</i>	<i>DEBSP</i>	<i>DEBP</i>	<i>EPALT</i>	<i>PROF</i>	<i>PVE</i>	<i>EPROS</i>
<i>NIVP</i>	1,00							
<i>CHG</i>	-0,17	1,00						
<i>DEBSP</i>	0,09	-0,28	1,00					
<i>DEBP</i>	-0,14	0,06	0,66	1,00				
<i>EPALT</i>	0,38	-0,06	0,03	-0,03	1,00			
<i>PROF</i>	0,15	0,53	-0,22	-0,04	-0,03	1,00		
<i>PVE</i>	0,22	0,92	-0,24	0,01	0,09	0,586	1,00	
<i>EPROS</i>	-0,16	0,41	-0,18	-0,01	-0,71	0,72	0,34	1,00

L'analyse de ce tableau montre plusieurs niveaux de corrélation entre les différentes variables. On observe une corrélation significative entre la première venue d'eau et la charge hydraulique (0,92). Une corrélation moyenne ($r = 0,71$) est observée entre la profondeur totale du forage et l'épaisseur de la roche saine. Entre l'épaisseur des altérites et la profondeur de la roche saine, la corrélation est négative ($r = -0,72$). Ces deux variables évoluent de façon inverse. Le débit de production et le débit spécifique sont corrélés faiblement ($r = 0,66$). En dehors de ce lien, il n'existe aucun autre lien de dépendance entre ces deux variables et les autres paramètres.

8.3.2. Pourcentage de variance exprimée par les axes factoriels.

Les valeurs propres et les pourcentages de variance exprimée par chaque facteur sont consignés dans le tableau XXXII.

Tableau XXXII: Valeurs propres

	<i>Valeur propre</i>	<i>% variance exprimée</i>	<i>% variance exprimée Cumulée</i>
<i>Facteur 1</i>	2,95	36,89	36,89
<i>Facteur 2</i>	1,77	22,18	59,07
<i>Facteur 3</i>	1,56	19,54	78,61

On remarque que les trois premiers facteurs expriment plus de 70% de la variance avec 36,89% pour le facteur 1 et 22,18% pour le facteur 2 contre 19,54% pour le facteur 3. En somme, ces trois facteurs expliquent 78,61% de la variance totale, ce qui est très satisfaisant pour effectuer cette analyse. La projection du nuage de points a donc été faite dans les plans des axes 1-2 et 1-3. Il n'existe pas de structure forte dans l'échantillonnage réalisé ceci à cause de la modeste variance exprimée par le premier axe.

8.3.3. Analyse dans les plans factoriels F1-F2 et F1-F3 dans l'espace des variables

- **Plan F1-F2** (Figure 56a)

Le facteur F1 est défini par les variables suivantes : la profondeur totale du forage (PROF), la première venue d'eau (PVE), la charge hydraulique (CHG) et à un degré moindre par l'épaisseur de la roche saine (EPROS). Ces paramètres sont susceptibles d'influencer la productivité d'un forage. Mais, ils ne garantissent pas une bonne productivité. Par contre, ces paramètres influencent surtout le prix du forage. En effet, le coût d'un forage est plus élevé lorsque la profondeur totale du forage est importante de même que l'épaisseur de roche saine. Le coût total de foration est la somme du coût de foration dans les altérites plus celui dans le socle. De ce fait, le facteur 1 exprime *le coût d'investissement pour atteindre un aquifère et construire un ouvrage productif*.

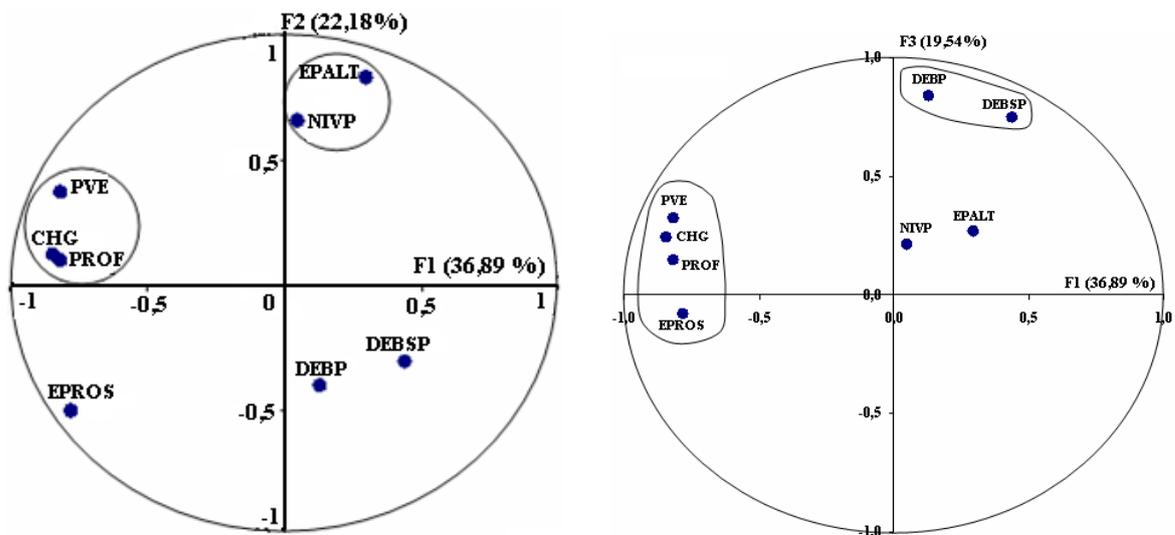
Le débit de production (DEBP) et le débit spécifique (DEBSP) restent indépendants vis-à-vis de cet axe. Ces différentes variables n'ont donc aucune influence sur le débit. La corrélation très significative qui existe entre la charge hydraulique et la première venue d'eau rend compte de l'affinité qui existe entre ces deux paramètres. Par contre, le facteur F2 oppose l'épaisseur des altérites et le niveau piézométrique au débit de production. On remarque aussi que le débit spécifique évolue indépendamment des autres paramètres. L'épaisseur des altérites influence la productivité des forages. Mais, cette influence relève du domaine probabiliste. En effet, une forte épaisseur d'altération de même qu'une faible épaisseur ne garantit pas l'obtention d'un fort débit.

Ces résultats témoignent du fait qu'il existe une variation inversement proportionnelle entre les débits de production importants et l'épaisseur des altérites. Plus les épaisseurs des altérites sont importantes et moins on obtient de gros débits. Il en est de même pour le niveau piézométrique (niveau statique), plus il est profond par rapport à la surface du sol, moins la

productivité de l'ouvrage est garantie. De ce qui précède, le facteur 2 traduit, la *probabilité d'obtenir une bonne productivité des ouvrages*.

• **Plan F1-F3** (Figure 56b)

Le facteur 3 est représenté par le débit de production (DEBP) et le débit spécifique (DEBSP). Ces deux paramètres sont caractéristiques de la productivité des forages. Le facteur 3 est donc le facteur *de productivité des forages*.



56a. F1x F2 dans l'espace des variables 56b. F1x F3 dans l'espace des variables

Figure 56 : Analyse en composantes principales dans les plans factoriels F1 -F2 et F 1 -F3 (Espace de variables).

8.4. CARACTERISATION DE LA FRACTURATION DE LA ZONE D'ETUDE

8.4.1. Analyse statistique de la carte linéamentaire

La carte linéamentaire (figure 57) de la zone d'étude a été extraite des images satellites après les différents traitements, 3065 linéaments ont été extraits. Les différents linéaments ont été transformés en données numériques par maille de 5km x 5km. Cette étude a permis d'obtenir l'orientation, la longueur ainsi que le nombre de linéaments.



Figure 57: Carte des linéaments de la zone d'étude.

8.4.2. Discrimination des familles de linéaments

L'analyse de l'histogramme (Figure 58) montre que la classe N-S est majoritaire. Les classes N90-100, N20-30, N40-50, N60-70 et N150-160 se démarquent plus ou moins de l'ensemble. Elles constituent les directions secondaires des linéaments issus des images satellites. L'orientation des linéaments est une caractéristique importante puisque des fractures qui ont toutes la même direction auront moins tendance à se croiser que des fractures qui ont des orientations différentes. Les linéaments obtenus, ont des directions multiples et pourraient donc former un réseau d'écoulement dense et de ce fait, favoriser un bon écoulement de l'eau. Dans la même zone, Yao (1998) dans ses travaux a trouvé des linéaments de directions N00 à N10, N020 à N030, N040 à N050 et N130 à N150 sur des granites. Selon l'auteur, la direction N130 à N150 varie largement. Elle représente les ensembles granitiques. Par contre, la direction N020 à N030 est toujours bien représentée et est caractéristique des formations volcanosédimentaires.

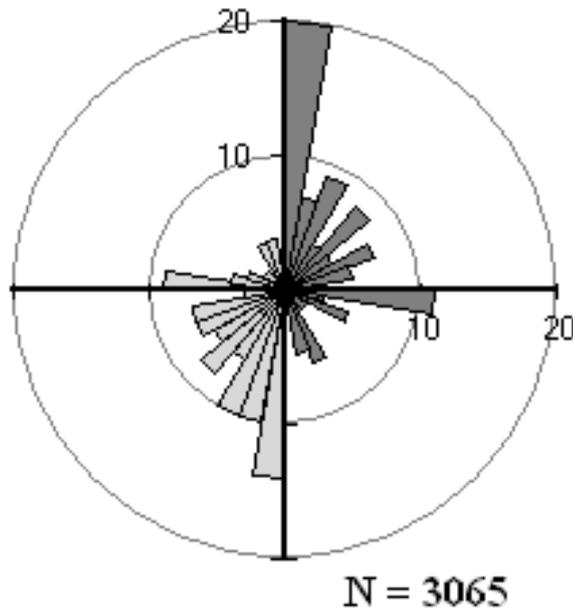


Figure 58: Histogramme de distribution des orientations des linéaments.

8.5. DISCUSSION DES RESULTATS DE LA CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUES DES AQUIFERES ET DE LA PRODUCTIVITE DES OUVRAGES

• Paramètres des forages

Dans l'ensemble, nous pouvons dire que ce soit sur schistes ou granites, les profondeurs maximales dépassent rarement les profondeurs limites de foration proposer dans la littérature (80 m sur granites, et 100 m sur schistes) en Afrique de l'Ouest en général et en particulier en Côte d'Ivoire ; ceci pour des raisons économiques (Biémi, 1992 ; Lasm, 2000). Sur 182 ouvrages, l'épaisseur moyenne des altérites sur granites est de 51,90 m. Cette valeur moyenne est supérieure à celle proposée par Engalenc (1978) sur granites qui varie de 15 à 20 m. En outre elle est supérieure à celle obtenue sur schistes qui est de 32,67 m. Cette valeur est largement inférieure à celle trouvé par Haubert (1977) dans la boucle du cacao en Côte d'Ivoire qui est d'environ 45m sur schistes. Ce recul du front d'altération sur les schistes Birimiens a été constaté par Haubert (1977). Selon l'auteur, ce front progresse plus en avant dans les schistes purs du Birimien à cause de la présence de niveaux gréseux qui rendent le Birimien plus résistant au processus de l'altération. Dans la recherche d'un lien entre la nature géologique de l'altération et la productivité des forages, Biscaldi (1967) a conclu à l'existence d'une relation positive entre l'épaisseur d'altération totale sur roches granito-gneissiques et la productivité des ouvrages, mais sur schistes, cette relation est semble-t-il négative.

Plusieurs auteurs ayant travaillé en Afrique de l'Ouest notamment en Côte d'Ivoire (Berger *et al.*, 1980-1981) en Haute Volta actuel Burkina Faso et au Togo, Assouma (1982 et 1988) *in* CEFIGRE (1990) ont obtenu une relation analogue entre l'épaisseur du réservoir d'altérites (couche d'altération) et la productivité ou le taux de succès des forages. Ces deux paramètres augmentent avec l'épaisseur pour toutes les roches cristalline et cristallophyllienne exception faite pour les schistes birimiens de Côte d'Ivoire où une trop forte épaisseur d'altération a un effet plutôt défavorable sur la productivité.

L'absence d'une corrélation nette entre la profondeur des forages et l'épaisseur des altérites est due au fait que l'arrêt du forage est conditionné par le débit recherché. De ce fait, la profondeur d'un forage est sous l'influence du débit recherché pendant les campagnes (Biscaldi, 1967 ; Engalenc, 1978 ; Thiery, 1981 *in* Mbonu, 1991; N'guessan, 1985 ; Déta, 1987). Selon ces auteurs en plus de ce facteur, il faut tenir compte du fait que les fractures hydrauliquement actives ont tendance à se fermer avec la profondeur. Cependant, il faut noter qu'il est possible de rencontrer des débits élevés ou faibles au-delà 100 m, mais ces venues d'eau sont du domaine du hasard. Elles sont généralement signalées par les mineurs sortant du cadre de la prospection hydrogéologique (Engalenc, 1978). Les valeurs de l'épaisseur des altérites obtenues dans cette étude se situent dans l'intervalle de l'épaisseur maximum moyenne des altérites qui est de 40 à 50m quel que soit le pays ou le climat considéré (Engalenc, 1978). Au regard de ces valeurs, et en tenant compte du fait que l'altération est sous la dépendance directe des fractures ouvertes et que l'ouverture de celles-ci est en général due à la décomposition superficielle des roches et à la tectonique cassante (Faillat, 1986), nous pouvons dire que c'est une zone très altérée.

L'aquifère que constitue ces altérites est généralement exploité par les puits modernes qui ne peuvent pas dépasser plus de 30m et les puisards. C'est un aquifère qui est très important parce qu'il joue un rôle capacitif. On serait donc tenté de croire qu'une forte épaisseur d'altérite serait la garantie d'avoir un bon débit lors d'une campagne de forage. Mais très souvent cette relation n'est pas vérifiée. En effet, selon Biémi, (1992), la présence d'une épaisseur trop importante d'altérites aura tendance à masquer les fractures sous-jacentes. L'alimentation par les eaux d'infiltration peut ainsi être retardée ou empêchée suivant la nature lithologique du recouvrement. C'est le cas des schistes où l'altération est de nature argileuse avec une épaisseur très importante mais très peu perméable. Une altération qui n'est pas très épaisse favorise l'accroissement du débit avec la profondeur. Dans le cas contraire, si l'épaisseur de la roche altérée dépasse les 40m, l'accroissement des débits est compromis (Engalenc, 1978).

Ces différents résultats, permettent de dire qu'il est possible de rencontrer de grands débits au-delà d'une certaine épaisseur d'altération. Dans ce cas, l'on serait dans le domaine de la probabilité. Ainsi, l'étude du rôle joué par l'épaisseur des altérites sur le débit, le débit spécifique a été réalisée dans la zone d'étude. Celle-ci est inspirée par les travaux de Detay et *al.*(1989) et Déta, 1991 *in* Savané (1997). Les écoulements en milieu fracturé sont imposés par la fissuration, ils restent en général laminaires et obéissent à la loi de Darcy (Detay et *al.*, 1989). Selon les mêmes auteurs, la vitesse moyenne d'écoulement dans une fracture est proportionnelle au carré de l'ouverture de cette dernière, ceci dans le cas d'un régime laminaire. Le coefficient de débit est proportionnel au cube de la largeur des fissures. De ce fait, le colmatage de ces dernières lié à l'augmentation du recouvrement, à dominance argileuse, entraîne au-delà du seuil critique une stabilisation du débit et la décroissance exponentielle du débit spécifique quand E_a augmente. Les différentes courbes proposées ici mettent en évidence ces seuils critiques : 30m pour Q (E_a), 13 m pour Q_s (E_a). Ces résultats sont en conformité avec ceux de Detay et *al.* (1989) dans le socle de l'Afrique centrale (Cameroun, Gabon, Centrafrique) ainsi que de Savané (1997) dans le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire sur le socle de l'Afrique de l'Ouest.

Dans la littérature, les arrivées d'eau les plus productives sont situées dans les trente premiers mètres sous la couche des altérites (Soro, 1987 ; CEFIGRE, 1990 ; Biémi, 1992 ; Lasm, 2000). Le débit de ces arrivées d'eau est plus ou moins fonction des propriétés géométriques des systèmes de fractures (longueur et interconnexion), de l'importance de la tectonique et dans une certaine mesure de l'épaisseur de la couche d'altération (Lasm, 2000). La moyenne de l'épaisseur d'altération étant environ égale à 49 m. De même, la valeur de l'écart type (environ 17 m), témoigne d'une forte dispersion des valeurs. Ce résultat est en accord avec ceux des auteurs ayant travaillé en Afrique de l'Ouest et que nous avons cités plus haut.

La forte récurrence de débits faibles n'est pas spécifique à la zone d'étude. En effet, dans la région de Man-Danané, 73% des débits rencontrés sont faibles (Lasm, 2000) de même que dans la région de Grand-Lahou où ils représentent 75% (Soro, 2002). Ces faibles débits sont également observés par différents auteurs ayant travaillé en Afrique de l'Ouest. Pour Saley (2003), ces faibles débits sont le fait d'un faible ravitaillement de la nappe ou à l'absence d'une faille drainante dans la zone de captage posant ainsi le problème d'implantation des forages. Dans la région des lacs, ces faibles débits sont surtout la conséquence d'un manque d'étude classique d'implantation de forage. En effet, il a été

constaté sur le terrain que plusieurs ouvrages ont été exécutés sans aucune étude préalable. Ce résultat est en accord avec les observations faites par Lenck et Haubert (1977) cités par Soro (2002) dans l'ancienne boucle du cacao à l'Est de la Côte d'Ivoire. La productivité des forages est liée à la qualité (ouverture ou degré de colmatage) de la fissuration et à l'épaisseur de la tranche fissurée. Au-delà de ces profondeurs (où la productivité baisse), les fissures se renferment ou deviennent rares (CEFIGRE, 1990 ; Dewandel et *al.*, 2006).

De ce qui précède, il ne serait plus économique de poursuivre le forage à une certaine profondeur au-delà de 80 m, car la chance de rencontrer de gros débits serait le fait du hasard et augmenterait en même temps le coût de revient du forage. Ces mètres inutiles sont qualifiés de surcreusement (Biémi, 1992, Savané, 1997). En somme, une combinaison des différentes méthodes d'implantation à savoir, la géophysique, la photointerprétation et la télédétection pourrait contribuer à améliorer qualitativement les débits lors des différentes campagnes.

• Paramètres hydrodynamiques

Les valeurs de débits spécifiques trouvées ici s'apparentent à celles fréquemment rencontrées dans la littérature au Burkina Faso et en Côte d'Ivoire qui oscillent entre 0,100 et 0,200 m³/h/m (Engalenc, 1978). Ces résultats sont similaires à ceux trouvés dans la région de la Marahoué (Biémi, 1992), dans la région d'Odiénné (Savané, 1997) et dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire notamment dans la région de Man-Danané (0,01 et 2 m³/h/m) (Lasm, 2000). La fréquence de cette gamme de débits spécifiques laisse à penser que les forages sont implantés sur des fractures secondaires. Selon Biémi (1992), l'on peut à partir des valeurs des débits spécifiques se faire une idée de l'ampleur d'un programme de foration dans une région ainsi que les techniques employées pour l'implantation des forages. En effet, on a pu constater dans le bassin versant de la Marahoué tout comme dans certaines régions du pays, Bouaké et Man (Faillat, 1986), que les débits spécifiques dépassaient rarement 1m³/h/m. Par contre, dans les programmes d'AEP des grandes agglomérations, 50 % des ouvrages ont des débits spécifiques supérieurs à 1m³/h/m et parfois pouvant même dépasser les 10 m³/h/m. Ce constat est consolidé par le fait que, lors des campagnes de forages en zone de socle, la recherche de gros débits n'est pas nécessaire car, avec 1 m³/h, les besoins en milieu rural sont satisfaits. Par conséquent, l'implantation du forage ne nécessite pas l'usage des méthodes de prospection en vigueur et, très souvent, c'est la géomorphologie qui prime. A cela, il faut ajouter l'influence des personnalités locales sur le choix du site du forage sans tenir compte

des résultats des études. Cependant, si l'on veut avoir des débits spécifiques supérieurs, ce qui est souvent le cas pour les systèmes d'hydraulique villageoise améliorés (HVA) qui sont de l'hydraulique urbaine à petite échelle, il importe de rechercher une fracture kilométrique et ne pas tenir compte de certains facteurs socioculturels, économiques qui pourraient empêcher l'obtention d'un bon résultat. Ceci, ne peut se faire qu'à partir d'études hydrogéologiques sérieuses en couplant les photographies aériennes et la télédétection avec à la géophysique.

Les transmissivités calculées dans cette étude sont conformes à celles trouvées par d'autres auteurs ayant travaillé en milieu fracturé en Côte d'Ivoire (Haubert, 1977 ; Faillat et Leblond, 1982, Leblond, 1984, N'guessan, 1985 ; Faillat, 1986 ; Soro, (1987 ; 2002) ; Biémi, 1992 ; Tapsoba, 1995 ; Savané, 1997 ; Jourda, 2005 ; Ahoussi, 2008) et en Afrique de l'Ouest (Savadogo, 1984 ; Traoré, 1985 ; Engalenc, 1978). Cependant, la valeur moyenne de la transmissivité est inférieure à celle trouvée par Lasm (2000), Soro (2002) et Ahoussi (2008), qui est respectivement de $1,23 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ dans l'archéen de l'Ouest de la Côte d'Ivoire, $2,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ et dans le Sud-Ouest (Grand Lahou et environs) et de $1,12 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ dans le socle de la région d'Abidjan-Agboville contre $4,95 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ dans la région des Lacs. Cette moyenne est supérieure à celle des autres travaux cités plus haut. La dispersion marquée des valeurs rend compte de la complexité des unités géologique et de l'hétérogénéité des aquifères. Le pourcentage élevé des faibles valeurs est attribué au caractère semi-captif des nappes (Soro, 2002). De même, les fortes valeurs pourraient être dues à une remarquable fracturation et à de bonnes propriétés géométriques développées par ces réservoirs et de leur connexion. La nature pétrographique du réservoir peut jouer également une influence sur la transmissivité.

Les perméabilités déduites de la région des lacs sont faibles. Elles suivent la même évolution que les transmissivités. Ces valeurs sont dans le même ordre de grandeur que celles obtenues par Soro (2002) qui sont de l'ordre de $3,73 \cdot 10^{-7}$ à $4,55 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ dans les formations granitiques de Grand Lahou. Ces valeurs sont inférieures aux perméabilités induites trouvées par Biémi (1992) dans la région de la Marahoué (10^{-6} à 10^{-4} m/s) et par Jourda (2005) dans la région de Korhogo qui varient de 10^{-6} à 10^{-5} m/s . Par contre, elles sont supérieures à celles obtenues respectivement par Savané (1997) dans la région d'Odiénné (10^{-10} à 10^{-11} m/s) et Ahoussi (2008) dans la région d'Abidjan-Agboville (10^{-8} à 10^{-7} m/s). La différence entre ces divers résultats est imputable à la densité de la fracturation de la zone, aux fractures captées et aux méthodes de détermination. Les faibles valeurs de perméabilités obtenues dans la région des lacs pourraient être dues au fait que les ouvrages de captage sont implantés sur des

fractures secondaires où l'écoulement des eaux peut être approché par la loi de Darcy. Dans ce cas, on a des perméabilités d'interstice.

L'analyse statistique a montré que les valeurs de transmissivité et de débits spécifiques s'ajustent à la loi lognormale. Ces résultats sont conformes à ceux de Lasm (2000) dans les aquifères archéens de l'Ouest de la Côte d'Ivoire (Lasm, 2000) et dans la région d'Abidjan-Agboville (Ahoussi, 2008). Nos résultats sont accord avec ceux de Jalludin et Razack, (2004), dans la corne de l'Afrique, notamment dans les basaltes volcaniques de Djibouti. Cet ajustement de la transmissivité à la loi log normale serait lié à l'hétérogénéité des aquifères en milieu fissuré (Lasm, 2000 ; Jalludin et Razack, 2004, Razack et Lasm, 2006).

L'estimation théorique de la transmissivité d'un aquifère en utilisant le débit spécifique a intéressé plus d'un auteur. Celle-ci vient du fait que les données de transmissivité sont en général rares dans certaines zones et aussi à cause des essais de pompage qui ne répondent pas très souvent aux conditions de Theis et Jacob. Ainsi, en Côte d'Ivoire, Faillat, (1986a), Soro (1987) et Lasm (2000) ; Razack et Lasm (2006) s'y sont intéressés. Ailleurs, on peut citer entre autres, Razack and Huntel (1991) ; Jalludin (1993); Acheampong et Hess (1998) ; Meier et *al.* (1999) ; Jalludin et Razack, (2004) ; Hamm et *al.* (2005) ; Razack et Lasm (2006) ; Srivastav et *al.*, (2007) et Rotzoll et El-Kadi (2008) qui ont consacré leurs travaux sur cette question. La relation empirique entre la transmissivité et le débit spécifique calculée pour cette étude diffère de celles de la littérature. Cette différence est due en partie aux conditions qui prévalent sur chaque site donné (Hamm et *al.*, 2005 ; Razack et Lasm, 2006). En comparant plusieurs relations empiriques issues de différents systèmes aquifères, Hamm et *al.* (2005) ; Razack et Lasm (2006) attribuent ces différences entre ces équations à plusieurs facteurs. Parmi ceux-ci, nous avons, les mesures de rabattements qui peuvent être différentes selon les ouvrages, la durée du pompage, le mode de développement du puits, la géologie, l'hydraulicité de l'aquifère, la pénétration partielle du puits et le coefficient d'emménagement de l'aquifère. Pour Meier et *al.*, (1999), les paramètres de l'équation de régression obtenus entre T et de Q/s sont affectés par l'hétérogénéité de l'aquifère, la période d'analyse et les pertes de charges due à la turbulence au niveau du puits. Ainsi, chacun de ces facteurs pourrait affecter les paramètres de l'équation de régression. La compréhension de ces facteurs permettrait d'expliquer la variabilité de ces différentes relations empiriques.

En effet, selon Lasm (2000), cette relation empirique entre T et Q/s indique que ce dernier est l'expression de la géométrie des fractures et de leur connexion avec l'ouvrage. Toutefois, le coefficient de détermination ($R^2 = 0,80$) trouvé dans la présente étude, indique que les transmissivités peuvent être calculées à partir de cette relation empirique dans les endroits où elles manquent dans le même contexte géologique. Cependant, il convient d'avoir toujours à l'esprit que ces valeurs de transmissivité calculées dans ce genre de cas restent toujours entachées d'erreurs qui ne sont pas négligeables. Par conséquent, l'estimation des transmissivités par le débit spécifique ne doit pas être abusée.

Le lien entre la nature pétrographique et la transmissivité des aquifères a fait l'objet de plusieurs études (Biémi, 1992 ; Lasm, 2000 ; Soro, 2002 ; Dibi et *al.*, 2004, Ahoussi, 2008). Dans la littérature, il est admis que la valeur maximale pour un granito-gneiss faillé est de 4.10^{-4} m²/s et que les filons de quartz et les quartzites présentent les meilleures transmissivités (Engalenc, 1978). Cependant, les schistes sont les plus transmissifs surtout lorsqu'ils sont gréseux (Engalenc, 1978). Cette forte transmissivité des schistes serait liée à leurs plans de schistosité verticale qui sont des zones de moindres résistances. En effet, selon Biemi (1992), les schistes à l'origine sont horizontaux ce qui les rend les imperméables car, l'eau ne pouvant trouver des passages. En somme, la nature pétrographique de la roche et les phénomènes tectoniques sont les facteurs principaux qui influencent les propriétés hydrodynamiques des aquifères en milieu fissuré.

• Productivité des ouvrages

La productivité d'un ouvrage hydraulique est influencée par plusieurs facteurs dont certains sont estimables et d'autres non. Ces facteurs ne sont pas très liés les uns aux autres (Bakalowicz, 1986 *in* Mbonu, 1991). Ils peuvent concerner la nature tectonique du socle, la géomorphologie, la stratégie d'implantation des ouvrages, le savoir-faire du foreur et l'équipement (Biscaldi, 1967 ; Detay, 1987 ; Mbonu, 1991), les mœurs, les coutumes et très souvent les humeurs des personnalités de la région (Biémi, 1992). L'inconvénient est que ces facteurs ne sont pas quantifiables. Ces remarques sont celles relevées dans les aquifères du plateau de Jos (Nigéria) (Mbonu, 1991), dans le socle camerounais et centrafricain (Détay, 1987), dans la boucle du cacao (Fahy, 1980-81) et dans le bassin de la haute Marahoué (Biémi, 1992). Selon Kouadio (2005), la productivité des forages est liée à la fois à la qualité

de la fissuration (ouverture ou degré de colmatage) et à l'épaisseur de la tranche fissurée, ainsi, au-delà de ces profondeurs, les fissures se renferment et deviennent rares.

Le lien inverse entre le débit de production et l'épaisseur des altérites résulte probablement de la nature sablo-argileuse des formations altéritiques (Mbonu, 1991). C'est le cas par exemple des schistes où l'altération est argileuse et peu perméable (Fahy, 1980-81). L'absence de corrélation entre le débit et la profondeur totale du forage serait due à la stratégie d'implantation des forages lors des différentes campagnes hydrauliques. En effet, très souvent la profondeur est déterminée par le débit recherché avant même le début de la campagne hydraulique. Ainsi, les profondeurs les plus grandes trouvées ici dans cette zone seraient liées au fait que n'ayant pas obtenu le débit recherché, l'on ait poursuivi la foration. Généralement, en zone de socle, lors des campagnes de forages, les forages très productifs sont arrêtés plutôt dès qu'une productivité jugée suffisante est assurée. *A contrario*, les forages négatifs ou peu productifs sont forés plus profonds dans l'espoir d'atteindre un débit minimal exploitable (Gassita et al., 1987). De ce fait, trouver un lien entre le débit et la profondeur est une réponse qui n'est ni simple ni unique. En plus, en région cristalline, trouver un débit satisfaisant au-delà de 120 m de profondeur est très aléatoire. Une grande profondeur ne garantit donc pas une grande productivité des ouvrages (Savadogo, 1984). L'une des questions à laquelle l'on doit répondre avant de faire des forages de grande profondeur est le prix de revient du mètre cube d'eau exploitable car, la productivité des forages baisse et entraîne une perte au niveau économique.

Au total, la poursuite d'un forage à une plus grande profondeur dans l'optique d'obtenir un meilleur débit tombe dans le domaine probabiliste. La profondeur à laquelle il y a fermeture totale des fractures, n'est pas connue avec précision, mais elle est certainement toujours supérieure à 120 mètres (Savadogo, 1984). La seule certitude que l'on a, est que dans les schistes, les débits sont d'autant plus meilleurs que la profondeur est plus grande. En définitive, il n'existe pas de relation entre le débit et la profondeur totale du forage.

CONCLUSION PARTIELLE

La zone d'étude comprend deux grands ensembles géologiques que sont les formations cristallines et cristallophylliennes qui constituent les principaux aquifères. L'étude des paramètres hydrauliques de ces aquifères à travers l'analyse des différentes fiches techniques des forages et l'interprétation des essais de pompage des forages a permis de comprendre le fonctionnement de ces aquifères et leur qualité hydrogéologique.

Les résultats de l'analyse statistique élémentaire des paramètres quantitatifs des forages montrent que :

- o la profondeur totale des forages varie de 28 à 100 m avec une moyenne de 68,54 m. Cette moyenne est la même sur granites, par contre sur schistes, elle avoisine les 70 m ;
- o l'épaisseur d'altération est comprise entre 8 et 95 m avec une moyenne de 49 m et 95% de la zone d'étude sont couvertes par une épaisseur qui varie de 20 à 60 m, l'altération est plus importante sur granite (52 m) que sur schistes (33 m) ;
- o Plus de 88% des forages ont leur niveau statique situé dans les 20 premiers mètres donc dans les altérites ;
- o 67% des débits rencontrés dans la zone se situent dans l'intervalle de 1 à 2,5 m³/h. le débit le plus faible est de 0,12 m³/h alors que le plus élevé est de 14,4 m³/h avec une moyenne de 2,37 m³/h.

Les valeurs de la transmissivité varient de $1,15 \cdot 10^{-6}$ à $4,48 \cdot 10^{-4}$ m²/s avec une moyenne de $4,95 \cdot 10^{-5}$ m²/s dans l'ensemble. La valeur moyenne au niveau des granitoïdes est comprise dans cet intervalle par contre les schistes ont des valeurs qui sont comprises entre $3,49 \cdot 10^{-6}$ et $1,15 \cdot 10^{-4}$ m²/s avec une moyenne de $2,57 \cdot 10^{-5}$ m²/s.

Les débits spécifiques varient entre $8 \cdot 10^{-3}$ et $2,03$ m²/h/m avec une moyenne de $0,19$ m²/h/m. Ces valeurs sont très faibles dans l'ensemble. Ils reflètent l'objectif fixé lors des campagnes d'hydrauliques villageoises pendant lesquelles, la recherche de gros débits n'est pas primordiale pour satisfaire les besoins en eau des populations rurales. Les valeurs de perméabilités déduites sont faibles et s'alignent sur le même ordre de grandeur que celles de la transmissivité. Elles varient de $1,54 \cdot 10^{-8}$ à $1,87 \cdot 10^{-5}$ m/s avec une moyenne de $1,35 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Une étude probabiliste du débit, du débit spécifique et de l'épaisseur d'altération a permis de trouver des seuils critiques de 30 m et de 13 m d'épaisseur d'altérite respectivement

pour les fonctions $Q(Ea)$ et $Qs(Ea)$. Au-delà de ces valeurs, on constate une stabilisation du débit et parallèlement une décroissance exponentielle du débit spécifique quand l'épaisseur des altérites augmente. De même, au-delà d'une profondeur de 70 m, on constate une chute au niveau des débits des forages.

L'étude statistique de la transmissivité et du débit spécifique a montré que ces deux paramètres sont distribués suivant la loi de probabilité log-normale. Cet ajustement à la loi log normale serait lié à l'hétérogénéité des aquifères de la zone d'étude. Cette relation est très importante, car elle permettra dans le futur d'entreprendre une modélisation hydrodynamique de ces aquifères. Une relation empirique a été obtenue entre la transmissivité et le débit spécifique :

$$T = 1,10.Qsp^{1,266}, R^2 = 0,8$$

Elle a permis d'estimer la transmissivité lorsque les essais de pompage ont fait défaut à certains endroits dans la zone d'étude.

L'analyse en composantes principales a permis de mettre en évidence que le débit du forage n'est pas déterminé par les seuls paramètres hydrogéologiques des forages. Certains paramètres non quantifiables sont à prendre en compte de la recherche de gros débits en milieu de socle. Ce sont entre autres : la tectonique et la géomorphologie du terrain, la stratégie d'implantation des forages, la méthode d'équipement et les moyens économiques mis en jeu lors d'une campagne de foration qui influenceraient la productivité du forage. La prise en compte de ces facteurs devrait permettre d'améliorer considérablement le taux de réussite des forages productifs lors des futures campagnes d'hydraulique villageoise

L'étude de la fracturation de la zone d'étude au moyen de l'imagerie satellitaire a permis de déceler 3065 linéaments. L'analyse statistique de ces linéaments a montré que la direction préférentielle d'orientation des linéaments est N-S. Quant aux directions secondaires, elles sont représentées par les classes, N20-30, N40-50, N60-70 N90-100 et N150-160. Ces directions correspondent généralement à des fractures (diaclasses) dans les ensembles granitiques et à une stratification pour les ensembles volcano-sédimentaires.

CHAPITRE 9 : CARACTERISATION HYDROCHIMIQUE ET POTABILITE DES EAUX SOUTERRAINES DANS LA REGION DES LACS

Ce chapitre présente les résultats de l'étude hydrochimique des eaux souterraines dans la région des lacs. Les résultats des différents paramètres sont consignés en annexes V et VI.

9.1. RESULTATS

9.1.1. Présentation des résultats physico-chimiques des eaux

Les analyses physico-chimiques des eaux souterraines dans la région des lacs, montrent une grande variation des concentrations des éléments chimiques. Ces dernières dépassent dans certains cas les normes de potabilité. Afin de bien comprendre ces variations, trois représentations des données ont été réalisées :

- l'une statistique, présentant les valeurs maximales, moyennes, minimales et les écarts-types. Les données sont représentées sous forme d'un tableau, où les différentes concentrations et les normes de potabilité des eaux sont reportées ;
- l'autre graphique, présente les fréquences de distribution en fonction des classes des différents éléments sous forme d'histogramme ;
- enfin, une dernière sous forme cartographique, présentant la répartition spatiale des différents éléments.

9.1.1.1. Paramètres physiques (mesurés *in situ*)

Ce sont les paramètres que l'on peut mesurer facilement et qui sont utiles pour la détermination de l'état chimique des polluants dans l'eau.

- **Température (T)**

Les valeurs observées sont résumées dans le tableau XXXIII.

Tableau XXXIII : Statistiques élémentaires de la température (°C) des eaux souterraines de la région des Lacs.

Paramètre (Température)	Nappe des fissures	Nappe des altérites	
Paramètres statistiques	Max	30,10	29,70
	Moy	27,21	27,81
	Min	25,50	26,00
	Ecart type	0,91	0,78
Normes OMS	< 25		

Les températures des eaux souterraines de la région des lacs sont supérieures à la norme de potabilité dans les forages tout comme dans les puits. Toutes ces valeurs sont au-dessus de la directive des communautés européennes qui donnent 22°C comme valeur guide, et 25°C comme valeur impérative pour tenir compte des circonstances climatiques dans les eaux destinées à la consommation humaine.

La température enregistrée dans la nappe des fissures varie entre 25,50 et 30,10 °C avec un écart type de 0,91°C et une moyenne de 27,21°C. Dans la nappe des altérites, elle est comprise entre 26 et 29,70°C avec un écart type de 0,78°C et une moyenne de 27,81°C. On remarque que la valeur centrale de la nappe des altérites est supérieure à celle de la nappe des fissures. Le faible écart entre les valeurs extrêmes montre que ces eaux ont une température à peu près constante quelle que soit la nature de l'ouvrage. Ces faibles écarts peuvent aussi être attribués aux formations argileuses qui couvrent les différentes nappes et les isolent de l'influence extérieure. La représentation graphique des effectifs par classe des valeurs de température rencontrées dans les eaux de la zone est traduite par l'histogramme de la figure 59. Les valeurs les plus fréquentes sont situées entre 26 et 27 °C et entre 27 et 28°C. Ces deux intervalles représentent plus de 65 %. La carte de répartition spatiale de la figure 60 montre que la zone d'étude est dominée par les intervalles des valeurs comprises entre 26-27 et 27-28 °C. Quant aux valeurs inférieures à 26 °C et celles supérieures à 28°C, elles sont distribuées de manière sporadique sur la carte.

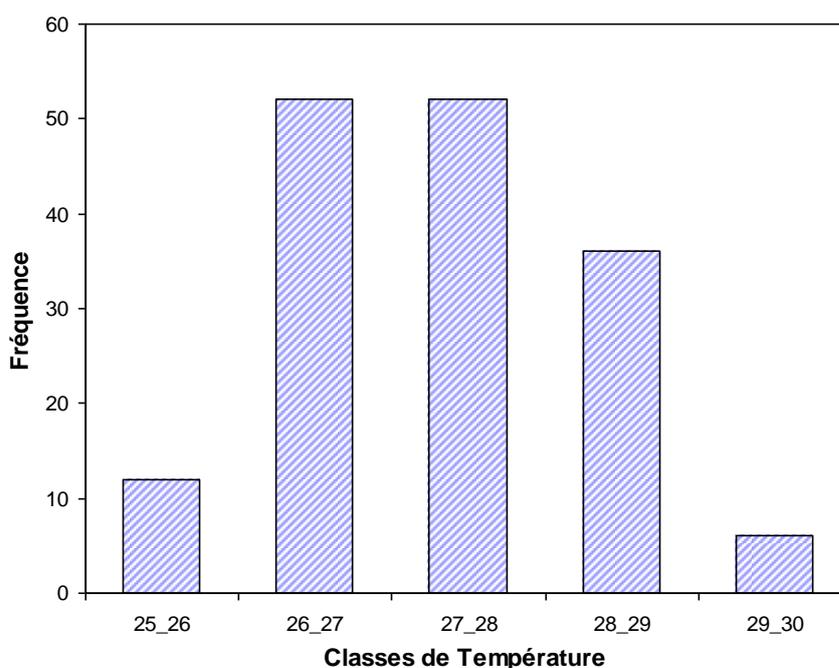


Figure 59 : Histogramme des effectifs de classes de température des eaux souterraines de la région des Lacs.

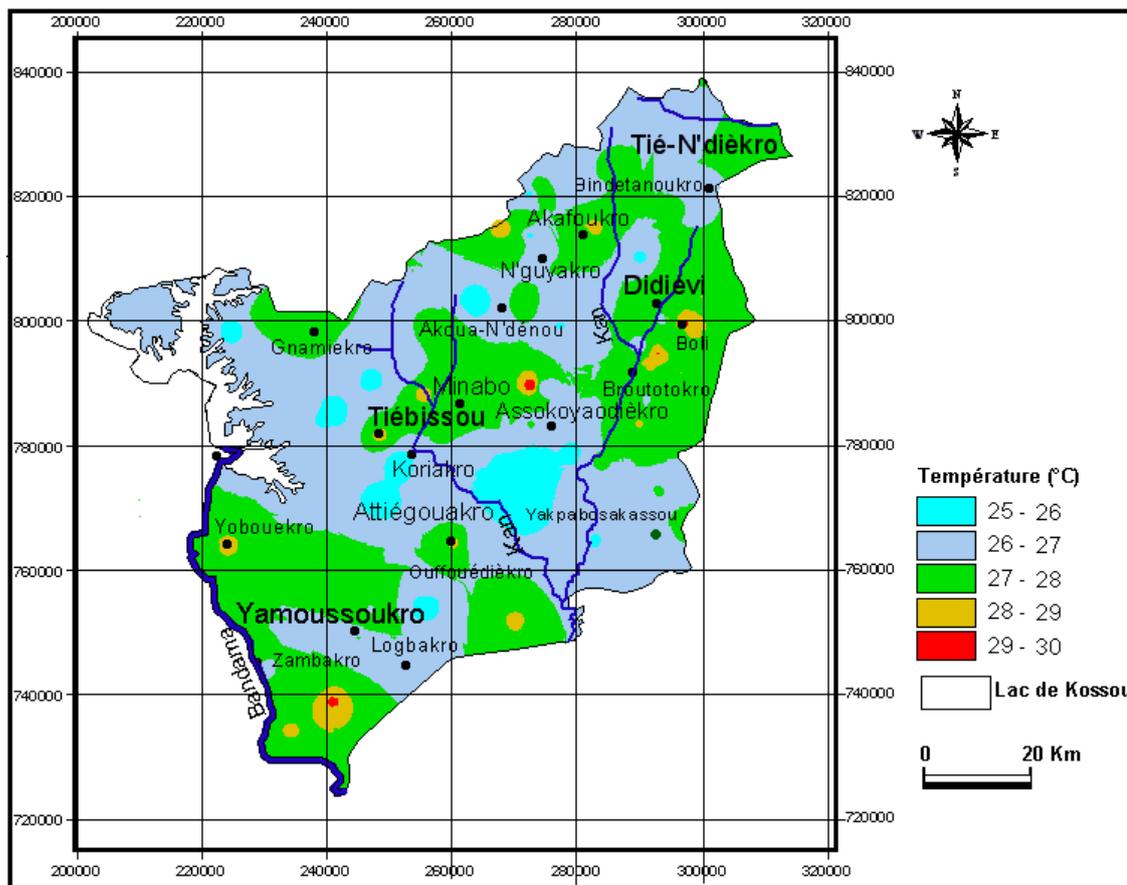


Figure 60 : Carte de répartition spatiale des températures des eaux souterraines de la région des Lacs.

- **La conductivité électrique (CE)**

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau XXXIV.

Tableau XXXIV: Résumé des statistiques élémentaires de la conductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Paramètre (Conductivité)	Nappe des fissures	Nappes des altérites	
Paramètres statistiques	Max	1097	1285
	Moy	331,17	354,73
	Min	11,2	41
	Ecart type	172,45	263,40
Normes (OMS)	< 400		

Les conductivités mesurées varient de 11,2 à 1097 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans le forage de N'dié avec une moyenne de $331,17 \pm 172,45 \mu\text{S}/\text{cm}$ dans la nappe des fissures. Au niveau de la nappe des altérites, la conductivité est comprise entre 41 et 1285 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne de $354,73 \pm 263,40 \mu\text{S}/\text{cm}$. Les écarts considérables observés entre les valeurs extrêmes dans les deux nappes indiquent une forte hétérogénéité de la minéralisation des eaux.

Les valeurs de conductivité les plus fréquentes sont comprises entre 10 et 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 200 et 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ soit 65% des valeurs (Figure 61). Ces valeurs se situent dans la norme recommandée pour les eaux d'alimentation en eau potable (AEP) par l'OMS qui est de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cependant, 35% des ouvrages ont des conductivités supérieures à la norme. Les eaux de ces ouvrages ont un goût salé ; ce qui peut entraîner un rejet de l'eau du forage au profit d'autres sources non sûres. La carte de distribution spatiale (Figure 62) de la conductivité montre que la zone est couverte en majorité par l'intervalle de 200-400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La tranche 400-600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ est localisée dans la région de Yamoussoukro et au Nord de Tiébissou. Quant aux valeurs inférieures à 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, elles se retrouvent en grande partie au Sud de Yamoussoukro. En tenant compte de la répartition assez homogène sur l'ensemble des sites échantillonnés de l'intervalle 200-400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 400-600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, on peut dire que les eaux de la région sont relativement minéralisées.

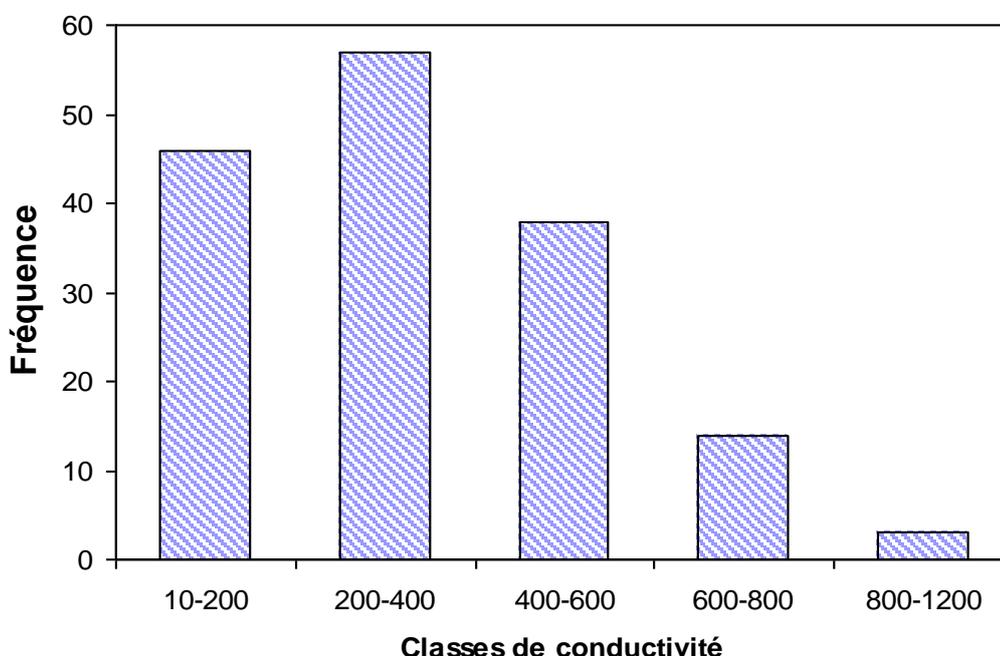


Figure 61: Histogramme des effectifs de classes de CE des eaux souterraines de la région des Lacs.

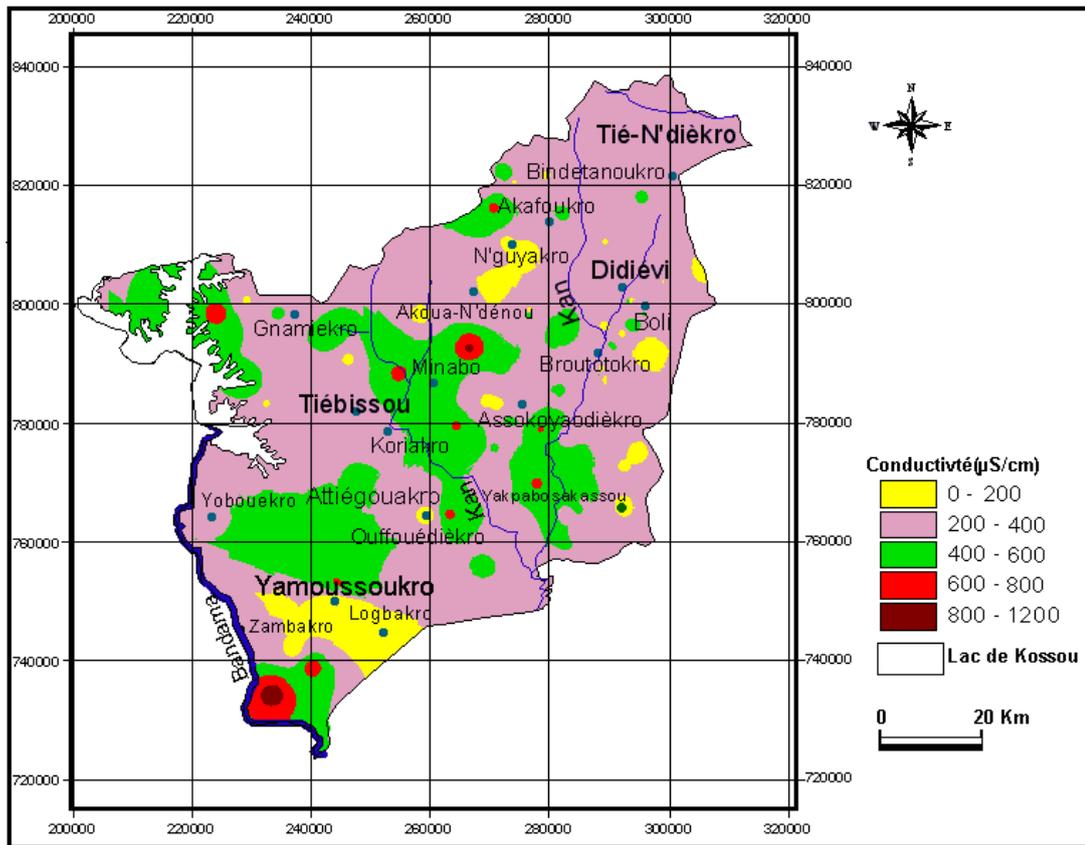


Figure 62 : Carte de répartition spatiale des conductivités dans les eaux souterraines de la région des Lacs.

- **Potentiel d’Hydrogène (pH)**

Les valeurs extrêmes du pH dans la nappe des altérites et celle des fissures sont reportées dans le tableau XXXV.

Tableau XXXV : Résumé des statistiques élémentaires du pH (unité pH) et Eh (mV) dans les eaux souterraines de la région des Lacs.

Paramètre (pH)		Nappe des fissures	Nappe des altérites
Paramètres statistiques	Max	8,04	7,93
	Moy	6,6	5,86
	Min	5,58	4,38
	Ecart type	0,577	0,67
Normes OMS		6,5 < pH < 9,5	
Paramètre (Eh)		Nappe des fissures	Nappe des altérites
Paramètres statistiques	Max	97	156
	Moy	65,5	73,99
	Min	23	-106,6
	Ecart type	20,05	47,05

Les valeurs du pH varient de 5,58 dans le forage d'Attékro à 8,04 dans le forage de Djezoukro dans les nappes de fissures avec une moyenne de $6,6 \pm 0,577$. Au niveau des altérites, le pH est compris entre 4,38 (Dioulabougou 8) et 7,93 (Akpessekro) avec une moyenne de $5,86 \pm 0,67$. Les faibles écarts types indiquent une constance dans les valeurs de pH. L'histogramme des fréquences de distribution (Figure 63) montre que les valeurs les plus fréquentes se situent dans l'intervalle de la norme de potabilité soit plus de 70% des ouvrages. Cependant, 30% des ouvrages ont des valeurs comprises entre les intervalles 4 et 5 et 5 et 6. Les eaux de ces ouvrages ne respectent pas les normes sont impropres à la consommation humaine.

La distribution spatiale des valeurs du pH est illustrée par la carte de la figure 64. On constate que dans la zone d'étude, que la classe 6-7 est dominante dans la zone. Elle est suivie par la classe 5-6 qui est dominante dans le département de Yamoussoukro. La classe 4-5 est peu représentée sur la carte de même que la classe 7-8.

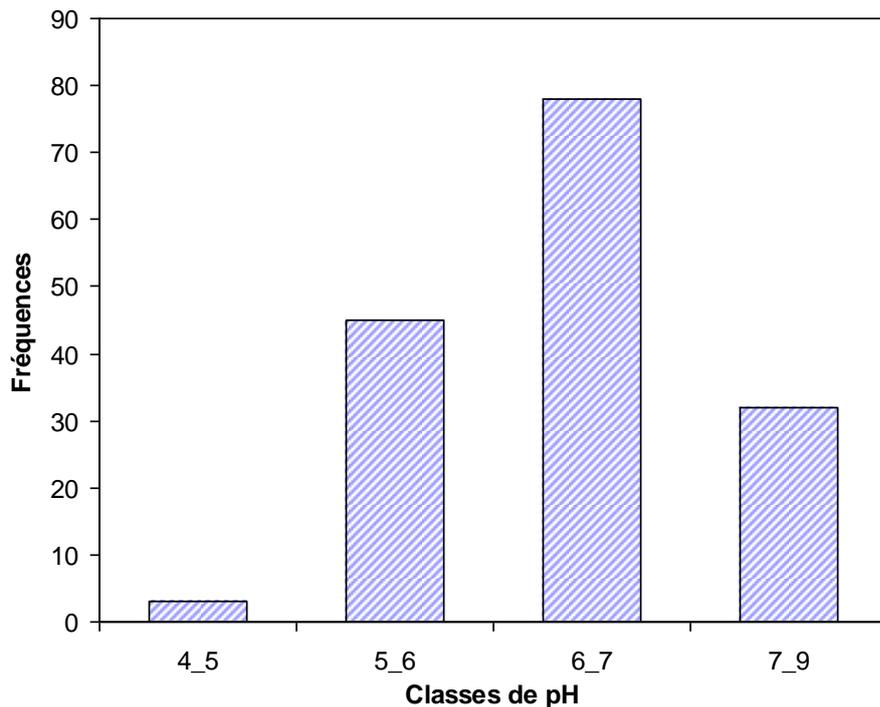


Figure 63: Histogramme des effectifs de classes de pH des eaux souterraines de la région des Lacs.

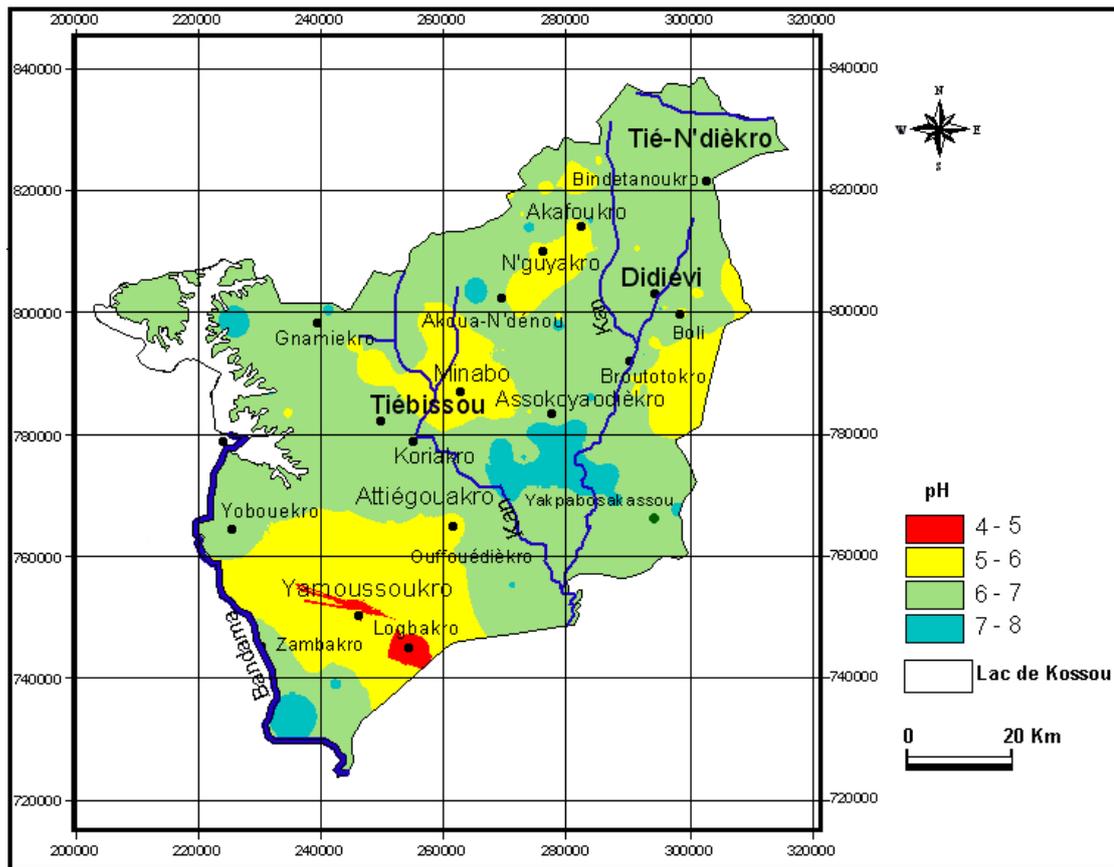


Figure 64 : Carte de répartition spatiale du pH dans les eaux souterraines de la région des Lacs.

- **Potentiel d’oxydoréduction (Eh)**

Ce paramètre nous permet de prévoir l’état des ions chimiques dans l’eau et la direction des réactions chimiques (oxydation ou réduction). Les résultats des mesures *in situ* sont présentés dans le tableau **XXXV**. Les valeurs d’Eh varient de 23 à 97mV avec une moyenne de $65,5 \pm 20,05$ mV pour les eaux des forages de la nappe des fissures. Dans la nappe des altérites, ces valeurs sont comprises entre -106,6 et 156 mV avec une moyenne de $73,99 \pm 47,05$ mV. On constate que la valeur centrale est plus élevée au niveau des puits par rapport aux forages. Les valeurs positives de Eh traduisent des conditions d’oxydation au niveau des deux types de nappes (altérite et fissure), ce qui pourrait témoigner des facilités d’infiltration des eaux superficielles et par conséquent des variations importantes des paramètres physico-chimiques. La présence d’un pH faible et d’Eh positif peuvent indiquer une alimentation facile des nappes. Un apport élevé d’oxygène dissous d’origine superficielle pouvant en être la cause. Par contre les valeurs négatives observés respectivement au niveau du puits de Subiakro (-64,50mV) et d’Akpessekro (-106,60 mV) indiquent que ces eaux sont dans conditions réductrices (pH élevé, Eh négatif). Ceci peut indiquer des conditions

d'alimentation difficile de la nappe. Le faible apport d'O₂ dissous d'origine superficielle aura tendance à créer des conditions réductrices. Dans ce cas, on peut supposer que ces eaux ont un temps de séjour élevé dans l'aquifère. Cet aspect sera plus approfondi dans un paragraphe consacré au temps de séjour des eaux dans l'aquifère.

- **Oxygène dissous (OD)**

Les différentes concentrations mesurées sont résumées dans le tableau XXXVI. Les concentrations en OD sont comprises entre 4,9 et 6,9 avec une moyenne de 6,7±0,25 mg/L. Les valeurs les plus fréquentes se situent autour de la moyenne.

Tableau XXXVI : Résumé des statistiques élémentaires de l'O₂ dissous (OD) en mg/L dans les eaux souterraines dans la région des Lacs.

Paramètre	Nappe des fissures	
Paramètres statistiques	Max	6,9
	Moy	6,65
	Min	4,9
	Ecart type	0,25

9.1.1.2. Paramètres chimiques

- ❖ *Cas des composés azotés et anions*

- ✓ **Composés azotés**

Les concentrations des trois éléments constituant le cycle de l'azote sont reportées dans le tableau XXXVII. La figure 65 présente les différents histogrammes de distribution des fréquences des anions.

Tableau XXXVII : Statistiques élémentaires des composés azotés (nitrate, nitrite et l'ammonium) en mg/L dans les eaux souterraines de la région des Lacs.

Paramètres azotés	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	
Paramètres statistiques	Max	149,40	2,30	0,70
	Moy	3,56	0,03	0,02
	Min	0,00	0,00	0,00
	Ecart type	16,49	0,23	0,07
Normes OMS	NO ₃ ⁻ : 50;	NO ₂ ⁻ :0,1;	NH ₄ ⁺ :0,5	

✓ Les nitrates (NO₃⁻)

L'azote est présent dans les eaux sous sa forme nitrate (NO₃⁻). Les valeurs varient de 0 à 149,40 mg/L avec une moyenne de 3,56 ± 1,49 mg/L. Les puits de Subiakro et d'Akpessekro présentent respectivement les concentrations les plus élevées 149,40 mg/L et 105,6 mg/L. Ces valeurs sont supérieures aux normes établies fixées à 50 mg/L. Ces eaux ne sont donc pas aptes à l'alimentation en eau potable à cause des risques sanitaires que l'ingestion de cet élément peut provoquer tel que la méthémoglobine chez les enfants. Un paragraphe sera consacré aux différents risques sanitaires liés à la consommation de l'eau impropre. Les valeurs les plus fréquentes sont comprises entre 0 et 10 mg/L (Figure 65), celles-ci concernent surtout les forages. Les eaux de ces forages ne présentent pas de danger aux consommateurs surtout en ce qui concerne les nitrates.

• Les nitrites ou azote nitreux (NO₂⁻)

Les valeurs de nitrites mesurées dans les eaux de forages sont très faibles voire nulles. Par contre, les teneurs dans les eaux de puits de Subiakro et d'Akpessekro sont respectivement de 1 et 2,3 mg/L. Ces valeurs sont supérieures à 0,1mg/l, la norme de potabilité fixée pour les eaux de boisson.

• L'ammonium (NH₄⁺)

L'ammonium est la forme d'azote la plus toxique. Sa présence dans les eaux est liée à la réduction des formes oxydées (nitrates et nitrites) en condition réduite. Les concentrations sont négligeables au même titre que celle des nitrites. Cependant, le puits de Subiakro présente une concentration de 0,7mg/L supérieure à la norme de potabilité qui est de 0,5mg/L.

✓ Les anions

Les paramètres statistiques des anions sont donnés dans le tableau XXXVIII.

Tableau XXXVIII: Statistiques élémentaires des anions (phosphate, bicarbonate, chlorures et sulfate) en mg/L dans les eaux souterraines dans la région des Lacs.

Paramètres		PO ₄ ³⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
Paramètres statistiques	Max	0,44	325	117,02	30
	Moy	0,20	139,92	15,64	4,99
	Min	0	35	1	0
	Ecart type	0,10	71,33	15,81	5,68
Normes OMS		PO ₄ ³⁻ : 6,7		Cl ⁻ : 200	SO ₄ ²⁻ : 250

- **Les phosphates**

Les valeurs de phosphate varient de 0 à 0,4 mg/L avec une moyenne de $0,2 \pm 0,1$ mg/L. Le faible écart type indique une constance entre les différentes concentrations. Les valeurs les plus fréquentes sont celles comprises entre 0 et 0,2 mg/L (Figure 65). D'une manière générale, les valeurs rencontrées dans les eaux souterraines sont très faibles et sont toutes en dessous de la norme de potabilité définie pour les eaux de boisson.

- **Les sulfates (SO₄²⁻)**

Les valeurs de sulfate dans les eaux souterraines de la région, varient de 0 à 30 mg/L avec une moyenne de $4,62 \pm 0,42$ mg/L. Les valeurs les plus fréquentes dans la région sont celles comprises entre 0 et 5 mg/L (Figure 65). Ces eaux sont aptes à la consommation humaine car, toutes les valeurs sont en dessous de la norme de potabilité.

- **Les chlorures (Cl)**

Les valeurs d'ions chlorures varient de 1 mg/L dans le forage d'Alialikro et celui de Dibié-N'guessankro à 117 mg/L dans le forage de N'dié, avec une moyenne de $15,64 \pm 1,41$ mg/L ($0,4$ méq/L). Les teneurs les plus fréquentes sont comprises entre 0 et 20 mg/L soit environ 80% des échantillons. Les plus fortes valeurs enregistrées vont de 45 mg/L à 117 mg/L. La figure 65 illustre la distribution des fréquences des valeurs rencontrées dans la région. Toutes ces valeurs sont inférieures à la norme de potabilité définie pour les eaux de consommation.

- **Les bicarbonates (HCO₃⁻)**

Les valeurs caractéristiques varient de 35 mg/L dans les forages de N'da Akissikro et d'Anouazeokabo à 325 mg/L dans le forage de Kossou. Les teneurs sont très variables (l'écart type est de 71,33 mg/L) avec une moyenne de 139,92 mg/L. Les anions se présentent selon l'ordre d'abondance suivant : HCO₃⁻ > Cl⁻ > SO₄²⁻ > NO₃⁻. L'histogramme des bicarbonates (Figure 65) montre que les concentrations les plus fréquentes sont situées entre 50 et 100 mg/L et entre 150 et 200 mg/L.

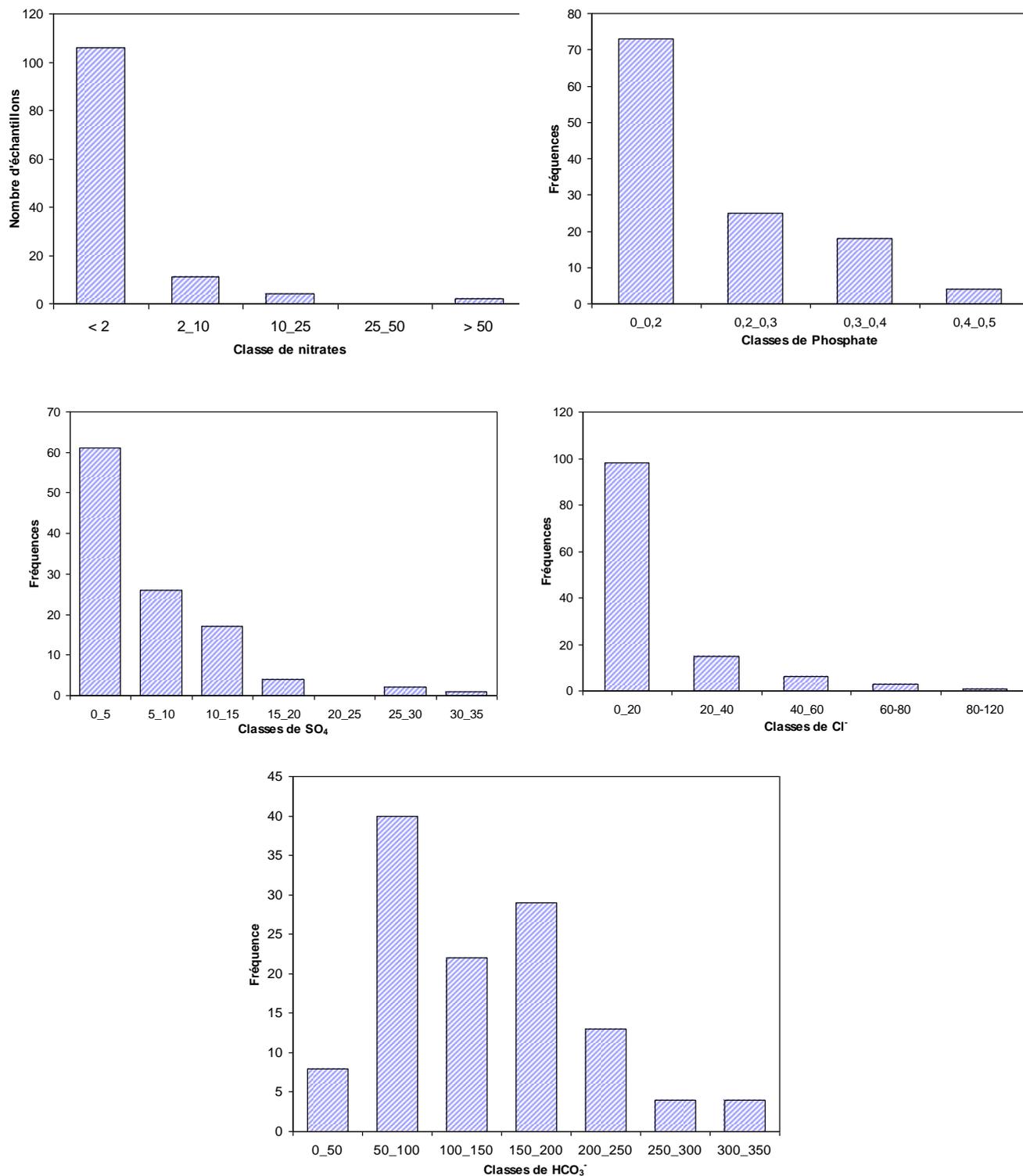


Figure 65: Histogrammes des fréquences de distribution des anions dans les eaux souterraines.

❖ Cas des cations

Le tableau XXXIX présente les résultats des concentrations des différents cations analysés dans les eaux souterraines. La figure 66 présente les différents histogrammes des fréquences des cations majeurs.

Tableau XXXIX: Statistiques élémentaires des concentrations des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) en mg/L dans les eaux souterraines dans la région des Lacs.

Paramètres : Cations		Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
Paramètres statistiques	Max	105,81	35,96	62	32,1
	Moy	30,24	8,49	12,5	3,94
	Min	4,01	0,48	0,28	0,1
	Ecart type	20,82	6,98	17,89	8,12
Normes OMS		Ca : 100	Mg : 50	Na : 150	K : 12

• Calcium (Ca^{2+})

Les concentrations en calcium varient de 4,01mg/L dans le forage d'Attekro 2 et de 105,81 mg/L dans celui de N'Dié. La très forte valeur de l'écart type (20,82 mg/L) traduit une grande variation des concentrations avec une moyenne de 30,24 mg/L. La quasi-totalité des points d'eau de la région des lacs présentent des concentrations inférieures à la norme de potabilité des eaux d'alimentation à l'exception du forage de N'Dié dont la concentration est légèrement supérieure à la norme. Ce forage présente également une très forte conductivité (1097 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Ce forage présente donc une eau dure qui peut entraîner des désagréments d'ordre domestique. En effet, de fortes teneurs en calcium peuvent provoquer la formation de tartre, entraîner l'utilisation excessive du savon dans les lessives et rendre la cuisson des légumes difficile. Tous ces effets d'ordre purement esthétique sont liés à la dureté totale de l'eau ($\text{Ca}+\text{Mg}$). Le calcium possède des effets bénéfiques. Il peut en effet bloquer l'absorption de métaux lourds, accroître la masse osseuse et prévenir certains types de cancers (Anonyme, 2009). Cependant, à des concentrations très élevées, il peut avoir des effets négatifs sur l'absorption d'autres minéraux essentiels pour le corps.

Les concentrations les plus fréquentes dans la région se situent entre 0 et 20 mg/L et entre 20 et 40mg/L et représentent environ 70% des analyses (Figure 66).

• Magnésium (Mg^{2+})

On remarque qu'aucune concentration ne dépasse la norme de potabilité définie pour les eaux d'alimentation. Par conséquent, ces eaux ne présentent pas de risques potentiels à l'homme. Les concentrations varient de 0,49 mg/L dans les forages d'Assankro

et d'Akafoukro et de 35,96 mg/L dans le forage 1 d'Ahougnassou. Ces données ne sont pas très dispersées car l'écart type observé (6,98 mg/L) est faible avec une moyenne de 8,49 mg/L. Les concentrations les plus fréquentes dans les eaux se situent entre 0 et 5 mg/L et 5 et 10 mg/L (Figure 66) soit environ 70 % des échantillons d'eaux.

• Sodium (Na^+)

Elles varient de 0,28 mg/L dans le forage de Bongué à 62 mg/L à Subiakro avec une moyenne de 12,50 mg/L avec un écart type de 17,89 mg/L qui traduit une grande variation dans les données. Au niveau de la qualité pour la boisson, toutes les eaux respectent les normes de potabilité définies. Les concentrations les plus fréquentes sont comprises entre 0 et 5 mg/L (Figure 66).

• Potassium (K^+)

Le potassium provient de l'altération des formations silicatées (gneiss, schiste), des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques (NPK). Dans la zone, les teneurs en potassium varient de 0,1 mg/L dans le forage de Dibié N'guessankro à 32,1 mg/L à Akpéssekro. Cette valeur observée dans la localité d'Akpéssekro est au-dessus de la norme de potabilité comme indiqué sur la figure 66. En dehors de cette valeur, toutes les autres sont inférieures à la limite de potabilité définie pour les eaux de consommation humaine. Elles sont donc bonnes pour l'alimentation en eau potable. La concentration exceptionnelle de 32,1 mg/L observée au niveau de la localité d'Akpéssekro est soit due à l'utilisation d'engrais chimiques, soit aux formations argileuses riches en potassium. Si l'on considère les valeurs moyennes exprimées (mg/L), les cations présentent un ordre d'abondance de type $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$.

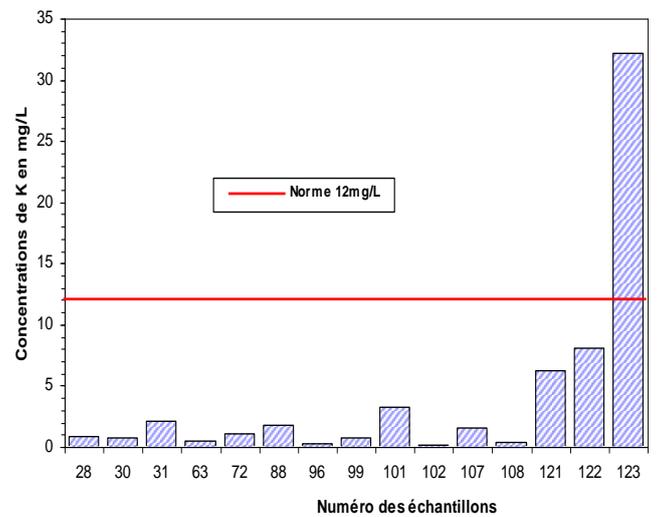
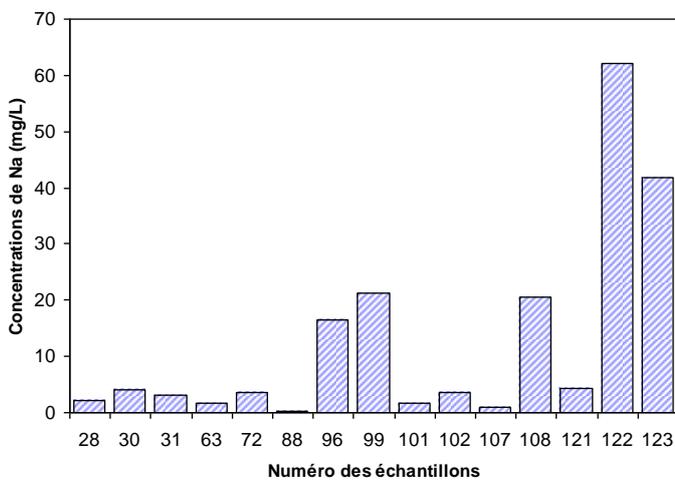
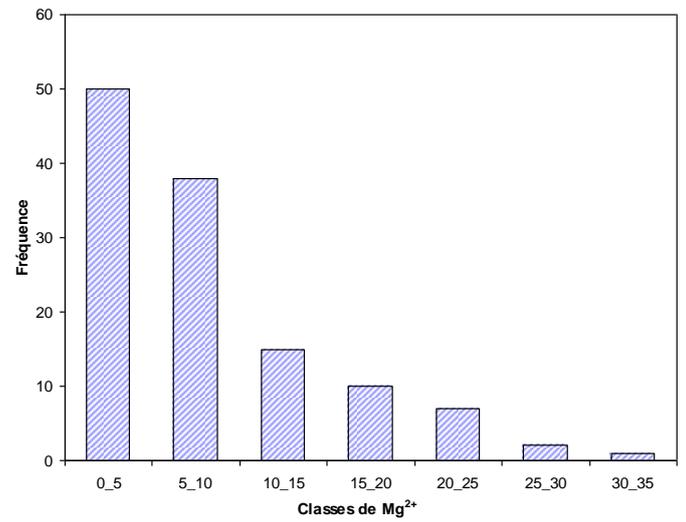
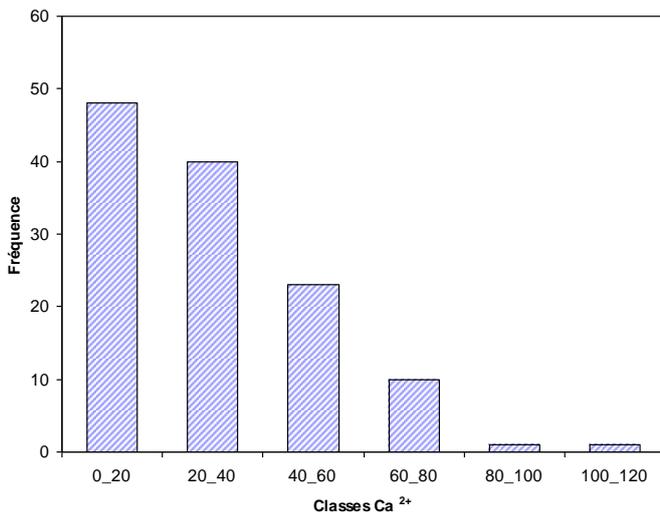


Figure 66: Histogrammes des fréquences de distribution des cations majeurs dans les eaux souterraines.

❖ Cas des éléments métalliques en traces : Fer et le Manganèse (Mn²⁺)

Les concentrations observées pour ces deux éléments sont reportées dans le tableau XL. Les valeurs minimales du fer et du manganèse sont nulles. Les valeurs moyennes sont supérieures à la norme de potabilité définie par l’OMS. L’histogramme de la figure 67 montre que 103 échantillons soit 84% de l’effectif ont des teneurs comprises entre 0 et 0,03, ces valeurs sont inférieures à la norme de potabilité définie contre, 16% qui ont des concentrations dépassant la norme de potabilité. Au niveau du manganèse, 80 % des échantillons ont des concentrations comprises entre 0 et 0,05 inférieures à la norme de potabilité définie contre 20% dont les concentrations excèdent la norme ce qui traduit une pollution des eaux par le manganèse. Les concentrations les plus élevées en fer : 1,72; 1,73 ; 3,96 ; 6,31 et 16,19 mg/L ont été respectivement observées dans les eaux de Kouakoutekro, Agankoffikro, Bezro, Subiakro et Akpessekro. Au niveau du manganèse, les localités d’Agankoffikro, Djahakro1, Allohoukoffikro et Labokro ont des teneurs égales à 0,25 mg/L. Des valeurs plus grandes sont rencontrées respectivement dans les eaux de Yaokimikro (0,6 mg/L), Kouakoutekro (1,4 mg/L) et Bézro (2,7 mg/L). La présence de ces deux éléments en concentrations élevées est liée au caractère réduit des eaux qui favorise leur libération.

Les risques sanitaires liés à la consommation d’une eau qui a des concentrations en fer et nitrate dépassant les normes de potabilité définies seront discutés dans le prochain paragraphe.

Tableau XL: Statistiques élémentaires des concentrations Fe et Mn (mg/L) dans les eaux souterraines dans la région des Lacs.

Eléments traces		Fe	Mn
Paramètres statistiques	Max	16,19	2,7
	Moy	0,38	0,07
	Min	0	0
	Ecart type	1,62	0,28
Normes : OMS		Fe : 0,3	Mn : 0,05

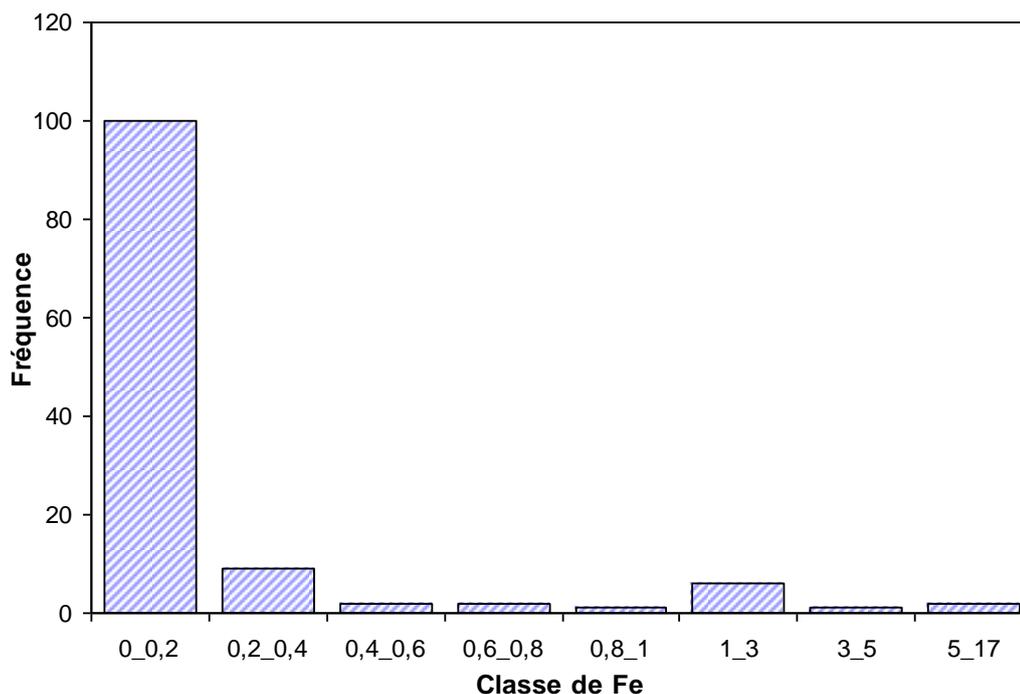


Figure 67: Histogramme des effectifs de classes de Fer dans les eaux souterraines.

9.1.2. Potabilité des eaux et impact sur la santé publique

L'étude de la potabilité des eaux a été basée sur les teneurs en nitrates de celles-ci. En prenant donc comme bruit de fond la concentration en nitrate inférieure à 2 mg/L, nous avons établi le Tableau XLI pour les eaux souterraines analysées dans la zone d'étude.

Tableau XLI : Seuils de classe qualité pour les nitrates pour les eaux de consommation humaine appliqués à la région des Lacs.

Classes de potabilité et observations	Nombre de points d'eau	Classe de Nitrates
BLEU : Eau de très bonne qualité dont la composition est naturelle ou subnaturelle	106	< 2 mg/litre
VERT : Eau de bonne qualité, proche de l'état naturel mais avec détection d'une contamination d'origine anthropique	11	2- 10 mg/litre
JAUNE : Eau de qualité passable. Dégradation significative par rapport à l'état naturel	4	10 – 25 mg/litre
ORANGE : Eau de qualité médiocre. Dégradation importante par rapport à l'état naturel	0	25- 50 mg/litre
ROUGE : Eau de mauvaise qualité. Dégradation importante par rapport à l'état naturel Deconseillée aux nourrissons et femmes enceintes	2	> 50 mg/litre

L'analyse de ce tableau montre que seuls deux points d'eau sont situés dans la classe rouge. Ce sont les puits de Subiakro et d'Akpessekro dont les teneurs en nitrates dépassent les 100 mg/L. Par rapport aux risques encourus, l'eau de ces ouvrages ne doit plus être consommée pour toutes les catégories de population. En dehors de ces deux points d'eau, l'ensemble des ouvrages présentent de l'eau de qualité acceptable.

A Yamoussoukro et dans toute la zone d'étude, il existe de nombreux puits modernes et traditionnels où il n'existe pas d'entretien hygiénique (Planche 9). Cet état de fait a pour conséquences d'exposer les consommateurs de l'eau de ces puits à diverses maladies hydriques dont les plus fréquentes sont les diarrhées et bien d'autres. Nous avons obtenus auprès de la Direction Départementale de la Santé de Yamoussoukro des données de statistique sur les maladies hydriques les plus fréquentes de 2000 à 2003 (Tableau XLII).

Tableau XLII: Statistiques épidémiologiques des maladies liées à l'eau dans la région des Lacs

<i>Maladies</i>	<i>2000</i>	<i>2001</i>	<i>2002</i>	<i>2003</i>	<i>Moy./an</i>
Diarrhée aiguë non sanglante	3 886	3 380	3 773	4 790	3957
Diarrhée aiguë sanglante	1 300	1 495	1 618	1 709	1531
Diarrhée persistante et chronique	257	154	83	231	181
Choléra	ND	1	-	ND	0

Source : [statistical Service, DDS Yamoussoukro, 2005 data base]

L'analyse du tableau XLI montre que les maladies diarrhéiques sont les plus fréquentes après le paludisme. Un seul cas de choléra a été détecté en 2001. L'évolution du nombre de cas de diarrhée en fonction des années est illustrée par le graphique de la figure 68. On remarque que les cas de diarrhée aiguë non sanglante sont les plus nombreux.

En 2003, le nombre de cas atteint de diarrhée aiguë non sanglante est de 4790. Ces maladies sont sans doute liées à la consommation d'eau non potable provenant des puits mal entretenus.

Les eaux souterraines dans la région des Lacs sont globalement aptes à la consommation humaine. Cependant, certains points d'eau présentent des risques sanitaires

réels et méritent d'être surveillés. L'accroissement des maladies hydriques telles que les diarrhées dans la région doit interpeller les autorités sur l'utilisation des eaux de puits en vue de prévenir de potentiels cas de choléra. Les concentrations élevées en fer dans certains ouvrages pourraient à la longue provoquer un rejet de ces points d'eau par les populations.

La mise en solution des éléments chimiques est le fait de certains processus chimiques et souvent biogéochimiques. Quelle est l'origine de ces paramètres chimiques ? Quel est le mécanisme qui contrôle le chimisme des eaux souterraines dans la région des lacs ? Cet aspect sera développé dans les prochains paragraphes.

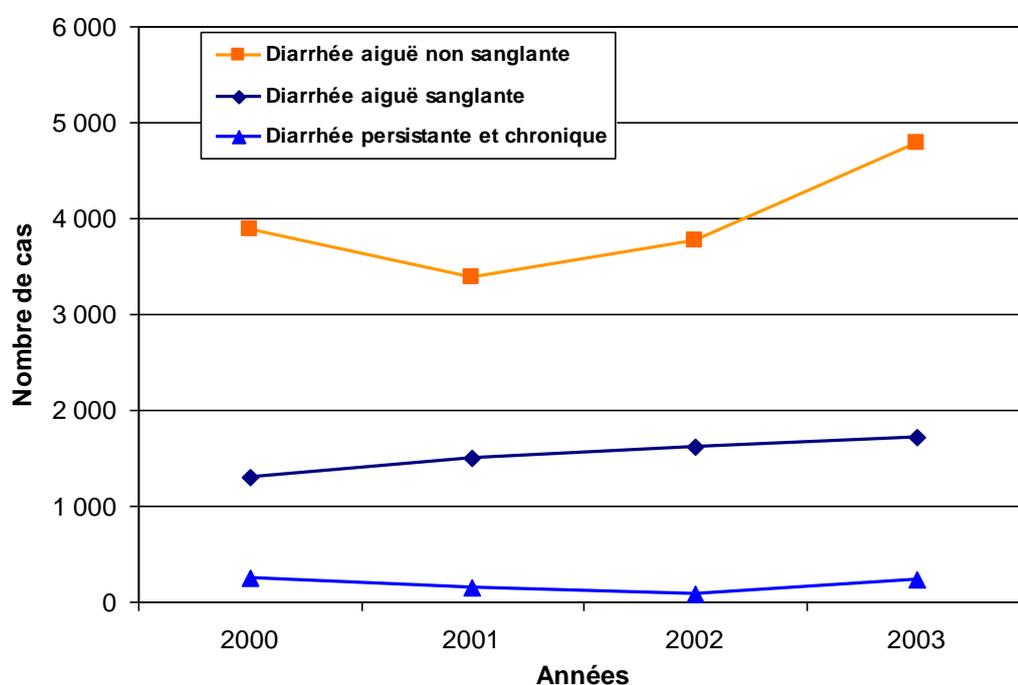


Figure 68 : Evolution des cas de maladies hydriques de 2000 à 2003 dans la région des Lacs.



Planche 8 : Exemple d'ouvrages hydrauliques mal entretenus dans la région des Lacs, sources potentielles de pollution. (Photos : Soro G).

9.1.3. Classification des eaux et notion d'hydrofaciès

La représentation de l'ensemble des analyses dans le digramme de Piper (figure 69) permet de dégager les observations suivantes :

- dans le triangle des cations, la plupart des eaux se localisent vers le pôle calcique. On note tout de même une proportion des eaux en magnésium relativement importante.
- dans le triangle des anions, toutes les eaux se situent dans le pôle bicarbonaté. Cependant, certains points d'eaux tendent vers le pôle chloruré et nitraté seulement dans le cas où la teneur en nitrate est forte. Ici, les anions sont donc représentés en majorité par le faciès bicarbonaté.
- dans le losange, une large majorité des eaux est de $(rCa + rMg) > (rNa^+ + rK^+)$ et $(rHCO_3^- > rCl^- + rNO_3^- > rSO_4^{2-})$.

Toutes les eaux sont de type $HCO_3^- - Ca$, à l'exception des points d'eau 96, 99, 102, 108, qui sont bicarbonaté calcique magnésienne. Toutes les eaux de la région des lacs sont bicarbonatées. Les concentrations en bicarbonates représentent l'essentiel de la teneur en anions soit environ 84% des anions et environ la moitié de la concentration totale des ions. En effet, sur l'ensemble de 120 analyses, nous avons en teneur cumulée de bicarbonates 337,68 méq/L sur un total de 668,69 méq/L soit 50,50%.

En somme, la plupart des eaux sont toutes bicarbonatées et il existe un seul faciès dominant : bicarbonaté calcique et très rarement bicarbonaté calcique magnésien.



et

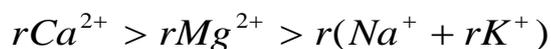


Diagramme de Piper des eaux de la région des lacs

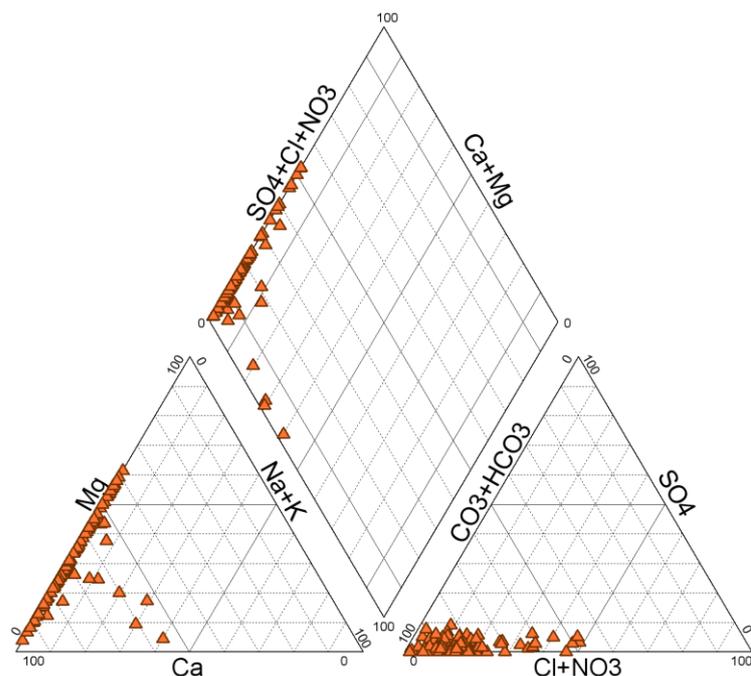


Figure 69: Représentation des eaux de la région des Lacs dans le diagramme de Piper.

9.1.4. Rapports caractéristiques des ions

9.1.4.1. Sodium, potassium et chlore

Les valeurs des rapports caractéristiques Na/K, Na/Ca et Na/Cl ainsi que les indices de base correspondantes sont indiqués dans le tableau XLIII.

Tableau XLIII : Rapports caractéristiques de quelques points d'eau avec ieb; ($\text{m\acute{e}qL}^{-1}$).

N°	Localités	cond ($\mu\text{S/cm}$)	MT ($\text{m\acute{e}q.L}$)	pH	Na/Ca	Na/K	Na/Cl	IEB
28	Cpt Amanzi	227	3,82	7,33	0,10	4,50	0,50	0,15
30	Ahounassou 1	843	13,72	6,28	0,05	9,00	0,40	0,42
31	Ahounassou 2	236	3,99	6,18	0,13	2,60	0,70	0,12
63	Mbouedio	145	2,49	5,92	0,11	7,00	0,20	0,23
72	Totokro	645	8,32	5,95	0,06	5,00	0,10	1,12
88	Bongue	499	6,33	7,27	0,01	0,30	0,00	1,08
96	Ali alikro	197	3,66	6,25	0,72	72,00	24,00	-0,37
99	Bossi	388	6,51	6,99	0,53	46,00	18,40	-0,24
101	Broukro	524	9,11	7,31	0,03	0,90	0,70	0,07
102	Dobie N'guessankro	134	2,03	6,11	0,31		5,00	-0,10
107	Labo	258	3,83	6,36	0,03	1,00	0,40	0,06
108	Krou Okoukro	441	7,00	7,46	0,48	89,00	22,30	-0,19

L'examen de ce tableau permet de faire quelques remarques :

- Les faibles valeurs du rapport Na/Ca (0,02 à 0,7) montrent la dominance du calcium sur le sodium dans les eaux ;
- Les rapports Na/K varient de 0,3 à 89, ce qui indique une dominance du sodium par rapport au potassium dans les eaux.

Les huit autres échantillons ont un rapport inférieur à 1. Ceci pourrait être dû dans un premier temps à une baisse de la teneur en sodium qui s'opère par échanges de bases. Dans un second temps l'élévation des teneurs en chlorures des eaux dans des roches qui ne renferment pas plus de minéraux riches en chlore que les autres pose le problème de l'origine des ions chlore.

9.1.4.2. Indice d'échange de base

L'examen du tableau XLIII montre une forte concentration en alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) par rapport aux valeurs ioniques de Na^+ , K^+ , ce qui fait penser *a priori* qu'il y a probablement eu échange des alcalins de l'eau contre les alcalino-terreux des permutolites. Les résultats de l'indice d'échange de base calculé montre que sur les douze échantillons, huit présentent un ieb positif confirmant ainsi en partie que ces eaux échangent effectivement des alcalins contre des alcalino-terreux. Ces échanges contribuent d'une part à augmenter considérablement les teneurs en ions de ces alcalino-terreux dans l'eau et d'autre part à faire baisser les teneurs en alcalins. Dans ce cas, l'abondance des alcalino-terreux est attribuable au phénomène de désorption par les minéraux argileux en voie d'évolution et/ou à l'hydrolyse des plagioclases calciques et des composés ferromagnésiens. Les valeurs négatives de l'ieb observées pour les quatre échantillons restant sont le fait d'un échange des ions alcalino-terreux contre les alcalins des permutolites. Ce phénomène devrait avoir pour conséquence une augmentation des teneurs en Na^+ et K^+ au détriment de Ca^{2+} et Mg^{2+} . Mais tel n'est pas le cas puisque nous avons des teneurs élevées en Ca^{2+} et Mg^{2+} dans les quatre échantillons.

9.1.5. Caractérisation des mécanismes chimiques des eaux souterraines par l'analyse multivariée

9.1.5.1. Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN)

Les résultats obtenus à la suite du traitement statistique sont exprimés sous forme de tableaux ou graphiques suivants :

1. tableau XLIV: matrice de corrélation, il permet de quantifier qualitativement l'affinité qui existe entre les éléments pris deux à deux.
2. tableau XLV: les valeurs propres, pourcentages et pourcentages cumulés de la variance exprimée. Il permet d'apprécier la variance exprimée par chaque facteur. Les plans factoriels définis par la première composante principale couplée aux quatre composantes principales suivantes ont été utilisés. Les cinq premières composantes principales représentent une portion importante de la variance totale des éléments chimiques.
3. tableau XLVI: les vecteurs propres ; ils donnent les coordonnées des variables sur chaque axe centré qui permettent de construire un graphe appelé cercle de communauté ou encore espace des variables ou des descripteurs.

- **Analyse de la matrice de corrélation**

La corrélation entre deux éléments est très bonne si elle est proche de 1. Le tableau XLIV donne les différentes corrélations qui existent entre les éléments chimiques analysés dans les eaux.

Tableau XLIV : Matrice de corrélation entre les éléments chimiques des eaux souterraines de la région des Lacs.

	<i>T°C</i>	<i>pH</i>	<i>Cond</i>	<i>HCO3</i>	<i>TAC</i>	<i>THT</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Cl</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>NO3</i>	<i>SO4</i>
<i>T°C</i>	1,000												
<i>pH</i>	-0,257	1,000											
<i>Cond</i>	-0,011	0,414	1,000										
<i>HCO3</i>	-0,153	0,678	0,767	1,000									
<i>TAC</i>	-0,134	0,674	0,777	0,993	1,000								
<i>THT</i>	-0,073	0,371	0,885	0,753	0,759	1,000							
<i>Ca</i>	-0,088	0,428	0,892	0,780	0,786	0,959	1,000						
<i>Mg</i>	-0,032	0,179	0,664	0,529	0,533	0,847	0,661	1,000					
<i>Cl</i>	0,069	-0,047	0,664	0,188	0,194	0,519	0,496	0,438	1,000				
<i>Fe</i>	0,221	-0,132	-0,120	-0,092	-0,088	-0,112	-0,109	-0,093	-0,105	1,000			
<i>Mn</i>	0,203	-0,107	-0,097	-0,061	-0,063	-0,099	-0,084	-0,102	-0,113	0,890	1,000		
<i>NO3</i>	0,142	0,025	0,367	0,074	0,078	0,163	0,190	0,076	0,506	-0,094	-0,073	1,000	
<i>SO4</i>	0,030	0,397	0,732	0,666	0,669	0,637	0,678	0,412	0,509	0,030	0,059	0,223	1,000

A l'analyse du tableau XLIV, on constate qu'il existe une très bonne corrélation entre le HCO_3 et le TAC (0,993). Cette corrélation très significative indique que l'essentiel de l'alcalinité des eaux provient des bicarbonates. Le THT présente une très bonne corrélation avec le calcium (0,959) et le magnésium (0,847). La dureté totale des eaux est gouvernée ici par l'apport en calcium et en magnésium. Le fer et le manganèse présentent une bonne liaison entre eux (0,890) parce qu'ils sont sous le contrôle d'un même processus chimique qui permet leur mise en solution l'oxydoréduction. La conductivité est corrélée respectivement avec le THT (0,885), le calcium (0,892), à un degré moindre avec le HCO_3 (0,767), le TAC (0,779) et le SO_4 (0,732). la conductivité est également moyennement corrélée avec le magnésium (0,664) et avec les chlorures (0,664). Ces différentes corrélations indiquent que la minéralisation des eaux provient non seulement de l'hydrolyse des silicates et de celles des carbonates secondaires (calcite, dolomite, aragonite, anhydrite) mais aussi de la dissolution des évaporites tels que l'halite et le gypse représentés par le Cl et le SO_4 . Le calcium est corrélé avec le TAC (0,786) et le HCO_3 (0,780). On note également une corrélation entre le THT et HCO_3 (0,753) et TAC (0,759). Ces corrélations traduisent l'abondance de ces ions par rapport aux autres dans la minéralisation es eaux. Elles indiquent également que le processus chimique majoritaire qui gouverne ces eaux est la dissolution des formations silicatées et des carbonates secondaires (calcite). La très faible corrélation qui existe entre les chlorures et les nitrates indique que les nitrates ont une origine superficielle (pollution anthropique).

- **Analyse du pourcentage de variance exprimée**

Le tableau XLV représente les cinq premiers facteurs avec leurs valeurs propres et les différents pourcentages exprimés.

Tableau XLV : Valeurs propres et pourcentage de variance exprimée.

	F1	F2	F3	F4	F5
Valeurs propres	6,07	1,99	1,75	0,97	0,81
% Variance exprimée	46,72	15,30	13,44	7,47	6,21
% Variance exprimée cumulée	46,72	62,02	75,46	82,93	89,14

On constate que les 5 premiers facteurs expriment à eux seuls 89% de l'information dont 46,7 % pour le facteur 1, 15,30 % pour le facteur 2 et 13,44 % pour le facteur 3. Les trois premiers facteurs totalisent plus de 75 % de la variance exprimée. Le couple F1-F2 exprime à lui seul plus 60 % de l'information. Au vu de ces pourcentages exprimés, nous pouvons dire que les mécanismes qui contrôlent l'évolution chimique des eaux de la région sont largement contenus

dans ces trois facteurs. De ce fait, notre analyse portera uniquement sur ces trois facteurs. Les vecteurs propres permettant de définir chacun de ces trois facteurs par rapport aux variables sont reportés dans le tableau XLVI.

Tableau XLVI : Vecteurs propres (coefficients de corrélation des variables centrées réduites avec les facteurs)

	Fact. 1	Fact. 2	Fact. 3	Fact. 4	Fact. 5
T°C	0,1076	-0,4512	0,3750	-0,0625	0,7957
pH	-0,5555	0,1772	-0,5467	-0,4264	0,0371
Cond	-0,9464	-0,0762	0,1846	-0,0277	-0,0194
HCO ₃	-0,8830	0,0052	-0,3692	-0,1153	0,1087
TAC	-0,8872	-0,0016	-0,3583	-0,1139	0,1242
THT	-0,9364	-0,0492	0,0630	0,2878	-0,0043
Ca	-0,9327	-0,0503	0,0150	0,1243	-0,0129
Mg	-0,7271	-0,0349	0,1356	0,5271	0,0099
Cl	-0,5442	-0,0951	0,6988	-0,0054	-0,2464
Fe	0,1630	-0,9177	-0,2084	0,0135	-0,1688
Mn	0,1395	-0,9162	-0,2254	-0,0245	-0,1811
NO ₃	-0,2642	-0,0522	0,6342	-0,5853	-0,1497
SO ₄	-0,7772	-0,2207	0,0368	-0,1968	0,0089

- **Analyse de la projection dans l'espace des variables**

- **Plan factoriel 1 et 2**

Le cercle de corrélation entre les deux premiers facteurs (Figure 70a) et les paramètres chimiques montrent que le facteur 1 est déterminé dans sa partie négative par les paramètres représentatifs de la minéralisation totale que sont le Ca, Mg, le THT, le TAC, la conductivité, le HCO₃ et dans une moindre mesure par les sulfates.

Les variables telles que le HCO₃, Ca, Mg sont en général issues de l'altération des roches et de l'hydrolyse acide des minéraux silicatés. Ce phénomène étant un processus lent surtout dans les aquifères de fissures où les vitesses d'écoulement des eaux sont faibles dû à un réseau de fractures peu développé en région de socle.

L'eau reste dans le massif plus longtemps et peut atteindre un degré d'équilibre chimique élevé avec la roche encaissante. Il revient que F1 semble rendre compte des conditions d'acquisition de la minéralisation. Le facteur F1 exprime donc le temps de séjour des eaux dans l'aquifère et l'acquisition de leur minéralisation par hydrolyse des silicates.

De tout ce qui précède, nous considérons le facteur F1 comme *un axe de minéralisation naturelle- temps de séjour des eaux par hydrolyse acide*.

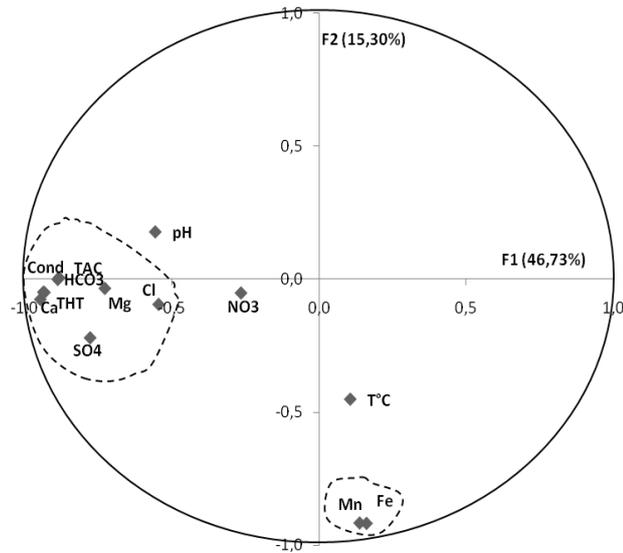
Le facteur 2 est surtout représentatif du fer (Fe) et du manganèse (Mn). La proximité entre ces deux éléments sur l'axe factoriel 2 signifie qu'ils sont mis en solution par le même mécanisme chimique qui est ici l'oxydo-réduction. L'origine de ces deux éléments dans les eaux est donc naturelle. Le caractère réducteur des eaux favoriserait donc la libération de ces deux éléments. La présence du fer et du manganèse serait liée au milieu réducteur que constitue l'aquifère captif. La position de ces éléments dans la partie négative du facteur 2 est aussi interprétée comme un effet de pollution des eaux.

Le facteur F2 exprime donc un *phénomène d'oxydo-réduction* qui favoriserait la mise en solution du fer et du manganèse.

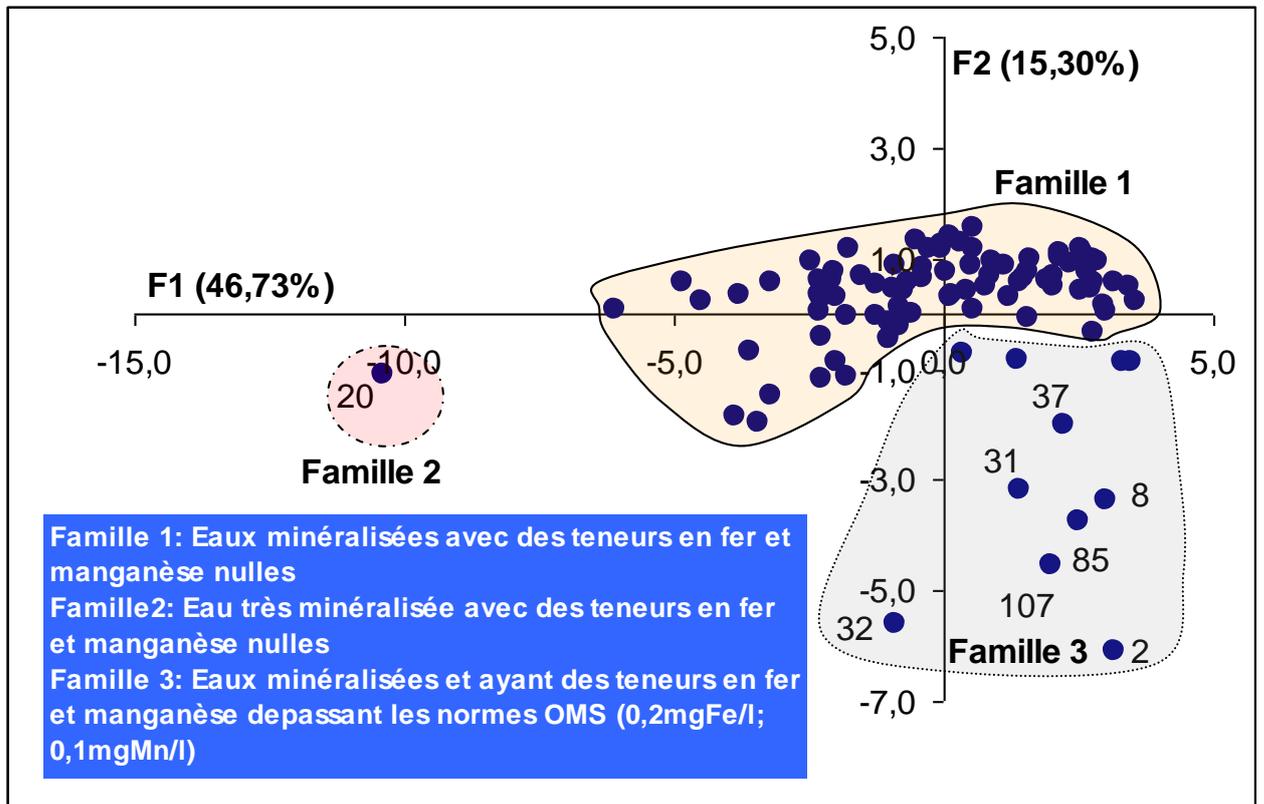
- ***Projection dans l'espace des individus (unités statistiques)***

L'analyse de l'espace des variables et les différents axes factoriels déterminés permet de subdiviser l'espace des unités statistiques ou individus en trois familles dans le plan factoriel F1-F2 (Figure 70b) qui sont :

- **Famille 1** : elle regroupe les échantillons présentant une bonne minéralisation et qui ont des teneurs en fer et manganèse nulles ;
- **Famille2** : elle comprend un seul échantillon qui correspond à celui de N'DIE (20). L'eau de ce forage est très minéralisée (1 097 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et contient une très faible quantité de fer (0,06mg/l) avec une teneur en manganèse nulle ;
- **Famille 3** : ce sont des forages dont les eaux présentent une bonne minéralisation mais ils se différencient des autres forages par leurs quantités de fer et de manganèse élevées. Les eaux contiennent des teneurs en fer et en manganèse qui dépassent les normes de l'OMS. Ce sont ces forages qui sont responsables de la position du fer et du manganèse dans l'espace des variables.



a-Espace des variables (F1-F2)



b-Espace des US (F1-F2)

- **Figure 70 :** ACP des eaux souterraines de la région des lacs (plan factoriel F1-F2).

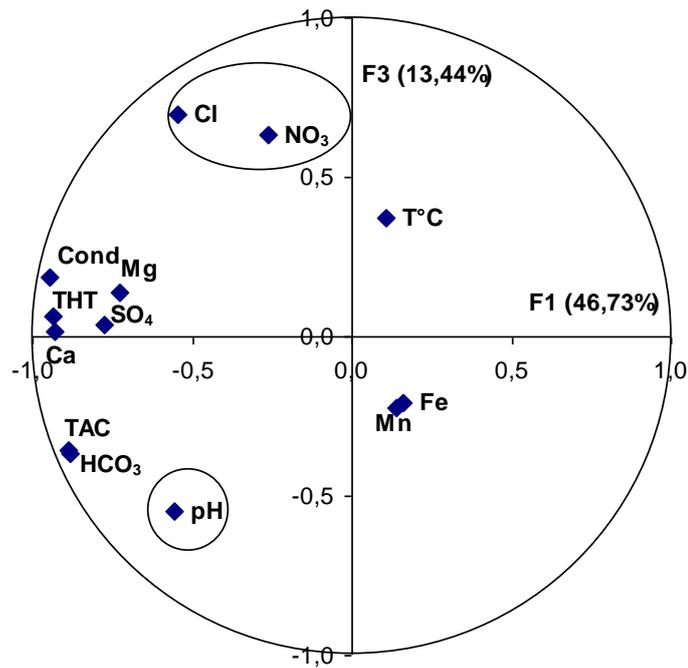
❖ *Projection dans le plan factoriel F1-F3*

• **Espace des variables.**

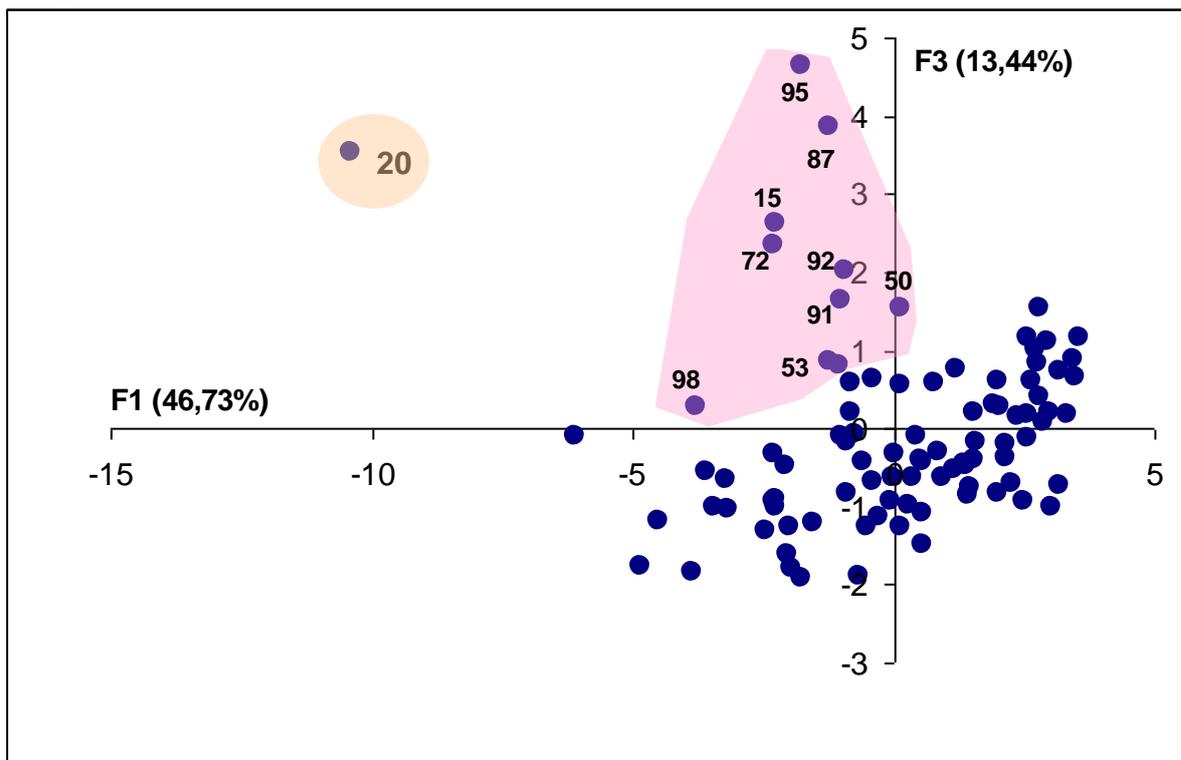
Dans le plan F1-F3 (figure 71a), l'opposition des variables Cl et le NO₃ avec le pH caractérise le facteur F3. Lorsque le pH diminue, donc lorsque le milieu devient acide, les eaux sont chargées en Cl et NO₃. La proximité apparente de Cl et NO₃ témoigne d'une origine commune de ces deux ions et ne doit pas faire illusion sur la valeur du coefficient de corrélation qui les lie ($r = 0,506$). Bien qu'il soit faible, il demeure le meilleur qu'on puisse trouver entre ces deux anions puisque l'essai dans d'autres plans factoriels ne permet pas de mieux les analyser. La présence de ces deux éléments dans les eaux souterraines est attribuée pour ce qui est du Cl⁻ au pluvioléssivage de la voûte forestière et des sols humifères et aux activités anthropiques (utilisation des engrais) pour les nitrates (NO₃). En outre, la majeure partie du CO₂ présent dans les eaux souterraines est issue de l'infiltration des eaux de pluies dans la nappe. Enfin, les fortes valeurs de ces deux ions sont attribuées principalement, en première approche, à la destruction de la forêt tropicale et des sols humifères dans et à proximité des villages dans les régions boisées. C'est pourquoi le facteur F3 sera interprété comme étant *origine spatiale des éléments par infiltration directe des eaux superficielles et dégradation anthropique de la qualité de l'eau*.

• **Espace des individus.**

Dans l'espace des unités statistiques du plan factoriel F1-F3 (figure 71 b), le forage 20 dont nous avons parlé plus haut se caractérise par une quantité de chlore plus élevée que les autres (117 mg/L) avec une teneur en nitrate faible (2,9 mg/L). Contrairement à ce forage, les forages (15, 53, 72, 87, 88, 91, 92, 95, 98) présentent des teneurs en chlore allant de 30 à plus de 60 mg/L et en plus, ils ont des quantités de nitrates relativement élevées. Ces deux ensembles regroupés sont à la base du positionnement du chlore et du nitrate dans le nuage de points de l'espace des variables du plan factoriel F1-F3. Ces forages contiennent des eaux qui sont chlorurées et relativement riches en nitrates et qu'il faudra surveiller de près. En effet, l'usage des intrants agricoles (fertilisants) et la décomposition de la matière organique due à la déforestation pourraient produire une grande quantité de nitrates qui serait par la suite entraînée vers les nappes par le pluvioléssivage et enrichir ses eaux en nitrates.



a-Espace des variables (F1-F3)



b-Espace des us (F1-F3)

Figure 71 : ACP des eaux souterraines de la région des Lacs (plan factoriel F1-F3).

9.1.5.2. Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)

Les résultats sont présentés par la figure 72. Le dendrogramme obtenu montre deux grandes classes statistiques distinctes. La première est déterminée par HCO_3^- et CE. Dans cette classe, on remarque l'influence prépondérante de HCO_3^- sur la minéralisation des eaux souterraines. La deuxième classe statistique peut être subdivisée en deux sous-classes à partir de cette analyse statistique :

1. une classe qui comprend la $T^\circ\text{C}$ et Ca^{2+} . Elle représente l'effet de la température sur le processus de précipitation de la calcite et de l'altération des silicates par hydrolyse ;
2. une classe composée de trois groupes qui sont en relation avec le phénomène d'altération par hydrolyse des silicates et celui de l'infiltration superficielle d'éléments d'origine anthropique :
 - un groupe composé des éléments SO_4^{2-} et pH lié au phénomène de dissolution de la matière organique et de des minéraux tels que l'arsénopyrite dont la dissolution produit des sulfates ;
 - un groupe qui comprend NO_3^- , Mn, Fe. Les nitrates sont liés à une pollution d'origine anthropique. Le fer et le manganèse sont issus du phénomène d'oxydoréduction. ;
 - un groupe avec les éléments TAC, THT, Mg et dans une moindre mesure Cl. Les trois premiers éléments sont liés au phénomène d'hydrolyse des silicates. Les chlorures sont issus d'une infiltration des précipitations.

L'analyse du dendrogramme permet de ressortir trois phénomènes qui sont à la base du mécanisme d'acquisition du chimisme des eaux souterraines de la région. Le phénomène majeur de la minéralisation dans la zone est l'altération par hydrolyse des silicates. Ensuite viennent le phénomène d'oxydoréduction qui entraîne la précipitation du fer et du manganèse dans les eaux et enfin un dernier processus lié aux activités anthropiques dont sont issus les nitrates.

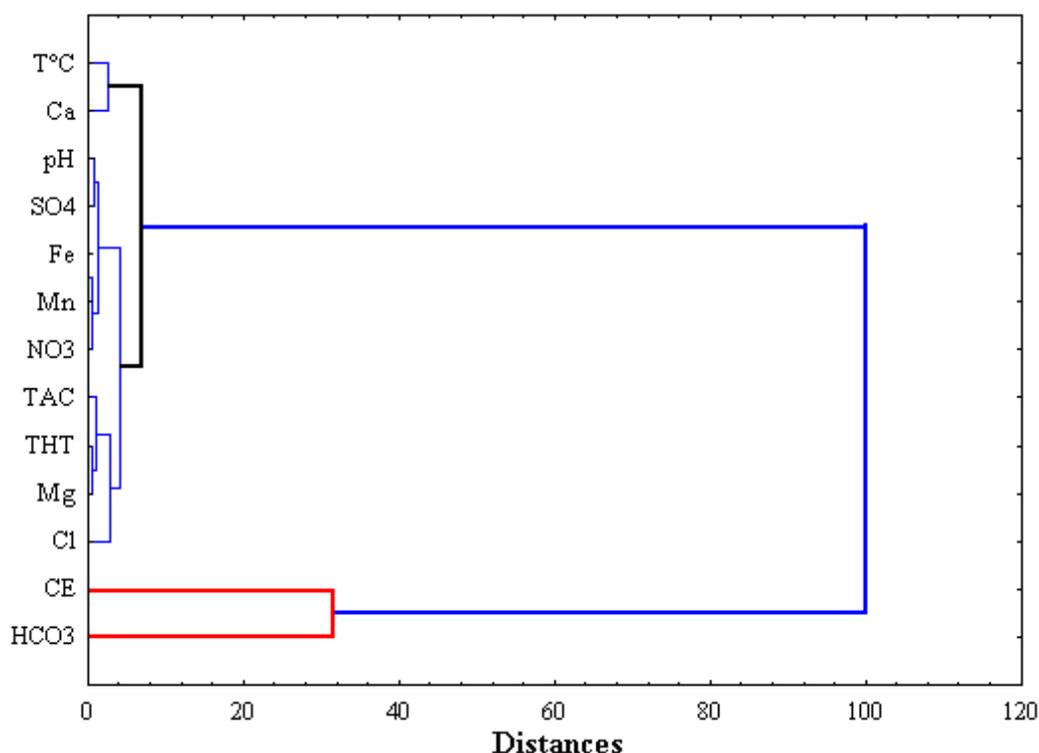


Figure 72: Dendrogramme de la classification ascendante hiérarchique des paramètres chimiques.

9.1.5.3. Origine de la minéralisation – Corrélation entre les ions

En nous référant à la matrice de corrélation, nous remarquons que le bicarbonate est bien corrélé avec la conductivité ($r = 0,767$). Cette affinité traduit l'influence qu'à ce dernier sur la minéralisation totale dans les eaux souterraines. De ce fait, le bicarbonate se positionne comme le meilleur indicateur des concentrations dissoutes en solution. La figure 73 permet d'analyser l'influence des bicarbonates sur la salinisation des eaux. On remarque qu'une grande partie du nuage de point est déporté vers l'axe des bicarbonates, indiquant la prépondérance des bicarbonates sur la charge saline des eaux. Cependant, certains points tendent vers l'axe de la conductivité traduisant une participation non négligeable des autres ions à la salinisation. Par ailleurs, le faible coefficient de corrélation linéaire ($R_2 = 0,62$) indique que le bicarbonate n'est pas le seul ion qui conditionne la minéralisation des eaux. La figure 74 indique une bonne corrélation positive entre la conductivité et la Totalité des matières dissoutes (TDS) ($R_2 = 0,81$). Ceci montre qu'il existe dans la solution en plus du bicarbonate d'autres substances. En effet, les solides totaux mesurés correspondent à la somme des espèces ioniques en solution. Très souvent, ces substances qui sont des colloïdes d'oxyde et hydroxydes ou de matière particulaire dissoute ne sont pas prises en compte lors

des mesures. Ces substances possèdent la propriété de former des complexes avec les ions et peuvent même dans certains cas les neutraliser de manière électrostatique. Sur la figure 75, on constate que le nuage de points est resserré autour de la droite de régression à l'origine et il existe une bonne corrélation positive entre les TDS et Ca + Mg ($R_2 = 0,80$). Cette corrélation positive indique que les alcalino-terreux contribuent à la charge saline des eaux de façon significative.

Durant l'évolution des eaux dans l'aquifère, l'une des conséquences de son long temps de séjour, est l'augmentation progressive des concentrations en matières totales dissoutes (TDS). Ce phénomène qui a recours au CO_2 pour dissoudre la matrice rocheuse tend à rendre le pH de plus en plus alcalin. Toute chose qui aboutit à la formation des bicarbonates qui sont dominants dans les eaux de socle. L'hydrolyse des silicates est le principal mécanisme qui permet de libérer les ions alcalins au détriment des cations. C'est ce qui explique sans aucun doute la prédominance des bicarbonates dans la charge saline des eaux par rapport aux cations dont la mise en solution provient de la dissolution des carbonates secondaires.

• Cas du calcium et du magnésium

Il s'agit ici de déterminer l'origine géologique du calcium et magnésium en fonction de deux éléments chimiques (bicarbonates et les sulfates) qui indiquent les deux principales origines : carbonates secondaires (aragonite, calcite et dolomite) et les évaporites (anhydrite et gypse). La figure 76 indique une corrélation linéaire faible ($R_2 = 0,65$) entre le calcium et $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$. De plus, la majorité des points est déporté vers le pôle $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ indiquant qu'une grande partie des concentrations en calcium observées dans les eaux est issue de l'hydrolyse des carbonates secondaires. Une partie non négligeable des points est projeté vers le pôle calcique montrant ainsi qu'une faible partie de Ca^{2+} provienne des minéraux sulfatés que sont le gypse et l'anhydrite. Le graphe de la figure 77 montre qu'il existe une corrélation linéaire moyenne ($R_2 = 0,64$) entre $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ et $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$. Le coefficient de détermination ainsi que l'ordonnée à l'origine de la droite de régression semble indiquer qu'une partie de calcium et de magnésium pourrait bien provenir de la dissolution des carbonates secondaires tels que l'aragonite, la calcite et la dolomite de la matrice aquifère. L'hydrolyse des silicates et la dissolution des carbonates néoformés pourraient être les principaux processus de mise en solution des différents ions dans les eaux. Le calcul des indices de saturation devrait nous permettent de confirmer ou infirmer cette hypothèse.

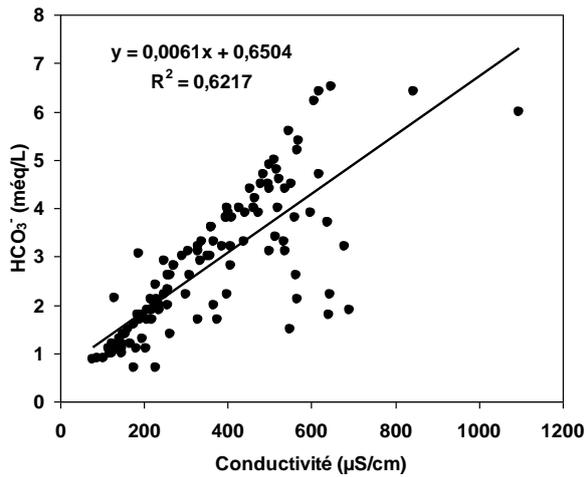


Figure 73: Corrélation : entre Conductivité et HCO_3^- .

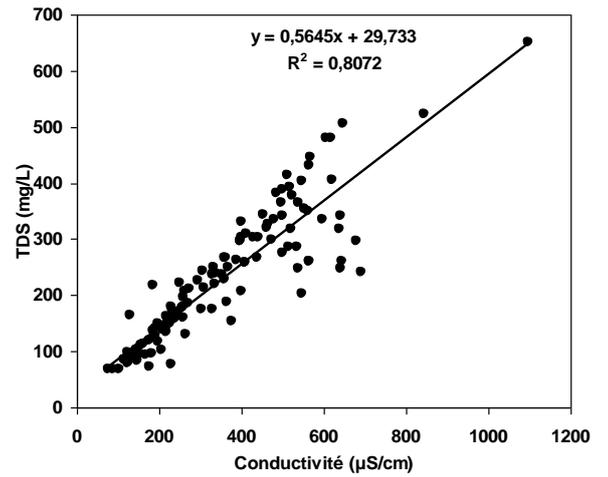


Figure 74 : Corrélation entre Conductivité et TDS

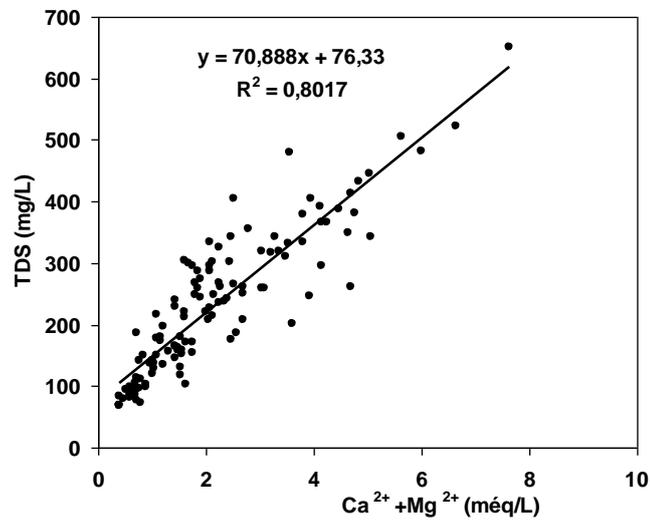


Figure 75: Corrélation entre TDS et Ca + Mg

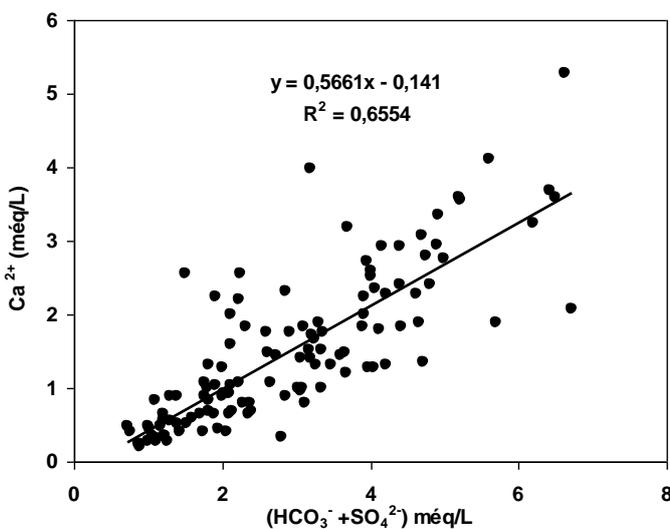


Figure 76: Corrélation Ca en fonction de $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$

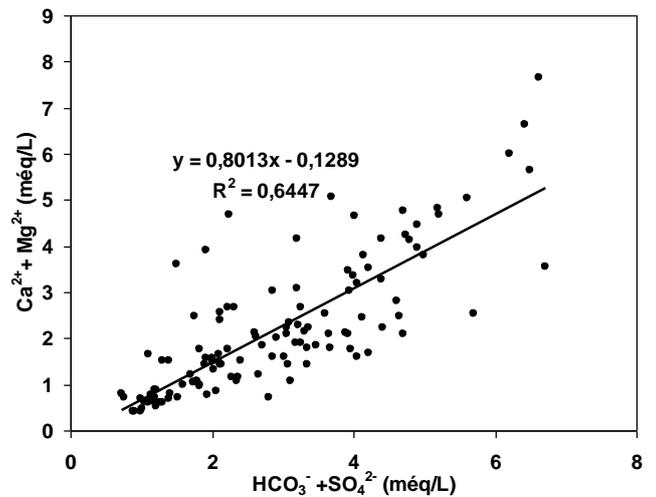


Figure 77: Diagramme de (Ca+ Mg) en fonction de $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$.

- **Cas des Nitrates**

La présence des nitrates dans les eaux souterraines est un phénomène très préoccupant dans le monde entier. Ce sont les polluants les plus fréquemment rencontrés dans les eaux souterraines. La contamination par les nitrates augmente globalement avec l'accroissement de la population et une demande en eau de plus en plus élevée. Sur la carte de la figure 78 qui indique la répartition spatiale des nitrates, on remarque que les teneurs les plus élevées en nitrates sont localisées dans les zones rurales. En zone urbaine, c'est dans un puits traditionnel du nouveau quartier de Kokrénou de la ville de Yamoussoukro qu'on trouve une concentration élevée. Les faibles concentrations en nitrates sont réparties de manière sporadique sur toute la zone d'étude. Cette répartition des nitrates dans une région où l'activité principale est l'agriculture suggère une origine anthropique de cet élément.

- **Cas du fer et du manganèse**

L'ACP a montré que l'oxydo-réduction était la base de la mise en solution de ces deux éléments. Nous avons donc établi une carte de répartition spatiale des concentrations en fer sur la carte géologique de la zone d'étude (figure 79). On remarque que les teneurs les plus fortes sont réparties sur les formations géologiques cristallines riches en biotite (granite à biotite). Toute chose qui semble confirmer le fait qu'une des sources du fer dans les eaux soit issue de l'hydrolyse des silicates ferromagnésiens. Le manganèse est le principal constituant des cuirasses manganésifères. Il y est présent sous forme d'oxyde manganifère. La réaction entre ces oxydes en milieu anaérobie dans des eaux moyennement acide produit des ions manganèses (Mn^{2+}). L'oxydoréduction et le lessivage des silicates ferromagnésiens seraient donc les sources probables du fer et du manganèse dans les eaux dans la région des Lacs.

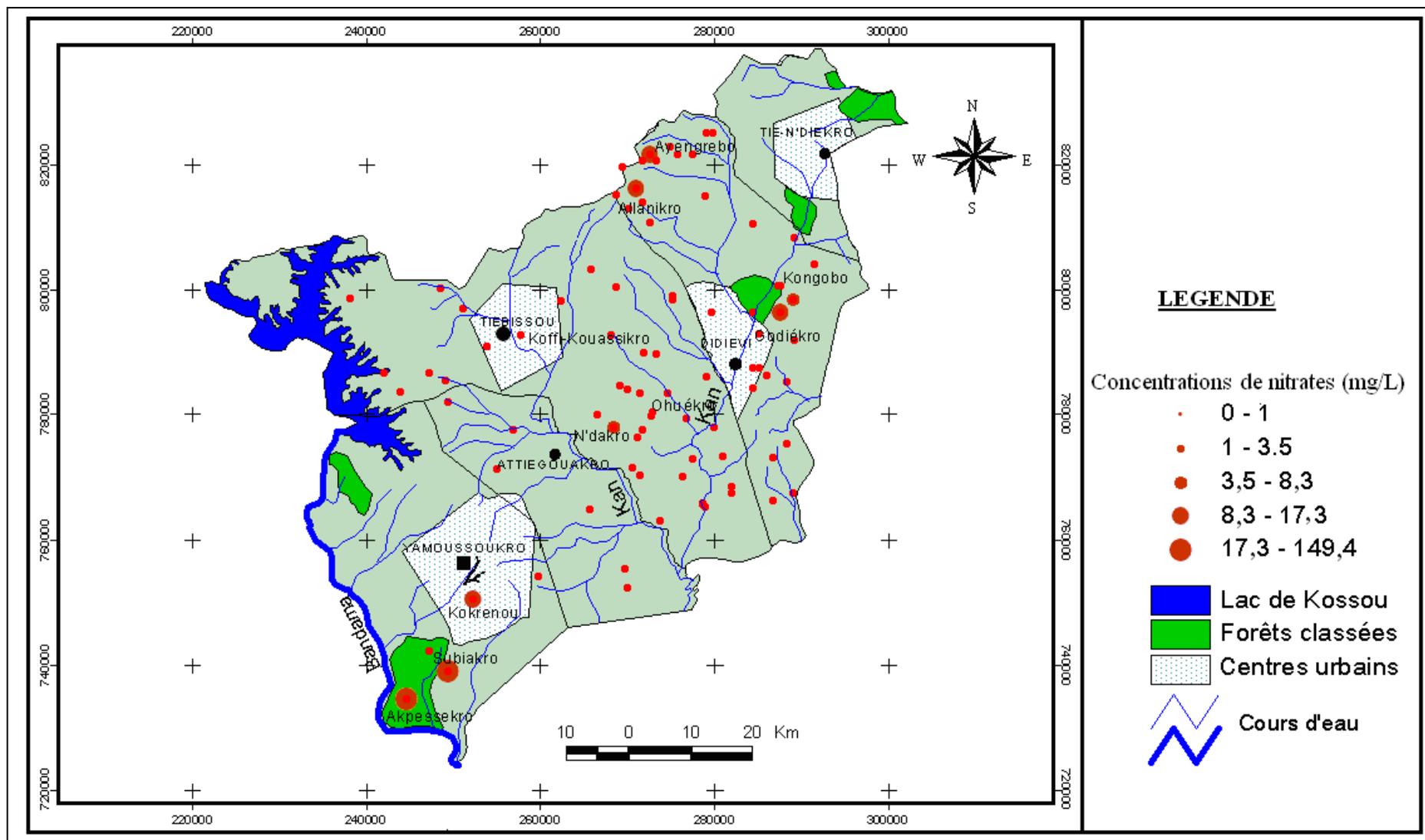


Figure 78 : Carte de répartition spatiale des nitrates couplée avec les grands centres urbains.

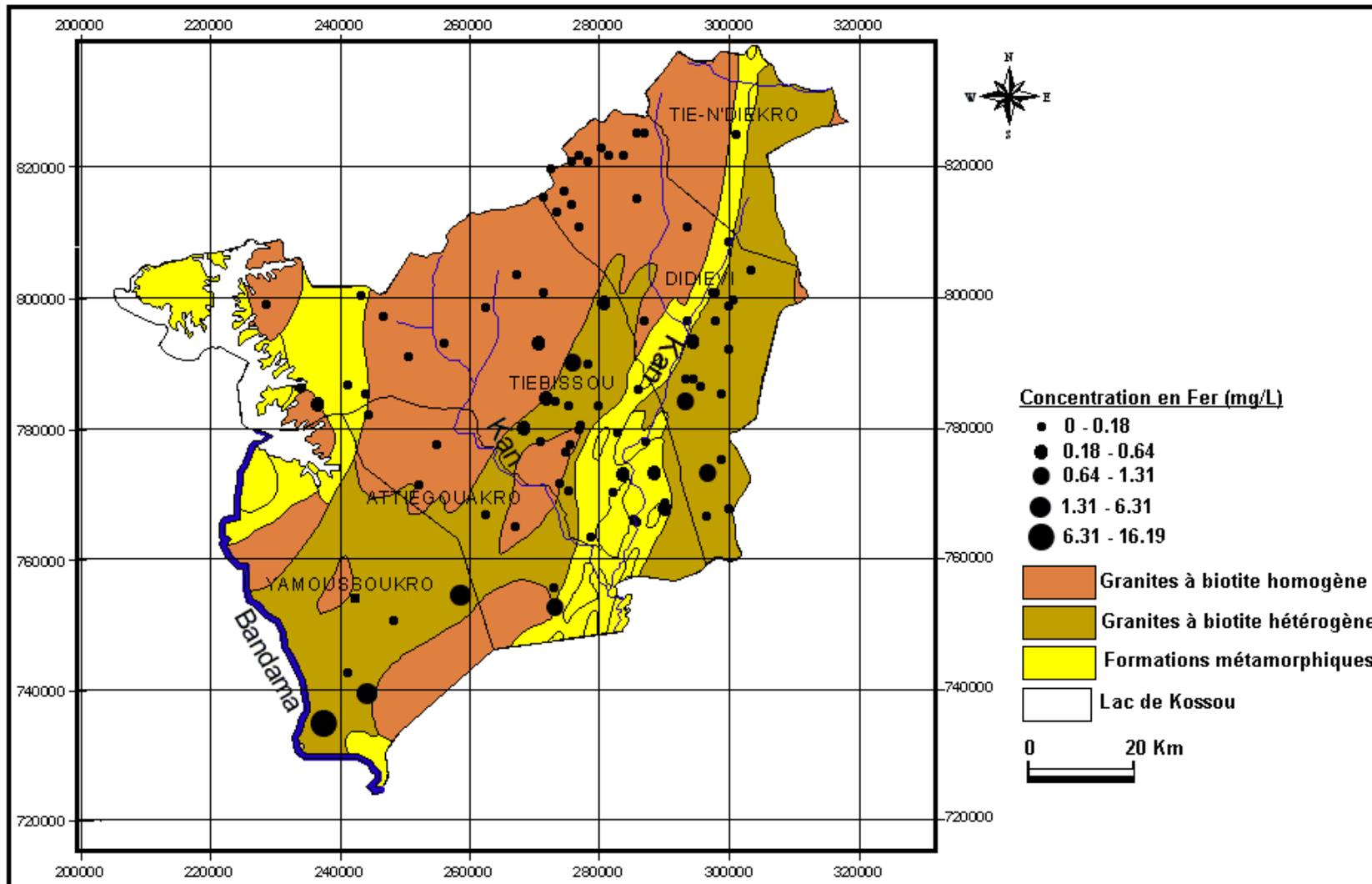


Figure 79: Carte de répartition spatiale des teneurs en fer en fonction de la géologie dans la région des Lacs.

9.1.5.4. Origine de l'acidité des eaux souterraines

L'acidité des eaux souterraines est due à un processus biogéochimique et anthropogénique. Pour évaluer cette acidité, le graphe de la dureté totale (Ca+Mg) en fonction de l'alcalinité a été utilisé. La figure 80 illustre l'absence de relation entre la dureté totale et l'alcalinité des eaux souterraines dans la région des lacs. On constate que la majorité des points sont alignés ou sont déportés vers l'axe de l'alcalinité en dessous de la droite de pente 1:1. La position de ces points sur le diagramme permet de dire que ces eaux ont acquis leur acidité par un processus biogéochimique naturel. Ce processus est lié dans la zone d'étude à la décomposition de la matière organique et à l'hydrolyse des silicates. La présence de forêts galeries et de forêts classées et une pluviométrie relativement abondante, favorisent la décomposition de la matière organique dans la région des lacs. La couleur brune des eaux de surface due à une charge importante en matière organique tout le long de l'année rend compte de l'activité biologique qui se développe au niveau des sols. Tout ce CO₂ produit à partir de la décomposition de la matière organique s'infiltré dans le sol et contribue à diminuer l'alcalinité au profit de l'acidité. Le reste des points d'eau aligné sur la droite 2:1 ou au-dessus ont probablement une acidité résultant de l'oxydation des minéraux sulfureux tels que la pyrite ou l'arsénopyrite qui sont présents dans la zone d'étude.

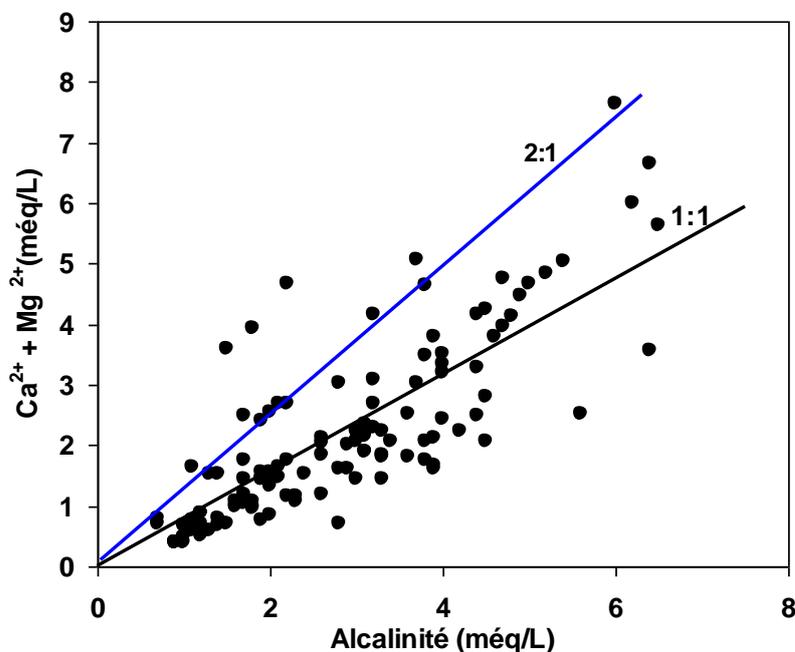


Figure 80: Distribution de la dureté totale en fonction de l'alcalinité des eaux souterraines dans la région des Lacs.

9.1.6. Étude de l'âge relatif des eaux

Les indices de saturation calculés pour différents minéraux sont reportés dans le tableau de l'annexe VII. Le tableau XLVII présente les différents paramètres statistiques pour chaque espèce.

Tableau XLVII : Résumé statistique des indices de saturation (Is) des carbonates secondaires, des minéraux ferreux, du gypse et de l'anhydrite.

Parameters	Minimum	Maximum	Moyenne	Mediane	Ecart-type
Is-Calcite	-3,12	0,78	-1,10	-1,00	1,00
Is-Dolomite	-6,90	0,80	-2,95	-2,86	1,92
Is-Anhydrite	-4,60	0,13	-2,23	-3,03	1,74
Is-Aragonite	-3,26	0,64	-1,25	-1,15	1,00
SDR	68,00	651,00	231,25	220,50	116,11
pCO ₂	0,00	1,10	0,06	0,03	0,12
LogpCO ₂	-2,78	0,04	-1,29	-1,31	0,65
Is-Gypsum	-4,42	-2,03	-3,32	-3,30	0,56
Is-Goethite	5,62	8,67	7,17	7,15	0,63
IsHematite	13,27	19,36	16,35	16,32	1,26
IsFe(OH)3(a)	-0,41	2,64	1,20	1,21	0,63

9.1.6.1. Pressions partielles de CO₂ équilibrant (pCO₂)

Les valeurs de logpCO₂ varient entre -2,78 et 0,04 atm avec une moyenne de -1,30 atm (tableau XLVII, figure 81). Cette plage de variation est supérieure à celle de la pCO₂ de l'atmosphère (10^{-3,5} et 10^{-3,4} atm.) mais par contre ces valeurs sont plus proches de celles liées à l'activité biologique du sol où la pCO₂ varie entre 10^{-0,5} et 10^{-2,5} atm. (Soro, 2002). Ces faibles valeurs de pCO₂ peuvent correspondre à un dégazage de ces eaux au contact de l'atmosphère (Daoud, 1995), ce qui laisse à penser que les eaux souterraines de la zone d'étude sont issues d'un système géochimique ouvert sur le CO₂ du sol (Njitchoua, 1991). Ce résultat, nous incite à étudier le comportement hydrogéologique de la nappe à partir de plusieurs graphiques. A l'analyse du graphique de la variation de la pCO₂ en fonction des teneurs en bicarbonate (figure 82), on s'aperçoit que la variation des valeurs de pCO₂ évolue entre -3 et 0 atm, et elle est indépendante de la teneur en bicarbonate.

L'évolution stable de la $p\text{CO}_2$ pour une augmentation de la teneur en bicarbonate de 0 à 7méq/L laisse penser qu'il s'agit d'un apport du CO_2 sous des conditions de milieu ouvert à un réservoir gazeux illimité : l'atmosphère du sol. La représentation des eaux dans le diagramme pHréel-teneurs en bicarbonates (figure 83) montre que la majorité des points d'eau se situent dans le domaine ouvert à l'atmosphère (Domaine I). La présence des points d'eau dans ce domaine montre que les aquifères captés sont assez perméables. Par conséquent, ils offrent d'excellentes conditions de circulation des masses d'eau et d'alimentation des nappes. Cependant, cette bonne perméabilité des aquifères peut exposer les nappes à une vulnérabilité à la pollution élevée. Trois points se situent dans le domaine II, où les conditions de circulation des eaux sont peu favorables. La perméabilité de ces aquifères est donc faible. Un seul point se trouve dans le domaine IV. Ici on a des systèmes hydrauliques mixtes qui ont un comportement imprévisible. Ils sont soit fermés et privés d'alimentation. Dans ce cas, les eaux sont probablement anciennes puisqu'il n'y a pas de renouvellement. Ces systèmes peuvent bien aussi évoluer vers des systèmes aérés pouvant recevoir des précipitations actuelles. En pareille situation, les eaux sont dites très jeunes.

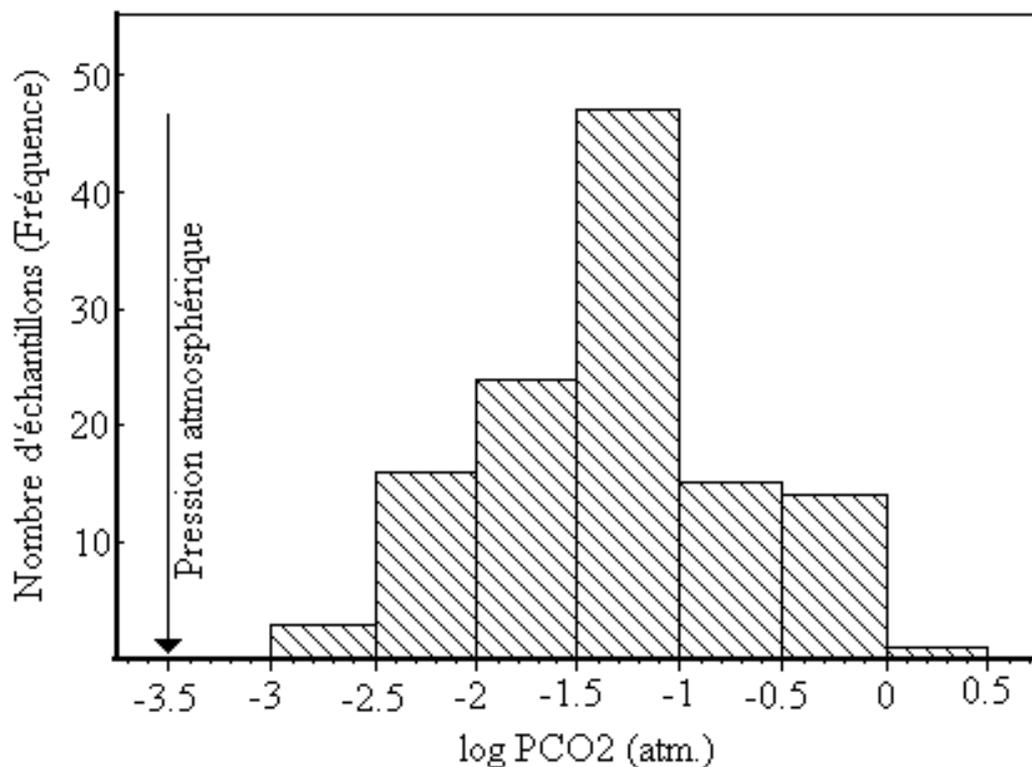


Figure 81: Fréquence de distribution des valeurs de log $p\text{CO}_2$.

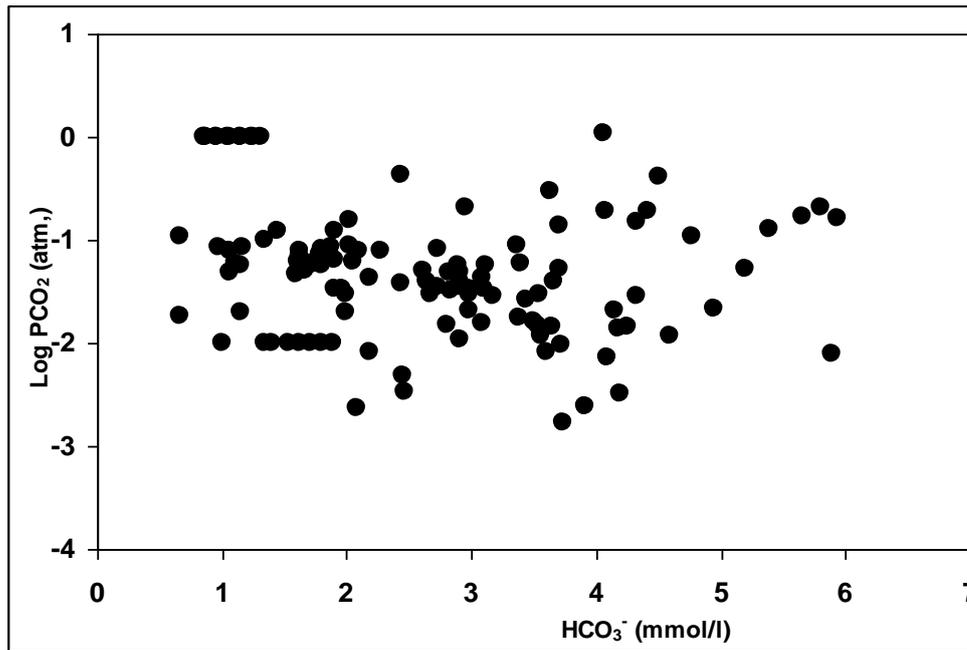


Figure 82 : Relation entre Log PCO₂ et la teneur en HCO₃⁻.

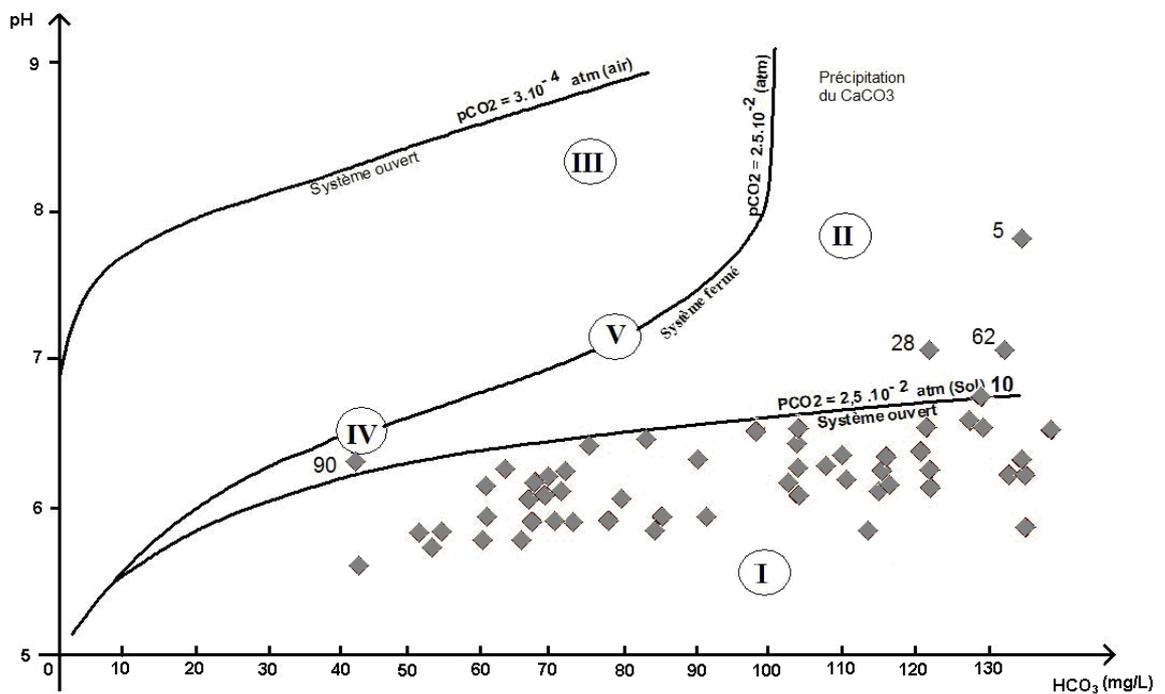


Figure 83 : Diagramme pH_{rél}-HCO₃⁻ des eaux souterraines dans la région des Lacs

La carte de distribution spatiale de la pression partielle du dioxyde de carbone en équilibre avec les eaux souterraines (figure 84) montre que tous les échantillons ont leur valeur plus élevée que celle de la $p\text{CO}_2$ de l'atmosphère ($\log p\text{CO}_2 = -3,5 \text{ atm}$), ce qui indique la présence d'un CO_2 gazeux dans les eaux souterraines. Les fortes valeurs sont observées dans le Sud de la zone d'étude notamment dans le département de Yamoussoukro. On observe également un gradient de décroissance en CO_2 , plus on monte vers le Nord c'est-à-dire en zone de savane, les valeurs de $p\text{CO}_2$ diminuent. Cette diminution graduelle en CO_2 peut être attribuable à la faible quantité de biomasse produite en savane. Le Sud de la zone se trouve en zone préforestière où il existe une végétation plus moins importante tout le long des cours d'eau et certaines forêts classées. Cette végétation produit de la matière organique qui à son tour génère du CO_2 qui va être entraîné en profondeur par les eaux de pluie. Par contre en zone de savane, la quantité de biomasse produite est faible. Par conséquent, les quantités de CO_2 produites ne sont pas importantes d'où les faibles valeurs de $p\text{CO}_2$ dans cette zone. Ce résultat s'accorde avec celui obtenu avec le diagramme de pH réel-bicarbonates qui montre que la quasi-totalité des eaux se trouvent en milieu ouvert à l'atmosphère. L'analyse des indices de saturation en calcite et en dolomite devrait nous permettre de confirmer ces résultats.

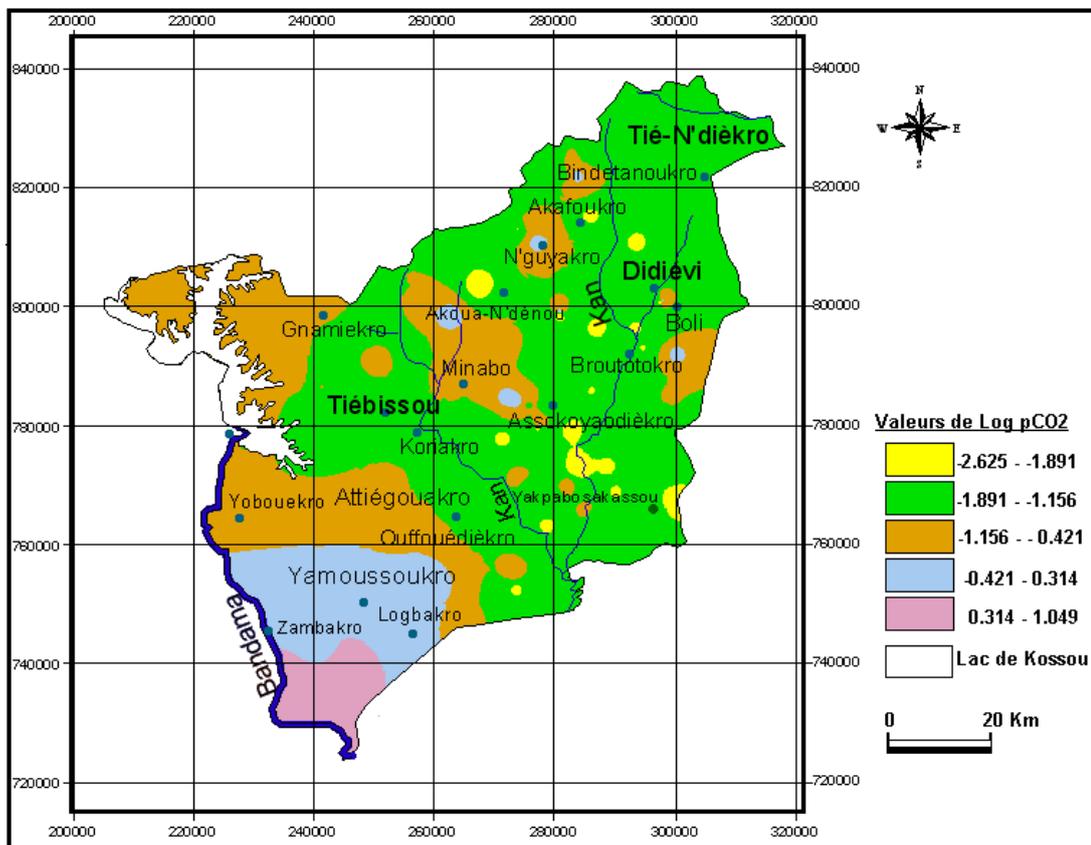


Figure 84: Carte de distribution spatiale des Log pCO2 dans la région des Lacs.

9.1.6.2. Indices de saturation des minéraux

- **Indices de saturation en calcite, en dolomite et aragonite**

Les indices de saturation en calcite sont compris entre 0,78 et -3,12 avec une moyenne de -1,10. Ceux de la dolomite varient de -6,90 à 0,80 avec une moyenne de -2,95. L'aragonite a un indice moyen de -1,25 et des valeurs comprises entre -3,26 et 0,64. La figure 85 montre que la majorité des eaux est sous saturée en aragonite. On remarque également que certains points d'eau (32 au total) sont en équilibre thermodynamique avec l'aragonite et que trois seulement ont atteint la sursaturation. Il s'agit des forages : n° 39 d'Attien koffikro (0,64) n°26 de Yao blekro (0,61) et n° 48 de Djezoukro (0,51).

La représentation des eaux de la région des lacs dans le diagramme ISC-ISD (figure 86) montre un alignement suivant une droite de régression d'équation : $ISD = 1,90 \times ISC - 0,85$ avec un coefficient de régression $R^2 = 0,97$. On remarque que dans la zone d'étude, la majorité des points d'eau sont sous-saturés en calcite et en dolomite.

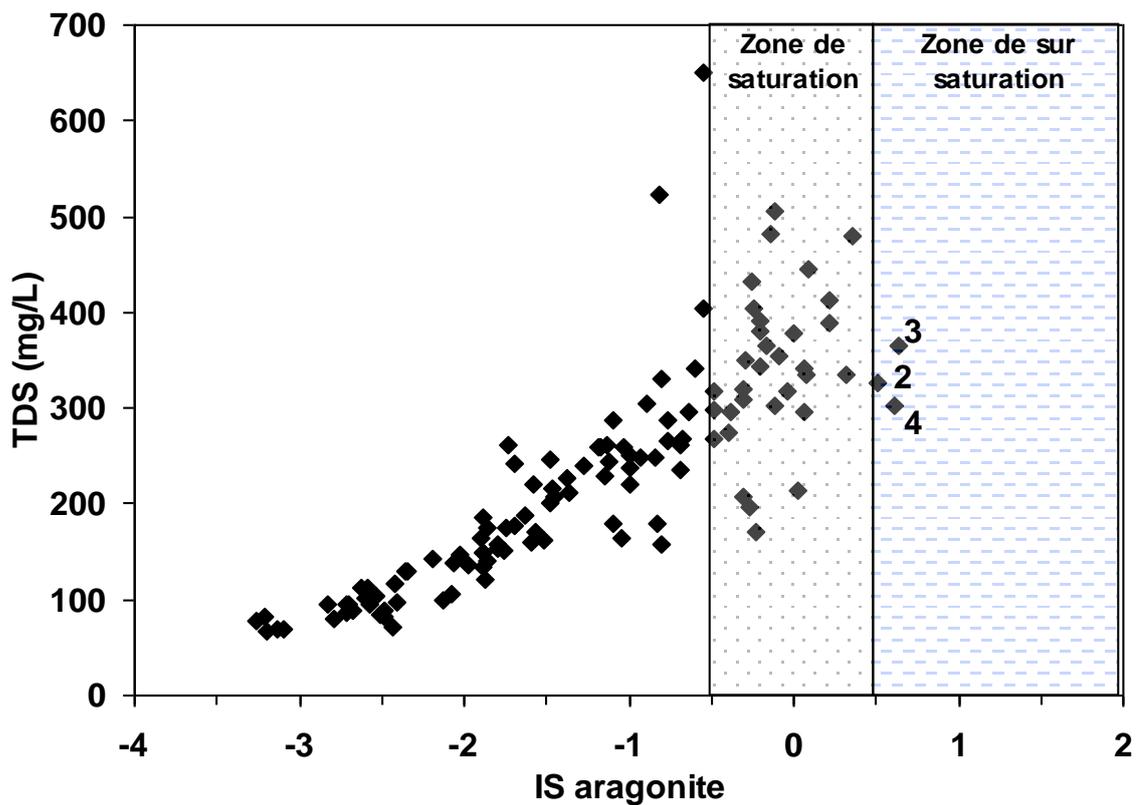


Figure 85 : Corrélation entre TDS indice de saturation en aragonite.

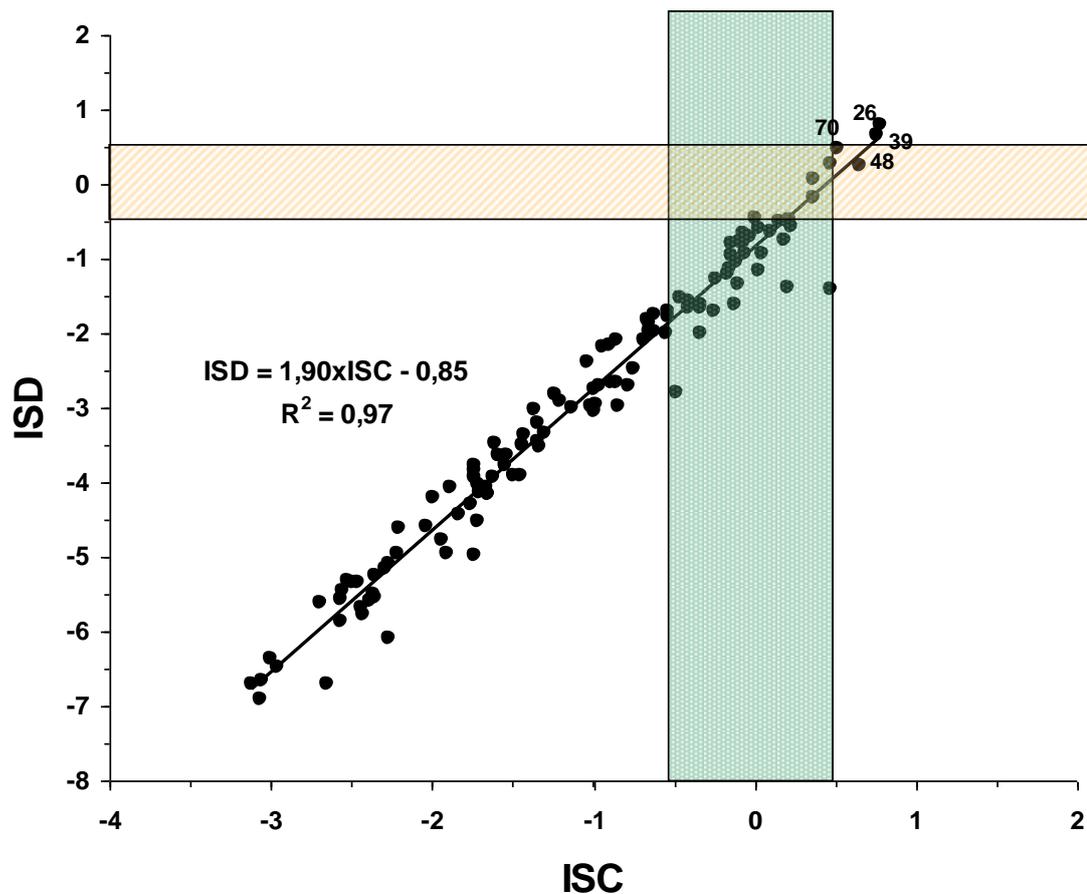


Figure 86 : Diagramme ISD en fonction d’ISC des eaux souterraines dans la région des Lacs.

En général, les eaux deviennent de plus en plus agressives lorsque les valeurs d’ISC et ISD deviennent de plus en plus faibles. Cette situation est due à leur renouvellement dans l’aquifère. Ce principe nous a permis de distinguer trois familles d’eau :

- **Famille 1 : eaux de très faible agressivité : $ISC > 0,5$**

Ces eaux ont été rencontrées dans quatre forages soit 3,30% de l’effectif : Attien koffikro (ISC= 0,78 ; ISD = 0 ,80) ; Yaoblékro (ISC = 0,76 ; ISD = 0,67) ; Djezoukro (ISC = 0,6 ; ISD = 0,25) et Ohuékro (ISC = 0,51 ; ISD = 0,47). Pour ces quatre forages, les eaux sont sursaturées respectivement en calcite et en dolomite. Dans ces eaux, la présence de précipités de carbonates en solution peut être observée car, elles ont atteint le stade d’incrustation. En outre, ces forages ont un $pH > 7$ ce qui justifie qu’elles ont épuisé tout leur stock de CO_2 ou bien qu’elles ne l’ont pas renouvelé. Dans ce cas, elles sont considérées comme très anciennes dans l’aquifère avec une vitesse de circulation très lente ou nulle. En effet, seul un contact prolongé entre l’eau et l’aquifère peut justifier la présence de précipités de carbonates dans les

roches du socle. La dissolution de la roche encaissante étant conditionnée par la durée du temps de séjour de l'eau au contact de la roche.

- **Famille 2 : eaux d'agressivité faible : $-0,5 < ISC > 0,5$**

Cette famille regroupe 35 points d'eau soit 29,20% des échantillons. Les eaux ont atteint l'état de saturation. Elles sont en équilibre thermodynamique. Ici la solution ne peut subir d'évolution tant que les conditions de températures et de pression partielle de CO₂ du milieu n'auront pas varié. Dans ce cas, les eaux de ces points d'eau ont perdu leur agressivité au contact des roches encaissantes. Le CO₂ utilisé pour dissoudre les roches est donc arrivé à épuisement. Ces eaux ont un âge relativement avancé donc un temps de séjour prolongé dans l'aquifère. Par conséquent, la vitesse de circulation des eaux dans l'aquifère est lente.

- **Famille 3 : eaux agressives $-3,5 < ISC > -0,5$**

Cette famille regroupe 67,50% des points d'eau. Les eaux de ces forages sont sous-saturées en calcite et en dolomite. Ces eaux seront caractérisées par une forte agressivité car elles sont riches en CO₂. Cet état de sous saturation des eaux pourrait être attribuable à un très court temps de résidence des eaux dans l'aquifère ou à l'existence d'espèces de carbonates sous d'autres formes qui ne sont pas facilement solubles dans l'eau. En d'autres termes, les eaux dans l'aquifère seraient donc récentes. Dans ce cas, on aurait des eaux dont le taux de renouvellement est rapide dans l'aquifère, ce qui traduirait par conséquent une bonne circulation.

La figure 87 montre la carte de distribution spatiale des différentes familles répertoriées. A cette carte, nous avons superposé les teneurs en nitrates dans les eaux afin de valider les résultats précédents. A l'analyse de la carte, on peut noter que la zone d'étude est découpée en deux parties. Au Sud, nous avons des aquifères perméables notamment dans le département de Yamoussoukro, et au Nord dans la sous-préfecture de Didiévi et de Tié-N'dièkro. Dans la zone de Tiébissou, d'Attiégouakro et une partie de Yamoussoukro ont des aquifères moins perméables. La répartition spatiale des ISC semble être faite en fonction de la perméabilité des aquifères. On remarque que les fortes concentrations en nitrates se retrouvent dans les zones d'aquifères perméables. Les nitrates sont des polluants qui arrivent dans les eaux souterraines par infiltration. Leur présence dans ces eaux se justifie par une circulation facile des eaux donc un taux de renouvellement rapide de celles-ci dans les aquifères. En d'autres termes, la cartographie couplée a permis de valider nos différents résultats.

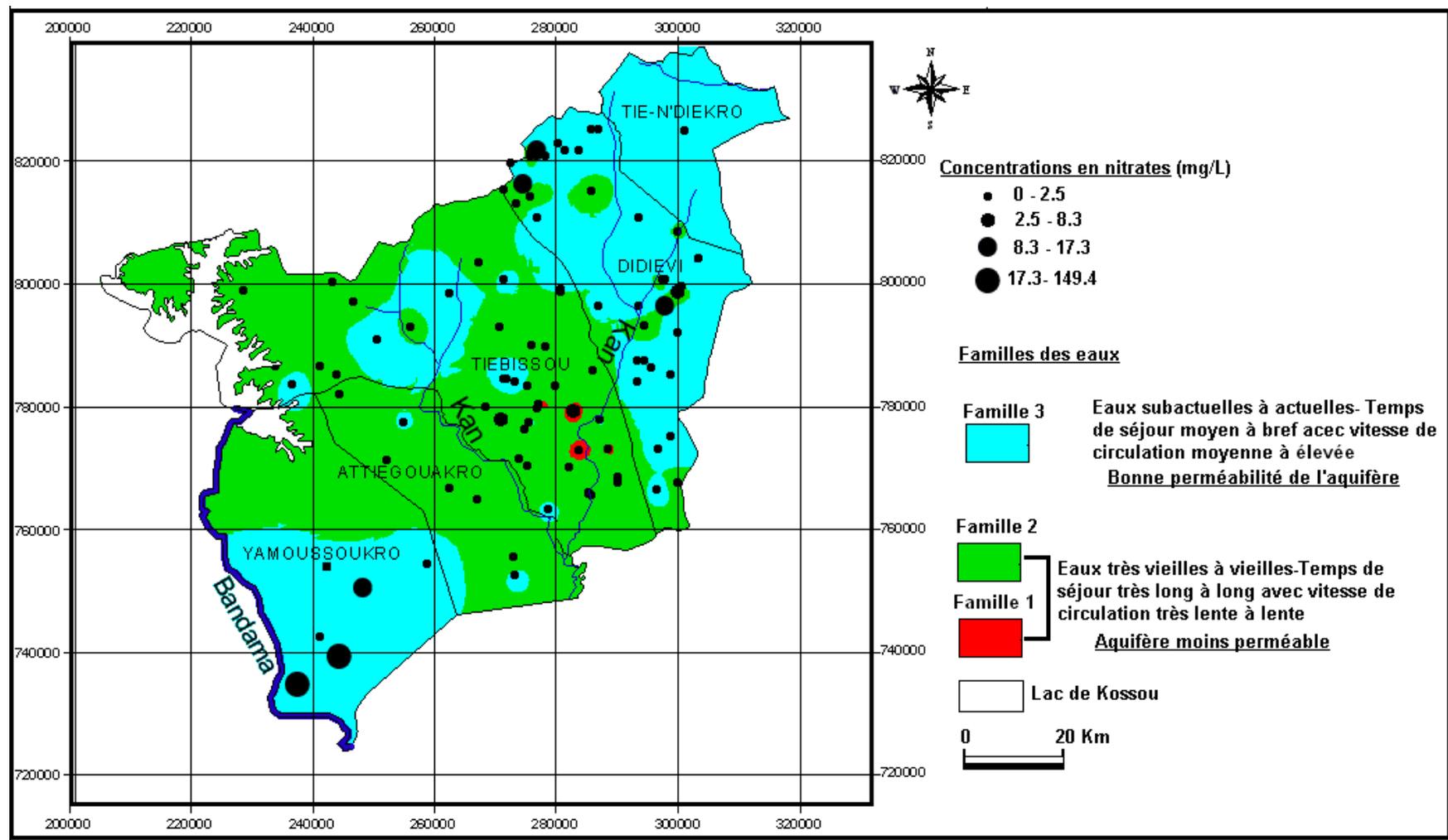


Figure 87: Carte de répartition spatiale des ISC couplée avec les teneurs en nitrates.

- **Indices de saturation vis-à-vis de l'anhydrite (CaSO₄) et du gypse (CaSO₄ 2H₂O)) (Figure 88)**

Les eaux souterraines de la région sont en déséquilibre thermodynamique avec le gypse, ce minéral est donc absent dans les réservoirs aquifères. En ce qui concerne l'anhydrite, la majorité des points d'eau sont sous saturés vis-à-vis de ce minéral. Cependant, on remarque que certains points d'eau ont atteint la saturation. La présence dans les eaux de faible concentration en sulfates serait en partie liée à l'hydrolyse de l'anhydrite. La dissolution de l'anhydrite a pour conséquence l'augmentation de la concentration des ions Ca²⁺ et celle du rapport Ca/Mg.

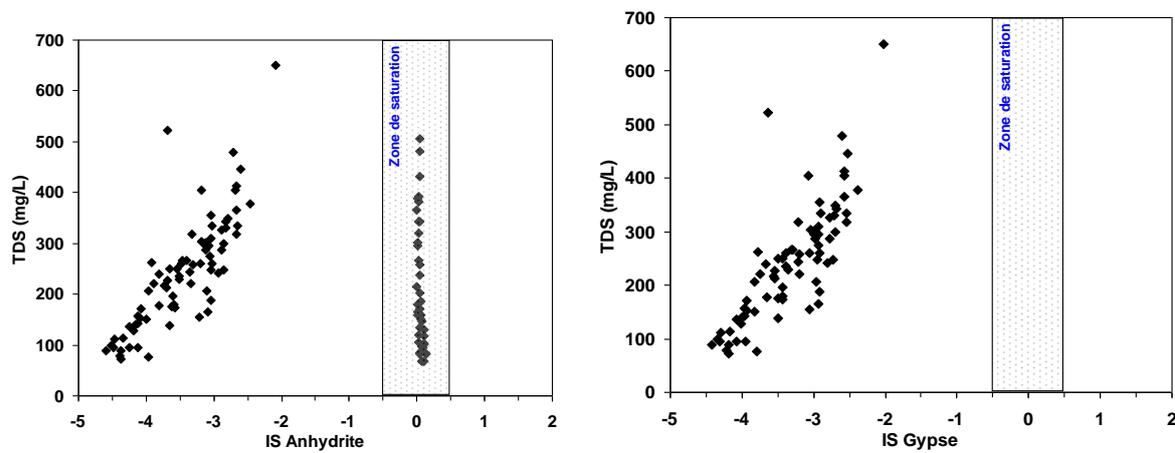


Figure 88: Corrélation TDS-indices de saturation des minéraux sulfatés dans la région des Lacs.

- **Indices de saturation vis-à-vis de l'hématite (Fe₂O₃), la goethite (FeOOH) et l'hydroxyde de fer (Fe(OH)₃.)**

Les indices de saturation de l'hématite varient de 13,27 à 19,36 avec une moyenne de 16,35 ; ceux de la goethite sont compris entre 5,62 et 8,67 avec une moyenne de 7,17. L'hydroxyde de fer a une moyenne de 1,20 et des valeurs extrêmes comprises entre -0,41 et 2,64. Les eaux souterraines de la région des lacs sont donc en équilibre thermodynamique avec l'ensemble des minéraux ferreux. Ces minéraux sont présents dans les réservoirs aquifères de la zone d'étude c'est ce qui semble expliquer sans doute l'augmentation des concentrations en ion ferreux (Fe²⁺) et manganèse (Mn²⁺) dans les eaux. Les phénomènes d'oxydoréduction étant le processus qui accélère leur mise en solution dans les eaux souterraines dans la zone d'étude. C'est pourquoi on trouve dans ces eaux des concentrations en fer dépassant souvent les normes dans les eaux établies pour les eaux destinées à la consommation humaine.

9.2. DISCUSSION

CAS DES RESULTATS DES PARAMETRES MESURES *IN SITU*

La valeur moyenne de température rencontrée dans la région des lacs est sensiblement égale à celles de certaines eaux du pays. C'est le cas pour les eaux de la Mé (27°C), du degré carré de Grand-Lahou (27,31°C) (Soro, 1987 ; 2002) et de la Marahoué (27,17°C) (Biémi, 1992). Par contre, elle reste inférieure à celle de la région de Dabou (28,24°C) (Tapsoba, 1995). Selon Biémi (1992), la valeur impérative de 25°C est difficile à observer en Afrique de l'Ouest où la température moyenne de l'eau tend vers 30°C en raison des conditions climatiques.

Dans la nappe de fissures, les forages de N'dié, d'Ahounnassou 1, d'Allanikro, de N'dénou, de Kossou pour ne citer que ces derniers ont des valeurs de conductivité respectivement égales à : 1097 ; 843 ; 692 ; 680 ; 648 $\mu\text{S}/\text{Cm}$. Ces fortes valeurs pourraient être dues à la nature des roches au contact de ces eaux.

Au niveau de la nappe des altérites, les puits paysans présentent les conductivités les plus élevées (ex. Dioulabougou 2 : 769 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et Dioulabougou 4 : 1285 $\mu\text{S}/\text{cm}$). La majorité de ces puits paysans sont situés dans la commune de Yamoussoukro dans le quartier Dioulabougou. A cet effet, il convient de noter que le puits de Dioulabougou 4 est situé dans un bas fond et le niveau de l'eau est seulement à 0,55 m de la surface. De ce fait, il est directement alimenté par les eaux de ruissellement lors des saisons pluvieuses. En plus, une probable infiltration des eaux parasites, qui pour la plupart, sont des eaux usées et du lixiviat issu de la décomposition des ordures ménagères n'est pas à écarter (Planche 10). Ces valeurs élevées de conductivité pourraient être due à une pollution d'origine superficielle. Le puits moderne d'Akpéssekro a une conductivité de 906 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette valeur peut être attribuée à la situation de cet ouvrage et de son entretien. En effet, ce puits est situé sur un sol riche en matière organique. De plus, la trappe du puits a été enlevée l'exposant ainsi aux diverses pollutions.

La valeur moyenne du pH mesurée est légèrement supérieure à celle enregistrée dans les forages du bassin de la Haute Marahoué (pH = 6,37), dans le degré carré de Grand-Lahou (6,08), dans la région Abidjan (5,04 à 5,26) mais elle est relativement inférieure à la moyenne trouvée dans le bassin de la Mé (6,87). En général, les eaux naturelles ont des valeurs de pH qui sont comprises entre 4,5 et 9 (Kortatsi, 2007).



Planche 9 : Chenal d'écoulement des eaux usées et du lixiviat issu des ordures ménagères dans le quartier Dioulabougou (Yamoussoukro) (Photos G. Soro).

Les eaux contiennent une quantité élevée de CO_2 libre qui contribue à la mise en solution d'ions H^+ et HCO_3^- (Biémi, 1992) ou au passage des eaux sur les permutolites libérant les ions H^+ (Soro, 2002). Mais selon Lallahem (2002) qui a travaillé dans le bassin nord de Paris, les faibles valeurs de pH dépendent essentiellement de l'importance de la couverture sableuse ou argileuse qui isole l'aquifère de l'air atmosphérique et de l'absence des apports acides ou alcalins. Aussi, qualifie-t-il l'ouvrage concerné non polluée. Dans la région des Lacs, les coupes géologiques des différents sondages montrent une séquence argilo-sableuse (Guerin-

Villeaubreil, 1962). De ce fait, l'on pourrait attribuer les faibles valeurs de pH à des conditions difficiles de circulation. Ce qui justifierait ainsi la thèse avancée par Soro (2002). En effet, compte tenu d'un faible taux d'infiltration, le CO₂ présent dans le sol n'est pas dilué par les apports externes. On assiste donc dans l'encaissant à une forte concentration de CO₂ contribuant ainsi à rendre les eaux plus acides par le phénomène d'hydrolyse.

Les valeurs d'oxygène dissous sont supérieures à 3 mg/L indiquant un état naturel des eaux. En outre, la valeur moyenne de 6,7 mg/L dépasse largement la valeur naturelle des eaux. Ces teneurs indiquent que les points sont localisés dans des endroits où les formations sont perméables et/ou un contact existe entre les eaux de surface et les eaux souterraines par le biais de réseau de failles et de fractures. Dans ce cas, une alimentation directe de l'aquifère par les eaux d'infiltration issues de pluies, de surface, est très possible. De même, la présence de l'oxygène dissous dans les eaux souterraines des aquifères de fissures est la preuve de la présence d'une phase gazeuse. Selon Faillat et Drogue (1993), les concentrations d'oxygène dissous peuvent être utilisées en partie pour expliquer le mécanisme du renouvellement des eaux souterraines des aquifères de fissures. Le principe d'une telle méthode a pour origine le phénomène d'oxydation. En effet, l'eau de pluie contient de l'oxygène dissous. Ainsi donc, lors de son infiltration vers la nappe de fissure, une grande partie de cet oxygène participe à des phénomènes d'oxydation. Ce processus a lieu sans qu'il y ait possibilité de renouvellement de l'oxygène. Dans ce cas, la nappe est donc confinée vis-à-vis des échanges de gaz. Toutefois, l'utilisation d'une telle méthode pour l'étude du mécanisme de renouvellement des eaux des nappes de fissure doit être modérée.

QUALITE DES EAUX ET RISQUES SANITAIRES

• Cas des nitrates

Les concentrations élevées en nitrates des puits d'Akpéssekro et de Subiakro qui sont respectivement de 105,6 mg/L et 149,40 mg/L, nous conduit à étudier le binôme nitrate - santé. Les nitrates ne sont pas toxiques en eux-mêmes. Cependant, lorsqu'ils sont transformés en nitrites et en composés nitrosés (nitrosamines et nitrosamides), ils peuvent alors devenir dangereux pour l'organisme. La toxicité des nitrates survient lorsqu'il y a une ingestion massive ou lorsqu'ils sont transformés en nitrites (NO₂⁻) dans l'organisme. En somme, ce sont les nitrites qui sont dangereux pour l'homme, car ils sont à la base de la méthémoglobine dont la maladie manifestée est la méthémoglobinémie. La Méthémoglobine est incapable de transporter l'oxygène vers les tissus et peut dans pareils cas provoquer une cyanose (asphyxie)

et des troubles de conscience pouvant évoluer vers la mort par anoxie cérébrale notamment chez les nourrissons de moins de 6 mois (Biémi, 1992 ; Ratel, 1992 ; Alagbe, 2006 ; Fewtrell, 2004 ; Cotard, 2009).

La méthémoglobinémie peut se manifester aussi par l'intermédiaire de la mère au cours de la grossesse. A cet effet, il semble exister des conditions de prédispositions à la méthémoglobinémie ou cyanose pour les nourrissons dont la mère a consommé régulièrement des eaux à fortes teneurs en nitrates (Ratel, 1992). La norme de potabilité de 50 mg/L dans l'eau de boisson a donc été établie afin de prévenir la méthémoglobinémie infantile (Fewtrell, 2004). C'est l'équivalent de 11,3 mg/L de NO₃-N. Cette norme a été fixée en tenant compte des résultats d'une étude faite par l'American Public Health Association (APHA). En effet, aucun signe de méthémoglobinémie n'a été observé chez des sujets consommant de l'eau dont la concentration en nitrate était inférieure à 10 mg/L de NO₃-N (nitrate azoté) (Fewtrell, 2004). En général, les cas de méthémoglobinémie apparaissent quand les taux de nitrates dans l'eau de consommation dépassent 100 mg/L.

En somme, les eaux des puits d'Akpessekro et de Subiakro devraient donc être interdites à la consommation afin de prévenir des risques potentiels de maladies. Par ailleurs, selon Alagbe (2006), la présence de concentrations élevées en nitrates peut indiquer aussi que l'eau contient des bactéries très dangereuses et d'autres polluants. Très souvent, la consommation de fortes teneurs en nitrates est liée à l'utilisation des puits privés de faible profondeur (< 15 m) réalisés dans les zones où la perméabilité des sols est bonne notamment dans les bas-fonds. Ce phénomène est généralement observé dans les petites localités ou chez les individus à faible revenu qui vivent en ville et qui n'ont pas accès à l'eau potable (Fan et *al.*, 1987). Les conditions d'hygiène vis-à-vis de l'eau étant mauvaises, la consommation d'une telle eau peut provoquer des gastroentérites chez les consommateurs. La consommation d'eau issue des puits traditionnels souvent très mal entretenus dans l'ensemble de la région des Lacs pourrait sans doute expliquer l'augmentation des cas de diarrhée dans le district sanitaire de Yamoussoukro.

• Cas du fer

La concentration maximale acceptable dans une eau de boisson a été fixée à 0,3 mg/L par l'OMS. Cette norme a été définie pour répondre plus à des critères esthétique et organoleptique qu'à des critères sanitaires. En effet, l'ingestion de fer semble plus nécessaire à l'homme. Cet élément est généralement conseillé aux femmes en âge de procréer et aux enfants en bas âge ou plus âgés qui sont le plus souvent plus exposés à des carences en fer. Les effets

liés aux carences en fer peuvent entraîner chez l'enfant une insuffisance du développement mental (Anonyme, 1983). Egalement, chez le sujet adulte, une carence en fer se manifeste par des cas graves d'anémie. Ainsi comme on le constate le fer est un élément essentiel à la nutrition, il n'en demeure pas moins qu'à certaines quantités ingérées, qu'il peut s'avérer toxique. En dehors des considérations sanitaires, la présence du fer à des concentrations supérieures à 0,3 mg/L dans les sources d'approvisionnement en eau potable n'est pas souhaitable pour des raisons d'ordre esthétique (Born *et al.*, 1987). L'excès de fer dans les eaux peut tacheter la lessive et attaquer les appareils de plomberie et donner un goût déplaisant aux boissons qui paraissent impropres à la consommation. De même, la précipitation du fer en excès donne à l'eau une couleur rouge brun désagréable. Cette situation a pour inconvénient le rejet de l'eau des forages au profit d'autres sources d'approvisionnement par le consommateur. Ces nouvelles sources d'eau sont très souvent polluées et peuvent être à l'origine de diverses maladies hydriques. Au Ghana, le problème du fer dans les eaux souterraines dans le bassin de l'Ankobra a entraîné l'abandon de nombreux forages (Kortatsi, 2007). En outre, la précipitation du fer peut également stimuler la croissance des ferrobactéries, qui sont des organismes qui tirent leur énergie de l'oxydation du Fe (II) en Fe (III). Ce phénomène aboutit au dépôt d'une pellicule biologique dans les conduites qui peut abaisser graduellement le débit comme on le constate sur les vieux ouvrages. Parmi toutes ces raisons évoquées, les principales qui provoquent le rejet des points d'eau par les populations sont d'ordre esthétique et organoleptique. Ce sont en autres, le goût désagréable que donne l'eau, la couleur rouge brun qu'elle laisse sur les ustensiles et les taches sur les lessives.

TYOLOGIE DES EAUX ET RAPPORTS CARACTERISTIQUES DES IONS

L'étude de la typologie a permis de mettre en évidence la prédominance du faciès bicarbonaté calcique dans les eaux souterraines de la région des Lacs. Ce résultat est en accord avec celui de plusieurs auteurs ayant travaillé en Afrique de l'Ouest et qui ont tous abouti à la conclusion que le faciès bicarbonaté est le plus représenté dans les eaux du socle (Akiti, 1980 ; Faillat et Blavoux, 1989 ; CEFIGRE, 1990 ; Biémi, 1992 ; Soro, 2002). Les eaux de type bicarbonaté calcique ou mixte (calcique, magnésienne) sont les plus représentées. Kortatsi (2007), dans le bassin de l'Ankobra aboutit au même résultat. Contrairement, au socle, le faciès chloruré sodi-potassique est le plus représenté en zone sédimentaire (Oga, 1998). La dominance du faciès bicarbonaté dans les eaux de socle est à rattacher à l'origine de la production des ions

bicarbonatés. En effet, les bicarbonates sont essentiellement produits par l'altération des silicates lors de l'acquisition de la charge saline des eaux dans la zone d'aération (CEFIGRE, 1990).

Le rapport Na/K est généralement faible dans un milieu bien drainé sujet à une altération des feldspaths potassiques (Tardi, 1969). Or en dehors du forage de Bongué où ce rapport est très faible (0,3), les autres forages présentent des rapports allant de 1 à 89. Ces fortes valeurs peuvent donc être attribuées à un mauvais drainage de certains horizons du sol, surtout dans la zone de transition qui marque le passage progressif vers le substratum sain (Soro, 1987). Selon Savadogo (1984), la prédominance du Na sur K dans les eaux trouve son explication dans le fait que la muscovite et les feldspaths potassiques sont d'une grande stabilité. De plus, la forte sollicitation des ions K par les plantes et dans les minéraux néoformés en est aussi une des causes (Soro, 1987 ; Biémi, 1992). Les faibles valeurs de sodium dans les eaux sont dues également au fait que les minéraux qui sont à l'origine de cet ion (albite et feldspaths) sont peu altérables. Le rapport Na/Cl varie de 0 à 24. Sur les 12 échantillons, seuls 4 ont un rapport supérieur à 1. Ici, on peut dire qu'il y a un apport de sodium. Et si nous nous situons dans le contexte géologique de notre étude, cet élément pourrait provenir de l'altération des feldspaths potassiques et sodiques (orthose, microcline, albite) et de celle des micas.

Les eaux provenant de l'altération des roches cristallines et cristallophylliennes ont, presque toujours, un pH négatif, puisque la destruction des silicates amène beaucoup plus d'alcalins que d'ions chlorure en solution (Stournaras, 1984). Ce déséquilibre entre chlorure et alcalins n'est pas lié aux échanges de base (Schoeller, 1934 *in* Biémi, 1992). Selon Biémi (1992), l'abondance des alcalino-terreux (Ca^{2+} , Mg^{2+}) dans les solutions au moment de leur arrivée dans le réservoir et les faibles proportions d'ions échangés ne permettent pas d'observer quantitativement la diminution de Ca^{2+} et Mg^{2+} .

Les eaux souterraines dans la région des Lacs sont peu minéralisées dans l'ensemble avec des valeurs allant de 1,49 méq/L à 17,62 méq/L avec une moyenne de 5,57 méq/L. Cette faible minéralisation est probablement due à la lenteur et à la difficulté des différents phénomènes d'attaque et des réactions de mise en solution en terrains cristallins et cristallophylliens. Les eaux sont principalement HCO_3 -Ca-Mg et dans quelques rares cas (points d'eaux 96, 99, 102, 108), elles sont HCO_3 -Mg-Ca.

CARACTERISATION DU MECANISME D'ACQUISITION DU CHIMISME DES EAUX ET ORIGINE DES DIFFERENTS IONS

L'étude du mécanisme d'acquisition du chimisme des eaux dans la région des lacs par les méthodes de l'analyse statistique multivariée (ACPN et CAH), nous a permis dans cette première approche d'observer trois principaux mécanismes qui sont responsables de l'évolution de la minéralisation des eaux dans les aquifères de fissures de la zone d'étude. Il s'agit dans un premier temps de la destruction de la végétation et de la décomposition de la litière qui produisent aussi bien des éléments tels que les nitrates et le chlore mais aussi des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} ...). Ce processus est contrôlé par l'infiltration directe des éléments dans la nappe occasionnant une pollution azotée. Le deuxième mécanisme est à la base de la minéralisation en éléments métalliques des eaux ; il s'agit ici de l'oxydoréduction. Enfin, la minéralisation naturelle par altération du réservoir dans le temps et précipitation des ions issus de la dissolution des silicates et précipitation des carbonates secondaires (dolomite, calcite etc....) reste le processus majeur qui gouverne le chimisme des eaux souterraines dans la région des Lacs. Quel est l'origine de ces éléments qui sont mis en solution par différents mécanismes ?

• Cas des bicarbonates

L'ion bicarbonate représente l'anion le plus fréquent dans les eaux du socle en Afrique de l'Ouest (CEFIGRE, 1990) et de ce fait il donne son nom au faciès bicarbonaté calcique. Il se pose donc la question de l'origine de cet ion dans les eaux souterraines. Ne disposant pas d'analyses d'eaux de pluie et de surface, nous nous sommes donc référés à la littérature pour essayer de connaître la provenance de cet ion dans les eaux.

Au Burkina Faso, Savadogo (1984) a montré que l'eau de pluie avant de parvenir au sol contenait déjà du gaz carbonique dissous mais en petite quantité (0,45 méq/L) et que les eaux de surface s'enrichissaient en bicarbonate au cours du ruissellement. L'auteur affirme que les eaux souterraines contiennent trois fois plus de bicarbonate que les eaux de surface et dix fois plus que les eaux de pluie. Au Cameroun, Djeuda (1987) trouve un résultat identique. Partant de ces résultats, nous pouvons dire que la grande partie des bicarbonates rencontrés dans les eaux souterraines est acquise lors de l'infiltration des eaux de pluie.

L'origine des fortes teneurs en bicarbonate serait donc à rechercher dans les différents réservoirs chimiques (Savadogo, 1984 ; Biémi; 1992). Parmi lesquels nous avons :

- o le réservoir chimique atmosphérique. L'atmosphère contient du CO_2 même si celui-ci est en petite quantité qui va s'infiltrer dans le sol lors des différents événements

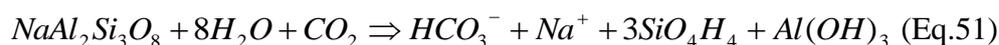
pluvieux. Sa dissolution dans l'encaissant va contribuer à augmenter les teneurs en bicarbonates ;

- o le réservoir chimique pédosphérique. C'est la tranche superficielle de la croûte terrestre caractérisée par l'altération des roches et des minéraux sous l'influence de l'énergie et de la matière vivante ; il participe à la dissolution et la mise en circulation des ions à partir des roches (Soro, 1998) ;
- o le reservoir des sols.

Le CO₂ du sol provient de l'air et de la respiration des plantes. A cela il faut ajouter l'action des micro-organismes et des animaux qui libèrent au cours de leur respiration, une quantité de CO₂ pouvant atteindre plusieurs fois le poids de leurs corps (Biemi, 1992). La présence dans l'eau de ce CO₂ provenant des sols facilite l'hydrolyse qui permet, d'une part la formation de HCO₃⁻, et d'autre part, en supposant une évolution en milieu fermé, l'augmentation du pH. C'est pour cette raison que l'eau des nappes de fissures, bien que relativement peu minéralisée, présente de fortes teneurs en HCO₃⁻ (Faillat et Drogue, 1993). Selon Savadogo (1984), l'altération des feldspaths libère également des ions qui en se combinant donnent des bicarbonates présents dans les eaux souterraines. Ainsi, l'altération de l'albite et de l'anorthite conduit à la formation de gibbsite et de kaolinite et aux carbonates selon les équations chimiques (50 et 51) suivantes (Soro, 2002) :



Kaolinite



Gibbsite

Le réservoir chimique floristique. L'action du couvert végétal est source de bicarbonates dans les eaux (Biemi, 1992). La végétation de la zone d'étude est à cheval entre la savane et la forêt. Les feux de brousse sont courants dans la zone. Ils sont la source de production d'une importante quantité de CO₂ qui avec les pluies va s'infiltrer dans le sol et dans la nappe. Ce CO₂ participera à l'hydrolyse des silicates et va contribuer à la production de bicarbonates dans les eaux.

• Cas des nitrates

La problématique de l'origine de la pollution par les nitrates des eaux souterraines dans les aquifères de fissures en Afrique de l'Ouest a intéressé plusieurs travaux (Savadogo, 1984 ; Faillat et Rambaud, 1988 ; Faillat et Blavoux, 1989 ; CEFIGRE, 1990 ; Faillat, 1990 ; Onugba, 1990 ; Faillat et Rambaud, 1991 ; Travi et Mudry, 1997 ; Biemi, 1992 ; Soro, 2002 ; Ahoussi, 2008). Ces auteurs ont signalé la présence dans les eaux souterraines de fortes concentrations de nitrates de plus en plus récurrentes. Une origine agricole des nitrates dans les eaux souterraines en zone tropicale humide en général et dans la zone d'étude en particulier est encore peu probable en raison de la faible utilisation des engrais due à un faible pouvoir économique des populations, des habitudes agricoles ainsi que des pratiques culturelles. Ainsi, d'autres sources de production des nitrates doivent être explorées.

L'hypothèse d'une origine géologique des nitrates n'est pas à écarter. En effet, des teneurs notables en NH_4^+ , jusqu'à 1500 ppm ont été rencontrées dans les biotites de certains schistes ou gneiss en Finlande (Faillat, 1990). Dans le contexte géologique de notre zone d'étude, ce cas semble être très probable notamment dans les métasédiments birimiens. L'origine des nitrates est donc à chercher entre la décomposition de la matière organique émanant de la déforestation, le lessivage des sols et les apports d'azote par les eaux météorites. Certains auteurs ayant travaillé dans la zone tropicale humide (Savadogo, 1984 ; Faillat, 1986 ; Faillat et Rambaud, 1988, Faillat, 1990 ; Biémi, 1992 ; Travi et Mudry, 1997 ; Soro, 2002) s'accordent à attribuer les fortes teneurs en nitrates dans les aquifères de fissures au lessivage des sols et à la décomposition de la matière organique suite à la déforestation ; la source météorique ne fournissant que quelques centièmes de méq/L de nitrates dans les nappes fissurées (Faillat, 1990). L'azote représente 3,5 % en poids d'une plante banale vivante et 1,5 % de sa matière sèche (Lavollay, 1980 *in* Faillat et Rambaud, 1991). Rougerie (1983) cité par Faillat et Rambaud (1991) estime à 1500 tonnes par hectare de matière végétale en forêt intertropicale humide, soit un maximum de 50 tonnes par hectare d'azote disponible. Hrkal (1992), dans l'ancienne Tchécoslovaquie particulièrement dans la Bohême du Nord, région non agricole, a observé une augmentation du taux de nitrate en trois décennies de 4 mg/L à 19 mg/L, soit un accroissement de cinq fois plus en dix ans. Cette augmentation subite en un temps record a été attribuée par l'auteur à la déforestation. Le rapide changement qualitatif dans le couvert végétal, le dépérissement ou l'abattage des arbres entraînent une croissance des teneurs en nitrates dans l'eau souterraine. Des quantités élevées d'azote d'origine atmosphérique que la végétation absente ne consomme plus sont ainsi libérées. Ceci est d'autant plus probable lorsqu'on sait que

les stocks en matière organique et en azote sont plus importants en zone forestière qu'en zone de savane. Et selon Faillat et Rambaud, (1988), la quantité d'azote est de l'ordre de 2 à 7 tonnes par hectare dans le Sud de la Côte d'Ivoire et ceci sur une épaisseur de 0,5m. Cependant, même s'il est difficile d'apprécier la part d'azote qui, d'une part, sera nitrifiée, et d'autre part, parviendra aux nappes sous formes de NO_3^- , compte tenu des phénomènes de ruissellement en surface, d'infiltration, de fixation ou de dénitrification dans les sols (Faillat et Rambaud, 1988), il est certain qu'une partie non négligeable doit arriver aux eaux souterraines, et contribuer aux teneurs anormalement élevées. En effet, le temps que peut mettre un ion nitrate pour atteindre la nappe située à quelques dizaines de mètres sous la surface est estimé à vingt années et plus (Soro, 2002). Tout ceci ne doit pas exclure la possibilité d'une pollution domestique directe ou diffuse dans les centres urbains. En effet, Onugba (1990), à l'aide d'une relation tritium-nitrate a montré que la minéralisation nitratée est liée aux eaux d'infiltration récente. Celle-ci est discontinue et semble se propager, logiquement, suivant les axes de drainage liés à la fracturation (Travi et Mudry, 1997). Cette dernière se développe au voisinage des villages et des rejets d'eau urbaine. De ce fait, l'on peut dire que dans une zone où les pratiques agricoles et pastorales, le climat et la végétation sont les mêmes, la densité de population et le système de fracturation des aquifères déterminent pour une large part les concentrations en nitrates dans les eaux souterraines. Dans la région d'étude qui est à cheval entre la savane et la forêt (« V » Baoulé), la déforestation localisée lors de l'implantation de nouveaux campements ou de mise en cultures de nouvelles terres peut modifier le cycle naturel de l'azote avec pour conséquence une croissance des teneurs en azote total des sols avec pour effet immédiat d'accroître les teneurs en nitrates dans les eaux des nappes de fissures. Si la déforestation due à l'homme est la principale source de nitrates dans les eaux souterraines, une contamination urbaine n'est pas à exclure.

• Cas des phosphates

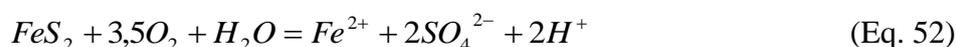
Cet élément chimique est souvent rencontré en milieu aquatique sous l'effet de rejets urbains, industriels et agricoles et aussi sous l'effet des réactions biologiques. Divers facteurs chimiques et biologiques peuvent réagir sur la mobilisation du phosphate et sur l'évolution des composés azotés à l'interface eau/sédiments : la température, l'oxygène dissous (O_2), le potentiel d'oxydoréduction (Eh) et le pH (Lallahem, 2002). Les phosphates ne sont pas abondants dans les pluies, mais le lessivage pluvial de la forêt fournit aux eaux de pluie de fortes proportions de phosphates (Mathieu, 1976) qui peuvent atteindre les nappes lors de leur infiltration. La production de phosphates est assurée aussi par la matière organique sous forme de

p205. Les faibles valeurs de cet élément dans notre zone d'étude seraient dues à la mise en culture des sols qui participent à la diminution de l'activité des phosphates (Soro, 2002).

• Cas des sulfates

Le problème des sulfates dans les eaux souterraines de la zone d'étude n'est pas alarmant. Cependant des teneurs relativement élevées de 30 mg/L (0,6 méq/L), nous amène à essayer de voir quelle est l'origine de ces sulfates dans la région des Lacs. Les données chimiques comme nous l'avons signalé plus haut sont les premières analyses des forages.

De ce fait, une origine anthropique est *a priori* à écarter, il en est de même pour des sulfates d'origine industrielle car la zone n'est pas située en zone industrielle. L'oxydation et la dissolution des pyrites et de l'arsénopyrite pourraient être la source majeure des sulfates (SO_4^{2-}) et du fer dans les eaux souterraines (Kortasi, 2007). La présence des sulfates ici est donc d'origine géologique. Au Ghana, dans le bassin d'Offin, Kortasi et *al.* (2008) ont montré que les roches du Birimien contenaient des quantités très significatives de pyrite et d'arsénopyrite. Ils se forment par altération des minerais sulfureux et apparaissent dans la zone d'oxydation des gîtes métallifères. L'oxydation de la pyrite et de l'arsénopyrite peut s'écrire respectivement selon les équations chimiques 52 et 53 suivantes (Kortatsi et *al.*, 2008):



Ces réactions sont supposées produire des concentrations élevées de sulfate à un pH acide et à un ratio de $\text{Fe}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ compris entre 0,5 et 1 respectivement (Kortatsi, 2007 ; Kortatsi et *al.*, 2008). Coulibaly et *al.* (2008) ont trouvé un assemblage de minéraux sulfureux tels que la pyrite-chalcopyrite dans le Birimien au centre de la Côte d'Ivoire et notamment dans la zone qui fait l'objet de cette étude. De même les roches du Birimien du Ghana contiennent également des teneurs significatives en pyrite et arsénopyrite (Kortatsi, 2007 ; Kortatsi, et *al.*, 2008). Si une partie des sulfates peut provenir des roches, notamment des inclusions fluides, des sels intergranulaires et des sulfures, cette contribution doit être faible dans la tranche des 100 premiers mètres où le renouvellement des eaux est rapide (Faillat et Drogue, 1993).

L'activité métabolique de la biomasse tropicale pourrait être une des origines des sulfates dans les eaux (Soro, 2002), la production des sulfates par les végétaux étant très significative. Ainsi, à la station de Lamto, Crozat (1978) cité par Biémi (1992) montre que le soufre rejeté pendant

la durée d'un feu de brousse dans l'air est de 1,553 kg, soit une émission de 150 mg de S par m². De même, Delmas montre que les feux de brousse des savanes tropicales peuvent produire davantage de soufre par m² (Biémi, 1992). On constate donc que le réservoir floristique joue un grand rôle dans l'origine de cet élément dans les eaux souterraines de la région des Lacs.

De même, une origine atmosphérique n'est pas à exclure. En effet, les eaux de pluie semblent s'appauvrir plus rapidement en chlorures qu'en sulfates lorsqu'on s'éloigne de la côte (Mathieu, 1976). Il ressort d'une étude réalisée en Côte d'Ivoire d'une forte présence de sulfate de calcium dans les brumes sèches issues de l'émission de particules terrigènes en provenance du Sahara (Soro, 2002). Selon Delmas cité par Biémi (1992), les composés gazeux réduits du soufre (hydrogène sulfuré) peuvent se transformer également dans l'air, en dioxyde de soufre puis en sulfate (SO₄). Il estime à 1,28 mg/L la quantité de SO₄²⁻ issue du pluviollessivage de la voûte forestière en Côte d'Ivoire. Il est donc possible que les sulfates puissent provenir principalement de la pluie et du lessivage des sols par celle-ci. Selon Faillat et Drogue (1993), il a été montré que dans certaines eaux en zone de socle que la totalité des anions d'acides forts (Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻) pouvaient être apportés par les précipitations.

Les sulfates parviennent jusqu'aux eaux souterraines par l'intermédiaire du sol, des formations géologiques, de la végétation et de la faune avoisinantes, des précipitations et des processus biologiques, physiques et chimiques dans l'eau. En somme, les sulfates dans les eaux souterraines pourraient provenir du pluviollessivage des sols, de l'action métabolique de la biomasse forestière tropicale, des aérosols très riches en sulfure et de l'oxydation et de la dissolution des minéraux sulfureux tels que la pyrite et la chalcopyrite.

• Cas des chlorures

Les plus fortes valeurs enregistrées vont de 45 mg/L à 117 mg/L. Les chlorures ont une origine exclusivement météorique en l'absence de pollution anthropique et de dépôts évaporitiques. La zone d'étude étant exclusivement située en région de socle et à plus de 250 km de l'océan, l'origine de cet élément ne peut être attribué uniquement aux précipitations. En effet, lors du déplacement de la mousson vers le continent, celle-ci subit un effet de pluviollessivage au cours des différents événements pluvieux diminuant ainsi sa concentration en sel notamment en NaCl. Ainsi, les pluies qui tombent à l'intérieur du continent, loin de la côte, sont appauvries en chlorures (Mathieu, 1976). En zone de socle, le chlore peut provenir de l'altération des apatites chlorées (Ca₅(PO₄)₃(OH, F, Cl), minéraux accessoires communs des roches métamorphiques, ou des chloropatites appartenant aux roches basiques (Tapsoba 1995 ;

Soro 2002). Mais cette origine lithologique paraît secondaire car selon CEFIGRE (1990) ; Soro (2002), les teneurs en chlorures et sulfates sont habituellement faibles dans les réservoirs du socle cristallin de l'Afrique de l'Ouest sauf dans quelques cas particuliers. En outre, une partie du Cl^- et de SO_4^{2-} peut provenir des roches, notamment des inclusions fluides, des sels intergranulaires et des sulfures, mais cette contribution devrait être faible dans la tranche des 100 premiers mètres, où le renouvellement des eaux est rapide en milieu de socle (Faillat et Drogue, 1993). Ceci est d'autant vrai que la profondeur moyenne des ouvrages se situe autour des 80 mètres. De même, il est vraisemblable que les anions tels que le Cl^- , SO_4^{2-} et le NO_3^- et une partie des cations, proviennent principalement de la pluie et du pluviolessivage des sols. L'apport de la voûte forestière n'est pas écarté, la forêt étant capable de stocker et de restituer de grandes quantités de chlore d'origine essentiellement océanique prélevé dans l'atmosphère (Mathieu, 1976). Savadogo (1984) et Faillat (1987) ayant travaillé respectivement au Burkina Faso et en Côte d'Ivoire, ont attribué ces teneurs exceptionnellement élevées de chlorures à la présence d'un recouvrement argileux sur le substratum rendant difficile les circulations d'eau en leur sein et même dans les fissures qu'il colmate avec pour conséquence une surconcentration des chlorures. Cette explication nous semble plausible dans la mesure où les coupes de forages dans la zone montrent des séquences d'altérites de nature argileuse et argilo-sableuse. En définitive, l'origine des chlorures dans les eaux souterraines de la zone d'étude serait donc due au pluviolessivage de la voûte forestière dans le sud de la zone où il existe encore des lambeaux de forêts. Par contre, dans le reste de la zone où la savane domine, les concentrations élevées en chlorures pourraient être attribuées au recouvrement argileux.

• Cas du calcium et du magnésium

Le rapport Ca/Mg varie de 1,2 à 12,5 et montre que le calcium domine le magnésium dans les eaux, ceci est confirmé avec la dominance du faciès calcique dans le triangle des cations de Piper. Ce rapport est très souvent utilisé en hydrogéologie comme un moyen pour la définition du régime hydrochimique des eaux souterraines (Stournaras, 1984). Le magnésium provient de l'altération des minéraux ferromagnésiens : biotite, amphiboles et pyroxènes. Le calcium peut provenir des plagioclases et aussi des amphiboles. Une proportion assez importante d'anorthite dans les plagioclases, variété la plus facilement altérable, justifie que la concentration de Ca^{2+} soit supérieure à celle de Mg^{2+} . Le sodium et le calcium, libérés au cours de l'hydrolyse acide des plagioclases évoluent conjointement avec les bicarbonates dans les

eaux (Soro, 2002). En dehors du phénomène de l'hydrolyse, qui est vue comme la source principale de production des ions majeurs en général et en particulier des cations, certains auteurs ont montré qu'en zone de socle, plus de la moitié des cations pouvaient être apportés par les précipitations (Faillat et Drogue, 1993).

• Cas des éléments trace : *Fer et le Manganèse*

La présence de fer dans l'eau peut avoir diverses origines : une origine naturelle par lessivage des terrains argileux ou oxydation de la pyrite ou encore hydrolyse des minéraux ferromagnésiens. A ces différentes origines, il convient d'ajouter l'action des microorganismes notamment celle des bactéries. Ces bactéries jouent un très grand rôle dans la minéralisation du fer notamment les thiobacilles. Elles oxydent 200 ppm de fer ferreux (Fe^{2+}) en fer ferrique (Fe^{3+}) en trois jours alors que dans les mêmes conditions physicochimiques naturelles, les eaux météorites mettraient deux fois plus de temps à le faire. Ainsi, il passe en solution dans les milieux moyennement réducteurs mais les concentrations restent faibles comparées à celles des ions majeurs (Travi et Mudry, 1997). Par contre, dans la zone anaérobie saturée (réducteur et présence de CO_2) comme c'est le cas des nappes, et en l'absence de sulfure et de carbonate, on peut trouver du fer et du manganèse solubles en concentration souvent élevée (Bell, 1975 ; Dore, 1989). La présence du fer dans des sources naturelles d'approvisionnement en eau est attribuable à la décomposition de la roche, des minéraux et aux eaux acides de drainage des mines (Bell, 1975), aux eaux de lessivage des décharges contrôlées (James, 1977), aux effluents d'égouts (Oliver et Cosgrove, 1975), ainsi qu'aux rejets des secteurs industriels qui traitent le fer. Cependant, les différents ouvrages échantillonnés dans la zone d'étude ne ni situés en zone urbaine et encore moins dans une zone industrielle. De ce fait, la présence de fer dans les eaux serait donc due à la décomposition de la roche et des minéraux en présence d'un milieu réducteur.

Etant donné que les fortes teneurs en fer et en manganèse sont liées à la présence d'un milieu réducteur et du CO_2 , ces deux éléments pourraient servir d'indicateurs de l'âge des eaux dans les aquifères. En effet, la présence de CO_2 dans les eaux augmente la vitesse de dissolution de l'encaissant et une production de H^+ qui contribuent à élever le pH (milieu acide). La présence de fer et du manganèse dans les eaux souterraines est donc sous l'influence de la présence d'un milieu acide (riche en CO_2) réducteur qui favorise la précipitation de ces éléments. Cependant, il semble que ce mécanisme ne suffit pas à lui seul pour expliquer la mise en solution du fer et du manganèse dans les eaux souterraines (Kortatsi, 2007).

En effet, les minéraux ferreux tels que l'hématite, la goëthite et hydroxyde de fer peuvent réagir dans les eaux à l'équilibre. Cette réaction nécessite un temps assez long pour atteindre l'équilibre et elle peut en outre participer à la mise en solution de fer et de manganèse dans les eaux. Dans ce cas, le fer précipitera dans les eaux si celles-ci sont oxygénées à l'instar des nappes phréatiques. Dans le cas contraire, on assistera au phénomène de réduction au niveau des forages. La réduction se fait probablement grâce à un agent microbiologique qui joue le rôle de catalyseur car, la dissolution de l'hématite en présence de protons (acide) est extrêmement lente. Cependant, la réaction peut être accélérée par la présence d'un lien organique (Appelo and Postma, 1999).

La zone d'étude est relativement bien arrosée avec une végétation capable de produire une bonne quantité de matière organique. Il est donc fort probable que la présence de cette matière organique dans le sol soit à la base de la dissolution des minéraux ferreux par réduction et c'est peut être par ce processus que le fer (Fe^{2+}) entre dans les eaux souterraines.

Au plan géologique, la zone d'étude est constituée de granites, de granodiorites et de roches métamorphiques. Une autre source du fer dans les eaux souterraines pourrait être le lessivage des silicates ferromagnésiens (biotite, hornblende et pyroxènes). Ces minéraux se rencontrent les roches de la région (Leblond, 1984). De même, il est fort probable que le fer provienne de la dissolution de l'hématite et de la goëthite et de la magnétite souvent associée à l'hématite en présence de matière organique (Kortatsi, 2007 ; Kortatsi et *al.*, 2008). Les indices de saturation calculés des minéraux ferreux dans le paragraphe qui suit, vont nous permettre de comprendre les origines du fer dans les eaux souterraines.

CAS DES INDICES DE SATURATION ET AGE DES EAUX

Les eaux souterraines de la région des lacs sont dans la majorité des cas sous saturées en aragonite, en calcite et en dolomite même si parfois on a constaté certains équilibres. Toutefois, ceux-ci restent relativement faibles par rapport au nombre d'échantillons. Ce résultat est en accord avec celui de nombreuses études réalisées en Côte d'Ivoire (Biémi, 1992 ; Tapsoba, 1995 ; Savané, 1997, Goné, 2001, Soro, 2002 ; Ahoussi, 2008) et en Afrique de l'Ouest (Kortatsi, 2007 ; Kortatsi et *al.*, 2008). Cette sous saturation est due à l'absence de ces minéraux dans les roches (Biémi, 1992). Par ailleurs, l'évolution des eaux dans un système ouvert à l'atmosphère permet aux aquifères de se charger en CO_2 nouvellement infiltré.

Cette présence de CO₂ provenant de l'atmosphère et du sol indique que les aquifères ont une bonne perméabilité. Dans ce cas, les eaux qui séjournent dans la matrice aquifère sont récentes et d'âge récent. De ce fait, les carbonates secondaires n'ont pas eu le temps de précipiter. Par conséquent, l'hydrolyse des silicates qui nécessite du CO₂ est donc très active. Ce dernier phénomène est donc le mécanisme principal qui gouverne le chimisme des eaux souterraines dans la zone d'étude. Une étude plus pointue tenant compte de la silice et de l'aluminium aurait pu étayer cette hypothèse. Mais l'absence de ces deux éléments ne nous permet pas de voir le comportement des minéraux alumino-silicatés tel que l'albite, l'anorthite, la chlorite et l'illite.

CONCLUSION PARTIELLE

L'étude hydrochimique quantitative et qualitative des eaux souterraines dans la région des Lacs s'est avérée fort intéressante en ce sens qu'elle permet de tirer plusieurs conclusions. Ainsi, au niveau des paramètres physiques mesurés *in situ*, les observations suivantes peuvent être faites :

- la température moyenne des eaux des forages est de 27,21°C et celle des puits est de 27,81°C ;
- les eaux ont un pH moyen de 6,6 et de 5,86 respectivement pour les forages et les puits;
- la conductivité moyenne est de 331 µS/cm avec des valeurs extrêmes comprises entre 11,2 et 1097µS/cm pour les forages. Tandis que les puits présentent une valeur moyenne de 382 µS/cm et un maximum de 1285 µS/cm ;

En dehors des points d'eau d'Akpéssekro et de Subiakro qui évoluent en milieu réducteur (Eh négatifs), tous les autres points d'eau sont dans des conditions d'oxydation (Eh positif).

L'étude des éléments chimiques majeurs et des éléments métalliques traces montre que :

- les cations sont peu abondants et Ca²⁺ est le plus dominant. Les anions sont dominants avec une prédominance de HCO₃⁻ - qui représente 84 % des anions et plus de la moitié de la charge saline des eaux. Les eaux sont de types HCO₃-Ca ou HCO₃-Ca-Mg ;
- l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) ont permis de mettre en évidence trois mécanismes qui sont à l'origine de la production des ions : La destruction de la végétation, la décomposition de

la litière, l'hydrolyse et la dissolution des silicates. L'oxydoréduction est à l'origine de la mise en solution du fer et du manganèse. La minéralisation naturelle des eaux est acquise par hydrolyse des silicates après l'infiltration des eaux enrichies en CO₂ du sol dans la zone non saturée ;

- les eaux sont sous-saturées par rapport aux carbonates secondaires que sont l'aragonite, la calcite et la dolomite et aussi, par rapport aux minéraux évaporites (gypse et l'anhydrite). Cependant, elles sont sursaturées en minéraux ferreux tels que la goethite, l'hématite, et l'hydroxyde de ferreux;
- le diagramme pH-HCO₃ montre que les eaux évoluent dans un système ouvert à l'atmosphère et sont de ce fait récentes dans l'aquifère. Le taux de renouvellement est donc rapide ce qui indique une bonne perméabilité des aquifères;
- les fortes concentrations en nitrates dépassant les normes OMS observées dans certains points d'eaux sont dues aux phénomènes anthropiques tels les feux de brousse, la déforestation localisée lors de l'implantation de nouveaux habitats pour ce qui est des nitrates. Par contre, les valeurs élevées en fer et en manganèse sont dues à une minéralisation naturelle des eaux. La sursaturation des eaux en goethite, hématite et en l'hydroxyde ferreux est à l'origine des concentrations élevées en fer et en manganèse dues à la précipitation de ces minéraux en présence d'un milieu anaérobie riche en CO₂ ;
- au plan qualitatif, les eaux souterraines sont dans l'ensemble aptes à l'alimentation des populations.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le district de Yamoussoukro et le département de Tiébissou (Région des lacs) centre de la Côte d'Ivoire ont connu une forte pression démographique due aux crises sociopolitiques. Cet état de fait, a entraîné une forte demande en eau potable des populations rurales et urbaines. L'étude de l'évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraine dans le district de Yamoussoukro et dans le département de Tiébissou (Région des Lacs) a nécessité la création d'une base de données (hydro-climatique, hydrochimique, géologique, hydrogéologique, télédétection, ...). Le développement de ces différents thèmes dans la présente étude a permis de faire le point des connaissances sur les potentialités et la qualité des ressources en eaux souterraines. L'utilisation des techniques statistiques multivariées (ACPN, CHA), hydrochimiques, hydrodynamiques et de télédétection ont guidé notre démarche. Les apports de cette thèse sont multiples.

HYDROCLIMATOLOGIE

Les changements climatiques observés en Afrique en général à partir des années 1960 ont eu une forte influence dans la zone d'étude.

L'étude de la dynamique spatio-temporelle des précipitations a montré l'existence d'un gradient pluviométrique SW-NE en constance variation dans le sens de la baisse pluviométrique de la zone d'étude.

Le calcul du bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite pour la période allant de 1970 à 1997, montre l'impact de la variabilité climatique relevé par les méthodes statistiques. Pour une moyenne pluviométrique de 1122 mm, seulement 3,63 % s'infiltrent vers la nappe soit un volume de 2,44 10⁹ m³, le reste partant sous forme d'évaporation (92 %) et de ruissellement (4,37%). Ce déficit qui s'élève à 38,80% est fortement ressenti sur les installations hydroélectriques dans la zone. On a pu observer une réduction de 40% de la superficie du lac de Kossou depuis sa mise en service en 1972.

Cette modification au niveau du régime pluviométrique influencé le régime des cours d'eau et principalement du celui Kan durant la période de 1970-1995.

Les coefficients de tarissement de cours d'eau sont compris entre 2,21 10⁻² et 1,02 10⁻¹ J⁻¹ avec une moyenne de 5,93 10⁻² J⁻¹. Quant aux volumes mobilisés par les aquifères du bassin du Kan, ils évoluent entre 0,048 et 0,491 Km³ avec une moyenne de 0,158 Km³. Ces volumes sont faibles et traduisent une baisse des réserves en eau souterraine en dehors des années 1980

et 1985 où l'on a observé des pics qui se sont traduits au niveau des coefficients de tarissement par une baisse.

La région des lacs à l'instar des autres régions de la Côte d'Ivoire subit donc très sévèrement l'impact de la variabilité du climat observée depuis les années 1960 et dont l'une des manifestations sévères a été la sécheresse des années 1983.

DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL DANS LA REGION DES LACS

L'analyse diachronique d'images satellitaires Landsat TM et ETM⁺ sur une période de 16 ans de 1986 à 2002 par la méthode de la classification supervisée a permis de discriminer six (6) classes d'occupation du sol. Une tendance à la régression avec des taux d'évolution moyens annuels a été relevée au niveau des plans d'eau (-0,164), des cultures irriguées (-0,231) et de la savane arborée (-1,063). De même, une tendance à la progression est perceptible au niveau de la forêt (0,287), des cultures (0,473) et des sols nus ou dégradés (0,699). De faibles indices de rétention (< 100) ont été trouvés. Ils rendent compte d'une forte anthropisation et de variabilité climatique importante dans la zone. Une dynamique de l'occupation du sol a donc été mise en évidence avec ses répercussions sur les ressources en eau.

HYDROGEOLOGIE ET TELEDETECTION

L'intérêt des paramètres hydrauliques des aquifères réside dans le fait qu'ils peuvent servir à une étude de modélisation future pour une meilleure gestion des ressources en eaux souterraines de la zone d'étude, il en est de même pour la fracturation. L'étude des paramètres des ouvrages montre que :

- la profondeur totale des forages varie de 28 à 100 m avec une moyenne de 68,54m ; cette moyenne est la même sur les granites, par contre sur les schistes, elle avoisine les 70 m ;
- l'épaisseur d'altération est comprise entre 8 et 95 m avec une moyenne de 49 m et 95% de la zone d'étude couverte par une épaisseur variant entre 20 et 60 m ;
- plus de 88% des forages ont un niveau statique qui se situe dans les 20 premiers mètres donc dans les altérites. Ce résultat est très intéressant dans la mesure où la vulnérabilité des aquifères est sous l'influence de la profondeur du plan d'eau;
- le nombre des arrivées d'eau varie de 2 à 4 et les profondeurs sont comprises entre 10 et 86 m avec une moyenne de 44 m ;
- 67% des débits rencontrés dans la zone se situent dans l'intervalle de 1 à 2,5m³/h. Le

débit le plus faible est de $0,12 \text{ m}^3/\text{h}$ alors que le plus élevé est de $14,4 \text{ m}^3/\text{h}$ avec une moyenne de $2,37 \text{ m}^3/\text{h}$.

L'étude des paramètres hydrodynamiques des aquifères montre que :

- les transmissivités varient de $1,15 \cdot 10^{-6}$ à $4,48 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ avec une moyenne de $4,951 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Ces valeurs se répartissent sur trois ordres de grandeur traduisant ainsi l'hétérogénéité du milieu ;
- les débits spécifiques varient de $0,008$ à $2,03 \text{ m}^2/\text{h}/\text{m}$ avec une moyenne de $0,19 \text{ m}^2/\text{h}/\text{m}$. Ces valeurs sont faibles et mettent en évidence la méthode choisie pour l'implantation des forages de même que les fractures interceptées. Elles rendent aussi compte de l'objectif fixé lors des campagnes de foration. Très souvent un ouvrage qui a un débit de $1 \text{ m}^3/\text{h}$ est considéré comme positif en hydraulique villageoise ;
- les perméabilités déduites sont faibles et s'alignent sur quatre ordres de grandeur tout comme la transmissivité, elles indiquent l'hétérogénéité du milieu d'étude. Elles varient de $1,54 \cdot 10^{-8}$ à $1,87 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ avec une moyenne de $1,35 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$.

L'analyse statistique de la transmissivité et le débit spécifique a montré que ces deux paramètres s'ajustent à la loi log-normale. Ce résultat serait lié à l'hétérogénéité des aquifères en milieu fissuré. Cette étude a montré également, l'existence d'une relation empirique de forme puissance entre la transmissivité et le débit spécifique ($T = 1,10 Q_{sp}^{1,266}$, $R^2 = 0,8$). Elle permet d'estimer les valeurs de transmissivité dans les endroits où elles font défaut dans le même contexte géologique. L'intérêt de cette relation réside dans la possibilité de disposer de paramètres hydrogéologiques faibles clés de la modélisation hydrogéologique.

L'étude probabiliste du débit, du débit spécifique et de l'épaisseur d'altération a permis de trouver des seuils critiques de 30 m et de 13 m respectivement pour les fonctions Q (Ea) et Qs (Ea). Au-delà de ces seuils, le débit tend à se stabiliser et parallèlement, on assiste à une décroissance exponentielle du débit spécifique quand l'épaisseur des altérites augmente. De même, au-delà d'une profondeur de 70 m, on constate une chute au niveau des débits des forages.

L'analyse en composantes principales des données de forages a permis de montrer que le débit du forage (la productivité) n'est pas uniquement influencé par les paramètres hydrogéologiques des forages. Certains facteurs externes qu'il n'est pas facile de quantifier rentrent en jeu lorsqu'il s'agit de rechercher de gros débits. On note la tectonique et la géomorphologie du terrain, la stratégie d'implantation des forages, le mode d'équipement et les

moyens économiques mis en jeu lors d'une campagne de foration. Tous ces facteurs agissent sur la productivité du forage. De ce fait, pour atteindre un grand taux de réussite lors des campagnes d'hydraulique villageoise, il serait souhaitable d'en tenir compte.

L'étude de la fracturation de la zone d'étude au moyen de l'imagerie satellitaire a permis de cartographier 3065 linéaments sur l'image satellite. L'analyse statistique de ces linéaments a montré que la direction préférentielle d'orientation des linéaments est N-S. Quant aux directions secondaires, elles sont représentées par les classes N90-100, N20-30, N40-50, N60-70, N85, N140 et N150-160.

HYDROCHIMIE ET QUALITE DES EAUX

L'analyse hydrochimique et de potabilité des eaux souterraines de la zone d'étude a permis de faire au niveau des paramètres physiques mesurés *in situ*, les observations suivantes :

- la température moyenne des eaux des forages est de 27,21°C et celle des puits est de 27,81°C. Ces valeurs avoisinent celle de la température ambiante ;
- les eaux ont un pH moyen de 6,6 et de 5,86 respectivement pour les forages et les puits.
- la conductivité moyenne est de 331 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec des valeurs extrêmes comprises entre 11,2 et 1097 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les forages. Tandis que les puits présentent une valeur moyenne de 382 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et un maximum de 1285 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dans l'ensemble, les eaux sont moyennement minéralisées.
- les cations sont généralement peu abondants avec Ca^{2+} majoritaire. Les anions sont importants en quantité. Le HCO_3^- représente 84 % des anions et plus de la moitié de la charge saline des eaux. Les eaux sont de types $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ ou $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$;
- la minéralisation des eaux est contrôlée par plusieurs facteurs que sont : la décomposition de la matière organique, l'altération et la dissolution des silicates par hydrolyse, l'oxydoréduction, et enfin les apports superficiels liés aux activités anthropogéniques. Mais le phénomène principal est l'hydrolyse des silicates. La minéralisation naturelle des eaux souterraines de la zone d'étude est acquise par hydrolyse des silicates après l'infiltration des eaux enrichies en CO_2 du sol dans la zone non saturée ;
- globalement les eaux souterraines sont aptes à la consommation humaine. Cependant

certaines ouvrages présentent des teneurs en nitrates supérieures à la norme OMS (50 mg/L), c'est le cas des puits d'Akpéssékro et de Subiabkro (105,6 mg/L et 149,40 mg/L). Cette pollution chimique est d'origine anthropique. De même des concentrations en fer supérieures à la norme OMS (0,3 mg/L) ont été également observées dans certains points d'eau. Ces teneurs sont dues à une minéralisation naturelle des eaux d'origine géologique. Tout ceci pourrait provoquer chez les consommateurs des désagréments d'ordre sanitaire et esthétique. Cette situation pourrait entraîner à la longue un abandon de ces ouvrages au profit d'autres sources d'approvisionnement en eau dont la qualité peut être douteuse avec pour corollaire une augmentation des maladies hydriques.

L'étude de l'âge relatif des eaux avec les variables du système calco-carbonique a montré que les eaux sont globalement sous-saturées par rapport aux carbonates secondaires que sont l'aragonite, la calcite et la dolomite et aussi, par rapport aux minéraux évaporites (gypse et l'anhydrite). Elles sont récentes dans l'aquifère et évoluent dans un système ouvert au CO₂ de l'atmosphère du sol. Par ailleurs, ce sont des eaux qui sont constamment renouvelées et qui circulent dans des aquifères présentant une bonne perméabilité.

La sursaturation des eaux en goéthite, hématite et en l'hydroxyde ferreux est à l'origine des concentrations élevées en fer et en manganèse. Ces minéraux proviennent de la précipitation en milieu anaérobie (riche en CO₂).

PERSPECTIVES

Cette étude doit être poursuivie dans la perspective d'une amélioration de la carte hydrochimique en augmentant le nombre de points de prélèvement et aussi le pas d'échantillonnage. Des analyses du fluor, et de certains métaux lourds (Arsenic, Cuivre, Zinc, etc...) s'avèrent nécessaire à cause de la proximité de la mine d'Angovia avec la zone d'étude. La zone étant à vocation agricole, une étude des résidus des éléments composants les pesticides et les herbicides dans les eaux souterraines et dans les eaux de surface devra être faite. Une étude géochimique des eaux et des roches devra être réalisée afin de comprendre l'origine de certains ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- ; etc...) dans la minéralisation des eaux.

Une étude du mode recharge et l'âge des eaux souterraines doit être faite afin de compléter l'étude hydrochimique. Par conséquent, l'utilisation des isotopes de l'environnement (^{18}O , ^{14}C , ^{15}N , ^{34}S , ^{37}Cl) et aussi la méthode des chlorures seront d'une grande utilité. L'apport de modèle hydrodynamique pour la simulation des écoulements souterrains en milieu fissuré permettra de comprendre la réaction des nappes aux différentes sollicitations et d'estimer les ressources en eau de la région.

Dans cette perspective, une étude géostatistique des paramètres hydrodynamiques d'entrée dans le modèle doit être faite en vue d'analyser leur variabilité spatiale et leur régionalisation. Les problèmes d'érosion sont d'actualité et la zone d'étude regroupe à elle 96% du volume d'eau stocké, c'est pourquoi, une étude de l'impact du mode d'occupation du sol sur les phénomènes d'érosion hydrique dans la zone permettra une meilleure gestion des eaux et des terres.

Une étude de l'impact de la décharge de Yamoussoukro sur les eaux souterraines, les eaux de surface et les populations riveraines pourra aussi permettre d'acquérir une base de données. En effet, le déplacement effectif de la capitale à Yamoussoukro va sans aucun doute créer des problèmes d'assainissement et de gestion des ordures ménagères.

Toutes les informations collectées à l'issu de ces opérations seront intégrées dans un SIG et permettront de mettre en place une politique de gestion intégrée des ressources en eau dans la région. Ce SIG va servir d'outil d'aide à la décision en vue d'orienter certaines directives dans la politique de l'exploitation et la gestion de ces ressources dans la perspective d'un développement durable qui répond aux préoccupations des populations de la région.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADIAFFI B. (2008). Apport de la géochimie isotopique, de l'hydrochimie et de la télédétection à la connaissance des aquifères de la zone de contact "socle-bassin sédimentaire" du Sud-Est de la Côte d'Ivoire. Thèse Unique en Sciences, Université Paris Sud (XI), Orsay, France, 230p.

ACHEAMPONG S.Y., HESS J.W. (1998). Hydrogeological and hydrochemical framework of the shallow groundwater system in the southern Voltaian Sedimentary Basin, Ghana. *Hydrogeol. J.* 6, pp.527-537.

AHOUSSE K.E. (2008). Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le Sud de la Côte d'Ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région d'Abidjan-Agboville. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 270p

AHOUSSE K.E., SORO N., SORO G., LASM T., OGA M.S., ZADE S.P. (2008). Groundwater pollution in Africans biggest towns: case of the town of Abidjan (Côte d'Ivoire). *E. J. S. R.*, vol. 20, n° 2, pp. 302-316.

AKITI T. F. (1980). Etude géochimique et isotopique de quelques aquifères du Ghana : Gneiss de la plaine d'Accra, calcaire de la plaine au Sud-Est de la Volta, granites de la haute Région. Thèse Doct. Ing. Univ. Paris-Sud, France, 232 p.

ALAGBE S.A. (2006). Preliminary evaluation of hydrochemistry of the Kalambaina Formation, Sokoto Basin, Nigeria. *Environ. Geol.* 51, pp.39-45.

ANONYME (1983). Iron deficiency and mental development. *Nutr. Rev.* 41, 235p.

ANONYME (1996). Programme Sectoriel d'Aménagement Rural PSAR 1996 : Inventaire et diagnostic des barrages, DCGTX, p.95.

ANONYME (1997). Plan d'urbanisme directeur de Yamoussoukro, Rapport de synthèse. Ministère du logement, du cadre de vie et de l'environnement. District autonome de Yamoussoukro ; Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement. 90p.

ANONYME. (2001). Hydraulique humaine en Côte d'Ivoire D.H.H., M.I.E., République de Côte d'Ivoire 66 p.

ANONYME (2003a). Gestion Intégrée des Ressources en Eau en Côte d'Ivoire (GIRE-CI) : Bilan et Perspectives. Ministère des eaux et forêts, République de Côte d'Ivoire. Octobre 2003.

ANONYME (2003b). Message de Kofi Annan, le 6 octobre 2003 à l'occasion de la journée de l'Habitat.

ANONYME (2009). Pénurie d'eau à Tiébissou. Fraternité Matin n° 13293 du 3 mars 2009.

APPELO, C.A.J., POSTMA, D. (1999). Chemical analysis of groundwater. *Geochemistry, Groundwater and pollution*. Fourth corrected print. AA Balkema, Rotterdam. B. et al. (Eds.), *Ecological Studies*, vol. 47, Springer, pp. 94-114.

ARCHAMBAULT J. (1960). Les eaux souterraines de l'Afrique Occidentale. Berger-Levrault, Nancy, 137 p.

ARDOIN S. (2004). Variabilité hydroclimatique et son impact sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II, France, 330p.

ARDOIN S., LUBES N.H., SERVAT E., DEZETTER A., BOYER J.F., (2003). Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest : caractérisation de la situation de la décennie 1990. IAHS Publ. n° 278, pp. 223-228.

ARNOULD D. (1961). Etude géologique des migmatites et des granites précambriens du Nord-Est de la Côte d'Ivoire et de la Haute Volta méridionale. Dir. Géol. Prosp. Min. Abidjan n° 1, 175 p.

ASSANI A. (1999). Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation océanique (El Niño/La Niña). Sécheresse n° 4, vol. 10, pp. 245-252.

AVENARD J.M., ELDIN M., GIRARD G., SIRCOULON J., TOUCHEBEUF P., GUILLAUMET J. L., ADJANOHOUN E., PERRAUD A. (1971). Le milieu naturel de Côte d'Ivoire, ORSTOM – mémoire n° 50 – Paris, 391 p.

AYEBO A., KROSS B. VLAD M., SINCA A. (1997). Infant methemoglobinemia in the Transylvania region of Romania. Int. J. Occp. Environ Health 3(1), pp.20-29.

BECEOM (1997). Schéma Directeur d'assainissement de Yamoussoukro, p.100.

BELL A.V. (1975). Base metal mine waste management in Canada. Dans: Minerals and the environment. Institute of Mining and Metallurgy, Londres, R. -U. (1975).

BESSELES B. (1977). Géologie de l'Afrique: le craton Ouest africain. Mémoires du BRGM n°88, 402 p.

BERGER J., CAMERLO J., FAHY J.C. ET HAUBERT M. (1908-1981). Etude des ressources en eau souterraines dans une région de socle cristallin : la « Boucle du Cacao » en Côte d'Ivoire. Bull. BRGM, série 2, section III, n°4, pp. 335-338.

BLAVOUX, B., MUDRY, J. AND PUIG, J.-M., (1992). Bilan, fonctionnement et protection du système karstique de la Fontaine de Vaucluse (sud-est de la France). Geodinamica Acta (Paris), 5(3), pp. 153-172.

BIEMI J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale hydrodynamique, hydrochimique et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aire granitique de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat ès Sc. Nat., Université de Cocody, Côte d'Ivoire 479 p.

BIEMI J., DOUMOUYA I., TAPSOBA-SY A. ET SORO N. (1995). Evolution du système calco-carbonique et indice cationique de vieillissement des eaux souterraines en Côte d'Ivoire. Africa Geoscience Review, vol. 2, N° 1, pp. 61-76.

BIGOT S., BROU Y. T., OSZWAID J., DIEDHIOU A. (2005). Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. Sécheresse, vol. 16, n° 1, pp.5-13.

BISCALDI R. (1967). Etude statistique des forages et carte hydrogéologique des régions à substratum éruptif et métamorphique en Afrique Occidentale. BRGM-CIEH, 2 vol., Ouagadougou.

BORN S.M., YANGGEN D.A., ZAPOROZEC A. (1987). A guide to groundwater quality planning and management for local Governments. Wisconsin Geological and, natural history Survey, Madison, Special Report. 9, 91p.

BOUANAMI A. (2006). Hydrologie, transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie). Thèse Doctorat d'état, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Algérie, 250p.

BRGM et AQUATER (1986). La recharge naturelle des aquifères de socle sous climats Sahélien et Soudanien. Etude expérimentale au Burkina Faso. Rapport BRGM 86. BFA 177 EAU.

BRICQUET J.P., BAMBA G., MAHE G., TOURE M. ET OLIVRY J.C. (1997). Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique. Rev. Sci. Eau (3), pp. 321-337.

BROU Y. T. (2005). Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire de synthèse des activités scientifiques présenté en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Techniques de Lille, France, 212p.

BROU YAO T., SERVAT E., PATUREL J.-E. (1998). Activités humaines et variabilités climatiques : Cas du Sud forestier ivoirien. Water Resources Variability in Africa during the XXth Century. IASH Publ. N° 252, 1998.

CAILLET F. ET PAGES J.P. (1976). Introduction à l'analyse des données. SMASH, Paris, 616 p.

CAMIL J. (1984). Pétrographie, chronologie des ensembles granitiques archéens et formations associées de la région de Man (Côte d'Ivoire). Implication pour l'histoire géologique du craton Ouest-Africain. Thèse de Doct. ès Sc. Nat. Univ. Abidjan, Côte d'Ivoire 306 p.

CLARK, I. AND FRITZ, P. (1997). Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publishers, 328 p.

CASANOVA R. (1973). Géochimie et minéralogie des granitoïdes éburnéens de Côte d'Ivoire. Thèse Université de Nice, France, 327p.

CECCHI P., GOURDIN F., KONE S., CORBIN D., JACKIE E., CASENAVE A. (2009). Les petits barrages du nord de la Côte d'Ivoire : inventaire et potentialités hydrologiques. Sécheresse, 20 (1), pp.112-22.

CEFIGRE (1990). L'Hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest. Synthèse des connaissances sur l'hydrogéologie du socle cristallin et cristallophyllien et du sédimentaire ancien de l'Afrique de l'Ouest. Coll. Maîtrise de l'eau 2^e Ed. 147 p.

CEMAGREF (1981). Analyse de la pluviométrie par la méthode des composantes principales, 58 p.

CHARTRAND J, LEVALLOIS P., GAUVIN D., GINGRAS S., ROUFFIGNAT J., GAGNON M-F. (1999). « La contamination de l'eau souterraine par les nitrates à l'île d'Orléans ». Vecteur Environnement. Vol. 23, n° 1, 3, pp. 37-46.

CIEH (1978). Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Edition Géohydraulique, vol. 1, 190p.

CHAKAR S. (2006). Cartographie décisionnelle multicritère. Formalisation et implémentation informatique. Thèse de Doctorat Univ. Paris Dauphine, France, 300p.

COHEN J.M., LAMPHAKE L.J., HARRIS E.K. ET WOODWARD R.L. (1960). Taste threshold concentrations of metals in drinking water. J.Am. Water Works Assoc., 52: 660p.

COLLECTIF (1991). Evaluation hydrologique de l'Afrique subsaharienne pays de l'Afrique de l'Ouest. Banque Mondiale-PNUD-BAD, juin 1991.

COULIBALY S. (2003). L'imagerie spatiale haute résolution pour l'étude de la dynamique de l'occupation du sol dans le Nord-Est de la Côte d'Ivoire : Bouna. DEA, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 60p.

COULIBALY Y., BOIRON M.C., CATHELINEAU M., KOUAMELAN A.N. (2008). Fluid immiscibility and gold deposition in the Birimian quartz veins of the Angovia deposit (Yaouré, Ivory Coast). Journal of African Earth Sciences (50), pp. 234-254.

CYR I. (1999). Exploitation des données RSO de RADARSAT pour la cartographie de la vulnérabilité de la nappe souterraine. Mémoire de Maîtrise, Université de Laval, 143 p.

DAGNELIE P. (1981). Analyse statistique à plusieurs variables. Les presses agronomiques de Gembloux. 362 p.

DAOUD D. (1995). Caractérisation géochimique et isotopique des eaux souterraines et estimation du taux d'évaporation, dans le bassin du Chott Chergui (Zone sémi-aride), Algérie. Thèse de doctorat, Université Paris sud, Orsay N° 3826, France, 256p.

DEBIECHE T-H. (2002). Evolution de la qualité des eaux (salinité, azotée et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Thèse de doctorat de l'université de Franche-Comte n°. 900, France, 199p.

DE MARSILY G. (1994). Hydrogéologie : Comprendre et estimer les écoulements souterrains et le transport des polluants. Ecole des mines de Paris, 242 p.

DETAY M. (1987). Méthodologie d'implantation des ouvrages, type hydraulique villageoise par étude de terrain et photo-interprétation. Session Internationale de Formation « Evaluation, aménagement et gestion des ressources en eau », Résumé de cours Doc CEFIGRE, 20 p.

DETAY M. (1993). Le forage d'eau : Réalisation, entretien, réhabilitation. Edition Masson, 371 p.

DETAY M., POYET P., EMSELLEM Y., BERNADI A. ET AUBRAC G. (1989). Influence du développement du réservoir capacitif d'altérites et de son état de saturation sur les caractéristiques hydrodynamiques des forages en zones de socle cristallin. C. R. Acad. Sci. Série II, pp. 429-436.

DEWANDEL B., LACHASSAGNE, P.; WYNS R., MARÉCHAL, J.-C.; AND KRISHNAMURTHY (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. J. Hydrol., 330, 260-284.

DIBI B., INZA D., GOULA B. T. A., SAVANÉ I., BIÉMI J. (2004). Analyse statistique des paramètres influençant la productivité des forages d'eau en milieu cristallin et cristallophyllien dans la région d'Aboisso (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). Sud Sciences & Technologies N° 13, (Dec. 2004), n°13, pp 25-27.

DILLMAN E., GALE C., GREEN W.E., JOHNSON D.G., MACKLER B. ET FINCH C. (1980). Hypothermia in iron deficiency due to altered tricodothyronine metabolism. Am. J. Physio. 239 (R) 377p.

DIRECTION DEPARTEMENTALE DE LA SANTE, (2005). Service statistique, DDS Yamoussoukro, base de données.

DJEUDA TCHAPNGA H.B. (1987). Géologie et hydrogéologie d'un secteur de la zone mobile d'Afrique centrale : région de Poli, Nord-Cameroun. Thèse de Doctorat Univ. Scient. Technol. et Médicale de Grenoble, France 307p.

DJRO S.C. (1998). Evolution tectono-métamorphique des gneiss granulitiques archéens du secteur de Biankouma. Thèse d'Etat, Univ. Abidjan, Côte d'Ivoire, 171 p.

DORE M. (1989). Chimie des oxydants et traitement des eaux. Ed. Techniques et documentations, 505 p.

EL MORJANI Z. (2002). Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale ; application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, Maroc). Thèse de doctorat, Université de Genève, Suisse, 300 p.

ENGALENC, M. (1978). Méthodes d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Comité interafricain d'études hydrauliques, série hydrogéologie, vol.1, 318 p. ; vol. 2, 193 p.

FABIO P., NJIFONJOU O., ASSIENAN J., KODJO A., NDIA Y., SALVATI N., SEGHERI C., (2002). Profil de pauvreté des communautés riveraines du Lac de Kossou en Côte d'Ivoire. Cotonou, Programme pour des moyens d'existence durable dans la pêche en Afrique de l'Ouest. DFID-FAO. PMEDP/RT/17 90p.

FAHY J.C. (1980-1981). Exploitation et entretien des points d'eau villageois en Côte d'Ivoire. Bull. du BRGM (2), III, n°4, pp. 339-341.

- FAILLAT J.P. (1990).** Origine des nitrates dans les nappes de fissures de la zone tropicale humide. Exemple de la Côte d'Ivoire. *Journal of Hydrol.*, 113 (1990), pp. 231-264.
- FAILLAT J.P. (1987).** Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest). *Hydrogéologie*, n° 2, pp.109-112, 1fg.
- FAILLAT J. P. (1986a).** Hétérogénéité et effet d'échelle dans les aquifères fissurés. Approche par pompage d'essai sur station expérimentale (Afrique de l'Ouest). *Hydrogéologie*, n. ° 1, pp. 65-76.
- FAILLAT J.P. (1986 b).** Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest). Thèse Univ. Languedoc Montpellier, France, 534 p.
- FAILLAT J. P. ET BLAVOUX B. (1989).** Caractères hydrochimiques des nappes des roches endogènes fissurées en zone tropicale humide : l'exemple de la Côte d'Ivoire. *J. Afri. Earth. Sc.*, vol. 9, n°1, p 31- 40.
- FAILLAT J.P. ET DROGUE C. (1993).** Différenciation hydrochimique de nappes superposées d'altérites et de fissures en socle granitique. *Journal des Sciences hydrologiques*, 38, 3, 6. pp. 215-229.
- FAILLAT J.P., LEBLOND P. (1982).** Premiers résultats des essais menés sur une station de pompage en Côte d'Ivoire. BRGM-Colloque : Les milieux discontinus en hydrogéologie.
- FAILLAT J. P. AND RAMBAUD A. (1991).** Deforestation and leaching of nitrogen as nitrates into underground water in intertropical zones: The example of Côte d'Ivoire. *Env. Geology* vol.17, N°2, pp. 63-166.
- FAILLAT J.P. ET RAMBAUD A. (1988).** La teneur en nitrates des nappes de fissures de la zone tropicale humide en relation avec les problèmes de déforestation. *C.R.Acad. Sci. Paris*, tome. 306, série II, p. 1115-1120.
- FAN A.M., WILLHITE C.C, BOOK S.A. (1987).** Evaluation of the nitrate drinking water standard with reference to infant methemoglobinemia and potential reproductive toxicology. *Regul. Toxicol Pharmacol.* 7(2): pp.13 5-148.
- FREEZE A.R., CHERRY J.A.Q. (1979).** *Ground-water*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
- FEWTRELL L. (2004).** Drinking-Water Nitrate, Methemoglobinemia, and Global burden of Disease: a discussion. *Environmental Health Perspectives*. Vol.112, N°. 14, pp.1 371-1374.
- GARRY B. (2007).** Étude des processus d'écoulements de la zone non saturée pour la modélisation des aquifères karstiques : Expérimentation hydrodynamique et hydrochimique sur les sites du Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB) de Rustrel et de Fontaine de Vaucluse. Thèse de Doctorat de l'université d'Avignon et des pays de Vaucluse. France, 206 p.

GASSITA S., GAGEONNET M., SOLAGES S. (1987). Synthèse des résultats du premier programme d'hydraulique rurale exécutée en République du Gabon. Hydrogéologie, n°2, pp. 113-126.

GEOMINES (1982a). Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise. Carte de Gagnoa, Cahier n° 24, République de Côte d'Ivoire, Ministère des Travaux publics et des transports, Direction centrale de l'hydraulique, 30p.

GEOMINES (1982b). Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise. Carte de Dimbokro, Cahier n° 25, République de Côte d'Ivoire, Ministère des Travaux publics et des transports, Direction centrale de l'hydraulique, 20p.

GERIGNE A. (1998). Variabilité temporelle et spatiale, et typologie des pluies dans la région de la ville de Palmira (Colombie). DEA, Université de Pierre et Marie Curie, France, 43p.

GONE D. L. (2001). Contribution des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines à l'étude du fonctionnement des systèmes hydrauliques en milieu fissuré de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle, Univ. Abobo-Adjamé. Côte d'Ivoire, 182 p.

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 électronique, vol., 7 ; N°1. pp. 1-12.

GRIMALDI, C. 2004. Hydrochimie de petits bassins versants. Apports à la connaissance du fonctionnement géochimique du sol et de la qualité de l'eau des cours d'eau. Habilitation à diriger des recherches. Université Rennes 1. Agrocampus-INRA UMR Sol Agronomie Spatialisation Rennes. France, 80 p.

GUERIN-VILLAUBREUIL G. (1962). Hydrogéologie en Côte d'Ivoire. Mémoires du BRGM, n° 20, 43 p.

GUIRAUD R. (1976). Sur la présence de nappes de fissures dans le socle précambrien de l'Afrique intertropicale. 4^{ème} R.A.S.T., p.217.

GUIRAUD R. ET LENCK P. (1975). Sur l'intérêt hydrogéologique majeur des zones de failles dans le socle métamorphique et éruptif de l'Afrique Occidentale. 6^e Réunion. Cons. CIEH, Journées techniques, Ouagadougou, F.III, pp. 1-7.

HAMM S-Y., CHEONG J-Y., JANG S., JUNG C-Y., KIM B-S. (2005). Relationship between transmissivity and specific capacity in the volcanic aquifers of Jeju Island, Korea. Journal of Hydrology, 310, pp.111-121.

HAUBERT M. (1977). Prospection et exploitation des eaux souterraines dans une région de socle : la boucle de cacao (Côte d'Ivoire). Géohydraulique. S.A.H. Abidjan, Note interne, 14p.

HRKAL Z. (1992). Les nitrates dans les eaux souterraines de la Bohême du Nord. Hydrogéologie, n° 3, pp. 137-143.

HUBERT P. ET CARBONEL J.P. (1987). Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, n°95, pp.165-183.

HUBERT P., BENDJOUDI H. (1996). Introduction à l'étude des longues séries pluviométriques. X I^{èmes} Journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, France, 10-11 oct.1996.

HUBERT P., CARBONEL J.P. ET CHAOUCHE A. (1989). Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology* : (110) : pp. 349-367.

HUBERT P., SERVAT E., PATUREL J.E., KOUAME B., BENDJOUDI H., CARBONEL J.P. ET LUBES-NIEL H. (1998). La procédure de segmentation, dix ans après. *IAHS* : (252) : pp. 267-273.

HUSSEIN M. T. (2004). Hydrochemical evaluation of groundwater in the Blue Nile Basin, eastern Sudan, using conventional and multivariate techniques. *Hydrogeology Journal*, Vol. 12, pp. 144-158.

INS (2001). Recensement général de la population et de l'Habitat (RGPH) 1998. Données socio-démographiques et économiques : Région des Lacs.

JACOB C.E. (1947). Draw-down test to determine effective radius of artesian well. *Trans. Amer. Soc. Of Civil Engineers*, 112 (2321), pp. 1047-1070.

JALLUDIN M. (1993) : Propriétés géométriques et hydrodynamiques des aquifères en milieux volcaniques fissurés sous climat aride. République de Djibouti. Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, France, n° 657, 195p.

JALLUDIN M. ET RAZACK M. (2004): Assessment of hydraulic properties of sedimentary and volcanic aquifer systems under arid conditions in the Republic of Djibouti (Horn of Africa). *Hydrogeology Journal*, 12: pp.159-170.

JAMES S.C. (1977). Metals in municipal landfill leachate and their health effects. *Am. J. Public Health*, 67: p. 429.

JOURDA J. P. (2005). Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 430p.

JOURDA J.P., SALEY M.B., DJAGOUA E.V., KOUAME K.J., BIEMI J., RAZACK M. (2006). Utilisation des images ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le fissuré précambrien de la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : Approche par analyse multicritère et test de validation. *Télédétection*, Vol. 5, N° 4, pp.339-357.

KORTATSI B.K. (2006). Hydrochemical characterization of groundwater in the Accra plains of Ghana. *Environ. Geol.* 50, pp. 299-311.

KORTATSI B.K. (2007). Hydrochemical framework of groundwater in the Ankobra Basin, Ghana. *Aquat. Geochem.* 13, pp. 41-74.

KORTATSI B.K., TAY C. K; ANORNU G., HAYFORD E., DARTEY G. A. (2008). Hydrogeochemical evaluation of groundwater in the lower Offin basin, Ghana. *Environ. Geol.* Vol 53, N° 8, pp 1651-1662.

KOUADIO K. E. (2005). Stratégie de prospection des nappes de fissures par analyse spatiale du potentiel de productivité et optimisation de la profondeur des forages. Cas du Denguelé (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 181p.

KOUAME K. F. (1999). Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des données des images satellitaires. Thèse de 3^{ème} cycle, Univ. Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire ,194 p.

KOUAMELAN A. N. (1996). Géochronologie et géochimie des formations Archéennes et Protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition Archéenne-protérozoïque. Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes 1, France, 277p.

KOUASSI A. M. (2007). Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire ,210 p.

KOUASSI A.M., KOUAME K.F., SALEY B. M., KOFFI Y.B. (2007). Identification of tendencies with in the rainfall-runoff relation and refill of the tablecloths in a context of hydroclimatic variability in the catchment area of N'zi (Bandama) in Ivory Coast. *E.J.S.R.*, vol. 16, n° 3, pp. 412-425.

KOUASSI K. A. N. (2004). Apport de la géophysique à l'étude du mécanisme de fonctionnement des nappes fissurées de la région de Daoukro-Bocanda-Dimbokro (Centre Est de la Côte d'Ivoire). DEA, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 64 p.

KRUSEMAN G.P. ET DE RIDER N.A. (1974). Interprétation et discussion des pompages d'essai. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen, the Netherland, 214p.

KRUSEMAN G. P. ET DE RIDER N. A. (1991). Analysis and evaluation of pumping test data. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen, The Netherland. 2nd ed. (Completely revised), 337p.

LALLAHEM S. (2002). Structure et modélisation hydrodynamique des eaux souterraines : Application a l'aquifère crayeux de la bordure nord du bassin de Paris. Thèse de Doctorat de l'Univ. des Sciences et Technologies de Lille, France, 190 p. n° d'ordre: 3168.

LAMB, P. J. (1982). Persistence of Subsaharan drought. *Nature* 299, September : 46-47.

LASM T. (2000). Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle: Analyses statistiques et géostatistiques de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des

montagnes de Côte d'Ivoire (domaine Archéen). Thèse de Doctorat de l'université de Poitiers, France, 272 p.

LEBLOND P. (1984). Contribution aux études hydrogéologiques en Côte d'Ivoire. Région de Yamoussoukro (Station expérimentale de l'ENSTP). Thèse de 3^e cycle de l'Université de Bordeaux 1, France, n° d'ordre 2015, 150 p.

LUBÈS-NIEL H., MASSON J. M., SERVAT E., PATUREL J. E., KOUAMÉ B., BOYER J. F. (1994). Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques - Etude bibliographique. ORSTOM, FRIEND AOC, Programme ICCARE, N° 3, 21p.

MAHE G., OLIVRY J.C., DESOUASSI R., ORANGE D., BAMBA F., ET SERVAT E., (2000). Relation eaux de surface-eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali, C.R. Acad. Sci., Sciences de la Terre et des planètes, 330, pp.689-692.

MAHE G., DESSOUASSI R., BANDIA C., OLIVRY J. C. (1998). Comparaison des fluctuations interannuelles de piézométrie, précipitation et débit sur le bassin versant du Bani à Douna au Mali. IAHS Publication, n° 252, pp.289-295.

MAHE G., OLIVRY J.C., (1995). Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et centrale de 1951 à 1989, Sécheresse, n° 6, vol. 1, pp.109-117.

MAHE G., PATUREL J. E., SERVAT E., CONWAY D., DEZETTER A. (2005). Impact of land use change on soil water holding capacity and river modeling of the Nakambe River in Burkina. J. Hydrol., 300, pp. 33-43.

MAMA V. J. ; OLOUKOI J. (2003). Evaluation de la précision des traitements analogiques des images satellitaires dans l'étude de la dynamique de l'occupation du sol. Télédétection, vol. 3, n°5, pp. 429-441.

MASSUEL S. (2001). Modélisation hydrodynamique de la nappe phréatique quaternaire du bassin du lac Tchad. DEA Université de Montpellier II, Université d'Avignon et des pays du Vaucluse, France, 85 p.

MATHIEU P. (1976). Influence des apports atmosphériques et du pluviolessivage forestier sur la qualité des eaux des bassins versants en Côte d'Ivoire. Cah. ORSTOM, sér. Géol., Vol. VII, n°1, pp. 11-32.

MARTELAT A., FOUCHER J.C., LACHASSAGNE P., PAUWELS H. (1997). Processus de dénitrification au sein d'un aquifère de socle (Schistes à pyrites) : caractérisation du fonctionnement hydrogéochimique à l'échelle locale, dans le cadre d'un petit bassin versant breton. Hard Rock Hydrochemistry (Proceedings of Rabat Symposium S2, may 1997). IAIHS Publ. n°. 241.

MBONU M. (1991). Hydrogéologie, hydrochimie et Géochimie isotopique des aquifères de socle du Plateau de Jos et des plaines environnantes (Nigeria). Thèse de Doct. Univ. D'Avignon et des Pays de Vaucluse. France, 171p.

- MEIER PM., CARRERA J., SANCHEZ-VILLA X. (1999).** A numerical study on the relationship between transmissivity and specific capacity in heterogeneous aquifers. *Ground Water* 37, pp. 611-617.
- N'DA D. H. (2007).** Etude et suivi par télédétection et système d'information géographique d'une aire protégée soumise aux pressions anthropiques : cas du parc national de la Marahoué. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 139p.
- N'GO Y. A., GONE D. L., SAVANE I. ET GOBLE M. M. (2005).** Potentialités en eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'Agboville (Sud Ouest de la Côte d'Ivoire) : Caractérisation hydroclimatique et physique. *Afrique SCIENCE* 01(1), pp. 127-144.
- N'GUESSAN A. (1985).** Contribution à l'hydrogéologie de la région Centrale de la Côte d'Ivoire et analyse statistique des résultats de forage. Thèse de 3^e cycle. Université de Franche-Comté, Besançon, France, 154 p. N° d'ordre 485.
- N'GUESSAN K. E. (1990).** Etude de l'évolution de la végétation du « V Baoulé » (contact forêt/savane en Côte d'Ivoire) par télédétection. *Télédétection sécheresse*. Ed. AUPELF-UREF, p. 181-196.
- NICHOLSON S. E. (1993):** An overview of Africa rainfall fluctuations of the last decade. *J. Climatol.* ; 6, pp.1463-1466.
- NJITCHOUA R. (1991).** Hydrochimie et géochimie isotopique des eaux souterraines de la nappe des grès de Garoua (Nord Cameroun). Thèse de Doctorat de l'Université de Paris Orsay, France, N° 1618, 120p
- OGA M. S. (1998).** Ressources en eaux souterraines dans la région du Grand Abidjan (Côte d'Ivoire): Approche Hydrochimique et Isotopique. Thèse de Doctorat de l'Université de Paris Orsay, France, 240p.
- OLIVER B. G., COSGROVE E.G. (1975).** Metal concentrations in the sewage, effluents and sludge's of some southern Ontario wastewater treatment plants. *Environ. Lett.*, 9 :75p.
- OLIVRY J.C., BRICQUET J.P., MAHE G. (1998).** Variabilité de la puissance des crues des grands cours d'eau d'Afrique intertropicale et incidence de la baisse des écoulements de base au cours des deux dernières décennies. *IAHS Publication*, n°252, pp.189-197.
- 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, 10-11 octobre, 1996.
- OMS (1992).** Directives de la qualité de l'eau de boisson. Vol 1, 192 p.
- ONUGBA A. (1990).** Contribution à la connaissance des systèmes aquifères de la haute Bénoué (Nigeria). Etude hydrochimique et isotopique de zones témoins du socle et du sédimentaire. Vulnérabilité des forages à la pollution. Thèse de Doct. de l'Univ. d'Avignon et des pays de Vaucluse, France, 230 p.

LOUDIN, L. (2004). Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris) / Cemagref (Antony), France, 495 p.

OUATTARA, T., DUBOIS, J-M, M, 1 et GWYN, Q, H, J, (2006), Méthode de cartographie de l'occupation des terres en milieu aride à l'aide de données multisources et de l'indice de végétation tsavi, Télédétection, vol, 6, n° 4, pp. 291-304

PARADIS D., BERNIER P.J., LEVALLOIS P. (1991). Qualité de l'eau souterraine dans la MRC de Portneuf. Opérations régionales. Ministère de l'Environnement du Québec, Département de Santé communautaire du centre hospitalier de l'Université Laval. Canada 13p.

PATUREL J. E., KOUKPONOU P., OUATTARA F., L'AOUR A., MAHE G., CRES F. N., (2002). Variabilité du climat du Burkina Faso au cours de la seconde moitié du XXème siècle. Sud Sciences & Technologies, N° 8, pp. 41-49.

PATUREL J.E., SERVAT E., LUBES H., DELATTRE M.O. (1998) : Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. Hyd. Sc. Jour., 43 (6), pp. 937-946.

PATUREL J.E., SERVAT E., KOUAME B., LUBES H., MASSON J.M., BOYER J.F., TRAVAGLIO M. ET MARIEU M. (1997B). Variabilité pluviométrique en Afrique tropicale humide le long du Golfe de Guinée : Approche régionale intégrée. PHI-V : (16), pp. 1-31.

PATUREL J.E., SERVAT E., LUBES-NIEL H. ET DELATTRE M-O. (1997A). Variabilité climatique et analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne. C.R. Acad. Sci., Paris, Sciences de la terre et des planètes/Earth & Planetary Sciences, (325), n°10, pp. 779-782.

PATUREL J.E., LUBES H., SERVAT E., DELATTRE M.O. (1996B). Etude de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne. XII^{èmes} journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, 10-11 oct.1996

PATUREL J.E., SERVAT E., KOUAME B., BOYER J.F., LUBES NIEL H., MASSON J.M. (1996A). Procédures d'identification de « ruptures » dans des séries chronologiques-modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non sahélienne. IAHS Publ. n° 238.

PENE C.B. ET ASSA D. A. (2003). Variations interannuelles de la pluviométrie et de l'alimentation hydrique de la canne à sucre en Côte d'Ivoire, Sécheresse, n° 14, vol.1, pp. 43-52.

PETTITT A. N. (1979). A non-parametric approach to the change –point problem. Appl. Statist. 28(2), pp.126-135.

POMEROL C. (1989). Eléments de géologie, Paris A Colin, 10^e édition 303p.

- PONTIUS Jr. R. G. (2000).** Quantification error versus location error in compararison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering and remote Sensing*, vol. 66, n° 8, pp. 1011-1016;
- POTHIN K. B. K. (1988).** Pétrographie et géochimie des formations précambriennes de la région d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Typologie du volcanisme birrimien. Tendances évolutives du magmatisme éburnéen. Géochimie des l'uranium et du thorium dans les granitoides. Thèse d'Etat Univ. d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 326 p.
- POTHIN K. B. K., GIOAN P. & GRONAYES C. C. 2000.** Bilan géochronologique du socle précambrien de Côte d'Ivoire. *Bioterre, Rev. Intern. Sci. de la Vie et de la Terre, Vol. I, n°1, 2000, Presses Universitaires de Côte d'Ivoire*, pp. 36- 47.
- RASMUSSEN P., TAHA B.M.J.OUARDA, BOBEE B. (1997).** Méthodologie de rationalisation des réseaux hydrométriques. Sustainability of water resources Increasing Uncertainty (Proceedings of the Rabat Symposium S1, April 1997), *IAHS Publ. N° 240*.
- RATEL M-O. (1992).** Elimination des nitrates des eaux potables. Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales. Direction de l'espace rural et de la forêt Document technique fndae hors série n°4 fonds national pour le développement des adductions d'eau. Office international de l'eau snide. 71 p.
- RAZACK M. ET LAM T. (2006).** Geostatistical estimation of the transmissivity in highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast). *Journal of Hydrology*, n°325, pp. 164-178.
- RAZACK, M., HUNTEL D. (1991).** Assessing transmissivity from specific capacity in a large and heterogeneous aquifer. *GroundWater*, 29(6), pp.856-861.
- ROQUES M. (1968).** La structure profonde de l'écorce terrestre et les problèmes géologiques de l'Ouest africain. VI^e Conf. Ass. Sc. Ouest Afr. Abidjan, Diff. Prov. Lab. Géol. Fac. Sc., 10 p.
- ROTZOLL K., EL-KADI A. (2008).** Estimating hydraulic conductivity from specific capacity for Hawaii aquifers, USA. *Hydrogeology Journal*, 16, pp. 969-979.
- SALEY M. B. (2003).** Systèmes d'information à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 209 p.
- SAVADOGO A. N. (1984).** Géologie et Hydrogéologie du socle cristallin de Haute –Volta. Etude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse de Doct. Ès Sc. Nat. Uni. Scientifique et médicale de Grenoble, France, 351 p.
- SAVANE I., COULIBALY K. M., GIOAN P. (2003).** Etude comparative de trois méthodes de calcul du coefficient de tarissement des cours d'eau. *Sécheresse*, vol. 14, n° 1, pp.37-42
- SAVANE I., COULIBALY K. M., GIOAN P. (2001).** Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man. *Sécheresse*, vol. 12, n°4, pp.231-237.

SAVANE I. (1997). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de Doct ès Sc. Nat, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 396 p.

SERVAT E., PATUREL J.-E., KOUAME B., TRAVAGLIO M., OUEDRAOGO M., BOYER J.F., LUBES-NIEL H., FRISTCH J.M., MASSON J.M., ET MARIEU B. (1998). Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. In Water Resources Variability in Africa during the XXth Century (ed. By E. Servat, D. Hughes, J. M. Fristch & M. Hulme) (Proc. Abidjan 98 Conference), IAHS Publ. N° 252, pp. 323-337.

SERVAT E., PATUREL J.-E., LUBES-NIEL H., KOUAME B., MASSON J.M., TRAVAGLIO M. ET 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) : pp.363-387.

SMITH S. R., WOODSA V. AND EVANSBT. D. (1998). Nitrate dynamics in biosolids-treated soils. II. Thermal-time models of the different nitrogen pools. Bioresource Technology, 66 (2), pp.151-160.

SORO N. (1987). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du Sud-Est de la Côte d'Ivoire. Thèse de 3^è cycle Univ. Scient. Technol. et Médicale de Grenoble, France, 243 p.

SORO N. (2002). Hydrochimie et géochimie isotopique des eaux souterraines du degré carré de Grand-Lahou et ses environs (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Implication hydrologique et hydrogéologique. Thèse de Doct ès Sc. Nat Univ. de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 272 p.

SORO N., LASM T., KOUADIO B.H., SORO G., AHOUSSE K. E. (2006). Variabilité du régime pluviométrique du Sud de la Côte d'Ivoire et son impact sur l'alimentation de la nappe d'Abidjan. Sud Sciences & Technologies, N° 14, pp. 30-40.

SORO N., SORO G., AHOUSSE K.E., SALEY M.B., LASM T., BIEMI J. (2007). Caractérisation spatio-temporelle des précipitations dans le « V » Baoulé (Centre de la Côte d'Ivoire) au cours de la période 1966-2000. Journal Africain de Communication Scientifique et Technologique, N° 2, pp. 89-108.

SPROULE B.J., MITCHELL J.H. ET MILLERW.F. (1960). Cardiopulmonary physiological response to heavy exercise in patients with anemia. J. Clin. Invest., 39: 378p.

SRIVASTAV S.K., LUBCZYNSKI M.W., BIYANI A.K. (2007). Upscaling of transmissivity, derived from specific capacity: a hydrogeomorphological approach applied to the Doon Valley aquifer system in India. Hydrogeology Journal, 15, pp.1251-1264.

STATSOFT FRANCE (2003). STATISTICA (logiciel d'analyse de données), version 6. www.statsoft.com.

STOURNARAS G. (1984). Evolution et comportement d'un système aquifère hétérogène. Géologie et hydrogéologie du delta du Nestos (Grèce) et de ses bordures. Thèse de Doctorat, Université de Scientifique et médicale de Grenoble, France, 275p.

SYLLA D. (2002). Dynamique de l'occupation du sol dans le Nord de la Côte d'Ivoire (1986-2000): l'exemple du département de Korhogo. DEA, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 67p.

TAGINI B. (1971). Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotechnique régionale. SODEMI Abidjan, 302 p.

TAPSOBA S. A. (1995). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région de Dabou (Sud de la Côte d'Ivoire) : hydrochimie, isotopie et indice cationique de vieillissement des eaux souterraines. Thèse de 3è cycle, Université nationale de Côte d'Ivoire, 200 p.

TARDI Y. (1969) : Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Mém., Serv. Carte géol. Als. Lorr. N°31, 199p. Strasbourg.

THEIS C. V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration on discharge of the well using ground-water storage. Tran. Am. Geophys. Union , 16, pp. 519-524.

TOURE S. (2007). Pétrologie et géochronologie du massif granitoïde de Bondoukou. Nord-Est de la Côte d'Ivoire. Évolution magmatique et contexte géodynamique au Protérozoïque inférieur. Relations avec le volcano-détritique du Zanzan, Koun-Fao, Tanda attribué au Tarkwaïen du Ghana. Implications paléogéographiques. Thèse de Doctorat ès Sc. Nat., Univ. d'Abobo Adjamé, Côte d'Ivoire, 224p.

THORNTHWAITE, C.W. (1948). An approach towards a rational classification of climate. Geographical Review, 38, pp. 55-94.

TRAORE A.Z. (1985). Géologie et hydrogéologie des plateaux mandingues (Mali). Région de Koula –Nossombougou. Thèse de 3è cycle, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, France, 218 p.

TRAVI Y., MUDRY J. (1997). Méthode pour l'évaluation et la gestion du risque nitrate dans les aquifères de socle de la zone sahélienne d'Afrique de l'Ouest. Hydrogéologie, n° 1, pp. 13-21.

VO-KHAC K. (1969) : Mathématiques et statistiques pour les sciences naturelles (CB-BG), Collection Etudes Supérieures. Edition Bordas, p.432

VOORHESS M.L., STUART M.J., STOCKMAN J.A ET OSKI F.A. (1975). Iron deficiency anemia and increased urinary iron epinephrine excretion. J. Pediatr., 86:542 p.

YACE I. (1976). Le volcanisme éburnéen dans les parties centrales et méridionales de la chaîne précambrienne de Fétékro en Côte d'Ivoire. Thèse Doc. Es Sc. Nat. Univ. Abidjan, Côte d'Ivoire, 373 p.

YACE I. (2002). Initiation à la géologie. L'exemple de la Côte d'Ivoire et de l'Afrique de l'Ouest. Pétrologie, Géologie régionale. Ed. CEDA, SODEMI, 183p.

YAMEOGO D. (1988). Hydrogéologie des formations fissurées de la partie Sud du plateau mossi entre le Nazino et le Nakambe (Région de Komissiri-Manga) Burkina Faso. Thèse de 3^{ème} cycle Université Scientifique, Technologique et Médicale de Grenoble. France, 165 p.

YAO D. B. (1998). Lithostratigraphie et pétrologie des formations birrimiennes de Toumodi-Fettekro (Côte d'Ivoire) : Implications pour l'évolution crustale du paléoprotérozoïque du craton ouest africain. Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans. France, n°737-1998, 191p.

YIDANA S. M., OPHORI D., BANOENG-YAKUBO B. (2006). A multivariate statistical analysis of surface water chemistry data-The Ankobra Basin, Ghana. Journal of Environmental Management, 8p.

YIDANA, S. M., OPHORI D., BANOENG-YAKUBO, B. (2007). Hydrogeological and hydrochemical characterization of the Voltaian Basin: the Afram Plains area, Ghana. Environ. Geol. Vol 54, N°9, pp 1751-1762

YOUAN TA M. (2008). Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : cas de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Cote d'Ivoire). Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 237p.

REFERENCES INTERNETS

ANONYME (2008). Accès à l'eau salubre et aux moyens d'assainissement
<http://www.grida.no/geo/geo3/french/279.htm#fig159> (consulté en 2008)

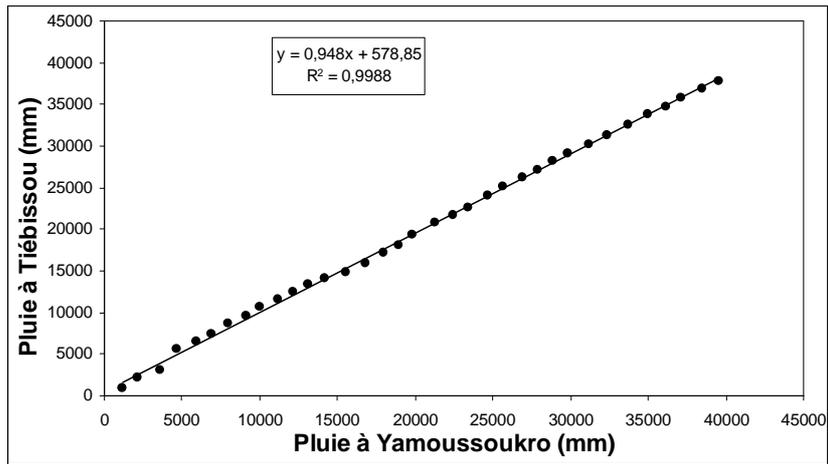
ANONYME (2009). Dans une goûte d'eau : Calcium et Magnésium.
www.gov.ns.ca/nse/water/ (consulté en 2009).

BROU T., BROUTIN H., ELGUERO E., & GUEGAN J-F (2009)
Variabilité climatique, dynamique agro-démographique, changement de l'occupation du sol en Côte d'Ivoire : impact sur le risque d'émergence de l'ulcère de Buruli. [www.cirdes.org/g/squelettes/conference/Theme 1 /BROU. pdf](http://www.cirdes.org/g/squelettes/conference/Theme%201/BROU.pdf) (consulté en 2009)

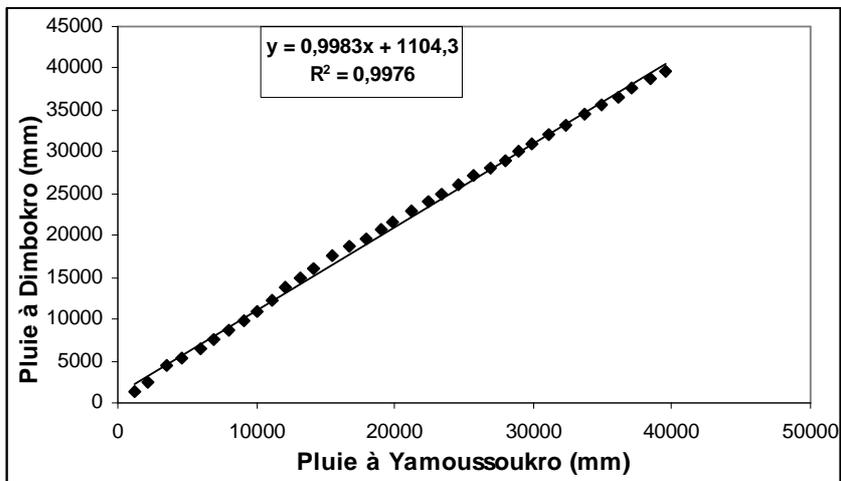
COTARD C. (2009) : LES NITRATES
<http://acces.inrp.fr/eduterre-usages> (consulté en 2009)

SIMLER R. (2004). Diagrammes 2.0 Logiciel d'Hydrochimie multilingages en distribution libre. Laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon.
<http://www.lha.univ-avignon.fr> (consulté en 2007)

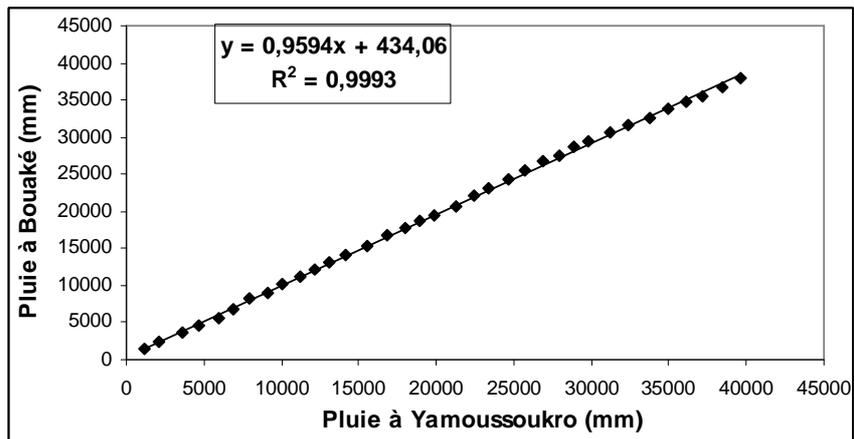
ANNEXES



Yamoussoukro-Tiébissou (1966-2000)



Yamoussoukro-Dimbokro (1966-2000)



Yamoussoukro-Bouaké (1966-2000)

Annexe I : Tests de double cumul

Annexe II : Tableau des précipitations et des indices pluviométriques

Année	Tiebissou		Bouake		Dimbokro		Dabakala		Mbahiakro		Bocanda		Yamoussoukro		Gagnoa		Divo	
	P (mm)	Ip	P (mm)	Ip	P (mm)	Ip	P (mm)	Ip	P (mm)	ip	P (mm)	Ip	P (mm)	Ip	P (mm)	Ip	P (mm)	Ip
1966	837,2	-1,073	1369	1,648	1240,5	0,483	1264,3	1,066	1201,6	0,664	1240,5	0,664	1173,5	0,266	1612,9	1,652	1441	0,809
1967	1260	1,265	943	-0,822	1170,8	0,162	1118,3	0,515	885,3	-0,646	1170,8	0,381	981,7	-0,947	1098,7	-1,353	1289,9	0,121
1968	914,5	-0,646	1313	1,323	1949,2	3,739	1639,2	2,480	1784,9	3,082	1949,2	3,544	1420,1	1,826	1562,9	1,360	1878,9	2,803
1969	889,8	-0,782	992	-0,538	923,8	-0,973	1016,4	0,131	741,4	-1,243	923,8	0,629	1088,3	-0,273	1248,6	-0,477	1378,4	0,524
1970	868,2	-0,902	995	-0,521	1086	-0,227	1011,2	0,111	905,2	-0,564	1085,1	0,779	1256,2	0,789	1352,3	0,129	1231,3	-0,146
1971	917,3	-0,630	1271	1,079	1145	0,044	1159	0,668	1440	1,151	1144,8	0,834	981,0	-0,952	1502,6	1,008	1536,5	1,244
1972	1194,7	0,904	1294	1,213	1204	0,315	834,7	-0,555	944,9	0,676	203,5	-3,549	1090,3	-0,260	1264,8	-0,382	1474,1	0,960
1973	989,8	-0,229	932	-0,886	1064	-0,329	1110,6	0,486	1264,5	0,983	1063	-0,057	1135,9	0,028	1428,8	0,576	1060,2	-0,925
1974	1104,7	0,406	1175	0,523	1241	0,485	604,4	-1,424	1403,3	1,116	1239,7	0,661	905,9	-1,427	1230,4	-0,583	1127,4	-0,619
1975	772,5	-1,431	917	-0,973	1120	-0,071	826,8	-0,585	1074,3	0,800	1120,9	0,812	1158,1	0,169	1162,2	-0,982	1133,7	-0,590
1976	1004,7	-0,147	864	-1,280	1616	2,208	876,8	-0,396	916,4	0,648	1127,4	0,818	968,3	-1,032	1235,8	-0,552	1238,9	-0,111
1977	770,6	-1,442	1163	0,453	1106	-0,136	1098,8	0,441	804,7	0,541	815,9	0,529	976,6	-0,980	1293,9	-0,212	1181,7	-0,372
1978	839	-1,063	960	-0,723	1194	0,269	748,9	-0,879	1109,6	0,834	1097	0,081	1045,9	-0,541	1118	-1,240	1015,6	-1,128
1979	668,9	-2,004	1083	-0,010	1526	1,795	1176,2	0,733	989,6	0,719	1159,9	0,337	1339,9	1,319	1505,1	1,022	1467	0,927
1980	1134,7	0,572	1423	1,961	1037	-0,453	938,3	-0,164	1172	0,542	1036,9	-0,163	1252,1	0,763	1326	-0,024	1274,7	0,052
1981	1255,9	1,243	1150	0,378	1020	-0,531	522,2	-1,734	825,3	-0,895	1020,3	0,719	1171,3	0,252	1432,8	0,600	1424,1	0,732

1982	910,4	-0,668	999	-0,497	1004	-0,604	507,8	-1,788	828	-0,884	1003,6	0,703	1014,3	-0,741	1168	-0,948	1143	-0,548
1983	1272,9	1,337	727	-2,074	968	-0,770	331,4	-2,453	735,3	-1,268	967,8	0,670	856,5	-1,740	1319,3	-0,064	881,2	-1,740
1984	1424	2,172	1096	0,065	1327,2	0,881	1225,1	0,918	1285,9	1,014	1327,2	1,017	1438,9	1,945	1800,7	2,750	1633,6	1,686
1985	878,3	-0,846	1424	1,966	1161,4	0,119	1174,9	0,728	1162	0,500	1162	0,345	1230,9	0,629	1531,3	1,176	1537,8	1,250
1986	1008	-0,129	1018	-0,387	855,3	-1,288	915,5	-0,250	855,1	-0,772	855,1	-0,902	906,1	-1,426	1033	-1,737	994,2	-1,226
1987	1282,7	1,391	1223	0,801	1026,7	-0,500	1355,8	1,411	698,3	-1,421	1034,9	0,732	1259,3	0,809	1438,1	0,631	1579,9	1,442
1988	1088,7	0,318	1182	0,563	1142,3	0,031	947,2	-0,131	969,1	-0,299	1141,3	0,831	1009,7	-0,770	1433,6	0,604	1222	-0,188
1989	1199,7	0,932	1134	0,285	1024	-0,512	1088,7	0,403	1351,2	1,066	1199,7	0,885	1218,3	0,550	1377,4	0,276	1519,7	1,167
1990	912,1	-0,659	886	-1,152	912,1	-1,027	927,1	-0,206	975,9	0,705	912,1	-0,670	1062,3	-0,437	1364,2	0,199	1224,3	-0,178
1991	1032	0,004	1057	-0,161	1032	-0,476	895,3	-0,326	850	0,585	1032	-0,183	951,9	-1,136	1300,8	-0,172	1102	-0,735
1992	827,2	-1,129	901	-1,066	827,2	-1,417	786,6	-0,736	896,5	0,629	827,2	-1,015	951,3	-1,140	1006,4	-1,892	940,3	-1,471
1993	1214,8	1,015	1072	-0,074	1214,8	0,364	1394	1,555	1214,8	0,935	1214,8	0,899	1310,0	1,130	1379,9	0,291	1132	-0,598
1994	1104	0,402	955	-0,752	1097,8	-0,173	902,5	-0,299	1194,1	0,915	1104	0,797	1202,8	0,452	1292,8	-0,218	1190,7	-0,331
1995	1191,5	0,886	1151	0,384	1191,5	0,257	1188,8	0,781	1230,7	0,950	1191,5	0,878	1393,6	1,659	1520	1,109	1205,8	-0,262
1996	1269,1	1,316	1116	0,181	1269,2	0,614	1080	0,370	1070,5	0,796	1269,1	0,781	1225,9	0,598	1197,3	-0,777	1129,5	-0,610
1997	940	-0,505	940	-0,839	944,7	-0,877	680,7	-1,136	982	0,711	940	-0,557	1184,2	0,334	1101,3	-1,338	966,8	-1,350
1998	989	-0,234	808,8	-1,600	975	-0,738	1123,3	0,534	653,3	-1,608	989	-0,358	968,5	-1,031	1295,7	-0,202	1210,2	-0,242
1999	1147	0,640	1207,9	0,714	1147	0,053	950,7	-0,117	1037,6	-0,015	1147	0,836	1315,0	1,161	1276,7	-0,313	1224	-0,179
2000	979,3	-0,287	1227,4	0,827	980,3	-0,713	941,7	-0,151	993,4	-0,199	979,3	0,681	1155,8	0,154	1343,9	0,080	1226,5	-0,168

Annexe III : synthèse de la base de Données des forages dans la région des Lacs

SOUS-PREFECTURE	LOCALITES	X(m)	Y(m)	Géologie	NS (m)	Q/s (m ³ /h/m)	T (m ² /s)	QF (m ³ /s)	Epalt	Epros	Prof (m)	PVE	CHG
TIEBISSOU	CptN'Gatta N'guessankro	271223	777903	Granites discordants	22,2	0,06	9,01E-06	0,72	8,4	41,1	49,5	33,5	11,3
TIEBISSOU	Adikro	285318	765676	Schistes birrimiens (volc-séd)	6,7	0,08	5,60E-06	1,2	6,5	47,5	54	38	31,3
TIEBISSOU	Ahounassou1	270848	792728	Granites géosynclinaux, micas	32,3	0,22	1,51E-05	0,9	31,7	36,8	68,5	40	7,7
TIEBISSOU	Ahounassou2	270848	792728	Granites géosynclinaux, micas	17,65	0,01	1,15E-06	0,7	15,4	74,6	90	41	23,35
TIEBISSOU	Allahou Koffikro	276139	789939	Granites discordants	15	0,04	3,24E-06	1,5	10,6	74,9	85,5	77	62
TIEBISSOU	Assabonou	267472	803363	Granites cratons, biotite	18	0,26	7,98E-05	8,64	5,8	64,9	70,7	63	45
TIEBISSOU	Assoko n'guessankro 1	290079	767647	Granites cratons, biotite	13,3	0,07	1,06E-05	3,32	2,7	60,3	63	40	26,7
TIEBISSOU	Assoko n'guessankro2	290079	767647	Granites discordants	6,25	0,13	2,84E-05	3	3,1	46,4	49,5	21,5	15,25
TIEBISSOU	Assoko Yao dièkro	280419	783394	Granites cratons, biotite	6,3	0,11	1,10E-05	1,2	5,1	48,9	54	16	9,7
TIEBISSOU	Assuikro	236768	783600	Granites discordants	17,01	0,10	1,37E-05	1,8	8,1	77,4	85,5	78	60,99
TIEBISSOU	AttienKofikro1	293461	784114	Granites discordants	11,2	0,17	5,67E-05	3	3,2	77,8	81	29	17,8
TIEBISSOU	Bakro Sakassou	268580	779906	Granites cratons, biotite	26,5	0,66	3,04E-04	1,5	25,8	28,2	54	34	7,5
TIEBISSOU	Bomgobo2	275085	776338	Granites discordants	14	0,44	1,10E-04	4,8	31,3	22,7	54	37,5	23,5
TIEBISSOU	Bondoukou F2	273469	785969	Granites géosynclinaux, micas	15,48	0,07	9,42E-06	0,7	14,1	66,9	81	37	21,52
TIEBISSOU	Bongobo1	275085	776338	Schistes birrimiens (volc-séd)	15,65	0,07	6,91E-06	1,2	13,7	67,3	81	46	30,35
TIEBISSOU	Cpt Jeannot			Granites discordants	16,6	0,22	5,03E-05	7	3	93,1	96,1	58	41,4
TIEBISSOU	Cpt Koffikro	278943	774109	Granites cratons, biotite	10,2	0,02	3,24E-06	0,6	4,4	67,6	72	54	43,8
TIEBISSOU	Djokokro			Granites discordants	13,15	0,02	1,42E-06	0,38	7,1	87,4	94,5	47	33,85
TIEBISSOU	Galébo	287137	777835	Schistes birrimiens (volc-séd)	5,15	0,30	1,13E-04	6,171	6,2	70,3	76,5	30	24,85
TIEBISSOU	Gbegbessou				13,3	0,11	3,57E-05	0,51	35	15	50	38,5	25,2
TIEBISSOU	Koffi Kouassikro	256153	792797	Granites cratons, biotite	25,2	0,11	1,84E-05	0,96	41,25	26,25	67,5	45	19,8
TIEBISSOU	Konan Kékérékro	299136	783059	Granites discordants	21,3	0,09	6,97E-06	1	20,1	42,9	63	40	18,7
TIEBISSOU	Kondrobo	241315	786674	Schistes birrimiens (volc-séd)	8	0,21	2,83E-05	4	10,8	43,2	54	29	21
TIEBISSOU	Koreakro	256511	775205	Granites discordants	10,05	0,32	1,02E-04	10	6,9	62,2	69,1	64	53,95
TIEBISSOU	Kouamékro	295679	786317	Granites discordants	10,73	0,03	2,39E-06	1	53,1	18,9	72	57	46,27
TIEBISSOU	Lomo Kankro	298989	785198	Schistes birrimiens (volc-séd)	6,03	0,06	8,54E-06	0,28	5,4	70,2	75,6	39,5	33,47
TIEBISSOU	M'bouedio	265360	800607	Granites discordants	10,22	0,38	6,07E-05	6	29,2	24,8	54	33	22,78
TIEBISSOU	N'Dakro	298989	785198	Granites discordants	12,35	0,05	5,20E-06	1,5	62,3	23,2	85,5	65,5	53,15
TIEBISSOU	Ninkro	285430	765896	Granites discordants	13,05	0,13	2,08E-05	1,3	13,3	40,7	54	21	7,95
TIEBISSOU	N'zi Cafenou			Granites discordants	26,7	0,07	9,03E-06	1	17,6	54,4	72	54	27,3

TIEBISSOU	Propronou	250619	790832	Granites discordants	18,85	0,33	4,18E-04	2,8	31,6	22,4	54	35	16,15
TIEBISSOU	Totokro			Granites discordants	10,1	0,07	1,26E-05	0,654	5,9	48,1	54	43	32,9
TIEBISSOU	YakpaboSakassou1	285870	765452	Granites cratons, biotite	17,7	0,14	2,51E-05	2	34,4	33,1	67,5	37	19,3
TIEBISSOU	YakpaboSakassou2	285870	765452	Granites cratons, biotite	27,5	0,12	2,18E-05	1	33,2	25,3	58,5	44	16,5
TIEBISSOU	Yobouet Yaokro	234021	786712	Granites discordants	10,71	0,03	8,87E-06	0,8	18	36	54	39	28,29
DIDIEVI	Ablinkro				19,98	2,03	1,53E-04	10	13,3	40,7	54	22	2,02
DIDIEVI	Adjebo	300146	808420	Granites géosynclinaux, micas	17,8	0,08	1,20E-05	0,576	26	32,9	58,9	38	20,2
DIDIEVI	Ahougnanou	286882	796308	Granites discordants	19,5	0,51	1,62E-04	5	5,1	62,4	67,5	31,5	12
DIDIEVI	Aka Akafoukro	303482	803983	Granites géosynclinaux, micas	13,3	0,30	5,01E-05	7	38,3	20,2	58,5	41	27,7
DIDIEVI	Akakouamekro			Granites géosynclinaux, micas	8,65	0,28	9,29E-05	0,5	3,3	50,7	54	14	5,35
DIDIEVI	AliAlikro	274821	820692	Granites géosynclinaux, micas	4,05	0,04	9,70E-06	0,96	4,8	49,2	54	29,5	25,45
DIDIEVI	Allanikro	293569	810659	Granites géosynclinaux, micas	14,1	0,11	1,54E-05	0,7	22,95	31,5	54,45	21	6,9
DIDIEVI	Andokoi Kouamekro	296732	773041	Granites discordants	19,95	0,04	3,60E-06	0,5	14,8	39,2	54	48	28,05
DIDIEVI	Attekro	300120	791830	Granites discordants	10,9	0,10	1,54E-05	0,9	25,1	51,4	76,5	28	17,1
DIDIEVI	Ayengrebo	277054	821793	Granites discordants	10,3	0,13	1,71E-05	1,728	5,9	43,6	49,5	40	29,7
DIDIEVI	Bongue	285858	815117		15,8	0,03	3,64E-06	0,55	6,1	70,4	76,5	66	50,2
DIDIEVI	Bossi	275945	820692	Granites discordants	8,8	0,33	4,56E-05	3,5	5,1	57,9	63	54,5	45,7
DIDIEVI	Broukro	294601	792958	Granites discordants	9,6	0,25	4,48E-04	6,2	8,6	72,4	81	70	60,4
DIDIEVI	Dibie N'guessankro	293474	787432		17,8	0,05	7,10E-06	1	24,65	42,85	67,5	36	18,2
DIDIEVI	Golikro	280372	822884	Granites discordants	11,1	0,01	1,30E-06	0,5	10	80	90	69	57,9
DIDIEVI	Grodiékro	298009	796281	Granites discordants	12,85	0,20	5,49E-05	2,88	6,6	51,9	58,5	37	24,15
DIDIEVI	Kangrassou	296706	766405	Granites discordants	7,63	0,14	1,53E-05	3	9,9	53,1	63	56	48,37
DIDIEVI	Kotobrinoui	285858	815117	Granites cratons, biotite	13,45	0,03	1,84E-06	0,5	14,6	48,4	63	48	34,55
DIDIEVI	KouadioGgbakro	281471	821773		25,3	0,14	2,36E-05	0,2	6,37	81,76	88,13	87	61,7
DIDIEVI	Kouadiokro				5,8	0,59	6,44E-05	3,9	10,6	43,4	54	31	25,2
DIDIEVI	Kouakou Koffikro (Danzo)	294579	787428	Granites discordants	12,13	0,07	1,15E-05	0,115	13,2	67,8	81	74	61,87
DIDIEVI	KouameAkafoukro	274285	814621	Granites discordants	14,4	0,51	1,42E-04	7,2	24,5	38,5	63	34	19,6
DIDIEVI	Krou Okoukro	275915	814055		11,5	0,11	2,19E-05	2,5	5,1	66,9	72	64,5	53
DIDIEVI	Labo				14,8	0,13	1,77E-05	0,9	5,6	57,4	63	43	28,2
DIDIEVI	Lekissou	283679	821763	Granites discordants	30,8	0,07	8,81E-06	0,6	31	59	90	70	39,2
DIDIEVI	Mafe	273701	812959	Granites discordants	6,1	0,03	1,71E-06	0,1	4,1	76,9	81	28,5	22,4
DIDIEVI	Mangouakro				4,4	0,02	1,43E-05	0,4	3,98	50,02	54	31	26,6
DIDIEVI	M'bam	272628	819601	Granites discordants	23,96	0,09	1,25E-05	2	31,1	58,9	90	52	28,04

DIDIEVI	Naomikro				19,99	0,50	8,70E-05	6	32,6	21,4	54	38	18,01
DIDIEVI	N'da Akissikro	298989	785198	Granites discordants	15,2	0,14	6,98E-06	0,5	19,9	43,1	63	28	12,8
DIDIEVI	N'Gotakikro	271503	815181	Granites discordants	8,45	0,44	2,48E-04	4	17,5	38,1	55,6	19	10,55
DIDIEVI	N'guessankro	285 901,91	825 071,51		19,45	0,07	6,45E-06	0,9	5,8	79,7	85,5	38	18,55
DIDIEVI	Sangbe Tanoukro F2	305635	789597		10,3	0,24	4,81E-05	1	14	49	63	16	5,7
DIDIEVI	Tahoussou Ecole	275945	820692	Granites discordants	21,53	0,03	5,81E-06	0,7	13	72,5	85,5	44	22,47
YAKRO	Abokouamékro1	273115	755329	Granites discordants	3,7	0,06	8,01E-06	1,8	6,3	74,7	81	72	68,3
YAKRO	Abokouamékro2	273115	755329	Granites discordants	12,73	0,14	1,16E-05	2,5	22,8	40,2	63	36	23,27
YAKRO	Allocobo				10,05	0,07	9,33E-06	2	3,6	86,4	90	80,5	70,45
YAKRO	Amani Yaokro				22,65	1,03	3,85E-04	6	22,5	45	67,5	36	13,35
YAKRO	Angan Koffikro	231227	759397		27,35	0,10	1,79E-05	0,7	30,1	23,9	54	37	9,65
YAKRO	Assaoulekro II				7,39	0,01	1,35E-06	0,5	4,1	58,9	63	49	41,61
YAKRO	BEZRO	258957	754174	Granites discordants	6,4	0,57	2,68E-04	8	20,8	42,2	63	30	23,6
YAKRO	Cpt Yao Kimikro				13,55	0,07	7,20E-06	1	3,3	59,7	63	18	4,45
YAKRO	Djahakro1				3,58	0,29	2,67E-05	2,5	8,8	45,2	54	17	13,42
YAKRO	Djaman Sakassou	244497	782012	Schistes birrimiens (volc-séd)	16,65	0,12	3,42E-05	2,5	63,1	26,9	90	64	47,35
YAKRO	Konankoffikro	252292	771131	Granites discordants	18,6	0,38	3,66E-05	0,96	1,9	83,1	85	10	-8,6
YAKRO	Koriakro	256511	775205	Granites discordants	6,75	0,06	7,77E-06	0,72	4,8	75,2	80	25	18,25
YAKRO	Kouakoutekro				8,75	0,15	2,09E-04	1,1	26,1	35,8	61,9	52	43,25
YAKRO	Labokro	273434	752452	Granites discordants	6,66	0,11	2,93E-05	2,88	18,6	53,4	72	32	25,34
YAKRO	M'lanYaokro2				28,64	0,09	1,73E-05	1,2	26,3	59,2	85,5	75	46,36
YAKRO	N'denou	250523	771140	Granites discordants	14,5	0,36	8,96E-05	4	16,6	69,9	86,5	80	65,5
YAKRO	Ngekro				4,25	0,19	9,73E-05	1,4	17,8	49,7	67,5	23	18,75
YAKRO	N'zéré	260565	767442		4,45	0,52	8,90E-05	10,8	3,5	86,5	90	52	47,55

ANNEXE IV : Transmissivités et perméabilités déduites des forages dans la région des Lacs

<i>Localités</i>	<i>Profondeur (m)</i>	<i>Niveau statique (m)</i>	<i>T (m²s⁻¹)</i>	<i>Perméabilité déduite K (m. s⁻¹)</i>
<i>Cpt N'Gatta N'guessankro</i>	87,4	13,15	1,41910 ⁻⁶	1,624E-08
<i>Adikro</i>	22,4	18,85	4,182E-04	1,867E-05
<i>Ahounnassou1</i>	36,8	32,3	1,513E-05	4,112E-07
<i>Ahounnassou2</i>	74,6	17,65	1,153E-06	1,545E-08
<i>Allahou Koffikro</i>	25,3	27,5	2,178E-05	8,608E-07
<i>Assabonou</i>	66,9	15,48	9,420E-06	1,408E-07
<i>Assoko n'guessankro 1</i>	62,2	10,05	1,018E-04	1,637E-06
<i>AssokoYao dièkro</i>	60,3	13,3	1,060E-05	1,758E-07
<i>Assuikro</i>	18,9	10,73	2,394E-06	1,267E-07
<i>AttienKofikro1</i>	70,3	5,15	1,134E-04	1,613E-06
<i>Bakro Sakassou</i>	74,9	15	3,238E-06	4,323E-08
<i>Bomgobo2</i>	67,6	10,2	3,245E-06	4,800E-08
<i>Bondoukou F2</i>	40,7	13,05	2,078E-05	5,106E-07
<i>Bongobo1</i>	93,1	16,6	5,025E-05	5,398E-07
<i>Cpt Duibo</i>	26,25	25,2	1,839E-05	7,008E-07
<i>Cpt Jeannot</i>	28,2	26,5	3,045E-04	1,080E-05
<i>Cpt Koffikro</i>	48,9	6,3	1,104E-05	2,258E-07
<i>Djangokro</i>	48,1	10,1	1,264E-05	2,627E-07
<i>Djokokro</i>	46,4	6,25	2,839E-05	6,118E-07
<i>Gbegbessou</i>	43,2	8	2,828E-05	6,546E-07
<i>Gogokro</i>	77,8	11,2	5,675E-05	7,294E-07
<i>Konan Kékrékro</i>	64,9	18	7,985E-05	1,230E-06
<i>Kondrobo</i>	23,2	12,35	5,201E-06	2,242E-07
<i>Koreakro</i>	22,7	14	1,097E-04	4,831E-06
<i>kossou</i>	26,4	17,05	2,394E-05	9,068E-07
<i>Kouamékro</i>	77,4	17,01	1,367E-05	1,766E-07
<i>Lomo Kankro</i>	70,2	6,03	8,541E-06	1,217E-07
<i>M'bouedio</i>	42,9	21,3	6,966E-06	1,624E-07
<i>N'Dakro</i>	47,5	6,7	5,603E-06	1,180E-07
<i>N'Denou</i>	36	10,71	8,873E-06	2,465E-07
<i>Ninkro</i>	54,4	26,7	9,027E-06	1,659E-07
<i>N'zi Cafenou</i>	33,1	17,7	2,515E-05	7,598E-07
<i>Propronou</i>	24,8	10,22	6,067E-05	2,446E-06
<i>Totokro</i>	67,3	15,65	6,908E-06	1,026E-07
<i>YakpaboSakassou1</i>	15	13,3	3,566E-05	2,377E-06
<i>Yobouet Yaokro</i>	41,1	22,2	9,013E-06	2,193E-07
<i>BEZRO</i>	42,2	6,4	2,681E-04	6,354E-06
<i>Assaoulekro II</i>	58,9	7,39	1,346E-06	2,285E-08
<i>Allocobo</i>	86,4	10,05	9,331E-06	1,080E-07
<i>Amani Yaokro</i>	45	22,65	3,852E-04	8,559E-06
<i>N'zéré</i>	86,5	4,45	8,897E-05	1,029E-06
<i>Djahakro1</i>	45,2	3,58	2,669E-05	5,905E-07
<i>Kouakoutekro</i>	35,8	8,75	2,093E-04	5,846E-06
<i>Cpt Yao Kimikro</i>	59,7	13,55	7,196E-06	1,205E-07
<i>Abokouamékro1</i>	74,7	3,7	8,006E-06	1,072E-07
<i>Abokouamékro2</i>	40,2	12,73	1,164E-05	2,896E-07
<i>Djaman Sakassou</i>	26,9	16,65	3,415E-05	1,270E-06
<i>Konankoffikro</i>	83,1	18,6	3,659E-05	4,403E-07
<i>Koriakro</i>	75,2	6,75	7,767E-06	1,033E-07
<i>Labokro</i>	53,4	6,66	2,928E-05	5,484E-07
<i>Ngekro</i>	49,7	4,25	9,726E-05	1,957E-06

<i>N'denou</i>	69,9	14,5	8,961E-05	1,282E-06
<i>Angan Koffikro</i>	23,9	27,35	1,788E-05	7,482E-07
<i>M'lanYaokro2</i>	59,2	28,64	1,726E-05	2,916E-07
<i>Attien Kouassikro2</i>	81	17,9	2,267E-06	2,798E-08
<i>N'Gotakikro</i>	38,1	8,45	2,476E-04	6,499E-06
<i>Kotobrinoi</i>	48,4	13,45	1,839E-06	3,799E-08
<i>N'guessankro</i>	79,7	19,45	6,445E-06	8,087E-08
<i>Tahoussou Ecole</i>	72,5	21,53	5,812E-06	8,017E-08
<i>Sangbe Tanoukro F2</i>	49	10,3	4,809E-05	9,814E-07
<i>Naomikro</i>	21,4	19,99	8,698E-05	4,065E-06
<i>N'Drikro</i>	70,2	3,55	1,042E-05	1,485E-07
<i>Mafe</i>	76,9	6,1	1,713E-06	2,228E-08
<i>M'bam</i>	58,9	23,96	1,248E-05	2,119E-07
<i>Lekissou</i>	59	30,8	8,809E-06	1,493E-07
<i>Krou Okoukro</i>	66,9	11,5	2,188E-05	3,270E-07
<i>Labo</i>	57,4	14,8	1,766E-05	3,077E-07
<i>Kouakou Koffikro (Danzo)</i>	67,8	12,13	1,147E-05	1,692E-07
<i>KouameAkafoukro</i>	38,5	14,4	1,420E-04	3,688E-06
<i>Grodiékro</i>	51,9	12,85	5,489E-05	1,058E-06
<i>Dibie N'guessankro</i>	42,85	17,8	7,102E-06	1,657E-07
<i>Broukro</i>	72,4	9,6	4,479E-04	6,186E-06
<i>Kouadiokro</i>	43,4	5,8	6,445E-05	1,485E-06
<i>Bossi</i>	57,9	8,8	4,561E-05	7,877E-07
<i>Akakouamekro</i>	50,7	8,65	9,294E-05	1,833E-06
<i>Aka Akafoukro</i>	20,2	13,3	5,005E-05	2,478E-06
<i>AliAlikro</i>	49,2	4,05	9,697E-06	1,971E-07
<i>Allanikro</i>	31,5	14,1	1,542E-05	4,896E-07
<i>Attekro</i>	51,4	10,9	1,535E-05	2,986E-07
<i>Adjebo</i>	32,9	17,8	1,205E-05	3,662E-07
<i>Ahougnanou</i>	62,4	19,5	1,618E-04	2,593E-06
<i>Ablinkro</i>	40,7	19,98	1,527E-04	3,751E-06
<i>KouadioGgbakro</i>	81,76	25,3	2,363E-05	2,890E-07
<i>Golikro</i>	80	11,1	1,300E-06	1,625E-08
<i>Mangouakro</i>	50,02	4,4	1,429E-05	2,857E-07
<i>Kangrassou</i>	53,1	7,63	1,534E-05	2,889E-07
<i>AssankroF2</i>	77,75	9,1	3,753E-05	4,827E-07
<i>N'da Akissikro</i>	43,1	15,2	6,976E-06	1,618E-07
<i>Andokoi Kouamekro</i>	39,2	19,95	3,600E-06	9,185E-08
<i>Ayengrebo</i>	43,6	10,3	1,706E-05	3,914E-07
<i>Bongue</i>	70,4	15,8	3,636E-06	5,165E-08

Annexe V : Tableau des paramètres chimiques

N°	Localités	T°C	pH	CE	OD	TDS	Na	K	HCO3	THT	Ca	Mg	SO4	Cl	NO3	Mn	Fe	PO4
1	ABO KOUAMEKRO F1	27,9	7,19	454	6,8	343			220	16	48	10,7		14,2	1,5	0	0,16	0
2	AGAN KOFFIKRO	28,2	5,97	157	6,3	112			70	4	8,02	4,86	1	10,6	0,4	0,25	1,73	0,08
3	AKIMOU YAOKRO	26,8	6,78	640	6,8	342			185	25	64	22,8		28,4	0,7	0	0,09	0,36
4	ALLOCOBO	28,4	7,48	501	6,7	388			245	22	59,2	18,5		10,6	0,9	0	0,19	0
5	Anoughlé KOUADIOKRO	26,8	7,78	248	6,8	171			110	8,8	21,6	8,26	1	5,32	0,9	0	0,03	0,1
6	BEZRO	25,8	5,92	197	6,7	117			65	7,6	17,6	7,78		10,6	1,2	0,05	0,29	0,41
7	BEZRO	27,1	5,94	264	6,5	130			70	7,6	17,6	7,78		10,6	1,2	2,7	3,96	0,41
8	DJAHAKRO F1	26,3	6,14	148	6,3	94			60	3	5,61	3,89	3	7,09	0,2	0,25	0,83	0,09
9	DJAHAKRO F2	28,4	7,32	397	6,7	296			190	8,8	25,7	5,83	8	21,3	3,1	0,05	0,11	0,18
10	DJAMAN SAKASSOU	26,9	6,74	217	6,9	163			105	7,4	12,8	10,2		10,6	0,5	0	0,02	0,28
11	HERMANKONO	25,8	6,71	336	6,8	220			145	10	35,3	2,92	1	3,55	0,7	0	0,01	0,13
12	KONAN KOFFIKRO	26,1	7,13	463	6,5	320			200	17	50,4	10,2		14,2	1,1	0	0,1	0,38
13	KORIAKRO	25,9	6,55	232	6,7	171			105	8,2	18,4	8,75		14,2	1,4	0	0,08	0,28
14	KOUAKOUTEKRO	28,9	6,9	566	4,9	432			260	24	72	15,1		24,8	0	1,4	1,72	0
15	KOUASSI KONGOKRO	26,5	6,35	641	6,7	247			90	20	44,9	20,4	6	63,8	1,6	0	0,05	0,19
16	landonou	27	7,2	569	6,7	445			270	25	82,6	11,2	10	10,6	1,4	0	0,09	0,15
17	M'LAN YAOKRO F1	26,7	6,52	176	6,8	120			80	5	12	4,86	0	5,32	0,3	0	0,01	0,09
18	M'LAN YAOKRO F2	28	6,84	546	6,7	404			280	13	37,7	7,78	5	10,6	1,2	0	0,02	0,1
19	N'DèNOU	26,2	7,4	680	6,7	296			160	21	80	1,94		17,7	0,6	0	0,07	0,25
20	N'Dié	26,5	6,45	1097	6,8	651			300	38	106	28,7	30	117	2,9	0	0,06	0,26
21	N'GBèKRO F1	27,9	6,08	115	6,8	86			55	3	6,4	3,4		7,09	1,8	0	0,1	0
22	N'GUESSANKRO	25,9	6,18	119	6,7	85			50	3,4	9,6	2,43		10,6	0,6	0	0,06	0,32
23	Nienekro	27,1	7,32	553	6,6	355			225	14	45,7	6,32	6	21,3	1,3	0,08	0,11	0,16
24	RAVIART	26,5	7,01	620	6,6	405			235	20	67,3	7,29	10	31,9	1,5	0,08	0,17	0,18
25	SAWA	29,1	7,14	498	6,7	366			225	21	56,1	17,5	12	3,55	1,3	0,05	0,35	0,26
26	YAO BLEKRO	26,4	8,18	428	6,8	302			200	12	36,1	7,78	6	7,09	1,2	0	0,01	0,21
27	YAOKIMIKRO F2	27,2	7,17	518	5,2	392			240	21	48	20,9		28,4	0,7	0,6	0,57	0
28	CPTAMANZI	27,5	7,33	227	6,8	158	2,16	0,8	100	7,4	17,6	7,29	0	7,09	0,5	0	0,04	0,36
29	ADIKRO	26,9	7,02	607	6,6	481			310	30	64,9	33,5		3,55	0,9	0	0,03	0,34
30	AHOUGNASSOU 1	27,7	6,28	843	6,8	523	4,06	0,7	320	33	73,7	36	1	16	0,3	0	0,01	0,36
31	AHOUGNASSOU 2	27,7	6,18	236	6,5	165	3,06	2,1	95	7,2	20,8	4,86	10	7,09	0,4	0,2	0,63	0,22
32	ALLAHOU KOFFIKRO	30,1	6,9	514	6,3	287			170	10	29,7	7,29	12	28,4	1,1	0,25	1,06	0,09
33	ASSABONOU	25,5	7,69	258	6,8	197			130	6	21,6	1,46	3	10,6	0,9	0	0,02	0,32
34	ASSOKO NGUESSANKRO	26,9	6,77	359	6,5	229			150	7,2	20	5,35	4	14,2	1,4	0,1	0,24	0,21
35	ASSOKO NGUESSANKRO	26,6	7,1	353	6,8	236			150	11	28,1	10,2	3	10,6	0,9	0	0,08	0,16
36	ASSOKO YAO DJEKRO	27,3	6,78	331	6,6	250			160	13	26,5	16,5	3	7,09	1,3	0,05	0,11	0,1
37	ASSUIKRO2	26,6	6,19	191	6,3	129			85	5,2	8,02	7,78	2	7,09	0	0,15	0,64	0,11
38	ATTIEN KOFFIKRO1	25,8	7,53	263	6,8	207			130	10	29,7	6,8	1	10,6	0,5	0	0,04	0,09
39	ATTIEN KOFFIKRO2	26,8	7,97	538	6,9	365			220	21	58,5	15,1		21,3	1,2	0,05	0,11	0,36
40	BAKROSAKASSOU	26,5	6,95	638	6,4	318			185	15	54,5	3,89	12	21,3	0	0,1	0,32	0,26
41	BONDOUKOU F2	26,9	6,28	127	6,7	82			52,5	3	7,21	2,92		7,09	0,5	0	0,06	0,22

42	BONGOBO	25,6	7,11	360	6,8	267			180	9	24	7,29	4	10,6	0,9	0	0,02	0,16
43	BongoboF3	25,9	7,23	473	6,6	299			195	8,4	26,5	4,37	15	14,2	0,9	0	0,09	0,16
44	CPT DUIBO	27,3	6,58	408	6,6	259			160	15	28,1	20,4		14,2	0,9	0	0,06	0,3
45	CPT JEANNOT	27,5	6,64	329	6,6	237			155	12	36,7	6,32		3,55	0,7	0	0,04	0,28
46	CptKOFFIKRO	26,6	6,61	306	6,6	244			155	9,5	30,5	4,62	4	14,2	1,3	0	0,07	0,12
47	DJANGOKRO	26,2	5,7	146	6,3	83			50	2	5,61	1,46	0	14,2	0,4	0,1	0,42	0,09
48	DJEZOUKRO	26,9	8,04	466	6,8	326			210	11	36,9	4,86	10	17,7	0	0	0,05	0,21
49	DJOKOKRO	26,9	6,94	362	6,6	266			180	13	28,9	13,1		3,55	0,9	0	0,05	0,32
50	GALEBO	27,6	6,38	329	6,7	176			85	12	21,6	17	3	28,4	2,1	0	0,06	0,11
51	GBEBESSOU	27,2	7,2	412	6,8	310			190	17	44,9	14,9	6	10,6	2,1	0	0,02	0,1
52	GOGOKRO	25,8	6,79	368	6,7	249			165	9	30,5	3,4	2	10,6	0,9	0	0,05	0,18
53	KOFFI-KOUASSIKRO1	26,5	6,68	534	6,7	287			165	9,2	26,5	6,32	8	42,6	2,5	0	0,04	0,21
54	KONANKEKEREKRO	26,7	7,42	513	6,6	413			250	23	71,3	13,6	10	10,6	1,6	0,15	0,4	0,21
55	KONANKRO	25,6	6,58	293	6,8	227			150	10	19,2	13,6	3	7,09	1,2	0	0,01	0,12
56	KONDROBO	26,7	7,09	228	6,7	179			120	7,6	13,6	10,2	0	7,09	1,1	0	0,1	0,38
57	KONGOKRO	26,5	7,42	521	6,7	317			200	16	47,3	10,2	3	10,6	1,2	0,05	0,1	0,18
58	KOREAKRO	27,2	6,26	208	6,5	146			95	7,2	12,8	9,72		7,09	0,5	0	0,04	0,23
59	KOSSOU	26,8	6,98	648	6,7	505			325	28	72,1	24,8		10,6	0,8	0	0,02	0,24
60	KOUAKOUASSIKRO	25,9	7,79	308	6,6	214			130	11	35,3	4,37		14,2	0,8	0,05	0,18	0,39
61	KOUAMEKRO	25,9	6,91	398	6,6	296			190	10	40,1	0,97	6	14,2	2,3	0	0,09	0,18
62	LOMOKANKRO	26,4	7,18	129	6,6	165			85	7,2	13,6	9,23	0	10,6	0,3	0,05	0,13	0,11
63	MBOUEDIO	28,2	5,92	145	6,8	103	1,68	0,5	60	4,4	12,8	2,92	0	10,6	0,7	0	0,01	0,28
64	N'DAKRO	28,1	6,8	401	6,7	304			195	8	25,7	3,89	7	24,8	4,5	0	0,07	0,12
65	NDENOU	26,8	6,35	249	6,6	221			145	8	20	7,29	6	10,6	0,3	0,05	0,11	0,13
66	NGATTA	26,4	7,47	598	6,7	335			195	19	58,5	10,7	12	16	0	0	0,06	0,26
	N'GUESSANBLEKRO1																	
67	N'GATTA	26,4	6,59	226	6,6	150			100	4,2	8,02	5,35	3	10,6	1,1	0	0,06	0,11
	N'GUESSANBLEKRO2																	
68	NINKRO	26,8	7,08	485	6,6	381			235	24	61,7	20,4		10,6	1,2	0,05	0,14	0,44
69	NZI CAFENOU	26,8	5,81	205	6,8	102			55	8,2	16,8	9,72		7,09	0,5	0,1	0,33	0,36
70	OHUEKRO	26,1	7,7	619	6,6	480			320	18	41,7	18	15	10,6	3,5	0	0,08	0,28
71	PROPRONOU	26,1	5,9	162	6,8	113			75	3,6	10,4	2,43	1	7,09	0,6	0	0	0,16
72	TOTOKRO	27,7	5,95	645	6,7	261	3,52	1,1	110	23	51,3	25,8	2	42,6	0,5	0	0,01	0,33
73	WAWAKRO	27,2	7,95	480	6,6	334			225	10	27,3	8,75	10	10,6	2,1	0,1	0,25	0,16
74	YAKPABOsakassou1	25,9	6,54	187	6,7	217			80	5,4	16	3,4	3	7,09	0,8	0,05	0,07	0,13
75	YAKPABOSAKASSOU2	28,9	5,97	141	6,7	95			60	2,6	7,21	1,94	1	10,6	0,5	0	0,05	0,09
76	YOBOUETYAOKRO	27	6,45	219	6,7	135			85	6	12,8	6,8		10,6	0,5	0	0,09	0,42
77	ATTIEN KOUASSIKRO 1	28,5	6,5	271	6,6	186			140	11	6,6	4,8		1,5	0,9	0,13	1,2	0
78	ATTIEN KOUASSIKRO 2	27,1	6,17	366	6,7	187			100	13	40,1	6,8	6	10,6	1,2	0	0,09	0,13
79	ATTIEN KOUASSIKRO 3	26,7	6,53	257	6,5	177			115	5,4	12,8	5,35	3	14,2	0,9	0,1	0,33	0,07
80	KOUADIO GBAGBAKRO	27	6,24	376	6,8	154			85	8,8	26,5	5,35	6	10,6	1,3	0	0,06	0,16
81	GOLIKRO	27,3	6,31	237	6,7	157			100	6,6	18,4	4,86	1	10,6	0,2	0	0,01	0,13
82	MANGOUAKRO	28,3	5,88	89	6,8	69			45	2	4,81	1,94	0	7,09	0	0	0	0

83	KANGRASSOU	26,9	6,59	123	6,8	99			60	4,4	7,21	6,32	1	10,6	0,5	0	0,05	0,13
84	N'DA AKISSIKRO	27,9	5,63	228	6,6	77			35	3,6	8,02	3,89	3	17,7	1,1	0,05	0,1	0,12
85	ANDOKOI KOUAMEKRO	27,4	6,3	186	6,3	137			90	4,8	13,6	3,4	1	7,09	0,6	0,15	1,31	0,14
86	ALLOCOKRO	26,6	6,42	151	6,8	105			70	3,4	10,4	1,94	0	7,09	0,2	0	0,02	0,08
87	AYENGREBO	27,6	6,6	566	6,8	261			105	13	44,1	5,83	6	60,3	16,3	0	0,01	0,26
88	BONGUE	29	7,27	499	6,6	275	0,28	1,7	155	10	33,3	2,92	7	39	1	0	0,06	0,28
89	ASSANKRO	26,6	6,08	143	6,7	98			65	3	11,2	0,49	0	7,09	0	0	0,07	0,08
90	ANOUAZE OKABO	27	6,39	177	6,7	72			35	4	9,62	3,89	1	14,2	0,4	0	0,07	0,11
91	ABLANKRO	27,9	6,56	409	6,6	259			140	15	46,5	8,75	3	21,3	8,3	0,05	0,12	0,16
92	AHOUGNANOU	27,1	6,35	548	6,5	202			75	18	51,3	12,6	0	45,6	1,1	0	0,02	0,32
93	ADJEBO	28,2	6,58	339	6,7	240			165	7,2	20	5,35	2	10,6	0,6	0	0,02	0,09
94	ATTEKRO 2	28,4	5,92	104	6,6	69			45	2	4,01	2,43	0	7,09	0,5	0,1	0,13	0,09
95	ALLANKRO	28,1	6,22	692	6,6	242			95	12	32,1	9,72	10	56,7	17,3	0,05	0,12	0,18
96	ALI ALIKRO	26,3	6,25	197	6,7	150	16,6	0,2	90	5,4	20	0,97	0	1	0,6	0	0,08	0,28
97	AKA AKAFOUKRO	27,8	5,9	123	6,8	79			50	2,4	8,82	0,49	1	7,09	0,3	0	0,02	0,11
98	AKA KOUAMEKRO	27	7,16	561	6,8	349			190	23	52,1	24,8	10	28,4	1,4	0	0,02	0,18
99	BOSSI	26,2	6,99	388	6,9	262	21,2	0,7	160	11	34,5	6,8	1	1,75	0,7	0	0,02	0,22
100	KOUADIOKRO	29	5,78	77	6,8	68			45	2	4,81	1,94	0	7,09	0	0	0,01	0,08
101	BROUKRO	29	7,31	524	6,7	378	1,68	3,2	230	19	55,3	12,6	19	3,55	1,2	0,08	0,34	0,36
102	DIBIE N'GUESSANKRO	27,6	6,11	134	6,8	88	3,55	0,1	57,5	3,2	9,62	1,94	1	1	0,6	0,05	0,11	0,29
103	GODIEKRO	28,1	6,65	565	6,8	260			130	9,2	28,9	4,86	6	46,1	15,1	0	0	0,12
104	KONGOBO EXT	25,8	7,58	500	6,8	342			220	12	37,7	7,29	12	14,2	2,5	0	0,03	0,31
105	KOUAME AKAFOUKRO	28,2	6,26	302	6,7	174			110	5,8	16	4,37	4	14,2	1,3	0	0,02	0,15
106	KOUAKOU KOFFIKRO DANZO	26,7	6,36	399	6,8	207			110	13	36,9	10,2	6	17,7	1,4	0	0	0,15
107	LABOKRO	28,6	6,36	258	6,5	159	0,98	1,5	100	7,8	25,7	3,4	0	3,55	0,8	0,25	1,03	0,32
108	KROU OKOUKRO	26,3	7,46	441	6,6	302	20,5	0,3	195	11	36,9	3,4	0	1,5	1	0,05	0,12	0,36
109	LEKISSOU	26,8	5,96	168	6,8	94			60	3,6	11,2	1,94	0	7,09	0,4	0	0	0,1
110	M'BAM	27	6,14	208	6,8	138			85	5,2	17,6	1,94	3	10,6	0,7	0	0,09	0,14
111	MAFE	28,2	7,14	439	6,8	267			165	11	35,3	5,83	3	21,3	0,3	0	0,01	0,19
112	N'DRIKRO	28,1	6,24	217	6,8	142			95	3,8	8,82	3,89	2	10,6	1	0	0,01	0,13
113	NAOMIEKRO	28,1	6,18	147	6,8	89			55	3,2	5,61	4,37	1	10,6	0,5	0	0	0,09
114	SANGBE TANOUKRO F1	26,6	6,68	400	6,8	331			200	18	45,7	15,1	10	14,2	1,5	0	0	0,18
115	SANGBE TANOUKRO F2	28	5,96	183	6,7	96			55	3,8	6,41	5,35	2	14,2	0,8	0	0,03	0,1
116	TAHOUSSOU ECOLE	26,7	6,65	273	6,7	212			140	8	17,6	8,75	3	10,6	0,6	0	0,04	0,11
117	N'GUESSANKRO	26,4	6,33	221	6,6	152			95	7,8	20,8	6,32	1	7,09	0,4	0,08	0,15	0,07
118	YBOUET KPLISSOU	27,8	7,27	258	6,7	180			115	5,8	16	4,37	4	14,2	0,5	0	0,02	0,09
119	KOTO BRINOÏ	27,6	6,32	190	6,7	141			90	5	16,8	1,94	1	10,6	0,4	0	0,02	0,1
120	N'GO TAKIKRO	29,1	6,77	538	6,7	248			155	11	37,7	3,4	10	7,09	0,8	0	0,05	0,08
121	Kokrenou	28,1	5,53	128		57	4,4	6,2	140	-	6,7	0,8	3,2	4,2	15	0,01	0,03	0,44
122	Subiakro	29,4	7,25	690		314	62	8	71,3	-	54,9	19,9	18,5	69,8	149	0,05	6,31	0
123	Akpessekre	28,4	7,93	906		412	41,9	32	35		65,2	15,3	28,8	46,4	106		16,2	0,19

pH : unité pH, CE : $\mu\text{S}/\text{cm}$, T : $^{\circ}\text{C}$, OD à PO4 (mg.L^{-1}), THT ($^{\circ}\text{F}$)

ANNEXE VI : Paramètres physiques mesurés *in situ*

N°	Nom de localités	Ouvrage	X	Y	T°C	pH	CE	Eh
Tién'dièkro	Bindetanoukro	F	300059	818219	27,5	6,54	448	49
Tién'dièkro	Salekro	F	302062	818298	26,9	6,29	233	58
didiévi	kpébo	F	310084	806253	27,6	6,11	145,4	68
didiévi	akouamékro	F	303510	804166	28,6	6,63	391	39
didiévi	Boli	F	300579	799677	29,7	6,11	391	68
didiévi	allokoko	F	296535	795054	29,3	5,99	142,6	75
didiévi	broutotokro	F	294350	792705	28	6,22	324	61
didiévi	Kouadiokro	F	292862	789091	28,2	6,23	163	61
didiévi	Didiébou	F	292417	787988	27,7	6,36	412	52
didiévi	attekro	F	300690	792437	27,4	5,58	12,5	97
didiévi	Koukou koffikro	F	296898	788988	27,5	5,61	272	94
didiévi	Gbégbessou	F	285940	785940	28,2	6,4	11,2	50
Tiébissou	Assokoyaadjèkro	F	279927	783354	27,3	6,54	310	45
Tiébissou	Lomokankro	F	275800	783639	27,9	5,89		79
Tiébissou	Bondoukou	F	272913	784626	28,2	5,79		84
Tiébissou	Nzissessou	F	270622	785251	28,2	5,57	370	97
Tiébissou	Minabo1	PM	265087	786957	28,2	5,45	670	103
Tiébissou	Minabo2	PM	265104	786921	27,7	5,84	403	84
Tiébissou	Koubi	F	259096	788450	28,6	5,69	635	90
Tiébissou	AkouaN'denou	PM	271559	800508	28	5,97	126	73
Tiébissou	Tolabonou	F	274515	802412	28	5,7	80	88
Tiébissou	N'gokro	PM	275580	804030	27,5	5,87	161	79
Tiébissou	N'guyakro	F	279884	808944	27,4	5,73	87	87
Tiébissou	Akafoukro	F	284695	814038	27,5	5,62	252	94
Tiébissou	Gangoro-Nana	F	247369	795088	27,2	6,11	600	70
Tiébissou	Gnamiekro	F	241647	798249	28,1	6,23		60
Tiébissou	Komorossou	F	238748	798664	27,6	6,94	415	23
Tiébissou	KoffiAgokro	F	233352	800735	27,7	6,49	190	46
Yakro	Sopim1	PT	248386	750310	26	5,46	41	103
Yakro	Sopim2	PT	248388	750212	26,8	5,2	51	115
Yakro	Sopim3	PT	248481	750137	26,8	5,79	140	82
Yakro	Sopim-Mosqué	PT	248370	750011	27,4	6,61	200	39
Yakro	Sopim4	PT	248375	749513	27,4	5,8	140	92
Yakro	Sopim5	PT	248449	749434	27,2	5,54	107	98
Yakro	Sopim6	PT	248601	749531	27,7	5,42	251	105
Yakro	Sopim7	PT	248531	750280	27,1	5,44	92	103
Yakro	Sopim8	PT	248487	750459	27,6	5,69	92	92
Yakro	Dioulabougou1	PT	249482	753182	27,4	5,85	431	79
Yakro	Dioulabougou2	PT	249474	753225	28,1	6,14	769	64
Yakro	Dioulabougou3	PT	249220	753287	28,1	5,45	556	104
Yakro	Dioulabougou4	PT	249087	753161	27,2	6,83	1285	30
Yakro	Dioulabougou5	PT	249226	752811	28,4	5,07	510	121
Yakro	Dioulabougou6	PT	248751	752479	28,1	5,53	577	99
Yakro	Dioulabougou7	PT	248738	752203	28,1	4,8	718	137

Yakro	Dioulabougou8	PT	248834	752001	26,9	4,38	219	156
Yakro	Dioulabougou9	PT	249047	752169	27,9	4,89	255	
Yakro	Dioulabougou 10	PT	249325	752632	28,6	5,96	151,1	
Yakro	Qt220logts1	PT	250056	754047	28,2	6,04	240	72
Yakro	Qt220logts2	PT	250165	753970	26,9	6,5	680	46
Yakro	Qt220logtsNdri	PT	250483	754066	27,2	6,04	477	73
Yakro	Qt220logts4	PT	250606	753932	27	5,33	326	110
Yakro	Qt220logts5	PT	250383	754338	27,3	5,11	185	121
Yakro	Tonzouebo	PM	252099	782099	28,6	6,9	342	25
Yakro	Koriakro	PM	255047	777539	29,6	6,26	348	60
Yakro	Yobouekro	PM	227764	764337	28,4	6,65	370	40
Yakro	Zambakro Villa	PT	232567	745276	28,1	6,28	254	57
Yakro	Zambakro2	PT	233269	744826	26,8	6,32	348	57
Yakro	Logbakro	PM	256561	744904	27	5,28	75	103
Yakro	Offfouédièkro	PT	263799	764722	28,5	5,91	110	79
Yakro	Kokrenou	PT	248487	750459	28,1	5,53	127,6	21,9
Yakro	Subiakro	PM	244510	739084	29,4	7,25	690	-64,5
Yakro	Akpessekro	PM	237741	734580	28,4	7,93	906	-106,6

F : forage, PM : puits modernes, PT : puits traditionnel, X et Y en m, pH : unité pH, T : °C, CE : $\mu S/cm$, Eh : mV

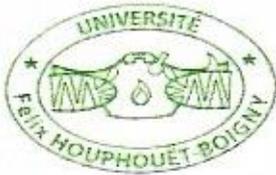
Annexe VII : Tableau indices de saturations

N°	Localites	IsC	IsD	IsAnh	IsAra	TDS	pCO2	LogpCO2	IsGyp	IsGoe	IsHem	IsFe(OH)3(a)
1	Abo kouamekro f1	-0,06	-0,93	0,02	-0,20	343	0,19	-0,72		7,77	17,56	1,78
2	Agan koffikro	-2,49	-5,34	-4,46	-2,63	112	0,10	-1,00	-4,29	8,04	18,09	2,03
3	Akimou yaokro	-0,46	-1,53	0,04	-0,60	342	0,06	-1,22		7,36	16,73	1,40
4	Allocobo	0,36	0,07	0,01	0,22	388	0,41	-0,39		7,90	17,83	1,89
5	Anougble kouadiokro	-0,09	-0,77	-4,08	-0,23	171	0,00	-2,63	-3,93	7,17	16,36	1,22
6	Bezro	-2,27	-5,09	0,10	-2,42	117	0,00	0,00		7,23	16,48	1,31
7	Bezro	-2,22	-4,95	0,10	-2,36	130	0,00	0,00		8,37	18,77	2,41
8	Djahakro f1	-2,56	-5,45	-4,13	-2,70	94	0,06	-1,25	-3,95	7,88	17,78	1,95
9	Djahakro f2	-0,24	-1,27	-3,12	-0,38	296	0,01	-1,93	-2,99	7,63	17,29	1,62
10	Djaman sakassou	-1,37	-3,02	0,02	-1,52	163	0,03	-1,52		6,69	15,40	0,73
11	Hermankono	-0,85	-2,98	-3,89	-1,00	220	0,04	-1,45	-3,74	6,38	14,78	0,46
12	Konan koffikro	-0,17	-1,21	0,02	-0,31	320	0,14	-0,85		7,58	17,17	1,65
13	Koriakro	-1,43	-3,36	0,04	-1,57	171	0,02	-1,70		7,18	16,38	1,26
14	Kouakoutekro	-0,11	-1,05	0,04	-0,25	432	0,11	-0,96		8,67	19,36	2,64
15	Kouassi kongokro	-1,34	-3,20	-3,05	-1,48	247	0,05	-1,30	-2,95	6,82	15,65	0,87
16	Landonou	0,23	-0,57	-2,60	0,09	445	0,02	-1,67	-2,52	7,54	17,09	1,58
17	M'lan yaokro f1	-1,72	-4,02	0,03	-1,87	120	0,01	-2,00		6,25	14,52	0,30
18	M'lan yaokro f2	-0,41	-1,65	-3,19	-0,55	404	0,05	-1,29	-3,08	6,72	15,47	0,73
19	N'denou	0,20	-1,39	0,01	0,06	296	0,21	-0,68		7,50	17,01	1,57
20	N'die	-0,41	-1,56	-2,09	-0,55	651	0,13	-0,89	-2,03	6,96	15,94	1,02
21	N'gbekro f1	-2,57	-5,56	0,06	-2,71	86	0,00	0,00		6,90	15,82	0,91
22	N'guessankro	-2,36	-5,51	0,04	-2,51	85	0,00	0,00		6,78	15,57	0,86
23	Nienekro	0,05	-0,93	-3,04	-0,09	355	0,01	-1,87	-2,92	7,66	17,34	1,69
24	Raviart	-0,10	-1,34	-2,68	-0,24	405	0,03	-1,55	-2,57	7,75	17,52	1,81
25	Sawa	-0,03	-0,70	-2,66	-0,17	366	0,02	-1,68	-2,58	8,07	18,17	2,04
26	Yao blekro	0,76	0,67	-3,12	0,61	302	0,00	-2,78	-3,00	6,70	15,41	0,76
27	Yaokimikro f2	-0,07	-0,66	0,02	-0,21	392	0,19	-0,72		8,33	18,67	2,36
28	Cptamanzi	-0,66	-1,86	0,01	-0,80	158	0,12	-0,92		7,22	16,45	1,24
29	Adikro	0,00	-0,46	0,04	-0,14	481	0,17	-0,77		7,00	16,01	1,04
30	Ahounnassou 1	-0,67	-1,81	-3,68	-0,81	523	0,21	-0,68	-3,63	6,04	14,11	0,06
31	Ahounnassou 2	-1,76	-4,30	-3,09	-1,90	165	0,08	-1,09	-2,94	7,78	17,58	1,79
32	Allahou koffikro	-0,62	-1,98	-2,88	-0,76	287	0,03	-1,55	-2,77	8,44	18,92	2,37
33	Assabonou	-0,12	-1,61	-3,60	-0,27	197	0,00	-2,48	-3,43	7,02	16,05	1,11
34	Assoko nguessankro	-1,00	-2,75	-3,52	-1,15	229	0,03	-1,49	-3,36	7,78	17,59	1,83
35	Assoko nguessankro	-0,54	-1,70	-3,52	-0,69	236	0,02	-1,82	-3,38	7,46	16,94	1,52
36	Assoko yao djekro	-0,86	-2,09	-3,55	-1,00	250	0,03	-1,47	-3,43	7,44	16,90	1,47
37	Assuikro2	-2,21	-4,61	-4,18	-2,35	129	0,07	-1,15	-4,01	7,81	17,63	1,86
38	Attien koffikro1	-0,16	-1,14	-3,96	-0,30	207	0,00	-2,32	-3,82	7,29	16,59	1,37
39	Attien koffikro2	0,78	0,80	0,00	0,64	365	1,10	0,04		7,74	17,49	1,78
40	Bakrosakassou	-0,34	-2,00	-2,66	-0,48	318	0,03	-1,59	-2,54	8,00	18,02	2,06

41	Bondoukou f2	-2,35	-5,26	0,04	-2,49	82	0,01	-2,00		6,85	15,72	0,89
42	Bongobo	-0,54	-1,78	-3,46	-0,68	267	0,02	-1,76	-3,31	6,88	15,78	0,97
43	Bongobof3	-0,34	-1,65	-2,85	-0,48	299	0,01	-1,84	-2,70	7,57	17,16	1,65
44	Cpt duibo	-1,04	-2,38	0,05	-1,18	259	0,03	-1,52		7,06	16,13	1,08
45	Cpt jeannot	-0,86	-2,65	0,05	-1,00	237	0,04	-1,40		6,92	15,86	0,94
46	Cptkoffikro	-0,98	-2,96	-3,35	-1,12	244	0,05	-1,32	-3,21	7,15	16,33	1,21
47	Djangokro	-3,07	-6,90	0,13	-3,21	83	0,00	0,00		7,19	16,40	1,26
48	Djezoukro	0,65	0,25	-2,89	0,51	326	0,00	-2,62	-2,77	7,39	16,80	1,43
49	Djokokro	-0,62	-1,74	0,03	-0,76	266	0,09	-1,05		7,19	16,39	1,23
50	Galebo	-1,61	-3,48	-3,62	-1,75	176	0,05	-1,34	-3,49	6,91	15,85	0,93
51	Gbegbessou	-0,15	-0,95	-3,05	-0,30	310	0,02	-1,82	-2,94	6,88	15,78	0,91
52	Gogokro	-0,78	-2,71	-3,65	-0,93	249	0,03	-1,47	-3,50	7,13	16,27	1,21
53	Koffi-kouassikro1	-0,96	-2,71	-3,12	-1,10	287	0,04	-1,36	-2,98	6,96	15,93	1,01
54	Konankekerecro	0,36	-0,18	-2,66	0,22	413	0,01	-1,93	-2,57	8,25	18,52	2,30
55	Konankro	-1,24	-2,82	-3,68	-1,38	227	0,05	-1,31	-3,54	6,30	14,62	0,39
56	Kondrobo	-0,94	-2,19	0,01	-1,09	179	0,08	-1,10		7,56	17,13	1,61
57	Kongokro	0,10	-0,63	-3,32	-0,04	317	0,01	-2,02	-3,21	7,65	17,32	1,71
58	Koreakro	-1,89	-4,06	0,07	-2,03	146	0,01	-2,00		6,65	15,32	0,68
59	Kossou	0,02	-0,59	0,04	-0,12	505	0,16	-0,80		6,80	15,63	0,85
60	Kouakouassikro	0,18	-0,74	0,00	0,03	214	0,43	-0,37		7,97	17,95	2,05
61	Kouamekro	-0,49	-2,79	-3,07	-0,64	296	0,03	-1,53	-2,93	7,45	16,90	1,52
62	Lomokankro	-0,90	-2,16	0,01	-1,05	165	0,09	-1,05		7,71	17,43	1,77
63	Mbouedio	-2,39	-5,58	0,10	-2,54	103	0,00	0,00		5,75	13,53	-0,25
64	N'dakro	-0,75	-2,47	-3,18	-0,89	304	0,04	-1,40	-3,04	7,25	16,51	1,25
65	Ndenou	-1,44	-3,50	-3,34	-1,58	221	0,08	-1,08	-3,20	7,16	16,34	1,21
66	Ngatta n'guessankro1	0,22	-0,47	-2,65	0,08	335	0,01	-2,09	-2,54	7,44	16,90	1,50
67	N'gatta n'guessankro2	-1,74	-3,84	-4,00	-1,89	150	0,03	-1,48	-3,83	7,08	16,18	1,14
68	Ninkro	-0,07	-0,79	0,02	-0,21	381	0,15	-0,82		7,69	17,40	1,74
69	Nzi cafenou	-2,46	-5,33	0,11	-2,60	102	0,00	0,00		7,18	16,38	1,22
70	Ohuekro	0,51	0,47	-2,72	0,36	480	0,01	-2,10	-2,61	7,61	17,22	1,68
71	Proprou	-2,44	-5,69	-4,35	-2,58	113	0,12	-0,92	-4,17			
72	Totokro	-1,59	-3,63	-3,48	-1,73	261	0,16	-0,81	-3,39	5,77	13,56	-0,22
73	Wawakro	0,47	0,27	-3,02	0,32	334	0,00	-2,49	-2,90	8,08	18,19	2,12
74	Yakpabosakassou1	-1,33	-3,52	-3,73	-1,47	217	0,06	-1,25	-3,56	7,12	16,25	1,20
75	Yakpabosakassou2	-2,57	-5,86	-4,48	-2,71	95	0,09	-1,06	-4,31	6,49	15,01	0,46
76	Yobouetyaokro	-1,74	-3,93	0,04	-1,89	135	0,01	-2,00		7,15	16,32	1,19
77	Attien kouassikro 1	-1,74	-3,77	0,06	-1,89	186	0,03	-1,52		8,30	18,62	2,28
78	Attien kouassikro 2	-1,49	-3,91	-3,05	-1,63	187	0,09	-1,06	-2,92	6,93	15,87	0,96
79	Attien kouassikro 3	-1,54	-3,64	-3,81	-1,69	177	0,04	-1,36	-3,65	7,78	17,57	1,83
80	Kouadio gbagbakro	-1,65	-4,17	-3,21	-1,80	154	0,06	-1,20	-3,06	6,81	15,64	0,85
81	Golikro	-1,66	-4,06	-4,13	-1,80	157	0,06	-1,20	-3,97	6,09	14,20	0,12
82	Mangouakro	-2,96	-6,47	0,08	-3,10	69	0,00	0,00				
83	Kangrassou	-1,99	-4,21	-4,51	-2,13	99	0,02	-1,70	-4,34	7,00	16,01	1,04

84	N'da akissikro	-3,12	-6,71	-3,97	-3,26	77	0,11	-0,96	-3,80	6,49	15,00	0,49
85	Andokoi kouamekro	-1,83	-4,43	-4,25	-1,98	137	0,06	-1,23	-4,08	8,20	18,42	2,22
86	Allocokro	-1,94	-4,78	0,03	-2,08	105	0,01	-2,00		6,48	14,99	0,54
87	Ayengrebo	-1,00	-3,04	-3,03	-1,14	261	0,03	-1,47	-2,91	6,29	14,60	0,31
88	Bongue	-0,25	-1,71	-3,06	-0,40	275	0,01	-1,96	-2,94	7,35	16,72	1,31
89	Assankro	-2,27	-6,08	0,07	-2,41	98	0,00	0,00		6,75	15,52	0,81
90	Anouaze okabo	-2,29	-5,15	-4,37	-2,43	72	0,02	-1,73	-4,19	7,00	16,02	1,04
91	Ablinkro	-0,89	-2,66	-3,31	-1,03	259	0,05	-1,31	-3,20	7,34	16,70	1,34
92	Ahougnanou	-1,34	-3,46	0,04	-1,48	202	0,01	-2,00		6,42	14,85	0,45
93	Adjebo	-1,13	-2,99	-3,81	-1,28	240	0,06	-1,25	-3,67	6,57	15,17	0,57
94	Attekro 2	-3,00	-6,37	0,07	-3,14	69	0,00	0,00		6,87	15,76	0,86
95	Allanikro	-1,55	-3,77	-2,94	-1,69	242	0,07	-1,13	-2,81	7,08	16,19	1,08
96	Ali alikro	-1,74	-4,97	0,06	-1,88	150	0,01	-2,00		6,95	15,92	1,02
97	Aka akafoukro	-2,65	-6,71	-4,39	-2,79	79	0,08	-1,08	-4,21	6,04	14,11	0,05
98	Aka kouamekro	-0,15	-0,79	-2,79	-0,29	349	0,02	-1,78	-2,70	6,87	15,76	0,91
99	Bossi	-0,55	-1,99	-3,92	-0,69	262	0,02	-1,69	-3,78	6,82	15,66	0,89
100	Kouadiokro	-3,06	-6,65	0,10	-3,20	68	0,00	0,00		5,62	13,27	-0,41
101	Broukro	0,15	-0,49	-2,46	0,00	378	0,01	-1,84	-2,38	8,11	18,24	2,08
102	Dibie n'guessankro	-2,35	-5,55	-4,37	-2,49	88	0,06	-1,23	-4,19	6,97	15,96	0,99
103	Godiekro	-1,02	-2,97	-3,20	-1,17	260	0,04	-1,42	-3,06			
104	Kongobo ext	0,20	-0,50	-2,82	0,06	342	0,01	-2,14	-2,69	7,17	16,36	1,25
105	Kouame akafoukro	-1,71	-4,14	-3,58	-1,86	174	0,08	-1,10	-3,43	6,34	14,70	0,34
106	Kouakou koffikro danzo	-1,30	-3,34	-3,10	-1,45	207	0,06	-1,22	-2,97			
107	Labo	-1,45	-3,92	0,06	-1,59	159	0,01	-2,00		8,13	18,28	2,11
108	Krou okoukro	0,03	-1,15	0,01	-0,11	302	0,30	-0,52		7,74	17,50	1,81
109	Lekissou	-2,43	-5,78	0,09	-2,57	94	0,00	0,00				
110	M'bam	-1,91	-4,95	-3,66	-2,06	138	0,08	-1,10	-3,49	6,91	15,83	0,95
111	Mafe	-0,34	-1,62	-3,41	-0,49	267	0,02	-1,81	-3,29	6,55	15,11	0,54
112	N'drikro	-2,04	-4,60	-4,12	-2,19	142	0,07	-1,14	-3,96	6,03	14,08	0,03
113	Naomiekro	-2,52	-5,31	-4,60	-2,67	89	0,05	-1,32	-4,42			
114	Sangbe tanoukro f1	-0,66	-1,97	-2,83	-0,80	331	0,05	-1,28	-2,72			
115	Sangbe tanoukro f2	-2,69	-5,62	-4,25	-2,83	96	0,08	-1,10	-4,08	6,27	14,56	0,27
116	Tahoussou ecole	-1,21	-2,90	-3,70	-1,36	212	0,04	-1,40	-3,55	6,94	15,89	0,99
117	N'guessankro	-1,62	-3,94	-4,09	-1,76	152	0,06	-1,25	-3,93	7,29	16,59	1,35
118	Yobouet kplissou	-0,69	-2,10	-3,59	-0,83	180	0,01	-2,09	-3,43	6,89	15,81	0,90
119	Koto brinoï	-1,72	-4,53	-4,15	-1,86	141	0,06	-1,25	-3,99	6,40	14,81	0,41
120	N'go takikro	-0,70	-2,57	-2,85	-0,84	248	0,03	-1,46	-2,73	7,07	16,17	1,03

Is: Indice de saturation ; Anh:Anhydrite, Ara : aragonite, C : Calcite ; D : Dolomite ; Gyp : Gypse, GOE : Goéthite ; Hem : Hématite



Université Félix Houphouët-Boigny
Cocody-Abidjan



UFR des Sciences de la Terre
et des Ressources Minières

PERMIS D'IMPRIMER

DOCTORAT UNIQUE EN SCIENCES DE LA TERRE

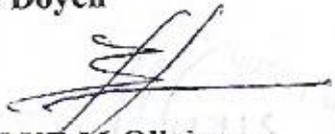
Présenté par Monsieur **SORO Gbombélé**

THEME : « Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraine dans la région des lacs (Centre de la Côte d'Ivoire) : Hydrogéologie et hydrochimie des aquifères discontinus du District de Yamoussoukro et du Département de Tiébissou ».

Vu et approuvé

Abidjan, le 13 janvier 2015

Le Doyen


Prof. BOFFOUE M. Olivier

Vu et Permis d'Imprimer

Abidjan, le 13 janvier 2015

Le Président de l'Université
Félix Houphouët Boigny


Prof. L. ATTA KOFFI
Vice-Président



RESUME

Titre : « *Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraines de la région des Lacs (centre de la Côte d'Ivoire) : Hydrogéologie et Hydrochimie des aquifères discontinus du district de Yamoussoukro et du département de Tiébissou* »

Le district de Yamoussoukro et le département de Tiébissou dans la Région des Lacs subissent les effets pervers des changements climatiques relevés en Afrique et en Côte d'Ivoire. L'influence de ces changements sur la quantité et la qualité des ressources en eau et le mode d'occupation du sol est encore mal connue. Dans cette zone où l'agriculture est la principale activité économique, les seules ressources hydriques sûres et disponibles pour l'Alimentation en eau potable des populations rurales sont celles des aquifères d'altérites et de fissures. La présente étude vise donc à une meilleure connaissance de ces aquifères au plan quantitative et qualitative. Pour ce faire, plusieurs techniques, parmi lesquelles, l'hydroclimatologie, l'occupation du sol, l'hydrodynamique, l'hydrochimie et la qualité des eaux ont été utilisées.

L'étude de la dynamique spatio-temporelle des précipitations a mis en évidence un gradient pluviométrique de direction SW-NE. Celui-ci est en constance variation dans le sens de la baisse pluviométrique dans la zone d'étude. Le déficit hydrologique est de 38,80% avec des effets très néfastes relevés au niveau des installations hydroélectriques. Les volumes mobilisés par les aquifères du bassin du Kan sont faibles. Ils sont compris entre 0,048 et 0,491 km³ avec une moyenne de 0,158 km³. Ces volumes traduisent une baisse des réserves en eau souterraine des aquifères. On a pu observer au cours des années 1980 et 1985 des pics qui se sont traduits au niveau des coefficients de tarissement par une baisse.

L'analyse diachronique d'images satellitaires (TM et ETM⁺) a mis en évidence une modification spatio-temporelle de l'occupation du sol. Cette dynamique est marquée par la régression de la savane arborée au profit des sols nus ou dégradés et des cultures. Parallèlement, on observe une progression de la forêt. Les coefficients de rétention calculés sont faibles et rendent compte d'une forte anthropisation de la zone.

Les paramètres hydrodynamiques des aquifères sont très dispersés et s'étendent en général sur quatre ordres de grandeurs. Cette forte dispersion rend compte de la forte hétérogénéité au niveau des aquifères discontinus. Les transmissivités varient entre 1,15 10⁻⁶ et 4,4810⁻⁴ m²/s. avec une moyenne de 4,9510⁻⁵ m²/s. Les débits spécifiques évalués varient de 0,008 à 2,03 m²/h/m avec une moyenne de 0,19 m²/h/m. Les perméabilités déduites sont comprises entre 1,54 10⁻⁸ et 1,87 10⁻⁵ m/s une moyenne de 1,35 10⁻⁶ m/s. Une relation empirique de forme puissance entre la transmissivité et le débit spécifique avec un bon coefficient de régression (R² = 0,8) a été déterminée. Elle permet d'estimer les valeurs de la transmissivité là où elles font défaut en prévision d'une étude de modélisation hydrodynamique. Les linéaments cartographiés dans la zone ont pour direction d'orientation majoritaire N-S avec des directions secondaires N90-100, N20-30, N40-50, N60-70, N85, N140 et N150-160.

Le faciès bicarbonaté calcique est commun à la plupart des eaux souterraines de la région des Lacs, signe d'une continuité hydraulique des aquifères. Les eaux présentent dans leur ensemble une minéralisation moyenne avec des valeurs extrêmes de 1097 µS/cm dans les nappes de fissures et 1285µS/cm dans celles des altérites. Cette minéralisation eau est acquise par hydrolyse acide des minéraux des roches encaissantes après l'infiltration des eaux de pluies enrichies en CO₂ du sol. Les eaux sont récentes et évoluent dans un système ouvert au CO₂ de l'atmosphère du sol. Elles ont une bonne vitesse de circulation caractéristique de la bonne perméabilité des aquifères. Au plan qualitatif, les eaux sont chimiquement aptes à la consommation humaine par rapport aux normes OMS. Toutefois, certains points d'eau présentent des teneurs en nitrates et en fer dépassant la norme OMS. La pollution due aux nitrates est d'origine anthropogénique tandis que l'excès de fer dans les eaux est d'origine géologique et est lié à une minéralisation naturelle des eaux.

Mots clés : Région des lacs, aquifères discontinus, gradient pluviométrique, occupation du sol, paramètres hydrodynamiques, minéralisation, pollution, anthropogénique.

ABSTRACT

Title “*Quantitative and qualitative assessment of groundwater resources in lakes' region (centre of Côte d'Ivoire): Hydrogeology and hydrochemistry of heterogeneous aquifers of Yamoussoukro and Tiébissou districts*”

Yamoussoukro and Tiébissou districts in the lakes region underwent the perverse effects of the climatic variability's raised in West Africa. Its impacts on the quantitative and qualitative groundwater resources and the land cover conditions are unknown. In this area, where agriculture is the main economic activity, the only available sure water resources for food and drinking water of the farming populations are those of the alterites and cracks aquifers. The present survey aims therefore to a better knowledge of these aquifers at the qualitative and quantitative level. In this way, many techniques', among which, hydroclimatology, land cover, hydrodynamic, hydrochemistry and waters quality have been used.

The survey of the dynamic spatio-temporal of the rain has discovered a gradient of SW-NE direction of rain-fall in constancy variation in the sense of decrease in the area. The hydrologic deficit is 38.8% with very ominous effects noted to the level of the hydroelectric facilities. The volumes mobilized by the aquifers of the Kan are estimated between 0.048 and 0.491 km³ with 0.158 km³ as average. These volumes are weak and show a decrease of the groundwater reserves.

Satellite images (TM and ETM⁺) diachronic analysis has found the evident space-time modification of the land cover. This is situated by the decrease of the savanna raised to the profit of naked soils or damaged and the farms. The increase of forest is notice. The zone is also marked by the falling percentage of water keeping and that explain an important anthropization.

The hydrodynamic parameters of aquifers are spread most of time on four sides presenting strong heterogeneous aquifers. The transmissivities vary from 1.15 10⁻⁶ to 4.48 10⁻⁵ m²/s with an average of 4.95 10⁻⁵ m²/s. Specifics capacity evaluated vary from 0.008 to 2.03 m²/h/m with 0.19 m²/h/m in average. The permeabilities are situated between 1.54 10⁻⁸ and 1.87 10⁻⁵ m/s average of 1.35 10⁻⁶ m/s. An empiric relation of shape power between the transmitivity and the specific capacity with a well coefficient decrease (R² = 0.8) has been determined. It permits to estimate the transmissivity values where they make defect in forecasting of survey hydrodynamic modeling. Cartographed lineaments in this area have as main orientation N-S with secondary's orientations N90-100, N20-30, N40-50, N60-70, N85, N140 and N150-160. The calcic bicarbonate facies is common to most waters in the Region des Lacs sign of a hydraulic continuity. Waters have been mineralized in average with some tops values of 1097 µs/cm in the cracks and 1285µs/cm in the alterites. That mineralization of water is acquired by acidic hydrolysis of minerals of the cashing rocks after the infiltration of rain water enriched in CO₂ of soil. Waters are recent and evolve in a system opened to the CO₂ of the atmosphere of the soil. Concerning the qualitative levels, waters are chemically acceptable for human consumption comparing to the WHO's norms. However some points of water deserve a particular attention, because they have holding in nitrate and in iron overcoming WHO's norms. This chemical pollution of nitrate is from anthropogenic.

Key words: Lakes Region, heterogeneous aquifers, rain fall gradient, land cover, hydrodynamic parameters, mineralization, pollution, anthropogenic.