
**ETUDE GEOCHIMIQUE ET PIEZOMETRIQUE DES EAUX
SOUTERRAINES DE LA REGION DE OUAGADOUGOU**

***MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER D'INGENIERIE***

Présenté et soutenu publiquement le :

par

M. Missa HIE

Travaux dirigés par : Angelbert BIAOU, Docteur en Hydrologie/Hydrogéologie
Enseignant-Chercheur (GVEA -2iE)

Sina THIAM, Expert en SIG et Base de Données
Enseignant (DIASP-2iE)

Devant le jury composé de

Président :	-	-
Membres :	Dr. Angelbert BIAOU	Hydraulique/Hydrogéologie/2iE
	-	-
	-	-

1^{ère} Promotion 2008/2009

DEDICACES

Tout revient à Allah. Je commence par lui rendre grâce en ses composantes de l'espace et du temps. Louange et Glorification à Lui, DETENTEUR du SAVOIR et du POUVOIR INFINI.

Je dédie ce travail de recherche à

- ♦ *La mémoire de mon père HIE Ségnarebane, arraché à notre affection en 2005, Ses conseils me reviennent toujours à l'esprit. Merci maman ;*
- ♦ *La mémoire de mon tuteur KARGOUGOU R. Boniface, ici à Ouagadougou*
Qu'ALLAH, Le Tout miséricordieux, les accueille dans son paradis.
- ♦ *Ma mère KARA Sonié à qui, dire merci serait une injure. Merci cependant pour l'instruction et l'éducation, les sacrifices, prières et encouragements ;*
- ♦ *Mes frères et sœurs à Anyama en Côte d'Ivoire ;*
- ♦ *La famille KARGOUGOU et HEMA à Ouagadougou ;*
- ♦ *Mes camarades de la 38^{ème} promotion de l'Équipement rural ;*

Mes amis et à tous ceux qui de près ou de loin ,ont contribué à ce que je sois là aujourd'hui, à l'occurrence, celle qui m'a apporté son soutien à travers sa présence et ses coups de fil souvent tardifs pour m'encourager : Alida KIENTEGA.

REMERCIEMENTS

Au terme ce travail de recherche, il m'est permis d'adresser des remerciements à tous ceux qui ont contribué ou apporté une aide pour l'élaboration de ce document. Sans que la liste ne soit exhaustive :

Je voudrais exprimer ma gratitude à mon encadreur à 2iE Dr Angelbert BIAOU pour ses conseils et orientations, son expérience confirmée, sa disponibilité et ses relectures et à M. Sina THIAM pour les séances de travail pour la conception de la base de données.

J'adresse mes sincères remerciements à Madame Suzanne OUANDAOGO/YAMEOGO, Docteur en hydrogéologie et Enseignante à l'université de Ouagadougou. Sa disponibilité, sa sagesse m'ont beaucoup impressionné. Merci pour votre soutien et d'avoir mis à notre disposition les informations pour réaliser ce travail.

C'est aussi l'occasion de remercier Mr Sylvain SOME pour son aide. Merci d'avoir mis à notre disposition des documents pour la réalisation de cette étude.

Je souhaite remercier l'administration, les enseignants et les étudiants du 2iE pour leur disponibilité, la qualité de la formation, la compréhension, l'entraide et le compagnonnage.

Enfin je remercie ma famille, mes amis, mes camarades pour le soutien et l'assistance.

Puisse DIEU, le Tout puissant nous couvrir de sa grâce et nous maintenir dans la droiture.

== Sincères remerciements ==

RESUME-ABSTRACT

Les aquifères de la région de Ouagadougou, au centre du Burkina Faso, sont mal connus tant dans leur structure que dans leur fonctionnement. Cependant les eaux souterraines de la région sont d'un grand intérêt car elles sont de plus en plus sollicitées pour la satisfaction de plusieurs besoins humains (AEP, Cultures irriguées...). Ainsi la caractérisation et la quantification de la recharge de ces aquifères dans ce contexte de forte évaporation est très utile pour la gestion et la planification de l'exploitation des eaux souterraines de la région. C'est dans le but de contribuer à l'état de connaissance de ces ressources que ce travail de recherche a été initié. Pour y parvenir, la caractérisation, l'identification et le fonctionnement des différents aquifères s'est faite, d'une part, sur la base des caractéristiques physico-chimiques des eaux, des données sur les forages et d'autre part, à partir de l'analyse des fluctuations piézométriques. La recharge a été estimée par la méthode de la variation du niveau piézométrique. Les résultats obtenus concordent avec ceux de certains auteurs sur les aquifères de la zone de socle en général et l'origine de leur réalimentation. Les valeurs de recharge obtenues restent acceptables comparativement à celles d'autres études dans la région. L'étude a montré que le renouvellement des eaux souterraines de Ouagadougou se fait essentiellement à partir des précipitations efficaces, c'est-à-dire par le volume d'eau qui reste disponible à la surface du sol après soustraction des pertes par évapotranspiration réelle. Ainsi, une partie de l'eau : le ruissellement alimente l'écoulement de surface collecté par le réseau hydrographique et la deuxième partie : l'infiltration, alimente le stock d'eau souterrain.

Mots clés : Ouagadougou ; aquifère, piézométrique, recharge. Physico-chimique

The aquifers of the region of Ouagadougou, in the center of Burkina Faso, are badly known as well in their structure as in their operation. However the underground water of the area are of a great interest because they are requested more and more for the satisfaction of several human needs (AEP, irrigated Cultures...). Thus the characterization and the quantification of the refill of these aquifers in this context of strong evaporation are very useful for the management and the planning of the exploitation of these underground waters. It is with an aim of contributing to the state of knowledge of these resources that this research task was initiated. For that purpose, the characterization, the identification and the operation of the aquifers were made, on the one hand, on the basis of physicochemical characteristic of water, the data on drillings and on the other hand, by the analysis of the piezometric fluctuations. The refill was estimated by the method of the variation of the piezometric level. The results obtained agree with those of certain authors on the aquifers of the zone of base in general and the origin of their refeeding. The values of refill obtained remain acceptable compared to those of other studies in the region. The study showed that the renewal of underground water of Ouagadougou is done primarily starting from effective precipitations, which are to say by volume; water that remains available to the surface of the soil after subtraction of the losses by real evapotranspiration. Thus, the first part of water: the streaming feeds the out-flow of surface collected by the hydrographic network and the second part: the infiltration, feeds stock of underground water.

Key words: Ouagadougou; aquifer, piezometric, refill. Physicochemical

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DE TABLEAUX	vi
INTRODUCTION GENERALE	viii
A.CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	1
B.OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	2
C.APPROCHE METHODOLOGIQUE.....	2
D.LE PLAN DU TRAVAIL	6
CHAPITRE I : GENERALITES	8
I. 1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	8
I. 1.1 Situation géographique de Ouagadougou	8
I.1.2 Milieu naturel et physique.....	9
I.1.2.1- Le relief et le climat	9
I. 1.2.2 -La pédologie et la végétation	11
I. 1.2.3- Réseau hydrographique.....	11
I.2 CONCEPTION DE LA BASE DE DONNEES	12
I. 2.1 La démarche MERISE	12
I. 2.2 Les étapes de la réalisation du système d'information.....	14
I. 2.3 Concepts utilisés et formalismes	15
I. 2.3.1 Le modèle conceptuel de données(MCD).....	15
I. 2.3.2 Les règles de passage du MCD au MPD.....	18
I.2.3.3 Le modèle physique de données(MPD)	18
I.3 ETUDE DU SYSTEME AQUIFERE	19
I. 3.1 Définition et typologie des aquifères	19
I. 3.1.1 Définitions.....	19
I. 3.1.2 Typologie des aquifères	19
I. 3.2 Contexte géologique	20
I. 3.3 Contexte hydrogéologique et catégories d'aquifères	21
I. 3.3.1 Les aquifères des formations superficielles	21
I. 3.3.2 Les aquifères de socle	21
CHAPITRE II : REALISATION DE LA BASE DE DONNEES	24
II.1 ANALYSE ET CRITIQUE DES DONNEES COLLECTEES	24
II.1.1 Etat des lieux des données disponibles	24
II.1.2 Analyse critique des données collectées.....	25

II.2 CONCEPTION DE L'ARCHITECTURE DE LA BASE DE DONNEES	25
II.2.1 Objectif du futur système et résultats attendus	25
II.2.2 Règles de gestion et dictionnaire des données	26
II.2.3 Les modèles conceptuels : MCD ET MPD.....	26
II.3 REALISATION ET MISE EN OEUVRE DE LA BASE DE DONNEES	26
II.3.1 Génération des Tables.....	27
II.3.2 Les requêtes	27
II.3.3 Les formulaires	28
II.3.4 Les états	28
CHAPITRE III : ETUDES GEOCHIMIQUES	29
III.1 GENERALITES SUR LA GEOCHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES	29
III.1.1 Sur l'hydrochimie.....	29
III.1.2 Sur l'utilisation des traceurs isotopiques.....	30
III.2 CARACTERISATION GEOCHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA REGION DE OUAGADOUGOU	33
III.2.1 Inventaire et analyse des données disponibles	33
III.2.2 Identification des différents types d'eau présents dans la région de Ouagadougou	33
III.2.2.1 Faciès hydrochimique.....	33
III.2.2. 2 Caractéristiques isotopiques des eaux souterraines de Ouagadougou.....	35
III.3 DISCRIMINATION DES DIFFERENTS AQUIFERES PRESENTS DANS LA REGION DE OUAGADOUGOU	39
III.3.1 Données disponibles.....	39
III.3.2 Analyse et interprétation	40
CHAPITRE IV : LA DYNAMIQUE DES AQUIFERES	44
IV.1 ETUDE DES VARIATIONS DE LA PIEZOMETRIE	44
IV.1.1 Généralités sur les études piézométriques et les réseaux piézométriques	44
IV.1.2 Inventaire et analyse des données disponible.....	46
IV.1.3 Classification des réponses des piézomètres aux épisodes pluvieux.....	46
IV.1.4 Identification des facteurs expliquant la réponse des piézomètres aux épisodes pluvieux	48
IV.1.5 Description du processus de recharge des aquifères	49
IV.1.5.1 Les composantes du cycle hydrologique.....	50
IV.1.5.2 Les mécanismes de recharge des aquifères	52
IV.1.6 Résumé sur les méthodes d'évaluation de la recharge des aquifères	53
IV.1.6.1 Méthode du bilan de THORNTHWAITE.....	53

IV.1.6.2	Technique basée sur la fluctuation de la surface piézométrique	56
IV.2 CARACTERISATION DE LA DYNAMIQUE DES AQUIFERES DE LA REGION DE OUAGADOUGOU		58
IV.2.1	Analyse et interprétation des évolutions temporelles des niveaux piézométriques.....	58
IV.2.1.1	Evolution temporelle de la piézométrie dans les altérites (piézomètre du CIEH).....	59
IV.2.1.2	Evolution temporelle de la piézométrie dans la nappe profonde (QP106 et (QP104)	59
IV.2.1.2.1	Evolution temporelle de la piézométrie dans QP106	59
IV.2.1.2.2	Evolution temporelle de la piézométrie dans QP104	60
IV.2.2	Etude des paramètres hydrodynamiques	61
IV.2.2.1	La transmissivité	62
IV.2.2.2	Le coefficient d'emmagasinement	62
IV.2.2.3	La perméabilité.....	62
IV.2.2.4	Le débit spécifique	63
IV.3 ESTIMATION DE LA RECHARGE PAR LA METHODE DES FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES		63
IV.3.1	Principe de la méthode	63
IV.3.2	Méthodologie de calcul et présentation des résultats	64
IV.3.2.1	Estimation de la porosité efficace	65
IV.3.2.2	Présentation des résultats	66
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS		70
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES		73
ANNEXES		77
ANNEXE 1 : SUR LE CHAPITRE II.....		78
Annexe II-1	Prise en main de 'AKIFER_2009'	78
Annexe II-2	Exemple de requête permettant d'obtenir la lithologie d'un forage : exemple du forage C26 :.....	81
Annexe II-3	Règles de gestion et dictionnaire des données	82
Annexe II-4	Structure des tables et les relations qui les lient.....	83
ANNEXE 2 : SUR LE CHAPITRE III		84
Annexe III-1	Résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines	84
ANNEXE 3 : SUR LE CHAPITRE IV		87
Annexe IV-1	Données sur quelques piézomètres et mesures piézométriques	87
AnnexeIV-2	Schéma illustratif du réseau piézométrique.....	88
AnnexeIV-3	Schéma conceptuel du modèle de THORNTHWAITE, modifié	88

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de présentation de Ouagadougou	8
Figure 2 : Moyenne pluviométrique annuelle à Ouagadougou (1975-2007)	10
Figure 3 : Variation annuelles des paramètres climatiques à Ouagadougou	10
Figure 4 : Carte Géologique de Ouagadougou	21
Figure 5 : Profil d'altération théorique dans un aquifère en zone de socle, recoupé par la topographie actuelle.	22
Figure 6 : Faciès des eaux sur diagramme de Piper	35
Figure 7 : Modèle théorique de condensation d'une vapeur recyclée issue d'un évènement pluvieux donné. (Repris de A. Akouvi, 2001),	37
Figure 8 : Graphe $\delta^2\text{H} = f(\delta^{18}\text{O})$ des eaux de puits et forages	38
Figure 9 : Graphe $\delta^2\text{H} = f(\delta^{18}\text{O})$ des eaux en générale	38
Figure 10 : Coupe type des forages selon les données lithologiques	40
Figure 11 : Carte d'épaisseur d'altération mouillée	43
Figure 12 : Illustration de l'épaisseur de l'altération saturée à Ouagadougou.....	43
Figure 13 : Carte piézométrique avec les forages (points bleu) de la région de Ouagadougou	45
Figure 14 : Illustration du toit du socle dans la région	45
Figure 15 : Réponse du piézomètre du CIEH face aux épisodes pluvieux.....	47
Figure 16 : Réponses des piézomètres (QP121 ;QP106 ;QP98 ;QP104) face aux épisodes pluvieux.	48
Figure 17 : Illustration du cycle global de l'eau.....	51
Figure 18 : Illustration des mécanismes de recharges (Lerner, 1997 ; modifié)	53
Figure 19 : Schéma conceptuel du bilan de Thornthwaite	54
Figure 20 : Situation des différents piézomètres et forages.....	61
Figure 21 : Carte de transmissivité de la région de Ouagadougou	62
Figure 22 : Variation annuelle des volumes d'eau parvenus au piézomètre du CIEH	70

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1 : Données utilisées et leurs provenances	24
Tableau 2 : Teneurs en ^{18}O et ^2H des eaux souterraines de Ouagadougou en ($\%_0$).....	35
Tableau 3 : Récapitulatif des données sur les forages.....	40
Tableau 4 : Piézomètres choisis pour l'étude.....	46
Tableau 5 : Caractéristiques hydrodynamiques.....	61
Tableau 6 : Calcul mensuel du cumul des variations par an dans la nappe profonde	67
Tableau 7 : Calcul mensuel du cumul des variations par an dans les altérites	68
Tableau 8 : Valeurs de recharge par la méthode des variations du niveau piézométrique.....	69

LISTE DES SIGLES ET ABBREVIATIONS

2Ie : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

AEP : Approvisionnement en eau potable

BUMIGEB : Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina

BUNASOLS : Bureau National des Sols du Burkina Faso

CIEH : Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques

DGRE : Direction Générale des Ressources en Eau

DMM : Droite Météorite Mondiale

MCD : Modèle Conceptuel de données

MCT : Modèle Conceptuel de Traitement

MERISE : Méthode d'Etude et de Réalisation Informatique par sous-ensemble

MLD : Modèle Logique de Données

MOT : Modèle Organisationnel de Traitement

MPD : Modèle Physique de Données

ONEA : Office National de l'Eau et l'Assainissement

SGBD : Système de Gestion de Base de Données

SGBD-R : Système de Gestion de Base de Données Relationnelles

SQL : Structured Query Language (Langage d'Interrogation Structuré)

UNEP : United Nations Environmental Programme

UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture.

Auteur : Missa HIE, ingénieur 2iE-IAST

2iE/DESA/GVEA/DIME

Professeurs responsables de l'encadrement

Dr. Angelbert BIAOU

Hydraulique-Hydrogéologie à 2iE

M .Sina THIAM

Expert SIG et Base de Données à 2iE

THEME

***Etude géochimique et piézométrique des eaux souterraines de
la région de Ouagadougou***

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

HIE. M., 2009. *Etude géochimique et piézométrique des eaux souterraines de la région de Ouagadougou*
.Mémoire de fin d'étude de Master d'Ingénierie de 2iE, Ouagadougou, Burkina Faso

INTRODUCTION GENERALE

A.CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

La région de Ouagadougou, au centre du Burkina Faso, est bâtie sur une formation de socle cristallin et cristallophyllien du paléoprozoïque. D'une manière générale, la structure et le fonctionnement des aquifères de ces formations (socle) restent mal connus malgré des études récentes de recherches et d'exploitation des eaux souterraines dans ces formations par des auteurs comme entre autres : SAVADOGO, 1984.

D'après OUANDAOGO/YAMEOGO, 2008, les aquifères de cette région ne sont très bien caractérisés, ni dans leur nature, ni dans leur fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique ; les rares études les concernant sont restées au stade prospectif.

L'alimentation en eau de la région est assurée essentiellement par les eaux de surface. Cependant, un certain nombre d'ouvrage de captage (puits et forages) sont érigés pour capter ces aquifères qui contribuent en partie à la mise à disposition de l'eau pour de nombreuses activités telles que les cultures irriguées, la production d'eau minérale, d'où l'importance capitale de ces ressources en eaux souterraines. Aujourd'hui l'état des connaissances sur la reconstitution et la qualité de ces eaux souterraines est très limité et les sollicitations appliquées aux aquifères deviennent de plus en plus intenses : augmentation des prélèvements d'eau, rejets accrus de polluants dans l'environnement,... et se traduisent par une dégradation de l'état quantitatif et qualitatif de cette ressource.. Cependant elles présentent actuellement des indices alarmants et une indéniable vulnérabilité : Baisse du niveau de l'aquifère, diminution des débits ou tarissement des sources et surtout un risque très sérieux de pollution.

C'est ainsi que face à ce besoin de plus en plus croissant de la ressource, et face à la forte évaporation de cette région, il serait intéressant de se lancer dans la connaissance de ces ressources souterraines afin de comprendre leur fonctionnement et mieux les quantifier pour leur gestion optimale.

La présente étude dont la thématique est : «Etude géochimique et piézométrique des eaux souterraines de la région de Ouagadougou», s'inscrit dans le cadre d'un mémoire de fin d'étude de Master d'ingénierie de 2iE et se propose d'étudier le fonctionnement hydrique et hydrochimique de l'aquifère de socle de Ouagadougou, contribuant ainsi à une amélioration

de l'état des connaissances des ressources en eaux souterraines de cette région; à la gestion et à la protection de ces dites ressources.

B.OBJECTIFS DE L'ETUDE

Ce travail s'attèle principalement à la mise en place d'une base de données constituée de données piézométriques, physico-chimiques, météorologiques, hydrodynamiques, évapotranspiration qui servira de base à l'étude hydrogéologique du système aquifère de la région de Ouagadougou.

Spécifiquement, nous nous attachons à:

- Mettre en place une base de données à partir des données collectées nécessaires à une modélisation hydrogéologique des aquifères de la région de Ouagadougou ;
- Identifier et caractériser la dynamique des différents aquifères et types d'eaux souterraines présents dans la région de Ouagadougou à partir des paramètres physico-chimiques, des traceurs isotopiques et des données sur les forages.
- Estimer la recharge de ces aquifères à partir de l'étude de l'évolution temporelle des niveaux piézométriques des nappes en fonction des précipitations.

Le travail est orienté sur trois (03) points :

- La collecte des données nécessaires à l'étude;
- La mise en place de la base de données ;
- L'étude du système aquifère.

C.APPROCHE METHODOLOGIQUE

Pour atteindre les objectifs fixés par les termes de références (TDR) dans ce travail de recherche, la démarche adoptée s'articule autour des points ci-après :

❖ Phase de synthèse générale

i) Travaux préliminaires

C'est la phase d'appropriation de la thématique notamment l'analyse du TDR pour la compréhension des termes et travail demandé en réalisant le cadre logique. Les différentes données nécessaires à l'étude seront collectées dans des structures que l'on identifiera.

Ces travaux consistent à :

- Faire une recherche bibliographique pour une connaissance générale sur les systèmes de gestion des bases de données (SGBD) et sur l'hydrogéologie des milieux aquifères de socle cristallin afin d'identifier les données dont nous avons besoin et les structures capables de nous les fournir. Il s'agit de rassembler et exploiter le maximum de documents relatifs aux bases de données, à la mobilisation et au suivi des eaux souterraines dans la zone (Suivi piézométrique au Burkina, Études antérieures du CIEH, du BUMIGEB, études de recherche, etc.). Cette phase d'étude s'est essentiellement faite à la bibliothèque du 2iE, auprès de personnes ressources et sur Internet.

Une fois l'identification des structures faite, nous avons, pour y faciliter notre accès et la mise à notre disposition des différentes données, adressé une lettre aux directeurs généraux des dites structures. Il s'agit pour nous de leur expliquer le but de notre travail.

- Prendre en main différents logiciels utiles à notre étude notamment :
 - Arc Gis 8.3** pour la cartographie ;
 - Microsoft ACCESS** pour l'implémentation de la base de données ;
 - Surfer 8** pour le tracer des cartes piézométriques, d'épaisseurs d'altération... ;
 - Power AMC** pour la création des modèles conceptuels de la base de données.

ii) Travaux de terrain

Ceux-ci ont concernées principalement la visite des différentes structures identifiées pour la collecte des données. Notons que cela n'était pas aisé compte tenu de certains faits à savoir : le manque de moyens de déplacement, le traitement tardif des courriers que nous avons déposés au sein des structures empiétant du coup sur notre planning de travail.

❖ Phase d'analyse et de traitement des données

C'est l'ossature de l'étude et la phase de compilation des données. Il s'agit entre autres de :

i) La synthèse et l'analyse des différentes données connexes mises à notre disposition ;

Nous avons effectué une analyse critique des données recueillies afin de mesurer leur qualité. L'étude de l'homogénéité et/ou de la stationnarité des différentes données évoluant dans le

temps notamment les données météorologiques, piézométriques, physico-chimiques est importante avant toute exploitation de celles-ci dans toute étude hydrogéologique.

Les données ont été analysées sous l'angle des lacunes (discontinuité), d'éventuelles erreurs et d'incohérences entre les valeurs mesurées. Ces lacunes représentent les taux d'années dont les données ne sont pas disponibles. Les années prises en compte sont donc des années sans lacune quant aux valeurs mensuelles. Les erreurs et incohérences seront corrigées en prenant en compte uniquement les valeurs moyennes mensuelles des mesures.

Les données ont été saisies et traitées sous EXCEL afin de faciliter leur insertion dans la base de données car certaines ont été fournies sur papier.

En somme, les données accumulées nous ont permis de réaliser la base de données, une coupe hydrogéologique, des diagrammes, des courbes d'évolution temporelle et des cartes. Suivant la nature des données et en fonction du type de résultat recherché, un outil spécifique de traitement a été adopté.

ii) Conception de la base de données

Elle a été conçue conformément à la méthode MERISE. Cependant toutes les étapes de cette méthode n'ont pas fait l'objet de la présente étude car la nécessité de certaines étapes n'était pas avérée.

Nous avons dressé un tableau regroupant toutes les informations recueillies, dans lequel nous avons défini pour chaque information, son code, son type (texte, numérique...) et sa description (unité, lien dans la détermination d'autres informations). Ensuite sur la base de ce tableau, nous avons identifié toutes les entités (tables) que nous allons générer ainsi que les champs constitutifs de ces différentes entités. Les règles de gestion de chaque entité nous ont permis d'établir les cardinalités entre celles-ci. Notons que pour des contraintes liées à l'utilisation de la base de données pour notre étude du système aquifère, nous nous sommes permis de définir certaines règles de gestion. Tout ce travail préliminaire nous a permis de définir le modèle conceptuel de données (MCD), de générer le modèle physique de données (MPD) à l'aide du logiciel POWER AMC et de choisir le logiciel qui servira à la mise en place de la base de données. Enfin pour l'utilisation de cette base de données pour notre étude, nous avons passé en revue toutes les informations à calculer et à générer

automatiquement ainsi que les différents logiciels qui serviront à cette tâche. Cela aurait permis de créer un lien entre ces logiciels et la base de données qui permettra à partir de « commandes », d'afficher différents résultats (valeurs calculées, courbes, cartes etc...).

iii) L'étude du système aquifère par :

➤ L'identification et la caractérisation de la dynamique des aquifères de la région

Une classification des eaux sur la base de leur faciès hydrochimique et leur caractéristiques hydrodynamiques permet d'obtenir des informations précieuses sur l'identification des unités aquifères, la minéralisation des eaux souterraines ainsi que sur les conditions de recharge des nappes. Elle se fera à travers :

✓ L'analyse des données hydrochimiques des eaux souterraines et des données sur les forages de la zone d'étude.

Nous nous sommes essentiellement basé sur les résultats d'analyse des eaux souterraines d'une étude antérieure de SOME, 2006 dans le cadre du projet régional de l'UNESCO en partenariat avec l'UNEP intitulé: « URBAN POLLUTION OF SURFICIAL AND GROUNDWATER AQUIFERS IN AFRICA » qui a effectué une étude sur la qualité des eaux souterraines de Ouagadougou afin de déterminer non seulement les zones vulnérables mais aussi les paramètres physico-chimiques qui sont à l'origine de la dégradation de la qualité des eaux. L'objectif final étant la mise au point d'un dispositif d'alerte précoce sur la pollution des eaux souterraines. A ces données nous avons ajouté celles des analyses effectuées par OUANDAOGO/YAMEOGO, 2008, en ce qui concerne la géochimie isotopique des eaux souterraines.

Ainsi nous avons, avec le logiciel « **diagrammes2.0** » et EXCEL obtenu l'hydrofaciès de ces eaux à partir du diagramme de Piper et des graphes de l'évolution de la teneur en Deutérium ($2H$) en fonction de celle en oxygène (^{18}O).

Les données sur les forages ont permis d'obtenir le log type des forages de la région ainsi que les cartes piézométriques, d'épaisseur et de transmissivité.

✓ L'analyse des séries temporelles des niveaux piézométriques

Cette analyse passe par le tracé et l'interprétation des courbes de fluctuation des niveaux piézométriques sur la base des mesures réalisées sur l'ensemble du réseau

piézométrique opérationnel dans la région de Ouagadougou. Pour mettre en évidence ces fluctuations, nous avons choisi une série d'années allant de 1978 à 2004 pour le piézomètre du CIEH et de 2001 à 2004 pour les autres piézomètres. Les piézomètres n'ayant pas fait l'objet d'un suivi régulier n'ont pas été pris en compte. Nous analyserons les variations du niveau des différents aquifères faces aux épisodes pluvieux afin d'identifier les facteurs susceptibles d'en être la cause. Cela nous permettra ainsi, de comprendre leur fonctionnement et le processus de leur recharge.

✓ **L'estimation de la recharge des aquifères**

Plusieurs méthodes d'estimation de la recharge des aquifères existent. Mais pour obtenir une estimation réaliste de cette recharge au niveau de Ouagadougou, nous ferons le choix entre deux méthodes (Bilan de Thornthwaite et Méthode de fluctuation des niveaux piézométriques) compte tenu du temps imparti et surtout de la disponibilité des données. Cependant conformément aux termes de références, nous estimerons la recharge par la méthode de fluctuation des niveaux piézométriques tout en n'omettant pas d'exposer le principe du Bilan de Thornthwaite. En effet la technique basée sur les variations des niveaux piézométrique semble être la mieux adaptée dans notre contexte climatique qui connaît une très grande variabilité de l'évapotranspiration et des précipitations. Elle met en évidence les eaux de pluie effectivement parvenues à la nappe. Selon N'DIAYE, 2008, c'est ce qui la différencie de l'approche THORNTHWAITE qui elle, est tributaire à la capacité de stockage en eau du sol et à l'uniformité de la pluviométrie et nous renseigne plutôt sur le moment où l'eau quitte les tranches supérieures de sol. Notre choix se justifie ainsi, au regard de tout cela mais surtout à cause de l'indisponibilité de données pédologiques nécessaires pour estimer la recharge par la méthode de THORNTHWAITE.

D.LE PLAN DU TRAVAIL

Ce travail de recherche est constitué d'une introduction générale, de quatre chapitres et d'une conclusion générale suivie des perspectives.

Il s'agira de présenter en introduction, le contexte et la problématique de cette étude, les objectifs à atteindre, la méthodologie pour y parvenir et la structure de notre travail.

Le chapitre I traite des généralités il s'agira de présenter la zone d'étude, la méthode MERISE et le système aquifère.

Le chapitre II traite de la conception de la base de données. Il s'agit, à partir des données collectées, de définir les modèles conceptuels afin de choisir le SGBD approprié pour la réalisation de l'application.

Les chapitres III et IV sont consacrés à l'étude du système aquifère. Le chapitre III portera sur l'étude du chimisme des eaux et dans le chapitre IV nous aborderons l'étude sur la dynamique des aquifères de la région. C'est le moment d'analyser et d'interpréter les différentes données afin de discriminer les aquifères et estimer leur recharge.

CHAPITRE I : GENERALITES

I. 1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I. 1.1 Situation géographique de Ouagadougou

La ville de Ouagadougou est située au centre du Burkina Faso dont elle est la capitale. Elle occupe une partie du bassin versant du Nakambé et répond aux coordonnées suivantes : $1^{\circ}28'$ à $1^{\circ}36'$ longitude ouest et $12^{\circ}20'$ à $12^{\circ}26'$ latitude nord. Avec un peu plus d'un million d'habitants, elle s'étend actuellement sur un espace de 15 km de rayon et est composée de six arrondissements et de trente (30) secteurs, avec des populations et des superficies inégalement réparties. Les densités les plus élevées s'observent dans les quartiers périphériques où s'exercent des activités socioprofessionnelles peu rémunératrices et où le raccordement au réseau d'eau potable est peu dense ou inexistant. Les populations s'y alimentent alors à partir de puits ou de forages à pompes manuelles.

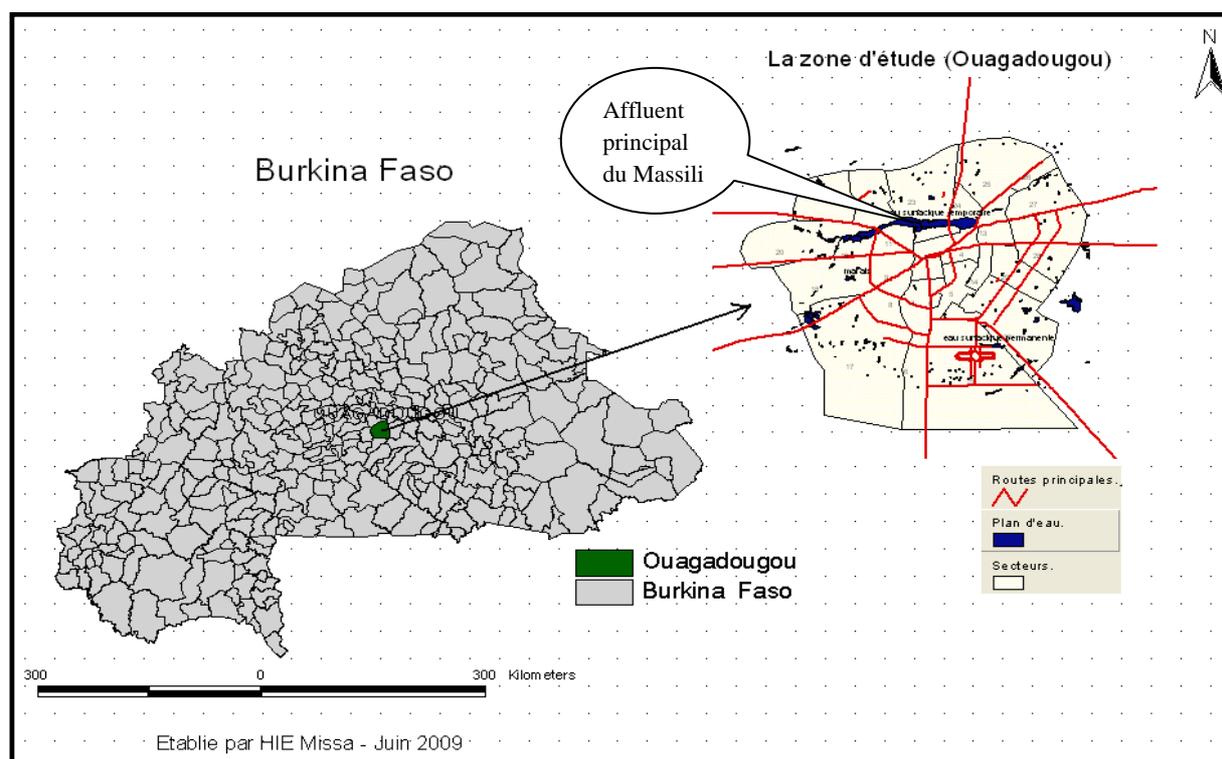


Figure 1 : Carte de présentation de Ouagadougou

I.1.2 Milieu naturel et physique

I.1.2.1- Le relief et le climat

Ouagadougou présente un relief aplani et monotone avec une altitude moyenne comprise entre 280 et 300 mètres, duquel émergent au sud-ouest, à l'ouest et au nord-est des buttes témoins de cuirasses latéritiques.

Le climat est très important dans la recharge des nappes aquifères et conditionne aussi très fortement la teneur en isotopes lourds du signal de pluie d'entrée.

La ville connaît un climat tropical chaud et peu humide commandé par une influence alternée des vents sahariens et des moussons océaniques qui détermine deux saisons : une saison de pluies de juin à septembre et une saison sèche d'une durée de 8 mois (octobre à mai) :

La saison sèche est liée à l'harmattan, vent chaud et sec soufflant sur tout le Burkina Faso d'octobre à mars et du Nord- Est vers le sud- Ouest. Les pluies se raréfient entre octobre et novembre avec cependant une baisse des températures en décembre, due à l'harmattan .La saison sèche se prolonge ensuite de décembre en Mai avec des températures atteignant fréquemment 40°C en Février et Mars.

La saison des pluies : Le Sahara surchauffé devient une zone de basses pressions aspirant les masses d'air océaniques. C'est la mousson qui se glisse sous l'harmattan dont elle est séparée par un plan incliné du sud vers le Nord appelé Front intertropical(F.I.T). Le FIT fait la navette entre la côte et le sud du Sahara. Il passe donc deux fois sur la ville de Ouagadougou. Le climat à Ouagadougou va dépendre de la progression du FIT et de l'ampleur des manifestations pluviales qui s'y rattachent.

Les pluies sont suivies à Ouagadougou depuis 1902. Elles commencent en juin et montrent dans les temps des variations énormes dans l'année et d'une année à l'autre. La courbe inter - annuelle a une allure en dents de scie (**figure2**), alternant périodes humides et périodes sèches. Le mois le plus pluvieux est celui d'août. On note depuis 1976, une baisse de la pluviométrie, même les périodes positives humides n'enregistrent guère plus de 900 mm/an. Les amplitudes des variations interannuelles sont atténuées avec des hauteurs pluviométriques comprises entre 600 et 800 mm.

La répartition des températures est moins contrastée que celle des pluies. On distingue une saison très chaude avec des pics de température au delà de 40°C à l’ombre pendant les mois de mars, avril et mai. De juin à novembre la saison est chaude et humide (**figure 3**).

Les effets conjugués de la température et de l’humidité relative font que l’on enregistre à Ouagadougou des prélèvements très élevés, par évaporation et évapotranspiration (respectivement 165.44 mm et 249.9 mm/mois mesurés entre 1961 et 1990) sur les barrages et les nappes d’eau qui se remplissent ou se rechargent plus ou moins bien chaque année en fonction des précipitations.

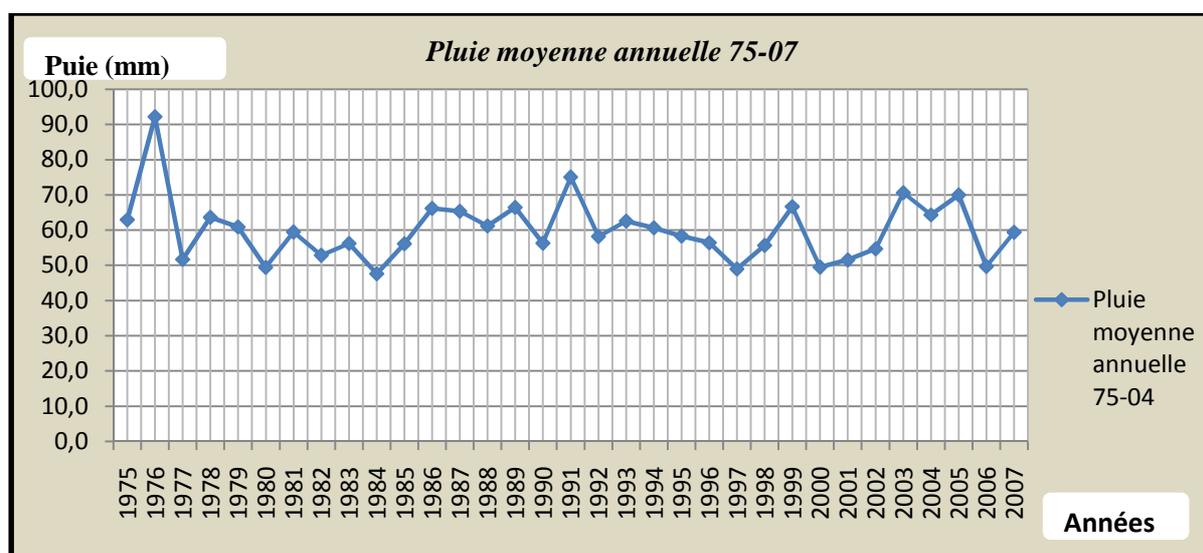


Figure 2 : Moyenne pluviométrique annuelle à Ouagadougou (1975-2007)

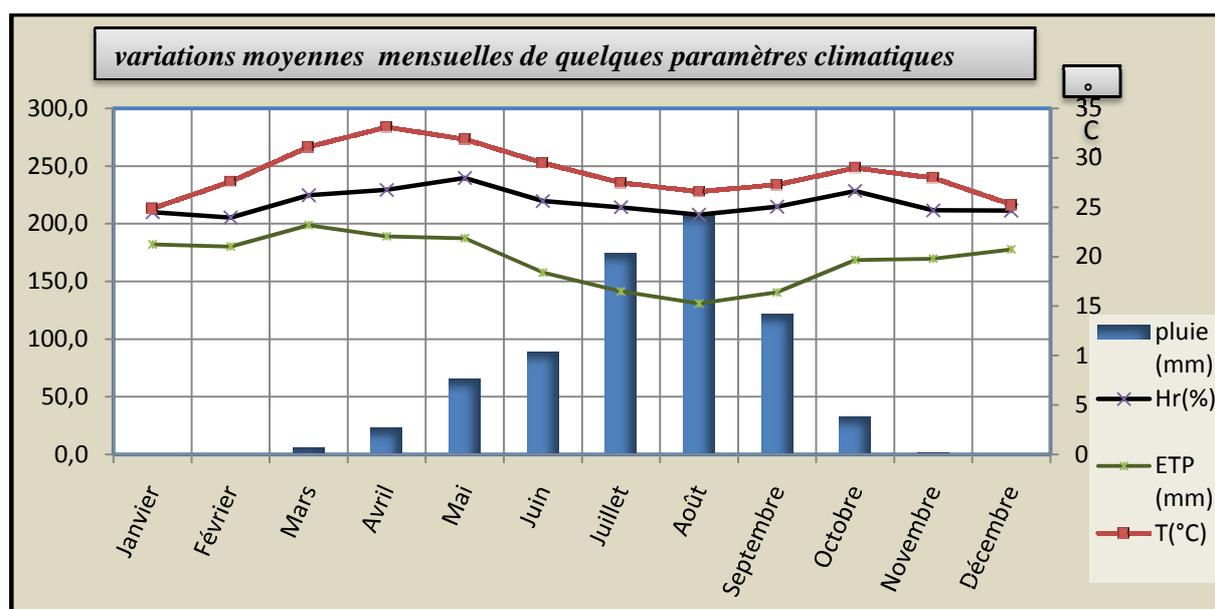


Figure 3 : Variation annuelles des paramètres climatiques à Ouagadougou

I. 1.2.2 -La pédologie et la végétation

Les études du BUNASOLS, 1998, montrent que les sols à Ouagadougou possèdent un taux de saturation très élevé (> 60%) et une faible capacité d'échange cationique(CEC) qui reste inférieur à 10 méq/100g. Ce sont des sols très acides avec un pH variant entre 4,5 et 4,9 ayant une importante réserve en eau utile (13,1 à 18,7%) soit 105,3 mm pour les 50 premiers centimètres et 199mm pour les 100 centimètres de profondeur effective.

La végétation à Ouagadougou est tributaire des sols et du climat. Le sol est presque nu à l'exception de quelques grands arbres appartenant aux espèces protégées comme *Acacia albida* et bien d'autres qu'on rencontre dans la région. Hormis le domaine classé de l'Etat et les « bois sacrés¹ », les formations végétales naturelles de la région sont menacées à la fois par les activités anthropiques et les aléas climatiques. On note ainsi un accroissement du ruissellement au détriment de l'infiltration dû au réseau de drainage des eaux pluviales constitué d'aménagements en canaux 'bétonnés'.

I. 1.2.3- Réseau hydrographique

La ville est drainée par des affluents du Massili qui se jette dans le Nakambé qui lui, joint ses eaux à celles des autres branches de la Volta au Ghana. L'affluent principal (**figure1**) qui traverse la ville est coupé par quatre barrages colinéaires (barrage de Boulmiougou sur la route de Bobo- Dioulasso, barrage n°1 route de Ouahigouya, barrage n°2 de Tanghin, barrage n°3 route de Kaya) Le dernier participait naguère à l'alimentation en eau potable de la ville. En effet, la capitale s'alimentait en eau potable à partir d'eau de surface du barrage n°3 situé au cœur de la ville et du barrage de Loubila édifié à 15 km au nord sur la route Ouagadougou-Kaya. Cependant depuis l'avènement du barrage de ziga (année 2004) ceux-ci ne participent plus à l'alimentation en eau potable de la ville. Les eaux des autres affluents drainant la ville sont endiguées par des canaux qui contournent le barrage n° 3 pour se rejoindre à l'Est de la ville. Un seul, celui de Kadiogo rejoint le barrage n°2.

¹ Lieux de culte

I.2 CONCEPTION DE LA BASE DE DONNEES

I. 2.1 La démarche MERISE

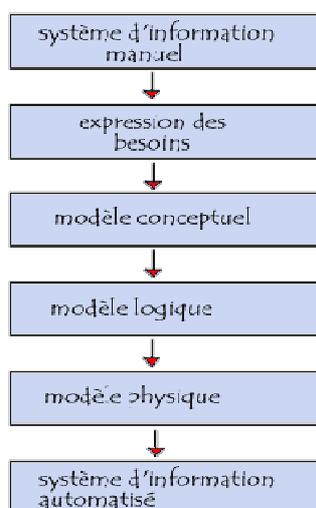
La méthode d'analyse MERISE a été créée vers 1977, par la volonté des autorités publiques françaises, désireuses de doter les administrations et les entreprises publiques d'une méthodologie rigoureuse tout en intégrant les aspects nouveaux pour l'époque : informatique, bases de données... Elle propose une approche de la conception séparant l'étude des données de celle des traitements, en avançant progressivement par niveaux. Chacun de ses niveaux a pour objectif principal de fournir un certain nombre de documents (MCD, MPD...) permettant ainsi la synthèse textuelle d'un processus de réflexion. Ces documents sont indispensables à l'élaboration et à la concertation autour de tout projet informatique.

La démarche MERISE propose trois niveaux de représentation qui constituent ce qu'on convient de nommer les trois cycles : le cycle d'abstraction, de vie et de décision.

Le concepteur déroule les trois cycles tout au long de son étude. A chaque étape du cycle de vie, les formalismes du cycle d'abstraction sont utilisés avec une précision de plus en plus grande et des décisions sont prises, d'ordre global au début puis de plus en plus détaillées à mesure qu'avancent les travaux.

Les trois cycles

- **Le cycle d'abstraction**



La conception du système d'information (SI) se fait par étapes, afin d'aboutir à un système d'information fonctionnel reflétant une réalité physique. Il s'agit donc de **valider** une à une chacune des étapes en prenant en compte les résultats de la phase précédente. D'autre part, les données étant séparées des traitements, il faut vérifier la concordance entre données et traitement afin de vérifier que toutes les données nécessaires aux traitements sont présentes et qu'il n'y a pas de données superflues. Cette succession d'étapes est appelée : cycle d'abstraction pour la conception des systèmes d'information:

Niveau conceptuel : à ce niveau sont représentées les informations et leurs relations d'une part, les utilisations qui en sont faites et les contraintes associées d'autre part en faisant abstraction de toute contrainte liée à l'organisation. A ce stade on se pose les questions "QUOI FAIRE?" et "AVEC QUELLES DONNEES?"

Niveau organisationnel ou logique : il exprime la réalité décrite au niveau conceptuel telle qu'elle est vécue par les acteurs quels qu'ils soient. A ce niveau aucune différence n'est faite entre les hommes et les machines pour autant que la dominante reste le "QUI ?" et le "OU ?" à l'exclusion du "COMMENT ?". On intègre à l'analyse les critères liés à l'organisation.

Le niveau opérationnel ou physique : c'est une représentation des moyens qui vont effectivement être mis en œuvre pour gérer les données ou activer les traitements. On apporte des solutions techniques et on répond à la question "COMMENT ?"

- **Le cycle de vie**

Ce cycle comporte trois grandes périodes :

- La **conception** ou période d'étude de l'existant puis du système à mettre en place.
- La **réalisation** qui recouvre la mise en œuvre et l'exploitation.
- La **maintenance** qui devra permettre au système d'évoluer et de s'adapter aux modifications de l'environnement et aux nouveaux objectifs jusqu'au moment où il ne sera plus capable de s'adapter et devra laisser la place à un nouveau système.

- **Le cycle de décision**

Tout au long de l'étude et de la maintenance, des décisions sont à prendre, très générales d'abord, puis de plus en plus ponctuelles. Les décisions globales doivent être prises par la structure dirigeante, mais à chaque niveau chacun doit être consulté. Les diverses décisions se prennent au vu des différents documents rédigés lors de l'avancement des travaux (dossier de choix, cahier des charges, etc.). La hiérarchie MERISE des décisions à prendre est la suivante :

- Découpage du SI en domaines
- Grandes orientations en matière de gestion, d'organisation et de solutions techniques.
- Planification du développement.
- Choix entre procédures manuelles et automatisées.

- Choix entre procédures temps réel et automatisées.
- Détermination des postes de travail et de leurs tâches.
- Dessins d'états, grilles d'écran, etc.

I. 2.2 Les étapes de la réalisation du système d'information

- **Le schéma directeur**

Il consiste à étudier le SI d'une manière globale et à le découper en domaines, un domaine étant un ensemble de processus du SI utilisant des données communes et présentant peu d'échanges avec les autres processus.. Les grandes orientations sont fixées et un plan de développement doit en résulter.

- **L'étude préalable**

Elle est menée pour chaque domaine à étudier par des utilisateurs et des organisateurs en liaison avec la direction générale et avec les informaticiens. On part de la situation existante pour laquelle on restitue le MOT et le MLD actuels. On gomme l'organisation existante et on en déduit le MCT et le MCD actuels. Tenant compte des objectifs fixés par la structure dirigeante et des critiques faites lors de l'étude de l'existant, on modifie le MCT et le MCD pour obtenir le MCT et le MCD Bruts futurs.

On imagine alors plusieurs scénarios pour l'organisation nouvelle et on établit pour chacun d'eux le graphe de circulation des procédures les plus représentatives (MOT futur partiel). Sur le plan opérationnel on définit le matériel à utiliser, les logiciels à acquérir et on vérifie que les volumes d'informations sont compatibles avec le matériel défini (ou existant).

On termine par une évaluation de chaque scénario, en termes de coûts, d'avantages, d'impact sur l'organisation, etc.

La comparaison de ces scénarios doit permettre le choix de celui qui semble le plus approprié.

- **L'étude détaillée**

Pour chaque domaine, et à partir du scénario choisi lors de l'étude préalable, on procède à une étude détaillée : MOT – Validation du MCD – MLD.

Le domaine peut être découpé en projets, auxquels cas l'étude est menée par projet.

Chaque projet sera découpé en applications et un cahier des charges utilisateurs sera rédigé par application.

Dans notre cas l'étude c'est faite en globale et une seule application réalisée (voir la partie conception).

- **L'étude technique**

Elle comporte : l'optimisation du MLD - le MPD et le MOT. Elle donne lieu à la rédaction d'un cahier des charges de réalisation par application.

- **La réalisation**

Elle comporte, par application : la programmation et les tests - la mise en œuvre (lancement progressif en exploitation, implantation des fichiers, formation du personnel, etc.)

- **La maintenance**

Modification des programmes suite à des erreurs constatées à l'usage ou suite à des demandes des utilisateurs.

Le contenu précis de chaque étape peut prendre des aspects très divers selon la méthode retenue par le concepteur. En effet MERISE n'est pas une méthode figée mais un ensemble de principes et d'outils que l'on peut adapter à chaque situation.

I. 2.3 Concepts utilisés et formalismes

Notre étude n'a pas tenu compte de toutes les étapes et concepts de la démarche MERISE. Conformément aux données, les modèles conceptuels utilisés sont le MCD et le MPD que nous présentons ainsi :

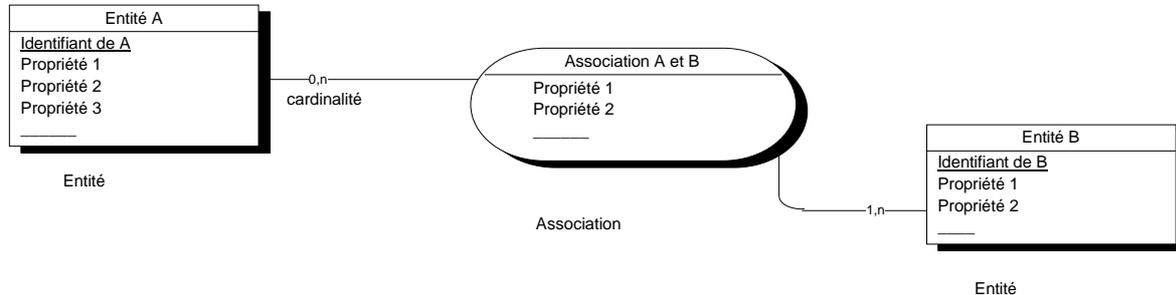
I. 2.3.1 Le modèle conceptuel de données(MCD)

Définition

Le modèle conceptuel des données (MCD) est la formalisation de la structure et de la signification des informations décrivant des objets et des associations perçus d'intérêt dans le domaine étudié, en faisant abstraction des solutions et contraintes techniques informatiques d'implantation en base de données. Il permet de conceptualiser les contraintes d'intégrité qui

doivent être maintenues sur les données pour refléter de façon correcte les règles de gestion de l'entreprise. Il faut apparaître les données manipulées par le domaine.

Formalisme



Concepts

- **Entité:** Une entité est la représentation d'un élément matériel ou immatériel ayant un rôle dans le système que l'on désire décrire. On appelle classe d'entité un ensemble composé d'entités de même type, c'est-à-dire dont la définition est la même.



Les classes d'entités sont représentées par un rectangle. Ce rectangle est séparé en deux champs:

- le champ du haut contient le libellé. Ce libellé est généralement une abréviation pour une raison de simplification de l'écriture. Il s'agit par contre de vérifier qu'à chaque classe d'entité correspond un et un seul libellé, et réciproquement.
- le champ du bas contient la liste des propriétés de la classe d'entité.

- **Association :** Une association (appelée aussi parfois relation) est un lien sémantique entre plusieurs entités. Une classe de relation contient donc toutes les relations de même type (qui relient donc des entités appartenant à des mêmes classes d'entité). Elle peut lier plus de deux classes d'entité.

Voici les dénominations des classes de relation selon le nombre d'intervenants:

- une classe de relation récursive (ou réflexive) relie la même classe d'entité
- une classe de relation binaire relie deux classes d'entité
- une classe de relation ternaire relie trois classes d'entité

- Une classe de relation n-aire relie n classes d'entité

Les classes de relations sont représentées par des hexagones (parfois des ellipses) dont l'intitulé décrit le type de relation qui relie les classes d'entité (généralement un verbe).

- **Identifiant** : Un identifiant est un ensemble de propriétés (une ou plusieurs) permettant de désigner une et une seule entité. L'identifiant est une propriété particulière d'un objet telle qu'il n'existe pas deux occurrences de cet objet pour lesquelles cette propriété pourrait prendre une même valeur. Le modèle conceptuel des données propose de souligner les identifiants (parfois de les faire précéder d'un #). Ainsi, chaque classe d'entité doit posséder au moins un attribut identifiant, et l'ensemble de ses attributs identifiants doivent être renseignés à la création de l'entité.

- **Propriété** : La propriété est une information élémentaire, c'est-à-dire non déductible d'autres informations, qui présentent un intérêt pour le domaine étudié. Dans le modèle conceptuel des données figurent toutes les propriétés, identifiées par un nom, qui présentent un intérêt pour le domaine à étudier. Ce nom doit être le plus explicite possible : à sa seule lecture on doit donc pouvoir se faire une idée de ce que représente la propriété. En outre, l'identification de chaque propriété consiste à garantir une bijection entre l'ensemble des noms et l'ensemble des propriétés à gérer. On devra donc exclure les **synonymes** qui correspondent à deux noms différents pour identifier la même propriété et les **polysèmes** qui représentent deux propriétés différentes ayant le même nom. Enfin, le principe de **non-redondance** impose que chaque propriété, correctement identifiée, n'apparaisse qu'une seule fois dans le modèle.

- **Cardinalité** : Les cardinalités permettent de caractériser le lien qui existe entre une entité et la relation à laquelle elle est reliée. La cardinalité d'une relation est composé d'un couple comportant une borne maximale et une borne minimale, intervalle dans lequel la cardinalité d'une entité peut prendre sa valeur:

- la borne minimale (généralement 0 ou 1) décrit le nombre minimum de fois qu'une entité peut participer à une relation ;
- la borne maximale (généralement 1 ou n) décrit le nombre maximum de fois qu'une entité peut participer à une relation ;

Un couple de cardinalités placé entre une entité E et une association A représente le nombre minimal et maximal d'occurrences de l'association A qui peuvent être « ancrées » à une occurrence de l'association E.

I. 2.3.2 Les règles de passage du MCD au MPD

Les entités deviennent des tables, les propriétés des entités deviennent les colonnes des tables et les identifiants deviennent les clés primaires des tables.

Lorsque l'association binaire porte un lien de cardinalité $x, 1$ où $x = 0$ ou 1 et un autre de cardinalité x, n où $x = 0$ ou 1 , il y a migration des identifiants de l'entité liée au lien de cardinalité $0, n$ ou $1, n$ vers l'autre entité.

Lorsque l'association binaire porte deux liens de cardinalité x, n où $x = 0$ ou 1 l'association devient une table dans le MPD. Les identifiants des entités liées migrent dans cette table

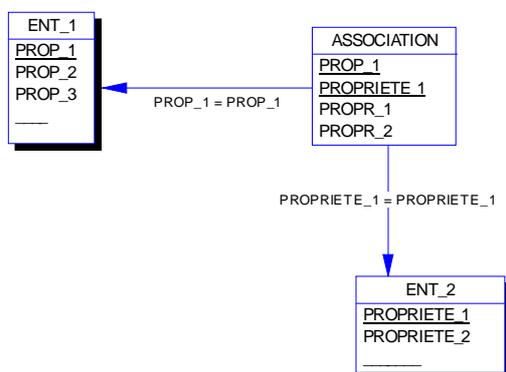
Relation n-aire (quelles que soient les cardinalités) l'association devient une table dans le MPD. Les identifiants des entités liées migrent dans cette table.

I.2.3.3 Le modèle physique de données(MPD)

Définition

Le modèle physique de données (MPD) est la visualisation graphique de la manière dont les données seront structurées dans la base de données.

Formalisme



Concepts

Etant donné que notre future base de données sera établie selon le modèle relationnel, les concepts ci-dessous empruntent la terminologie de ce modèle qui fut défini par le mathématicien CODD et est fondé sur la théorie des ensembles. L'idée de cette théorie est de disposer les données sous forme de tableaux à deux dimensions appelés table ou relations.

- **Table** : une table correspond à une entité ou une association du MCD, elle est constituée de lignes et de colonnes.
- **Ligne** : une ligne correspond à la notion d'occurrence d'entité ou d'association. On parle aussi d'enregistrement.
- **Colonne** : la notion de colonne correspond à celle de propriété.
- **Clé primaire** : la notion de clé primaire correspond à celle d'identifiant.
- **Clé étrangère** : une colonne d'une table est dite clé étrangère si elle correspond à une clé primaire d'une autre table. La clé primaire permet d'accéder aux colonnes de la table référencée en évitant les répétitions.

I.3 ETUDE DU SYSTEME AQUIFERE

I. 3.1 Définition et typologie des aquifères

I. 3.1.1 Définitions

L'aquifère est défini, selon le dictionnaire français d'hydrogéologie, comme un réservoir souterrain, une formation géologique perméable pouvant contenir de l'eau en quantités exploitables et permettant son écoulement dans des conditions hydrauliques favorables.

Le milieu aquifère est donc le réservoir (le contenant) qui abrite la nappe d'eau souterraine définie comme l'ensemble de l'eau saturant un milieu poreux (le contenu). Cette eau est en communication hydraulique continue que ce soit par des pores, des fissures ou des chenaux DIENG, 1999.

I. 3.1.2 Typologie des aquifères

Cet essai de classification des aquifères s'inspire des travaux de DIAW, 1992.

- ❖ **Aquifères à nappe captive** : Ici l'eau est sous pression et se trouve emprisonnée entre deux couches imperméables (Toit et mur de la nappe). Ce type d'aquifère subit une pression égale à la colonne de terre qui le surmonte
- ❖ **Aquifères à nappe semi-captive** : Ils sont souvent appelés aquifères à drainance. L'eau, dans la formation hydrogéologique, est comprise entre deux couches pouvant être toutes semi-perméables ou bien l'une perméable, l'autre semi-perméable.

- ❖ **Aquifère avec nappe à surface libre** : Dans cette situation, l'eau n'est pas sous pression. La surface libre est à la pression atmosphérique. Le milieu aquifère comporte une zone non saturée surmontant la surface libre et une zone saturée en contact direct avec la nappe. Le niveau piézométrique est très influencé par le pompage et subit des fluctuations plus complexes que dans le cas des nappes captives.

I. 3.2 Contexte géologique

Ouagadougou repose sur un socle cristallin constitué essentiellement de granitoïdes qui sont :

- Des granodiorites, tonalites et diorites quartzifères foliées à l'extrémité sud-ouest de la ville,
- Des granodiorites à amphibole et biotite spatialement associées à une bande de roches gneissiques à amphibole et biotite au nord-ouest et au sud de Ouagadougou,
- De granite à grain moyen à biotite et amphibole et de granite porphyroïde à biotite et rare amphibole. Ces deux faciès constituent une entité énorme qui prédomine au nord-ouest et à l'est de la ville.

Ces formations sont traversées par quelques intrusions de dolérites, de pegmatites, d'aplites et de rhyolites et rhyodacites.

Tout cet ensemble appartenant au domaine Baoulé-mossi mis en place entre 2215 et 2060 Ma au cours du cycle éburnéen avec son cortège de métamorphisme général et de granitisation qui a subi au niveau de la région de Ouagadougou une intense fracturation suivant deux directions prédominantes : NE-SO et NO-SE (**figure 4**). Le nombre de forages à haut rendement (débit supérieur à 10m³/h) de l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA) implantés sur les fractures majeures ou leurs intersections repérées toujours par géophysique montre que les fractures cachées par les altérites ont été très sous évaluées au niveau de la cartographie géologique.

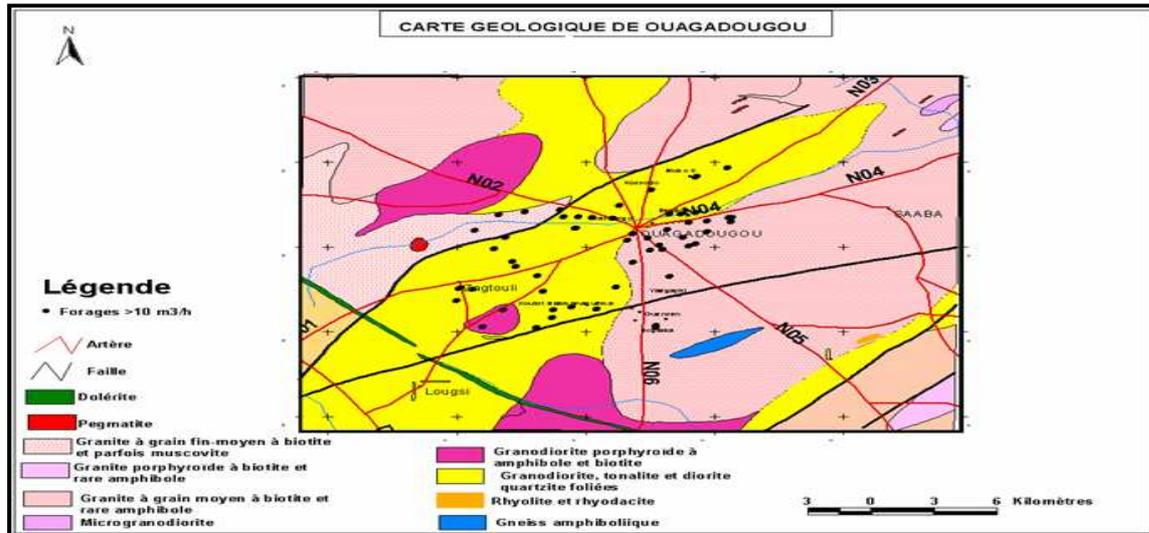


Figure 4 : Carte Géologique de la région de Ouagadougou

I. 3.3 Contexte hydrogéologique et catégories d'aquifères

I. 3.3.1 Les aquifères des formations superficielles

Les sables éoliens peuvent former des aquifères de nappe peu étendus, tandis que les alluvions aquifères holocènes à caractère temporaire s'installent en période de crue. Les cuirasses ferrugineuses, dotées d'une bonne porosité et perméabilité fissurale, sont susceptibles avec les carapaces ferrallitiques sous-jacentes, lorsqu'il y a imbibition, de fournir d'excellentes nappes aquifères. Les arènes fines, bien qu'épaisses et discontinues, constituent des aquifères intéressants si les proportions des argiles sont faibles. Dans les profils d'altération ferrugineuse, on enregistre des aquifères perchés. La plupart des puits traditionnels, de moins en moins développés dans les agglomérations urbaines, sont alimentés par des aquifères superficiels temporaires exploités pour réaliser l'irrigation en culture maraîchère ou pour assurer l'alimentation en eau du bétail en milieu rural.

I. 3.3.2 Les aquifères de socle

Le concept d'aquifère de socle SAVADOGO, 1984 exprime « un système constitué d'un recouvrement semi-perméable (réservoir d'altérites) surtout capacitif et alimenté par la surface, surmontant un aquifère de fissures ou de fractures (socle au sens strict), captif, drainant la couverture, à fonction essentiellement conductrice ». Cette définition évoque le

rôle des altérites et autres arènes grenues du socle altéré et fissuré et leur interaction dans le mode de concentration des eaux d'infiltration souterraines.

Dans les régions de socle cristallin, les seules réserves d'eau souterraine sont liées aux altérites et à la frange fissurée induites par les fractures qui affectent le « bed-rock ». Le niveau de productivité des horizons du profil d'altération permet de distinguer deux types de nappes (**figure 5**) : une superficielle constituée par la base noyée de la cuirasse latéritique ou les alluvions des cours d'eau, l'autre profonde correspondant aux arènes et à la frange fissurée du substratum SAVADOGO, 1984.

Au niveau de la région de Ouagadougou le profil d'altération est complet. Les derniers niveaux de cuirasse latéritique d'âge quaternaire sont entaillés par les cours d'eau qui traversent la ville. Ils donnent naissance à des nappes superficielles de cuirasse noyée exploitées par de nombreux puits traditionnels ou modernes. La nappe des arènes et de la roche fissurée est exploitée par des forages dont un bon nombre implanté par prospection géophysique sur des nœuds de fractures majeures sont très productifs (débit > 35 m³/h) et viennent en appoint aux eaux de surface pour différents besoins en eau de la ville.

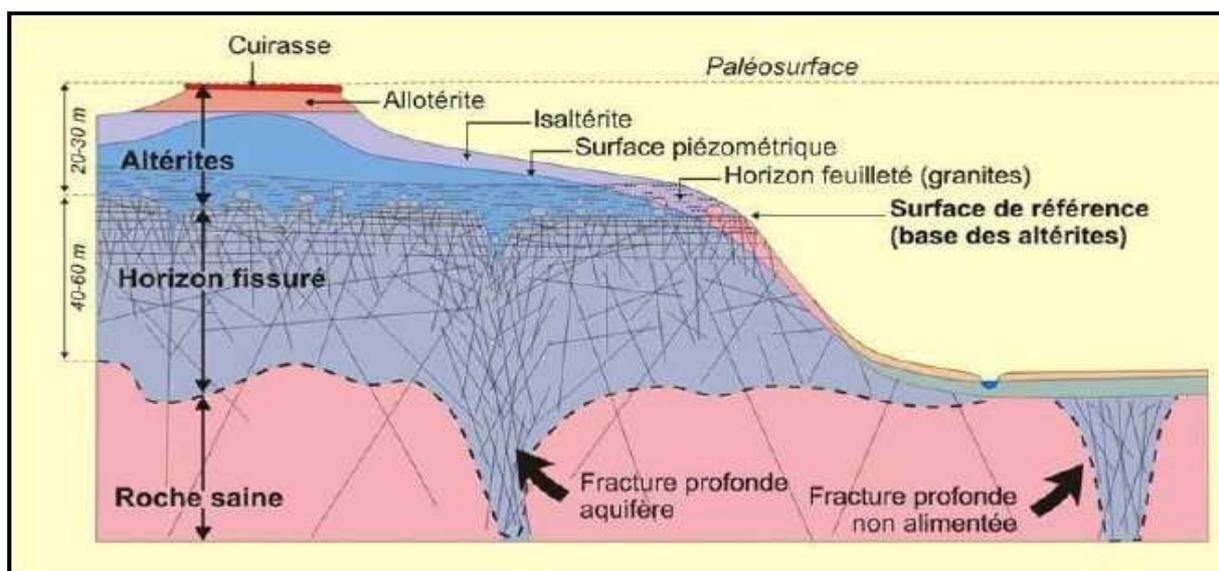


Figure 5 : Profil d'altération théorique dans un aquifère en zone de socle, recoupé par la topographie actuelle.

Selon HYDROEXPERT², les aquifères de Afrique de l'Ouest peuvent être classés en trois grandes catégories :

❖ **Aquifères continus** : Ils sont constitués par des couches meubles et poreuses localisées dans des bassins sédimentaires. Leurs réserves en eau sont importantes, leurs débits spécifiques assez favorables avec une profondeur souvent assez forte, 40 m et au-delà.

❖ **Aquifères discontinus** : On les retrouve dans les fissures du socle gréseux ou granitique, qui fournissent des débits souvent faibles et des profondeurs statiques de l'ordre de 20 à 30 m. Le BRGM a élaboré une méthodologie de gestion durable de ces aquifères à partir des hauteurs et débit d'utilisation ;

❖ **Aquifères de nappes à faible profondeur et de petite taille** : On les rencontre dans des contextes variés tels que les dépôts alluviaux des ouadis soudano-sahélien, les périphéries des mares temporaires. Cette catégorie d'aquifères est dispersée dans l'espace et n'a fait l'objet que d'études ponctuelles.

Ouagadougou se situe dans la zone de socle granitique, globalement ses aquifères sont considérés comme discontinus.

² Société d'ingénierie spécialisée dans le domaine de la maîtrise des eaux souterraines et des transferts d'éléments associés, en particulier les pollutions.

CHAPITRE II : REALISATION DE LA BASE DE DONNEES

II.1 ANALYSE ET CRITIQUE DES DONNEES COLLECTEES

II.1.1 Etat des lieux des données disponibles

Dans cette étude, les données rassemblées (collectées) proviennent essentiellement des structures ci-après :

Tableau 1 : Données utilisées et leurs provenances

Données	Sources
Météorologiques (Précipitations, ETP, Vent, Insolation, Humidité relative...)	Direction Nationale de la Météorologie
Sur les forages	ONEA ; OUANDAOGO/YAMEOGO, 2008.
Piézométriques (Piézomètres, mesures)	DGRE ; Laboratoire d'hydrogéologie de l'université de Ouagadougou
Pédologiques	BUNASOLS-Ouagadougou
Géologiques	BUMIGEB ; SOME, 2006
Analyses physico-chimiques	SOME,S,2006
isotopiques	OUANDAOGO/YAMEOGO,2008.

II.1.2 Analyse critique des données collectées

D'un point de vue hydrogéologique, les données disponibles sur le suivi des eaux souterraines à Ouagadougou sont très peu. Il n'existe presque pas de piézomètres, seulement 3 ouvrages dont le suivi des mesures de certains n'est pas régulier. En ce qui concerne les sols, il n'existe pas de données sur lesquelles l'on puisse se baser pour entreprendre une étude hydrogéologique du système aquifère (estimation de la recharge par la méthode de THORNWAITE par exemple). Les seules données pédologiques que nous avons pu avoir au niveau de BUNASOLS-Ouagadougou concernent des études menées à la périphérie de la ville à la recherche de terres propices à l'agriculture.

Les données en ce qui concerne les prélèvements d'eau par l'ONEA n'ont pas été obtenues car l'exploitation des forages a été arrêtée depuis l'alimentation en eau de la ville par le barrage de Ziga. Cependant, selon les rapports techniques de l'ONEA, une moyenne mensuelle de 230000 m³ provenait des forages durant leur fonctionnement.

II.2 CONCEPTION DE L'ARCHITECTURE DE LA BASE DE DONNEES

II.2.1 Objectif du futur système et résultats attendus

La mise en place de ce système se justifie pour les raisons suivantes :

- Simplification et amélioration du travail par l'automatisation des procédures répétitives et fastidieuses.
- Facilité et rapidité d'accès aux données : l'ordinateur pouvant favoriser un accès facile et rapide à un maximum d'informations possible, il permet de sélectionner à grande vitesse parmi une grande masse de données mémorisées les informations utiles à la prise de décision.

Ainsi l'objectif visé par notre système est de permettre le stockage des données nécessaires à toute étude hydrogéologique.

II.2.2 Règles de gestion et dictionnaire des données

Les règles de gestion du MCD précisent les contraintes qui doivent être respectées par le modèle. Elles permettent de mettre les cardinalités, et expriment les contraintes d'intégrité du modèle. Ces contraintes représentent les lois de l'univers réel modélisé.

En **annexe II-3**, sont présentées les règles de gestion.

II.2.3 Les modèles conceptuels : MCD ET MPD

La conception de notre base de données n'a pas suivi toutes les étapes de la démarche telle que détaillée ci-dessus (Chapitre I § 2.3). En effet certaines étapes n'étaient pas nécessaires. Cependant elle conserve toute la rigueur de la démarche MERISE.

Notre démarche s'est limitée à la construction des modèles de données. Le logiciel POWER AMC nous a permis de construire le MCD et de générer automatiquement le MPD. C'est sur la base de ce MPD que s'est fait la création de la base de données.

II.3 REALISATION ET MISE EN OEUVRE DE LA BASE DE DONNEES

La réalisation de l'application "AKIFER_2009" est basée sur les résultats des études de conception. La phase de réalisation de la base de données constitue l'étape pratique de cette étude. A ce niveau le choix du système de gestion de base de données adopté s'est orienté vers Microsoft Access 2007 pour sa simplicité d'utilisation et d'accès.

Microsoft Access constitue un SGBD à part entière. Il permet de définir les données, de les manipuler et de les contrôler. Il contient des fonctionnalités avancées qui facilitent le classement et la gestion des données quelque soit leur volume et leur répartition entre tables. Les tables correspondent donc dans une base de données Access, à l'objet dans lequel se fait le stockage des informations. De nombreuses fonctions permettent d'assurer leur intégrité et leur sécurité. Microsoft Access constitue également, et c'est là l'un de ses atouts, un puissant environnement de développement d'applications. Il dispose d'un langage de programmation souple, Visual Basic, qui permet d'automatiser les tâches les plus courantes. Cet

environnement, très complet, possède de nombreux outils prenant la forme de fenêtres et de boîtes de dialogue permettant le développement de véritables applications de base de données, quel que soit leur niveau de complexité. ACCESS a de plus une fonctionnalité multi utilisateurs qui permet au développeur de gérer et donner accès à plusieurs utilisateurs de la base de données avec des niveaux d'autorisations spécifiques quant à leur marge de manœuvre sur les données.

II.3.1 Génération des Tables

La génération des tables constitue la phase d'implantation de la base de données sous le logiciel "Access 2007" qui est une SGBD relationnelle.

Une base de données relationnelle est une collection de tables de données. La manipulation de ces données s'effectue grâce à un langage : le SQL, SGBD-R sont des logiciels qui permettent de stocker, gérer et utiliser ces données. Ils garantissent leur qualité ainsi que leur cohérence et autorisent l'accès aux données à plusieurs utilisateurs simultanément. L'utilisateur peut alors exploiter ces données sans se soucier de la manière dont elles sont stockées et organisées au niveau physique.

A partir du MPD établi, le logiciel POWER AMC nous a permis de générer automatiquement des tables et les relations existant entre elles, sur Access 2003. Les tables générées ont des champs vides et gardent les mêmes domaines de validité des valeurs possibles tels que décrits dans le MCD.

Les relations rencontrées sont de type un à plusieurs, (1 à ∞): dans ce type de relation, un enregistrement de la première table peut être relié à plusieurs enregistrements de la seconde, alors qu'à chaque enregistrement de la seconde ne correspond qu'un enregistrement de la première. La structure des tables et relations générées se trouve en **annexe II-4**.

Signalons que les requêtes, les formulaires et les états ont été faits avec la dernière version 2007 d'Access car nous avons connu une panne d'ordinateur et ceux de la salle informatique du 2iE avec lesquels nous avons travaillé ne sont dotés que de cette version. De plus, compte tenu du retard que nous avons accusé dans notre planning pour l'acquisition des données, certaines parties n'ont pu être élaborées. Néanmoins, nous comptons apporter des améliorations

et surtout réaliser ces partie afin de rendre simple et conviviale l'utilisation de la base de données.

II.3.2 Les requêtes

Les requêtes sont des moyens permettant d'extraire automatiquement des données disponibles dans les tables suivant des critères bien définis, pour en faire une opération. Elles permettent également de retrouver toutes les données "calculées" et "concaténées", éliminées du dictionnaire des données lors de l'établissement du MCD.

Une requête peut afficher un sous-ensemble de données, comme par exemple tous les forages situés au secteur 17, ou bien des combinaisons de données provenant de différentes tables, comme par exemple les couches traversées par un forage donné. Vous trouverez un exemple de requête en **annexe II-2**.

II.3.3 Les formulaires

Les formulaires sont des interfaces privilégiées de communication entre le SGBD et l'utilisateur. Véritable outil de dialogue, le formulaire est un écran personnalisé permettant de saisir, modifier, sélectionner et visualiser les enregistrements d'une (ou plusieurs) table(s), de valider des options ou de lancer différentes actions.

Un sous formulaire est un formulaire inséré dans un autre formulaire.

Notre souci est d'avoir le minimum de formulaires et qui sont communicants entre eux selon les opérations réalisées.

Nous avons donc réalisé des formulaires/sous formulaires partout où nous avons les relations de un à plusieurs. Voir la partie « prise en main » (**annexe II-1**) pour l'utilisation de ces formulaires.

II.3.4 Les états

L'état est une manière de présenter les données des tables relationnelles à l'écran ou à l'impression. Il peut également comporter des données calculées, triées et/ou regroupées.

Un sous état est un état inséré dans un autre état.

La réalisation de chacun des états est précédée par une mise en place des requêtes basées sur des tables et/ou des résultats d'autres requêtes afin de rassembler tous les champs nécessaires.

CHAPITRE III : ETUDES GEOCHIMIQUES

III.1 GENERALITES SUR LA GEOCHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

La géochimie des eaux souterraines est la science qui explore les processus contrôlant la composition chimique des eaux souterraines, autrement dit, la qualité des eaux souterraines APPELLO et POSTMA, 2007. C'est une discipline qu'il convient d'intégrer au même titre que la gestion quantitative des eaux souterraines, car c'est également de la qualité d'une eau que dépendra son usage.

III.1.1 Sur l'hydrochimie

La composition chimique d'une eau naturelle comme les eaux souterraines est le résultat des interactions entre l'eau et les phases minérales solides des roches. La dissolution et la précipitation des phases solides jouent donc un rôle décisif, notamment pour la régulation de la concentration des éléments majeurs (calcium, carbonates, silicates...) Selon les conditions géologiques d'une région donnée, différentes phases minérales comme le carbonate de calcium, le quartz ou les minéraux argileux sont importantes SIGG et al. 1992 La solubilité d'un minéral est limitée par la concentration maximale de ces constituants dans l'eau APPELLO et POSTMA, 2007.

L'analyse des eaux souterraines revêt deux intérêts majeurs : illustrer par cartographie la distribution régionale de la qualité des eaux, afin de constituer un outil décisionnel dans la gestion des ressources en eaux et obtenir une première indication des interactions entre la minéralogie de l'aquifère et la composition chimique (ou faciès géochimique) des eaux de cet aquifère.

Une analyse chimique standard d'une eau de forage doit comprendre au minimum les paramètres suivants : la température, le pH, la conductivité électrique, les quatre cations majeurs : Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} et les quatre anions majeurs : Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- . Cela dit, des précautions de prélèvement et de conservation des échantillons doivent être prises et également une vérification de la qualité des analyses doit être faite afin de corriger les erreurs (systématiques et statistiques).

Pour les ions majeurs, l'erreur systématique peut être estimée à travers le calcul du bilan ionique. On part du principe qu'une eau est électriquement neutre, par conséquent, la somme des anions (ions dissous de charge négative) doit être égale à la somme des cations (ions dissous de charge positive).

La formule du bilan ionique, exprimé en pourcentage :

$$B.I = \left(\frac{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}} \right) * 100$$

Les concentrations en cations et anions sont exprimées en milliéquivalent/L et le signe de la charge est pris en compte dans le calcul.

Cependant, selon le type et la nature de l'échantillon analysé, d'autres ions (comme Fe²⁺-NH₄⁺ dans nappes captives confinées - milieu réducteur - ou H⁺, Al³⁺, dans les eaux souterraines acides) peuvent contribuer significativement à l'équilibre de la balance ionique et doivent de ce fait, être identifiés et pris en compte dans le calcul du BI.

Dans le cas d'une eau acide, le calcul du bilan ionique est plus complexe et peut nécessiter l'usage d'un logiciel de géochimie tel que Phreeqc. Un bilan ionique supérieur à 2% est quasi-inévitable dans la plupart des laboratoires. On estime qu'un bilan ionique < 5% est acceptable pour valider l'analyse GNANDI, 2009.

Il existe plusieurs outils pour l'interprétation en géochimie analytique dont les principaux sont le diagramme de Piper et celui de Schoeller-Berkaloff. Ces deux outils permettent de déterminer le faciès chimique, c'est-à-dire l'association des cations et anions dominants dans l'eau analysée.

Le diagramme de Piper est plus indiqué pour avoir une vue d'ensemble de tous les faciès lorsqu'on doit interpréter plusieurs dizaines d'analyses. En revanche, celui de Schoeller-Berkaloff est plus approprié pour un maximum de 10 analyses, avec l'avantage de distinguer, en plus des faciès, les gammes de concentrations des paramètres analysés ;

III.1.2 Sur l'utilisation des traceurs isotopiques

Une bonne connaissance du circuit hydrogéologique nécessite de répondre aux interrogations sur l'origine de l'eau et de sa minéralisation, sur l'histoire de l'eau depuis les parties profondes où elle a acquis l'essentiel de sa minéralisation jusqu'à la zone

d'émergence et enfin sur la durée du circuit. Les méthodes isotopiques se prêtent remarquablement à ce genre d'études et sont souvent performantes.

Les traceurs³ sont utilisés en hydrogéologie en tant qu'outil complémentaire aux autres outils d'investigation (données piézométriques, hydrochimiques et pompages d'essais). Ils permettent d'obtenir de nombreuses informations complémentaires (zone d'alimentation (Oxygène 18) et le temps de séjour de l'eau souterraine (Tritium et Carbone 14) dans l'étude des eaux souterraines et d'acquérir ainsi une meilleure connaissance des aquifères.

Au cours de ces dernières années, les méthodes de traçage se sont largement développées grâce à l'amélioration des techniques analytiques, à une meilleure connaissance des méthodes de traçage ainsi qu'au développement de nouveaux traceurs notamment les traceurs environnementaux qui ont rapidement vu leurs applications se diversifier. Parmi celles-ci, on peut noter l'analyse de la recharge des nappes d'eaux souterraines, leur datation ainsi que l'estimation de leur contribution au débit des rivières et leurs interactions avec l'eau provenant d'autres sources. Ces méthodes ont aussi donné la possibilité d'effectuer des études qualitatives de contamination des nappes souterraines ainsi que de leur salinisation. Parmi les traceurs environnementaux utilisés, les traceurs isotopiques ont été privilégiés. Les isotopes naturels les plus utilisés sont les isotopes stables : hydrogène lourd ou deutérium (²H) et l'oxygène 18 (¹⁸O). Ces deux traceurs sont des constituants de l'eau naturelle et sont de fait de bons éléments pour l'analyse du cheminement de l'eau.

Dans l'eau, l'abondance relative des isotopes stables ²H et ¹⁸O est exprimée par rapport à celle existant dans l'eau océanique moyenne standard V-SMOW (*viena standard mean ocean water*). Les rapports isotopiques ²H/¹H et ¹⁸O/¹⁶O sont alors représentés par les variations delta (δ) telles que :

$$\delta_m I(\text{‰}) = \frac{({}^m I / {}^n I)_{\text{eau}} - ({}^m I / {}^n I)_{\text{SMOW}}}{({}^m I / {}^n I)_{\text{SMOW}}} * 1000 \text{ où}$$

³ Un traceur (synonyme marqueur) est un organisme ou une substance, naturelle ou artificielle, permettant l'étude des processus physiques, chimiques ou biologiques du milieu dans lequel il se trouve permettant l'étude des processus physiques, chimiques ou biologiques du milieu dans lequel il se trouve.

Avec :

${}^m\text{I}$ et ${}^n\text{I}$ représentant deux isotopes de l'élément I,

m et n étant les masses atomiques de ces deux isotopes.

Les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ sont normalisées dans une échelle V-SMOW-SLAP, GONFIANTINI, 1978.

Les isotopes ${}^2\text{H}$ et ${}^{18}\text{O}$ sont très utiles dans l'étude d'une ressource, puisqu'ils permettent d'identifier les processus en jeu et de réaliser un bilan entrée-sortie. Leurs variations permettent de mieux appréhender les échanges eau - minéraux et partant de là, un traçage des écoulements au travers des formations.

L'étude de la covariation en ${}^2\text{H}$ et ${}^{18}\text{O}$ est réalisée par un graphique de $\delta^2\text{H}$ en fonction de $\delta^{18}\text{O}$ pour lequel la fonction de corrélation mondiale définit la ligne des eaux météoriques CRAIG, 1961.

$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ de la forme $\delta^2\text{H} = a\delta^{18}\text{O} + b$ où la pente **a** est liée à l'humidité relative et **b** l'excès en deutérium traduit l'origine des précipitations.

Les eaux se plaçant sur la ligne des eaux météoriques sont ainsi supposées avoir pour origine les précipitations et n'avoir subi aucun processus isotopique. Quant aux eaux situées au-dessus ou en dessous de cette ligne, elles reflètent respectivement la perte ou l'enrichissement en l'un ou l'autre des isotopes sous l'effet de différents processus.

Localement, les coefficients de cette corrélation peuvent différer légèrement. la recherche bibliographique fournit quelques résultats d'études antérieures menées au Burkina Faso :

- **Sur les eaux de pluies** : d'après MATHIEU, 1993, la Droite Météorologique Locale (DML) pour les années 1988 et 1989 à Barogo déterminée par la méthode de régression des axes majeurs sur les couples disponibles, a pour équation :

$$\delta^2\text{H} = (7,73 \pm 0,32) \delta^{18}\text{O} + (7,8 \pm 4,0), n = 41 \text{ et } r = 0.9658$$

Cette relation est proche de la droite météorologique mondiale (DMM) ainsi que de la droite régionale des eaux souterraines établie pour l'Afrique de l'Ouest par JOSEPH et ARANYOSSY, 1989 à partir de la composition isotopique des nappes superficielles de recharge récente :

DMR : $\delta^2\text{H} = 7,5\delta^{18}\text{O} + 4,8$ avec $r = 0.9658$

- **Sur les eaux souterraines**, il existe très peu d'études de la corrélation entre $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$.

III.2 CARACTERISATION GEOCHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA REGION DE OUAGADOUGOU

L'étude de la chimie des eaux souterraines est une méthode de prospection hydrogéologique qui permet la caractérisation des aquifères. En effet, la composition chimique des eaux souterraines dépend en grande partie du type de roche encaissante, des évolutions hydrodynamiques des écoulements de la nappe, de la profondeur, de la circulation et de la zone climatique.

III.2.1 Inventaire et analyse des données disponibles

Les données sur les paramètres chimiques des eaux souterraines proviennent de l'étude de SOME, 2006. Les analyses ont porté sur les éléments majeurs. Le tableau (**annexe III-1**) restitue les différents résultats. Les valeurs des conductivités oscillent entre 100 et 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et des pH compris entre 6 et 7,5. Toute l'année, les eaux souterraines ont une température variant entre 27 et 32°C. La minéralisation totale des eaux varie entre 100 mg/l (puits Agha) et 674mg/l (puits Ram). Les deux extrêmes s'observent au niveau des puits alors qu'en tenant compte des distances parcourues par l'eau avant la nappe on se serait attendu à ce que les eaux des forages soient les plus minéralisées. En fait, ce sont les polluants qui viennent s'ajouter à la minéralisation initiale pour rehausser la conductivité et la minéralisation totale.

III.2.2 Identification des différents types d'eau présents dans la région de Ouagadougou

La base de l'étude hydrochimique est la classification des eaux souterraines en hydrofaciès.

III.2.2.1 Faciès hydrochimique

Pour apprécier le faciès chimique des eaux, plusieurs techniques de traitement existent : en plus de la classification par les diagrammes de Piper, il est d'usage d'appliquer les méthodes

de traitement statistique aussi bien simples que multidimensionnelles lorsqu'on dispose de plusieurs paramètres, comme c'est le cas en géochimie.

Dans notre étude, sans être exhaustif, et vu aussi le nombre d'éléments (plus d'une dizaine) nous nous contenterons de l'analyse par le diagramme de Piper.

Ce diagramme montre que la plupart des eaux de forages sont bicarbonatées calciques et magnésiennes (**Figure 6**). Celles des puits le sont également mais avec des teneurs plus élevées de chlorures et surtout de nitrates. On retiendra que partout les eaux des forages sont nettement moins polluées que les eaux des puits qui sont plus exposées. En effet les aquifères captés par les puits sont les aquifères superficiels qui sont peu profonds et très peu protégés. Contrairement aux forages qui captent les nappes des arènes et de la roche fissurée, les puits restent très vulnérables à la pollution notamment celle venant des latrines et fosses sceptiques. Faut de protection, la recharge de ces puits est directe et à cause de leur caractère libres, le niveau de l'eau monte jusqu'aux environs des fosses sceptiques et latrines où elle est sujette à la contamination par les germes fécaux et les nitrates.

D'une manière générale, retenons que les eaux du socle cristallin de Ouagadougou ont une composition à dominante bicarbonaté calcique et magnésienne. Ces résultats sont analogues à ceux de SAVADOGO, 1984 sur les roches du Burkina et également à ceux récents de OUANDAOGO/YAMEOGO, 2008, qui stipule que : « toutes ces eaux sont de la même famille chimique, elles ne diffèrent généralement entre elles que par leur niveau de concentration ionique qui varie suivant l'environnement immédiat fortement anthropisés de l'agglomération de Ouagadougou ».

Il ressort de ce constat que la configuration en poche plus ou moins discontinue des nappes n'autorise pas une circulation générale des eaux. Chaque ouvrage semble avoir une réaction intrinsèque en zone de socle. Les nappes sont-elles atteintes de manière différente par les pluies efficaces ? L'étude de la dynamique des ces aquifères au chapitre suivant nous permettra certainement d'y répondre.

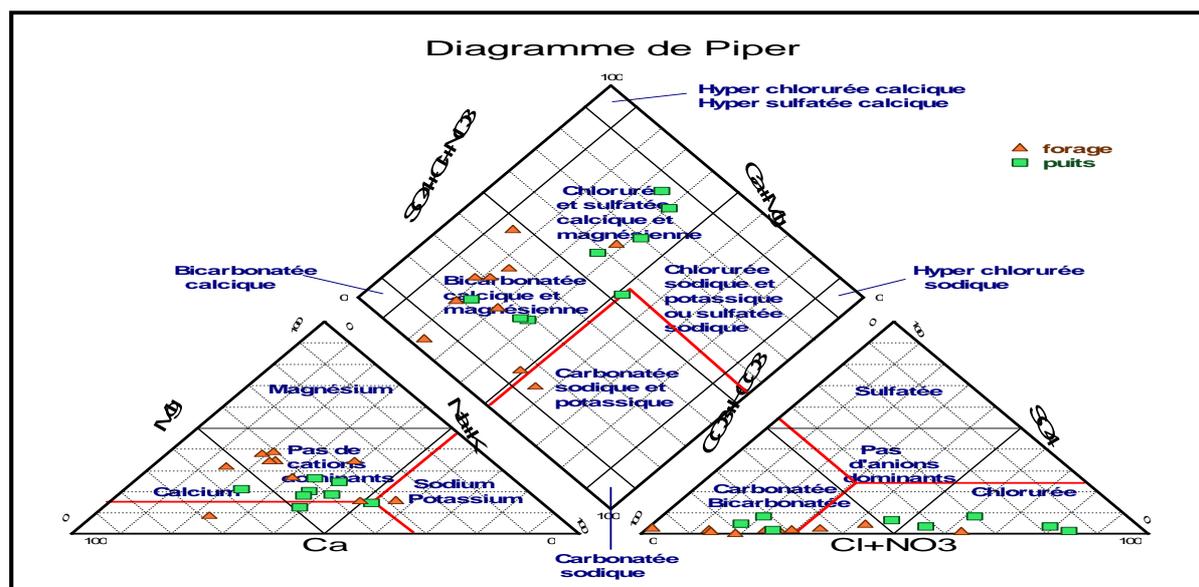


Figure 6 : Faciès des eaux sur diagramme de Piper

III.2.2. 2 Caractéristiques isotopiques des eaux souterraines de Ouagadougou

Les données concernant les teneurs en isotopes stables ^{18}O et ^2H sont issues des travaux de OUANDAOGO/YAMEOGO, 2008. Les prélèvements ont été fait à la mi-septembre 2005 et en 2006 à la fin de la saison pluvieuse. Les prélèvements de 2005 ont concerné 7 forages et le piézomètre du CIEH. En 2006, afin d’avoir une image isotopique des nappes dans le contexte de socle granitique de Ouagadougou, tous les puits et forages en exploitation dans trois zones cibles (zone du barrage de Boulmiougou, centre ville et la zone aval de la zone industrielle de kossodo) ont été prélevés. Les résultats d’analyse sont consignés dans le tableau ci- après :

Tableau 2 : Teneurs en ^{18}O et ^2H des eaux souterraines de Ouagadougou en (‰)

FORAGES (2005/2006)	$\delta 18\text{O}$	$\delta 2\text{H}$	d
FOP29	-4,89	-27,8	11,32
FZON	-3,5	-20,2	7,8
FPARC	-0,93	-5,9	1,54
FFT26	-4,5	-25,4	10,6
FKOS	-4,49	-26,4	9,52
FGOA	-4,55	-25,9	10,5
FQP24	-4,86	-27,5	11,38
FDAP	-3,87	-23,6	7,36
FBAS	-4,35	-26,2	8,6

PUITS(2006)			
PBOUL	-2,1	-10,8	6
PGIB	-3,2	-15,1	10,5
PZIDA	-2,8	-13,4	9
PDAP	-2,1	-10	6,8
PBAR	-3,4	-19,02	8,18
PIEZO CIEH	-3,3	-19,2	7,2
PAGHA	-3,4	-20,6	6,6
PSECT	-3,1	-15,7	9,1

L'analyse des teneurs en ^{18}O des eaux fait état de deux groupes d'eau :

- Le groupe des eaux intermédiaires avec ^{18}O entre $-5,5$ et -4 ‰ correspondant à des eaux rechargées sensiblement à partir de la même altitude selon le schéma hydraulique suivant : l'eau se minéralise au contact des roches encaissantes pendant son trajet dans un milieu confiné. Il s'agit de la plupart des forages captant la nappe profonde.
- Le groupe des eaux enrichies avec ^{18}O entre -4 à -2 ‰. Ce groupe comprend les eaux superficielles évaporées (puits et forages captant la nappe des altérites).

Pour cerner l'origine de ces groupes, nous nous inspirons du modèle théorique adapté par Alouvi au Togo (AKOUVI, 2001) cité par DAKOURE, 2003 qui illustre l'évolution le long de la droite météorologique mondiale, de la composition isotopique d'une eau de pluie formée par une masse de vapeur donnée. En effet d'après ce modèle (Figure 7),

- Les teneurs en ^{18}O et en ^2H des précipitations ayant subi une évaporation sont corrélées suivant la droite d'équation : $\delta ^2\text{H} = b \delta ^{18}\text{O} + d$ avec $d < + 10 \text{ ‰}$ et $5 \leq b \leq 6$
- Les précipitations issues d'un mélange de vapeurs recyclées et de vapeurs atmosphériques s'alignent dans un diagramme $\delta ^2\text{H}$ en fonction $\delta ^{18}\text{O}$ sur une droite située au-dessus de la droite météorologique mondiale et d'équation : $\delta ^2\text{H} = 8 \delta ^{18}\text{O} + d$ avec $d > + 10 \text{ ‰}$.

Ce modèle peut être adapté aux eaux souterraines en comparant les signatures isotopiques à celle des précipitations locales.

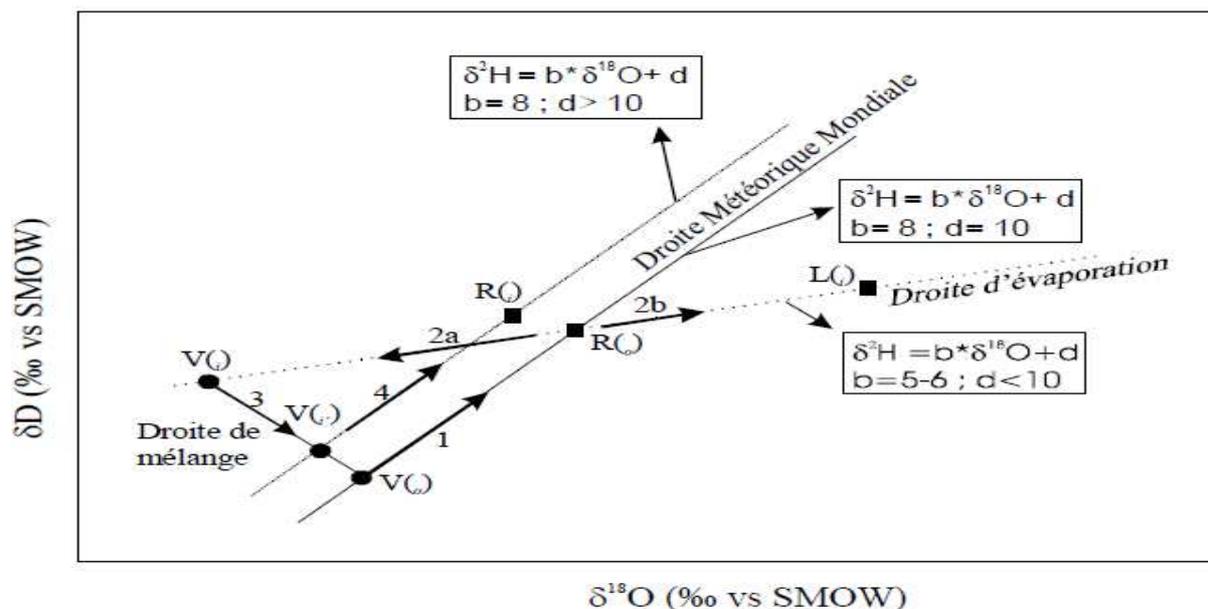


Figure 7 : Modèle théorique de condensation d'une vapeur recyclée issue d'un évènement pluvieux donné. (Repris de Akouvi, 2001),

Soit $R(o)$, un évènement pluvieux donné issu d'une vapeur d'eau de composition $V(o)$: $R(o)$ et $V(o)$ évoluent sur la Droite Météorique Mondiale suivant la droite 1. $R(o)$ en s'évaporant suivant la ligne 2b donne une phase liquide $L(i)$ plus enrichie en isotopes lourds ; en se vaporisant suivant la ligne 2a, il donne une vapeur $V(i)$ plus appauvrie. La vapeur $V(i)$ par mélange avec la vapeur présente dans l'atmosphère acquiert une composition isotopique $V(i')$ suivant la droite 3. La vapeur $V(i')$ se condense suivant la droite 4 pour engendrer la précipitation $R(i)$: $R(i)$ suit une droite parallèle à la Droite Météorique Mondiale avec un excès en deutérium supérieur à 10 ‰.

Sur le diagramme $\delta^2H = f(\delta^{18}O)$ (**Figure 8**) on observe globalement trois groupes de points:

- Un premier, situé le long de la droite météorique locale (DML). Il s'agit d'eaux de pluie qui ont rejoint la nappe plus ou moins rapidement sans évaporation et rechargées à la même altitude.
- Un second, situé sous de la droite, correspondent à des eaux qui ont subi une évaporation pendant l'évènement pluvieux ayant engendré la recharge ou à des eaux souterraines qui ont subi une évaporation après leur entrée dans le système.
- Le dernier, situé au-dessus de la droite correspondent à des eaux enrichies en isotopes lourds issues de vapeurs atmosphériques recyclées. Certains auteurs notamment DINCER, 1984, attribue cet enrichissement à une contribution non négligeable des

pluies de début et de fin d’hivernage, période où l’humidité relative est nettement plus faible.

D’une manière générale, la **figure 9** nous montre que l’alimentation des eaux souterraines de la région de Ouagadougou est d’origine pluviale. En effet, les points sont situés globalement sous la DMM qui est établie sur la base des teneurs en isotopes lourds des océans dont on suppose être alimentés uniquement par les pluies.

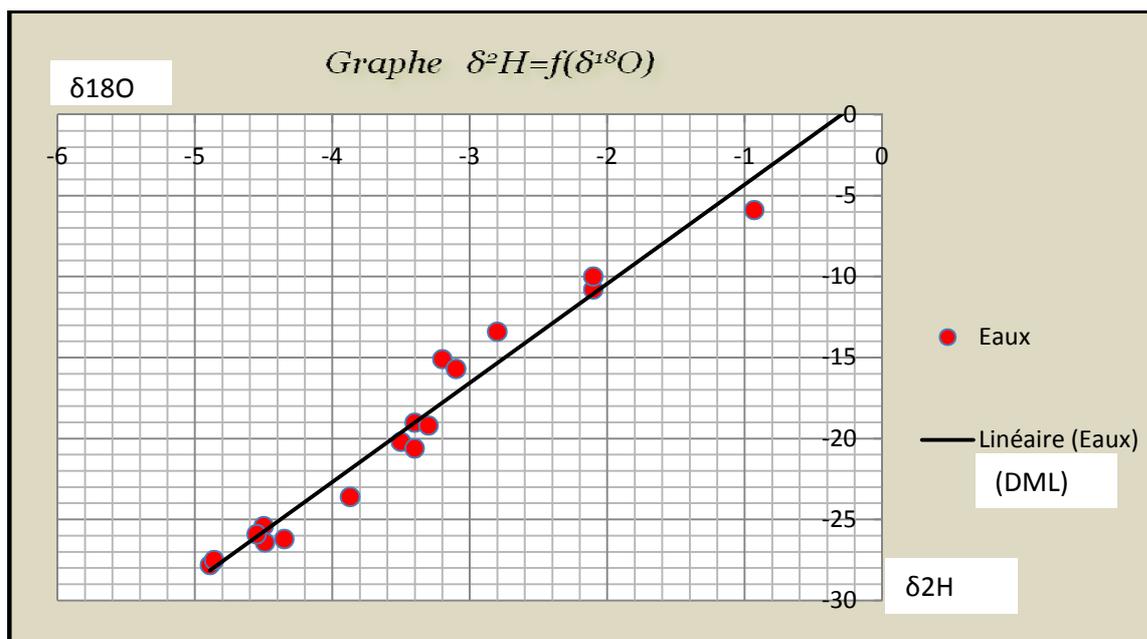


Figure 8 : Graphe $\delta^2H = f(\delta^{18}O)$ des eaux de puits et forages

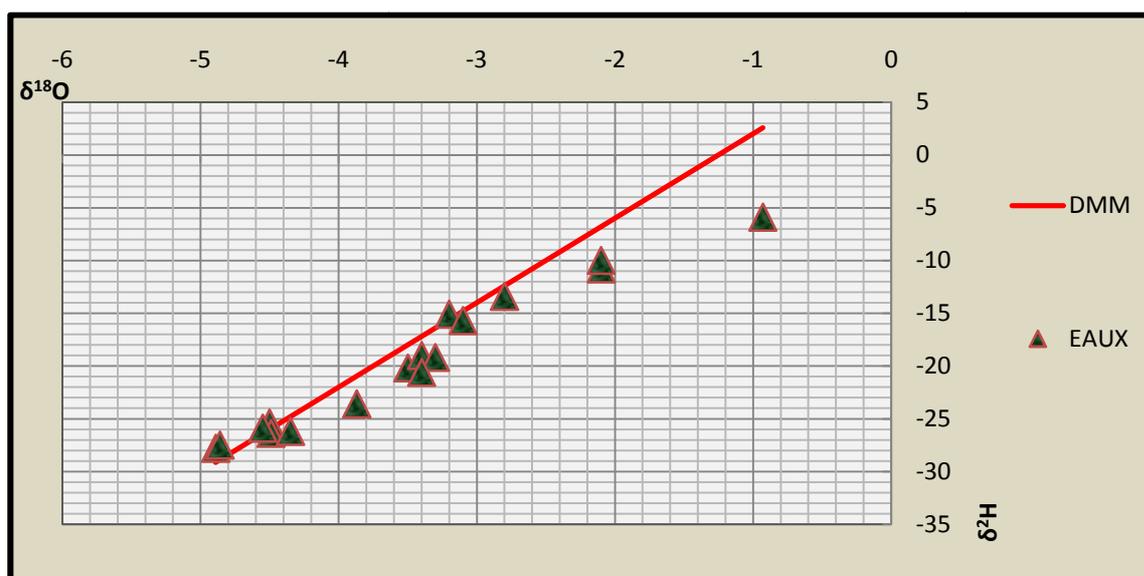


Figure 9 : Graphe $\delta^2H = f(\delta^{18}O)$ des eaux en générale

Conclusion partielle

Le chemin suivi par l'eau depuis la surface du sol jusqu'au système aquifère, lui confère sa qualité chimique. Elle subit d'abord une modification en surface sous l'effet de l'évaporation et ensuite transite par la zone non saturée et enfin atteint la nappe où elle reste en contact plus ou moins long avec la roche-réservoir pour l'acquisition de sa minéralisation.

Dans la région de Ouagadougou, les faciès chimiques sont de types bicarbonatés calciques pour certains forages et de type calcique et magnésien pour la plupart. Pour certains puits, leurs eaux voient leur charge minérale augmenter du fait des apports par l'infiltration des eaux usées.

Les eaux de la région sont sous-saturées vis-à-vis de la calcite et de la dolomite, du gypse et l'halite.

Cela indique que le phénomène prédominant dans la minéralisation des eaux de la zone étudiée semble être l'hydrolyse des silicates qui fournirait une partie non négligeable des cations, de la silice et de HCO_3^- dont l'origine est essentiellement contrôlée par la diffusion de CO_2 atmosphérique et organique dans le milieu cristallin OUANDAOGO/YAMEOGO, 2008 .

L'étude des isotopes stables a révélé qu'en générale les apports d'eau au niveau des nappes dans la région de Ouagadougou proviennent essentiellement des pluies efficaces.

III.3 DISCRIMINATION DES DIFFERENTS AQUIFERES PRESENTS DANS LA REGION DE OUAGADOUGOU

III.3.1 Données disponibles

Il s'agira dans cette partie de la caractérisation hydrogéologique du système aquifère du socle cristallin de la région d'après la lithologie des forages. Les données disponibles font état de 197 forages sur un total de 300 forages qui ont suffisamment d'informations pouvant servir à notre étude hydrogéologique. Nous avons donc analysé les données (**annexe III-2**) sur les forages que nous avons ensuite interprétés. La **figure 10** présente une coupe type des forages de la région de Ouagadougou.

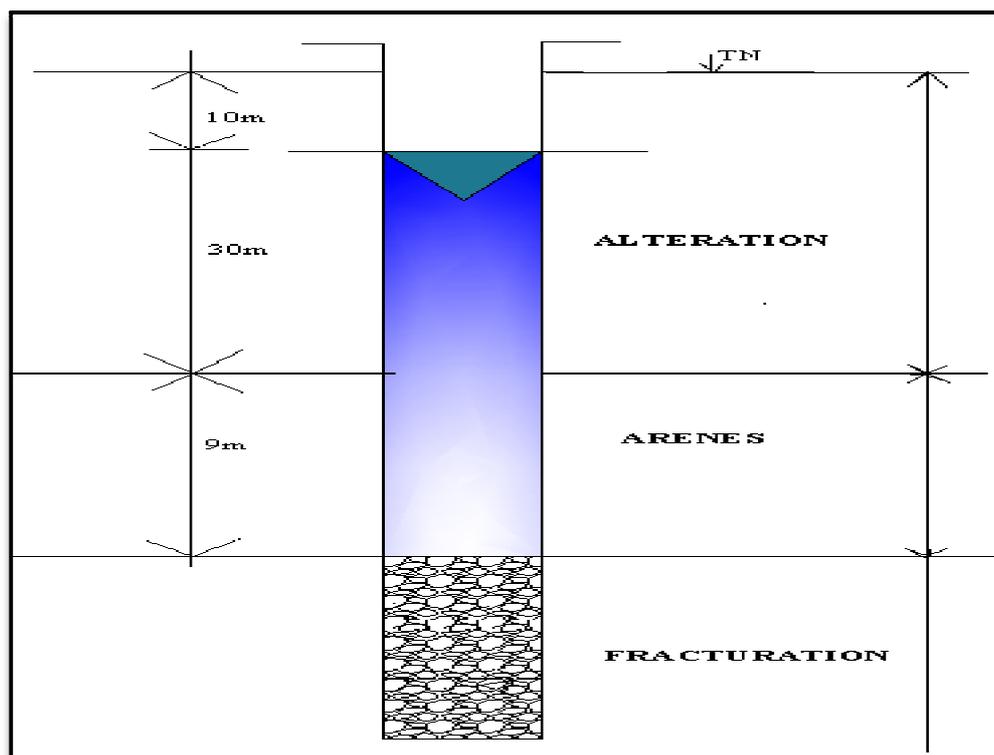


Figure 10 : Coupe type des forages selon les données lithologiques

III.3.2 Analyse et interprétation

Tableau 3 : Récapitulatif des données sur les forages

Variables	Nombre de forages	Minimal	Maximal	Moyenne	Médiane	Ecart-type
Profondeur total(m)	197	32,47	79,42	56,23	55,95	10,34
Débit fin de foration(m ³ /h)	197	2,30	70,00	13,93	10,00	10,95
Débit essai airlft(m3/h)	110	0,00	34,60	8,94	8,20	5,04
Epaisseur d'altération EA (m)	197	10,00	60,82	30,54	29,80	9,42
Epaisseur d'altération saturée EAS (m)	197	0,00	44,72	16,95	16,43	8,95

La lithologie des forages (**Figure 10**) confirment les observations géologiques de la région (**chapitre I § 3.3**). Ouagadougou est constitué essentiellement de formation à dominante granitoïde injecté de filon de quartz et de pegmatite. Les faciès sont altérés à différents degrés avec une composante argileuse qui confère au marteau d'altération une épaisseur variant entre 0 et 40 m et une faible perméabilité.

On observe trois (3) horizons aquifères superposés selon les coupes de forages et précisent leurs caractéristiques lithologiques.

❖ **Les horizons superficiels des altérites**

Ces horizons sont constitués par le recouvrement quaternaire (argile grise, latérite et cuirasse latéritique) et les arènes argileuses fines. Ces nappes sont à surface libre, elles sont très influencées par les aléas climatiques et très vulnérables à la pollution à cause de la contamination des eaux peu profondes (3 à 15m).

❖ **Les franges sous-jacentes**

Elles sont formées par des arènes très fluentes qui résultent de l'altération de la roche-mère. C'est un horizon qui se caractérise par une porosité d'interstice significative et une faible perméabilité du fait de sa dominante argileuse qui lui permet d'assurer, lorsqu'il est saturé, une bonne capacité de stockage des eaux souterraines au sein du système aquifère.

GILLI, MANGAN, MUDRY, 2004. traitant de l'hydrogéologie ouest Africaine subsaharienne stipule : «On observe une différence entre les roches métamorphiques micacées dont les altérites sont argileuses, donc à priori peu productives et les granites et gneiss, dont l'altération produit des sables quartzeux grossiers, plus favorables au stockage ».

❖ **Le socle fissuré**

Il est constitué de granite affecté sur une épaisseur de plusieurs dizaines de mètres par des fissures et injecté de filon de pegmatite qui augmente sa productivité. En effet, le filon joue un rôle de drain permettant ainsi une très bonne réalimentation de la nappe. La fréquence de ces fissures décroît avec la profondeur. Ce niveau assure la fonction transmissive et est atteint par la plupart des forages réalisés à Ouagadougou.

Dans le profil, on a trois horizons plus ou moins aquifères mais en général, nous avons deux nappes :

- La nappe supérieure avec la cuirasse quand elle est noyée ;
- La nappe inférieure regroupant les arènes et la roche fissurée soit deux aquifères qui se différencient par leur comportement hydrodynamique : Un horizon supérieur capacitif, celui des altérites et un horizon inférieur transmissive, celui du socle fissuré. L'horizon supérieur assure le stockage de l'eau permettant ainsi une alimentation différée de la nappe inférieure.

Les forages de Ouagadougou captent ces deux derniers horizons. Notons qu'il n'y a pas de relation linéaire entre la profondeur d'un forage et sa productivité, à titre d'exemple, les forages 17PY9011 et 17PY9416 de profondeurs respectifs 55,35m et 63,24m exploitant les nœuds de deux fractures d'envergure régionale, débitent respectivement 43m³/h et 32m³/h. La productivité dépend de l'emplacement du forage.

Selon OUANDAOGO/YAMEOGO, 2008, les forages ayant un débit supérieur à 35 m³/h correspondent à des forages implantés sur des fractures ou des nœuds de fractures d'envergure régionale Nord-est, Sud-ouest ; Nord-Ouest, Sud-est et Nord-Sud.

La carte d'épaisseur d'altération saturée (**Figure 11** et **figure 12**) montre quatre zones présentant des critères favorables du point de vue hydrogéologique : Ouest, Est, Sud-ouest, Sud-est. On peut donc affirmer que la région de Ouagadougou dispose de bonnes ressources en eaux souterraines. L'épaisseur d'altération saturée (**tableau 3**) qui varie entre 0 et environ 45 m, nous permet de l'affirmer. Cependant une estimation, même grossière, du volume d'eau stockée dans ces altérations serait fonction de la porosité efficace de celles-ci.

Nous avons donc fait une extrapolation de l'épaisseur d'altération mouillée sur toute la zone et obtenus avec le logiciel *Surfer 8*, en considérant une porosité de 5%, un volume de : **618,8** millions de m³ à l'échelle de la région.

Ce volume est une estimation grossière compte tenu des connaissances limitées sur la géologie et l'hydrogéologie de la région. Cela nécessite donc une étude plus approfondie sur ces aspects.

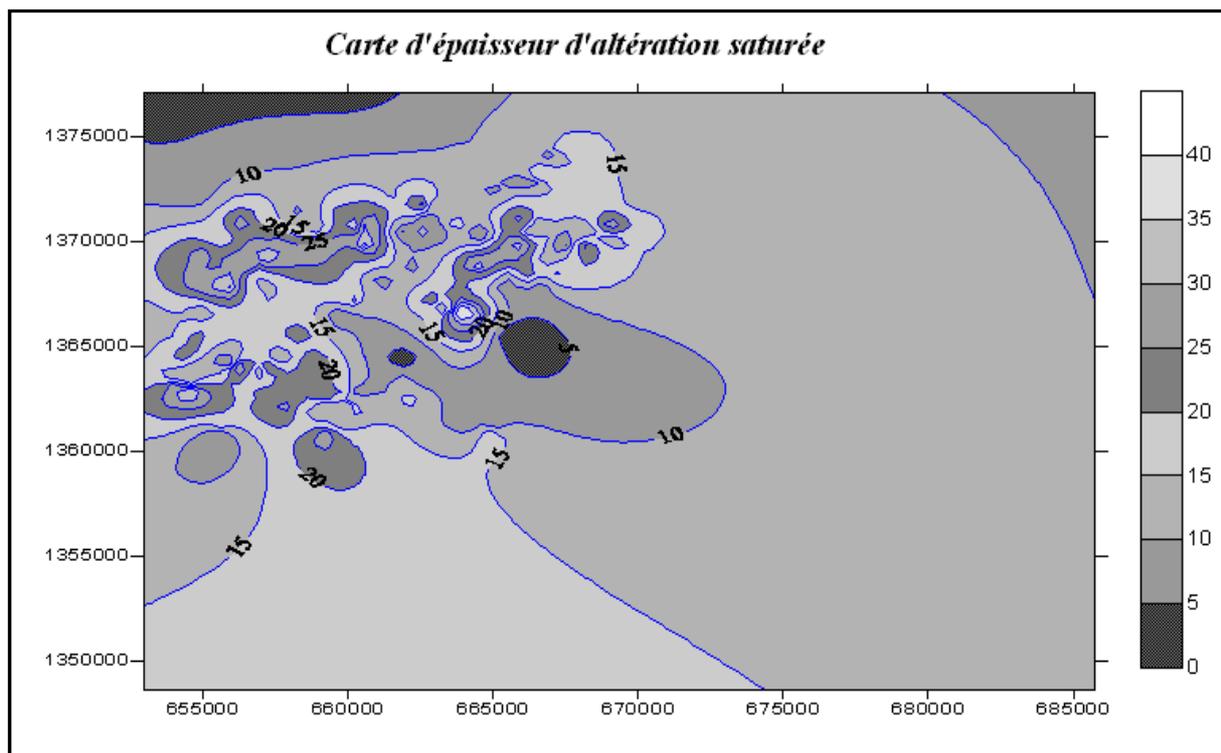


Figure 11 : Carte d'épaisseur d'altération mouillée

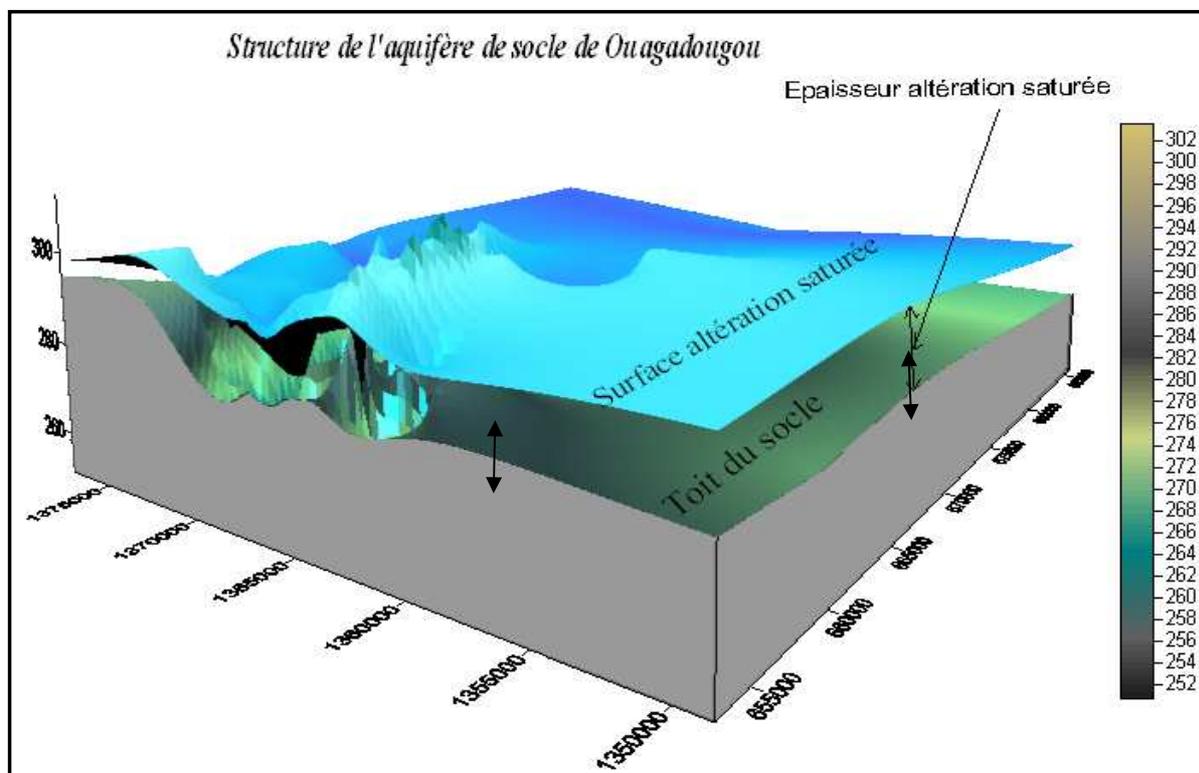


Figure 12 : Illustration de l'épaisseur de l'altération saturée à Ouagadougou

CHAPITRE IV : LA DYNAMIQUE DES AQUIFERES

IV.1 ETUDE DES VARIATIONS DE LA PIEZOMETRIE

IV.1.1 Généralités sur les études piézométriques et les réseaux piézométriques

La synthèse et l'interpolation spatiale des niveaux piézométriques et des conditions aux limites du réservoir, sont représentées par des cartes piézométriques. Les cartes de la surface piézométrique, dites piézométriques, établies avec les données sur les niveaux piézométriques, représentent, à une date donnée, la distribution spatiale des charges et des potentiels hydrauliques CASTANY, 1982.

Les cartes piézométriques sont les documents de base de l'analyse et de la schématisation des fonctions capacitives et conductrices du réservoir et du comportement hydrodynamique de l'aquifère. C'est la synthèse la plus importante d'une étude hydrodynamique.

L'établissement de ces cartes repose sur la mesure des niveaux piézométriques qui passe nécessairement par la mise en place d'un ⁴réseau piézométrique dont les objectifs visent principalement :

- Une meilleure compréhension du système aquifère ;
- Un suivi quantitatif et qualitatif des ressources en eaux souterraines ;
- Une participation à la protection des ouvrages d'exploitation et à la gestion des eaux souterraines.

La surface piézométrique correspond à la surface supérieure de la zone saturée de l'aquifère. Les cotes de cette surface forment des courbes de niveau appelées courbes isopiézométriques car correspondant à des points de même charge hydraulique. L'écoulement se déplace perpendiculairement aux courbes isopiézométriques; sa vitesse est inversement proportionnelle à la distance entre 2 courbes consécutives.

Par interpolation avec le logiciel **Surfer8** à partir des données sur les forages, nous avons obtenu différentes représentations décrivant le système aquifère de la région de Ouagadougou.

⁴ Ensemble de points d'observation dans lequel on peut mesurer le niveau de la nappe, la charge hydraulique.

La figure 13 montre que globalement les bas niveaux piézométriques d'après la surface de l'altération saturée (sans perturbation), se situent vers le Nord-ouest, au centre, à l'ouest et vers l'est. Les isopièzes se resserrent en ces lieux pouvant constituer ainsi des dépressions piézométriques ou zones de décharge des eaux souterraines. Ce qui explique le nombre important de forages (points bleus) dans cette zone.

La figure 14 confirme ce fait et nous présente le caractère discontinu et en poche des nappes de la zone. On observe des « lignes de partage des eaux » qui séparent les dépressions et la quantité d'eau parvenant à ces aquifères sera fonction de leur taille et de la topographie. Ce qui semble expliquer les différents débits des forages situés dans la zone.

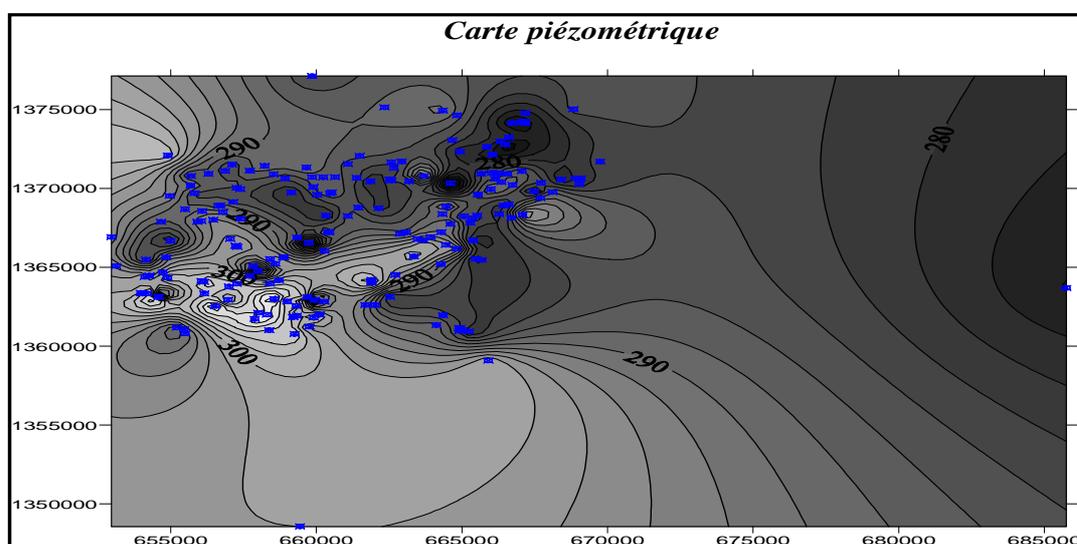


Figure 13 : Carte piézométrique avec les forages (points bleu) de la région de Ouagadougou

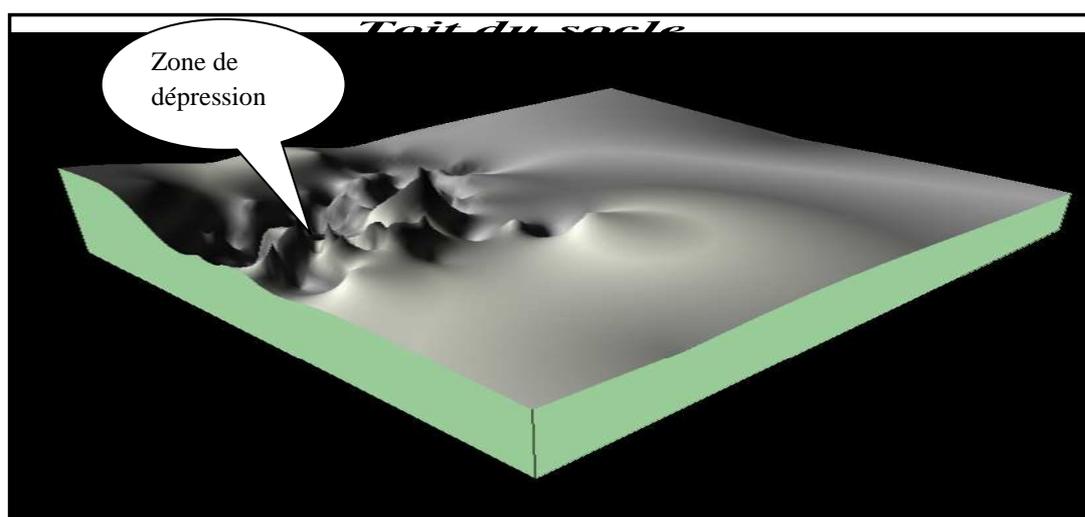


Figure 14 : Illustration du toit du socle dans la région

IV.1.2 Inventaire et analyse des données disponible

L'état des lieux du réseau piézométrique dans la région de Ouagadougou fait état de trois (3) piézomètres (CIEH, Bassinko 1 et 2), ce qui paraît insignifiant. Pour cerner au mieux l'hydrogéologie du secteur d'étude, nous avons adjoint à ces piézomètres quatre forages ayant servi de piézomètre à une étude menée par OUANDAOGO/YAMEOGO, 2008. Ce sont les forages QP98, QP104, QP106 et QP121 dont les mesures de niveaux piézométriques ont été faites de façon régulière durant l'étude (2001 à 2004). Une synthèse de ces piézomètres est faite dans le tableau ci-après :

Tableau 4 : Piézomètres choisis pour l'étude

Piezomètres	Coord x	Coord y	Profondeur(m)
CIEH	659657	1367532	20
BASSINKO 1	649758	1370207	53,8
BASSINKO 2	649758	1370207	58
QP98	659624	1364987	69,15
QP104	658999	1363233	69,75
QP106	653984	1363236	67,05
QP121	654073	1363605	72,8

IV.1.3 Classification des réponses des piézomètres aux épisodes pluvieux

L'étude des fluctuations de la surface piézométrique passe par le tracé des courbes des fluctuations des niveaux piézométriques sur la base des mesures réalisées sur l'ensemble des piézomètres susmentionnés (**Tableau 4**). Pour mettre en évidence ces fluctuations, nous avons choisi une série d'années allant de :

- 1978 à 2004 pour le piézomètre du CIEH ;
- 2001 à 2004 pour QP98, QP104, QP106 et QP121 conformément à leur période de suivi.

Nous avons ainsi obtenu avec **Excel**, les graphes d'évolution du niveau piézométrique en fonction de la pluviométrie (**figures 15 et 16**).

D'une manière générale, les variations temporelles du niveau piézométrique gardent la même allure sur les années retenues ; les amplitudes des fluctuations varient d'un piézomètre à l'autre selon la nature des couches superficielles et son emplacement. La réponse d'un piézomètre est décelable 1 à 2 voire 3 mois après la pluie. Ces réactions différées par rapport aux pluies font état de trois (03) catégories de réponses des nappes qui sont :

- Le niveau piézométrique varie régulièrement avec la pluie (QP98, QP106 et QP121);
- Le niveau piézométrique n'est pas tributaire à la pluie (QP104);
- La variation du niveau piézométrique est aléatoire suivant les années (CIEH)

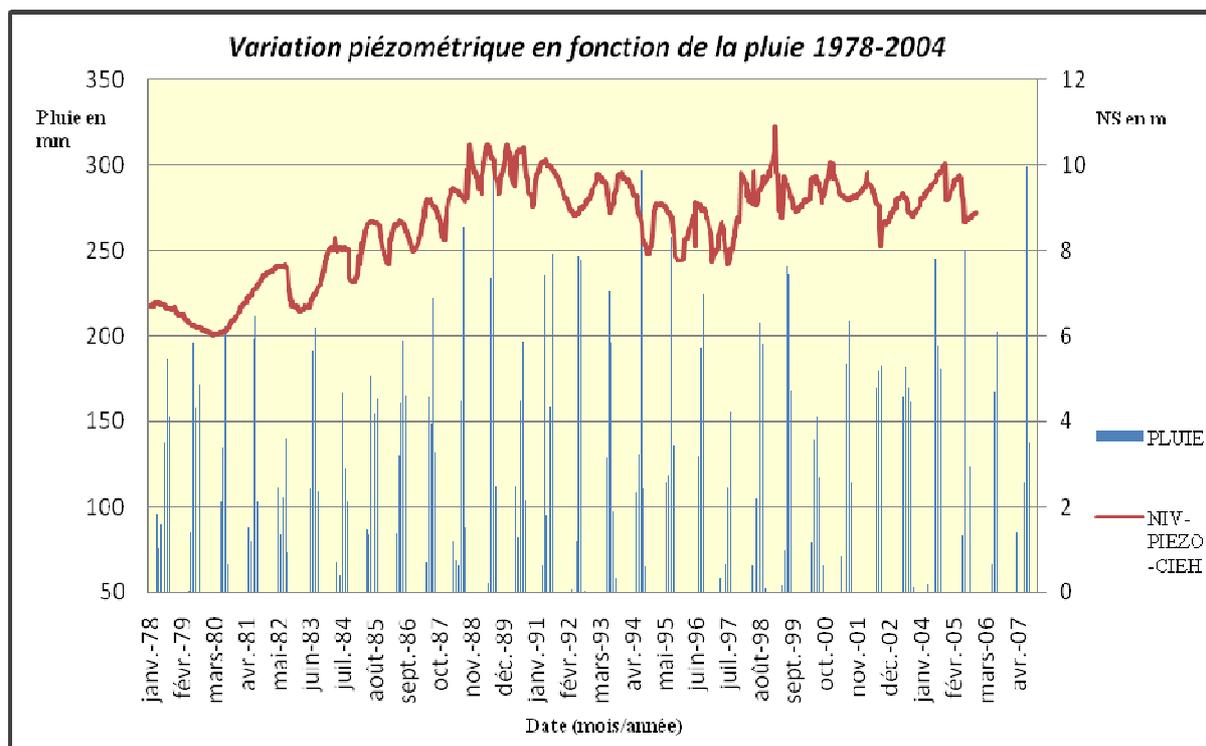


Figure 15 : Réponse du piézomètre du CIEH face aux épisodes pluvieux

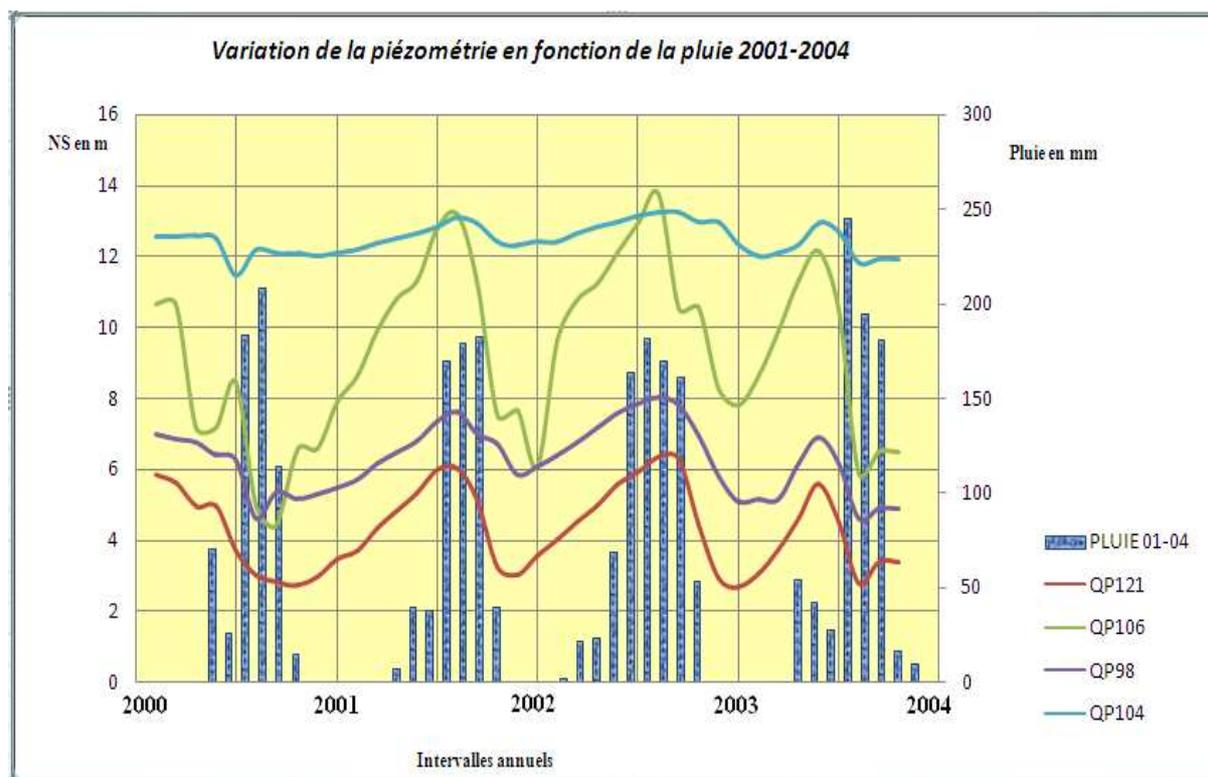


Figure 16 : Réponses des piézomètres (QP121 ;QP106 ;QP98 ;QP104) face aux épisodes pluvieux

IV.1.4 Identification des facteurs expliquant la réponse des piézomètres aux épisodes pluvieux

L'analyse des différentes réponses (**figures 15 et 16**) des piézomètres étudiés nous montre que durant la période (2001-2004), en ce qui concerne les piézomètres QP98, QP104, QP106 et QP121, les évolutions de la recharge ont des allures comparables avec seulement des différences dans les amplitudes des variations. Cependant, une variation remarquable de celles-ci est enregistrée dans les ouvrages QP104 et QP106 où pour le premier (QP104) l'allure est relativement plane, la recharge fluctue entre 11,50 et 13,50m et pour le second (QP106), elle est la plus importante, entre 4 et 14 m. Une variation presque similaire pour les ouvrages QP98 et QP121 où elle oscille entre 2 et 8m. On enregistre, pour le piézomètre du CIEH une allure irrégulière des évolutions sur des intervalles annuelles.

Les différences de variations du niveau de l'eau dans ces ouvrages sont dues à plusieurs phénomènes. En effet, ces variations sont multiples et liées essentiellement aux caractéristiques des ouvrages, à la géométrie locale de l'aquifère, aux conditions de recharge,

à des causes artificielles et à des phénomènes naturels qui peuvent être classés en deux groupes: les variations naturelles et les variations artificielles.

Parmi les variations naturelles, nous distinguerons les fluctuations saisonnières réparties sur l'ensemble d'une année. En effet, les nappes passent par un maximum qui apparaît en général entre septembre et octobre (un à deux mois après le mois le plus pluvieux : Août) et un minimum qui se situe en début et fin d'année. Il peut parfois être légèrement avancé ou reculé. Certaines variations piézométriques présentent un caractère cyclique se répartissant sur plusieurs années groupées.

Parmi les causes artificielles, nous distinguerons essentiellement les pompages, parfois intensifs pour les besoins (AEP, agricoles et industriels) et le poids de l'urbanisation.

IV.1.5 Description du processus de recharge des aquifères

Dans le dictionnaire français d'hydrogéologie, l'alimentation ou la recharge d'une nappe est définie comme étant l'« apport d'eau externe, de toutes origines, à un aquifère ». En d'autres termes, c'est la « quantité d'eau apportée à un aquifère par unité de surface et unité de temps » : On parle alors d'alimentation ou de recharge spécifique de la nappe. Plusieurs disciplines interviennent dans ce processus de recharge:

- L'hydrologie qui étudie les eaux de surface ;
- L'hydrogéologie qui s'intéresse aux eaux souterraines ;
- La géologie qui vise à comprendre la nature, les constituants de la terre et ses transformations actuelles et passées.

Le bassin hydrogéologique correspond à la partie souterraine du bassin hydrologique.

La réalimentation de la nappe introduit les termes de ressource et de réserve qui qualifient des volumes d'eau dans l'aquifère. La ressource fait allusion à la quantité d'eau qu'on peut extraire par un ouvrage de captage sans modifier l'équilibre dynamique de l'aquifère: on entend par là : ressource exploitable. La réserve, avec un taux de renouvellement assez faible, qualifie ou fait référence au volume d'eau contenu dans la nappe : on parle ainsi de réserve permanente, de réserve renouvelable.

Selon ROCHE, 2005, la réserve renouvelable correspond au volume d'eau qu'il est physiquement possible de détourner et soustraire des issues naturelles des aquifères. C'est la part de réserve totale renouvelée chaque année par la recharge des nappes.

La source d'alimentation en eau du bassin hydrogéologique de Ouagadougou est fournie par les précipitations efficaces, c'est à dire par le volume d'eau qui reste disponible à la surface du sol après soustraction des pertes par évapotranspiration réelle. L'eau se répartit en deux (02) fractions:

- Le ruissellement qui alimente l'écoulement de surface collecté par le réseau hydrographique;
- L'écoulement hypodermique ;
- L'infiltration qui alimente les nappes d'eaux souterraines.

IV.1.5.1 Les composantes du cycle hydrologique

Le cycle hydrologique est composé de la pluviométrie, de l'infiltration, du ruissellement et de l'évapotranspiration.

❖ Pluviométrie

Le cycle hydrologique part généralement de la pluie. Les précipitations sont des produits sous forme de liquide ou solide issus, de la condensation de la vapeur d'eau tombant, des nuages ou déposés par l'air humide sur le sol. Les précipitations sont mesurées dans des pluviomètres installés au niveau des stations pluviométriques.

❖ Interception

L'interception fait partie des pertes qui interviennent sur le bilan hydrologique. C'est le processus par lequel une partie des précipitations est captée et retenue par la végétation, puis évaporée sans avoir atteint le sol.

❖ Evapotranspiration

L'évapotranspiration est une combinaison de deux termes, à savoir, l'évaporation à partir d'une surface, d'un plan d'eau, et la transpiration des végétaux. C'est un phénomène très

complexe car les mécanismes qui le gouvernent ne sont pas toujours totalement connus et peuvent différer d'un milieu à un autre. Il en résulte alors que son estimation est aussi complexe.

❖ Infiltration

Le phénomène d'infiltration se produit après reconstruction d'un certain niveau d'humidité du sol. C'est une propagation de l'eau vers les tranches de sols plus profondes et vers la nappe. L'arrivée de l'eau au niveau de la nappe se produit d'une manière différée par rapport à la pluie en fonction de l'emplacement des piézomètres. La hauteur d'infiltration est la quantité d'eau infiltrée à travers le sol pendant une durée déterminée. Le taux d'infiltration représente la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol. C'est la hauteur d'infiltration rapportée au temps.

❖ Ruissellement

Le terme ruissellement ou écoulement de l'eau englobe le ruissellement superficiel, l'écoulement hypodermique et souterrain. Il se produit, lorsque l'intensité de la pluie est très forte ou que le sol est totalement imperméable. Le ruissellement est tributaire à la capacité de rétention du sol.

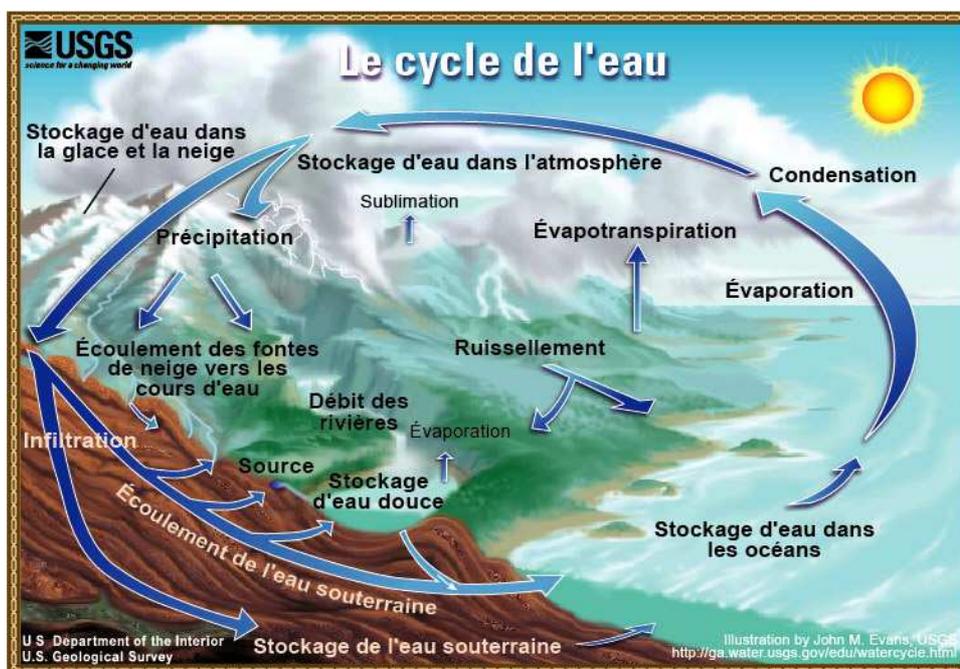


Figure 17 : Illustration du cycle global de l'eau

IV.1.5.2 Les mécanismes de recharge des aquifères

Trois mécanismes de recharges existent ; ils seront examiner successivement dans cette étude :

❖ La recharge directe

Selon DIENG, 1999, elle est observée lorsque le sol atteint son niveau d'humidité et que la pluie se prolonge. Elle se traduit par une propagation verticale de l'eau vers les tranches de sol plus profondes vers la nappe : C'est l'infiltration directe de l'eau de pluie qui se fait par front d'humidité suivant les couches de sol jusqu'à l'aquifère. Elle est considérée comme uniforme sur l'ensemble du domaine étudié. L'effet de la recharge directe sur le niveau piézométrique de la nappe se fera sentir avec une remontée du niveau piézométrique dans le temps par rapport à la pluie advenue: C'est le retard à l'infiltration.

❖ La recharge indirecte préférentielle

Cette recharge se fait suivant des zones préférentielles (fissures, fractures...) Exemple des zones de socles et régions karstiques.

La tectonique engendre un compartimentage et une intense fracturation dans les formations gréseuses et granitiques (**Figure 18**). Des axes de drainages préférentiels ainsi créés, liés à de forts gradients, favorisent des vitesses de transit rapides.

❖ La recharge indirecte par les plans d'eau

Les échanges entre l'aquifère et le plan d'eau se manifestent par une alternance de transfert d'eau (drainage et alimentation) suivant le rythme des saisons.

- Décharge de l'aquifère vers le plan d'eau en période de décrue ;
- Recharge de l'aquifère en crue

L'objet de ce travail de recherche est d'étudier l'infiltration vers les aquifères : cas où le niveau piézométrique de la nappe est inférieur à la côte (position) de la surface libre dans le plan d'eau.

Vu le contexte hydrogéologique de la région de Ouagadougou, nous estimons que la recharge des aquifères profonds sera essentiellement de type indirect préférentiel et directe pour les aquifères superficiels.

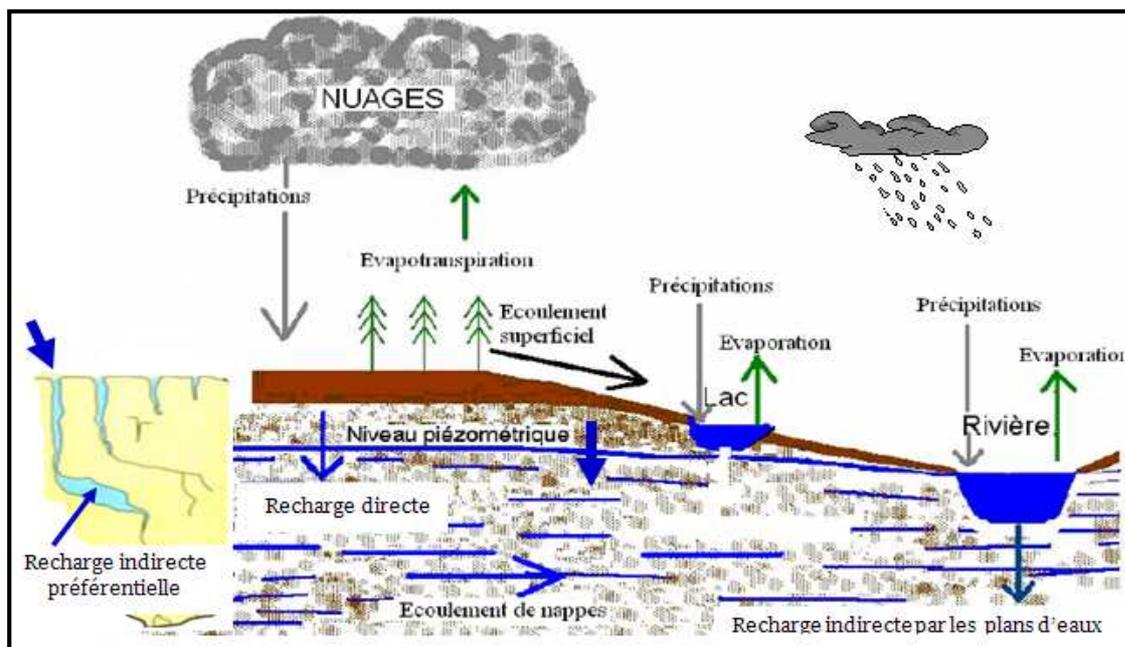


Figure 18 : Illustration des mécanismes de recharges (Lerner, 1997 ; modifié)

IV.1.6 Résumé sur les méthodes d'évaluation de la recharge des aquifères

Cette vision générale sur les méthodes provient essentiellement de l'étude de N'DIAYE, 2008.

Les méthodes d'estimation de la recharge s'appuient sur les données concernant les eaux de surface et les eaux souterraines.

IV.1.6.1 Méthode du bilan de THORNTHWAITE⁵

Le bilan hydrique à l'échelle du bassin versant, est le bilan d'eau fondé sur le principe que pendant un certain intervalle de temps, le total des apports au bassin versant doit être égal au

⁵ Charles Warren THORNTHWAITE, Climatologue américain

(Bay City 1899-Bridgeton, New Jersey, 1963)

total des sorties plus la variation positive ou négative du volume d'eau stocké dans le bassin (EPFL).

Ce phénomène continu du bilan de l'eau peut être schématisé suivant quatre phases : les précipitations, l'évaporation, le ruissellement de surface et l'écoulement souterrain.

Ainsi l'équation du bilan hydrique se fonde sur l'équation de continuité et s'exprime comme suit, pour une période de temps Δt et sur un bassin donné (ici bassin versant du Nakambé).

$$P = E + I + R + \Delta S$$

Avec les spécifications ci-après :

P représente la hauteur moyenne de la pluie tombée [mm] ;

E traduit l'évapotranspiration réelle (Parfois notée ETR) [mm] ;

I est l'infiltration qui alimente - recharge- la nappe [mm] ;

R est le ruissellement de surface : c'est la lame d'eau écoulée à l'exutoire du bassin [mm];

ΔS est la variation de stock d'eau dans le sol pendant la période considérée [mm].

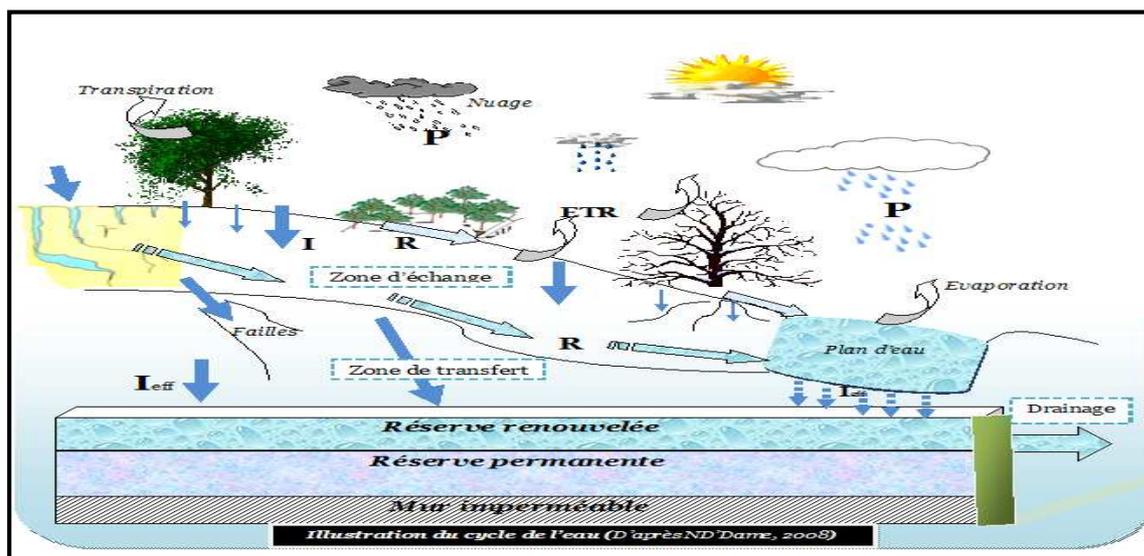


Figure 19 : Schéma conceptuel du bilan de Thornthwaite

Faire le bilan du cycle de l'eau revient ainsi à quantifier les différents termes de cette équation. L'hydrogéologue s'intéresse à la détermination du terme **I** constituant la part qui alimente la nappe d'eau souterraine. Compte tenu de la complexité du processus d'échange entre l'écoulement souterrain et celui de surface, il considère la pluie efficace (P_{eff}) ou eau utile (EU), comme étant la somme du ruissellement [R] et de l'infiltration [I_{eff}].

$$\text{Ainsi } P_{eff} = EU = R + I_{eff}$$

L'infiltration efficace [I_{eff}] est la part des précipitations qui alimente effectivement la nappe.

Pour DASSARGUES, 2006, le modèle conceptuel du bilan de Thornthwaite se base sur les considérations ci-après :

- ❖ La zone non-saturée du sol est considérée comme un stock rechargeable en eau. Cette hypothèse permet de se décharger de la complexité des écoulements en milieux poreux partiellement saturés, en modélisant cette zone par un stock ou réservoir d'eau rechargeable ;
- ❖ Le stock modélisant le milieu partiellement saturé possède une capacité maximale et que cette valeur appelée capacité de stockage en eau du sol (CSE) est connue. Cette hypothèse peut se justifier par le fait que le sol ne peut pas contenir plus d'eau que celle équivalant à sa saturation ;
- ❖ Enfin, il ne peut y avoir infiltration vers la nappe ou ruissellement que lorsque cette capacité de stockage en eau du sol est satisfaite.

L'approche Thornthwaite est un modèle constitué de trois réservoirs reconstitués comme suit :

- ❖ Les précipitations reconstituent le réservoir évapotranspiration (d'une capacité variable d'un mois à l'autre) ;
- ❖ L'excédent (P-ETP) reconstitue le réservoir stock en eau du sol ;
- ❖ S'il y a encore un excédent, celui-ci alimente le réservoir "recharge + ruissellement"

La méthode consiste à calculer donc l'évapotranspiration potentielle (ETP) ; la comparer avec les précipitations du mois considéré. Les conditions se présentent ainsi :

Si $P \geq ETP$: les précipitations sont en surplus ;

- ❖ Alors $ETR=ETP$ et l'excédent $[P-ETR]$ rechargera d'abord la capacité de stockage en eau (CSE), avant de s'infiltrer ou de ruisseler ;

Si $P \leq ETP$: les précipitations sont déficitaires

- ❖ Alors la pluviométrie est insuffisante pour satisfaire l'évapotranspiration, le déficit d'eau $[ETR-P]$ sera totalement ou partiellement comblé par l'eau se trouvant dans le stock d'humidité initial du sol. (ΔSi).

Voir schéma illustratif de la méthode du bilan de Thornthwaite (**annexe IV-3**).

Conclusions et recommandations d'étude antérieures

Différents auteurs, à travers leurs études, ont tiré des conclusions et fait des recommandations sur la méthode d'estimation de la recharge selon Thornthwaite.

L'approche Thornthwaite selon DIENG et BAZIE, 1995, peut donner une estimation de la recharge, mais elle pose un certain nombre de problèmes, notamment la prise en compte de l'évaporation en période sèche et le choix des valeurs de la réserve en eau du sol. Ces valeurs dépendent de la nature du sol et de l'épaisseur de la zone d'échange considérée.

Quant à DAKOURE, 2003, le choix de la réserve facilement utilisable (RFU)⁶ reste la difficulté majeure dans cette approche -Méthode de Thornthwaite. Celle-ci dépend de nombreux paramètres à savoir : la nature de la composition lithologique et de l'épaisseur de la couche superficielle, du climat, de la profondeur du niveau piézométrique et est surtout influencée par le type de couverture végétale.

Rappelons que la RFU est une notion définie arbitrairement, puisque plus le taux d'humidité du sol descend vers le point de flétrissement temporaire, plus la plante a du mal à prélever l'eau COMPAORE, 2005. Le sol apparaît comme un réservoir, la RFU est la partie disponible à volonté.

IV.1.6.2 Technique basée sur la fluctuation de la surface piézométrique

⁶ Selon le dictionnaire environnement, la RFU correspond à la quantité d'eau du sol en dessous de laquelle une plante flétrit, ce qui permet de déterminer les doses d'irrigation. Elle est exprimée en mm.

La mesure du niveau piézométrique est l'opération de base en hydrogéologie; on utilise généralement des sondes piézométriques qui détectent le niveau de la nappe au moment de l'opération. La mise en place du réseau de points d'observation sur la zone d'étude vise à atteindre les objectifs suivants :

- ❖ La mise en évidence de la réponse de la nappe après les précipitations ;
- ❖ Le suivi et la surveillance quantitative et qualitative des eaux souterraines ;
- ❖ La détermination des directions et sens d'écoulement des eaux;
- ❖ L'évaluation des réserves en eaux souterraines exploitables, renouvelables et/ou totales.

Pour avoir un niveau piézométrique représentatif, les mesures doivent être faites dans un puits ou piézomètre stabilisé en dehors de toutes perturbations (prélèvements, pompages...), selon le processus suivant :

Au niveau du point considéré, on mesure l'altitude-côte Z du niveau de sol- par rapport à un niveau de référence, généralement le niveau zéro des mers ;

Dans un puits ou piézomètre situé au niveau du point considéré, on mesure après stabilisation du niveau, la profondeur (h) de l'eau par rapport au sol;

On obtient ainsi la charge hydraulique H ou niveau piézométrique par rapport au niveau de référence en faisant $H = Z - h$.

Conclusions et recommandations des études antérieures

Le travail de recherche mené par DAKOURE, 2003 a estimé à partir de cette méthode, une recharge de l'ordre de 16 mm/an, sur le bassin versant du Kou en considérant une porosité de 1%. Et plus loin, il affirme que cette recharge est maximale au cœur de la saison pluvieuse, et même pour l'essentiel, elle intervient pour près de 60% entre Août et Octobre.

Cependant, l'application juste de cette méthode paraît délicate Bridget R, Healy R.W, et Cook P.G., 2002. SAURET , 2007 confirme ce fait en disant: « La grande contrainte étant la détermination de la porosité efficace [η_e] ou d'une valeur représentative du coefficient d'emménagement spécifique [S_s] garantissant que les fluctuations de la surface piézométrique sont dues à l'importance de la recharge et, non le résultat des changements de pressions atmosphériques, des effets des pompages d'eaux ou autres phénomènes ».

NDIAYE, 2008, a montré à travers son étude que les deux méthodes présentent des insuffisances. Pour lui, l'approche THORNTHWAITE reste délicate quant à son application en zone semi-aride et exige des études complémentaires basées sur les propriétés chimiques et isotopiques des eaux de pluie et des eaux interstitielles de la zone non saturée. Il poursuit en citant SAURET, 2006, qui, dans une analyse critique des méthodes d'évaluation de la recharge, soutient que la méthode est inappropriée (en milieu semi-aride) au vue de la grande variabilité des valeurs d'évapotranspiration et de précipitation très sensibles aux conditions climatiques. Mais que la méthode reste néanmoins intéressante pour une estimation des contrastes de recharge.

Quant à l'application des techniques de fluctuations piézométriques, il stipule que la difficulté réside surtout en la détermination de la porosité efficace du milieu saturé.

En hydrogéologie, tout se passe à l'abri du regard, mais les piézomètres, à réponse positive, détectent continuellement les gouttes d'eau qui parviennent à la nappe.

D'après DIENG, BAZIE et SCHMITT, 1995, la valeur la plus vraisemblable de la recharge, lorsque les paramètres hydrodynamiques de la nappe, notamment le coefficient d'emmagasinement, sont bien connus, est celle qui permet de restituer avec une bonne fiabilité les variations consécutives du niveau de la nappe.

Ainsi malgré la faiblesse de la couverture en réseau piézométrique dans la zone d'étude, cette méthode donne une bonne estimation des remontées nettes positives qui sont des indicatifs de la recharge dans la région de Ouagadougou.

IV.2 CARACTERISATION DE LA DYNAMIQUE DES AQUIFERES DE LA REGION DE OUAGADOUGOU

IV.2.1 Analyse et interprétation des évolutions temporelles des niveaux piézométriques

Le piézomètre du CIEH, situé dans les altérites, a la chronique la plus longue de Ouagadougou. Elle débute en 1978 jusqu'en 2004. Les autres piézomètres ont été réalisés par l'ONEA pour suivre l'évolution de la nappe profonde entre 2001 et 2004. Nous avons choisi

d'analyser l'évolution des niveaux piézométriques des piézomètres ayant des variations temporelles remarquables du niveau de l'eau (**figures 15 et 16**) paragraphe (**IV.1.3**).

L'interprétation des courbes piézométriques et pluviométriques permettra :

- De caractériser l'alimentation des aquifères et les prélèvements d'eau souterraine de l'année ;
- De mettre en relief le comportement piézométrique annuel et interannuel des aquifères

IV.2.1.1 Evolution temporelle de la piézométrie dans les altérites (piézomètre du CIEH)

D'après FILIPPI et al, 1990, la recharge varie considérablement d'une année à l'autre sous l'influence des fluctuations climatiques.

Les bas et hauts niveaux des eaux observés sont de 6,78m (en1978) et 10,86m en 1999. la période de prélèvement par évaporation va de Novembre à Juin et la remontée commence en Juillet pour culminer en octobre c'est-à-dire qu'il y a un léger décalage entre le pic des précipitations(Août) et celui de la recharge qu'il faut lier au temps de séjour qui est de 1 à 2 mois environ.

On observe deux périodes où l'on a connu une baisse remarquables du niveau de l'eau : de 1978 jusqu'en 1988 avec un niveau statique à 10,4m et de 1996 à 1999 avec environ 11m. La pluviométrie croissante a favorisé une remontée significative entre 1991 et 1996.

Entre 1999 et 2004 on observe une stabilisation du niveau statique due probablement à une mauvaise infiltration des eaux. Selon OUANDAOGO/YAMEOGO, 2008, cette stabilisation a été constatée depuis la construction du canal de l'université de Ouagadougou.

IV.2.1.2 Evolution temporelle de la piézométrie dans la nappe profonde

IV.2.1.2.1 Evolution temporelle de la piézométrie dans QP106

Ce piézomètre se situe à proximité du forage QP122 (**Figure 20**) en exploitation et lui sert de puits d'observation.

Du fait de la surexploitation du forage QP122, les niveaux piézométriques sont plus profondes (**figure 14**). Le niveau bas s'observe généralement en mai avec une moyenne de 12,43m. Quant au niveau haut des eaux, il se situe entre Juillet et Août matérialisé par une remontée significative, ce qui nous fait dire que malgré sa profondeur et à l'exploitation intensive du forage QP122, ce piézomètre réagit parfaitement aux épisodes pluvieux. Cela s'expliquerait certainement par une bonne et significative recharge de la nappe captée par QP106. L'assertion de OUANDAOGO/YAMEOGO, 2008, vient confirmer cet état de fait à savoir que le piézomètre QP106 se situe sur une fracture régionale de direction Est-Ouest.

Ce qui explique l'importante recharge de cette nappe malgré les contraintes auxquelles elle est soumise.

Au niveau de l'aquifère de socle granitique de Ouagadougou, les possibilités d'écoulements souterrains dépendent de la nature des roches, de la fissuration, ainsi que de l'épaisseur d'altération OUANDAOGO/YAMEOGO, 2008.

IV.2.1.2.2 Evolution temporelle de la piézométrie dans QP104

On note une très faible variation de niveau et que la nappe ne se vidange pratiquement pas (**Figure 16**). Cela pourrait s'expliquer par le fait que le piézomètre QP104 soit situé dans une zone dont la recharge n'est pas uniquement tributaire des pluies efficaces et de plus la nappe ne subirait aucune influence extérieure (pompage). Ce piézomètre captant une nappe profonde avec une profondeur de 69,75m, nous estimons que la nappe est à l'abri de tout prélèvement évaporatoire. BAZIE, DIENG, 1995 ont conclu dans ce sens en disant qu'au niveau de Ouagadougou, la profondeur maximale de reprise de l'eau par évaporation atteint 3m et que toute lame d'eau qui franchirait cette cote irait alimenter les réserves souterraines.

Selon OUANDAOGO/YAMEOGO, 2008, QP104 est situé en bordure de marigot et occupe plusieurs fractures dont la plus importante est sub-v verticale. Ce qui explique la faible variation de niveau et la presque non vidange de la nappe qui est liée à sa situation en zone d'alimentation où l'épaisseur d'altération dépasse 25m.

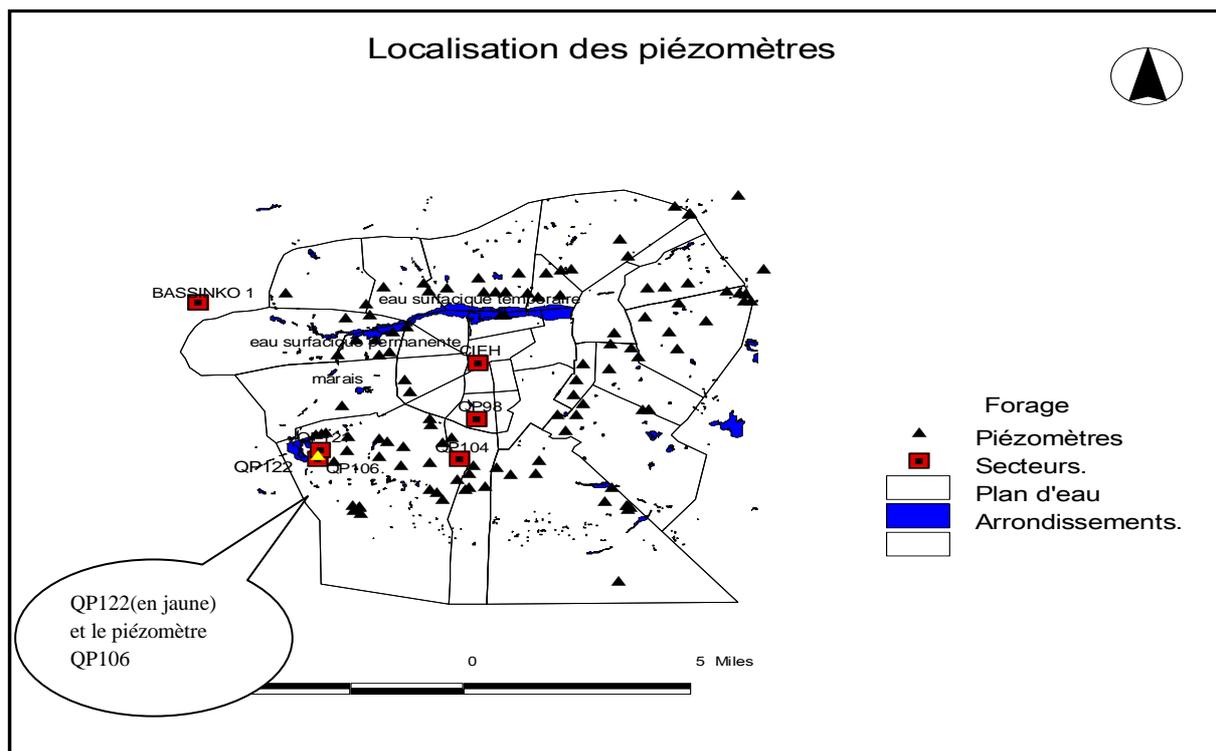


Figure 20 : Situation des différents piézomètres et forages

IV.2.2 Etude des paramètres hydrodynamiques

Ces paramètres ont été obtenus par la méthode de THEIS à partir des essais de pompage, on assimile les aquifères à un milieu poreux homogène. Par ailleurs, ces paramètres sont fortement influencés par les épaisseurs crépinées. Notons que ces essais de pompage n’ont pas fait l’objet d’une interprétation de notre part. Les différents paramètres avaient déjà été calculés et proviennent des données sur les forages que nous avons collectées. La synthèse des ces paramètres est présentée dans le tableau suivant.

Tableau 5 : Caractéristiques hydrodynamiques

Variabes	Nombre de forages	Minimal	Maximal	Moyenne	Médiane	Ecart-type
Transmissivité T (m ² /s)	109	2,9E-05	6,5E-03	5,8E-04	4,5E-04	6,9E-04
Perméabilité K (m/s)	109	3,3E-05	1,6E-04	9,2E-05	8,6E-05	6,2E-05
Coefficient d'emmaganement S(%)	109	1,0E-03	1,0E-01	4,2E-02	2,6E-02	4,9E-02

IV.2.2.1 La transmissivité

Les valeurs de transmissivité varient entre $2,9.10^{-5}$ et $6,5.10^{-3}$ m²/s. Ces valeurs sont bonnes avec une moyenne de $5,810^{-4}$ m²/s qui traduit ainsi la bonne qualité des propriétés conductrices du socle de la région en particulier la partie nord-ouest de la ville.

Selon MILLVILLE, 1990, ces valeurs de transmissivité ne sont pas en toutes logiques représentatives d'un domaine aquifère peu fracturé de perméabilité comprise entre 10^{-7} et 10^{-6} m/s. Cependant il convient de signaler que l'implantation de tous les forages étudiés ici a été fait par prospection géophysique sur les meilleures fractures de la zone ; leurs caractéristiques sont ainsi celles des failles et non celles du milieu fissuré.

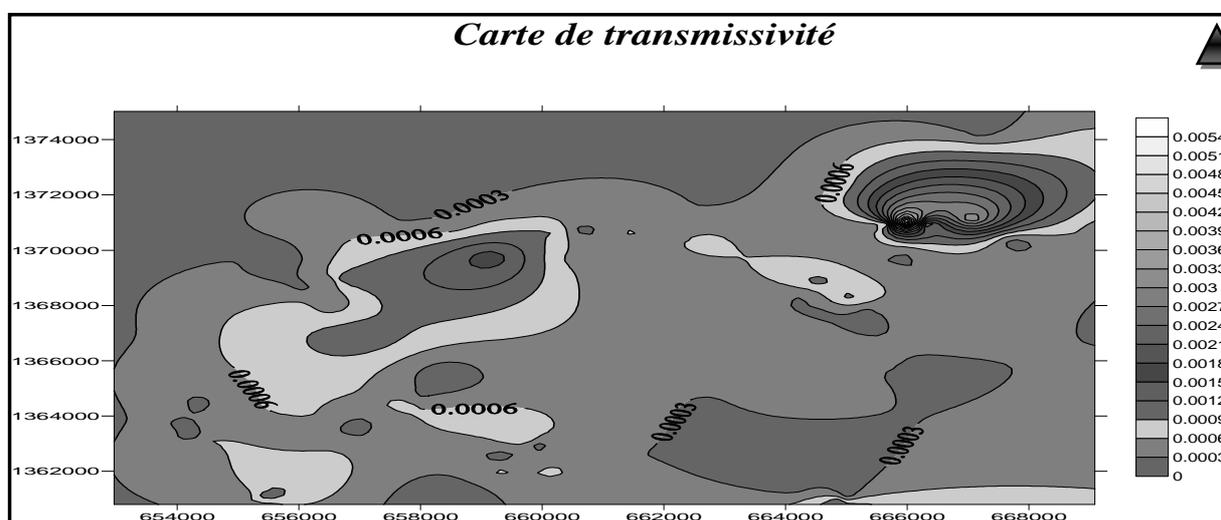


Figure 21 : Carte de transmissivité de la région de Ouagadougou

IV.2.2.2 Le coefficient d'emmagasinement

Ce coefficient caractérise la porosité efficace de l'aquifère. Il varie entre $1,0.10^{-3}$ et $1,0.10^{-1}$ avec une moyenne de $4,2.10^{-2}$. Ils sont relativement forts. Il se pourrait qu'ils soient influencés par les horizons d'arènes grenues.

Ces coefficients constituent le cas présent, selon COMPAORE, 1997, un bon moyen de vérification de l'existence de drainage entre aquifère superposé altérite/socle et montrent aussi que l'on se trouve dans un milieu semi-captif non confiné.

IV.2.2.3 La perméabilité

Calculée à partir d'essai de nappe allant de 48 à 72h, la perméabilité est relativement assez bonne, de l'ordre de 10^{-5} m/s. Elle varie entre $3,3.10^{-5}$ et $1,6.10^{-4}$ m/s avec une moyenne de

$9,2 \cdot 10^{-5}$ m/s. Les valeurs varient selon les méthodes utilisées lors de l'interprétation des essais de pompage.

IV.2.2.4 Le débit spécifique

Ce débit est préconisé à la fin d'essai de pompage longue durée .Il varie entre 1,20 et 34,6 m³/h/m avec une moyenne de 9,12 m³/h/m pour notre zone d'étude.

Il stabilise le niveau dynamique à 2 voire 3m au dessus du niveau dynamique maximum (rapport ANTEA, 1995).Il constitue ainsi un débit minimum garanti sur 7 à 8 mois d'exploitation de la nappe aquifère à raison de 10 à 12h de pompage par jour (pour les forages exploités par l'ONEA) et 20h par jour pour les autres forages.

IV.3 ESTIMATION DE LA RECHARGE PAR LA METHODE DES FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES

IV.3.1 Principe de la méthode

La méthode stipule que les fluctuations de la surface piézométrique sont des « variations continues alternatives » dues à la recharge ou décharge des aquifères. L'étude porte sur l'alimentation parvenant à la surface de la nappe, autrement dit l'élévation du niveau des eaux souterraines.

Le principe de calcul de la recharge [R] ou l'infiltration efficace [Ie] introduit deux grandeurs :

- ❖ La variation de niveau piézométrique [$\Delta h = h_2 - h_1$] en fonction de la référence de mesure choisie;
- ❖ La porosité efficace [η_e] qui représente pour une nappe libre le coefficient d'emmagasinement spécifique (S) ;

Ainsi l'algorithme de la recharge entre deux mesures piézométriques h_1 et h_2 s'établit comme suit:

Si $h_2 > h_1$: Augmentation du niveau piézométrique, alors la recharge :

$$R = \eta_e * \frac{dh}{dt} = \eta_e * \frac{\Delta h}{\Delta t} ;$$

Si $h_2 < h_1$: Diminution du niveau piézométrique, alors $R = 0$;

Avec

- R en mm/mois;
- Δh en mm ;
- η_e est exprimé en % ;
- Δt est le pas de temps en mois entre les mesures piézométriques.

Cet algorithme ne tient pas compte de la vidange de l'aquifère

IV.3.2 Méthodologie de calcul et présentation des résultats

Les différences de niveau piézométrique observées en un point donné, entre deux instants définis, servent à définir entre autre une variation de réserve exprimée en hauteur d'eau, en ce point, d'après les hypothèses que l'on admet sur le coefficient d'emménagement moyen ou la porosité efficace FORKASIEWCZ, 1969.

Nous avons choisi un pas de temps mensuel et le calcul est fait en faisant la différence entre deux valeurs de mesures moyennes mensuelles consécutives, considérant ainsi comme référence, celle des mesures du niveau de l'eau car étant en zone de socle et n'ayant pas la côte Terrain Naturel (TN) exacte des piézomètres.

Une autre méthode consiste à calculer la différence entre le niveau d'étiage et de pointe dans les piézomètres pour une année donnée. Cependant nous estimons que cette approche ne permet pas une estimation réaliste de la recharge car elle ne prend pas en compte les variations mensuelles de certains paramètres : climatiques par exemple. En effet, l'écart entre la période d'étiage (Avril-Mai) et de pointe (Septembre-octobre) en générale, est de l'ordre de quelques mois et tout phénomène affectant la fluctuation du niveau de la nappe pendant cette période est évaluée avec une marge d'erreur assez importante.

Ainsi la valeur la plus vraisemblable de la recharge sera alors, donnée par la méthode prenant en compte les valeurs moyennes mensuelles consécutives.

Pour estimer la recharge par cette méthode de variation du niveau piézométrique dans la nappe supérieure, nous avons considéré le piézomètre du CIEH car ayant la chronique la plus

longue (30ans) et un suivi régulier, et cela afin d'obtenir une valeur représentative de la recharge.

Les valeurs retenues correspondent à des valeurs moyennes mensuelles. Les valeurs manquantes sont remplacées par la moyenne mensuelle des autres années.

En ce qui concerne la nappe de l'horizon fissuré, la recharge a été estimée à partir des mesures sur 3 ans (2001-2004) de deux piézomètres : QP98 et QP121; les autres étant influencés, QP106 sujet à des perturbations dues à l'exploitation du forage QP122 et QP104 situé dans une zone d'alimentation (proche d'un marigot).

Sous Excel 2007, nous avons écrit un programme qui calcule, par an, le cumul des variations positives du niveau de l'eau [$\Delta h > 0$] (**Tableau 6 et 7**). Une valeur moyenne annuelle [Δh_{moy}] est évaluée. Elle correspond ainsi à la variation annuelle du niveau de l'eau dans le piézomètre.

La recharge est obtenue en multipliant Δh_{moy} par la valeur de la porosité efficace des roches.

IV.3.2.1 Estimation de la porosité efficace

La porosité efficace correspond à la part de porosité occupée par l'eau libre de mouvement. Elle est aussi appelée porosité de drainage ou porosité cinématique et est notée η_e DIENG, 1999.

Elle représente le coefficient d'emménagement spécifique pour une nappe libre. Elle correspond ici à la porosité des roches en zone saturée et est défini comme suit :

$$\eta_e = \frac{V_e}{V_t} = \frac{\text{volumed'eau libre}}{\text{volumetotal de la roche}}$$

L'eau qui arrive dans le sous-sol s'y accumule et y circule. La porosité efficace, comme la perméabilité, est un paramètre qui mesure ces deux aspects.

Elle détermine pour les roches du sous-sol, leur capacité d'accumulation de l'eau (et plus spécialement de l'eau mobilisable).

Pour mesurer la porosité d'une roche on mesure tout simplement la quantité d'eau (volume) qu'elle est susceptible de retenir (différence entre la masse de roche sèche et la masse de roche

après ressuyage, c'est-à-dire écoulement de toute l'eau de gravité). C'est donc un pourcentage qui exprime le volume disponible pour l'eau (ou un autre liquide de densité voisine qui occuperait le même espace) par rapport à un volume donné de roche.

Remarquons qu'en règle générale plus les grains d'une roche sont fins plus la porosité efficace diminue.

La porosité efficace (P_{eff}) au niveau du bassin du Nakambé est estimée dans la fourchette 2 à 5% SOME, 2006. Cette plage sera retenue pour le calcul de la recharge.

IV.3.2.2 Présentation des résultats

Les résultats des variations moyennes mensuelles des niveaux piézométriques dans la nappe superficielle et profonde sont résumés dans les tableaux 6 et 7 suivants :

On observe à travers ces résultats que la remontée, au niveau de la nappe superficielle, est d'une manière générale, perceptible à partir de Juillet jusqu'en Septembre voire octobre. En ce qui concerne la nappe profonde, il n'y a pratiquement pas de décalage entre les mois les plus pluvieux (juillet et août) et cette remontée du niveau des nappes. La remontée se perçoit et reste significative pendant la période de pluvieuse. (Confère parties encadrées en rouge des tableaux 6 et 7).

Ces phénomènes proviennent du fait qu'au niveau de la région de Ouagadougou, les nappes sont atteintes de manières différentes par les pluies efficaces. La composante argileuse de l'horizon superficiel ne favorise pas la circulation de l'eau, provoquant du coup une recharge lente de la nappe superficielle.

Pour les aquifères profonds, le caractère indirect préférentiel de la recharge, l'importance de la fracturation et des filons de quartz permettent une circulation facile et rapide des eaux pour la réalimentation des nappes profondes. Ce qui explique cette significative recharge pendant les mois de pluie. SAVADOGO, 1984 confirme cela en disant : « On ne peut sous-estimer ici le rôle catalyseur des fractures et des éléments filoniens dans le drainage de l'eau ».

Les valeurs moyennes annuelles des variations (Δh_{moy}) calculées confirment également l'excellente recharge des nappes profondes par rapport à celles des horizons superficiels. Des

variations du niveau piézométrique (Δh_{moy}) de **997,60** mm /an dans les altérites et de **2873,75**mm/an dans la nappe profonde ont été obtenues (**Tableau 6** et **7**).

Tableau 6 : Calcul mensuel du cumul des variations par an dans la nappe profonde

Années	Piézomètres	Niveau-eau	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	Cumul remontée (mm)/an/piézomètre	moyenne/an
2001	QP98	hi	6,78	7,16	7,58	7,87	6,98	6,85	6,76	6,59	4,99	5,22	5,5	5,72		2950
		Δhi	-0,38	-0,42	-0,29	0,89	0,13	0,09	0,17	1,6	-0,23	-0,28	-0,22		2880	
	QP121	hi	4,35	4,52	4,98	5,56	5,86	5,61	4,96	3,71	2,92	2,84	3,47	3,71		
		Δhi	-0,17	-0,46	-0,58	-0,3	0,25	0,65	1,25	0,79	0,08	-0,63	-0,24		3020	
2002	QP98	hi	5,72	6,16	6,48	6,8	7,37	7,18	7,61	6,98	6,7	5,84	6,09	6,41		2470
		Δhi	-0,44	-0,32	-0,32	-0,57	0,19	-0,43	0,63	0,28	0,86	-0,25	-0,32		1960	
	QP121	hi	4,35	4,82	5,32	5,56	5,98	6	6,01	5,12	3,25	3,03	3,58	4,01		
		Δhi	-0,47	-0,5	-0,24	-0,42	-0,02	-0,01	0,89	1,87	0,22	-0,55	-0,43		2980	
2003	QP98	hi	6,78	7,16	7,58	7,87	8,02	7,79	6,93	5,81	5,5	5,09	5,14	5,15		3300
		Δhi	-0,38	-0,42	-0,29	-0,15	0,23	0,86	1,12	0,31	0,41	-0,05	-0,01		2930	
	QP121	hi	4,52	4,98	5,56	5,94	6,34	6,28	4,45	2,94	2,92	2,67	3,06	3,75		
		Δhi	-0,46	-0,58	-0,38	-0,4	0,06	1,83	1,51	0,02	0,25	-0,39	-0,69		3670	
2004	QP98	hi	5,72	6,18	6,48	6,8	7,37	6,9	6,16	5,81	5,3	4,61	4,87	4,87		2775
		Δhi	-0,46	-0,3	-0,32	-0,57	0,47	0,74	0,35	0,51	0,69	-0,26	0		2760	
	QP121	hi	4,35	4,63	4,82	5,32	5,56	5,59	4,5	3,71	2,92	2,8	3,4	3,4		
		Δhi	-0,28	-0,19	-0,5	-0,24	-0,03	1,09	0,79	0,79	0,12	-0,6	0		2790	
														$\Delta h_{moy}/an$	2873,75	

Tableau 7 : Calcul mensuel du cumul des variations par an dans les altérites

Années	Niveau de l'eau	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	Cumul des Δhi positifs (m/an)
1978	hi	6,51	6,62	6,68	6,71	6,74	6,77	6,68	6,42	6,10	5,57	6,30	6,52	
	Δhi		-0,11	-0,06	-0,03	-0,03	-0,03	0,10	0,26	0,32	0,53	-0,72	-0,23	1199,22
1979	hi	6,80	7,00	7,16	7,37	7,50	8,09	7,61	7,16	6,73	6,52	6,73	7,01	
	Δhi		-0,20	-0,16	-0,21	-0,13	-0,60	0,49	0,45	0,43	0,21	-0,22	-0,28	1578,40
1980	hi	7,23	7,39	7,64	7,85	7,99	8,09	8,06	7,98	7,30	7,28	7,65	7,93	
	Δhi		-0,16	-0,24	-0,21	-0,14	-0,11	0,04	0,07	0,68	0,01	-0,37	-0,27	810,29
1981	hi	7,70	8,04	8,28	8,52	8,63	8,66	8,65	8,22	7,85	7,67	7,85	8,06	
	Δhi		-0,34	-0,24	-0,24	-0,11	-0,03	0,01	0,42	0,38	0,18	-0,18	-0,21	985,00
1982	hi	8,17	8,28	8,48	8,60	8,63	8,67	8,54	8,27	8,03	8,12	8,29	8,45	
	Δhi		-0,10	-0,21	-0,12	-0,03	-0,04	0,13	0,27	0,24	-0,08	-0,18	-0,16	640,00
1983	hi	8,61	8,71	8,83	8,95	9,15	9,14	9,00	8,76	8,35	8,26	8,45	8,73	
	Δhi		-0,10	-0,12	-0,12	-0,20	0,00	0,14	0,24	0,41	0,09	-0,19	-0,28	885,00
1984	hi	8,94	9,18	9,24	9,32	9,42	9,41	9,40	9,26	9,15	9,45	9,56	9,77	
	Δhi		-0,24	-0,06	-0,08	-0,10	0,01	0,01	0,14	0,11	-0,30	-0,11	-0,21	270,00
1985	hi	9,15	9,66	10,46	10,65	10,77	10,13	9,93	9,77	9,44	9,30	9,50	9,75	
	Δhi		-0,51	-0,80	-0,19	-0,12	0,64	0,20	0,16	0,33	0,13	-0,20	-0,25	1470,00
1986	hi	9,90	10,03	10,25	10,42	10,45	10,44	10,24	10,09	9,69	9,35	9,36	9,60	
	Δhi		-0,13	-0,22	-0,17	-0,03	0,01	0,20	0,15	0,40	0,34	-0,01	-0,24	1100,00
1987	hi	9,60	9,75	9,95	10,16	10,32	10,45	10,30	10,12	9,73	9,54	9,33	9,72	
	Δhi		-0,15	-0,20	-0,21	-0,16	-0,13	0,15	0,18	0,39	0,19	0,21	-0,39	1120,00
1988	hi	9,75	9,98	10,19	10,31	10,35	10,41	10,14	9,87	9,45	9,26	9,30	9,54	
	Δhi		-0,23	-0,21	-0,12	-0,03	-0,07	0,27	0,27	0,42	0,19	-0,04	-0,24	1150,00
1989	hi	9,10	9,63	9,78	9,86	10,04	10,10	10,00	9,78	9,28	8,92	8,86	8,99	
	Δhi		-0,53	-0,15	-0,08	-0,18	-0,06	0,10	0,22	0,49	0,36	0,06	-0,13	1240,67
1990	hi	9,10	9,23	9,40	9,54	9,70	9,78	9,69	9,53	9,14	8,89	8,98	9,12	
	Δhi		-0,13	-0,17	-0,14	-0,16	-0,08	0,09	0,16	0,40	0,24	-0,09	-0,14	890,00
1991	hi	9,33	9,43	9,60	9,76	9,75	9,57	9,29	8,84	8,18	7,95	8,07	8,11	
	Δhi		-0,10	-0,16	-0,17	0,02	0,18	0,28	0,45	0,66	0,23	-0,13	-0,04	1815,00
1992	hi	8,38	8,61	8,71	8,83	8,97	9,07	9,01	8,65	7,88	7,78	7,83	8,02	
	Δhi		-0,23	-0,10	-0,12	-0,14	-0,11	0,06	0,37	0,77	0,10	-0,05	-0,19	1294,86
1993	hi	8,30	8,44	8,53	8,61	9,10	9,08	8,99	8,65	8,00	7,69	7,82	7,90	
	Δhi		-0,14	-0,09	-0,08	-0,48	0,02	0,09	0,33	0,65	0,31	-0,13	-0,08	1405,00
1994	hi	8,01	8,19	8,35	8,47	8,79	8,87	8,76	8,47	8,01	7,69	7,82	7,90	
	Δhi		-0,18	-0,15	-0,12	-0,32	-0,08	0,11	0,29	0,45	0,32	-0,13	-0,08	1177,50
1995	hi	7,72	7,94	8,16	8,32	8,48	8,66	8,53	8,28	8,03	7,69	7,82	7,90	
	Δhi		-0,22	-0,22	-0,16	-0,16	-0,19	0,13	0,25	0,26	0,33	-0,13	-0,08	970,00
1996	hi	8,06	8,30	8,37	8,47	8,67	8,72	8,54	8,27	8,03	8,12	8,29	8,45	
	Δhi		-0,24	-0,07	-0,10	-0,20	-0,05	0,19	0,27	0,24	-0,08	-0,18	-0,16	693,33
1997	hi	8,50	8,70	8,80	8,93	9,10	9,21	9,16	8,97	8,69	8,72	8,70	8,92	
	Δhi		-0,20	-0,10	-0,14	-0,17	-0,11	0,05	0,19	0,29	-0,03	0,02	-0,22	544,42
1998	hi	8,94	9,10	9,23	9,40	9,54	9,70	9,78	9,67	9,34	9,32	9,11	9,39	
	Δhi		-0,16	-0,13	-0,17	-0,14	-0,16	-0,08	0,11	0,33	0,02	0,21	-0,28	675,00
1999	hi	9,56	9,65	9,82	9,98	10,09	10,20	10,35	10,54	9,80	9,24	8,85	8,76	
	Δhi		-0,09	-0,17	-0,16	-0,11	-0,11	-0,15	-0,19	0,74	0,56	0,39	0,09	1775,00
2000	hi	9,12	9,10	9,23	9,40	9,54	9,70	9,54	9,27	9,03	8,96	9,05	9,17	
	Δhi		0,02	-0,13	-0,17	-0,14	-0,16	0,16	0,27	0,24	0,07	-0,09	-0,12	764,50
2001	hi	9,19	9,40	9,54	9,70	9,78	9,69	9,67	9,61	9,41	9,17	9,26	9,34	
	Δhi		-0,21	-0,14	-0,16	-0,08	0,09	0,02	0,06	0,20	0,24	-0,09	-0,08	610,00
2002	hi	9,49	9,64	9,68	9,70	9,87	10,05	10,00	9,70	9,63	9,34	9,24	9,20	
	Δhi		-0,15	-0,04	-0,02	-0,17	-0,18	0,05	0,30	0,07	0,29	0,10	0,04	853,33
2003	hi	9,24	9,25	9,31	9,42	9,62	9,50	9,27	9,08	8,31	8,61	8,65	8,74	
	Δhi		-0,01	-0,06	-0,11	-0,21	0,12	0,23	0,19	0,78	-0,30	-0,05	-0,08	1317,50
2004	hi	8,86	8,97	9,00	9,09	9,18	9,22	9,31	9,14	8,89	8,82	8,92	9,05	
	Δhi		-0,11	-0,03	-0,09	-0,09	-0,04	-0,09	0,17	0,25	0,07	-0,10	-0,13	495,00
2005	hi	9,25	9,40	9,52	9,65	9,83	9,98	9,52	9,22	9,03	9,13	9,24	9,41	
	Δhi		-0,14	-0,13	-0,13	-0,18	-0,15	0,46	0,30	0,19	-0,10	-0,11	-0,17	950,00
2006	hi	9,18	9,23	9,25	9,43	9,59	9,69	9,73	9,30	9,17	9,45	9,56	9,77	
	Δhi		-0,05	-0,02	-0,18	-0,16	-0,10	-0,05	0,43	0,13	-0,28	-0,11	-0,21	560,00
2007	hi	8,77	8,96	9,11	9,09	9,30	9,36	9,23	9,12	8,68	8,75	8,82	8,89	
	Δhi		-0,19	-0,15	0,02	-0,20	-0,06	0,12	0,12	0,43	-0,07	-0,07	-0,07	689,11
Δh moy/an en (mm)														997,60

Δh_i en mm/mois est la variation du niveau piézométrique.

Considérant les valeurs de 2 à 5% pour la porosité efficace avec une pluviométrie moyenne (P_{moy}) de 710 mm et les remontées moyennes annuelles calculées ci-dessus, on obtient les différents résultats consignés dans le **tableau 8**.

Tableau 8 : Valeurs de recharge par la méthode des variations du niveau piézométrique

Aquifères concernés	Nappe des altérites			Nappe profonde		
Paramètres évalués	Réserves renouvelées	Recharge effective	% de pluie infiltrée	Réserves renouvelées	Recharge effective	% de pluie infiltrée
Formules utilisées	$V_r = A \times \Delta h \times \eta_e$	$R_e = \Delta h \cdot \eta_e$	$(R_e \cdot 100) / P_{moy}$	$V_r = A \times \Delta h \times \eta_e$	$R_e = \Delta h \cdot \eta_e$	$(R_e \cdot 100) / P_{moy}$
Résultats	7 à 20×10^6 m^3/an	19,95 à 49,88 mm/an	7%	20 à 50×10^6 m^3/an	57 à 143 mm/an	20%

Avec :

- A = Superficie de Ouagadougou en m^2 (350 Km^2) ;
- Δh = Variation moyenne annuelle du niveau piézométrique ;
- η_e : Porosité efficace (2 à 5%) ;

Ainsi la quantité d'eau renouvelée et exploitable annuellement par les puits (nappe superficielle) à Ouagadougou est estimée entre 7 et 20 millions de m^3 et entre 20 à 50 millions exploitables par les forages. Cette réserve renouvelée correspondrait à une infiltration effective de l'eau de pluie variant entre **19,95 à 49,88 mm/an** dans les altérites et de **57 à 143 mm/an** dans les horizons fissurés.

L'estimation de la recharge à partir des données de 1978 à 1985 du piézomètre du CIEH par FILIPPI et al, 1990, avec une porosité efficace comprise entre 2,5 et 8% avait donné une hauteur d'infiltration effective moyenne de **67 à 132 mm/an** .

Le cumul des remontées nettes varie d'une année à une autre dans ce piézomètre (**Figure 21**). Les extrema sont 270 et 1815mm ; correspondant respectivement aux années 1984 et 1991, de faible et forte pluviométrie..

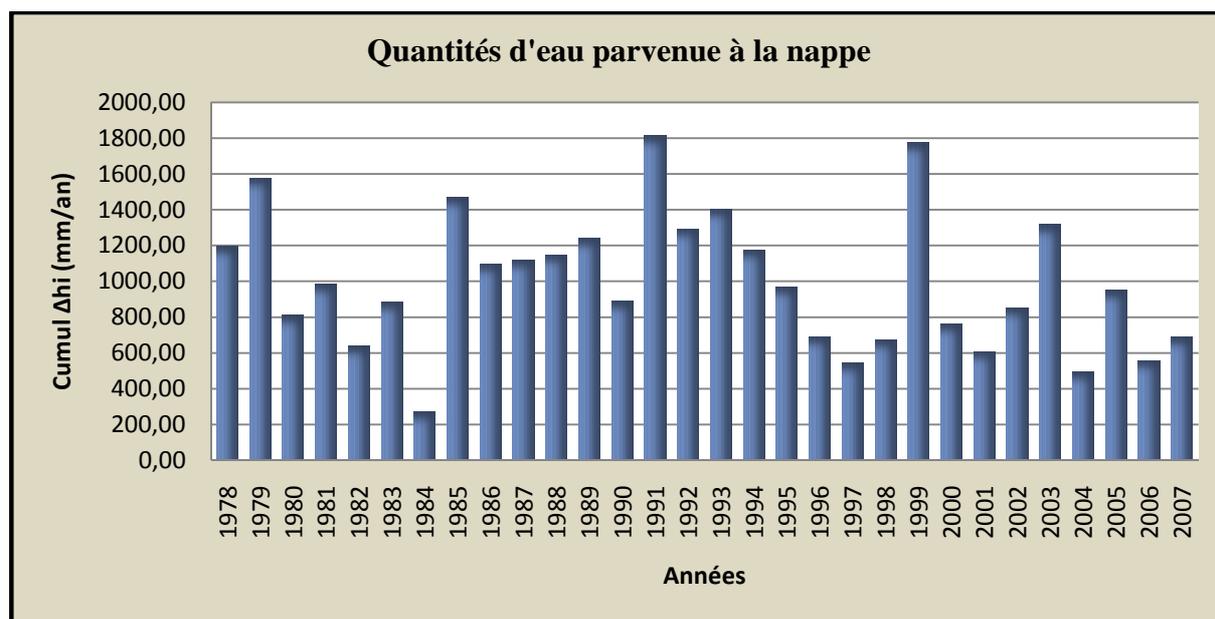


Figure 22 : Variation annuelle des volumes d'eau parvenus au piézomètre du CIEH

Ce travail n'a pas tenu compte du vidange de l'aquifère. La valeur réelle de la recharge devrait tenir compte de ce taux de vidange. Cette valeur de recharge trouvée serait donc une sous-estimation à l'échelle de la ville de Ouagadougou.

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Ce travail de recherche est une participation à l'amélioration de l'état de connaissance des ressources en eaux souterraines de la région de Ouagadougou. L'objectif principal de cette étude est de faire une étude géochimique et piézométrique des eaux souterraines de la région. Il a consisté à l'identification et à la caractérisation des aquifères et types d'eaux présents dans la région, à l'analyse du comportement de ces aquifères face aux épisodes pluvieux et l'évaluation de leur recharge par les précipitations météorologiques. Vu le contexte climatique et l'accroissement des besoins en eau dans la région, la connaissance de la quantité d'eau disponible dans les aquifères et leur condition de recharge s'avère nécessaire. Celle-ci permettra d'élaborer des stratégies efficaces de gestion et de protection des ressources en eaux souterraines de la région.

Cette thématique nous a permis d'identifier et de caractériser les différents types d'eaux et d'aquifères et d'estimer le taux de renouvellement de ceux-ci dans les altérites de la région de Ouagadougou:

- ❖ Le log type des forages nous indique trois (3) catégories d'aquifères qui se résume en deux (2) nappes exploitables par les ouvrages.
- ❖ L'analyse physico-chimique et le traçage isotopique nous ont situés sur le faciès hydrochimique des eaux et l'origine de la réalimentation des nappes à Ouagadougou : les eaux sont de type bicarbonaté calcique et magnésien avec une recharge exclusivement d'origine pluviale.
- ❖ L'estimation de la recharge d'après la technique de fluctuation du niveau piézométrique nous donne des valeurs de recharge annuelle entre 19,95 et 49,88 mm au niveau des horizons superficiels et de **57 à 143mm** dans la nappe profonde.

Il ressort à travers cette étude que la région de Ouagadougou dispose d'une réserve non négligeable d'eaux souterraines malgré les aléas climatiques. Elles constituaient jadis l'une des principales sources d'approvisionnement en ressources hydrauliques des populations. La subjectivité de la notion de volume exploitable la rend très difficile à définir. Elle dépend des choix des gestionnaires de la ressource. En considérant le volume exploitable comme équivalent au taux annuel de renouvellement des eaux souterraines, ce volume s'estime à plus de 50 millions de m³ d'eau souterraine dans la région.

Cependant une baisse généralisée du niveau piézométrique se perçoit à travers l'analyse des mesures des niveaux de l'eau, due probablement à la baisse des précipitations ces dernières décennies accentuée par le poids de l'urbanisation. Néanmoins l'on note en général une bonne réponse des aquifères faces aux épisodes pluvieux due à leur situation en zone de réalimentation, sur des failles majeures et dans des dépressions.

La réussite d'un développement durable suppose une parfaite autosuffisance en eau potable de ses populations. Cela dit, la méconnaissance et l'insuffisance de certaines données (piézomètres, pédologie...) rendent difficile toute étude hydrogéologique dans la région. Il est donc nécessaire de palier à ces manquements.

A ce titre nous recommandons :

- ❖ L'augmentation du nombre de piézomètres au niveau de la ville afin d'obtenir une couverture totale et un réseau piézométrique représentatif ;
- ❖ Un suivi régulier des mesures des niveaux piézométriques qui permettrait de suivre de façon précise les variations des niveaux des nappes.
- ❖ Une étude pédologique approfondie qui fournira des informations suffisantes qui permettent d'estimer de recharge par différentes méthodes.
- ❖ Elaborer des cartes géologiques à des échelles fines, ce qui va permettre une meilleure quantification des volumes d'eau contenue dans les aquifères de failles et fractures.
- ❖ Trouver un mécanisme rigoureux permettant de comptabiliser les prélèvements effectués dans chacun des aquifères.

Ce travail nous a permis de consolider et d'approfondir nos connaissances dans plusieurs domaines. L'expérience acquise durant ce travail notamment la conception de base de données et la maîtrise d'outils de modélisation du système aquifère semble être pour nous un tremplin pour une étude encore plus poussée afin d'une meilleure connaissance du système aquifère de socle de la région de Ouagadougou.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

ABADJI, H.D, Mémoire EIER 2002. Mise en place d'une base de données géo référencée des forages du BUMIGEB.

AKOUVI A., 2001. Etude géochimique et hydrogéologique des eaux souterraines d'un bassin sédimentaire côtier en zone tropicale. Implications sur la gestion, la protection et la préservation des ressources en eau du Togo (Afrique de l'Ouest), Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 154 pp.

APPELLO, C.A.J. et POSTMA , D, 2007. Geochemistry, groundwater and pollution

BOLY.A, 2007. Elaboration d'une Base de données pour le suivi des actions du projet ECOSAN_UE, CREPA, Ouagadougou, Burkina Faso

Bridget R, Healy R.W, et Cook P.G., 2002. Theme issue on groundwater recharge. Préface-hydrogéological journal pages 3-4

BUNASOLS, 1998. Etude morpho-pédologique de la province du Kadiogo/Echelle 1/5000^{0e} Rapport technique N°11

CASTANY G., 1982. Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod Université-Bordas, Paris, 238 pp

COMPAORE. G, 1997 : Evaluation de la fonction capacitive des altérites. Site expérimental de Sanon (Burkina Faso) : Socle granito-gneissique sous climat de type soudano-sahélien : Thèse de Doctorat – Université d'Avignon et des pays de Vaucluse.

COMPAORE M.L., 2005. Les données de bases de l'irrigation, Polycopié du cours EIER 3^{ième} édition. 49p

COULIBALY. O, Mémoire EIER 2005. Baisse de productivité des forages à gros débits en zone de socle : diagnostic et propositions de solutions

CRAIG, 1961. Isotopic variation in meteoric waters. Science,133:1702-1703

DAKOURE D., 1999. Composition isotopique des précipitations de Bobo-Dioulasso et relation avec les eaux souterraines des différentes unités des formations sédimentaires et du socle du Sud-ouest du Burkina Faso, Mémoire de DEA, Université Pierre et Marie Curie, 50 pp.

DAKOURE. D., 2003. Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure Sud-est du bassin sédimentaire de Taoudéni (Burkina Faso - mali) - Essai de modélisation. Thèse de Doctorat, Université Paris VI - Pierre et Marie Curie. 256p.

DASSARGUES A., 2006. Caractérisation des nappes aquifères : une nécessité pour leur gestion et leur protection. Jeudis de l'aquapôle, Université de Liège (Ulg/Belgique).

DIAW El Hadji B, 1992. Mécanisme de l'infiltration à l'échelle hectométrique et réalimentation de la nappe. Mémoire DEA en Mécanique et Ingénierie, Ecole Nationale des Ingénieurs des Travaux Ruraux et des Techniques Sanitaires, Université Louis Pasteur URA CNRS.

DIENG B. et BAZIE P., 1995. Bilan des transferts verticaux d'eau en zone non-saturée sous climat soudano-sahélien: application à l'estimation de la recharge des nappes. Rev. Sci. Eau. Rev. Sc. Eau, 8 (2): pp. 237-260 ;

DIENG B., BAZIE P., SCHMITI A., 1999 [École Inter États d'ingénieurs de l'Équipement Rural, BP 03. 7023 Ouagadougou, 03 Burkina Faso]. Transfert d'eau en milieu poreux non saturé. Recharge des nappes en climat soudano-sahélien

DINCER T., 1983. Sur l'alimentation des eaux souterraines de la zone de Kolokani-Nara (République du Mali). IAEA-SM-270/41.

FILIPPI. C et al, 1990. Evaluation de la recharge naturelle des aquifères en climat Soudano-Sahélien par modélisation hydrologique globale: Application a dix sites au Burkina Faso

FORKASIEWCZ J, 1969. Objectifs des réseaux de piézomètres permanents. Bulletin du BRGM, III,2: pp. 99-104.

GILLI, E, MANGAN, C, MUDRY, J, 2004. Hydrogéologie :objets, méthodes et application. Dunod, Paris, 290pp

GNANDI. K, 2009. Géochimie des eaux souterraines & Traceurs isotopiques. Polycopié de cours. Faculté des Sciences, Université de Lomé

GONFIANTINI, 1978.Determination of $\delta^{17}\text{O}$ values of reference water samples VSMOW and SLAP

JOSEPH, A. et ARANYOSSY, J.F., 1989. Mise en évidence d'un gradient isotopique de continentalité en Afrique de l'Ouest. Hydrogéologie, n° 3, pp. 215-218.

KONE.F, Mémoire EIER 2000. Suivi piézométrique au Burkina Faso : Bilan de 20 années d'observation

LALLAHEM.S, 2002 .Structure et modélisation hydrodynamique des eaux souterraines : application à l'aquifère crayeux de la bordure nord du bassin de paris. Thèse de Doctorat, université des sciences et technologies de Lille. 243pp

LAROCHE B., 1997. Détermination et représentation cartographique de la capacité de stockage en eau des sols du département de la côte d'Or, INRA, ENESAD (Rapport de stage)

MATHIEU. R., 1993 : Apport de la géochimie isotopique (^2H et ^{18}O) à l'étude des mouvements d'eau dans les sols argileux. Modélisation, étude expérimentale et application au milieu naturel (Burkina Faso) : Thèse de doctorat – Université Pierre et Marie Curie Paris VI.

MILVILLE .F, 1990 : Contribution à l'étude des mécanismes de la recharge naturelle des aquifères par les pluies en climat semi aride – Application au site expérimental de Barogo au Burkina Faso : Thèse de doctorat – Université Pierre et Marie Curie Paris VI.

N'DIAYE.D, Mémoire 2iE-2008 . Description et évaluation de la recharge des aquifères de la région de Bobo Dioulasso par les précipitations météorologiques (APEFE/Projet Eaux Souterraines-Bobo Dioulasso).

OUANDAOGO/YAMEOGO, S, 2008. Ressources en eau souterraine du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso : Qualité et vulnérabilité. Thèse de Doctorat, université d'Avignon et des pays de Vaucluse. 243pp

SAURET. E, 2006. Les processus de recharge des systèmes aquifères en milieu semi-aride : cas de la commune de Bobo-Dioulasso. Projet Eaux Souterraines. 32p.

SAWADOGO. A. N., 1984 : Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta Etude régionale du bassin versant de la Sissili : Thèse de Doctorat Es Sciences Naturelles - Université Scientifique et Médicale de Grenoble.

SIGG .L. et al. 1992 : Chimie des milieux aquatiques.

SOME.S, 2006.Étude d'élaboration du programme national d'approvisionnement en eau potable et assainissement à l'horizon 2015

SOME.S, 2009. Cours sur la géologie des aquifères à l'attention des étudiants de Master 1 de 2iE (Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement)

Liens internet

www.hydrogéologie.com

<http://www.springerlink.com/content/lcab2b2bfmcngk1m/>

http://www.afriquejet.com/encyclopedies/villes/ouagadougou_burkina-faso-200805254801/2.html

http://www.fasopresse.net/article.php3?id_article=14274

<http://www.biology.duke.edu/bio265/jlh26/abiotic.html>

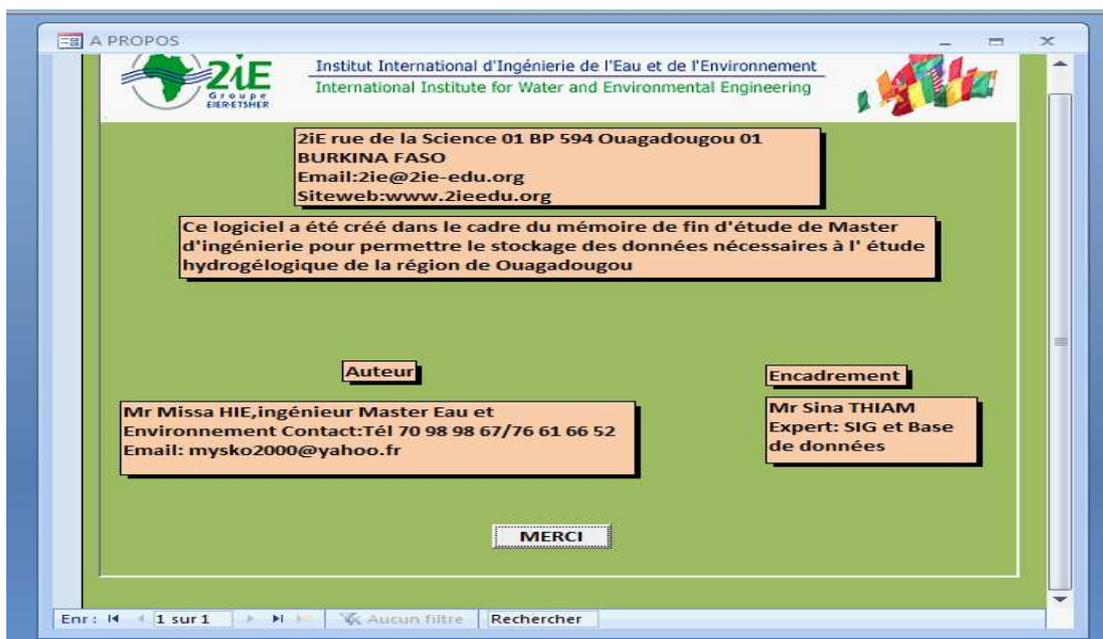
ANNEXES

ANNEXE 1 : SUR LE CHAPITRE II	78
ANNEXE 2 : SUR LE CHAPITRE III.....	84
ANNEXE 3 : SUR LE CHAPITRE IV	87

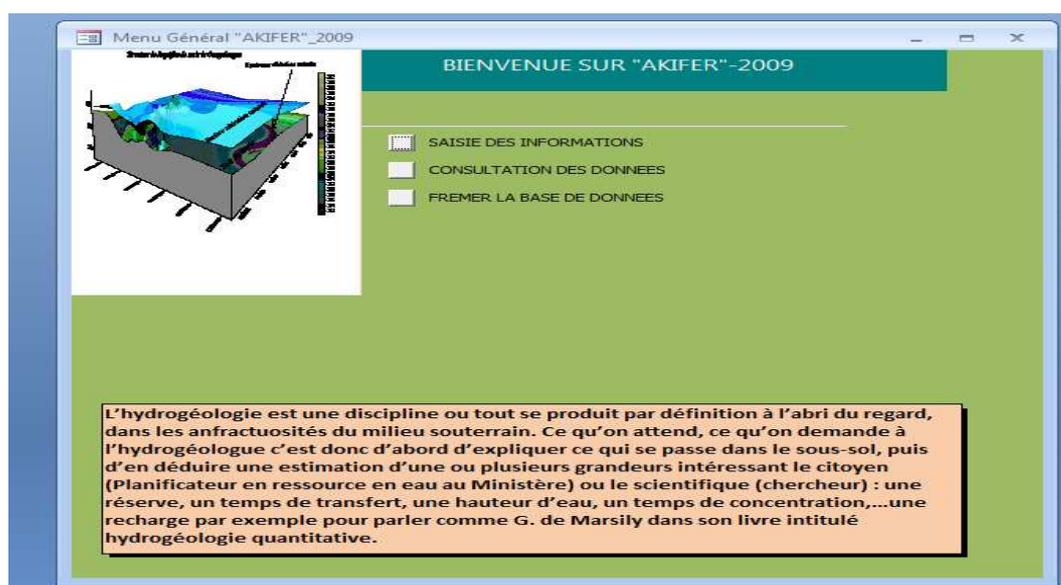
ANNEXE 1 : SUR LE CHAPITRE II

Annexe II-1 Prise en main de 'AKIFER_2009'

Au lancement de l'application AKIFER_2009 par clic sur l'icône de la base de données nous avons le formulaire suivant qui s'affiche :



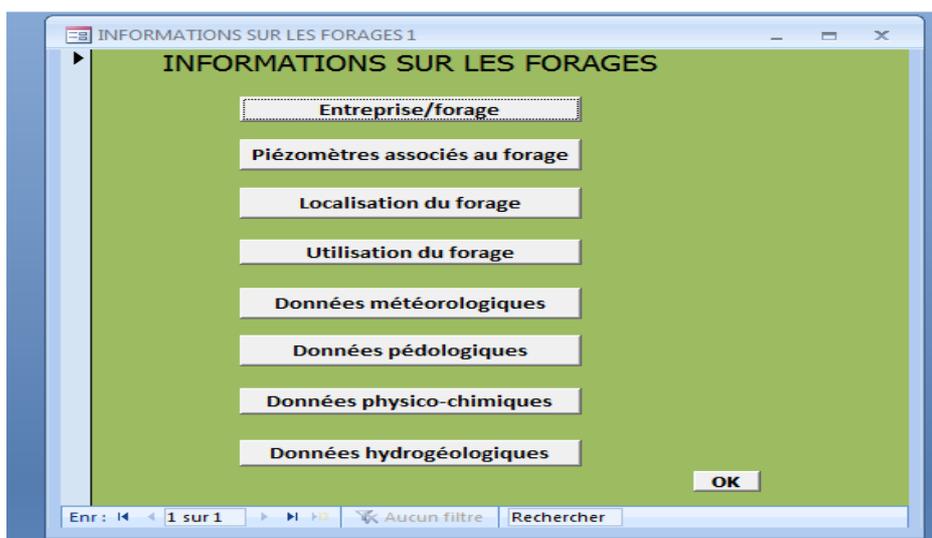
En cliquant sur la commande "Merci" de cette fenêtre, on a accès à la fenêtre principale suivante :



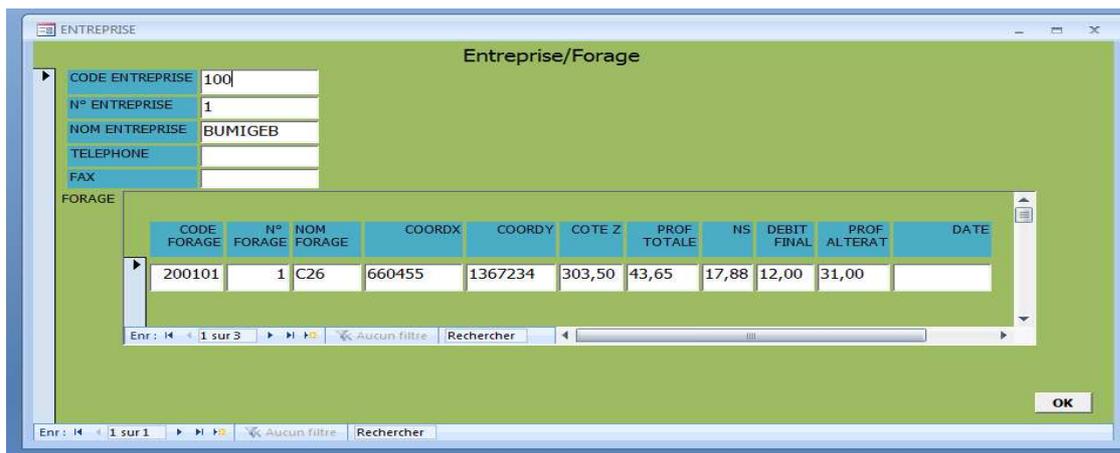
En cliquant par la souris sur le bouton « saisie des informations » on ouvre la boîte de dialogue qui suit :



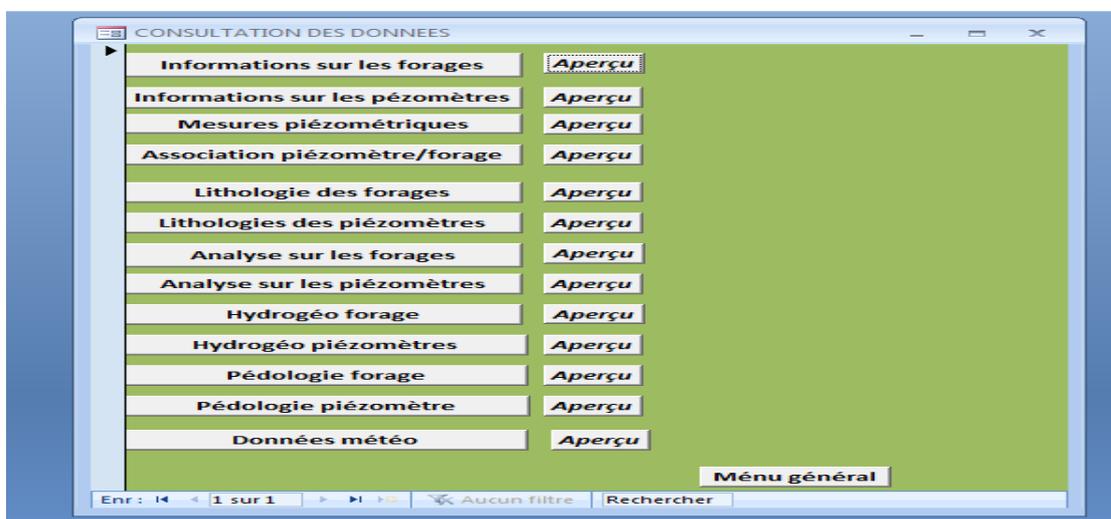
Où on peut choisir de saisir soit les données sur les forages ou sur les piézomètres. En cliquant sur les forages on ouvre la boîte de dialogue suivante :



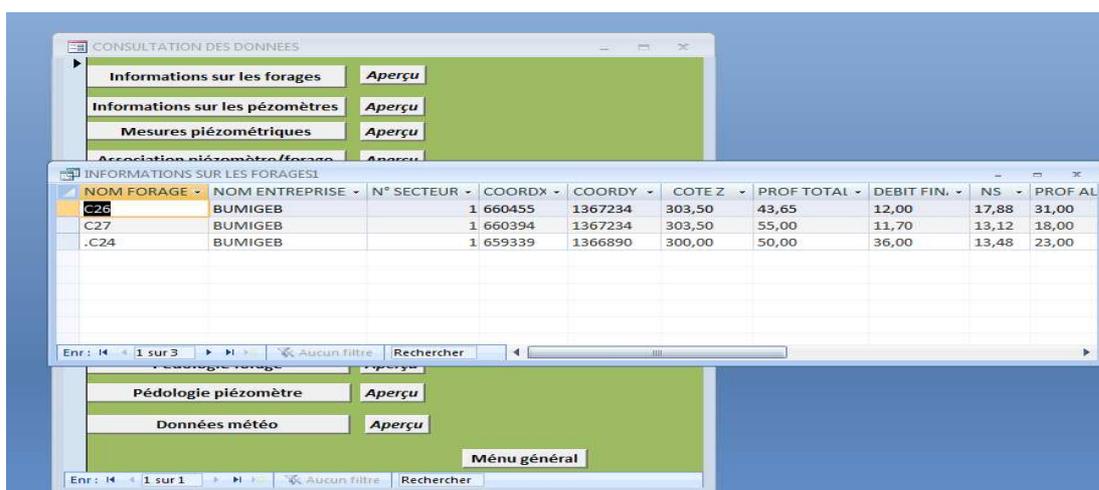
En cliquant sur un des boutons nous avons le formulaire suivant qui s'affiche (ici nous avons pris l'exemple d'Entreprise/Forage) :



Le sous menu « consultation des données » du menu général ouvre le formulaire suivant permet d'afficher les différentes informations.



En cliquant sur la commande « informations sur les forages », on obtient la fenêtre suivante :



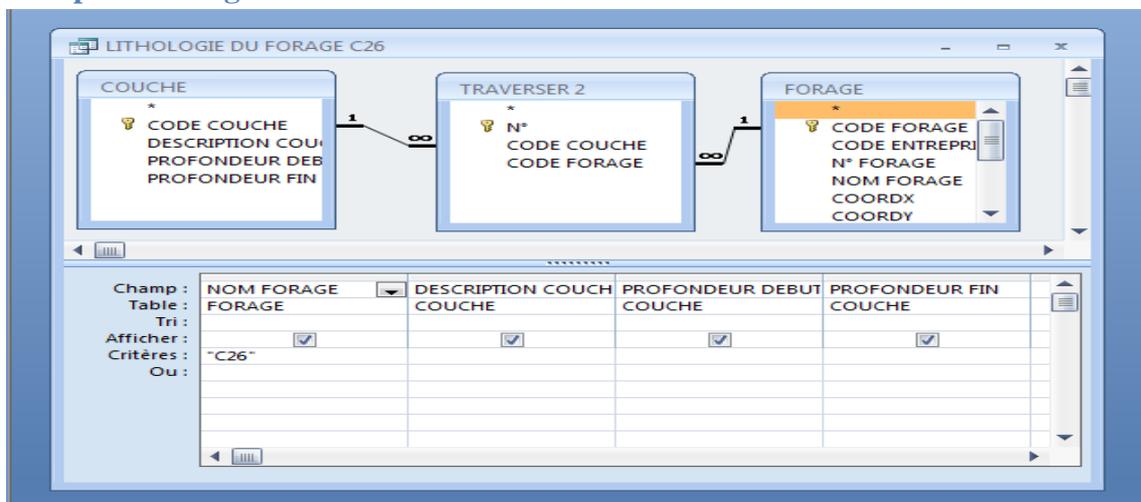
Ensuite un clic sur le bouton « aperçu en face », ouvre la page exportable sous plusieurs formats (word, excel...) et imprimable suivante :

INFORMATIONS SUR LES FORAGES

N° SECTEUR	NOM FORAGE	NOM ENTREPRISE	COORDX	COORDY	COTE Z	PROF TOTALE	DEBIT FINAL	NS	PROF ALTERAT	DATE EXEC
1	.C24	BUMIGEB	659339	1366890	300,00	50,00	36,00	13,48	23,00	
	C27	BUMIGEB	660394	1367234	303,50	55,00	11,70	13,12	18,00	
	C26	BUMIGEB	660455	1367234	303,50	43,65	12,00	17,88	31,00	

mercredi 10 juin 2009

Annexe II-2 Exemple de requête permettant d’obtenir la lithologie d’un forage : exemple du forage C26 :



En exécutant cette requête ,on obtient le résultat suivant :

LITHOLOGIE DU FORAGE C26

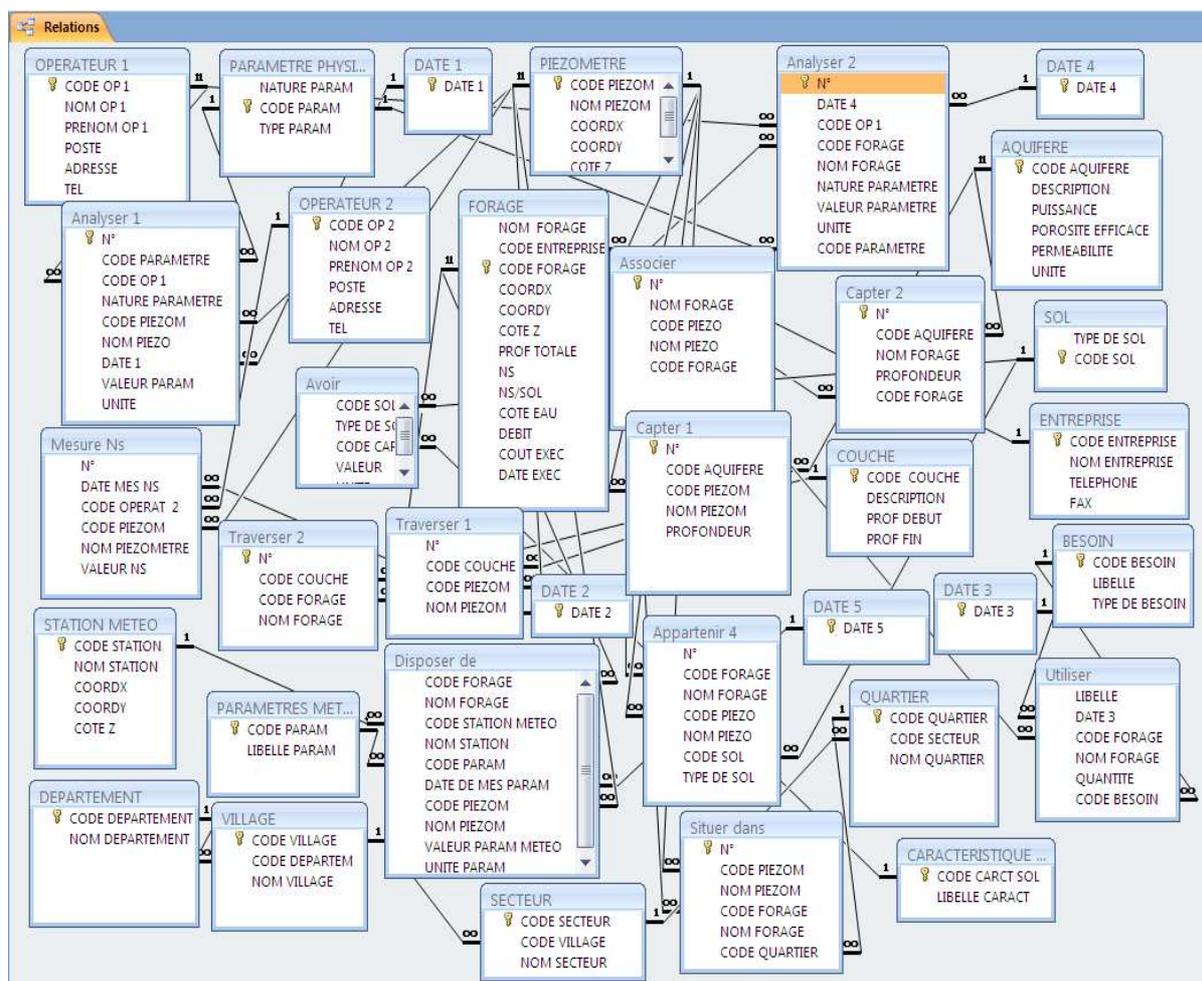
NOM FORAGE	DESCRIPTION C	PROFONDEUR DEBUT	PROFONDEUR FIN
C26	ALTERITE	0	10
C26	SABLE	10	35
C26	HORIZON FISSURE	35	40
*			

Enr : 1 sur 3 Aucun filtre Rechercher

Annexe II-3 : Règles de gestion et dictionnaire des données

- RG1** : Un forage est situé dans un seul quartier et un quartier peut avoir plusieurs forages
- RG2** : Un forage ou un piézomètre peut traverser plusieurs couches géologiques ou plusieurs aquifères.
- RG3** : L'eau d'un forage ou un piézomètre peut être analysée plus d'une fois à différentes dates par un ou plusieurs opérateurs.
- RG4** : L'eau d'un forage ou un piézomètre peut contenir tous les paramètres physico-chimiques.
- RG5** : Un forage peut servir de piézomètre mais un piézomètre ne peut pas servir de forage.
- RG6** : Un piézomètre ne peut capter qu'un seul aquifère mais un aquifère peut être capté par plusieurs piézomètres.
- RG7** : Les mesures de niveaux statiques se font dans les piézomètres à différentes dates par un opérateur.
- RG8** : L'eau de chaque forage est utilisée pour différents besoins.
- RG9** : Les données météo servent à estimer la recharge des nappes captées par les forages et piézomètres.
- RG10** : Un forage peut capter plus d'un aquifères et un aquifère peut être capté par plusieurs forages
- RG11** : Un quartier appartient à un seul secteur mais un secteur peut avoir plusieurs quartiers.
- RG12** : Un secteur appartient à un seul village mais un village peut avoir plusieurs secteurs.
- RG13** : Un village appartient à un seul département mais un département peut avoir plusieurs villages.
- RG14** : Chaque forage est réalisé par un opérateur à une date donnée.
- RG15** : Un forage ou un piézomètre peut appartenir à plusieurs types de sol
- RG16** : Un sol possède plusieurs caractéristiques.

Annexe II-4 : Structure des tables et les relations qui les lient.



ANNEXE 2 : SUR LE CHAPITRE III**Annexe III-1** : Résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines

Ouvrages	T°C	pH	Conductivité	Ca	Mg	Na	K	Fe(III)	Mn	HCO ₃ ⁻	F	Cl	SO ₄	NO ₂	NO ₃	SiO ₂
Unités	°C		µS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Forage QP29	32.6	6.1	314	26.61	12.81	13.84	4.316	0.43	0.12	163	0.45	0.44	3.45		0.29	104
Puits BOUL	31.8	6.8	630	74.61	17.12	18.47	28.4	-0.03	0.18	271	0.29	27.23	12.96	0.61	14.11	104
Puitsdu barr3	29.9	6.9	178	16.15	2.44	9.02	9.818	0.03	0.39	66	0.20	9.66	5.80	0.13	1.79	19
Forage PARC	30	6.4	393	40.39	14.06	10.85	3.192	0.48	0.32	122	0.21	56.00	8.33	1.49		21
Forage Kossodo	32.9	6.4	335	27.63	12.71	12.57	5.234	0.00	0.28	129	0.29	5.39	2.89	0.72	45.77	100
Puits RAM	29.8	6.1	867	62.08	17.98	61.07	26.33	0.00	0.09	162	0.11	165.28	34.18	3.49	49.24	92
Forage FT26	32.8	6.5	358	29.79	15.50	11.90	4.88	0.87	0.12	128	0.33	4.16	1.82		40.66	39
Puits GILBE	31.7	6.4	460	34.94	9.82	30.52	5.805	-0.01	0.17	138	0.16	56.30	8.66	2.91	83.41	101
Forage DAPO	38.8	6.6	265	21.55	7.87	15.44	2.924	-0.02	0.25	109	0.33	12.43	1.45		13.27	41
Puits Secteur 30	31.6	5.6	188	10.14	4.35	11.13	4.181	0.10	0.24	17	0.08	17.14	2.56	0.65	48.78	99
Puits AGHA	31.7	5.7	99	7.64	1.88	4.69	4.259	0.10	0.29	34	0.07	2.89	0.73		6.85	36
Puits DAPO	31.5	5.6	915	57.70	15.19	73.01	47.29	0.00	0.26	239	0.36	127.60	25.14	13.68	14.44	55
Puits ZIDA	31.3	5.7	295	18.62	7.47	17.29	2.784	0.01	0.31	26	0.04	35.65	1.95	2.06	85.31	29
Forage BASSO	31.6	6.3	156	9.70	2.48	13.97	2.727	4.14	0.13	71	0.20	1.21	1.14		8.53	38
Forage QP24	34.2	6.2	162	23.20	13.00	10.24	4.98	0.42		195		18.02	0.00		14.00	99
Piezo CIEH	30.1	6.6	300	13.60	10.30	20.20	3.46	0.21		73		61.07	1.00		21.00	38.80
Forage Goanghin	32.9	6.5	310	14.00	4.60	30.90	2.55	0.2		165		11.01	1.00		7.00	55.00
Forage Zongo	30.9	6.1	188	23.20	1.70	7.55	2.41	1.53		116		33.04	3.00		6.00	61.40

Annexe III-2 :Données sur les forages

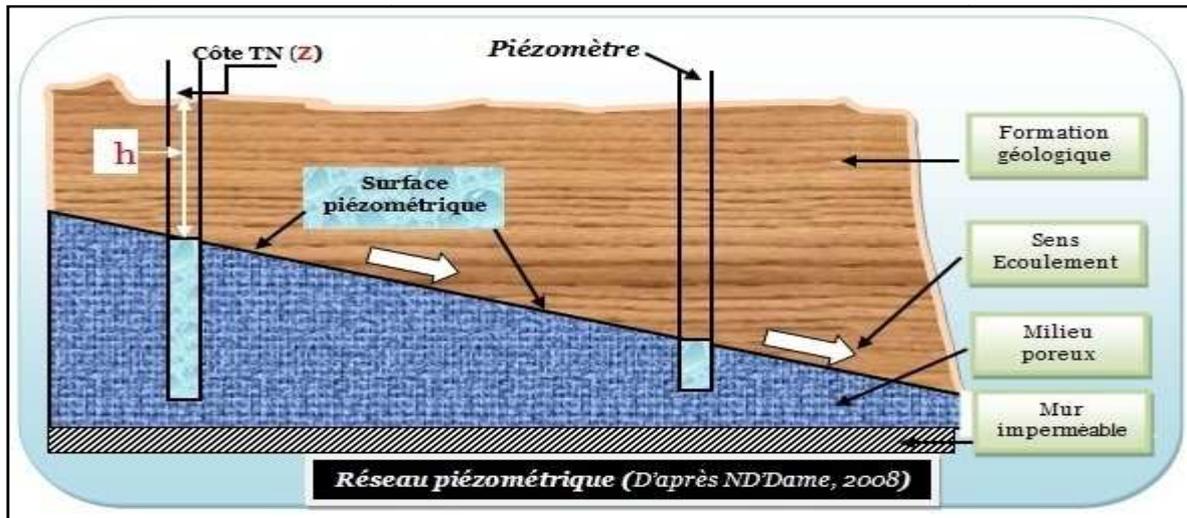
lieu	Sect	X	Y	Côte Z	NS	NS-Rsol	Côte du nv l'eau H	Altérations	Toit du socle	PT	PT-Alt	Q m3/h	Alt Saturées	Q/essai air lift	s en m	m3/h/m	T en m2/S	K m/s	S	GEOLOGIE
1.C26	1	660455	1367234	303.50	17.88	17.43	286.07	31.00	272.50	43.65	12.65	12.00	13.12							
1.C27	1	660394	1367234	303.50	13.12	12.67	290.83	37.00	266.50	55.00	18.00	11.70	23.88							
2.C24	2	659339	1366890	300.00	13.48	13.03	286.97	27.00	273.00	50.00	23.00	36.00	13.52							
2.C28	2	659439	1348578	304.00	6.00	5.55	298.45	26.00	278.00	44.00	18.00	40.00	20.00							
3.CO67	3	660280	1366035	308.90	16.80	16.35	292.55	26.00	282.90	40.20	14.20	5.60	9.20							
3.CO68	3	661084	1368252	297.70	10.37	9.92	287.78	18.00	279.70	46.52	28.52	5.40	7.63							
3.CO70	3	660328	1368278	297.70	19.00	18.55	279.15	35.50	262.20	44.50	9.00	13.00	16.50							
4.C14 Univ	4	657234	1366365	315.00	17.15	16.70	298.30	34.89	280.11	74.88	39.99	48.00	17.74	30.40	23.57					9.00E-04
4.C15 hopital	4	657044	1366799	310.10	13.27	12.82	297.28	28.00	282.10	61.00	33.00	27.00	14.73	6.96	7.93					1.20E-03
4.CO69	4	662138	1368749	298.80	18.00	17.55	281.25	26.00	272.80	48.00	22.00	6.00	8.00							
8.FT15	8	658419	1365524	300.90	3.90	3.45	297.45	28.00	272.90	61.00	33.00	12.00	24.10	6.80	10.43					3.20E-05
9.TH35	9	656708	1368920	296.60	6.80	6.35	290.25	29.00	267.60	63.05	34.05	36.00	22.20	9.60	14.45	0.66				1.15E-03
9.TH40	9	657234	1366365	315.00	17.15	16.70	298.30	34.00	281.00	74.00	40.00	48.00	16.85	14.50						1.20E-03
10.QP109	10	656636	1368890	293.60	7.04	6.59	287.01	39.00	254.60	60.50	21.50	10.70	31.96	10.60	13.83					5.50E-04
10.QP111	10	657143	1369143	288.30	3.27	2.82	285.48	37.50	250.80	61.30	23.80	10.80	34.23	9.21	12.58					1.00E-03
12.QP67	12	660468	1369688	291.50	3.75	3.30	288.20	29.74	261.76	52.29	22.55	24.00	25.99	7.85	7.37					5.00E-04
12.QP73	12	664463	1368857	297.10	3.27	2.82	294.28	37.50	259.60	61.30	23.80	10.80	34.23	9.24	12.58					1.00E-03
13.C13 Univ	13	661445	1368783	298.10	12.90	12.45	285.65	28.20	269.90	67.16	38.96	3.90	15.30	1.20	36.02					3.47E-04
13.QP103 bis	13	663676	1366728	304.80	6.03	5.58	299.22	50.75	254.05	56.75	6.00	16.70	44.72	7.55	9.16					4.50E-04
13.C16/SBMC	13	664606	1370330	285.40	19.05	18.60	266.80	22.00	263.40	63.00	41.00	5.14	2.95							
14.FPARC	14	663187	1370452	293.90	9.43	8.98	284.92	14.63	279.27	42.08	27.45	30.00	5.20	7.55	2.31					
14.PEA2ou CO1	14	658558	1362986	320.00	4.39	3.94	316.06	24.14	295.96	73.34	49.20	5.40	19.75	7.48	26.18					
14.SM12	14	659142	1369747	287.30	7.63	7.18	280.12	38.00	249.30	54.00	16.00	9.00	30.37							1.72E-03
14.SM13	14	663083	1367218	296.40	8.40	7.95	288.45	28.23	268.17	58.64	30.41	12.00	19.83							4.50E-04
15.F2	15	660277	1362826	316.00	23.90	23.45	292.55	31.50	284.50	61.26	29.76	18.00	7.60	8.00	15.45					6.00E-04
15.F3	15	661681	1362609	311.40	18.75	18.30	293.10	29.80	281.60	56.30	26.50	12.00	11.05	11.89	3.38					3.00E-04
15.F4	15	664126	1361335	308.00	19.12	18.67	289.33	24.15	283.85	62.35	38.20	7.20	5.03	15.65	13.67					2.00E-04
15.F6	15	664941	1361145	303.20	16.83	16.38	286.82	24.15	279.05	68.40	44.25	9.00	7.32	9.00	5.98					2.00E-04
15.F8	15	664908	1361148	303.20	19.18	18.73	284.47	29.80	273.40	56.30	26.50	12.00	10.62	6.20	13.38					3.34E-05
15.QP13	15	664991	1361029	303.10	18.62	18.17	284.93	24.15	278.95	43.85	19.70	7.20	5.53	5.21	4.85					2.00E-04
15.F9	15	664916	1360970	302.80	18.68	18.23	284.57	35.50	267.30	61.00	25.50	24.00	16.82	24.00	9.30					1.10E-03
15.QP16	15	664354	1361961	300.80	16.17	15.72	285.08	24.15	276.65	68.40	44.25	9.00	7.98	7.04	17.56					1.57E-04
15.QP18	15	659203	1361848	322.90	20.58	20.13	302.77	28.84	294.06	52.04	23.20	13.80	8.26	5.94	0.69					4.80E-04
15.QP81	15	659328	1361931	321.20	23.63	23.18	298.02	28.87	292.33	56.06	27.19	8.00	5.24	3.80	13.00					7.40E-04
15.FPM	15	665908	1359091	310.20	10.20	9.75	300.45	23.00	287.20	52.00	29.00	7.00	12.80							
15.FT60	15	662532	1363128	309.10	27.68	27.23	281.87	36.80	272.30	62.00	25.20	6.75	9.12							
DV	15	661895	1364028	315.80	9.47	9.02	306.78	19.00	296.80	35.00	16.00	9.00	9.53							
FT37	15	663478	1366790	305.00	10.14	9.69	295.31	13.00	292.00	65.00	52.00	5.40	2.86	0.00						
FT62	15	662021	1362603	309.20	22.00	21.55	287.65	40.00	269.20	52.00	12.00	18.00	18.00	3.00						
CO25	15	661892	1364108	315.80	6.80	6.35	309.45	10.00	305.80	58.00	48.00	13.00	3.20							
DV	15	666608	1373229	289.30	10.00	9.55	279.75	34.00	255.30	74.00	40.00	6.70	24.00							
DV	15	661895	1364208	315.80	12.41	11.96	303.84	13.00	302.80	35.00	22.00	14.40	0.59	5.40						
16.FT46	16	659315	1362544	318.10	12.57	12.12	305.98	35.00	283.10	61.02	26.02	10.80	22.43	8.80	17.80	2.04				1.60E-04
16.PEA6	16	659327	1361928	323.50	19.13	18.68	304.82	36.00	287.50	79.42	43.42	6.75	16.87	5.50	23.51					Filon de Q +grte
16.QP102	16	658406	1363963	308.50	6.98	6.53	301.97	28.00	280.50	58.10	30.10	9.00	21.02	8.20	21.39					7.00E-04
16.QP25	16	656138	1364080	319.70	11.04	10.59	309.11	49.24	270.46	61.27	12.03	9.00	38.20	7.25	9.87					6.50E-04
16.QP84/cissin	16	659213	1361854	322.90	20.58	20.13	302.77	28.84	294.06	52.04	23.20	13.80	8.26	5.94	0.69					4.80E-04
16.TH42	16	658716	1364181	310.20	8.20	7.75	302.45	34.40	275.80	67.00	32.60	10.30	26.20	12.00	11.21					1.00E-01
16.FT13	16	660091	1362009	322.20	21.00	20.55	301.65	34.00	288.20	58.00	24.00	24.50	13.00	10.28	7.87	1.31				6.40E-04
16.FT45	16	659692	1363113	318.50	15.31	14.86	303.64	33.20	285.30	53.00	19.80	36.00	17.89	19.00	3.61	5.26				8.57E-04
16.TH46	16	658893	1365628	304.20	9.13	8.68	295.52	26.86	277.34	67.29	40.43	10.30	17.73							
16.CO52	16	659911	1361823	324.20	19.07	18.62	305.58	28.87	295.33	48.58	19.71	8.00	9.80							
16.C8	16	659763	1361239	330.30	34.49	34.04	296.26	45.00	285.30	73.00	28.00	6.17	10.51							
17.33QP99	17	654112	1364391	305.60	6.98	6.53	299.07	27.37	278.23	58.10	30.73	18.00	20.39	8.20	21.39					3.50E-04
17.365QP107	17	654266	1364471	308.90	5.68	5.23	303.67	28.00	280.90	51.00	23.00	11.50	22.32	9.00	12.50					3.00E-04
17.44QP34	17	654583	1363142	313.20	34.50	34.05	279.15	50.00	263.20	73.00	23.00	6.20	15.50	5.57	17.30					6.00E-04
17.474QP23	17	654893	1364329	311.10	6.57	6.12	304.98	19.32	291.78	58.30	38.98	10.80	14.26							5.28E-04
17.CO69	17	657996	1364772	310.30	34.50	34.05	276.25	50.00	260.30	60.58	10.58	6.20	15.50	5.57	17.30					2.40E-04
17.F1	17	654001	1363350	306.50	5.72	5.27	301.23	35.00	271.50	60.80	25.80	6.90	29.28	6.92	35.90					3.47E-04
17.F3	17	654843	1365624	304.00	10.66	10.21	293.79	32.80	271.20	61.30	28.50	9.00	22.14	7.50	13.11					5.70E-04
17.FT12	17	656154	1363347	326.30	22.80	22.35	303.95	43.00	283.30	72.72	29.72	4.90	20.20	5.05	17.12					3.00E-04
17.QP120	17	654578	1363110	319.70	11.04	10.59	309.11	49.24	270.46	61.27	12.03	9.00	38.20	7.25	9.87					6.00E-04
17.PY9403	17	657830	1365087	309.00	23.80	23.35	285.65	41.39	267.61	74.22	32.83	9.00	17.59	10.70	10.50					3.50E-04
17.PY9406	17	655459	1361068	318.10	25.11	24.66	293.44	42.00	276.10	60.87	18.87	14.40	16.89	12.00	7.60					1.16E-03
17.PY9413	17	6																		

ANNEXE 3 : SUR LE CHAPITRE IV

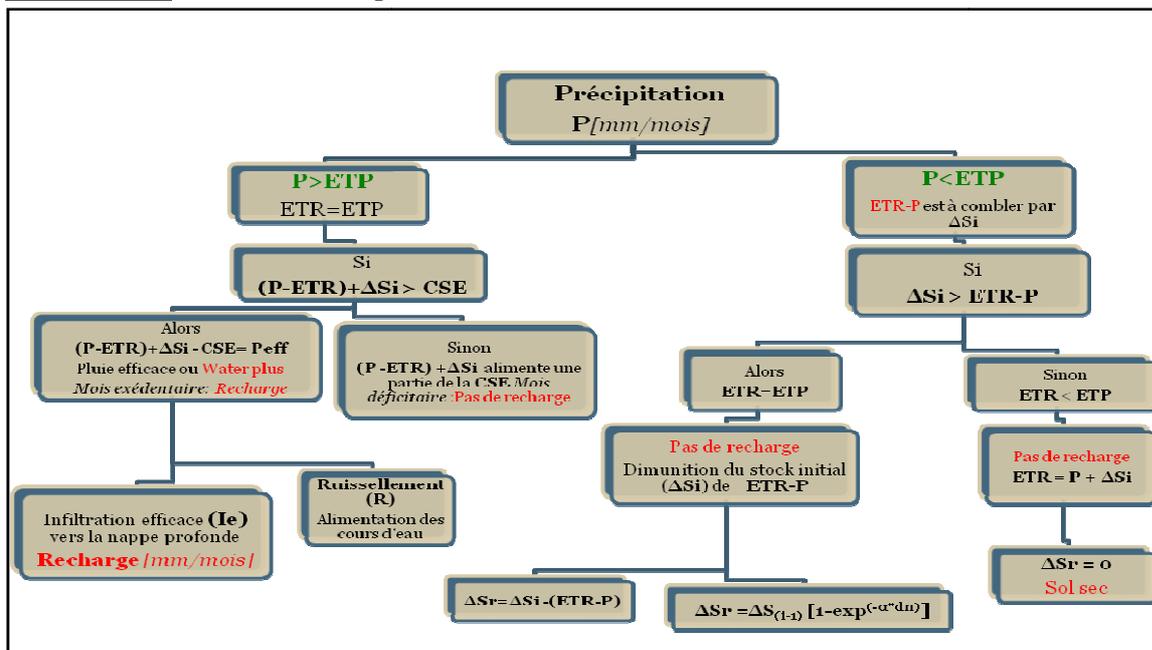
Annexe IV-1 : Données sur quelques piézomètres et mesures piézométriques

Piézomètres	QP121	QP106	QP98	QP104
X	654073	653984	659624	658999
Y	1363605	1363236	1364987	1363233
Profondeur (m)	72,8	67,05	69,15	69,75
Date de mesure				
28/05/2001	5,86	10,67	6,98	12,54
22/06/2001	5,61	10,65	6,85	12,55
17/07/2001	4,96	7,18	6,76	12,58
18/07/2001	4,96	7,18	6,41	12,52
17/08/2001	3,71	8,47	6,24	11,46
04/09/2001	3,02	4,99	4,61	12,18
20/09/2001	2,82	4,42	5,36	12,09
15/10/2001	2,72	6,55	5,16	12,08
30/10/2001	2,95	6,58	5,28	12
20/11/2001	3,47	7,92	5,5	12,12
07/12/2001	3,71	8,62	5,72	12,2
15/01/2002	4,35	9,91	6,16	12,38
15/02/2002	4,82	10,82	6,48	12,5
15/03/2002	5,32	11,33	6,8	12,66
15/05/2002	5,98	12,8	7,37	12,84
15/07/2002	6,01	13,18	7,61	13,09
19/08/2002	5,12	11,23	6,98	12,94
23/09/2002	3,25	7,53	6,7	12,41
23/10/2002	3,03	7,65	5,84	12,32
23/11/2002	3,58	6,06	6,09	12,42
20/12/2002	4,01	9,62	6,41	12,41
20/01/2003	4,52	10,76	6,78	12,66
22/02/2003	4,98	11,25	7,16	12,81
29/03/2003	5,56	12,1	7,58	12,99
24/04/2003	5,94	12,99	7,87	13,14
17/05/2003	6,34	13,76	8,02	13,25
20/06/2003	6,28	10,53	7,79	13,26
22/07/2003	4,45	10,55	6,93	12,97
23/08/2003	2,94	8,28	5,81	12,96
21/10/2003	2,67	7,82	5,09	12,34
22/11/2003	3,06	8,65	5,14	12
22/12/2003	3,75	9,93	5,15	12,1
26/02/2004	4,63	11,31	6,18	12,34
30/06/2004	5,59	12,13	6,9	12,94
30/07/2004	4,5	10,49	6,16	12,69
30/10/2004	2,8	5,89	4,61	11,84
27/11/2004	3,4	6,48	4,87	11,93
27/12/2004	3,4	6,48	4,87	11,93

AnnexeIV-2: Schéma illustratif du réseau piézométrique



AnnexeIV-3: Schéma conceptuel du modèle de THORNTHWAITE, modifié



Signification des termes utilisés

ΔSi représente la réserve -stock- initiale en eau du sol (Elle est calculée via l'humidité volumique en fonction de la profondeur Z) ;

$CSE = 2R U_{max}$ est la capacité de stockage (maximale) en eau du sol saturé (Cette valeur est à satisfaire avant toute infiltration) ;

$P_{eff} = R + I_{eff}$: L'infiltration efficace I_{eff} est la part de pluie qui alimente effectivement la nappe : c'est la recharge [mm/mois]

ΔS_r représente le stock d'eau restant dans le sol après la période de calcul considérée. (ici le mois)

d_n est le déficit mensuel ($d_n = ETP_i - P_i$)

α facteur dépendant de la variation maximale du stock ($\alpha=0,0102$ pour $stock_{max} = 100mm$ et $\alpha = 0,0068$ pour $stock_{max} = 150mm$, $\alpha=0,020$ pour $stock_{max} = 50mm...$) [LORENZINI, 2007].

