



UNIVERSITÉ D'AVIGNON
ET DES PAYS DE VAUCLUSE

ACADEMIE D'AIX-MARSEILLE
UNIVERSITE D'AVIGNON ET DES PAYS DE VAUCLUSE



THESE

présentée pour obtenir le grade de Docteur en Sciences
de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse

SPECIALITE : HYDROGEOLOGIE

RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE DU CENTRE URBAIN DE OUAGADOUGOU AU BURKINA FASO *QUALITE ET VULNERABILITE*

par Suzanne OUANDAOGO/YAMEOGO

soutenue le 28 novembre 2008 devant un jury composé de

M. Y. TRAVI	professeur à l'Université d'Avignon	Président du jury
M. J-P. FAILLAT	professeur à l'Université de Brest	Rapporteur
M. R. MOUMTAZ	professeur à l'Université de Poitiers	Rapporteur
M. E. NAAH	professeur à l'UNESCO Nairobi	Examineur
M. A. N. SAVADOGO	professeur à l'Université de Ouagadougou	Co-directeur de thèse
M. B. BLAVOUX	professeur à l'Université d'Avignon	Directeur de thèse

Ecole doctorale : **SIBAGHE**

Laboratoire d'Hydrogéologie : Traçage et modélisation des transferts



Dédicace

Cette thèse est dédiée à la mémoire affectueuse
de mon père, feu Barthélémy OUANDAOGO

Remerciements

Au professeur Alain Nindaoua SAVADOGO, Directeur du laboratoire d'hydrogéologie de l'Université de Ouagadougou qui a bien voulu m'accueillir dans son laboratoire et sans qui ce travail n'aurait pas vu le jour. Il m'a orientée vers ce projet de recherche : « *Aquifères superficiels et profonds et pollution Urbaine dans les grands centres Urbains en Afrique de l'Ouest* » qui allait alors s'étendre sur plusieurs années, pour finalement aboutir à ma présente thèse de Doctorat. Je lui exprime ma reconnaissance et ma profonde gratitude.

Au professeur Bernard BLAVOUX, du laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon à qui je dois la direction de cette thèse. Sa grande compétence, son expérience confirmée, le suivi scientifique rigoureux et régulier ne m'ont jamais fait défaut tout au long de ce travail. Il a su me soutenir et me remettre à chaque fois sur le chemin indiqué. La confiance qu'il m'a témoignée dès les premiers jours et surtout la chance qui m'a été offerte de me « réaliser » sont à souligner ici. Je lui sais gré pour tout cela et notamment pour l'accueil chaleureux dans ce laboratoire au début de ma thèse.

Cette thèse n'aurait pas pu aussi voir le jour sans le grand appui et la première confiance que Monsieur Emmanuel NAAH de l'UNESCO Nairobi a bien voulu m'accorder dès notre rencontre de Ouagadougou lors d'un séminaire international sur l'eau. Il me disait alors : « Je vous ouvre un boulevard, à vous d'aller jusqu'au bout de ce boulevard ». Je lui dois beaucoup car il m'a bien encouragée à persévérer.

Je dois au gouvernement Français et plus précisément à son département des bourses en place à Ouagadougou un grand remerciement. Sans la bourse en alternance qu'il a bien voulu m'octroyer, la réalisation de mon rêve aurait sans doute été compromise. J'adresse ici une mention toute spéciale à Madame Annick GIRAudeau du service des bourses françaises pour le suivi régulier avec le CNOUS à Paris et pour ses encouragements renouvelés.

Je remercie le professeur Vincent VALLES pour m'avoir fait découvrir un autre aspect de l'hydrogéochimie.

Je veux remercier vivement le professeur Yves TRAVI, Directeur du laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon pour avoir bien voulu présider le jury de soutenance et surtout pour nos multiples et fructueuses discussions scientifiques. Mes sincères remerciements vont aux Professeurs Moumtaz RAZACK et Jean-Pierre FAILLAT pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail de recherche.

Aux collègues du laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon qui ont su partager leur expérience, leur convivialité et leur bonne humeur, je dis sincèrement merci.

Je remercie Michel DANIEL et Roland SIMLER pour les analyses chimiques et isotopiques. J'adresse une mention à deux personnes, Didier PIQUEMAL, ami de longue date de notre famille qui a bien voulu m'offrir l'hospitalité dès mon premier séjour dans cette ville d'Avignon et Milanka BABIC avec qui j'ai partagé avec joie et chaque jour le bureau.

A Monsieur Salifou KABORE qui en toute circonstance a aidé à la réalisation de certaines cartes, à Christophe Baffo BAMOUNI qui m'accompagnait sur le terrain, aux collègues du laboratoire d'Hydrogéologie, du département de géologie de l'Université de Ouagadougou et tout particulièrement Urbain WENMENGA pour nos discussions enrichissantes sur la Géologie, aux amis des différents laboratoires d'analyses des eaux de la ville de Ouagadougou, avec une mention spéciale à Fousséni PALENFO, à Hélène COMPAORE et à AÏNA ; à tous ceux dont les noms n'ont pas été cités et qui ont contribué pour que ce rêve soit une réalité, je leur exprime ma gratitude.

Je garde une grande reconnaissance à l'endroit de ma famille : Adrien Jean Modeste, Joël Bertrand et Sindy Rosemary, mes trois enfants, Modeste mon tendre époux et mes parents qui ont toujours su me redonner le courage quand la route paraissait si longue et quand l'horizon semblait si sombre. J'ai toujours retrouvé auprès d'eux l'énergie nécessaire pour repartir et aujourd'hui grâce aussi à eux je suis fière de ce résultat.

Je voudrais enfin encourager mes jeunes sœurs et frères qui voudraient se lancer dans un travail de recherche de cette envergure, qu'ils aient avant tout, de la détermination et de la persévérance. Sans ces vertus, ils seraient bien tentés d'abandonner en chemin. Qu'ils se disent que chacun de nous peut s'il veut réaliser ses rêves.

En cette année internationale de l'Assainissement, puisse ce travail contribuer à aider mon pays le Burkina Faso ainsi que les autres pays de la sous région à améliorer les conditions de vie des populations et surtout à atteindre l'un des objectifs du Millénaire qui est de réduire d'ici à 2015 le pourcentage de la population qui n'a pas accès à un approvisionnement en eau potable ni à des services d'assainissement de base. Ce travail alors aura été utile et c'est mon seul vœu.

**RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE
DU CENTRE URBAIN DE OUAGADOUGOU
AU BURKINA FASO *QUALITE ET VULNERABILITE***

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE PROBLEMATIQUE ET METHODES EMPLOYEES	9
PARTIE I - CADRE DE L'ETUDE	15
CHAPITRE I - CADRE PHYSIQUE	16
I.1 - Situation géographique	16
I.2 - Relief et Hydrographie	17
I.2.1 - Relief	17
I.2.2 - Les principaux cours d'eau et leur bassin	17
I.2.2.1 - <i>Le bassin du Nakanbé</i>	18
I.2.2.2 - <i>Le Massili et son régime saisonnier</i>	18
I.2.2.3 - <i>Ouagadougou et son bassin versant</i>	21
I.3 - Les grands traits du climat	23
I.3.1 - La pluie	23
I.3.2 - La température	24
I.3.3 - Les vents et le rythme saisonnier des précipitations	25
I.4 - Les paramètres climatiques de Ouagadougou	26
I.4.1 - La pluie de la région de Ouagadougou	26
I.4.2 - Les températures à Ouagadougou	28
I.4.3 - L'humidité relative	28
I.4.4 - L'évapotranspiration potentielle	29
I.5 – Conclusion	30
CHAPITRE II - CONTEXTE GEOLOGIQUE	31
I - CADRE GEOLOGIQUE GENERALE	31
I.1 - La géologie du Burkina en Afrique de l'Ouest	31
I.2 - La lithologie des principales formations	34
I.2.1 - Le socle paléo protérozoïque (Birimien)	34
I.2.2 - La couverture sédimentaire	35
I.2.3 - Les formations récentes du quaternaire	35
I.3 - Aperçu sur la tectonique du Burkina Faso	36
I.3.1 - L'orogénèse éburnéenne	36
I.3.2 - L'orogénèse panafricaine	36

II.4 - La piézométrie des aquifères et variations naturelles	75
II.4.1 - Evolution temporelle du piézomètre du CIEH (nappes d'altérites)	75
II.4.2 - Evolution temporelle de piézomètres des nappes de fissures/fractures	78
II.4.2.1 - Evolution temporelle du piézomètre QP 106	79
II.4.2.2 - Evolution temporelle d'autres piézomètres (QP121 ; QP104 ; QP98)	79
II.5 - Les ressources en eau de Ouagadougou et son alimentation	81
II.5.1 - Les ressources en eaux de surface	81
II.5.2 - Les ressources en eaux souterraines	82
 PARTIE II - INVESTIGATIONS, RESULTATS ET INTERPRETATIONS	 84
 CHAPITRE IV - HYDROCHIMIE DES EAUX	 85
 I - CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DE OUAGADOUGOU	 85
I.1 - Méthodes d'échantillonnage et d'analyses	85
I.1.1 - Les campagne de prélèvements	85
I.1.2 - Les méthodes d'échantillonnage	88
I.1.3 - Le dosage des Ions	88
I.1.4 - Le traitement des résultats	89
I.2 - Contexte hydrochimique général	89
I.2.1 - Les principaux paramètres physico-chimiques	89
I.2.1.1 - La température	92
I.2.1.2 - Le pH	92
I.2.1.3 - La conductivité électrique	92
I.2.1.4 - L'alcalinité	93
I.2.2 - Les éléments chimiques majeurs	97
I.2.2.1 - Les caractères généraux	97
I.2.2.2 - Les faciès des eaux	98
I.2.2.3 - Les analyses en composantes principales	99
II - LES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DE SURFACE	103
Analyse des résultats	103
III - LES EAUX ISSUES DE LA NAPPE DE FISSURES/FRACTURES	104
III.1 - Les caractéristiques chimiques	106
III.1.1 - Les cations	106
III.1.2 - Les anions	109

III.2 - Les corrélations	111
III.2.1 - Relations attendues suite à l'hydrolyse des silicates	112
III.2.2 - Les relations des cations avec les bicarbonates	113
III.2.3 - Les relations de la silice avec les bicarbonates	116
III.2.4 - Les relations du sodium et du potassium avec les chlorures	117
III.2.5 - Les relations des sulfates et nitrates avec les chlorures	118
III.3 - Faciès géochimique des eaux	119
III.4 - Evolution temporelle des anions	120
III.5 – Conclusion	124
IV - LES EAUX SOUTERRAINES DE LA NAPPE DES ALTERITES	125
IV.1 - Les caractéristiques chimiques des eaux	125
IV.1.1 - Les cations	126
IV.1.2 - Les anions	127
IV.2 - Les corrélations	128
IV.2.1 - Les relations des cations avec les bicarbonates	129
IV.2.2 - Les relations des cations avec la silice	131
IV.2.3 - Les relations des cations avec les chlorures	131
IV.2.4 - Les relations entre anions et chlorures	133
IV.3 - Faciès géochimique des eaux des altérites	135
IV.4 - Evolution temporelle des éléments	136
IV.4.1 - Evolution temporelle des cations	136
IV.4.2 - Evolution temporelle des anions	136
V - ACQUISITION ET EVOLUTION DE LA MINERALISATION DE L'EAU	143
V.1 - Indices de saturation	143
V.2 - Diagramme d'équilibre	145
Evolution de la minéralisation	145
V.3 – Conclusion	149
CHAPITRE V - CONTRIBUTION DES ISOTOPES A LA CONNAISSANCE DES EAUX DE LA VILLE DE OUAGADOUGOU	150
I.1 - Les isotopes stables de la molécule d'eau	150
I.1.1 - Généralités et principe	150
I.1.2 - Signal pluie en Afrique de l'Ouest	152

I.1.3 - Le signal pluie à Ouagadougou	158
I.1.4 - Les eaux souterraines	162
I.1.4.1 - Relation $\delta^{18}O$ - δ^2H des eaux de forages	163
I.1.4.2 - $\delta^{18}O$ - δ^2H Relation $\delta^{18}O$ - δ^2H des eaux des puits	164
I.2 - Le tritium	164
I.2.1 - Généralités et principe	164
I.2.2 - Le signal pluie régional	165
I.2.3 - Les teneurs actuelles des pluies de Ouagadougou	165
I.2.4 - Le tritium dans les eaux souterraines	167
I.3 – Conclusion partielle	168
 CONCLUSION SUR L’HYDROCHIMIE ET L’ HYDROCHIMIE ISOTOPIQUE	170
 PARTIE III : POLLUTION, VULNERABILITE	173
 CHAPITRE VI : POLLUTION DES NAPPES AQUIFERES DE OUAGADOUGOU	174
 I - LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES	174
I.1 - Les résultats de l'étude des éléments majeurs	174
I.1.1 - Analyses en composantes principales sur les eaux polluées (Famille A figure 78)	175
I.1.2 - Analyses en composantes principales les eaux non polluées (Famille B figure 79)	179
I.1.3 - Analyse Discriminante	180
 I.2 - Etude de la répartition spatiale des nitrates sur 1800 puits à Ouagadougou	184
I.2.1 - Analyses corrélative et spectrale de la répartition spatiale des teneurs en nitrates	184
I.2.1.1 - Le variogramme	184
I.2.1.2 - Le corrélogramme simple	185
I.2.2 - Construction de la carte de distribution des teneurs en nitrates	186
I.3 - La pollution Bactérienne des puits des zones d'étude	188
I.4 - Aperçu des éléments mineurs ou en trace sur une campagne d'échantillonnage des eaux des points suivis (septembre 2006)	189
 I.5 - Qualité de quelques points du réseau de surface	191
I.5.1 - Quelques points de prélèvement	191
I.5.2 - Interprétation des résultats	191
I.5 – Conclusion partielle	197

CHAPITRE VII - VULNERABILITE DES AQUIFERES INFERIEURS DE OUAGADOUGOU	198
I – PROBLEMATIQUE	198
Les facteurs intrinsèques de vulnérabilité	198
II - LA CARTE DE SUSCEPTIBILITE DES AQUIFERES A LA POLLUTION	199
III - LA CARTE DES RISQUES	201
IV - CONCLUSION PARTIELLE	202
V - RECOMMANDATIONS ET PRIORITES	203
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	207
BIBLIOGRAPHIE	212
ANNEXES	217

ABREVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AEP	Approvisionnement en Eau Potable
BEWACO	Bilan d'Eau Iwaco
CIEH	Comité Inter Africain d'études Hydrauliques
DEP	Direction des Etudes et de la Planification
DGHA	Direction Générale de l'Hydraulique et de l'Agriculture
DGIRH	Direction Générale de l'Inventaire et des Ressources Hydrauliques
FIT	Front Inter Tropical
GIRE	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
ISND	Institut National de la Statistique et de la Démographie
OMD	Objectif de Développement du Millénaire
ONEA	Office National de l'Eau et de l'Assainissement
PAR-GIRE/AO	Plan d'Action Régional-GIRE Afrique de l'Ouest
PEA	Poste d'Eau Autonome
PIE	Poste d'Injection d'Eau
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
RESO	Ressources en Eau du Sud-ouest
SYSMIN	Ministère de l'Energie et des Mines /Groupement BRGM/ANTEA
SONABHY	Société Nationale Burkinabé d'Hydrocarbure
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'Education la Science et de la Culture
UNCHS/CEA	Programme des Nations Unies pour les Etablissements Humains
CEA	Commission Economique des Nations Unies pour l'Afrique

INTRODUCTION GENERALE
PROBLEMATIQUE ET METHODES EMPLOYEES

Les grandes villes africaines connaissent actuellement une rapide croissance incontrôlée de leur superficie et de leur démographie, entraînant une occupation anarchique de l'espace urbain. L'installation des populations dans cet espace urbain n'est souvent pas accompagnée par la réalisation d'un système d'assainissement de base si bien que les activités anthropiques menacent la qualité des ressources en Eau en général et des ressources en eau souterraine en particulier.

Aussi, l'UNESCO a décidé de développer le projet URBAN POLLUTION OF SURFICIAL AND GROUNDWATER AQUIFERS VUNERABILITY IN WEST AFRICA en lien avec le PNUE et l'UNCHS/ECA qui a permis le financement des premiers travaux de ce manuscrit. Ce projet vise à effectuer une étude sur la qualité hydrochimique des eaux souterraines de Ouagadougou. En effet, la capitale est bâtie sur ce que l'on appelle le môle de Ouagadougou qui est essentiellement constitué de formation de socle cristallin et cristallophyllien du paléo protérozoïque.

La recherche et l'exploitation des eaux souterraines dans ces formations du socle cristallin ont fait l'objet de quelques études récentes (Savadogo, 1984 ; Biémi, et Savané, 1986 ; Faillat, 1986 ; Guiraud, 1987 ; Ousmane, 1988 ; Galbane, 1991 ; Rogoto, 1993 ; Schneider et Zunino 1994) pour ne citer que ces auteurs. Cependant, des imprécisions existent quant à l'acquisition de la minéralisation, au fonctionnement hydrodynamique des nappes aquifères, à la modélisation hydrogéologique de tels systèmes (Leonardi, et al. 1996 ; Joseph, et Fangi, 2007). La structure et le fonctionnement des aquifères du socle restent de manière générale encore peu connus. L'aquifère de socle de Ouagadougou n'est très bien caractérisé, ni dans sa nature ni dans son fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique ; les rares études le concernant sont restées au stade prospectif.

La rapide croissance démographique au niveau de Ouagadougou entraîne une apparition d'habitats spontanés dans les zones périphériques entraînant aussi une pénurie d'eau. Avec plus d'un million d'habitants, le développement du réseau d'adduction d'eau potable ne se fait pas au même rythme que celui des habitats spontanés dans les zones périphériques, et la ville est confrontée aux problèmes d'alimentation en Eau, en quantité et surtout en QUALITE. La variété des activités domestiques et économiques (industrie, agriculture, commerce informel de lubrifiants notamment) avec leur corollaire de rejets de déchets solides (dépotoirs) et liquides, font courir à l'ensemble des eaux un risque très sérieux de pollution.

La qualité des eaux de surface mais aussi des eaux profondes peut en être affectée, ce qui peut rendre difficiles et plus complexes les études hydrochimiques de ces milieux. Elle est préoccupante dans la capitale Ouagadougou, vu que la construction des latrines et fosses septiques ne respectent pas les règles de protection des ressources en eau. Ceci explique que peu d'auteurs se soient risqués à étudier de tels systèmes hydrochimiques. Il en résulte un déficit de connaissances en ce domaine.

La présente étude se propose d'étudier le fonctionnement hydrique et hydrochimique d'un aquifère fracturé sur socle et en milieu urbain avec une pression polluante domestique importante. Son objectif est de contribuer en particulier à la caractérisation géométrique de l'aquifère fissuré du socle

de Ouagadougou, à la connaissance hydrodynamique des nappes, à la connaissance des mécanismes de l'acquisition du chimisme des eaux, du taux de renouvellement des nappes et enfin à la prévention de risque de pollution par la forte pression anthropique.

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

1) La caractérisation litho stratigraphique du socle birimien, préalable indispensable à l'étude hydrogéologique de la région de Ouagadougou

2) La caractérisation géométrique, hydrodynamique et hydrochimique des aquifères pose plusieurs questions :

⇒ l'utilisation des méthodes récentes de traçage chimique et isotopique en hydrogéologie de socle fracturé en milieu tropical est-elle pertinente ?

⇒ la pollution domestique n'interfère t-elle pas avec le traçage chimique et isotopique ?

3) L'évaluation de la vulnérabilité de ces aquifères vis-à-vis de la pollution venant de la surface ;

4) La localisation éventuelle des zones déjà polluées et une proposition de mesures de protection des ressources en eau encore potables.

La démarche adoptée repose, dans un premier temps, sur la collecte, le traitement et l'analyse des nombreuses données accumulées lors de la mise en œuvre des projets d'hydraulique urbaine et qui concerne la lithologie, l'hydrodynamisme et l'hydrochimie de ces aquifères. Les données existantes ont été, dans un second temps, complétées par les travaux de terrain et de laboratoire en ce qui concerne particulièrement la géologie, la caractérisation géométrique de l'aquifère, la piézométrie et l'hydrochimie.

♦ ACQUISITION DES DONNEES

Les données utilisées dans la présente étude sont récoltées au cours des recherches bibliographiques, des travaux de terrains et des analyses de laboratoire.

♦ RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

Elles ont concerné les mémoires, les thèses et aussi les rapports des projets d'hydraulique urbaine dont ceux de l'Office Nationale de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA), du Bureau des Mines et la Géologie du Burkina (BUMIGEB), du Bureau d'Ingénierie et de Conseil (ANTEA), de l'entreprise de Forages et Géotechnique (GEOFOR), de l'entreprise de Forage, Sondage et Pompage (AFCOM). Au bout de ces travaux documentaires, nous avons regroupé des données relatives aux cartes géologiques, aux logs stratigraphiques des forages, et aux données du piézomètre du Comité Inter Africain d'études Hydrauliques (CIEH).

- **Forages**

Environ 300 forages répartis sur l'ensemble de la ville ont été regroupés. Ils ont été installés dans le cadre de plusieurs projets dont celui de la Caisse Française de Développement pour le renforcement de l'alimentation en eau potable des quartiers périphériques de Ouagadougou. Sur les 300 forages, 200 ont été retenus pour avoir toutes les caractéristiques hydrogéologiques.

- **Piézomètres**

Il s'agit des piézomètres de reconnaissance installés pour le suivi des fluctuations des nappes de Ouagadougou. Le piézomètre du CIEH creusé dans les altérites a la plus longue chronique (1978 à 2004) suivi au pas mensuel par le CIEH et ensuite par la Direction de l'Inventaire des Ressources Hydrauliques (DIRH). Nous avons assuré un suivi au pas hebdomadaire depuis le début des travaux du projet Groundwater pollution en 2001. Douze autres piézomètres creusés par l'ONEA dans la nappe profonde ont été suivis de 2001 à 2004.

Les travaux bibliographiques ont également permis de disposer des données sur les paramètres hydrodynamiques et les niveaux statiques des forages et notamment des données climatiques régulièrement enregistrées par la météorologie nationale.

- ♦ **TRAVAUX DE TERRAIN**

Les travaux de terrain se sont déroulés en plusieurs campagnes :

- ***Pour les analyses chimiques***

Plusieurs campagnes de prélèvements ont porté sur quatre cycles hydrologiques dont deux ont fait l'objet d'analyses détaillées (2003 et 2004). Au cours de ces années, des prélèvements mensuels ont été effectués. Les méthodes d'échantillonnage et d'analyses seront détaillées dans le chapitre Hydrochimie à la page 88.

Parallèlement à ces activités de prélèvement, un inventaire aussi exhaustif que possible des puits et forages a été effectué. Ainsi ont été répertoriés mille huit cent (1800) puits et cinq cent dix (510) forages munis de pompes à motricité humaine ou immergées.

Six points d'eaux usées ont fait l'objet de suivis mensuels de 2001 à 2004. Ce sont : les eaux du canal central (CC), les rejets de la société nationale d'électricité (SONABEL), les eaux usées de l'hôpital central, le filet d'eau du Parc Urbain Bangr Wéogho et les rejets industriels (tannerie et brasserie), et celles de la zone exutoire,

- ***Pour les analyses bactériologiques***

Deux campagnes de prélèvement en 2003 et 2004 sur les eaux des puits et forages suivis ont été effectuées pour connaître la qualité bactériologique des eaux.

- ***Pour les analyses isotopiques***

En 2004 et 2005 des prélèvements d'eaux de précipitations ont été effectués sur une station pluviométrique installée à cet effet pour des analyses chimiques et isotopiques dans le cadre d'un projet AIEA-laboratoire d'hydrogéologie (BKF/8/003).

Au cours des années 2004, 2005 et 2006 des échantillonnages d'eaux des puits et forages des zones ciblées ont été effectués. Toutes ces eaux ont été prélevées pour les analyses isotopiques (^{18}O , ^2H , ^3H).

- ***Pour les analyses des éléments traces***

En septembre 2006, une campagne d'échantillonnage pour les éléments traces sur les aquifères superficiels et profonds, 16 échantillons d'eau acidifiés de 8 forages de 7 puits et du piézomètre du CIEH a été réalisée.

Environ 500 analyses d'eau ont été effectuées pour le suivi régulier au niveau des zones cibles en vue de comprendre l'évolution saisonnière de la composition chimique.

- ***Pour le levé géologique***

Plusieurs sorties ont été effectuées pour réaliser la cartographie géologique de la zone d'étude. Les rares affleurements ont été cartographiés et des lames minces ont été effectuées pour une étude plus fine de la composition minéralogique des différents faciès.

♦ TRAVAUX DE LABORATOIRE

Les échantillons d'eau prélevés au cours des travaux de terrain ont été analysés par la méthode volumétrique et par colorimétrie (DR 2000) au laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université de Ouagadougou. Une partie des analyses a été effectuée par la méthode chromatographique avec un chromatographe ionique en phase liquide de marque DIONEX DX-120. Ces dosages effectués au laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse ont concerné :

- les cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et NH_4^+
- les anions Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^- HCO_3^- .

Les balances ioniques calculées à partir des teneurs en ions dosés sont inférieures à 10% dans leur majorité ; ce qui donne une fiabilité suffisante aux données d'analyses de laboratoire et par conséquent aux interprétations qui en ont découlé. Les échantillons présentant des balances supérieures à 10% ont été éliminés.

- ***L'étude de la fracturation de la zone d'étude***

Nous avons également procédé à une analyse de la fracturation de la zone d'étude à partir d'image TM de LANDSAT de 1988 et de photographies aériennes au 1/ 50 000 de deux périodes différentes (1956 et 1990).

Les photographies aériennes à l'échelle du 1/50.000 ont été traitées par la méthode de la mosaïque et par la vue stéréoscopique pour tracer les linéaments, ce qui a permis une

illustration plus détaillée de la fracturation de la zone d'étude. L'image nous a permis de faire un inventaire rapide et aisé du réseau de fractures à l'aide des outils de dessin du SIG. Nous avons utilisé particulièrement l'analyse spatiale du logiciel Arc View 3.2a.

♦ TRAITEMENT DES DONNEES

Les données accumulées lors des différents travaux ont permis de réaliser une coupe hydrogéologique, des diagrammes, des courbes d'évolution temporelle et une carte de susceptibilité qui représente une ébauche de la carte de vulnérabilité à la pollution. Suivant la nature des données et en fonction du type de résultat recherché, un outil spécifique de traitement a été adapté.

La combinaison de plusieurs méthodes appropriées, a conduit aux résultats et interprétations présentés en 7 chapitres.

Le chapitre 1 présente le milieu d'étude dans ses contextes physique, hydroclimatique et hydrologique.

La synthèse des travaux antérieurs, relatifs à la géologie, avec la caractérisation géométrique de l'aquifère de la région de Ouagadougou constitue le second chapitre qui est consacré à la bibliographie.

Le chapitre 3 est consacré à la caractérisation hydrogéologique et au fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère profond de Ouagadougou.

Les chapitres 4 et 5 rapportent et analysent les résultats de l'étude hydrochimique à travers les diagrammes binaires, les variations spatio-temporelles et le mécanisme d'acquisition de la minéralisation et l'hydrochimie isotopique.

Dans les chapitres 6 et 7 enfin, et en ce qui concerne l'agglomération de Ouagadougou et ses environs, nous mettons en évidence une ébauche de l'état de vulnérabilité à la pollution de l'aquifère profond par les méthodes cartographiques d'interpolation spatiale.

Partie I - CADRE DE L'ETUDE

CHAPITRE I - CADRE PHYSIQUE

I.1 - Situation géographique

Le Burkina Faso se situe dans la zone sahélo-soudanienne en Afrique de l'Ouest entre les longitudes de 5°30' Ouest et 2°30' Est et les latitudes 9°20' et 15°20' Nord. Le relief est très modeste et les paysages monotones. Les altitudes s'échelonnent de 125 à 749 mètres. Il partage ses frontières avec six pays que sont le Mali à l'Ouest et au Nord ; la Côte d'Ivoire, le Ghana, et le Togo au Sud, le Benin (au Sud Est) et enfin le Niger à l'Est et au Nord Est (*figure 1.1*).

Sans accès à la mer, sans fleuve ou lac important, le Burkina Faso possède une industrie très faiblement développée et des ressources minières plus ou moins exploitées. Le pays trouve ses ressources dans sa production agricole qui constitue plus de 90 % de son économie.

La population nationale estimée à 13 925 000 d'habitants (données INSE en juillet 2005) comprend une soixantaine d'ethnies réparties sur une superficie de 275 200 km², soit une densité de 45 h/km². Le groupe ethnique dominant, les mossis, occupe le plateau central autour de Ouagadougou.

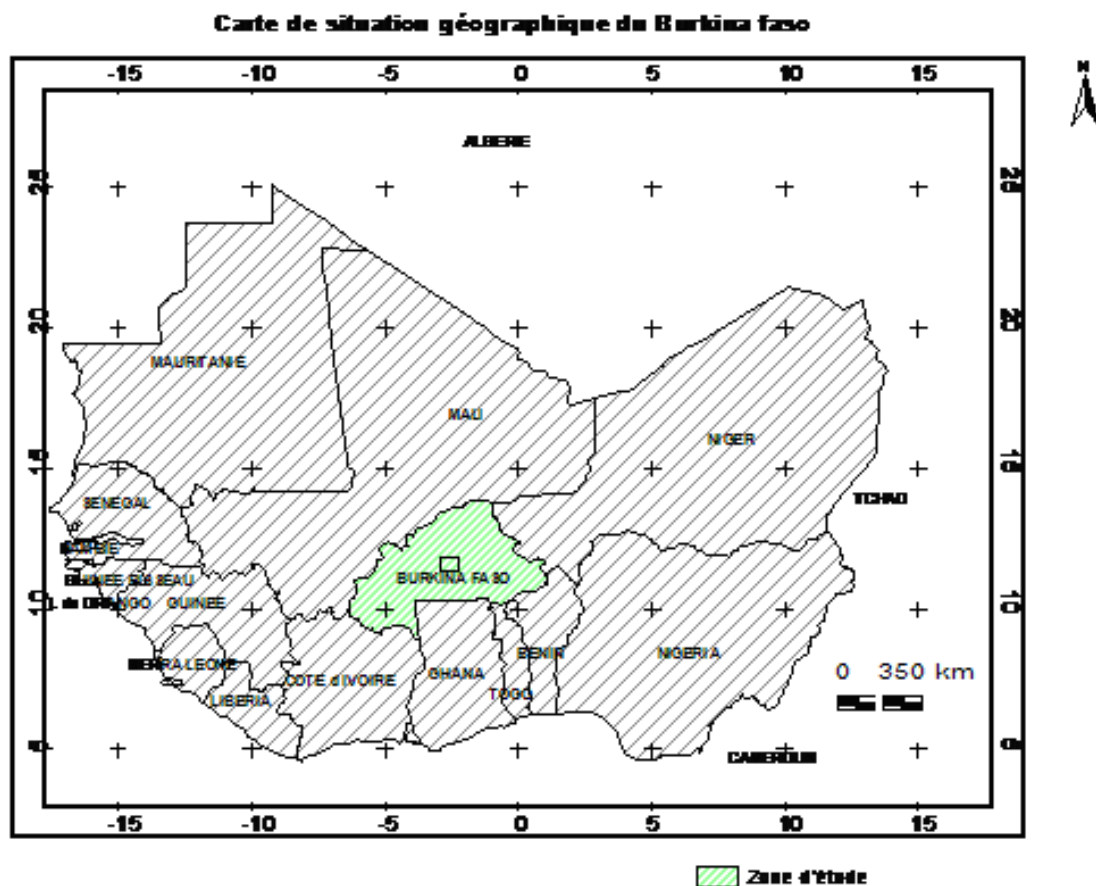


FIGURE 1.1 : Situation géographique du Burkina Faso

I.2 - Relief et Hydrographie

I.2.1 - Relief

C'est un pays plat dont l'altitude moyenne est comprise entre 208 m et 300 m. Cette planéité d'ensemble n'exclut pas une certaine variété du relief.

On distingue deux grands domaines topographiques selon Péron et al. 1975 :

- ⇒ une immense pénéplaine façonnée dans le précambrien s'étend sur les trois quarts du pays. Le relief est monotone et on y rencontre quelques buttes de cuirasses isolées ou groupes de collines constituées de roches dures volcano-sédimentaires, quartzites ou granitiques du birrimien.
- ⇒ un massif gréseux qui occupe le sud-ouest du pays. C'est la région la plus élevée et la plus accidentée du Burkina avec le mont Ténakourou qui culmine à 749 m. Cette région qui constitue la couverture sédimentaire du socle, est caractérisée par des falaises dont la plus importante domine le socle de 150 à 200 mètres (orientée Nord-Est / Sud-Ouest).

I.2.2 - Hydrographie

I.2.2.1 - Les principaux cours d'eau

Pays à relief peu élevé et relativement peu arrosé, le Burkina a cependant, un réseau hydrographique assez important surtout dans la partie méridionale. Il est drainé par quatre principaux cours d'eau qui se rattachent à quatre grands bassins que sont les bassins du Mouhoun, de la Comoé, du Nakanbé et du Niger (*figure 1.2*).

On dénombre six principaux cours d'eau d'importance variable dont : le Mouhoun ex-Volta noire (cours d'eau pérenne), le Nakanbé (ex-Volta blanche), le Nazinon (ex-Volta rouge, le plus court des trois), la Comoé et le Banafing.

Quelques affluents du Niger tels que le Béli, le Gorouol, la Sirba la Tapoa, et la Faga drainent l'extrême nord et l'est du pays.

Le Mouhoun, le Nakambé et la Comoé rejoignent l'océan atlantique respectivement par le Ghana et la Côte d'Ivoire.

La plupart de ces rivières ont un caractère temporaire car l'écoulement s'effectue notamment pendant l'hivernage de juillet, à septembre/octobre. Le reste de l'année l'écoulement est faible ou presque nul. On note des exceptions au niveau du Mouhoun et de la Comoé dont l'écoulement est assuré par des sources permanentes situées au sein du plateau sédimentaire dans le Sud-ouest du pays.



FIGURE 1.2 : Principaux bassins versant nationaux

1.2.2.2 - Le bassin du Nakambé (en vert sur la carte de la figure 1.2)

Le Nakanbé prend sa source au Nord du pays où les précipitations annuelles ne dépassent 600 mm. Il couvre 34000 km². Son lit est très peu marqué par le relief. La direction initialement Nord-sud change vers le Sud-est. Il se compose de plusieurs affluents dont le Massili. Le fleuve Nakanbé est un cours d'eau stratégique pour le Burkina car environ 4 millions d'habitants du pays vivent dans ce bassin que le pays partage avec le Ghana voisin.

1.2.2.3 - Bassin du Massili

Ouagadougou la zone d'étude est tributaire des eaux de surface du bassin du Massili (figure 1.4) qui se jette dans le Nakanbé.

Le Massili affluent rive droite du Nakanbé a un bassin versant de 2120 km² qui draine plusieurs affluents sur lesquels sont construits de nombreux petits barrages dont le plus important est celui de Loumbila édifié en 1947 avec une capacité de 35,98 millions de m³. Le rehaussement de 40 cm du seuil du déversoir a permis d'accroître la capacité du barrage qui est passée à 42,2 millions de m³. La principale vocation de ce barrage demeure l'alimentation en eau potable de la ville de Ouagadougou. Son remplissage reste aujourd'hui compromis par un nombre élevé de barrage amont.

Il est situé à une quinzaine de kilomètres au Nord-est de Ouagadougou en zone rurale. Le bassin versant est très allongé et peu accidenté avec une altitude moyenne de 320 m et une pente de 1‰. Les sols ferrugineux lessivés et le couvert végétal discontinu favorisent plus ou moins le ruissellement des eaux pluviales.

Autour du plan d'eau, de nombreux maraîchers exploitent les rives du barrage et la pêche y représente une activité bien développée.

1.2.3.4 - Le régime saisonnier du Massili à Gonsé

Les mesures sur la variation saisonnière des écoulements sont de la période 1975-2004 (source DGHA, figure 1.3).

L'analyse de ces courbes révèle :

- ⇒ Une période de crue maximale en août et septembre avec les pointes situées en août à 5.11 m³/s
- ⇒ Une période d'étiage de décembre à avril.
- ⇒ On observe une bonne corrélation pluies /débits sans aucun décalage.

Les variations saisonnières des écoulements sont accentuées et sont liées aux fluctuations pluviométriques.

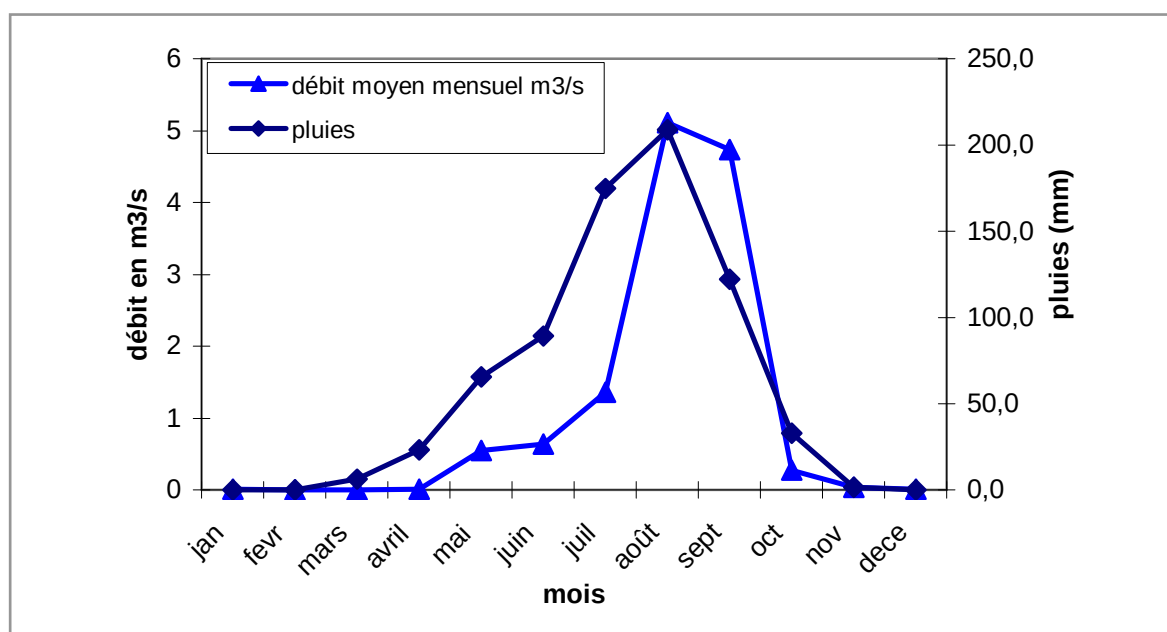


FIGURE 1.3 : Variation du débit moyen mensuel du Massili à Gonsé

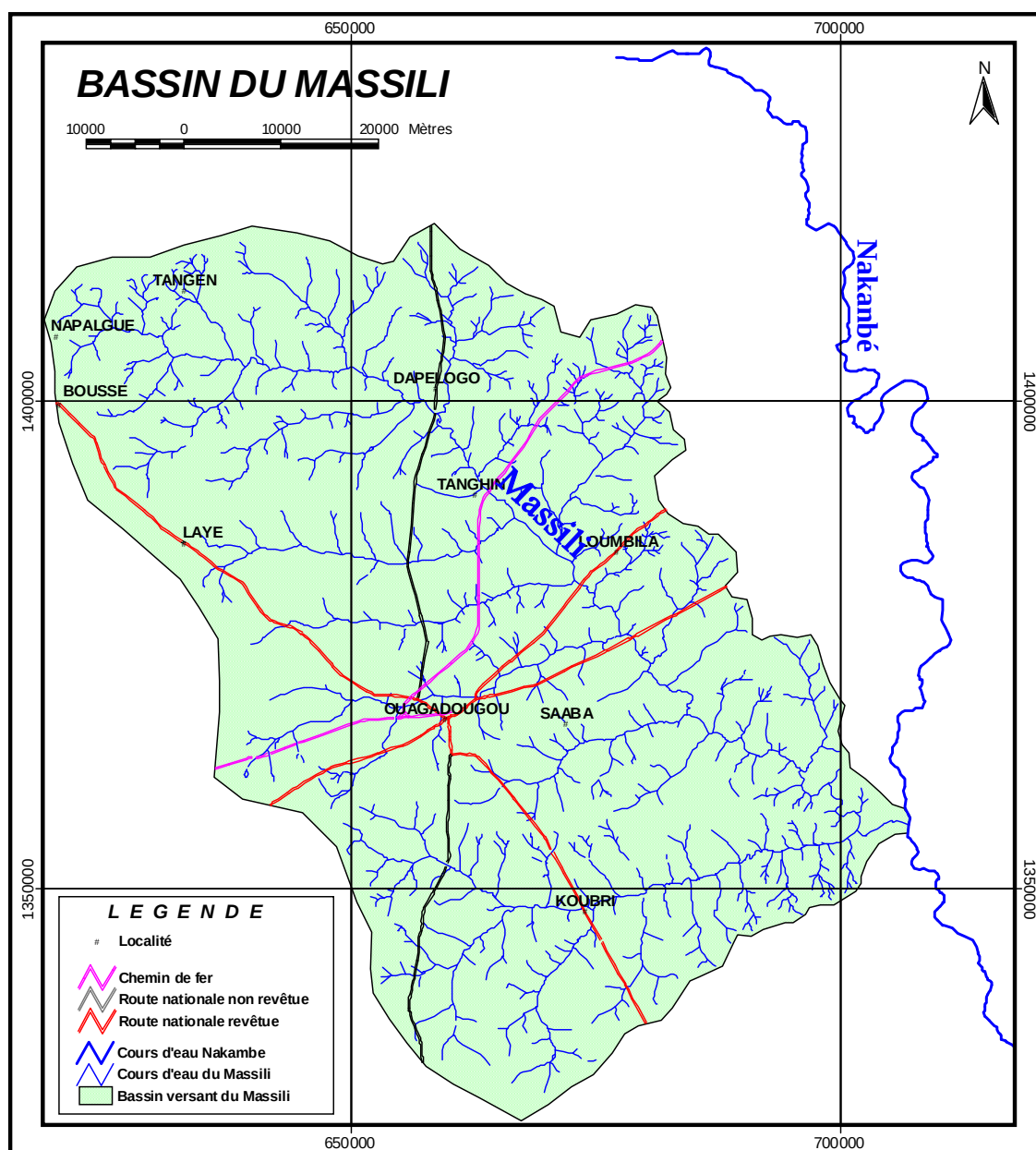


FIGURE 1.4 : Bassin versant du Massili

1.2.2.5 - Ouagadougou et son bassin versant

Ouagadougou occupe une partie du bassin versant d'un affluent du Massili (*figure 1.4*). Avec une superficie de 350 km², et une altitude moyenne comprise entre 280 et 300 m Ouagadougou reçoit en moyenne 787 mm d'eau répartis entre les mois de mai et d'octobre.

Sur le lit du marigot constituant l'affluent principal, sont construits trois barrages collinaires Ouaga 1, 2, et 3 qui constituent le réceptacle d'une partie des eaux pluviales (*figure 1.5*).

Des trois retenues, c'est le barrage de Ouaga 3 qui offre les possibilités de stockage les plus intéressantes et participe à l'alimentation en eau potable de la ville ; Les volumes d'eau stockés dans les retenues de Ouaga 2 et 3 étant faibles, le recours au barrage de Loumbila dans un premier temps s'est avéré nécessaire mais insuffisante pour alimenter la ville en eau potable. Pour pallier le déficit croissant le barrage de Ziga d'une capacité de 200 millions de m³ est construit à 50 km à l'Est de Ouagadougou.

La reconstitution des apports au niveau des retenues de Ouagadougou et Loumbila se fait à partir de relevés limnimétriques en tenant compte de prélèvements anthropiques et évaporatoires. Les débits spécifiques représentaient : 2.5 l /s/km² à Ouagadougou et 1 l /s/km² à Loumbila.

Le remplissage de la retenue Ouaga 3 s'effectue par l'intermédiaire d'une vanne de fond la reliant à celle de Ouaga 2. Avec l'urbanisation les principaux marigots de la ville ont été aménagés en canaux « bétonnés » et constituent ainsi le réseau de drainage des eaux pluviales ; ce qui va entraîner l'augmentation des superficies imperméables avec un accroissement du ruissellement au détriment de l'infiltration. On peut citer en exemple le piézomètre du CIEH qui depuis la construction du canal de l'Université a un niveau statique plus ou moins stationnaire.

Les principaux sont le canal du Mogho Naaba qui alimente la retenue Ouaga 2 (*figure 1.5*). Long de 4.3 km il draine un bassin versant moyennement urbanisé. Le canal central draine les eaux pluviales, du marché central et les environs, de l'hôpital, et a pour exutoire le pied de la retenue Ouaga 3.

Avec la réalisation de nouveaux quartiers, le canal de l'Université et celui de Dassassogho ont été aménagés ce qui porte à quatre le nombre de canaux qui servent maintenant d'axes de drainage dans le bassin de Ouaga. Les eaux de deux canaux (canal central et canal de l'Université) se rencontrent au niveau du parc urbain Bangr wéogho et s'écoulent jusqu'à l'exutoire du bassin où elles se mêlent aux eaux usées de l'usine de la tannerie de Kossodo et de la zone industrielle. Toutes ces eaux vont dans le Nakanbé qui ne présente pas d'écoulement à l'exutoire en dehors des épisodes pluvieux.

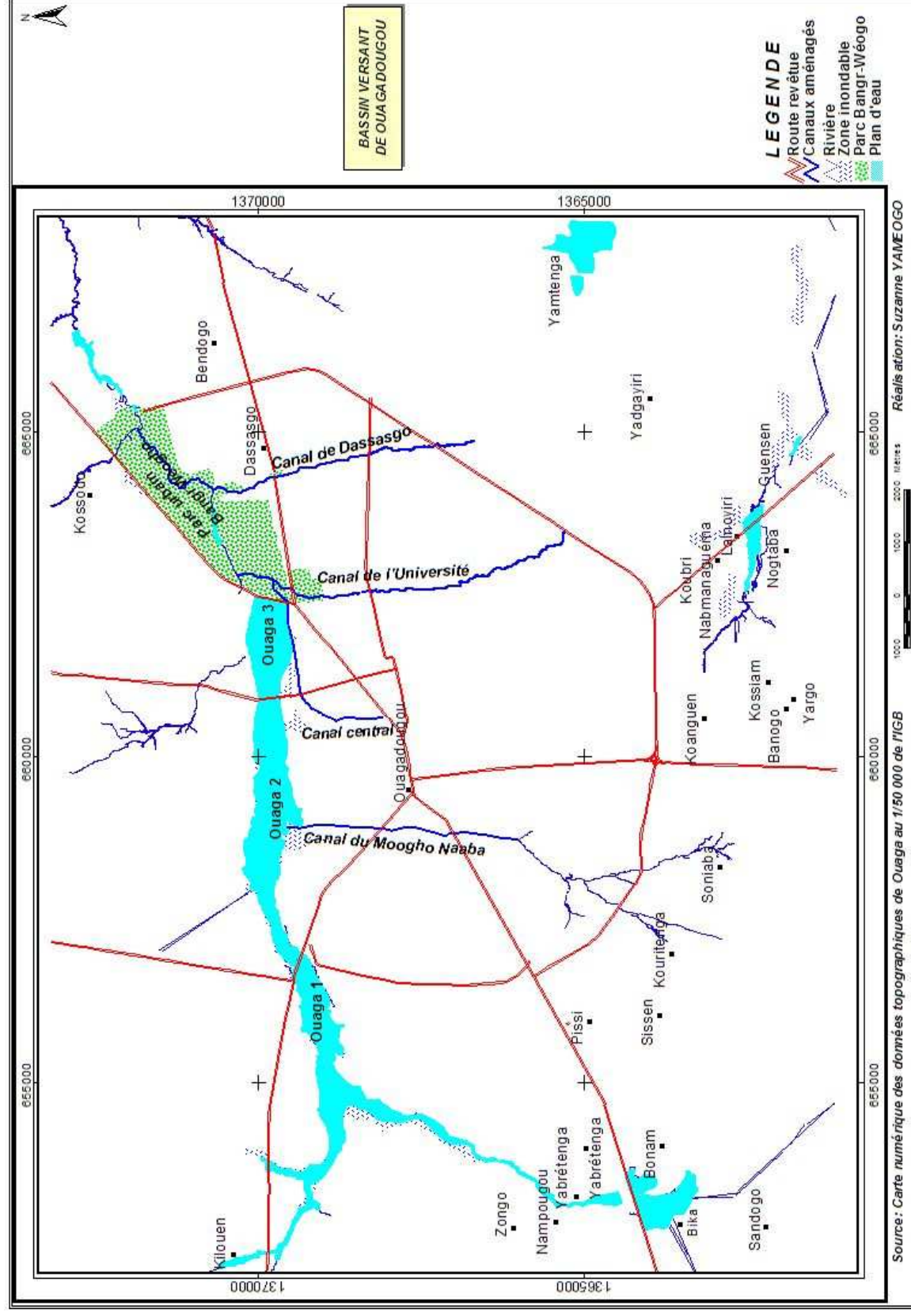


FIGURE 1.5 : La ville de Ouagadougou et son bassin versant

I.3 - Les grands traits du climat

Le climat est important pour la recharge des nappes aquifères. Il conditionne également de manière très forte la teneur en isotopes lourds du signal pluie d'entrée d'où la nécessité de préciser les caractéristiques essentielles du climat.

I.3.1 - La pluie

Au Burkina Faso, le climat est caractérisé par une saison de pluies et une saison sèche sur l'ensemble de trois zones climatiques : une zone sahélienne au nord de pluviométrie moyenne annuelle inférieure à 600 mm, une zone soudano-sahélienne au centre de pluviométrie moyenne comprise entre 600 et 900 mm et une zone soudanienne au sud caractérisée par une pluviométrie moyenne annuelle de plus de 900 mm. On note d'une manière générale que la pluviométrie décroît depuis les années 70. Cela se traduit par une translation vers le sud de l'ensemble des isohyètes (*figure 1.6 période de 50 années consécutives*) ; de 1951-1960 (courbes en noir) Ouagadougou faisait partie de la zone soudanienne, de 1961-1970 (courbes en rouge), elle fait partie de la zone soudano-sahélienne. Malgré la légère remontée de 1991 à 2000 (courbe en jaune) elle se situe toujours dans la zone soudano-sahélienne. Cette tendance à la remontée pourrait souligner une amélioration des conditions climatiques.

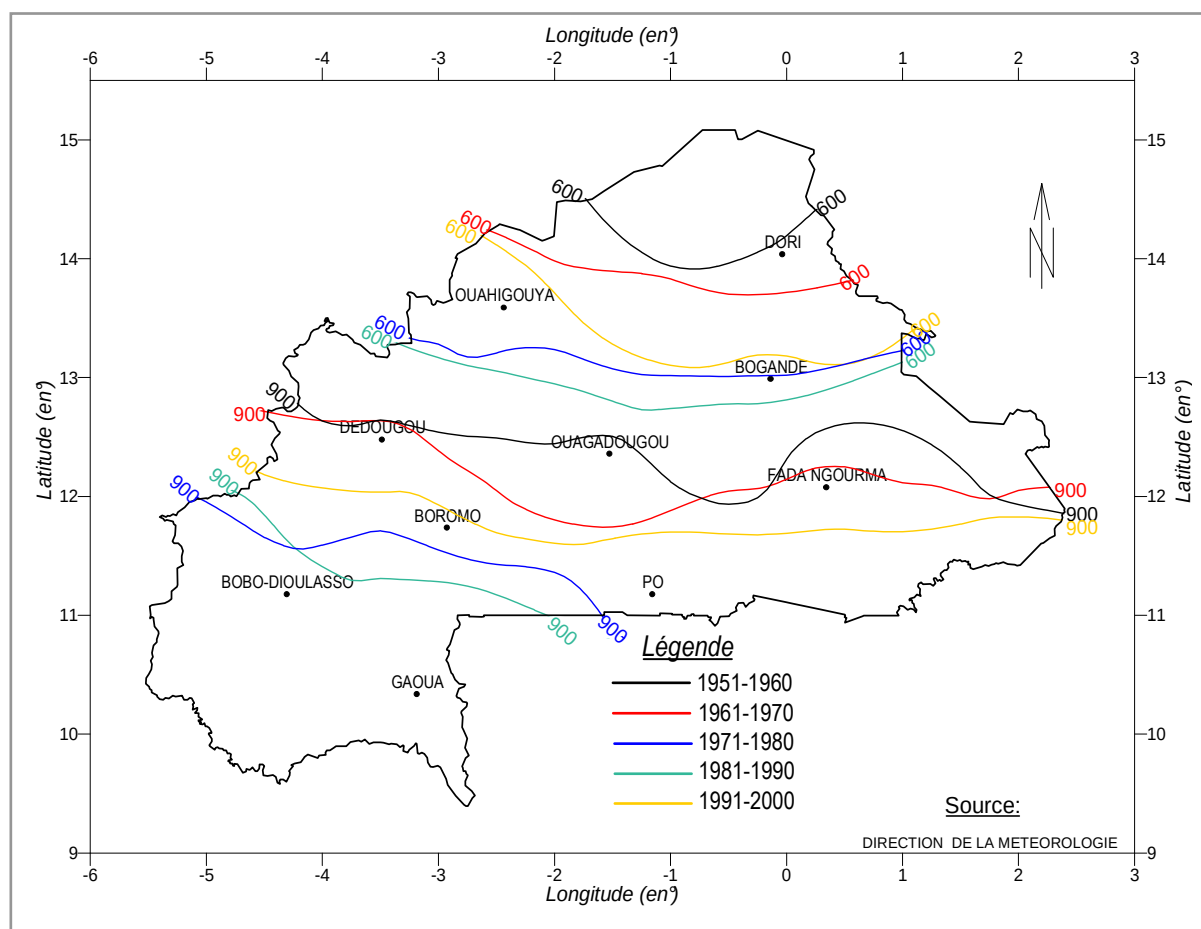


FIGURE 1.6 : Migration des isohyètes au cours des 50 dernières années au Burkina Faso

L'analyse de la pluviométrie par rapport à la normale sur les 30 dernières années d'observation (1975-2004) sur la figure 1.7 de six stations synoptiques montre que les précipitations débutent en mars et atteignent leur maximum en août avec : 272 mm à Bobo et 229 mm à Gaoua en zone soudanienne, autour de 244 mm à Pô, 208 mm à Ouagadougou, 207 mm à Fada en zone soudano sahélienne et 158 mm à Dori en zone sahélienne. Elles décroissent ensuite et s'arrêtent en novembre.

Les moyennes annuelles sont de 998 mm à Bobo-Dioulasso, 1048 mm à Gaoua, 805 mm à Fada, 725 mm à Ouagadougou, et 916 mm à Pô. Quant à l'extrême nord du pays, on y a enregistré 447 mm à Dori.

Les pluies varient énormément dans l'année et aussi d'une année à l'autre. La pluviométrie connaît une tendance à la baisse depuis la grande sécheresse des années soixante-dix. Cependant, dans la partie sud la remontée de l'isohyète 900 mm semble traduire l'annonce d'un retour à la normale (figure 1.6).

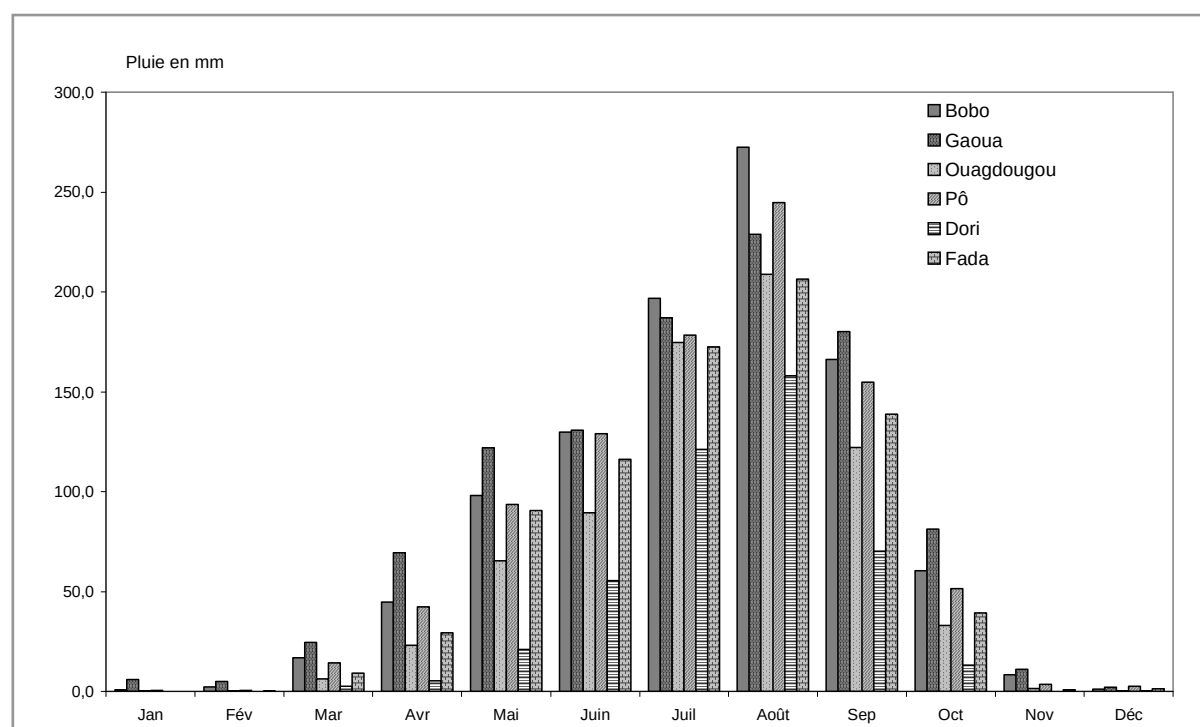


FIGURE 1.7 : Pluies moyennes mensuelles à Bobo, Gaoua, Fada, Ouagadougou, Pô, et Dori ; moyennes mensuelles sur 30 ans (1975 – 2004)

I.3.2 - La température

Elle est un paramètre climatique très important. Les températures sont toujours supérieures à 10° C quelque soit la période de l'année et les moyennes mensuelles dépassent rarement 35° C. Les températures extrêmes se rencontrent surtout vers le Nord du pays où les amplitudes diurnes journalières sont de plus en plus importantes. Les mois les plus chauds de l'année sont avril et mai où on peut enregistrer 40 °C et les plus frais sont décembre et janvier.

I.3.3 - Les vents et le rythme saisonnier des précipitations

L'harmattan, un flux d'air chaud et sec souffle du Nord Est vers le Sud Ouest sur tout le Burkina Faso d'octobre à mars. Il provient de la haute pression saharienne et se manifeste pendant la saison sèche. De novembre à février il est relayé par l'alizé boréal, vent frais et même froid soufflant dans le même sens.

A partir de mars, c'est la mousson flux d'air humide provenant des hautes pressions océaniques de l'hémisphère sud qui se glisse sous l'harmattan dont elle est séparée par le front inter tropical (F.I.T) ce dernier oscille au cours de l'année entre le golfe de Guinée (en janvier) et le 25^e parallèle (en août).

Au mois de juin, c'est ce flux qui génère les nuages de la saison des pluies qui s'installe en juillet, août et septembre avec des averses régulières et abondantes (Péron et al. 1975). Le FIT fait un aller-retour entre la côte du golfe de Guinée et le Sahara (*figure 1.8*). Il passe donc deux fois sur la ville de Ouagadougou dont le climat dépendra de sa progression et de l'importance des manifestations pluviales qui s'y rattachent. Ensuite, il repart vers le sud entre la fin septembre et mi-octobre. Les pluies se raréfient et la saison des pluies s'achève.

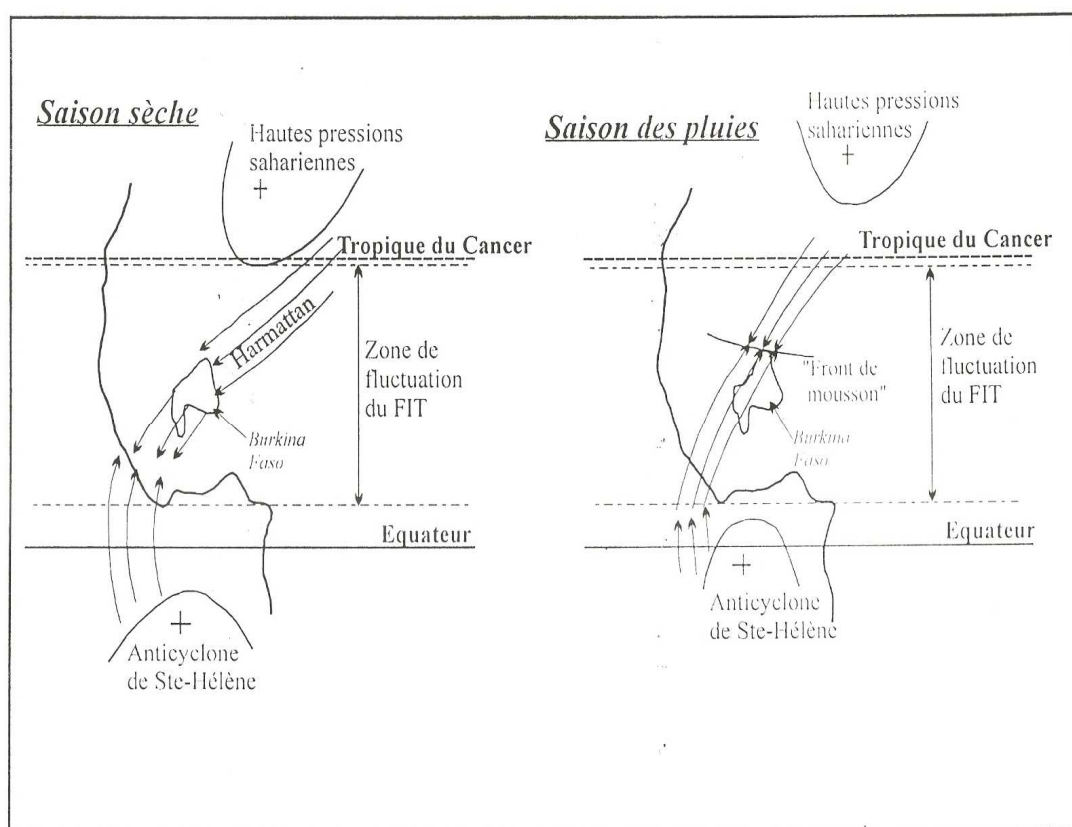


FIGURE 1.8 : Circulation des masses d'air au dessus du Burkina (d'après Carbonnel, 1985 modifié)

I.4 - Les paramètres climatiques de Ouagadougou

La pluviométrie moyenne annuelle dans le temps et dans l'espace de la ville de Ouagadougou détermine un climat tropical chaud et peu humide, baisse indiquée plus haut. La répartition des saisons est sous la dépendance du FIT zone de convergence des deux principaux flux d'air : l'harmattan et la mousson.

I.4.1 - La pluie de la région de Ouagadougou et analyse des tendances

Pour cette étude on retiendra comme référence la station de Ouagadougou aéroport située dans la zone d'étude, on dispose de la chronique de mesures la plus longue. En effet, les précipitations furent enregistrées par les missionnaires de 1902 à 1952 et de 1952 à nos jours par la météorologie nationale. Ces mesures ont un bon degré de fiabilité. Nous avons choisi d'étudier les précipitations annuelles depuis l'origine des mesures c'est-à-dire au début du 20^e siècle pour voir leur évolution dans le temps.

A la figure 1.9 on observe une courbe en dents de scie alternant les périodes humides et les périodes sèches.

La période 1971-1980 a été plus sèche que celle allant de 1960-1971 et cette tendance générale à l'assèchement s'est poursuivie jusqu'en 1994 où une remontée de la pluviosité a fait penser à un retour à la normale qui n'en était pas un. On remarque une persistance de la sécheresse.

La moyenne annuelle qui est aussi la médiane calculée sur les 100 ans est de 786.8 mm de pluie. Les années les plus sévères en année sèche furent celle de 1913 où on a enregistré 407 mm et de 1997 avec 587.8 mm. Les années les plus humides furent celles de 1962 avec 1183 mm et de 1975 avec 1106.2 mm. Le mois le plus pluvieux reste le mois d'août.

La tendance à la baisse a une influence négative sur les lacs, les fleuves et sur les réserves en eau souterraine.

Ces dix dernières années, des études pour évaluer le niveau de la recharge des nappes se sont multipliées. Depuis les années 70 les premiers programmes d'hydraulique villageoise et urbaine avaient adopté un système d'approfondissement des puits car le niveau de la nappe phréatique ne faisait que baisser. (3 à 4 m selon les zones) du fait que l'infiltration n'arrivait plus à compenser les prélèvements par évapotranspiration. Pour pérenniser la ressource disponible l'option de forage a pris le pas sur les puits sur toute l'étendue du territoire.

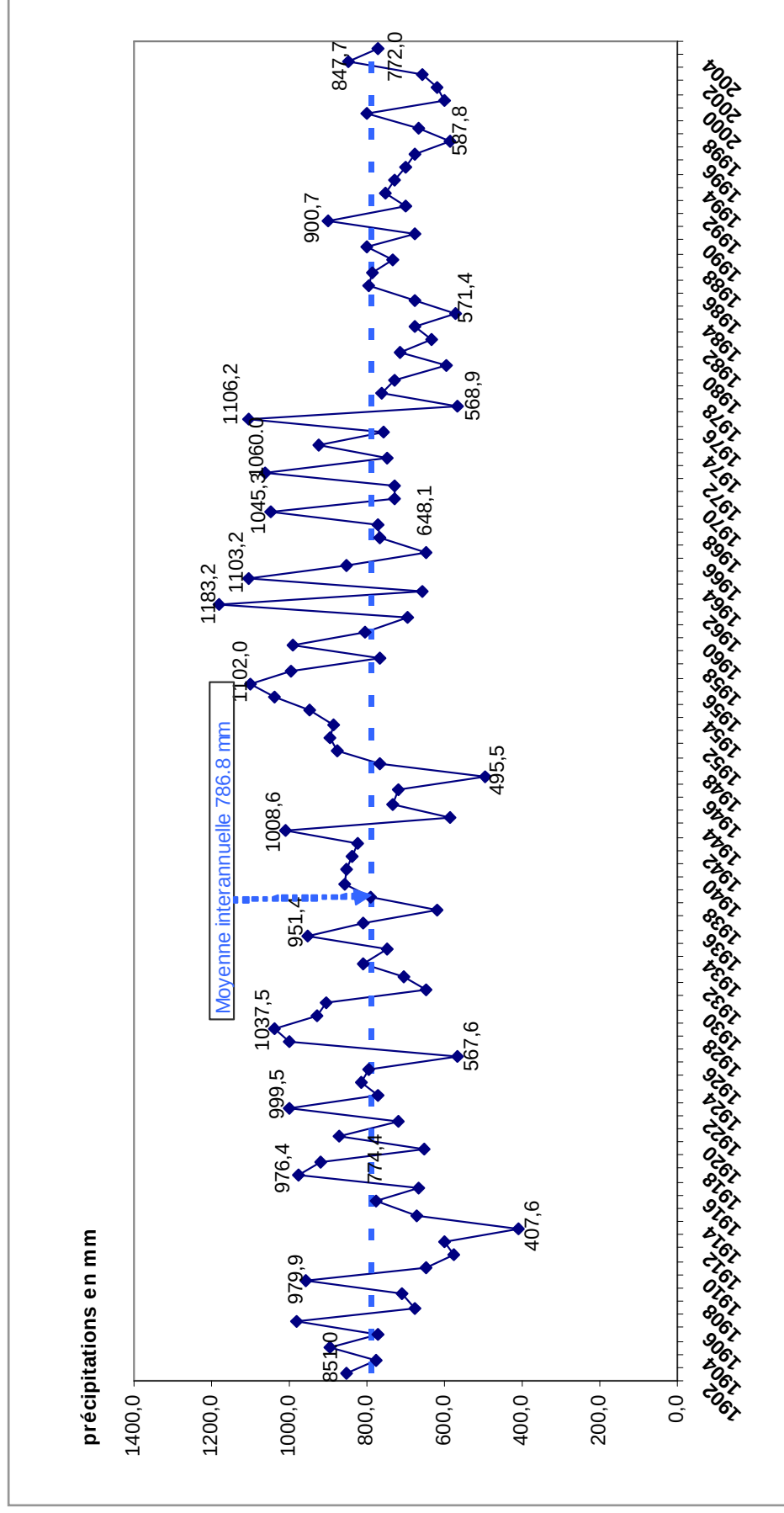


FIGURE 1.9 : Variation des pluies moyennes annuelles à Ouagadougou de 1902 à 2004

I.4.2 - Les températures

Les températures moyennes calculées sur une période de trente ans (1975 à 2004) oscillent entre 26.6 °C et 33.1 °C à Ouagadougou (*figure 1.10*). De juin à novembre la saison est chaude et humide. Les mois les plus frais à Ouagadougou sont de décembre à février.

Les maxima se situent au mois d'avril avec 33.1°C, et octobre avec 29 °C. Quant aux minima, l'un est en saison des pluies 26.6 °C en août et l'autre en saison sèche en janvier avec 24.6 °C. Parfois, on peut avoir des pics de température atteignant 40 °C pendant les mois d'avril et mai.

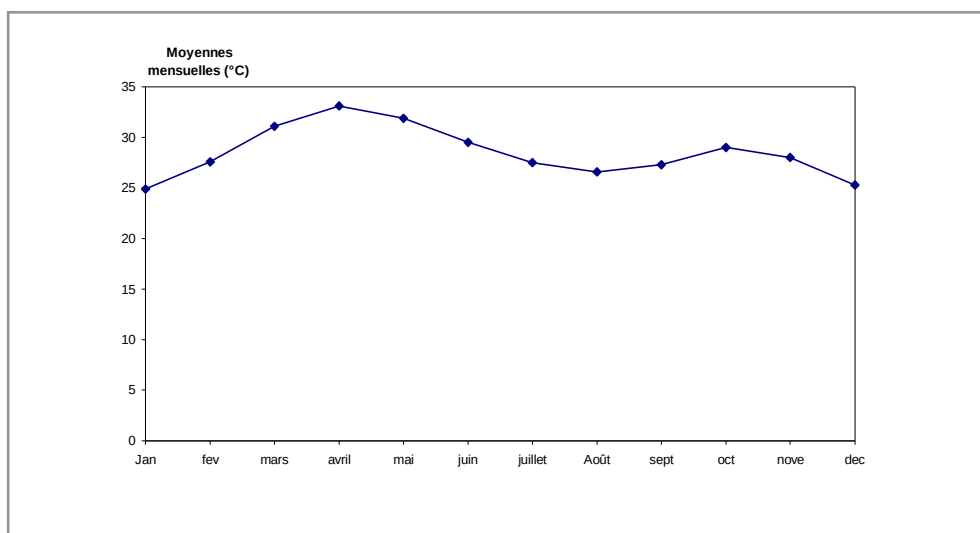


FIGURE 1.10 : Variations moyennes mensuelles des températures à Ouagadougou aéroport

I.4.3 - Humidité relative

Les faibles valeurs sont relevées en janvier, février et mars, qui correspondent aux mois les plus secs de l'année. Les fortes valeurs (95%) s'observent en juillet, août et septembre avec des valeurs autour de 95 % (*figure 1.11*).

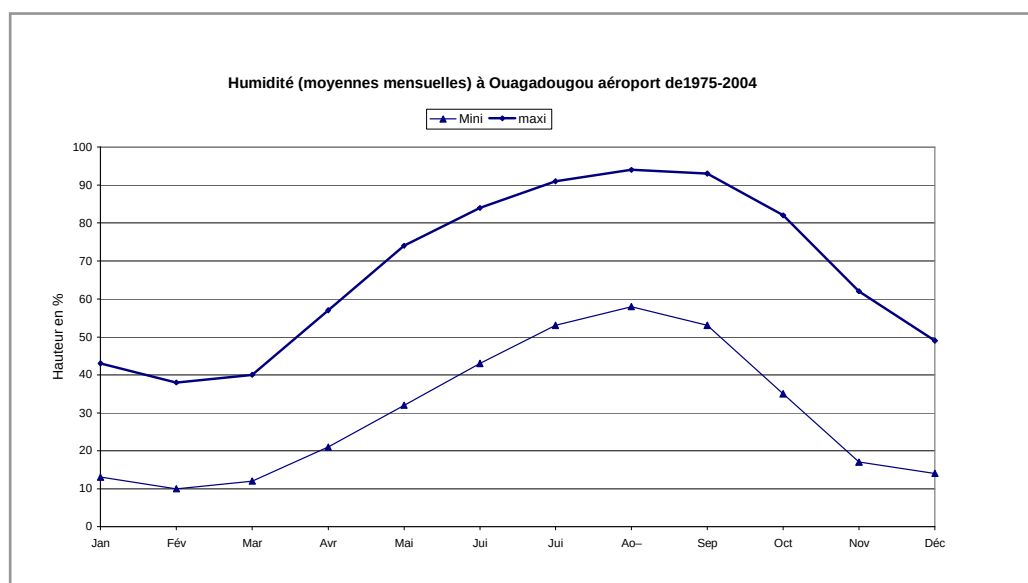


FIGURE 1.11 : Variations moyennes mensuelles de l'humidité relative à Ouagadougou aéroport

1.4.4 - Evapotranspiration potentielle Penman

Comme les températures, l'évapotranspiration moyenne mensuelle montre un maxima, en mars et un minima en août (*figure 1.12*).

Les effets conjugués de la température et de l'humidité relative font que l'on enregistre à Ouagadougou des prélèvements par évaporation et évapotranspiration très élevés. Le cumul sur les 30 années donne une lame d'eau évaporable de 1901 mm. Ces prélèvements ont des effets néfastes sur les eaux de surface (lacs et barrages) et les eaux souterraines qui sont sollicitées pour l'alimentation en eau potable de la population.

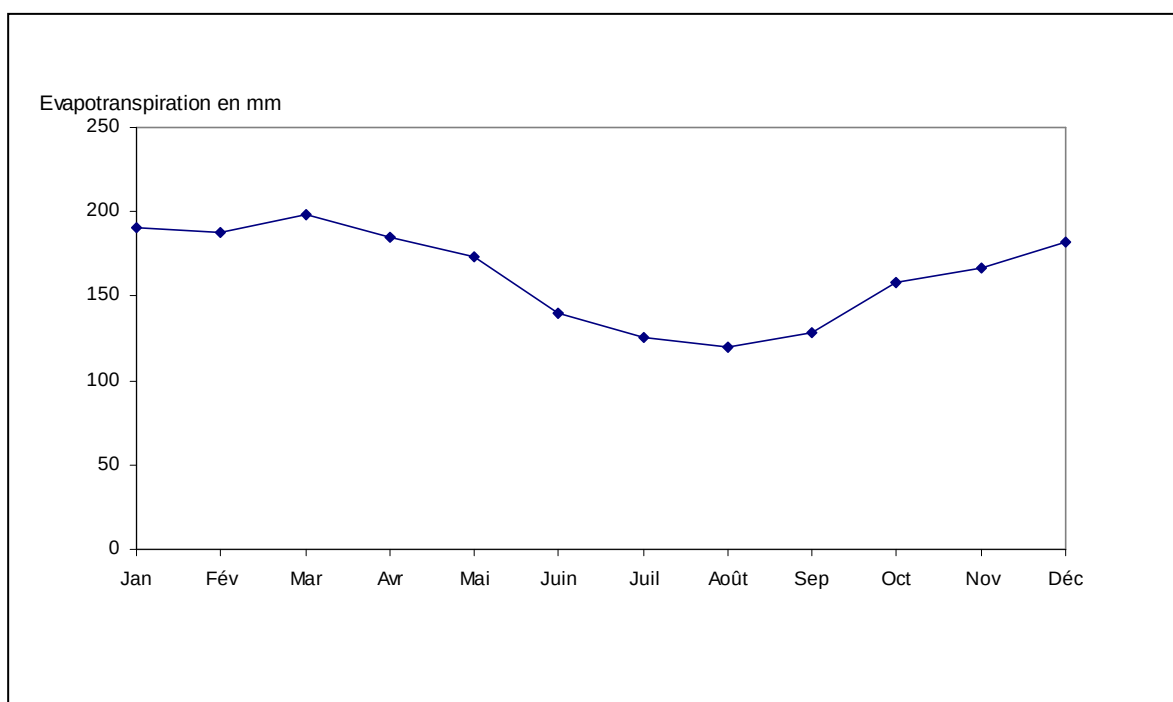


FIGURE 1.12 : Variations moyennes mensuelles de l'évapotranspiration Penman à Ouagadougou aéroport

1.5 - Conclusion partielle

Le Burkina Faso, pays relativement plat a un climat de type soudano-sahélien caractérisé par l'alternance d'une saison sèche et d'une saison des pluies dont le rythme est déterminé par le déplacement du front inter tropical (FIT).

Les paramètres physiques de l'agglomération de Ouagadougou permettent de mieux appréhender les problèmes d'approvisionnement en eau potable liés à plusieurs facteurs qui sont :

- Facteurs climatiques

Ouagadougou fait partie de la zone soudano-sahélienne et reçoit très peu d'eau de pluie selon les années avec une saison sèche plus longue et une saison des pluies de plus en plus courte. L'analyse de la figure 1.9 montre une moyenne pluviométrique de 787 mm sur l'ensemble de la ville de Ouagadougou depuis un siècle, celle des figures 1.10 et 1.12 montre des températures variant entre 26.6 °C et 33.1 °C et une évapotranspiration élevée de 1.901 m sur 30 ans. Ces vingt dernières années, les retenues sont en étiage dès avril et mai, mois pendant lesquels la température est élevée, l'évaporation et l'évapotranspiration également à leur maximum.

Cependant, on note une légère hausse au niveau de la pluviométrie dans les années 1991-2000 (*figure 1.6*), cette tendance à la remontée pourrait-elle souligner une amélioration des conditions climatiques ?

- Facteurs anthropiques

L'occupation anarchique du tissu urbain par les populations de plus en plus nombreuses, l'expansion de la superficie de la ville créent une disproportion entre les ressources disponibles et les besoins en eau croissante.

L'imperméabilisation de la surface due à l'urbanisation favorise un plus grand ruissellement des eaux et diminue l'infiltration.

Il est important de connaître si les eaux souterraines peuvent satisfaire la demande en eau pendant cette période de sécheresse. La connaissance du contexte géologique et hydrogéologique est donc indispensable pour répondre à la question.

CHAPITRE II - CONTEXTE GEOLOGIQUE

I - CADRE GEOLOGIQUE GENERAL

I.1 - Géologie du Burkina en Afrique de l'Ouest

L'histoire de la géologie du Burkina s'intègre dans celle du continent Africain et plus particulièrement du craton Ouest africain, dont les grandes lignes ont été esquissées par des auteurs tels que Duceillier 1963, et Bessoles 1977.

D'après Bessoles en 1977, le continent africain est occupé par trois cratons qui sont : le craton Ouest africain, le craton du Congo, le craton de Kalahari. Nous nous intéressons au craton Ouest Africain essentiellement constitué de formations très anciennes d'âge archéen (>2500 Ma) et paléo protérozoïque (2250-2000 Ma). On distingue deux grands ensembles qui sont la dorsale de Réguibat au Nord et la dorsale de LEO ou Dorsale de Man au Sud. Ces deux ensembles sont séparés par le grand bassin de Taoudéni où se sont accumulées des formations sédimentaires d'âge néo protérozoïque et paléozoïque (*figure 2.1*).

Le bassin de Taoudéni au Nord couvre les deux tiers du Mali et à l'Est une partie du Niger et dans une moindre mesure la partie Ouest et le Nord du Burkina.

Le Burkina Faso occupe la dorsale de LEO ou le bloc Baoulé Mossi dans le centre sud du craton Ouest africain. Il est essentiellement constitué d'un ensemble d'âge paléo protérozoïque, et une petite partie des formations sédimentaires du bassin de Taoudéni.

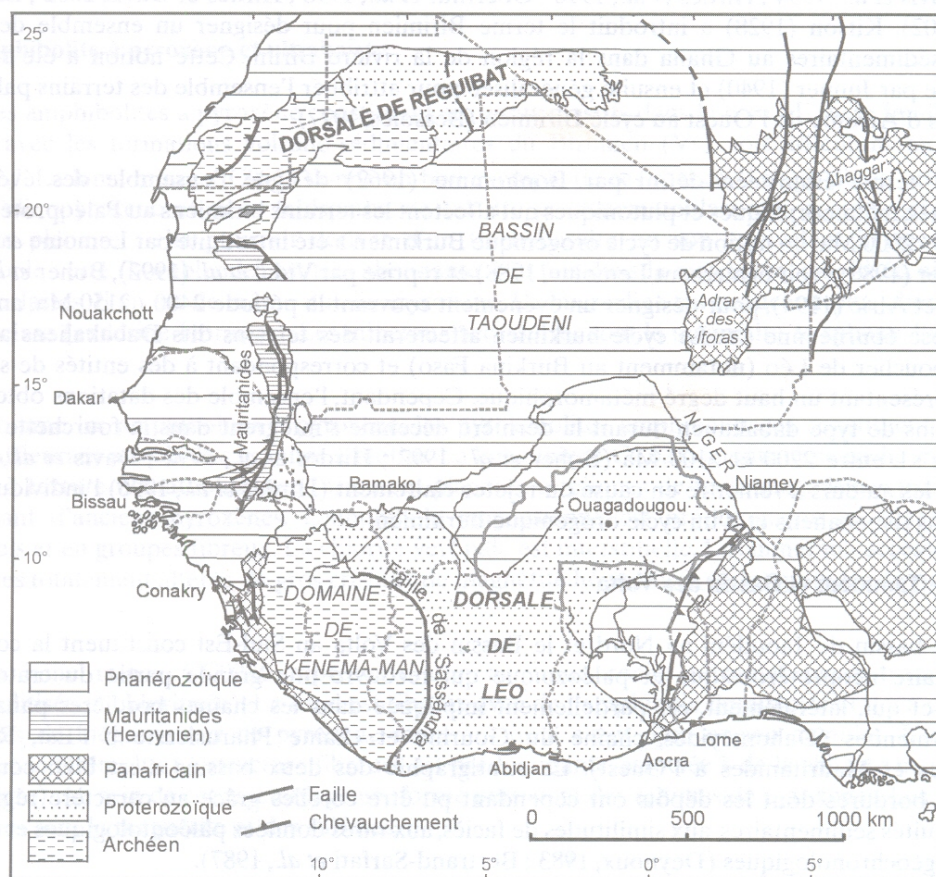


FIGURE 2.1 : Carte géologique du craton Ouest-Africain (Bessoles 1977)

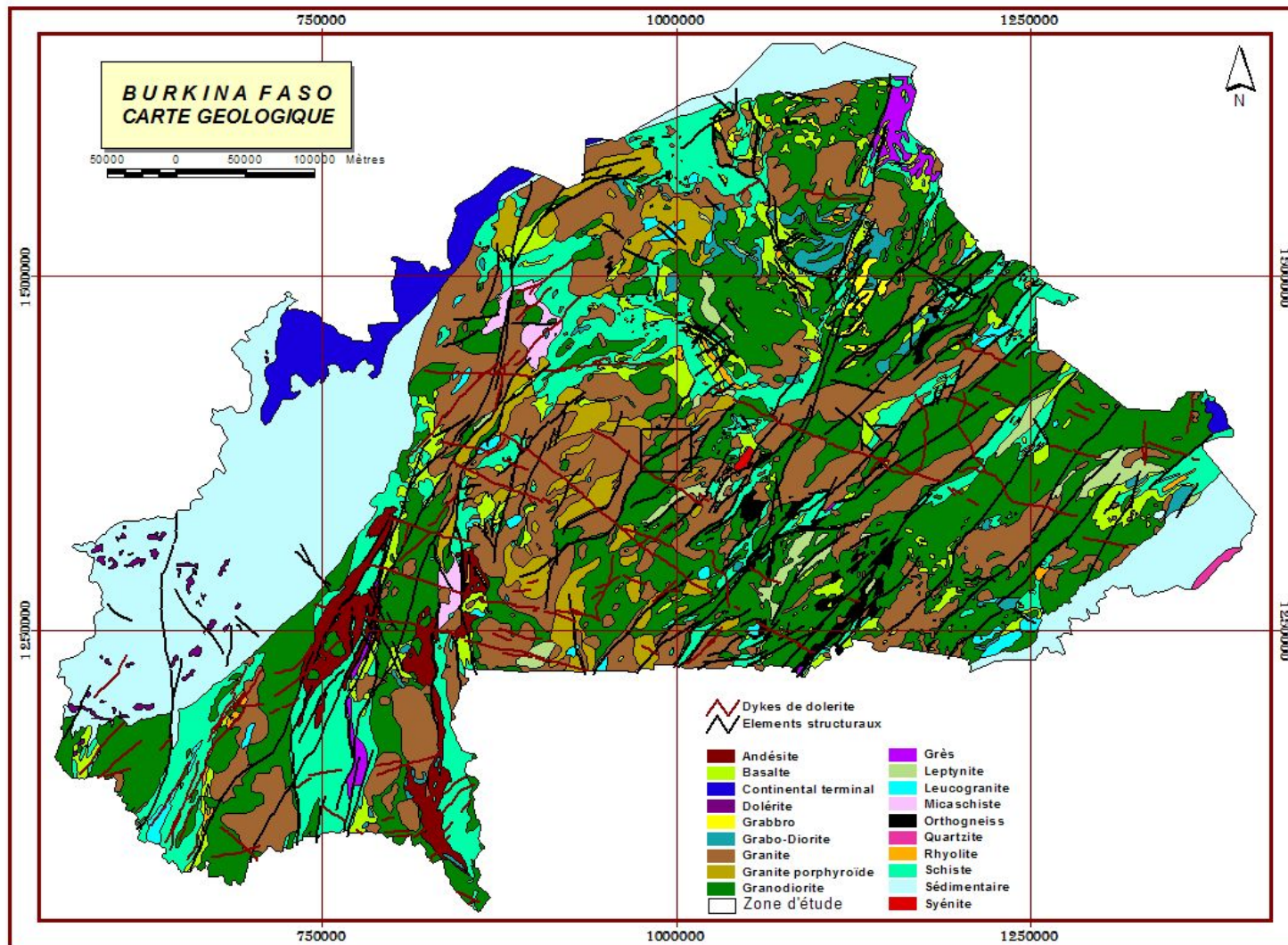


FIGURE 2.2 : Carte géologique du Burkina extraite de Casting et al. 2003

L'âge et l'histoire de la mise en place des formations géologiques au Burkina, notamment celles du socle cristallin font encore l'objet de controverses et discussions diverses. Selon G. Hottin Et O. F. Ouédraogo 1975, les formations du Précambrien D (ante-birimien) constituent l'ossature de la majeure partie du Burkina, qui s'est fracturé pour donner naissance à des sillons dans lesquels s'est développée l'orogénèse éburnéenne.

Les derniers travaux du projet SYSMIN (cartographie géologique du Burkina Faso, BRGM, de Castaing and al, 2003), à la différence des premiers auteurs, ne distinguent plus de Précambrien D au Burkina. Selon cette dernière étude, le Burkina Faso appartient au domaine Baoulé Mossi du craton Ouest-Africain et comprend deux unités de formations géologiques essentielles :

- ⇒ La première unité géologique est essentiellement constituée d'une part de ceintures de roches vertes (mégastructures dépassant les frontières) mises en place au cours de l'orogénèse éburnéenne (2250-2000 Ma) sous forme de projections volcaniques, et recoupées par la suite par des roches ultra basiques intrusives sous forme de batholites.
- ⇒ La deuxième unité est la couverture sédimentaire qui s'est déposée entre le néo protérozoïque et le paléozoïque. Elle constitue 20 % de l'ensemble du territoire.

Selon ces derniers travaux, les 80% de l'ensemble du territoire burkinabé sont constitués par les formations du socle paléo protérozoïque.

La figure 2.2 représente la carte géologique du Burkina.

I.2 - La lithologie des principales formations

I.2.1 - Le socle paléo protérozoïque (Birimien)

C'est un domaine cristallin et cristallophyllien composé de terrains volcano-sédimentaires et plutoniques birimiens disposés en ceintures orientées NNE-SSW et envahis par de vastes batholites de granitoïdes éburnéens.

Sur le plan lithologique on distingue les formations suivantes :

• Les roches ultra basiques

Ces roches affleurent sporadiquement dans la région de Bogandé - Dori au Nord Est du pays.

• Les formations Volcaniques

Elles se sont mises en place au cours de deux épisodes orogéniques : de 2240 à 2170 Ma et de 2135 à 2110 Ma. On rencontre deux faciès l'un basaltique qui constitue le principal faciès volcanique et l'autre andésitique. Les basaltes sont largement représentés dans la région de Ouagadougou où ils sont régulièrement amphibolisés avec une schistosité importante.

• Les formations volcano-sédimentaires

Elles sont constituées généralement de schistes à faciès très variés dispersées dans les ceintures où elles s'intercalent avec les roches volcaniques. Ces formations sont recoupées par des roches ultra basiques telles que les péridotites, les pyroxénolites, les gabbros les diorites et aussi de filon de quartz ou de pegmatite. Des intrusions de ce type ont pu être décrites à Goren et Wayen. Elles sont intéressantes parce qu'elles sont minéralisées en zinc en amas sulfurés de plomb zinc et molybdène.

• Les formations métamorphiques

Le métamorphisme qui affecte toutes ces formations est généralement de faciès schiste vert. On rencontre des micaschistes à grenat, sillimanite et staurotide, des leptynites parfois à grenat qui affleurent sur la feuille de Ouagadougou.

• Les formations du plutonisme éburnéen

C'est au cours de l'orogénèse éburnéenne que s'est déroulée la période de granitisation avec des intrusions de batholites organisées en deux grands ensembles :

- ⇒ Un ensemble tonalitique intrusif dans les ceintures volcano-sédimentaires et plutoniques birimiennes. Il est essentiellement composé de granodiorites, de tonalites et diorites quartzifères, parfois rubanées et foliées. Ces formations sont issues d'une intense activité plutonique située entre 2210 à 2100 Ma.
- ⇒ Un ensemble granitique intrusif dans l'ensemble tonalitique et les ceintures volcano-sédimentaires et plutoniques birimiennes. Ce sont notamment des granites à biotite et souvent amphibole, des granites rubanés près de Ouagadougou, et enfin des granites alcalins affleurant dans le centre du pays. Cette génération est tardive, et s'est mise en place entre 1900-1800 Ma.

I.2.2 - La couverture sédimentaire

Elle se localise principalement sur les frontières Ouest, Sud-ouest, le Nord et à l'extrême Est du pays. Elle comprend des formations déposées entre le Néo protérozoïque (précambrien supérieur) et le paléozoïque (primaire), et les formations tertiaires du continental terminal (CT). Elle constitue 20% de l'ensemble du territoire et n'est pas représentée dans la zone d'étude essentiellement constitué de formations plutoniques.

I.2.3 - Les formations récentes du quaternaire

Le quaternaire est représenté par : des alignements de dunes généralement mortes au Nord du pays. Ces dunes sont des dépôts éoliens ordonnés suivant un système de cordons plus ou moins fixés par la végétation (graminées) selon l'orientation E-W ; elles s'allongent sur plusieurs dizaines de kilomètres. Elles sont essentiellement constituées de quartz à grain fin (0.5 mm) émoussé.

Les cuirasses latéritiques omniprésentes dans tout le pays témoignent d'un ancien niveau de pénéplanation et sont mises en évidence par l'érosion actuelle sous forme de buttes tabulaires.

Quant aux alluvions elles sont observées dans les lits des cours d'eau ou sur les berges parfois sur plusieurs kilomètres. Elles sont essentiellement constituées de graviers, de sables et d'argiles qui sont des produits de décomposition de la cuirasse.

I.3 - Aperçu sur la tectonique du Burkina Faso

Toutes ces formations géologiques ont subi plusieurs cycles orogéniques, dont les plus marquants pendant lesquels se sont mises en place les principales unités géologiques sont l'orogénèse éburnéenne et l'orogénèse panafricaine.

I.3.1 - L'orogénèse éburnéenne

La phase majeure de l'orogénèse éburnéenne est marquée vers 2150 Ma par une fracturation du socle suivant deux directions prédominantes NE-SW et NNE-SSW. Cette phase tectonique se traduit par une granitisation syn à tardi tectonique vers 1900 à 1800 Ma, et par un métamorphisme régional.

- Entre 1890-1810 Ma, on note d'autres manifestations post tectoniques qui vont favoriser la mise en place de complexes magmatiques faits de syénites et de granites alcalins et aussi d'intrusions de dykes doléritiques mis en place au méso protérozoïque entre 1300 à 1400 Ma. Cette phase correspond à l'orogénèse Kibarienne.

- Vers 1000 Ma, la couverture sédimentaire néo protérozoïque du bassin de Taoudéni et du bassin des volta vient reposer directement et en discordance sur le socle birimien au Nord-ouest et à l'Est du pays. Des sills discordants se sont développés dans la couverture sédimentaire ils sont datés du primaire (250 Ma $\pm$ 13 Ma) d'après Hottin et Ouédraogo (1975).

I.3.2 - L'orogénèse panafricaine

Elle s'est déroulée vers 600 Ma et s'est traduite par l'apparition de faciès plissés et métamorphiques notamment au niveau de la chaîne du gourma à l'extrême Est de celle de Buem et celle de l'Atakora à l'extrême sud-est du pays (plissement Nord-Ouest Sud-est). Cette orogénèse panafricaine serait à l'origine de ces chaînes de montagnes.

I.4 - Conclusion Partielle

Pendant l'orogénèse éburnéenne, la phase majeure est marquée par une fracturation suivant deux directions prédominantes NE-SW et NNE-SSW. Ces événements tectoniques ont entraîné des déformations telles que schistosité et foliation qui caractérisent les roches métamorphiques.

L'étude de la fracturation à partir de photographies aériennes et d'image satellitaire de la zone d'étude donne des précisions sur la distribution directionnelle des fractures qui favorisent le mode de concentration des eaux d'infiltration depuis la surface du sol. On ne peut souligner ici le rôle catalyseur des fractures dans le drainage de l'eau.

II - CONTEXTE GEOLOGIQUE DE OUAGADOUGOU ET FRACTURATION

II.1 – Introduction

Nos connaissances géologiques de la région d'étude sont tirées des travaux de Ducellier (1963), de la synthèse géologique du Burkina de G. Hottin et F. Ouédraogo (1975), de la feuille de Ouagadougou au 1/200.000 dressée par Castaing et al (2003) dans le cadre du projet SYSMIN et enfin de nos propres observations de terrain et analyses microscopiques de lames minces.

La ville, repose sur ce que l'on appelle le môle de Ouagadougou constitué de socle cristallin et cristallophyllien qui affleure en appointements de petites dimensions au sud-est au nord-ouest et à l'ouest. Nous donnerons la lithologie de ces formations en nous appuyant sur la notice au 1/200 000 de Castaing et al. (2003).

II.2 - Morphologie des affleurements

Les affleurements sont de forme et de tailles variables (10 à 40 m). A l'ouest et Nord-ouest de la ville respectivement au niveau des carrières de Kanazoé et de la Sonabhy on a des ensembles qui mettent à nu de multiples fractures horizontales à subhorizontales et verticales ; des plans de cisaillement mettent en évidence des plans de déformation planaire des minéraux phylliteux, des feldspaths en forme sigmoïdale et des amas surmicacés étirés qui épousent les directions des fractures. Les affleurements visités sur quinze kilomètres à la ronde montrent une grande hétérogénéité de faciès. On trouve essentiellement des granodiorites, des tonalites et des diorites quartzifères foliées, des filons de pegmatite et d'aprites à feldspath potassique et plagioclase

Une vingtaine d'échantillons de roches sélectionnés parmi un grand nombre de prélèvements ont été considérés comme représentatifs de l'ensemble des granitoïdes de la zone d'étude et des lames minces ont été effectuées pour une étude plus fine de la composition minéralogique des différents faciès. Toutes ces roches sont enfouies sous une épaisse couverture d'altération et la nature du substratum est surtout connue à travers des log-types de forages faits dans la ville de Ouagadougou, pendant les campagnes d'hydraulique urbaine.

L'aspect de quelques affleurements est présenté dans les figures 2.3, 2.4. On observe le plan de contact bien net entre le granodiorite et l'aprite rose, et également des familles de grandes fractures orientées Est-ouest et Nord-sud (*photographie 2*) qui tronçonnent les affleurements ; des plans de cisaillement et des microfractures (diaclasses) plus ou moins verticales sont bien nets sur la diorite représentée par la *photographie 2*.

Toutes ces déformations mettent bien en évidence la tectonique plicative et cassante qui a affecté l'ensemble des formations géologiques du Burkina, notamment la zone d'étude essentiellement constituée de socle cristallin.

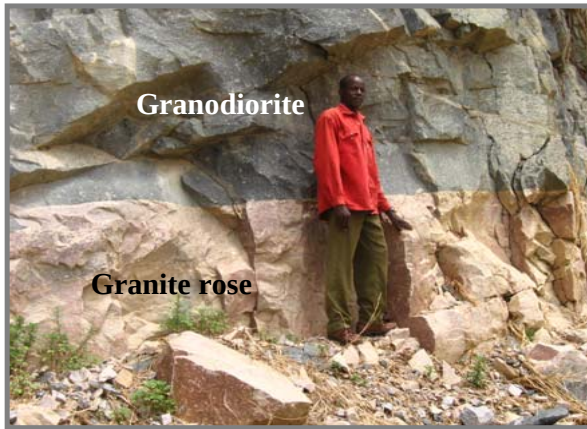


PHOTO 1 : Affleurement de granodiorite microfissuré contact franc avec un granite aplitique rose (site prélevé)



PHOTO 2 : Affleurement montrant une microdiorite quartzite Cisaillée avec un filon de pegmatite (site prélevé) intrusif



PHOTO 3 : Granodiorite porphyroïde en contact avec granite aplitique. Déformation sigmoïdale des feldspaths potassiques et minéraux phylliteux



PHOTO 4 : Granodiorite hétéro granulaire avec orientation de gros cristaux feldspaths potassiques (1 à 3 cm)

FIGURE 2.3 : Aspect des granitoïdes de la carrière de Kanazocé

Photographies : Suzanne YAMEOGO, juin 2007



PHOTO 5 : Granite aplitique intrusif dans la granodiorite avec une enclave bien visible au centre (avec alignement des minéraux)



Photo 6 : intrusion de filons de pegmatite dans un granitomigmatite



PHOTO 7 : Intrusion d'aplo-pegmatite dans une granodiorite



PHOTO 8 : Filon de quartz très fracturé et altéré de Silmissi

FIGURE 2.4 : Aspect de l'ensemble granitique intrusif dans l'ensemble de tonalite, granodiorite

Photographies : Suzanne YAMEOGO, juin 2007

II.3 - Lithostratigraphie des principales formations

Depuis les travaux de Castaing (2003), trois grands ensembles ont été distingués (*figure 2.5*) :

- alluvions (quaternaire) ;
- dolérites (formations post birimiennes) ;
- granitoïdes (granodiorites, tonalite, diorite et plutonites du socle birimien).

II.3.1 - Socle birimien

Le socle birimien se compose de formations plutoniques intrusives qui sont de 3 types :

- ⇒ granodiorites, tonalites et diorites quartzifères foliées suivant une bande SO-NE particulièrement développée au Sud-ouest de la ville,
- ⇒ granodiorites à amphibole et biotite au nord-ouest et des roches gneissiques à amphibole et biotite au sud de Ouagadougou,
- ⇒ granite à grain moyen à biotite et amphibole spatialement associé à un granite porphyroïde à biotite et rare amphibole. Ces deux faciès constituent une entité très grande qui prédomine à l'Est et au Nord-ouest de la ville où ils sont recoupés à leur tour par le granite grain fin moyen à biotite et parfois à muscovite.

Toutes ces formations sont traversées par quelques intrusions post tectoniques de dolérites, de pegmatites, d'aprites et de quartz.

A l'échelle de l'affleurement, deux faciès importants sont identifiés dans cet ensemble : le faciès de granodiorite, tonalite et diorite quartzite foliée représenté par les photographies 1, 2, et le faciès de granodiorite porphyroïde à amphibole et biotite par les photographies 3 et 4 ci-dessus.

Les granodiorites dans l'ensemble sont des roches à composition minéralogique dominée par le quartz, l'orthose, le microcline, les plagioclases (oligoclase, andésine). La hornblende verte peu abondante (5 %) en association avec la biotite (25 %) montre une déformation planaire marquée par une foliation en relation avec la tectonique cassante.

On observe également une orientation bien nette des gros cristaux de feldspaths potassiques (orthose).

Les diorites quartzites foliées et cisailées ont une texture grano-nématoblastique présentant des minéraux ferromagnésiens (65 %) de biotite et amphibole à forme sigmoïde alternant avec des cristaux de quartz craquelés et de plagioclases (oligoclase, andésine) marqués eux aussi par un alignement.

Les plutonites intrusifs sont les plus répandus. Ils sont constitués de granite syntectonique à biotite qui se présente sous deux faciès différents : l'un porphyroïde dans l'extrême Sud-est de la carte et l'autre à grain moyen. Ces deux faciès peuvent coexister. Ce sont des roches à composition minéralogique dominée par des cristaux de quartz xénomorphes en petites plages interstitielles

10-15 %, de l'orthose et du microcline (35 %), des plagioclases (20 %) relativement sains avec double macles et un zonage parfois discret, de biotite en association avec la hornblende verte (30 %).

On observe des filons d'aprites, de pegmatites qui se repèrent plus aisément dans les granites et les granodiorites. Ces filons sont les affleurements les plus spectaculaires que l'on rencontre au niveau des carrières de Kanazoé (*photos 3, 5, 7*) et de Pissy derrière la Sonabhy (*photo 6*).

De nombreux filons de pegmatite affleurent au Nord-est de la ville, ils suivent la même direction N30° que les grandes failles qui tronçonnent les granitoïdes. La pegmatite est essentiellement constituée de gros cristaux de quartz, d'orthose et ou du microcline, avec un peu de biotite et de muscovite.

Des filons de quartz blanc ont aussi été observés. Ils recoupent des formations lithologiques variées. Au Sud-ouest de la ville dans le village de Silmissi un filon de quartz exploité en tranchée pour granulats a été cartographié. Il est sub vertical de direction N20° E et est très fracturé et altéré, avec des enduits ferrugineux sur les diaclases (*photo 8*) ; un forage réalisé dans cette zone pour une usine de brasserie débite 36 m³/h.

Les observations faites à la carrière de Kanazoé mettent bien en évidence les relations entre les différentes formations qui affleurent. Elles montrent que le complexe granodiorite et ses enclaves constituent un mélange magmatique sub contemporain, recoupé par plusieurs générations de filons précoces de granodiorite grise à grain fin-moyen et de d'autres plus tardifs aplitiques et pegmatitiques.

A l'échelle de l'affleurement, on remarque au niveau des différents faciès l'existence de réseaux de fractures orientées Est-ouest /Nord-sud, mis en évidence par le front de taille au niveau des carrières d'exploitation. Les différentes roches ont des textures rubanées et foliées. Les directions prédominantes des fractures sont données par les grands accidents orientés NE-SO et NNE-SSO qui reflètent plus ou moins fidèlement la structure interne des entités cartographiées qui ont subi une intense fracturation lors de l'orogénèse éburnéenne. Les structures internes sont foliation ou rubanement pour les granodiorites, les gneiss et craquelure et étirement des cristaux de quartz pour les diorites quartzites et les granites.

La cartographie géologique a sous évalué les fractures de la zone d'étude qui sont souvent repérées par géophysique et que nous tenterons d'étudier au niveau du paragraphe II.4.1.

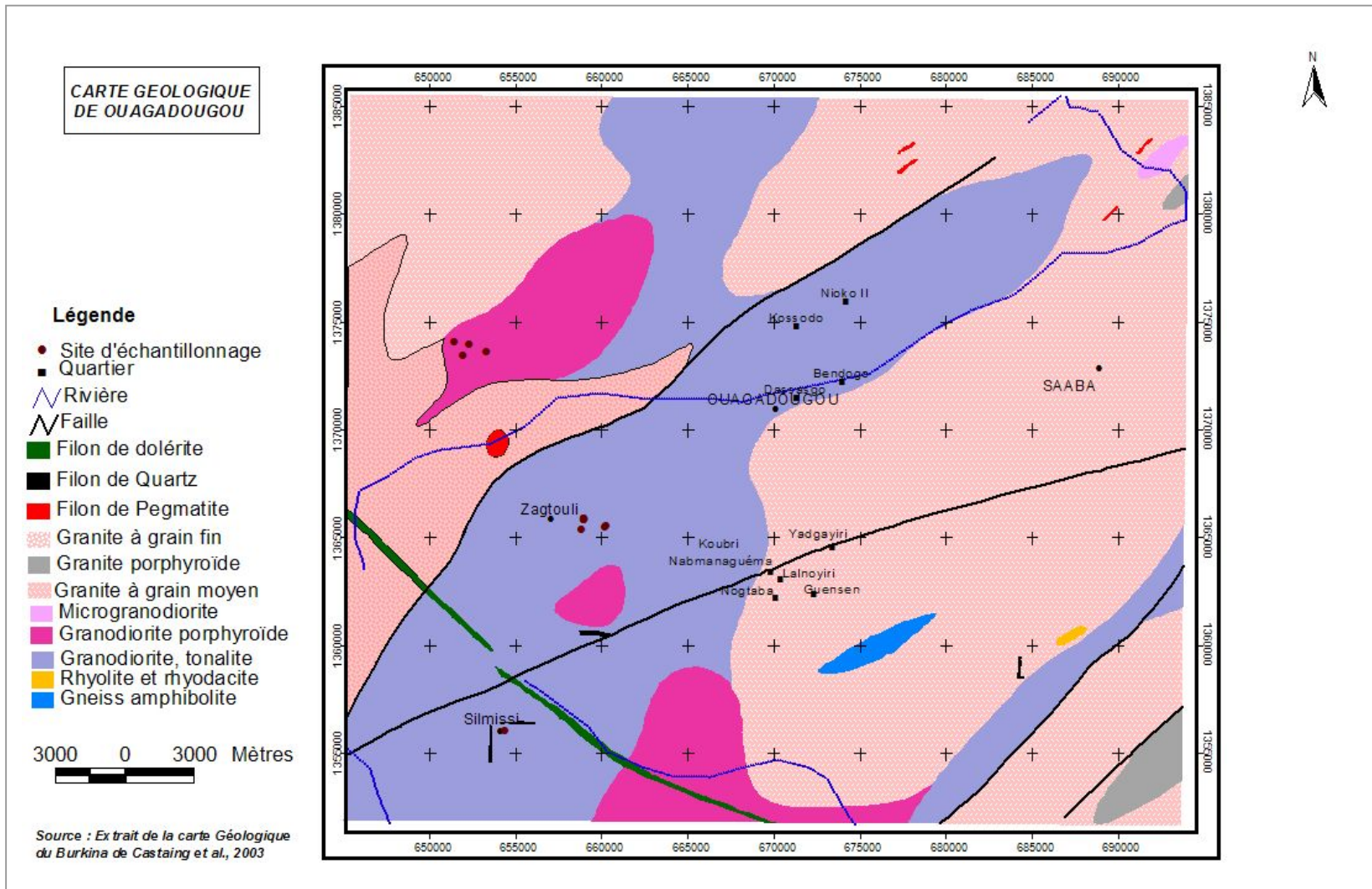


FIGURE 2.5 : Carte géologique simplifiée de la ville de Ouagadougou ; modifiée

II.3.2 - Dolérites post-birimiennes

Les formations post birimiennes à dominante doléritique sont très peu représentées dans la zone d'étude. Elles affleurent sous forme d'un filon au Sud-ouest de Ouagadougou sur la carte au 1/200 000.

Ces filons postectoniques s'organisent sur de grandes longueurs de direction NO-SE. Une étude plus fine au microscope précise la composition de la dolérite qui correspond à celle d'un méta gabbro à deux pyroxènes et amphibole avec des oxydes de fer et ou de titane.

II.3.3 - Altérites

Toutes ces formations de socle sont masquées par une cuirasse latéritique alumino-ferrugineuse surmontant des altérites argileuses et des arènes grenues avec des épaisseurs partout importantes. Ces cuirasses latéritiques omniprésentes témoignent d'un ancien niveau de pénéplanation et sont mises en évidence par l'érosion actuelle sous forme de buttes tabulaires. La cuirasse est la partie la plus productive des horizons supérieurs des altérations quand elle est noyée. La coupe schématique N-S à la figure 2.6 illustre l'organisation de ces altérites dans la ville de Ouagadougou.

II.3.4 - Alluvions (Quaternaire)

Les dépôts de sables, de graviers et d'argiles suivent les cours des rivières sur parfois de grandes distances. Ils couvrent aussi les bas fonds du bassin de Ouagadougou où on rencontre des sables quartzo-feldspathiques avec des alluvions exploitées par les riverains.

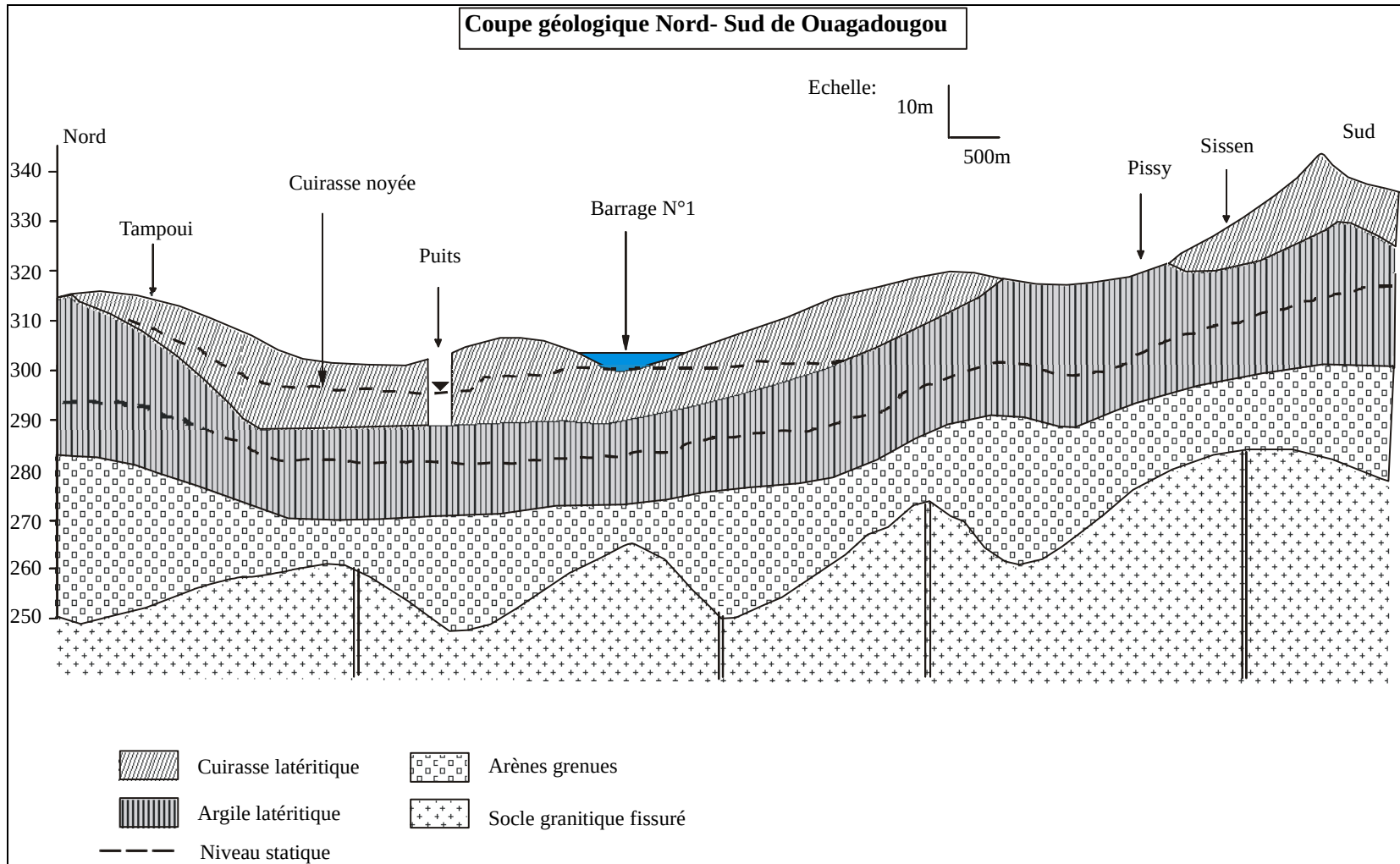


FIGURE 2.6 : Coupe schématique Nord-Sud de la géologie de Ouagadougou

II.4 - Contexte tectonique du socle de Ouagadougou

Certains auteurs (Engalenc, 1978 ; Savadogo, 1984 ; Guiraud, 1987 ; Biémi, et Savané 1986, Faillat, 1986, Ousmane, 1988) se sont déjà intéressés au socle cristallin en étudiant essentiellement les linéaments.

La région de Ouagadougou située en zone de socle est bien fracturée, et c'est ce qui nous amène à nous intéresser aux linéaments (alignements morpho structuraux) qui dans ce contexte correspondent à toutes les structures linéaires c'est-à-dire les failles, les fractures, les fissures, les diaclases ou les alignements géomorphologiques relevés sur les photographies aériennes et l'image satellitaire.

Engalenc disait que la photographie aérienne est l'œil de l'hydrogéologue. La photographie aérienne est dans la plupart du temps très usitée dans le cadre de recherche de sites favorables pour des forages d'eau au Burkina. Une bonne utilisation de ces photographies aériennes permet de gagner du temps sur le terrain par la localisation de failles probables et des zones favorables à l'implantation de forages à haut rendement.

Quant à l'imagerie satellitaire elle est aussi utilisée mais très peu compte tenu du fait qu'elle n'est pas accessible.

II.4.1 - Etude de la fracturation

Nous avons choisi d'exploiter les photographies des années 1956 et 1990 à deux périodes différentes, pour nous affranchir du paysage urbain actuel qui change de manière rapide. Nous avons également procédé à une analyse de la fracturation à partir d'une image TM de LANDSAT de 1988 (*figure 2.8*).

Deux cartes de linéaments ont été élaborées. Elles couvrent toute la zone d'étude allant de l'amont, la zone d'entrée (barrage de Boulmiougou) vers l'aval (zone exutoire Kossodo). Ce sont au total 81 méga linéaments sur l'image satellitaire LANDSAT-TM (*figure 2.9*) et 389 linéaments sur les photographies aériennes (*figure 2.10 et tableau 2.1a et b*) que nous avons repérés.

L'analyse a consisté à mesurer les angles que les linéaments font avec le Nord, et à calculer leurs longueurs cumulées. Ensuite ils ont été regroupés par classe de 10° en 10° pour leur traitement statistique, dans le but d'obtenir des classes de directions préférentielles qui sont reportées sur des rosaces de distributions directionnelles (*figures 2.11 a et b*).

La relation entre le nombre de linéaments et la longueur cumulée a été recherchée. On remarque qu'il existe une forte corrélation entre les deux paramètres (*figure 2.7*). Cette corrélation est linéaire et positive avec des coefficients R^2 de 0.95 pour les photographies aériennes et 0.97 pour l'image satellitaire. Cela indique selon Onugba, (1990) que la densité de fracturation peut être exprimée soit par le nombre de fractures ou par la longueur cumulée des différentes fractures.

**TABLEAU 2.1 a, b : Nombre de linéaments et leurs longueurs cumulées a : pour les photos ;
b pour l'image**

	Nombre de linéaments	Pourcentage %	Longueurs cumulées en cm
0			
20	37	9,5	88,3
40	54	13,9	146,4
60	62	15,9	207,8
80	26	6,7	84,2
100	21	5,4	72
120	23	5,9	68,9
140	85	21,9	283,4
160	56	14,4	150,2
180	25	6,4	70,9
Total	389	100	1172,1

a

Classe	Nombre de linéaments	Pourcentage %	Longueurs cumulées en cm
0			
20	19	23,5	140,81
40	12	14,8	91,4
60	13	16,0	85,6
80	2	2,5	18,2
100	5	6,2	38,5
120	2	2,5	8
140	7	8,6	42,4
160	12	14,8	104,1
180	9	11,1	70,5
Total	81	100,0	599,51

b

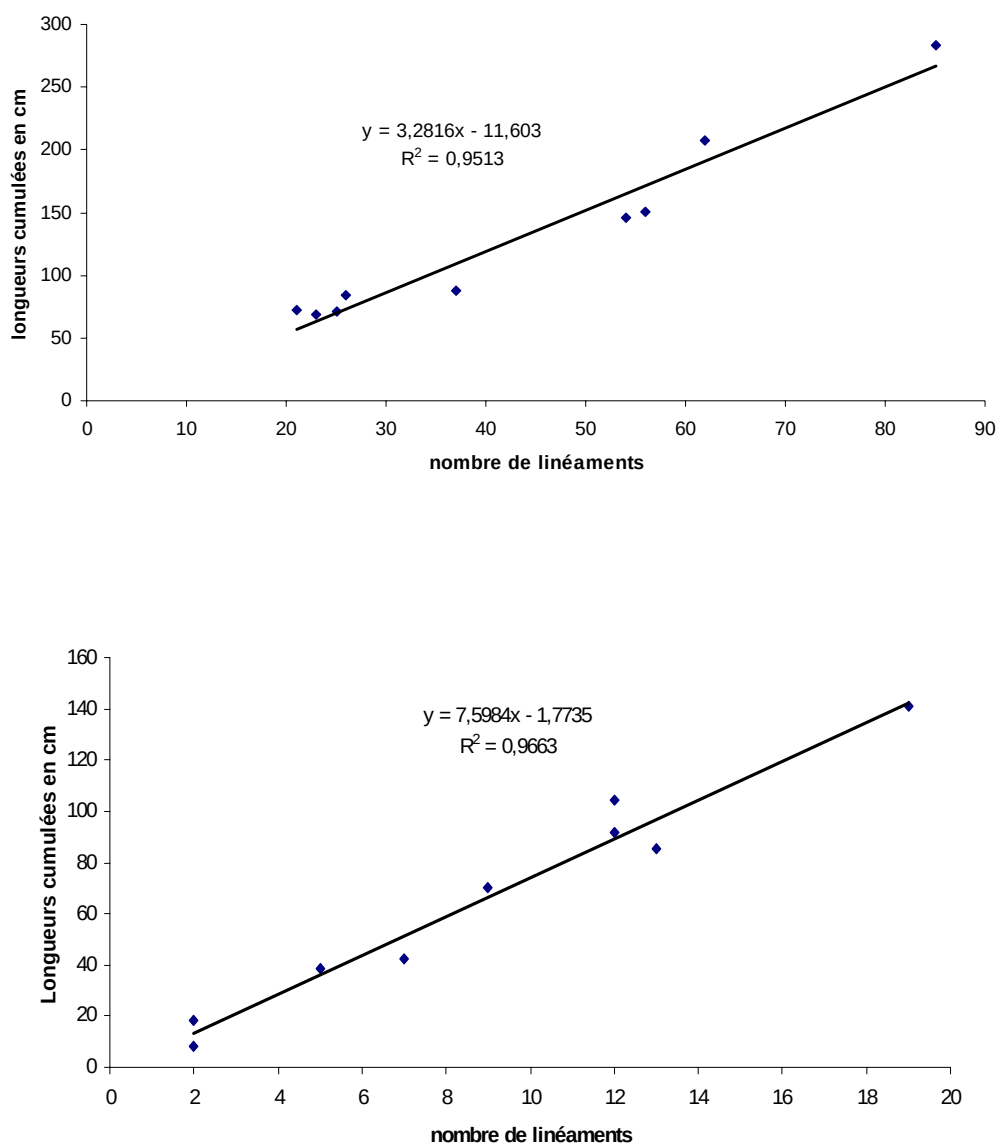


FIGURE 2.7 : Relation entre nombre de linéaments et les longueurs cumulées

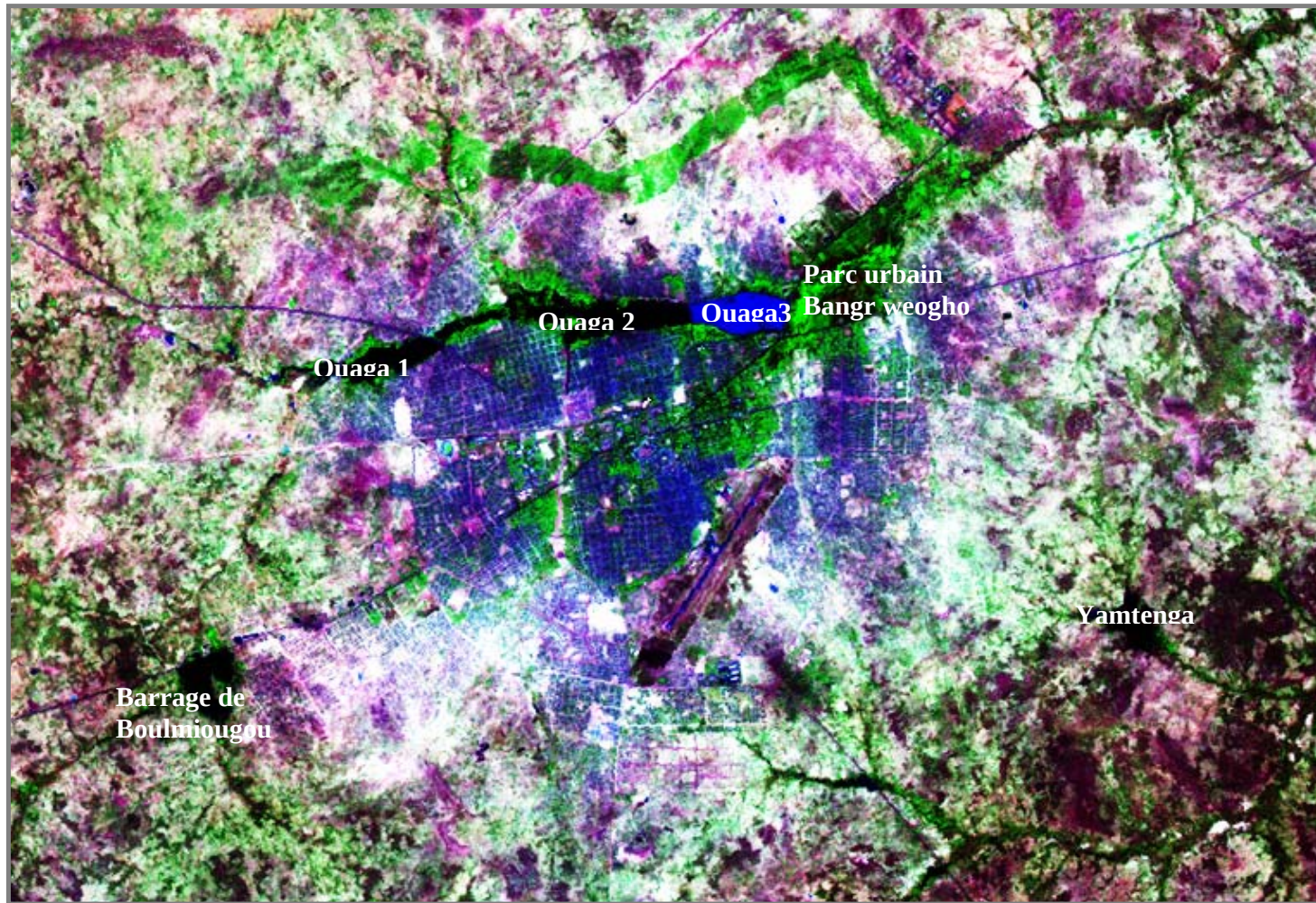


FIGURE 2.8 : ¹Image LANDSAT 1988 extrait de l'image 195/52 ; composition colorée RGB

¹ La couleur sombre de Ouaga1, Ouaga2, Boulmiougou et Yamtenga, représente des plans d'eau assez turbide ; tandis que la couleur bleue de Ouaga3 une eau moins turbide.

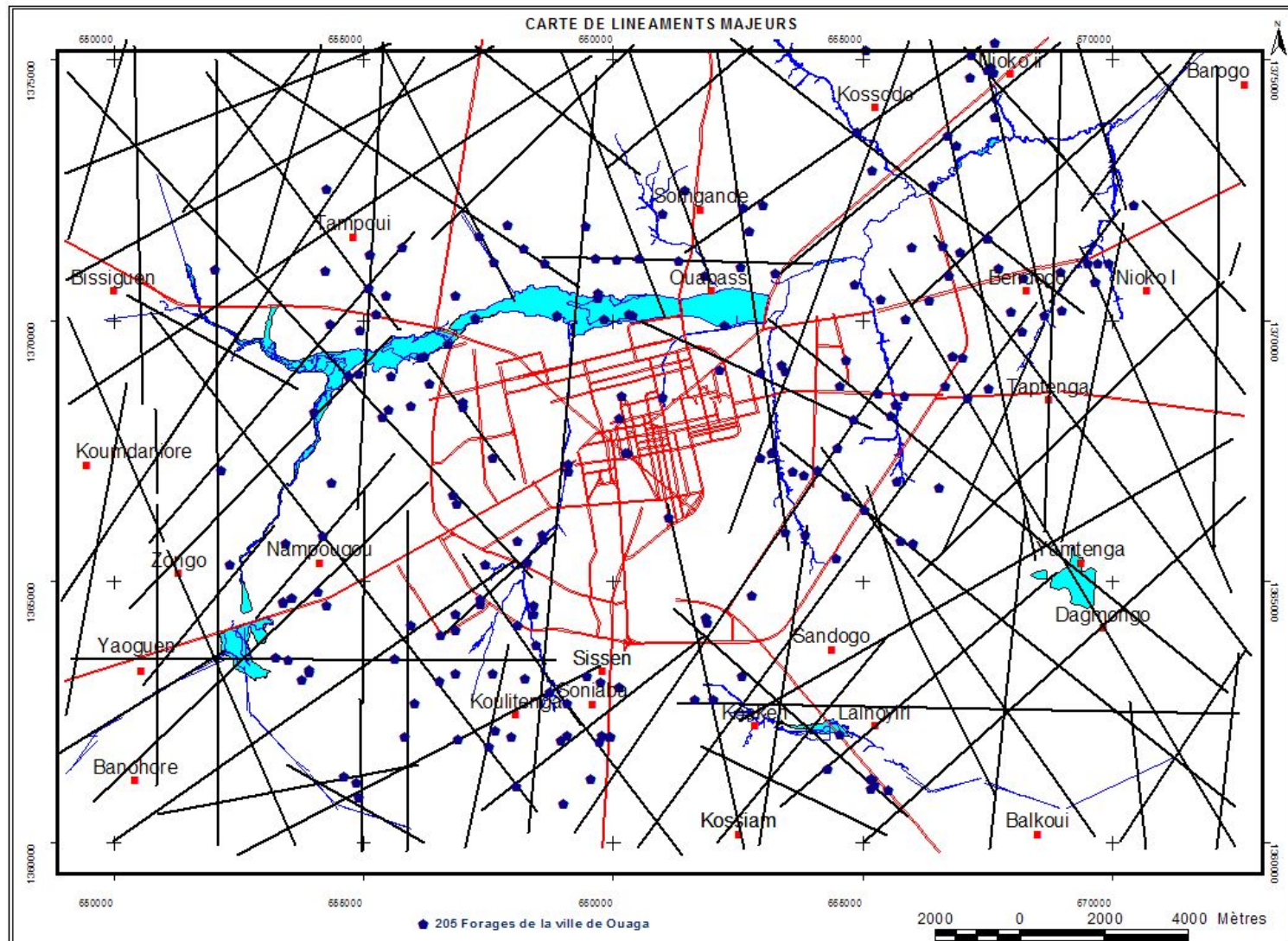


FIGURE 2.9 : Carte de linéaments à partir de l'image Landsat ci-dessous

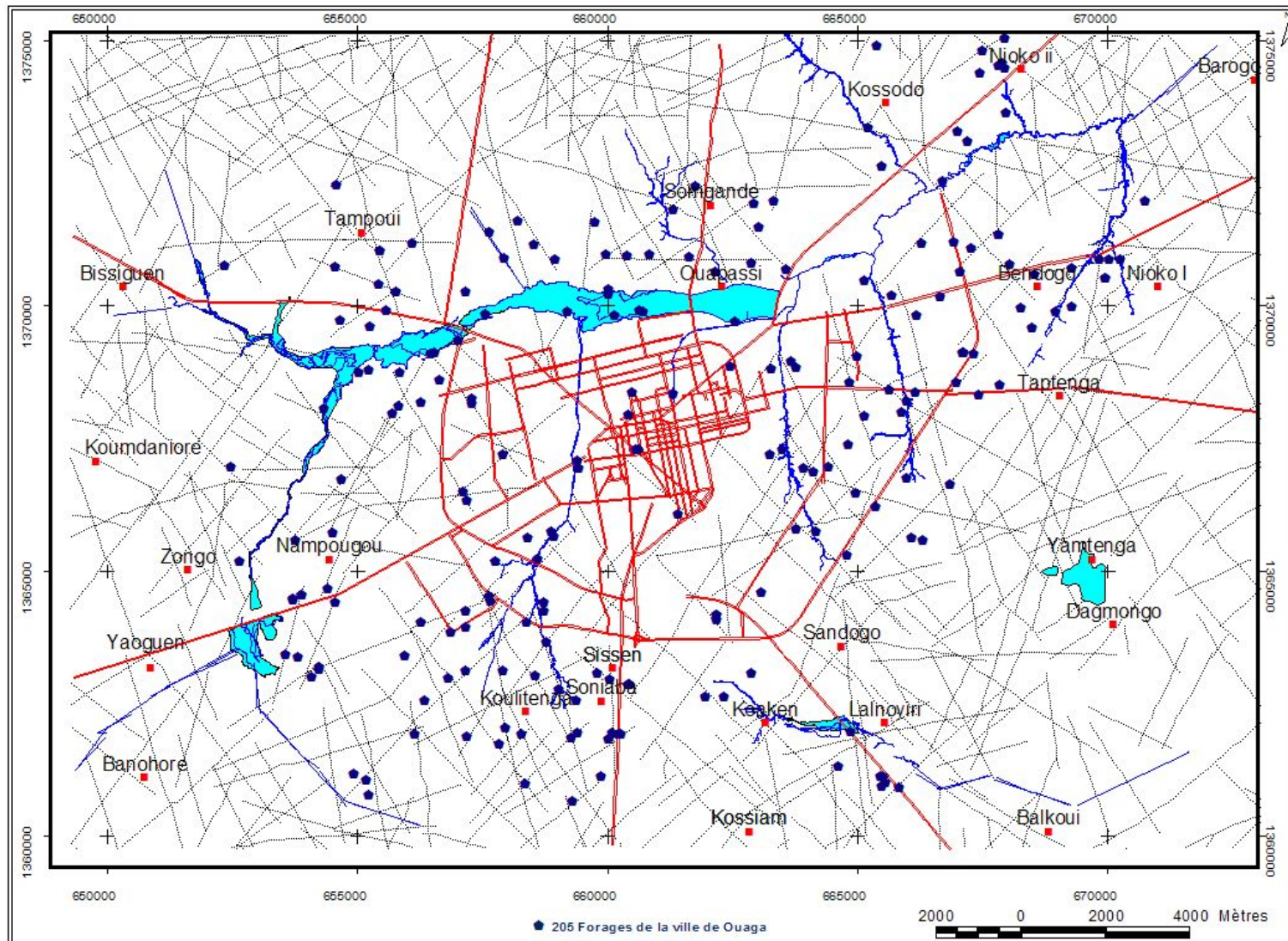


FIGURE 2.10 : Carte de linéaments de Ouagadougou à partir des photographies aériennes (les points représentent les forages positifs)

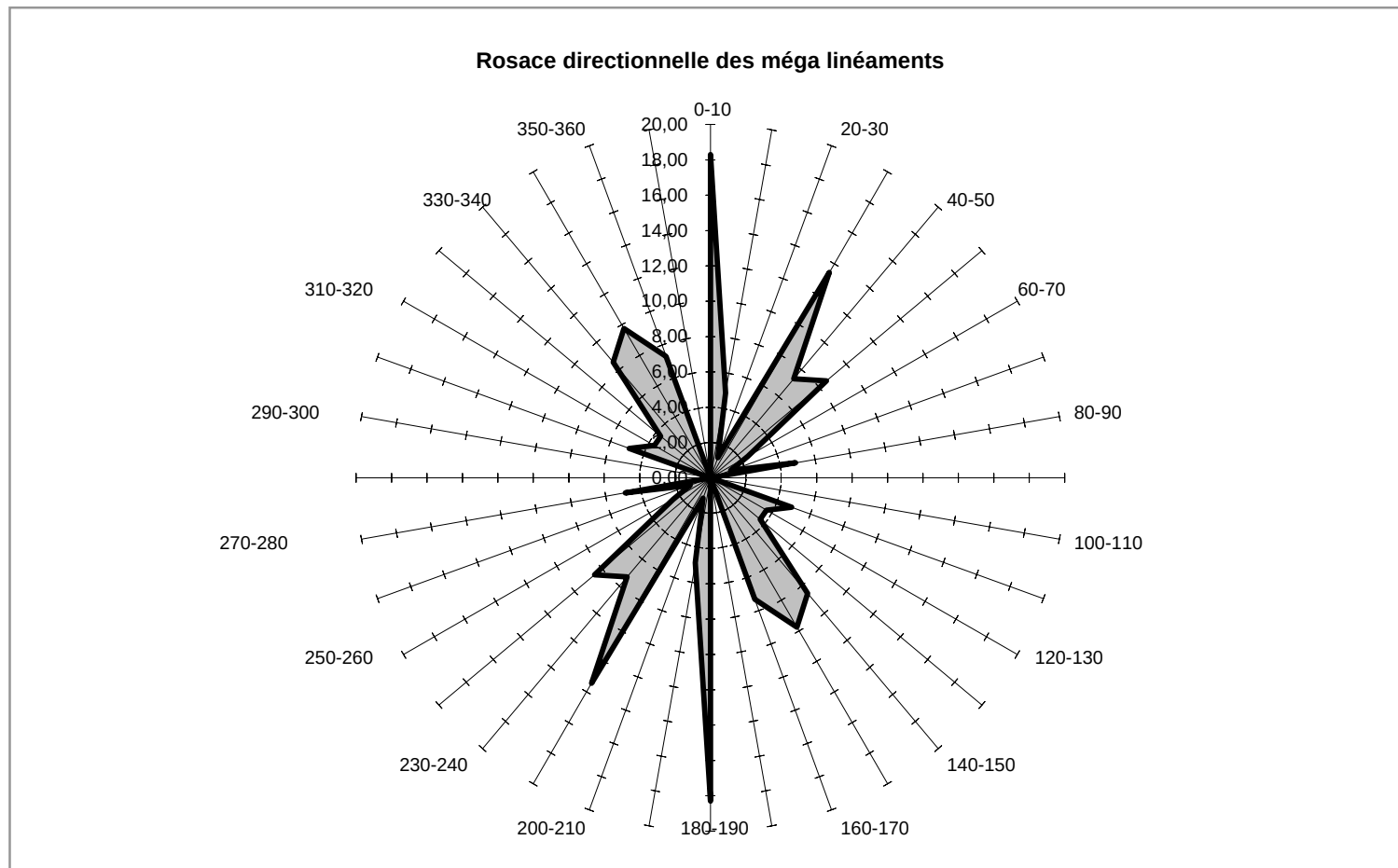
**a**

FIGURE 2.11 : Rosace directionnelle de linéaments relevés sur image (a)

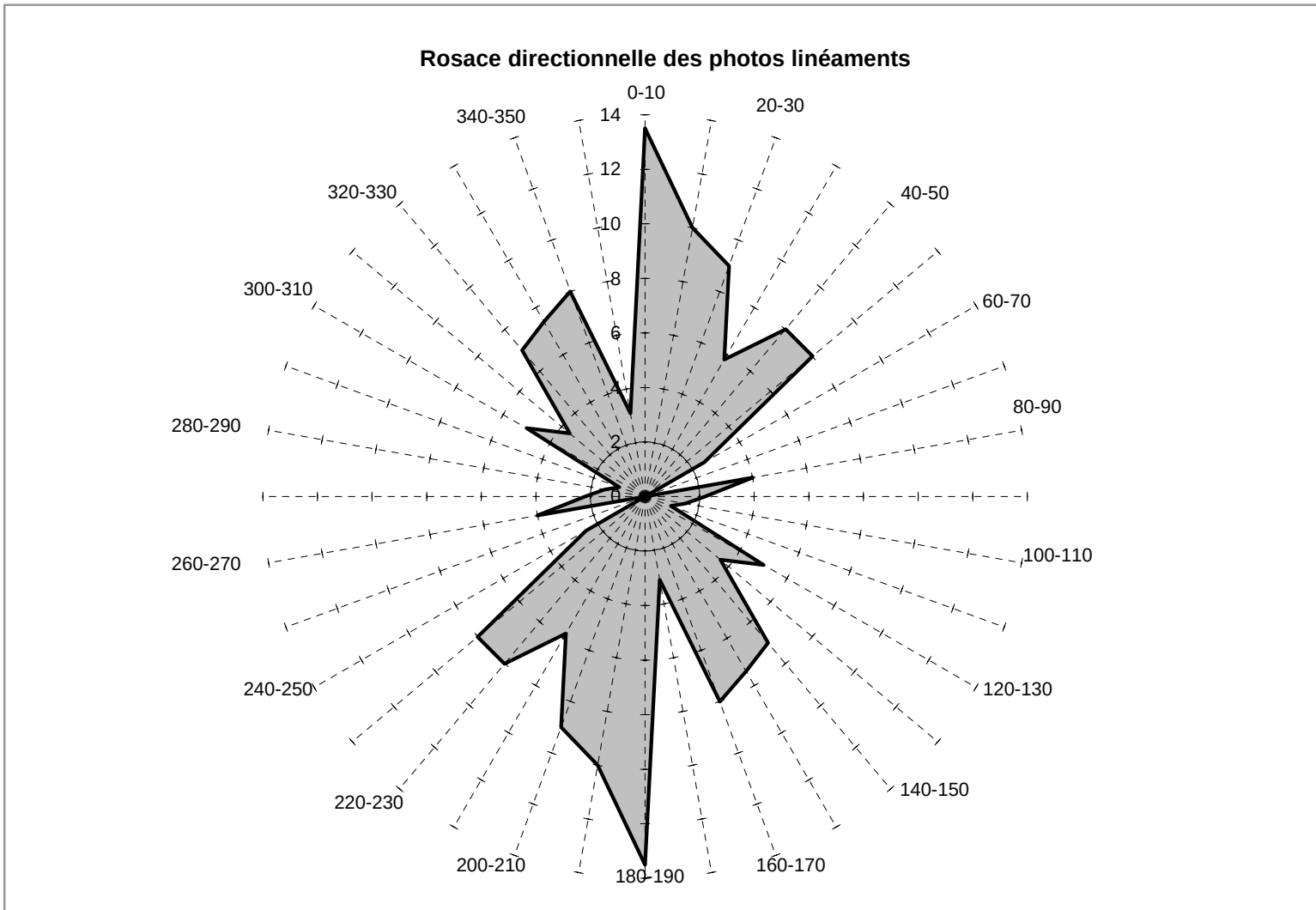
**b**

FIGURE 2.11 : Rosace directionnelle de linéaments relevés sur photographies aériennes (b)

II.4.2 - Les Cartes des linéaments

Les cartes de linéaments de la ville de Ouagadougou montrent que la région de Ouaga est bien fracturée et plusieurs intersections de linéaments sont présentes. Certaines des directions principales correspondent à celles du réseau hydrographique qui est donc orienté par la fracturation. L'exploitation de l'image satellitaire fait ressortir des fractures d'importance régionale. Statistiquement les directions N0°, N30° et N150° sont prédominantes au niveau des linéaments multi kilométriques.

La superposition entre les fractures relevées sur les photographies aériennes et celles relevées sur l'image satellitaire fait apparaître une assez bonne corrélation.

L'analyse directionnelle de toutes les fractures relevées montre qu'il existe trois familles principales de directions privilégiées. On distingue par ordre de fréquence et d'importance décroissante les directions suivantes :

- une famille avec N10° - 30° et N40° - 50° ;
- une famille avec N130° - 150° ;
- une famille N-S avec N0° - 10° peu marqué au niveau de l'image mais fréquente sur les photographies.

Ces directions sont conformes aux deux directions prédominantes de la phase orogénique majeure éburnéenne (2150-2100 Ma) qui a affecté toutes les formations géologiques du Burkina, notamment celles de la région de Ouagadougou.

On relève aussi quelques directions N80° - 90° très peu marquées.

Il est généralement conseillé de faire un contrôle par des relevés de terrain pour confirmer ou non l'existence des linéaments. Nous avons effectué quelques mesures sur le terrain qui concordent parfaitement avec les directions principales et celles des injections de filons de quartz et de pegmatite sur l'affleurement (carrière de Kanazoé) au Nord-ouest de la ville avec des directions entre N150° - N160° et N180°. Les plans de foliation et les rubanements épousent les directions imposées par la tectonique cassante.

La bonne connaissance du réseau de fracturation de la zone d'étude permet d'augmenter la précision des analyses et la fiabilité des prospections locales futures pour l'hydraulique urbaine.

La réussite d'un projet d'hydraulique villageoise ou urbaine est liée à la présence de fractures et à la bonne connaissance des directions qui doivent être privilégiées surtout quand elles se recoupent, car leur importance du point de vue hydrogéologique n'est plus à démontrer. Elles orientent les recherches futures sur le terrain et permettent également d'identifier les zones vulnérables à haut risque de pollution.

II.4.3 - Le rôle des différentes fractures

Dans le socle granitique de Ouagadougou la fracturation joue un rôle déterminant dans la circulation des eaux souterraines en profondeur. En analysant la distribution des forages dans le champ des fractures des deux cartes on remarque que :

- ⇒ Les filons qu'ils soient de pegmatites ou de quartz observés sur le terrain sont orientés E-O, N-S et NE-SO et NO-SE.
- ⇒ toutes les directions de fracturation n'ont probablement pas le même comportement hydraulique, les zones de fractures peuvent être des zones de drainage préférentiel des eaux et les zones les plus vulnérables.

Sur les figures 2.9 et 2.10, la plupart des forages surtout ceux positionnés sur les nœuds de fractures ont de bons débits :

- ⇒ treize (13) forages situés sur des nœuds de fractures débitent plus 40 m³/h et,
- ⇒ cent dix (110) ont un débit entre 10 et 40 m³/h.

Ces débits confirment le caractère important au sein du socle fissuré de la perméabilité induite par les fractures qui améliore les débits.

Avec le nombre assez élevé de forages (200) dont nous disposons une analyse statistique devra toutefois confirmer ces observations dans le volet hydrogéologie.

Dans la région de Ouagadougou les roches affleurent rarement et présentent des caractéristiques hydrogéologiques à porosité interstitielle faible ou nulle à l'état sain. Elles ne sont considérées comme aquifères que lorsqu'elles sont altérées ou fissurées ; et plus elles sont fissurées plus elles sont productives.

CHAPITRE III - CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

I - PRESENTATION GENERALE

I.1 - Hydrogéologie du Burkina

L'hydrogéologie du Burkina est à l'image de sa géologie.

Des études sur l'hydrogéologie de socle de différents auteurs, (Savadogo 1984 ; Galbane, 1991 ; Rogoto 1993, Schneider et Zunino 1994), ont permis de distinguer deux grands ensembles hydrogéologiques selon la géologie, la géomorphologie, l'hydrogéologie et les caractéristiques climatiques :

- ⇒ un ensemble constitué à 80% de formations cristallines et/ou métamorphiques imperméables. Cet ensemble est caractérisé par une faible épaisseur d'altération donc une potentialité hydraulique assez faible qui peut être localement améliorée par l'existence des réseaux de fractures ;
- ⇒ un ensemble à dominante gréseuse et dolomitique du bassin sédimentaire de Taoudéni. Ce dernier constitue un important aquifère continu dans l'Ouest et le Sud-ouest du pays. Les niveaux carbonatés de cet ensemble s'érigent en aquifère potentiel quand ils sont bien fissurés ou karstifiés.

I.2 - Hydrogéologie de socle cristallin

Cette étude concerne les nappes de socle cristallin fissuré/fracturé.

Ce concept de socle fracturé selon A.N. Savadogo 1984 caractérise un système bi couche constitué d'un recouvrement semi-perméable, le réservoir des altérites avec une bonne fonction capacitive et alimenté par la surface, surmontant un aquifère de fissures ou de fractures (socle au sens strict). Quant à Schneider et Zunino (1994) ils signalent le caractère libre des nappes des altérites et celui captif des aquifères de fissures.

Il faut aussi signaler le rôle très important des injections filoniennes et des zones de contact dans l'hydrogéologie de socle ancien. Les filons de quartz ou de pegmatite peuvent créer des discontinuités sous l'effet des contraintes postérieures à leur injection et assurer aussi un rôle de drain grâce à leur granulométrie souvent grossière.

I.2.1 – Essai de définition des types d'aquifères

I.2.1.1 - Aquifères superficiels

Ils sont constitués par les cuirasses latéritiques et les alluvions. La cuirasse est la partie la plus productive des horizons supérieurs des altérations (§ *paragraphe II.3.3*) quand elle est noyée. Ces

nappes sont captées par les puits traditionnels ou modernes à grand diamètre à faible profondeur (3 m à 15 m).

Le comblement alluvial des lits mineurs des marigots constitue un aquifère exploité par les puisards qui alimentent les riverains en eau. Mais ces ouvrages sont vite abandonnés pendant la saison des pluies à cause des phénomènes d'éboulement.

I.2.1.2 - Aquifères profonds

Ces aquifères doivent leur existence aux réseaux de fractures qui se sont développés au sein des formations compactes du socle lors de mouvements tectoniques. Les fractures sont suffisamment denses et ouvertes pour conduire et stocker l'eau. On distingue plusieurs niveaux plus ou moins aquifères mais principalement deux types sont répertoriés :

- ⇒ celui du socle altéré formé d'arènes très grossières et fluentes. Les arènes quand elles sont baignées d'eau forment un aquifère d'assez bonne fonction capacitive ;
- ⇒ celui du socle fissuré surmontant le substratum sain. Cet aquifère provient de la désagrégation du socle sain sous l'effet des contraintes tectoniques ayant affecté la zone. Cet aquifère assure une fonction drainante.

I.2.1.3 - Schéma du gisement des eaux souterraines

On peut dire en résumé qu'il y a trois types aquifères identifiés ; la figure 3.1 (Savado 1984) illustre la succession de ces aquifères de socle. Il s'agit de l'aquifère des cuirasses et des alluvions dont l'épaisseur moyenne varie entre 3 et 10 m, celui des arènes grenues et fluentes entre 10 et 35 m parfois 40, et celui du socle fissuré ou fracturé de 35 à 60 m en fonction des zones et de la lithologie de la roche mère.

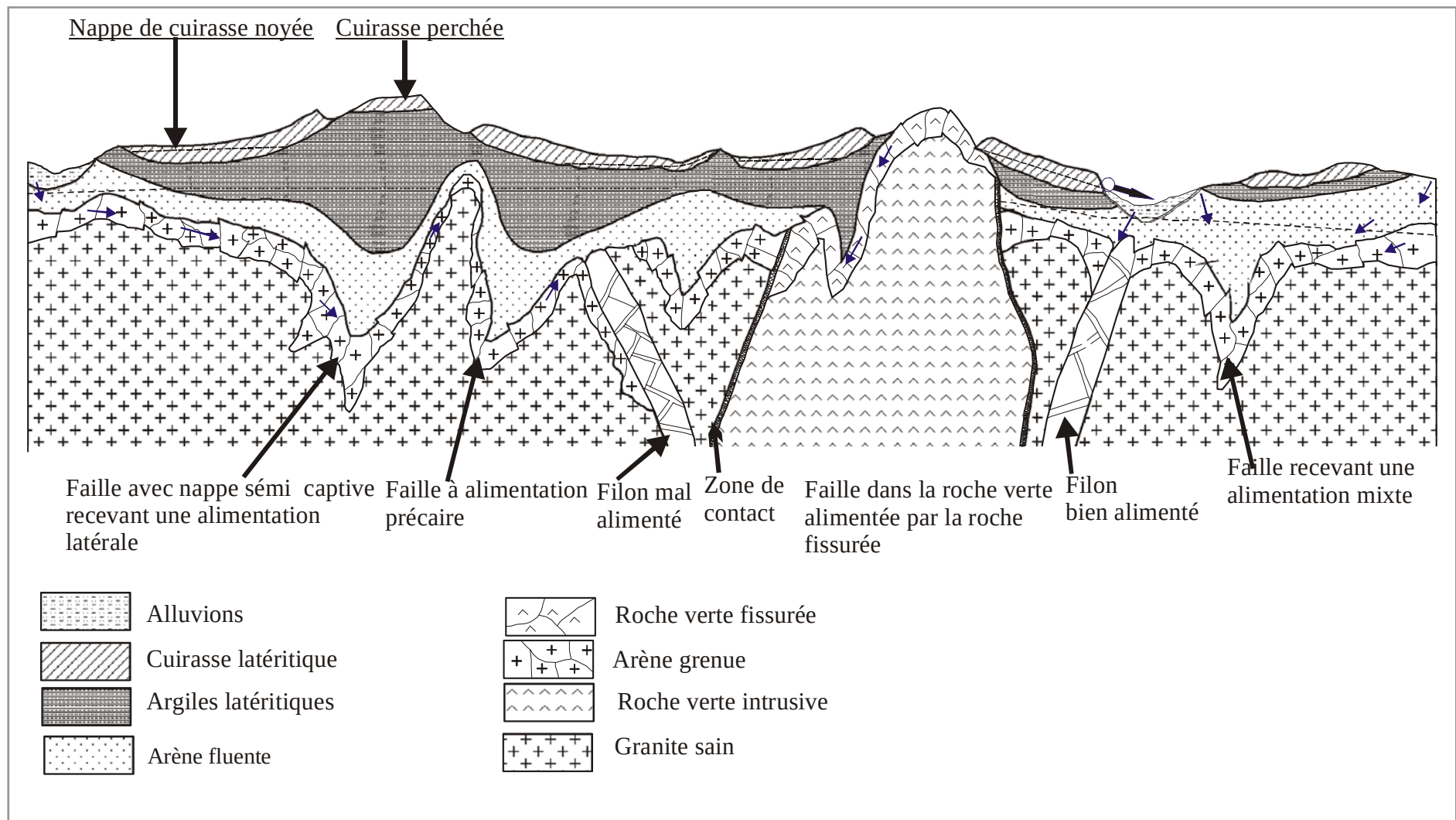


FIGURE 3.1 : Schéma de gisement des eaux souterraines de socle (d'après A.N. Savadogo 1984)

II - HYDROGÉOLOGIE DU SOCLE DE OUAGADOUGOU

II.1 - Caractéristiques Hydrogéologiques des aquifères de Ouagadougou

Dans ce paragraphe, sont utilisées les coupes de forages (log-type de forages) ayant fait l'objet de prospections géophysiques avant leur implantation, pour décrire les différents aquifères superposés d'une part, les paramètres hydrogéologiques et hydrodynamiques intervenant dans le fonctionnement de ces aquifères d'autre part. Les détails sur les coupes sont en annexes.

II.1.1 - Description des systèmes aquifères du socle cristallin de Ouagadougou d'après les forages

Les logs type de forages (*figure 3.2*) confirment les observations géologiques sur la région de Ouagadougou essentiellement constituée de formations à dominante granitoïde injectés de filon de quartz et de pegmatite. A différents degrés, les faciès sont altérés avec une composante argileuse qui confère au manteau d'altération une épaisseur variant de 0 à 40 mètres, et une faible perméabilité.

Les coupes de forages mettent en évidence trois horizons aquifères superposés et précisent leurs caractéristiques lithologiques de haut en bas :

- ⇒ les horizons superficiels des altérites constitués par le recouvrement quaternaire (argile grise, latérites, et cuirasse latéritique) et les arènes argileuses fines. Ils sont exploités par des puits à grand diamètre et des puisards. Ce sont des nappes à surface libre, donnant dans la majorité des cas des ressources en eaux souterraines temporaires. Comme vu précédemment, ces aquifères sont très influencés par les aléas climatiques et avec l'urbanisation de nos jours ils présentent moins d'intérêt car ils deviennent très vulnérables à la pollution à cause des contaminations de leurs eaux peu profondes (3 à 15 mètres) ;
- ⇒ la frange sous-jacente formée d'arènes très fluentes et grenues résultant de l'altération de la roche originelle. Du fait de sa dominante argileuse, cet horizon se caractérise par une porosité d'interstice significative et une perméabilité relativement faible. Lorsqu'il est saturé il assure une bonne capacité de stockage des eaux souterraines au sein du système aquifère ;
- ⇒ le socle fissuré. Il est constitué de granite affecté sur une épaisseur de plusieurs dizaines de mètres par des fissures et injecté de filons de pegmatite qui augmentent sa productivité. 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 niveaux plus ou moins aquifères mais généralement deux nappes :

- celle supérieure avec la cuirasse quand elle est noyée ;
- celle inférieure regroupant les arènes et la roche fissurée soit deux horizons aquifères qui se différencient par leur comportement hydrodynamique : un horizon supérieur capacitif celui des altérites et un horizon inférieur transmissif celui du socle fissuré. Les forages de Ouagadougou captent ces deux derniers horizons.

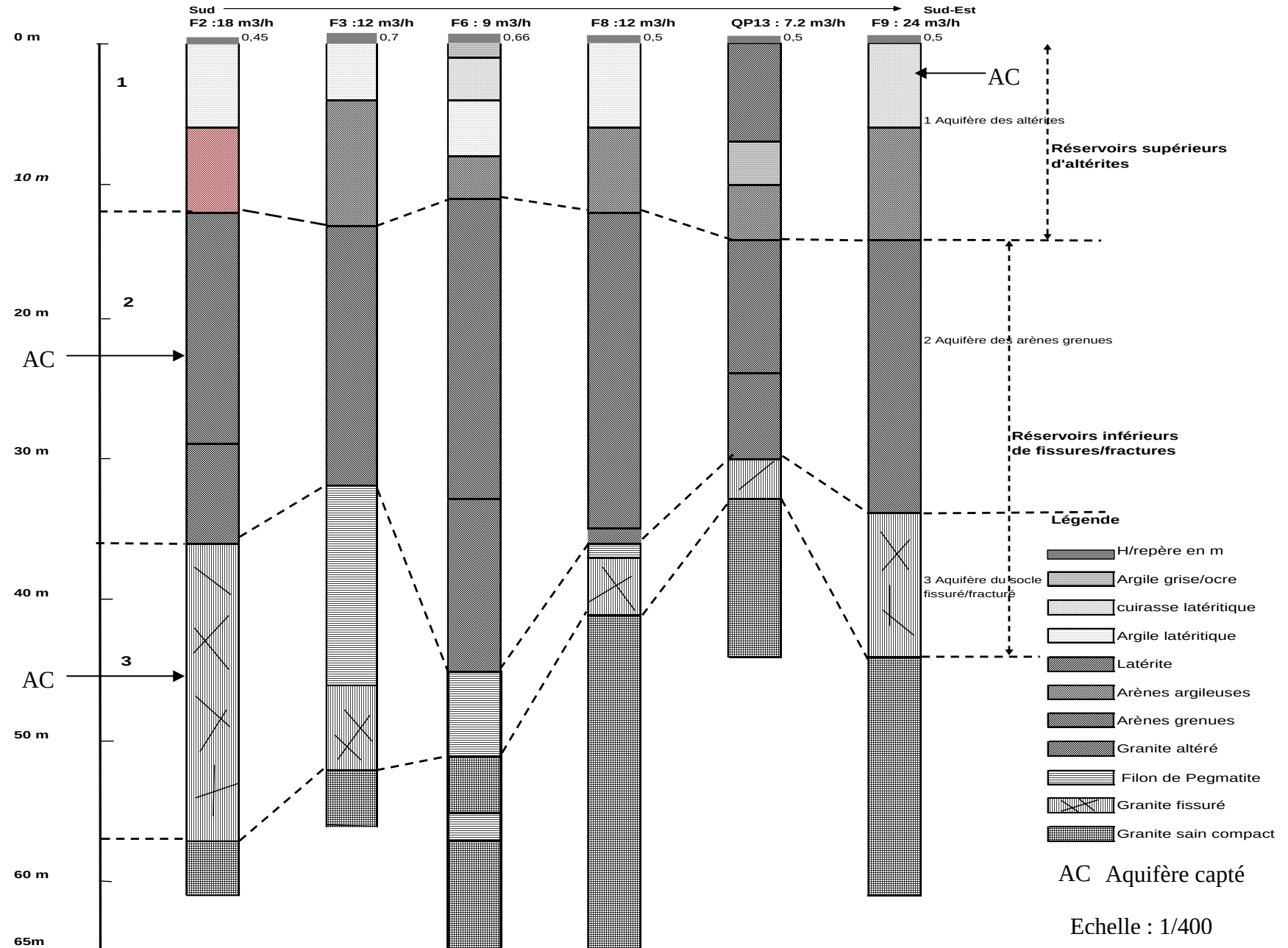


FIGURE 3.2 : Coupes types de forages avec corrélations litho stratigraphiques

II.2. - Les caractéristiques des forages et épaisseurs des altérites des systèmes aquifères du socle

Dans le cadre de ce travail, il n'a pas été possible de réaliser des essais de pompages pour déterminer les transmissivités, perméabilités, et coefficients d'emménagement. Nous avons utilisé les résultats de plusieurs campagnes d'hydraulique urbaine comportant au total 200 forages effectués dans la zone d'étude.

A partir de l'analyse de ces données, 3 cartes interprétatives et une étude statistique des paramètres hydrogéologiques intervenant dans le fonctionnement des aquifères ont été réalisées. L'analyse statistique montre des relations entre les paramètres hydrogéologiques et la lithologie. Les profondeurs totales, les débits, les profondeurs des niveaux statiques dans les forages, les épaisseurs d'altérations sont sur le tableau 3.1.

TABLEAU 3.1 : Paramètres hydrogéologiques des forages de Ouagadougou (aquifère profond)

Variables	Nombre	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Ecart type	CV%
Prof Totale T (m)	196	32,47	79,42	56,27	56,00	10,36	18,42
Débit de foration Q (m ³ /h)	196	2,30	48,80	13,16	10,00	9,14	69,50
Débit essai air lift Q (m ³ /h/m)	112	1,20	34,60	9,12	8,20	5,18	56,79
Epaisseur d'alt EA (m)	196	9,00	60,82	30,32	29,37	9,51	31,35
Epaisseur d'alt Sat EAS (m)	196	0,59	44,72	16,83	15,50	8,98	53,35
Transmissivité T (m ² /s)	107	2,90E-05	6,46E-03	5,86E-04	4,80E-04	4,80E-04	119,61
Perméabilité K m/s	15	0,12E-05	2,78E-04	5,2E-05	2,3E-05	7,2E-05	0,3E-03
Coefficient d'emmag S %	5	1,00E-03	1,00E-01	4,06E-02	1,00E-03	5,42E-02	2,20E-05

II.2.1 - La profondeur totale des forages

De manière générale tous les forages de la zone d'étude atteignent le socle sain (*coupes de forages à la figure 3.2*).

La productivité d'un forage est à la fois liée à la densité et à la nature de la fissuration et à l'épaisseur de la frange fissurée. Ainsi, au-delà d'une certaine profondeur, les fissures se referment ou deviennent rares. L'histogramme de distribution (*figure 3.3*) présente les résultats.

Les valeurs moyennes arithmétiques et la médiane des profondeurs totales sont respectivement de 56,3 m, et de 56 m et l'écart type de 10,4 m ; 64 % des forages ont une profondeur entre 32,5 à 79,4 m, et 11 % ont une profondeur entre 70 et 80 m.

En considérant l'écart type d'environ 10 m et la médiane 56 m, on peut dire que les bons débits sont générés entre 46 et 66 m de profondeur. Généralement, la dernière venue d'eau représente la

profondeur à partir de laquelle le plus souvent les fractures se referment. Environ 17 % des forages dépassent 66 m de profondeur et malgré cela leur débits restent inférieurs à $10 \text{ m}^3/\text{h}$.

D'après A. N. Savadogo, 1984 les grandes profondeurs ne garantissent pas toujours une grande productivité des ouvrages ce qui concorde parfaitement avec l'observation faite par des études plus récentes en Ouganda sur la perméabilité de fractures des aquifères du socle (Howard et al, 2004) qui ont montré qu'aucune zone fracturée présentant une perméabilité meilleure que 10^{-5} m/s n'a été trouvée au-dessous de 57 m. Ceci permet de supposer que la base réelle de l'aquifère est à environ 60 m sous la surface du sol.

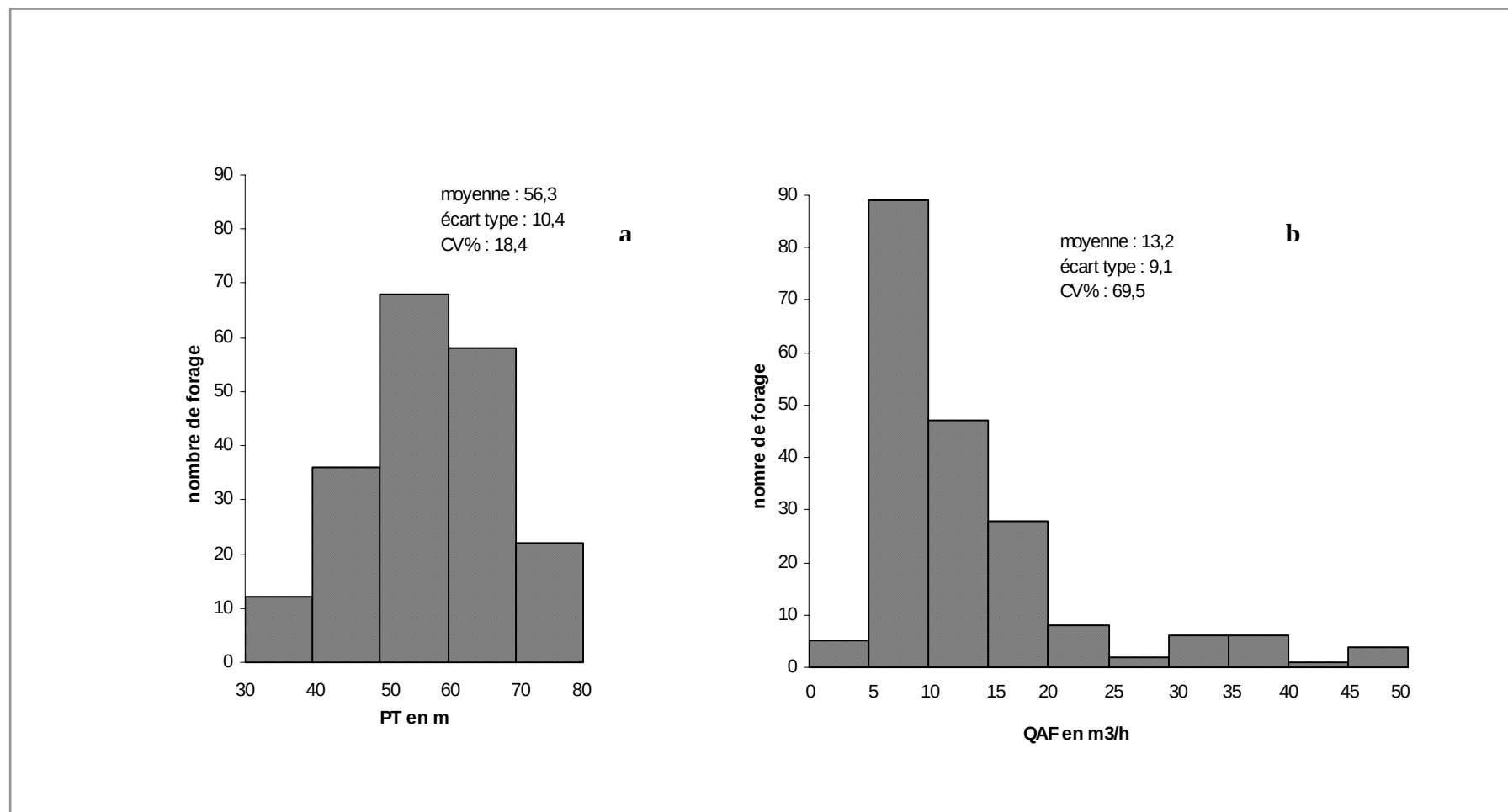


FIGURE 3.3 : Histogramme de distribution des profondeurs et débits de forages du socle de Ouagadougou (PT : Profondeur Totale, QAF : Q débit de foration)

II.2.2 - Le débit des forages : Relation entre profondeur et débit.

Les débits au moment de l'exécution des forages sont bons dans l'ensemble. La valeur moyenne est de 13.2 m³/h avec un écart type de 9.1. Le coefficient de variation de 70 % montre une forte variabilité du débit qui est fonction de plusieurs paramètres dont la nature pétrographique des roches, l'épaisseur d'altération et la densité de fracturation à petite échelle qui influence la perméabilité donc la productivité des forages. La distribution de la productivité révèle la prépondérance des débits supérieurs à 10 m³/h.

L'histogramme de distribution fréquentielle (*figure 3.3*) montre que 89 forages ont un débit qui varie entre 5 et 10 m³/h, (soit 45 %) alors que 102 forages ont un débit supérieur à 10 m³/h, (soit 52 %) et 30 % de forages ont des débits supérieurs à 15m³/h **traduisent une productivité sortant de l'ordinaire pour ce type de milieu. Les forages ayant un débit > 35 m³/h correspondent à des forages implantés sur des fractures ou des nœuds de fractures d'envergure régionale d'orientation NE-SO /NO-SE et N-S (§ carte de fracturations à la figure 3.4).**

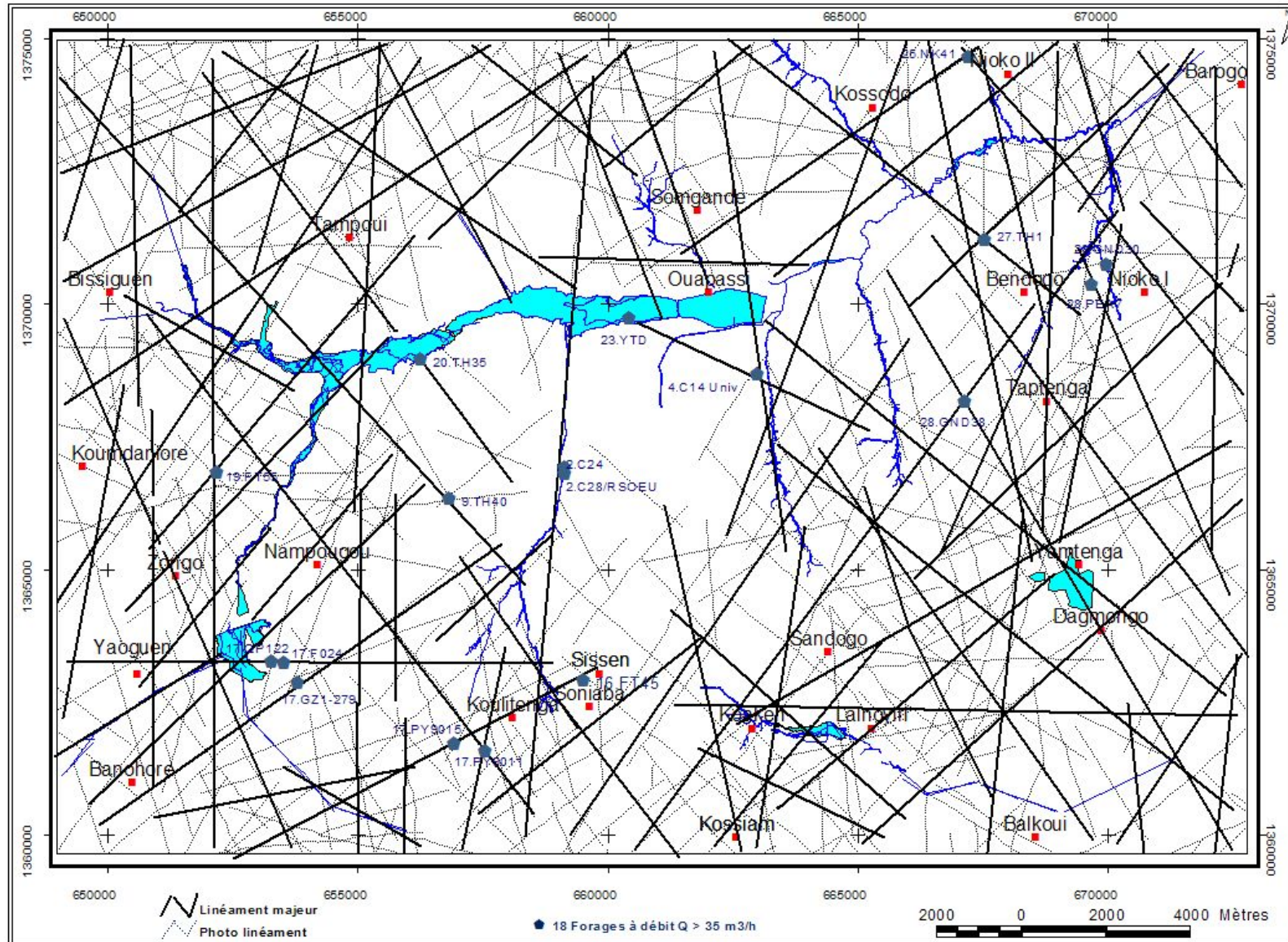


FIGURE 3.4 : Carte de fracturation avec 18 forages à débits $Q > 35 \text{ m}^3/\text{h}$.

En comparant les profondeurs et les débits (*figure 3.5*) on remarque qu'il n'existe pas de relation linéaire entre ces deux paramètres. Par exemple sur la figure 3.5 et sur la carte de fracturation on peut citer deux forages (17PY9011 et 17PY9416) exploitant des nœuds de deux fractures d'envergure régionale, qui débitent respectivement 43 m³/h et 32 m³/h alors que leurs profondeurs augmentent de 55.35 m à 63.24 m pour le second. Ceci confirme que les meilleurs débits sont générés entre 46 m et 66 m de profondeur. Ce sont les forages situés à l'intérieur du cercle qui représentent 67 % de l'ensemble.

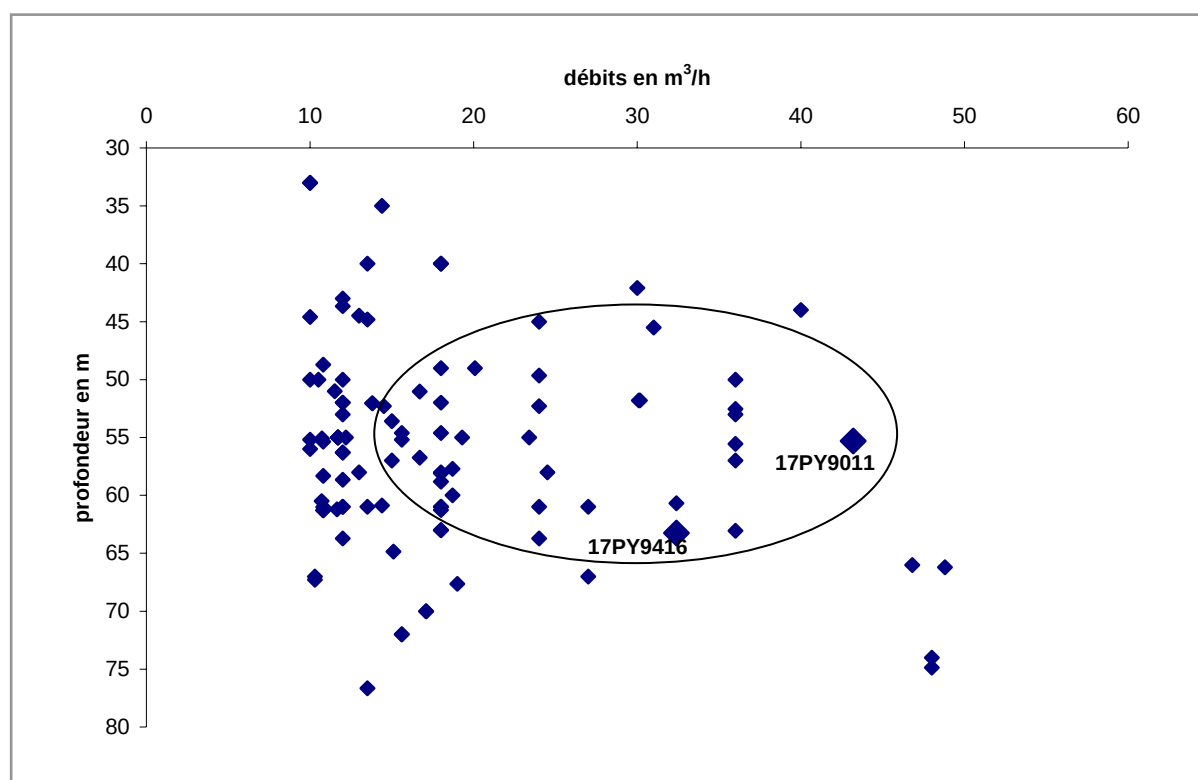


FIGURE 3.5 : Relation profondeur et débit des forages. Socle de Ouagadougou

II.2.3 - Les épaisseurs d'altération totale

La nature et l'épaisseur des produits d'altération sont déterminées par la lithologie de la roche mère, les conditions climatiques et l'intensité de la fracturation. Les altérations dans ce contexte d'étude sont à dominante argileuse poreuse mais peu perméable.

L'épaisseur moyenne d'altération totale est de 30.3 m et l'écart type de 9.5 (*figure 3.6*). Les altérations dont l'épaisseur dépasse 10 m peuvent constituer des ressources aquifères, les tranches d'altérites comprises entre 15 et 40 m ont les meilleurs débits alors que les recouvrements dont l'épaisseur dépasse les 45 m sont à dominante argileuse et entraînent des débits insignifiants voire nuls.

II.2.4 - Les épaisseurs d'altérations saturées : Relation entre épaisseur d'altération saturée et épaisseur d'altération totale

L'altération saturée constitue la composante non négligeable des altérites totales dont elle est la tranche mouillée. L'analyse statistique montre que la frange d'altération saturée représente en valeur absolue 40 % de l'épaisseur d'altération totale et il faudra au minimum 10 m d'épaisseur d'altérations saturées pour avoir des débits significatifs. L'épaisseur d'altération saturée est une fonction linéaire de l'épaisseur d'altération totale (*figure 3.7*).

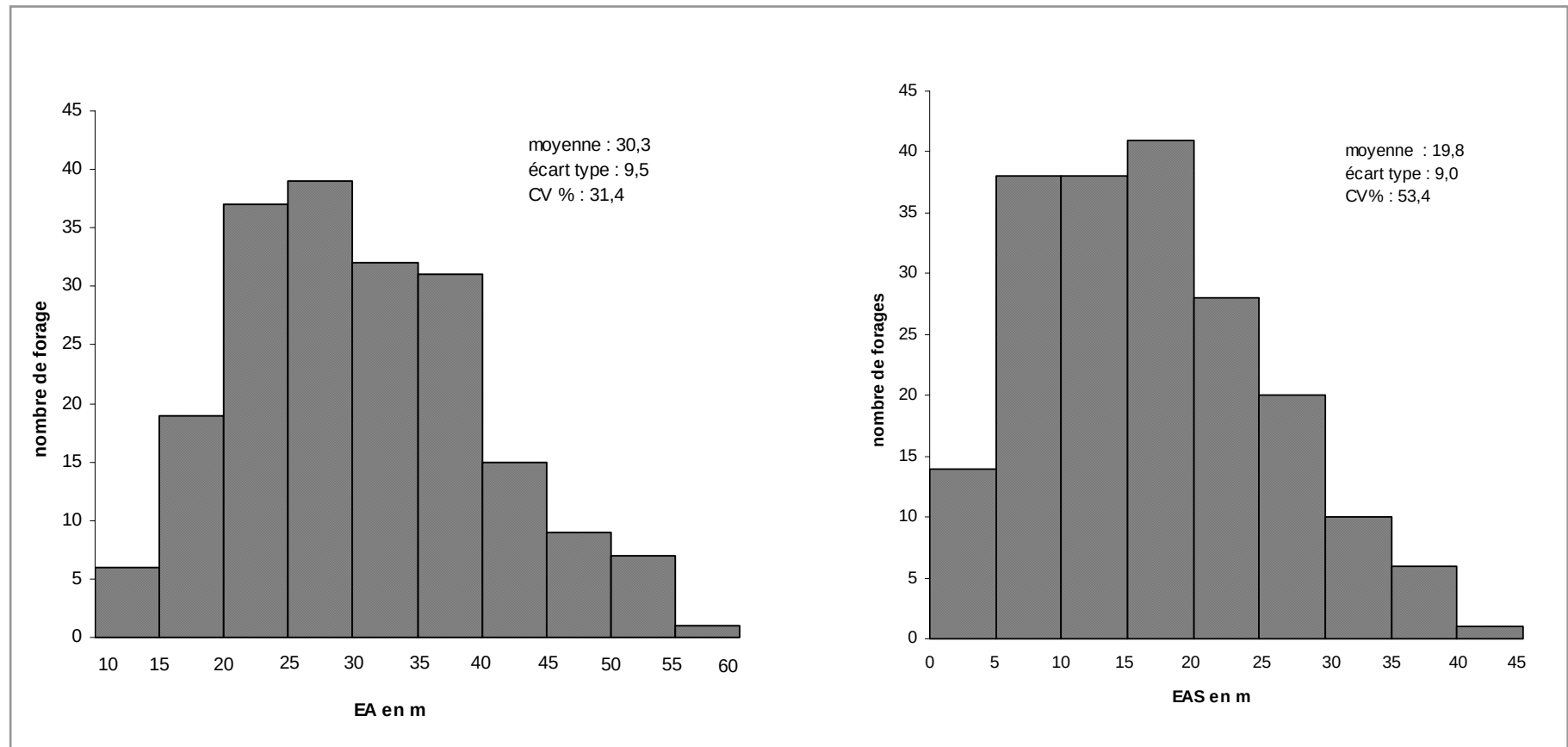


FIGURE 3.6 : Histogramme de fréquence des profondeurs des altérations / et altérations saturées ; EA : épaisseur d'altérations ; EAS : épaisseur d'altérations saturées

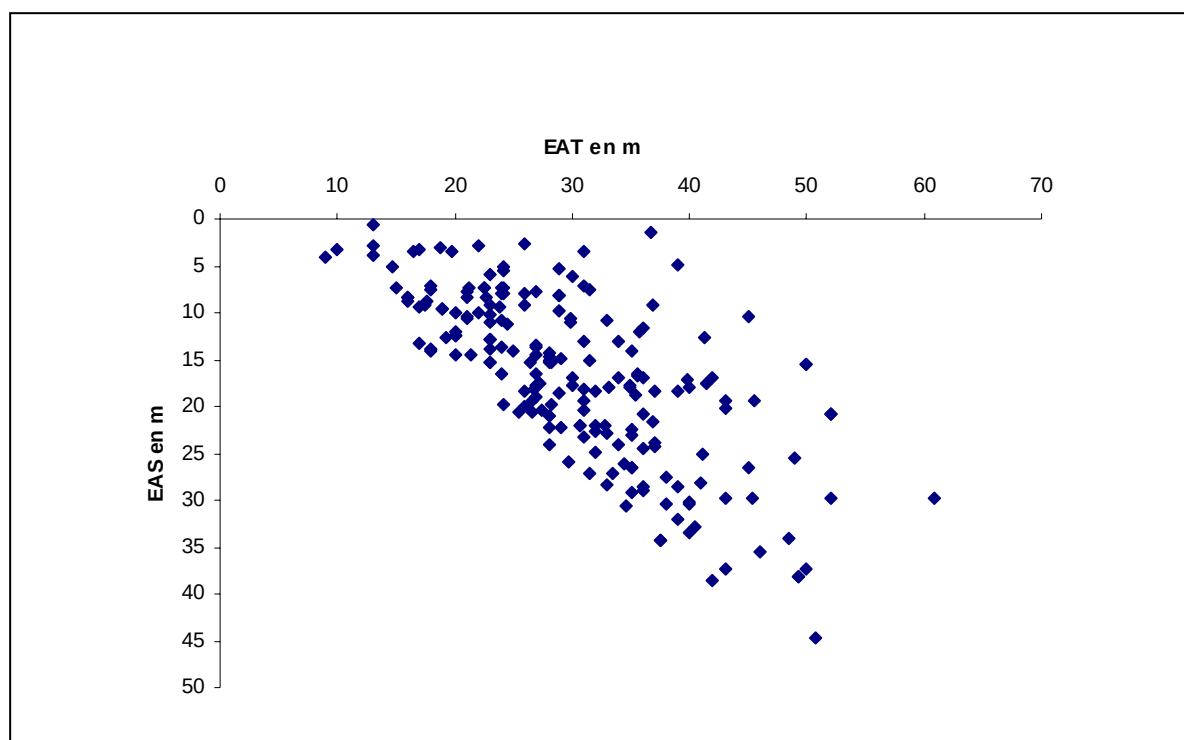


FIGURE 3.7 : Relation entre épaisseur d'altérations saturées et épaisseur d'altération totale

Une carte des épaisseurs d'altérations saturées, a été réalisée avec le logiciel surfer par la méthode d'interpolation pour apprécier leur variabilité spatiale ainsi qu'une carte du toit du socle pour en apprécier sa topographie.

La carte des altérations mouillées permet sur la base d'une approche géologique croisée avec les résultats de la carte du toit du socle et les observations hydrogéologiques, d'identifier des secteurs très favorables et d'autres moins favorables du point de vue des ressources en eau. Les épaisseurs les plus importantes sont dans les zones en bordure des barrages et des bas fonds où elles dépassent 25 m (*figure 3.8*), à l'Est et à l'Ouest du centre de la ville où elles dépassent 30 m et enfin au Sud-Ouest et Sud-Est avec 25 m à Sissen, kouritenga, Soniaba et Guensen. Les potentialités en eau des aquifères semblent bonnes dans ces zones et les forages implantés ont des très bons débits.

On remarque qu'il s'en dégage des directions (*tiré sur la figure 3.8*) qu'on pourrait comparer à celles des méga fractures de l'imagerie satellitaire. Elles correspondent parfaitement aux directions des failles d'envergure régionale.

Les zones où la surface du socle affleure (*figure 3.9*) sont considérées comme des zones à faibles potentialité hydraulique. Elles sont dans les secteurs où le socle sain est sub-affleurant et les forages y ont des débits faibles à très faibles.



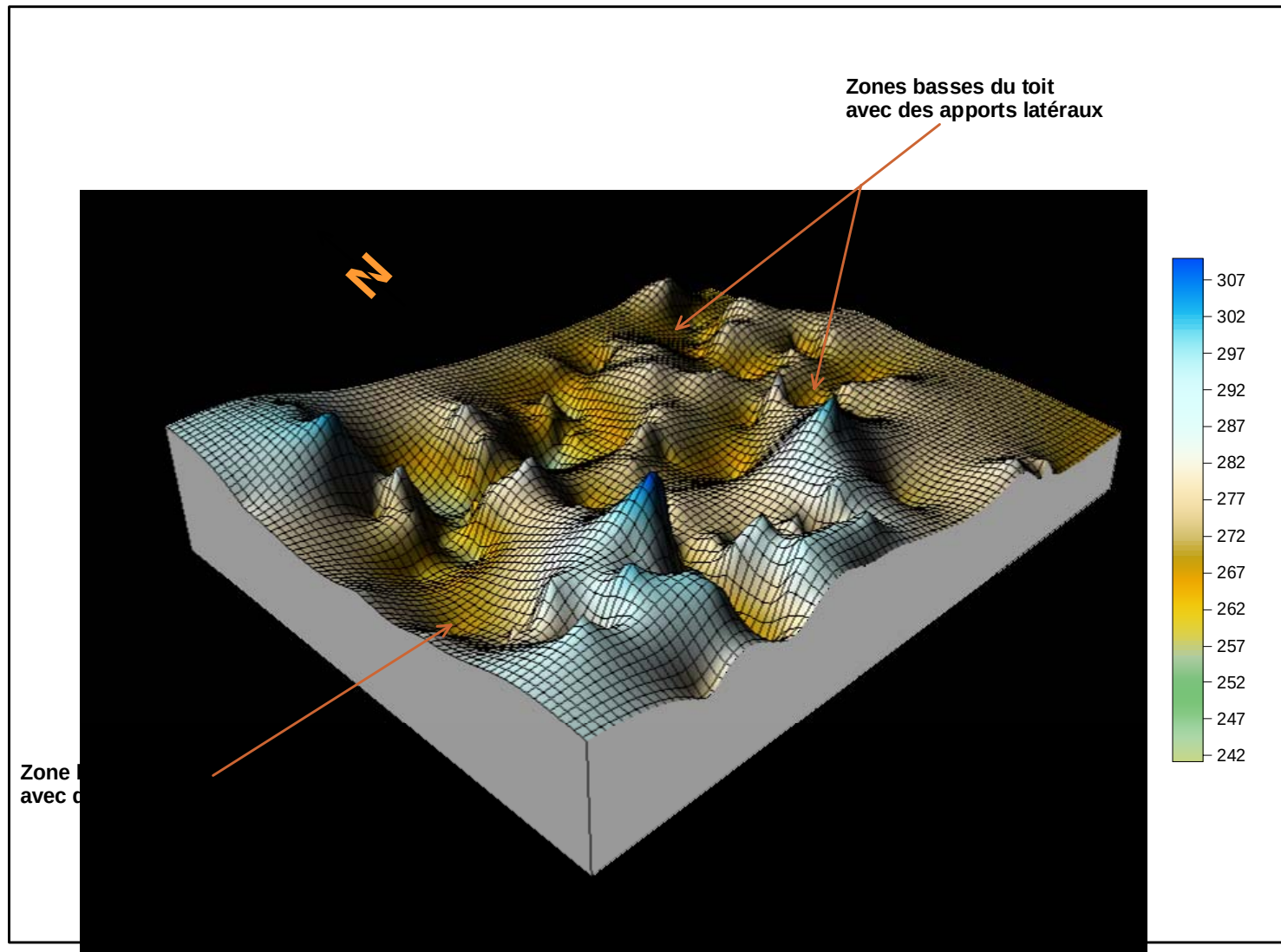


FIGURE 3.9 : Bloc diagramme montrant la morphologie du toit du socle de l'agglomération de Ouagadougou (à partir des données des 205 forages)

II.3 - Les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères de Ouagadougou

Il existe peu de données relatives à la perméabilité et au coefficient d'emménagement des aquifères de Ouagadougou car les essais de nappe (pompages longue durée de plusieurs jours) qui permettent de déterminer la perméabilité et le coefficient d'emménagement, lorsque l'on peut faire des mesures de rabattement sur un piézomètre proche du puits de pompage sont peu nombreux.

Les valeurs de transmissivité ont été déterminées à partir de pompages d'essai de durée allant de 24 heures à 60 heures et quelques rares fois 72 heures, par la méthode de THEIS qui assimile l'aquifère à un milieu poreux et homogène. Par ailleurs, ces paramètres sont fortement influencés par les épaisseurs crépines.

Les résultats des mesures présentes dans le tableau 3.1 montrent que :

II.3.1 - La transmissivité

Les valeurs de la transmissivité sont dans l'ensemble assez bonnes. Elle a été calculée à partir des essais de nappe et varie entre $2,90 \cdot 10^{-5}$ et $6,46 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. La valeur moyenne est de $5,86 \cdot 10^{-4}$ avec un écart type de $4,80 \cdot 10^{-4}$. Elles traduisent la bonne qualité des propriétés conductrices du socle dans la région de Ouagadougou particulièrement au Nord-ouest de la ville (*figure 3.10*). Si selon Milville, (1990), elles ne sont pas en toutes logiques représentatives d'un domaine aquifère peu fracturé de perméabilité généralement comprises entre de 10^{-7} et 10^{-6} m/s , il conviendrait de signaler que tous les forages étudiés ici ont été implantés par prospection géophysique sur les meilleures fractures de leur zone. Leurs caractéristiques sont celles des failles et non celles du milieu fissuré dans son ensemble.

II.3.2 - Le coefficient d'emménagement

Les coefficients d'emménagement ont été déterminés à partir de très peu d'observations piézométriques (5) et caractérisent la porosité efficace de l'aquifère. Ils varient entre $1,00 \cdot 10^{-3}$ et $1,00 \cdot 10^{-1}$. Leur valeur moyenne est de $4,06 \cdot 10^{-2}$. Ces coefficients d'emménagement sont relativement forts et sont probablement influencés par les horizons des arènes grenues. Par ailleurs selon Compaoré, (1997) ils constituent dans le cas présent un bon moyen de vérification de l'existence de drainage entre les aquifères superposés altérites/socle et montrent aussi que l'on se trouve dans un milieu semi-captif non confiné.

II.3.3 - La perméabilité

La perméabilité des terrains est calculée à partir d'essai de nappe allant de 48 à 72 heures. Elle est assez bonne elle est de l'ordre de 10^{-5} m/s . Elle varie entre $1,2 \cdot 10^{-5}$ et $2,78 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$. la valeur moyenne est de $5,2 \cdot 10^{-5}$. Les valeurs varient selon les forages et aussi selon les méthodes utilisées lors de l'interprétation des essais de pompage.

II.3.4 - Les débits spécifiques

Enfin les débits d'exploitation sont les débits qui stabilisent le niveau dynamique 2 à 3 m au dessus du niveau dynamique maximum (rapport ANTEA 1995). Ils sont préconisés à la fin d'essais de pompage longue durée et constituent des débits minimums garantis sur 7 à 8 mois d'exploitation que dure la saison sèche sans la réalimentation de la nappe aquifère, à raison de 10 à 12 heures de pompage par jour (pour les forages exploités par l'ONEA) et 20 heures par jour pour les autres forages. Ces débits varient entre 1.20 et 34.60 m³/h/m avec une moyenne de 9.12 m³/h/m.

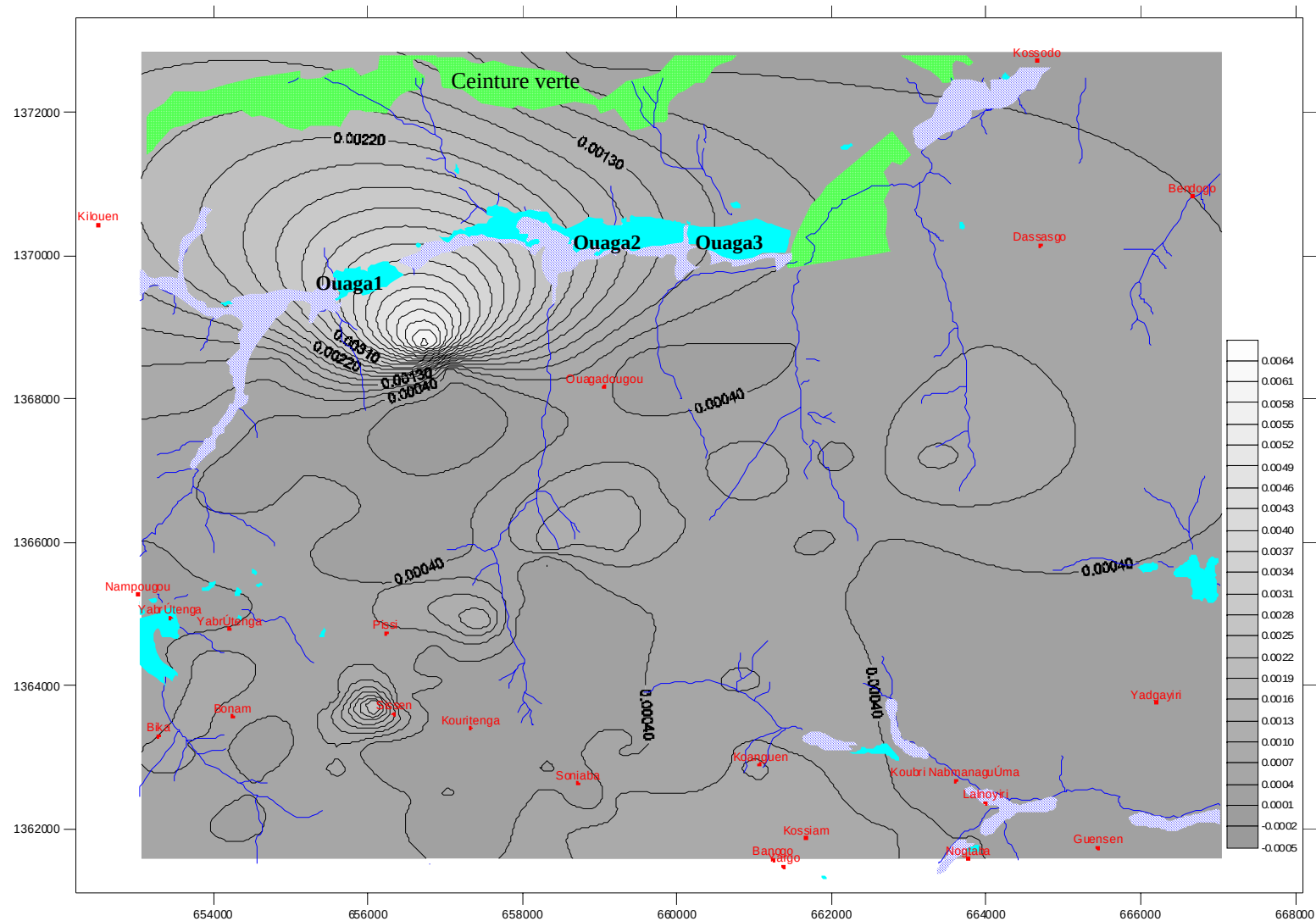


FIGURE 3.10 : Carte de transmissivité en m^2/s des aquifères à Ouagadougou

II.4 - La piézométrie des nappes et ses variations naturelles

La chronique piézométrique la plus longue de Ouagadougou est celle du piézomètre du CIEH qui débute en juin 1978 jusqu'en décembre 2004. Dix autres piézomètres ont été réalisés dans la ville pour suivre l'évolution de la nappe profonde.

II.4.1 - Evolution temporelle du piézomètre du CIEH (nappe des altérites)

On dispose de données de suivi du piézomètre du CIEH (20 m de profondeur). Ce piézomètre a été suivi de manière très détaillée (suivi hebdomadaire) à partir de l'année 2001 dans le cadre du projet « Vulnérabilité et pollution des eaux souterraines en contexte urbain de Ouagadougou ». La figure 3.11 montre l'évolution du niveau piézométrique depuis 1978 à 2004. La recharge varie considérablement d'une année à l'autre sous l'influence des fluctuations climatiques interannuelles (C. Filippi et al 1990).

Les niveaux hautes eaux et basses eaux extrêmes observés sont : 6.78 m (1978) et 10.86 m (1999). La période de prélèvement va de novembre à juin tandis que 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.

Les fluctuations naturelles ont montré que la quantité minimum de pluie nécessaire à l'augmentation du niveau de la nappe est de l'ordre de 100 mm pour déclencher le processus de recharge. La période favorable se situe à la fin du mois de juillet et au début du mois d'août s'il n'y a pas rupture de pluie.

On a vu précédemment au paragraphe I.4 que le déficit pluviométrique s'accompagne d'une augmentation des prélèvements par évapotranspiration. Il s'en suit que la période sèche que connaît la région de Ouagadougou depuis les années 74 (*figure 1.9*) s'accompagne d'une diminution des réserves en eau souterraine dont les niveaux piézométriques s'enfoncent d'année en année. La courbe de l'évolution temporelle du niveau piézométrique du piézomètre du CIEH semble démontrer ce phénomène.

On observe une tendance à la baisse depuis 1978 jusqu'en 1985. Depuis cette date, le niveau de la nappe s'est stabilisé à 10,4 m jusqu'en 1988. Puis on constate une remontée de la nappe due à la pluviométrie croissante des années 1991-1996. A partir de 1996-1999 une nouvelle baisse du niveau est observée puis une stabilisation semble se maintenir à partir de l'année 2000. En résumé on remarque que l'alimentation de l'aquifère par les pluies provoque une oscillation saisonnière du niveau de la nappe. Les variations interannuelles des amplitudes estimées en 1986 étaient de 0.6 m/an (IWACO, juin 1986). A partir de 1985 jusqu'en 2004 cette baisse est estimée à 1 m/an. On peut dire que la recharge des nappes s'opère chaque année, mais c'est la reprise par l'évapotranspiration plus importante par rapport aux apports pluviaux qui entraîne la baisse continue des niveaux piézométriques de base.

En estimant en moyenne la remontée de la nappe du piézomètre à 1.00 m sur les 27 ans de mesures (1978-2004) et en affectant à l'aquifère une porosité efficace de 5 % (hypothèse la plus défavorable), on assurera une lame d'eau utile moyenne de 50 mm ($1000 \times 0,05$) par an sans tenir compte de l'évapotranspiration et la vidange.

Pour une pluviométrie moyenne de 710 mm, ce chiffre représente seulement 7% des précipitations. L'exploitation des données du piézomètre de 1978 à 1985 par C. Filippi et al, 1990 avec des coefficients d'emmagasinement entre 2.5 et 8 % avait donné une hauteur d'infiltration efficace moyenne de 67 mm à 132 mm.

Ces calculs se font sur la base d'une hypothèse très simpliste puisqu'il y a des années (et elles sont nombreuses) où les prélèvements sont plus importants que les apports : il conviendrait donc de donner les apports moyens annuels sur la base d'un battement moyen.

En supposant que le bassin hydrologique se superpose au bassin hydrogéologique on peut estimer le volume des réserves souterraines renouvelables :

$$V = R \times S \\ = 0.05 \times 350 .10^6 = 17\,500\,000 \text{ m}^3$$

où

V : volume de la réserve renouvelable

R : recharge annuelle en m

S : superficie du bassin en m^2

Ce calcul très simpliste fait penser à une modélisation de ce type de système aquifère.

On remarque également que l'évolution du niveau piézométrique suit approximativement le cumul annuel de la pluviométrie excepté le léger déficit marqué par les deux événements des années 1996 et 1997 entraînant une baisse du niveau piézométrique qui remonte légèrement et se stabilise avec les pluies des années 2000. Nous avons vu précédemment que même si la situation pluviométrique n'est pas enviable à Ouagadougou, elle donne tout de même l'espoir d'une amélioration au cours de la dernière décennie 1991-2000 (§ *figure 1.6 migration des isohyètes de la météorologie nationale*).

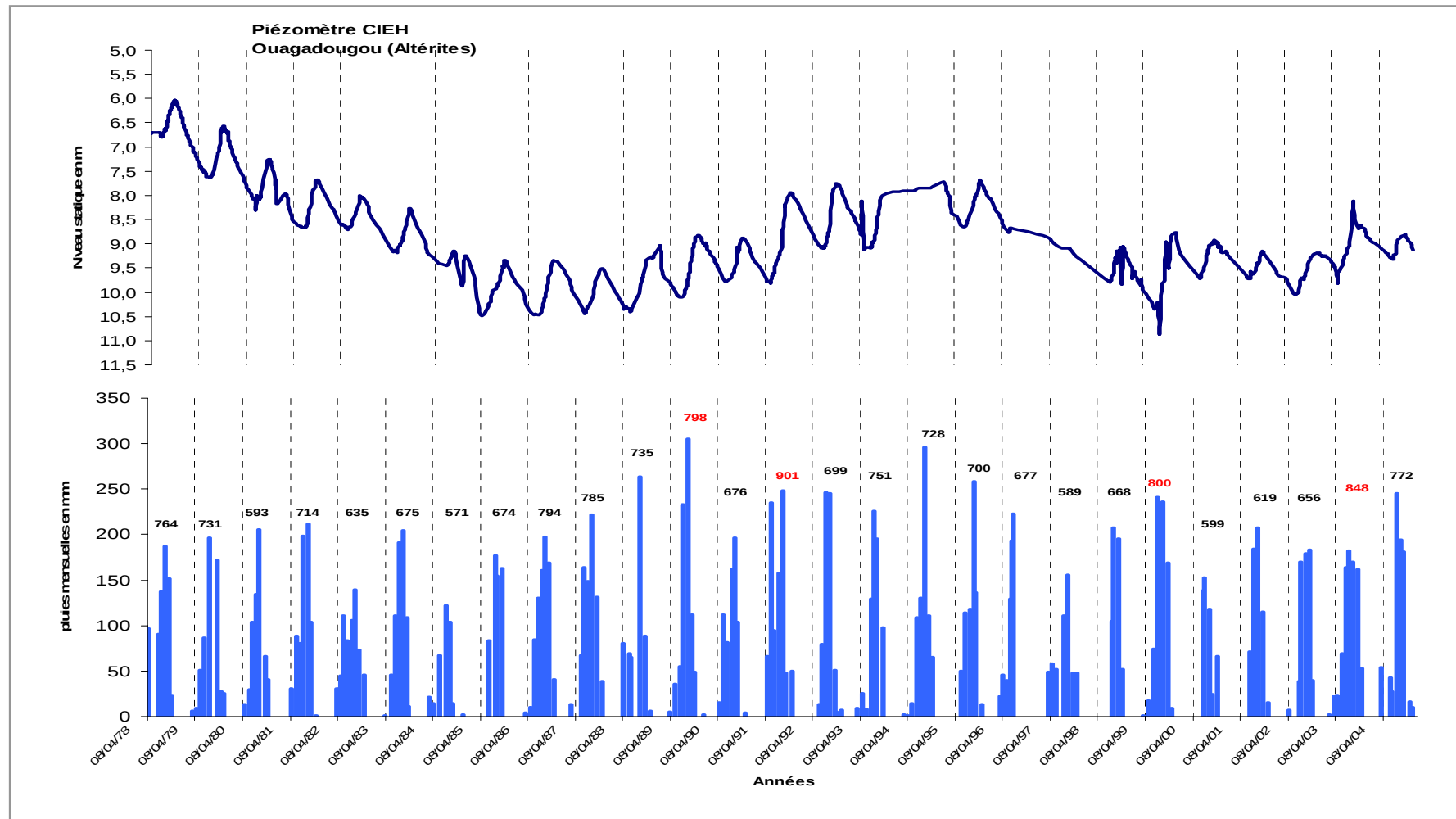


FIGURE 3.11 : Piézomètre et pluviométrie à Ouagadougou (CIEH). 798 mm : pluies annuelles. Moyenne pluviométrique (1978-2004) : 709 mm

II.4.2 - Evolution temporelle de la piézométrie des nappes profondes de fissures/fractures

Une dizaine de piézomètres creusés dans la nappe profonde permet de suivre les fluctuations saisonnières de la nappe de fissures/fractures. Les profondeurs des piézomètres varient entre 67 et 73 m avec une moyenne de 71 m et un écart type de 2.5 m.

Un suivi mensuel de 2001 à 2004 permet d'observer les fluctuations du niveau de la nappe profonde, dont les graphes d'évolution caractéristiques sont représentés sur la figure 3.12, par quatre piézomètres que sont QP 98, QP 104, QP 121, QP 106.

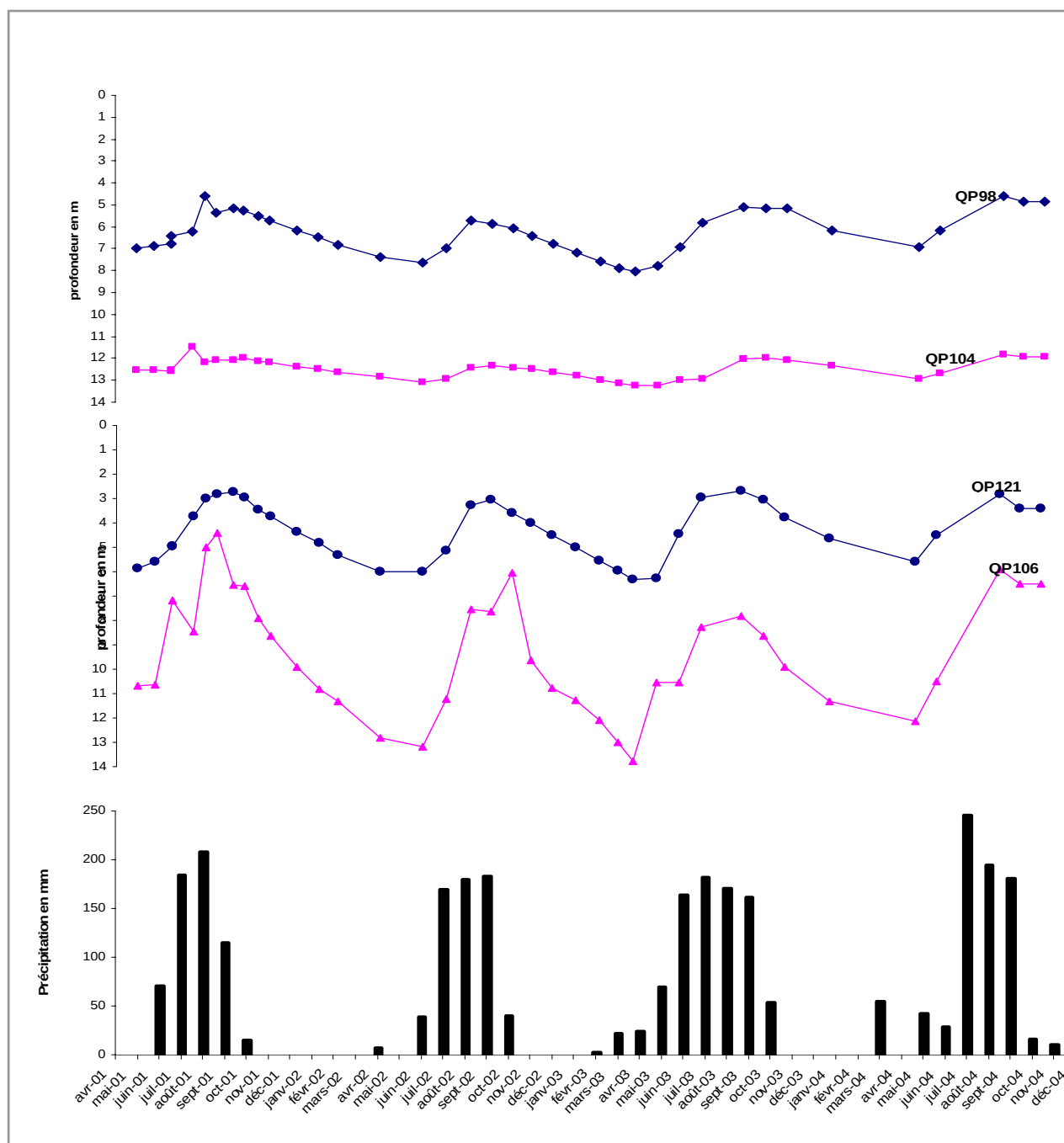


FIGURE 3.12 : Fluctuations de niveaux piézométriques et des précipitations de 4 piézomètres de Ouagadougou (2001-2004)

II.4.2.1 - Evolution temporelle du piézomètre QP 106

Le piézomètre QP 106 est situé à proximité du forage QP 122 en exploitation. Il sert comme puits d'observation et du fait de la surexploitation du forage QP 122 les niveaux piézométriques sont plus profonds. Les figures 3.13 reproduisent les évolutions piézométriques de ces deux ouvrages sur quatre années consécutives (2001-2004).

En période d'étiage les niveaux piézométriques sont au plus bas au mois de mai et varient entre 10.67 m et 13.76 m, la baisse du niveau est en moyenne de 12.43 m.

En période de hautes eaux (juillet et août) on observe chaque année une remontée significative de la nappe dont l'amplitude varie entre 4.42 m et 7.82 m entre le mois de septembre et le mois d'octobre. Malgré sa grande profondeur, cet ouvrage réagit aux différents événements pluvieux et également à l'exploitation intensive du forage QP122. Le rabattement de la nappe varie d'une saison à l'autre.

Au niveau de l'aquifère du socle granitique de Ouagadougou, les possibilités d'écoulements souterrains dépendent de la nature des roches, de la fracturation, ainsi que de l'épaisseur d'altération. On peut à priori penser que les directions de fractures d'orientations NE-SO et NNE-SSO, et E-O correspondent aux principales directions d'écoulements potentiels. On peut citer en exemple le piézomètre QP 106 situé sur une fracture régionale de direction E-O (*figure 3.4*).

II.4.2.2 - Evolution temporelle d'autres piézomètres (QP121, QP104 et QP98)

L'analyse des courbes (*Figure 3.12*) montre un comportement similaire aux observations précédentes, mais avec des amplitudes variables.

En période de recharge (septembre, octobre) on assiste à une remontée des eaux dans tous les ouvrages, à l'exception du piézomètre QP 104. La profondeur des niveaux statiques sont au plus haut et varient entre 2.67 et 3 m pour QP 121, entre 4.61 et 5.70 pour QP 98 et 11.46 et 12.32 pour le QP 104.

Le QP 104 profond de 69.8 m est situé en bordure d'un marigot et également recoupe plusieurs fractures régionales dont la plus importante est sub-verticale, ce qui explique les faibles variations des amplitudes au niveau de la surface piézométrique. Ce puits ne se vidange presque pas car il est dans une zone d'alimentation, où les épaisseurs d'altération mouillées dépassent 25 m et il est alimenté en permanence par les fractures perméables qu'il recoupe.

L'évolution temporelle des niveaux statiques est très atténuée mais similaire à celle observée en période de basses eaux sur tous les ouvrages.

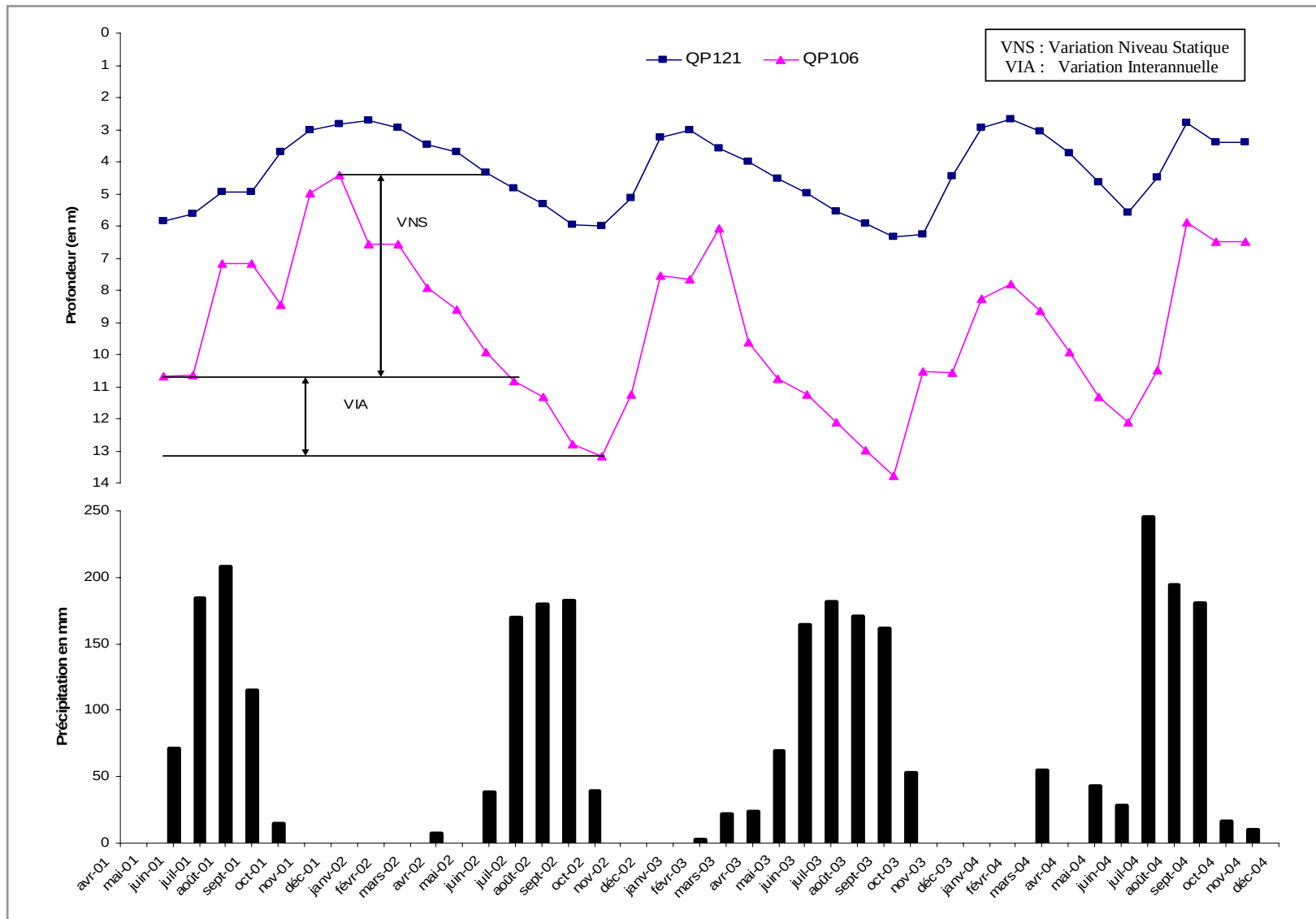


FIGURE 3.13 : Variation du niveau piézométrique de QP 106 et QP121 de 2001 à 2004

Il ressort de cette étude que les fluctuations naturelles du niveau des nappes de Ouagadougou montrent un minimum au mois de mai ou en juin s'il y a une rupture de pluie pendant la première décennie de juin, et un pic maximum au mois de septembre, octobre.

Ces variations ont pour amplitude l'ordre du cm à la dizaine de mètre environ. En général on observe un décalage entre l'infiltration et les oscillations du niveau piézométrique qui se manifestent au bout de 2 ou 3 mois après le début des pluies. Cette réponse retardée est liée à la position géomorphologique des piézomètres. Le niveau statique est entre 2 et 30 m sous le sol ; 2 m pour le puits en bordure des marigots, des barrages, des bas fonds et 30 m sur les plateaux. La réponse des piézomètres change d'une saison à l'autre c'est ainsi que les niveaux atteignent leur maximum au mois de septembre ou d'octobre selon les zones.

La carte de l'épaisseur des altérations mouillées montre que Ouagadougou dispose encore de bonnes ressources en eau souterraine qu'il est possible de mettre en exploitation ; quatre zones, l'Ouest et l'Est de la ville, le Sud-ouest et le Sud-est montrent des critères favorables du point de vue hydrogéologique.

Les valeurs élevées des caractéristiques hydrodynamiques (transmissivité et coefficient d'emménagement) confirment que la fracturation y est importante et peut assurer une bonne drainance entre les différents systèmes aquifères du socle de Ouagadougou.

Cependant, il ressort de cette étude que chaque ouvrage a sa réaction propre dans le socle de Ouagadougou. La configuration en poches plus ou moins discontinues des nappes n'autorise vraiment une circulation générale des eaux que par l'intermédiaire de la fracturation régionale. Ceci semble confirmer le fait que les différents forages sont atteints de manière différente par les pluies efficaces. Cet état de fait ne permet pas de lever une carte piézométrique de l'agglomération de Ouagadougou.

II.5 - Les ressources en eau de Ouagadougou et son alimentation

II.5.1 - Les ressources en eaux de surface

L'Alimentation en Eau Potable (AEP) est assurée à partir du barrage de Loumbila situé à 18 km au Nord-est de la ville et des 3 barrages Ouaga1, Ouaga2, et Ouaga3 communicants orientés selon un axe Ouest-est. La cuvette de la retenue d'eau de Loumbila a une capacité de stockage de $35.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ d'eau, et la réserve exploitable est de $11 \times 10^6 \text{ m}^3$ en année normale avec une superficie du plan d'eau de 16.9 Km^2 .

Les trois barrages de Ouagadougou ont une capacité de $6.11 \times 10^6 \text{ m}^3$ dont $3.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ représentent le volume exploitable en année normale. La superficie des trois barrages est de 3.5 km^2 .

Avant la mise en eau du barrage de Ziga d'une capacité de 200 millions de m^3 construit à 50 km à l'Est de la capitale Ouagadougou, les estimations dans les conditions normales d'exploitation ne devaient pas dépasser $14.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ en année normale, et $6 \times 10^6 \text{ m}^3$ en année sèche.

En 2000 avec une population de plus d'un million d'habitants et pour satisfaire un besoin quotidien de 50 l/personne/jour, la ressource avait été estimée à $18.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ ce qui est supérieur aux capacités actuelles des réservoirs exploités avant l'exécution du projet Ziga.

La consommation moyenne d'un habitant de Ouagadougou tributaire du réseau de distribution d'eau potable s'élève à plus de 400 l/foyer/jour (source ONEA). Ces chiffres très élevés cachent bien entendu une disparité et aussi une réalité précaire pour la plupart des « Ouagalais »

Depuis juillet 2004, l'eau de Ziga vient en appui de l'alimentation en eau potable de la ville et pallie cette situation alarmante.

Le barrage de Ziga est une réalité avec une capacité de 200 Mm^3 , une station de traitement de $45\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ (dont 3000 m^3 réalisée dans un premier temps), 8 châteaux d'eau de 2000 m^3 , 11 bâches au sol de 2000 m^3 et 50 000 branchements promotionnels, dans le seul but d'améliorer l'accès de plus de 500 000 nouveaux abonnés de la ville à un service correct et fiable de l'AEP (Sources ONEA). Ziga va assurer la couverture des besoins en eau potable jusqu'en 2015. La situation en AEP des citadins s'est améliorée depuis les branchements supplémentaires dont l'objectif est de passer de 50 l/jour/personne à 60 l/jour et par habitant pour les besoins domestiques.

II.5.2 - Les ressources en eaux souterraines

Environ 500 forages contribuent à l'AEP, par captage de nappes dans les altérites et le socle granitique. Ce système actuel permet de mobiliser au plus 17.5 millions m^3/an , avec en période sèche une production maximum de 6,5 millions m^3/an .

Nos résultats d'enquête 2003-2004 sur le terrain montrent qu'il existe environ 510 forages dans la ville de Ouagadougou destinés à l'alimentation en eau de la collectivité, des industries ou de personnes privées. De plus plusieurs milliers de puits (1800) existent dans les concessions. Ils captent l'aquifère superficiel des cuirasses et des alluvions, sont moins profonds (3 à 10 m) et prélèvent en moyenne 1000 à 1500 m^3/jour selon les besoins.

L'ONEA gère plus de 100 forages productifs sous forme de postes d'eau autonome (PEA) (pompes immergées avec réservoir en élévation et rampe de distribution) et de poste d'injection d'eau (PIE), par ailleurs les habitants des quartiers périphériques utilisent environ 150 forages équipés de pompes à main (issues pour la plupart de projets d'hydraulique urbaine). Il existe environ 108 forages purement privés dont 41 avec une exhaure motorisée. Les statistiques montrent que :

- 8 % des ménages s'alimentent par des sources gratuites pendant toute l'année, soit le puits particulier, le puits du voisin, le puits ou le forage public et les barrages ;
- 72 % des ménages utilisent uniquement des sources d'A.E.P payantes, c'est-à-dire le branchement particulier privé et celui du voisin, la borne-fontaine, le revendeur d'eau et le forage ou la borne fontaine privée ;
- 20 % disposent d'une combinaison des deux catégories précédentes.

Pour ce qui est des besoins, 33 % parviennent toujours à les satisfaire, 58 % sont en mesure de les satisfaire, et 8 % ne parviennent pas à satisfaire leurs besoins (d'après une enquête de 1984 : SDAU Ouagadougou 2000).

Les eaux souterraines contribuent pour l'heure, 12% à l'alimentation en eau potable de la collectivité. Ce taux à l'issue du branchement avec l'eau de Ziga va baisser probablement en quantité d'eau certains forages sont déjà abandonnés.

A l'issue de notre enquête effectuée sur le terrain, la ressource en eau venant des puits présente des pollutions importantes, elle est vulnérable soit par infiltration directe ou par contamination à la source. La tendance actuelle avec le déficit pluviométrique est à la transformation des puits qui ont tari soit en fosses de latrines, soit en fosses à ordures créant de sérieux problèmes sanitaires. Cet aspect pollution sera étudié dans le chapitre VI.

**Partie II : INVESTIGATIONS, RESULTATS
ET INTERPRETATIONS**

CHAPITRE IV - HYDROCHIMIE DES EAUX

I - LES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DE OUAGADOUGOU

Les chapitres précédents ont montré d'une part la complexité de la ressource en eau dans le système de fractures de la région de Ouagadougou et d'autre part l'inexistence des informations sur son fonctionnement hydrochimique.

Afin de mieux cerner cet aquifère, ce chapitre sera consacré à l'utilisation des outils d'hydrochimie et d'hydrochimie isotopique.

Le but recherché est d'une part la recherche de traceurs chimiques des écoulements de l'eau qui permettront de mieux suivre l'hydrodynamique du système, mais aussi de caractériser la qualité des eaux dans cet environnement fortement anthropisé que constitue la région de Ouagadougou.

I.1 - Les méthodes d'échantillonnage et d'analyse

I.1.1 - Les campagnes de prélèvements

Pour cette étude, l'échantillonnage des eaux a été fait de manière à couvrir toute la zone urbaine afin d'avoir une bonne idée sur la qualité physico-chimique des eaux.

Les campagnes de prélèvements ont porté sur quatre cycles hydrologiques dont deux ont fait l'objet d'analyses détaillées (2003 et 2004). Au cours de ces années des prélèvements mensuels ont été effectués.

Les zones cibles ont été choisies de manière aussi contrastées que possible du point de vue de leur situation géographique et des activités qui s'y exercent (figure 5.1) afin d'obtenir des renseignements sur les paramètres étudiés et les facteurs de contrôle du chimisme des eaux des roches cristallines sous climat tropical sec.

Les trois zones ciblées sont les suivantes :

- *zone I, la zone amont qui correspond à la partie sud-ouest de la ville où se situe le barrage de Boulmiougou. C'est une zone témoin d'une situation peu polluée par l'homme car elle n'est pas viabilisée et ne comporte aucun site industriel. On y pratique cependant des cultures maraîchères pour l'approvisionnement de la ville en fruits et légumes ;*

- *zone II, une zone centrale qui regroupe le barrage Ouaga 3, le canal central drainant les eaux de pluie, les rejets de la société nationale d'électricité, ceux de l'hôpital, et du marché central et ses environs ;*

- *zone III, où se concentrent les usines de la ville dont les principales sont : la tannerie de cuirs et peaux, l'abattoir et la brasserie. Elle constitue la zone exutoire en aval des usines.*

Au regard des premiers résultats analytiques et du contexte de la zone d'étude, le nombre de points de prélèvement qui au début était de 22 a été porté à 27, pour inclure deux retenues d'eau de surface Ouaga 2, Ouaga 3 et six points d'eaux usées, les eaux du canal central, les rejets de la société nationale d'électricité (SONABEL), les eaux usées de l'hôpital central, le filet d'eau du Parc urbain Bangr Wéogho et les rejets industriels (tannerie et brasserie).

Parallèlement à ces activités de prélèvement, un inventaire aussi exhaustif que possible des puits et forages a été effectué. Ainsi ont été répertoriés mille huit cent (1800) puits et cinq cent dix (510) forages munis de pompes à motricité humaine ou immergées. Des prélèvements d'eaux de précipitations ont été effectués sur une station pluviométrique installée à cet effet pour des analyses chimiques et isotopiques dans le cadre d'un projet AIEA-laboratoire d'hydrogéologie (BKF/8/003).

La carte de la ville avec les zones de prélèvement est présentée à la figure 4.1

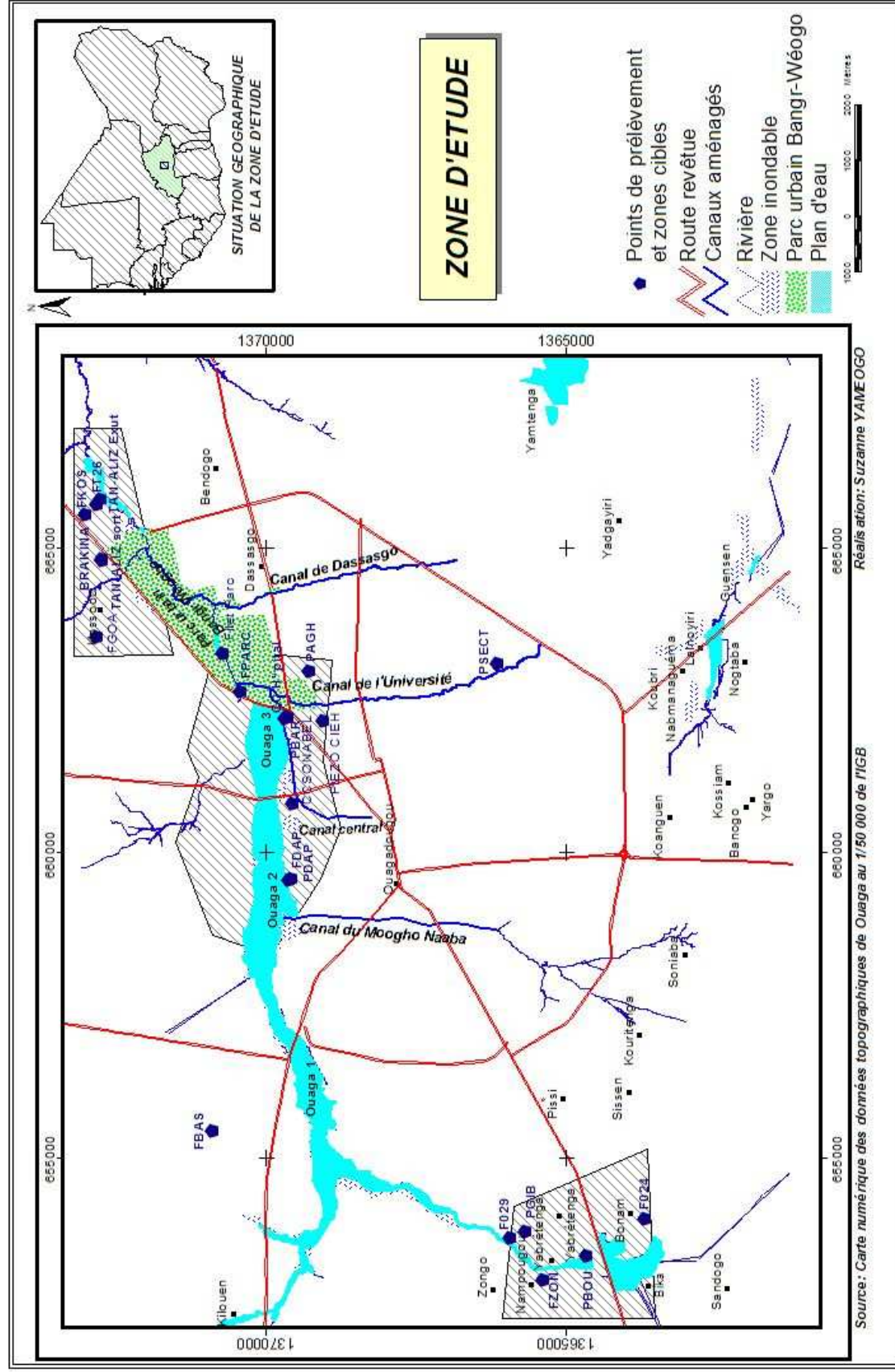


FIGURE 4.1 : Carte de localisation des zones cibles de prélèvement

I.1.2 - Les méthodes d'échantillonnage

Les prélèvements ont concerné tous les puits et tous les forages des secteurs et arrondissements de la ville. Plusieurs campagnes de prélèvement ont été effectuées.

A chaque campagne les mesures in situ ont été effectuées au niveau de chaque point d'eau : la température, le pH ont été mesurés à l'aide d'un pH mètre étanche portatif à microprocesseur de type HI 9024 C muni d'une électrode, et la conductivité avec un conductivimètre portatif multi gamme étanche équipé d'un dispositif de compensation automatique de température.

Les échantillons d'eau prélevés sont conservés dans des bouteilles en plastique d'un litre rincées au préalable trois fois avec l'eau à prélever.

Des glacières ont été utilisées pour la conservation des échantillons qui ont été acheminés au laboratoire. Le dosage des bicarbonates s'est effectué à l'arrivée au laboratoire ou dans les 24 heures qui ont suivi le prélèvement.

Un délai de 48 heures au maximum a été respecté pour le dosage des ions majeurs et la silice.

Les prélèvements pour l'analyse bactériologique ont nécessité des flacons propres et stériles en verre. Un chalumeau a été utilisé pour stériliser les bouts de pompes afin d'éviter toute souillure ou contamination.

Au cours des années 2003, 2005 et 2006 des échantillonnages des puits et forages des zones cibles ont été réalisés pour analyses isotopiques (^{18}O , ^2H , ^3H). Ces prélèvements ont nécessité des piluliers en plastiques fournis par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (A.I.E.A).

En septembre 2006, une campagne d'échantillonnage portant sur 16 points (8 forages, 7 puits, le piézo du CIEH) dont les eaux ont été acidifiées ont été réalisées pour les éléments traces. Les conditions de terrain n'ont pas permis de filtrer les échantillons avant leur acidification.

Environ 500 analyses d'eau ont été effectuées pour le suivi régulier au niveau des zones cibles en vue de comprendre l'évolution saisonnière de la composition chimique.

I.1.3 - Le dosage des Ions

Les ions majeurs Calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), bicarbonates (HCO_3^-), chlorures (Cl^-) ont été dosés par la méthode volumétrique ; et le nitrate (NO_3^-), les sulfates (SO_4^{2-}), les nitrites (NO_2^-), l'ammonium (NH_4^+) le phosphate (PO_4^{3-}) et la silice par spectrophotométrie au laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université de Ouagadougou. Le sodium (Na^+) et le potassium (K^+) ont été dosés par un spectromètre à flammes au laboratoire d'analyse des eaux de la Direction Générale de l'Inventaire et des Ressources Hydrauliques (DGIRH), et également au laboratoire du Bureau National des Sols (BUNASOL)

En 2003, quinze échantillons d'eau de la zone d'étude ont été analysés au laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon. L'analyse des cations a été effectuée par absorption atomique de flamme avec le spectromètre VARIAN type 640. Pour les anions (Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- , NO_2^- , F^- , Br^-), l'analyse a été faite par un chromatographe ionique en phase liquide sur un appareil

DIONEX relié à un intégrateur électronique. Les bicarbonates (HCO_3^-) ont été dosés par titrimétrie à l'acide sulfurique N/50, et la silice par la méthode d'analyse d'un complexe silico-molybdique à l'aide d'un spectrophotomètre CECIL. Cette analyse a été faite dans le but de comparer les résultats avec ceux obtenus au niveau du laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université de Ouagadougou. Ces résultats montrent une bonne concordance entre les données des deux laboratoires.

Les teneurs isotopiques de l'eau (^{18}O , ^2H) ont été déterminées au Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon et de Montpellier. Les teneurs en tritium ^3H ont été déterminées par le laboratoire de la section hydrologie isotopique de l'AIEA à Vienne.

Les éléments traces ont été analysés au laboratoire de Montpellier par spectrométrie d'émission optique avec plasma couplé par induction (IPC-MS).

I.1.4 - Le traitement des résultats

Les résultats des analyses chimiques sont exprimés en mg/l. La balance ionique a été vérifiée, et compte tenu de la charge ionique élevée de certaines eaux des nappes de l'agglomération de Ouagadougou la limite de validité de 10 % a été retenue.

Dans un premier temps, après avoir éliminé toutes les analyses qui ont une balance supérieure à 10% les données de tous les échantillons ont été traitées sans considérer leur origine. Dans un deuxième temps, le traitement a été réalisé après séparation de différents groupes en fonction de l'origine de l'eau et de la profondeur sur chacune des familles d'eau (surface, nappe superficielle, nappe profonde).

I.2. - Contexte hydrochimique général

Dans ce paragraphe, tous les échantillons sont traités par la statistique descriptive (histogramme de fréquence, analyse en composantes principales) la représentation sur le diagramme de Piper. Les diagrammes de corrélation et d'équilibre, seront utilisés pour interpréter les résultats des analyses sans distinction de localisation ou de profondeur.

I.2.1 - Les principaux paramètres physico-chimiques

Les paramètres mesurés sur le terrain concernent 184 prélèvements dont 14 pour les eaux de surface, 100 pour les eaux de puits et 70 pour les eaux de forages sur les périodes de 2001 à 2004.

L'histogramme de la figure 4.2 représente la distribution de fréquence de ces paramètres pour l'ensemble des eaux. Les tableaux 4.1, 4.2, 4.3 présentent les moyennes et variations de ces paramètres par grande famille d'eau.

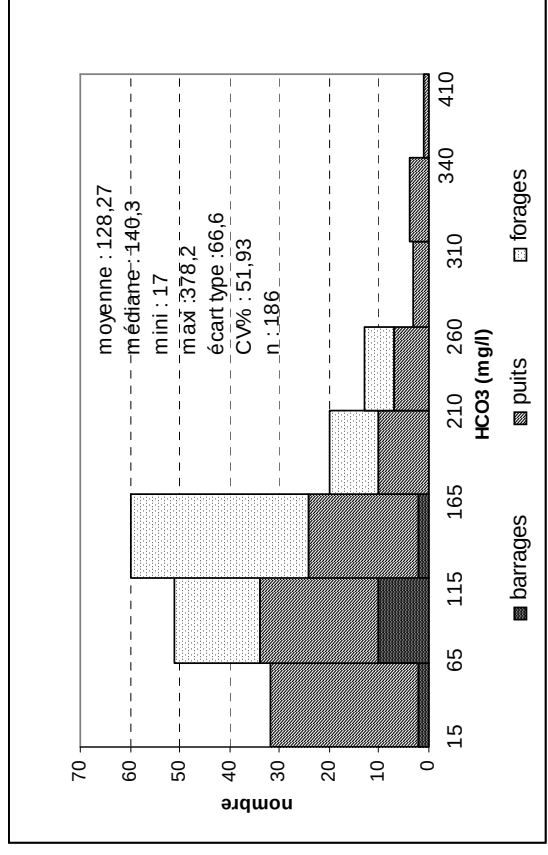
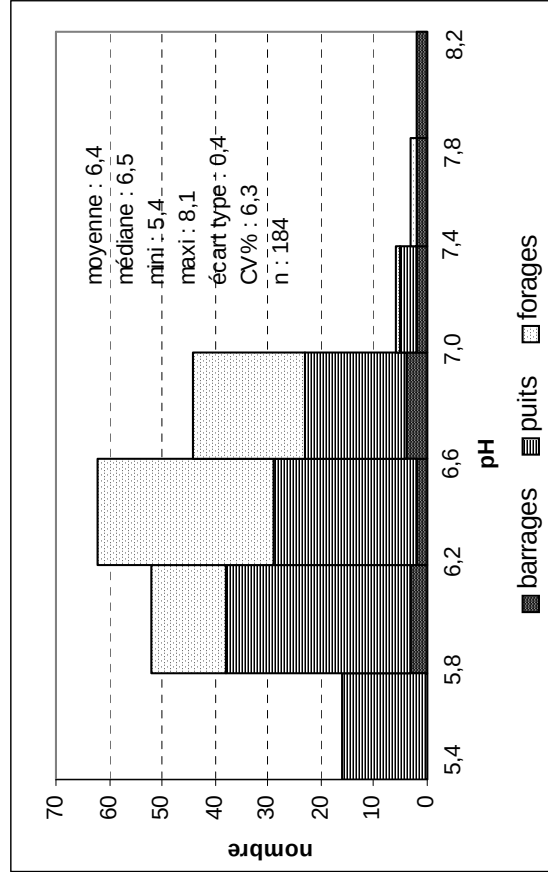
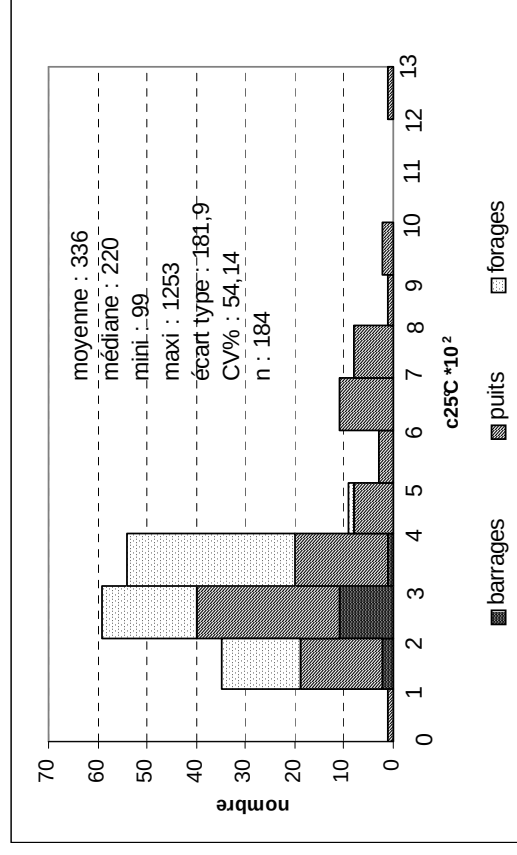
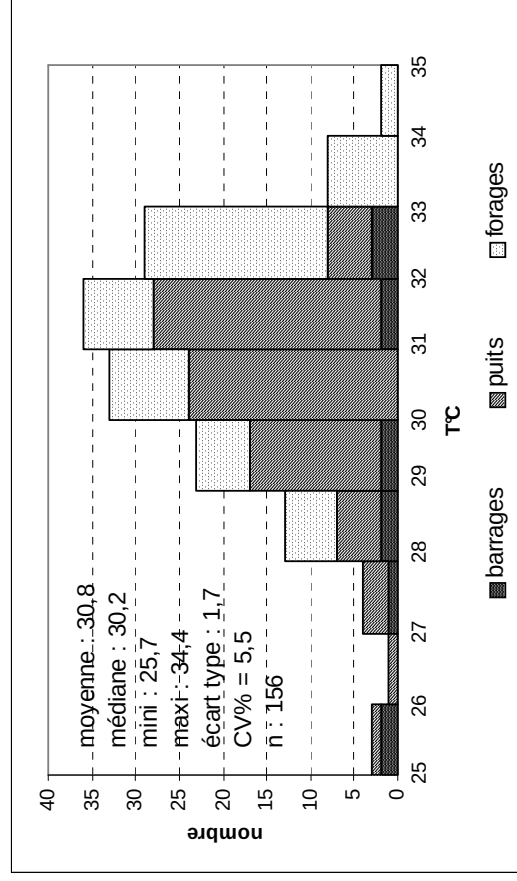


FIGURE 4.2 : Histogramme de fréquence des paramètres physico-chimiques des eaux de l'agglomération de Ouagadougou

TABLEAU 4.1 : Paramètres physico-chimiques in situ des eaux de surface de 14 analyses

	T°C	pH	c25°C	HCO ₃ [mg/L]
Moyenne	29.64	6.86	240.29	92.02
Médiane	29.50	6.10	220.00	97.60
mini	25.70	6.10	170.00	47.60
maxi	32.80	8.10	350.00	152.50
écart type	2.37	0.65	45.96	28.23
CV%	8.00	9.50	19.25	30.70

TABLEAU 4.2 : Paramètres physico-chimiques in situ des eaux de puits de 100 analyses (nappe de cuirasse noyée)

	T°C	pH	c25°C	HCO ₃ [mg/L]
Moyenne	30.44	6.25	388.01	121.93
médiane	32	6.20	250	48.80
mini	25.90	5.40	99	17
maxi	32.90	7.30	1253	378.20
écart type	1.40	0.39	225.56	81.73
CV%	4.61	6.28	58.13	67.03

TABLEAU 4.3 : Paramètres physico-chimiques in situ des eaux de forage de 70 analyses (nappe des arènes et de la roche fissurée)

	T°C	pH	c25°C	HCO ₃ [mg/L]
Moyenne	31.65	6.47	280.86	144.49
médiane	32.70	6.30	155	164.70
mini	28.10	6	150	71
maxi	34.40	7.60	444	219.60
écart type	1.55	0.28	74.20	38.00
CV%	4.89	4.33	26.42	26.30

I.2.1.1 - La Température

Pour l'ensemble des eaux les températures sont comprises entre 25.7 et 34.4°C (*figure 4.2*).

La température est en général très proche des valeurs atmosphériques moyennes : 26 à 31° C pour les eaux de surface, 28 à 32° C pour celles des puits et de 28 à 34° C pour les eaux de forages.

La valeur minimum reflète la température des eaux de surface au mois de janvier et février, sous l'effet de l'alizé boréal qui donne une période fraîche de décembre à février.

La médiane est plus représentative de la température des nappes superficielles qui sont en contact avec l'atmosphère. Les températures des eaux des nappes des altérites qui suivent les variations saisonnières de l'atmosphère ambiante indiquent le caractère superficiel de cette nappe et donc sa vulnérabilité vis-à-vis de la pollution.

Les valeurs comprises entre 31 et 34° C correspondent à celles des eaux des forages profonds qui après la recharge par la grande saison des pluies des mois d'août et septembre chutent légèrement et varient entre 29 et 32° C.

I.2.1.2 - Le pH

Les pH s'inscrivent dans des gammes relativement faibles entre 5.4 et 6.2 dans les puits des terrains de cuirasse et d'alluvions. Ceux des forages qui exploitent la zone d'altération de socle sont légèrement acides à neutres. Le pH se trouve souvent compris entre 6.2 et 7.4.

La nature silicatée des réservoirs explique ce caractère acide des eaux. La dissociation de l'acide carbonique issu du CO₂ de l'atmosphère constitue un des facteurs de l'acidification des eaux souterraines concernées (aquifère superficiel). En milieu ouvert, l'abondance de CO₂ du sol maintient les pH acides alors que dès que le milieu se ferme (aquifère profond) l'hydrolyse des silicates consomme l'acidité et le pH augmente (Bourrié, 1976).

On s'aperçoit qu'au niveau des tableaux 5.a, b, c précédemment traité, le pH varie entre 5.76 et 6.57 pour les eaux de puits et de 6.13 à 6.73 (presque 7) pour les eaux de forages. Le pH est proche de la neutralité pour les eaux de la retenue Ouaga 3, (6.86 en moyenne) par suite du départ de CO₂ qui se rééquilibre avec la pCO₂ atmosphérique.

I.2.1.3 - La Conductivité électrique

Les conductivités mesurées présentent une grande amplitude de variation. Elles varient très largement avec la charge minérale des eaux souterraines : de 99 jusqu'à 1253 µS/cm (*tabl.5.b*). Les eaux les moins minéralisées sont les eaux de surface et celles de certains puits. Les eaux de minéralisation moyenne sont celles des forages où les valeurs sont comprises entre 150 et 444 µ S/cm (*tableau 5c*).

On remarque des eaux de forages et de surface à conductivités électriques élevées dans les zones cibles (zone du canal central et zone industrielle au Nord-Est de la ville) en saison de pluie. On

verra avec les analyses chimiques que ces valeurs élevées de conductivité correspondent à des pollutions locales ou ponctuelles des nappes en période de hautes eaux.

Par exemple en saison sèche on enregistre au puits Dapoya (PDAP), des valeurs qui se situent entre 567 et 750 $\mu\text{S/cm}$, et en saison de pluies (hivernage) elles varient entre 725 et 1253 $\mu\text{S/cm}$. Le puits zone-Bois (PZOB) présente de valeurs de 440 à 695 $\mu\text{S/cm}$ en saison sèche alors qu'elles varient entre 460 à 975 $\mu\text{S/cm}$ en saison de pluie. Pour le puits Boulmiougou (PBOU) les valeurs s'échelonnent entre 237 à 415 $\mu\text{S/cm}$ en saison sèche et 352 à 682 $\mu\text{S/cm}$ en saison des pluies.

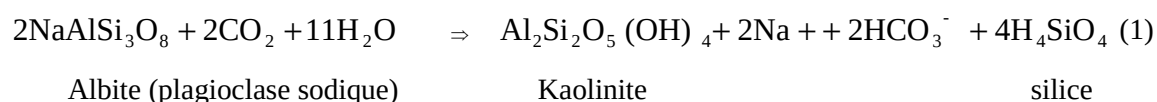
I.2.1.4 - L'alcalinité

L'alcalinité de l'eau est reliée au pH du système, et ces deux paramètres permettent de calculer la pression partielle de CO_2 équilibrant. Elle est influencée par l'addition ou la consommation des protons² (Bourrié, 1976).

Les valeurs de $\log p\text{CO}_2$ reportées sur la figure 4.3a sont calculées par rapport à la teneur en bicarbonates à l'aide du programme WATEQ Debye-Hückel. Elles varient peu et évoluent autour de 0.03 atm ($\log p\text{CO}_2 = -1.5$ atm). Selon Mbonu (1991), cette valeur est fréquemment associée à l'atmosphère du sol ; ce qui laisse penser qu'il s'agit d'un apport du CO_2 sous des conditions de système ouvert sur un réservoir gazeux illimité qui est l'atmosphère du sol.

En outre, les valeurs de pH (figure 4.3b) suivent la même évolution que la $p\text{CO}_2$ et restent inférieures à 8.3. Donc l'alcalinité est pour l'essentiel constituée de bicarbonates (HCO_3^-) (Drever, 1988) qui représentent dans la plupart des cas l'ion dominant avec plus de 50 % de la masse totale de la charge dissoute. C'est aussi l'ion dont les variations de concentrations ont les plus grandes amplitudes : de 47.6 et 152.5 mg/l pour les eaux de surface (tab.4.a), de 17 à 378 pour les eaux de puits (tab.4.b) et de 71 à 219 mg/l au niveau des forages (tableau 5.c).

Dans les réservoirs de socle, l'alcalinité provient principalement de l'altération de minéraux silicatés (Tardy, 1969 ; Bourrié, 1976). L'eau du sol chargée en CO_2 attaque les aluminosilicates et les constituants tels que Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , silice dissoute sont libérés en solution. Le principal produit d'altération de cette attaque et généralement le premier à se former est la kaolinite :



L'eau issue de cette réaction contiendra HCO_3^- , Na^+ , et H_4SiO_4 , dans les rapports 1-1-2.

² L'alcalinité est égale à la différence entre les équivalents cations et les équivalents anions d'acides forts minéraux ($\text{Alc} = (\text{Na}^+) + (\text{K}^+) + 2(\text{Mg}^{++}) + 2(\text{Ca}^{++}) - (\text{Cl}^-) - (\text{NO}_3^-) - 2(\text{SO}_4^{--})$)

Dans cette réaction l'acidité de l'eau est consommée et en conséquence l'eau devient de plus en plus alcaline au fur et à mesure que la réaction avance, c'est-à-dire que la concentration en HCO_3^- augmente (*figure 4.3 b*).

En général, pour l'altération du socle, en l'absence d'activité humaine, les eaux s'enrichissent en alcalinité et en cations. Plus le processus d'altération avance, plus la teneur en HCO_3^- augmente.

Dans ce cadre : $\text{feldspath} + \text{CO}_2 + \text{eau} \rightarrow \text{kaolinite} + \text{HCO}_3^- + \text{cation}$. Le CO_2 est le facteur limitant.

Les teneurs en HCO_3^- sont généralement modérées dans le milieu cristallin de l'ordre de 100 à 150 mg/l. Au delà de 200 mg/l cela suppose que le CO_2 est produit dans l'aquifère à partir de la minéralisation de la matière organique. (A.N. Savadogo, 2002).

Une assez bonne corrélation est observée entre la conductivité et l'alcalinité (*figure 4.4*), tout particulièrement pour les eaux des forages (entourés). Ceci confirme que les bicarbonates constituent l'essentiel de la minéralisation. Mais, les eaux qui s'écartent nettement de cette relation, essentiellement les eaux des puits sont probablement affectées d'une pollution significative par des éléments anthropiques (flèche). C'est une façon pratique de mettre en évidence la pollution à partir de la seule mesure des paramètres physico-chimiques.

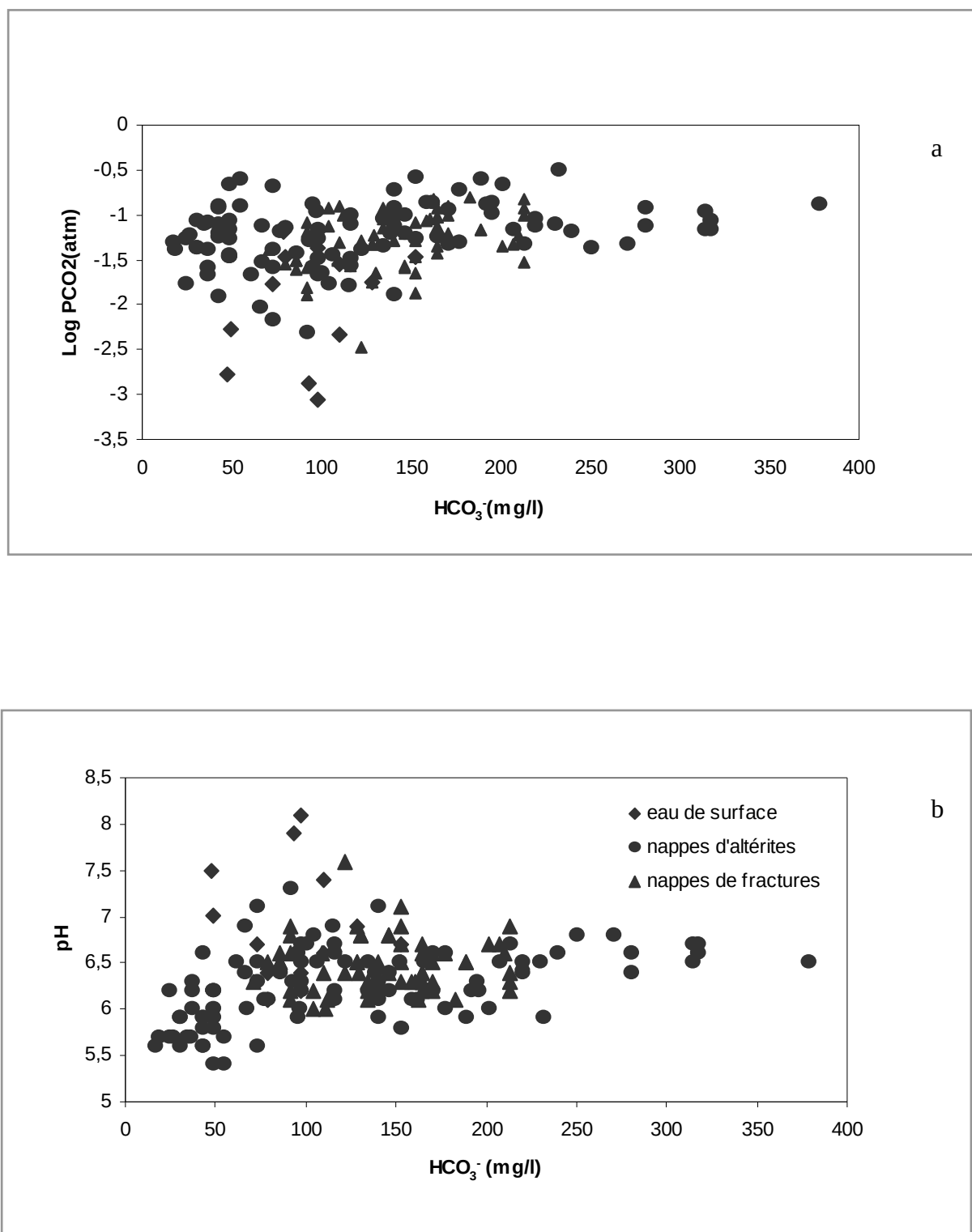


FIGURE 4.3 : Variation de logPCO_2 , du pH et des teneurs en HCO_3^- dans les eaux de l'agglomération de Ouagadougou

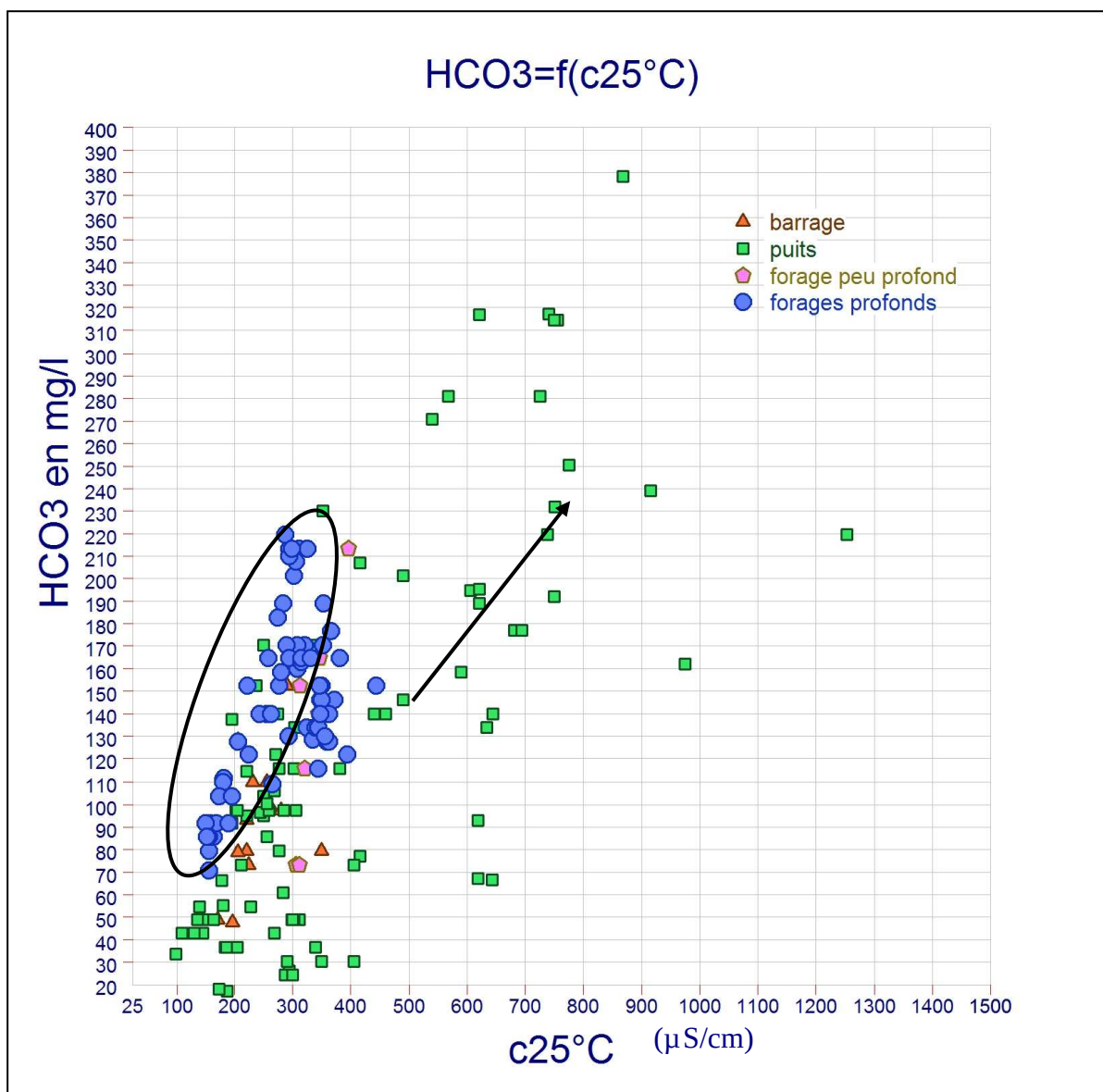


FIGURE 4.4 : Corrélation entre conductivité et alcalinité des eaux de l'agglomération de Ouagadougou

I.2.2 - Les éléments chimiques majeurs

Dans ce paragraphe, on discutera des différents processus contribuant à la minéralisation des eaux à l'aide des diagrammes de corrélations construits à partir des teneurs des ions majeurs.

Les concentrations moyennes des éléments majeurs des points d'eau suivis sont prises en considération. Ces valeurs caractérisent les forages et les puits suivis en saison sèche et en saison humide. D'autres résultats d'analyses (50 forages) prélevés une seule fois en fin de pompage d'essai en 1998 par le bureau d'étude ANTEA international /BRGM ont été pris en compte. Ces échantillons ont été retenus car ils présentent de bonnes balances ioniques même si les conditions de prélèvement n'ont pas été précisées. Par ailleurs les éléments tels que l'ammonium, les nitrites et la silice n'ont pas été dosés dans ces eaux. Les résultats sont consignés dans le tableau 4.6 en annexes.

I.2.2.1 - Les caractères généraux

Si l'on considère les valeurs en mg/l les cations présentent l'ordre d'abondance suivant :

$\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. Parfois, le sodium est plus important comme dans les eaux du puits DAP avec 60 mg/l où il domine les autres cations ($\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$). Le potassium est presque toujours le cation le moins abondant.

Pour ce qui concerne les anions, les bicarbonates sont largement les ions dominants, et ils représentent plus de 50% de la charge anionique dissoute. Ils sont particulièrement élevés au puits PDAP avec 281 mg/l soit 4.61 méq/l. Les anions se présentent dans l'ordre suivant : $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$. Les chlorures, sulfates et nitrates sont presque toujours faibles dans les eaux issues de granites (Travi et al. 1985, Onugba, 1990 ; Mbonu, 1991), mais il y a lieu de remarquer que les concentrations ne sont pas négligeables dans les eaux des nappes des altérites. La présence des anions chlorure et sulfate résulte du caractère presque exclusivement anthropique de l'environnement de la ville ; seulement sept échantillons présentent des teneurs en chlorures supérieures à 1 méq/l, les sulfates sont faibles à très faibles (une vingtaine d'échantillons ont une teneur ≥ 5 mg/l). Cependant, les concentrations en nitrates ne sont pas négligeables ; la valeur moyenne est de 9.10 mg/l, mais elles dépassent parfois dans certains puits et forages les normes de potabilité de l'O.M.S fixée à 50 mg/l⁻¹. Ces fortes concentrations confirment l'origine superficielle d'une partie de l'alimentation au moins de ces eaux.

I.2.2.2 - Les Faciès des eaux

Les faciès sont représentés sur le diagramme de Piper (figure 4.5)

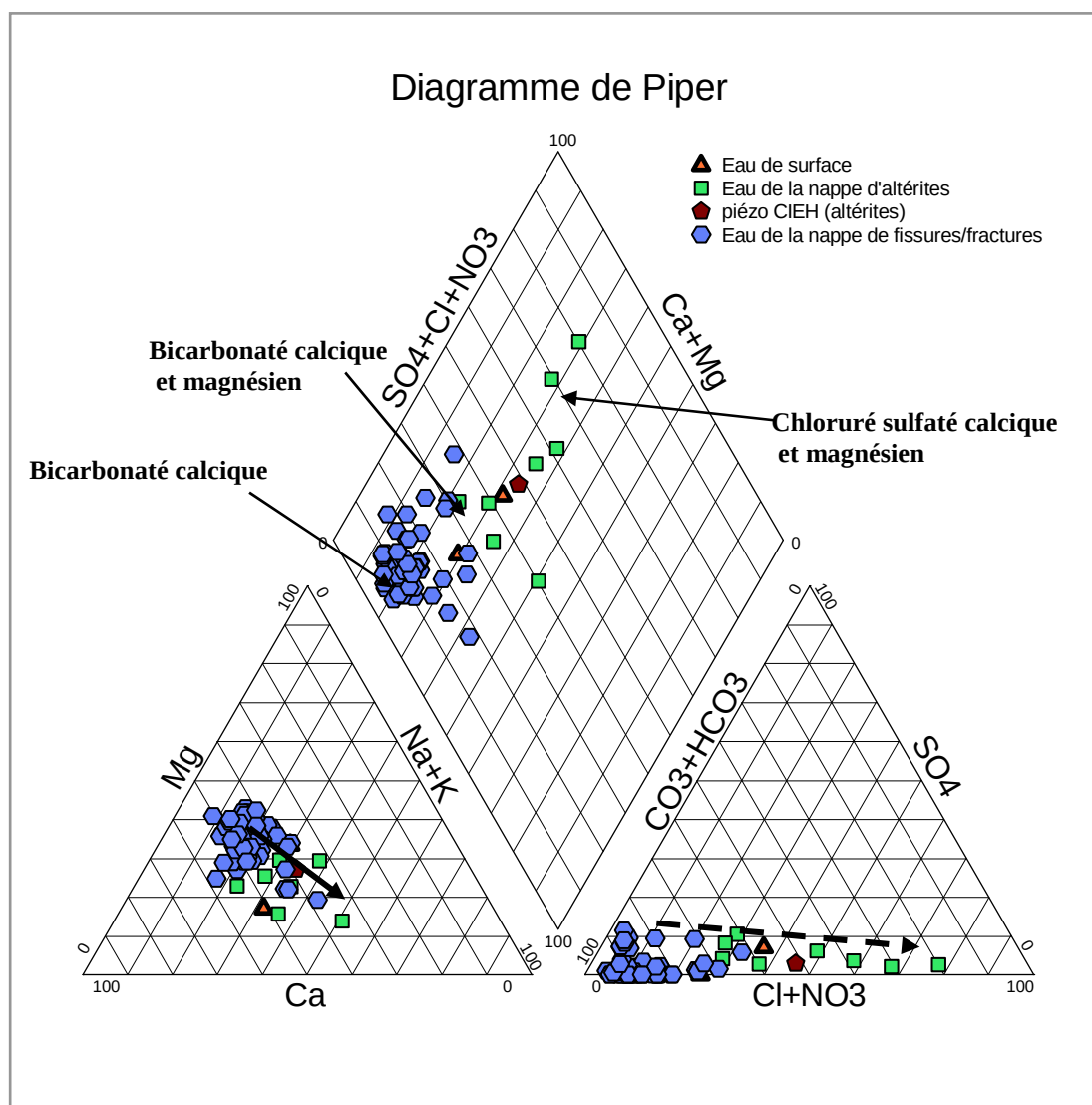


FIGURE 4.5 : Faciès de l'ensemble des eaux de la ville de Ouagadougou

Le sens des flèches indique une minéralité croissante sans préjuger de l'homogénéité des origines de l'eau.

Au niveau du triangle des cations la plupart des eaux (toutes origines confondues) se situent dans la zone centrale où aucun cation ne domine. On remarque que quelques eaux de la nappe de fissure/fracture sont proches du pôle calcique alors que certaines se détachent nettement vers le pôle sodique (flèche pleine).

Dans le triangle des anions, la majorité des eaux regroupées au niveau du pôle bicarbonaté appartiennent à la nappe de fissures. Quelques échantillons de la nappe des altérites et de la nappe de fissures/fractures tendent vers le pôle chlorure + nitrate (flèche en tireté) ; ce sont les eaux, où l'on

remarque des teneurs en nitrates élevées, souvent associées aux chlorures. Ce résultat ouvre plusieurs perspectives scientifiques intéressantes qui permettront de comprendre d'où vient cette évolution.

En résumé, les eaux sont caractérisées par des faciès bicarbonaté calcique, bicarbonaté calcique et magnésien et enfin de type chloruré et nitraté qui témoignent d'apports superficiels. La composition chimique des eaux issues des altérites montre à l'évidence une pollution que nous allons mieux cerner dans le détail ultérieurement en étudiant la nature chimique des eaux des différentes nappes.

1.2.2.3 - Les Analyses en Composantes Principales (résultats sont exprimés en mg/l)

Dans ce paragraphe, on va commencer par une approche multi variée avec les analyses en composantes principales (ACP). La nature des données nous a imposé l'utilisation de cette analyse dans le but de rechercher les relations entre les différents variables, et éventuellement de regrouper celles qui ont un type de variation semblable.

Douze (12) variables (voir *tableau 4.4*) sont prises en compte sans la silice, pour la comparaison des points d'eau comportant les caractéristiques chimiques proches sur les 67 forages.

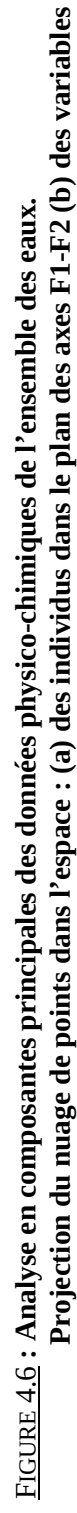
TABLEAU 4.4 : Coefficients de corrélation entre les éléments physico-chimique des eaux

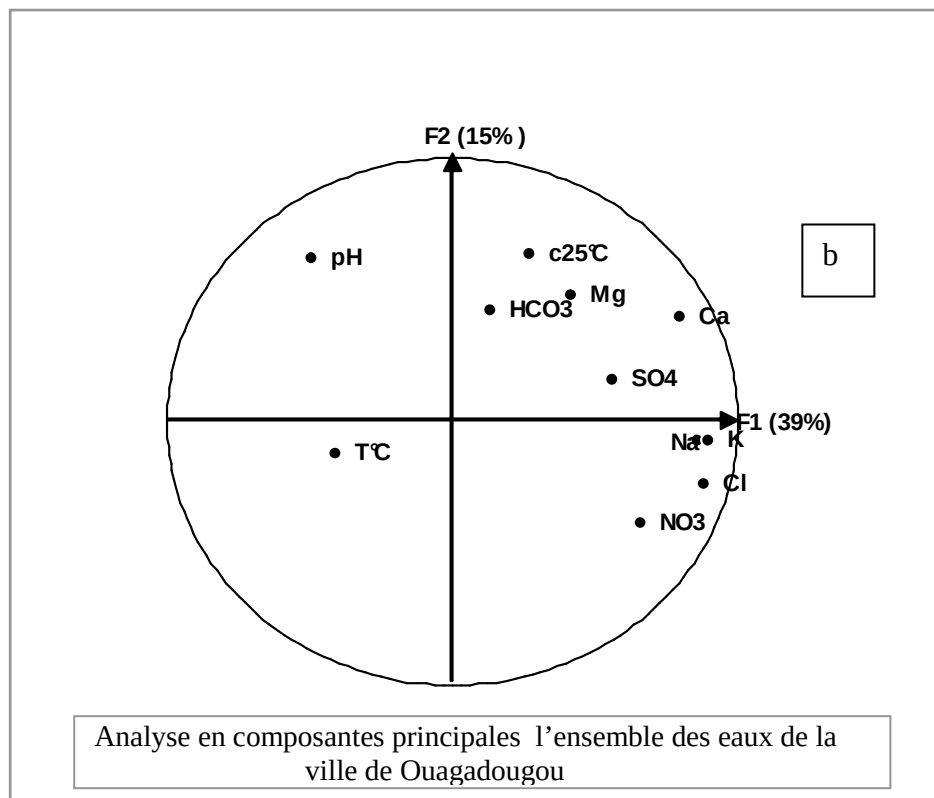
	T°C	pH	c25°C	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
T°C	1										
pH	0,16	1,00									
c25°C	-0,19	0,20	1,00								
Ca ²⁺	-0,30	-0,21	0,37	1,00							
Mg ²⁺	-0,01	-0,07	0,31	0,62	1,00						
Na ⁺	-0,27	-0,35	0,23	0,58	0,17	1,00					
K ⁺	-0,27	-0,38	0,17	0,64	0,23	0,83	1,00				
HCO ₃ ⁻	-0,10	0,07	0,01	0,21	0,12	0,10	0,10	1,00			
Cl ⁻	-0,27	-0,48	0,07	0,58	0,21	0,79	0,77	0,00	1,00		
SO ₄ ²⁻	-0,30	-0,09	0,08	0,42	0,08	0,39	0,50	0,19	0,47	1,00	
NO ₃ ⁻	-0,17	-0,54	0,07	0,35	0,26	0,48	0,53	-0,09	0,59	0,14	1

A l'examen, on observe :

- une bonne corrélation entre le sodium, le potassium, et le sodium et les chlorures ;
- une assez bonne corrélation entre le calcium, le magnésium, le potassium ; les chlorures et le sodium à un degré moindre ;
- un lien discret entre nitrates et chlorures et entre nitrates et potassium.

Ces indices ne sont pas suffisamment explicites dans la mesure où ils ne mettent pas clairement en évidence les relations attendues entre les différentes variables qui permettraient de comprendre les processus de minéralisation des eaux de la ville.





Les résultats de l'analyse en composantes principales permettent les observations suivantes :

L'ensemble des trois axes F1 (39 %), F2 (15 %) et F3 (11 %) représente 66 %. Les axes F1 et F2 représentent seulement 54 % de la variance. Ce résultat est indicateur d'une dispersion des sources de variabilité de la composition chimique des eaux. Il montre que la qualité chimique des eaux provient de plusieurs processus ce qui entraîne une situation très complexe.

On remarque que sur l'axe F1 (39 %) sont regroupés : les chlorures, le sodium, le potassium, les sulfates, les nitrates, s'opposant au pH et à la température. En effet, dans ce regroupement, l'association de ces ions correspond au pôle anthropique de la minéralisation de l'eau. Il traduit ici l'importance de la pollution domestique et agricole. Ceci montre une certaine originalité, dans ce cas d'étude. On peut dire que F1 est l'axe de la pollution.

L'axe F2 bien que peu représentatif (15 %) regroupe la conductivité les bicarbonates, le magnésium et le pH. Il traduit la minéralisation naturelle de l'eau ainsi que le degré d'altération des roches, d'une manière générale le temps de séjour de l'eau, la durée de l'interaction eau-roche (*figure 4.6*).

En projetant les points dans l'espace des variables sur la figure 4.6 a, on peut dire que les eaux qui s'écartent nettement sont essentiellement les eaux polluées influencées par les apports externes. La limite qui sépare les eaux polluées de celles non polluées est représentée par la verticale en tireté. On observe une augmentation de la pollution au niveau de la nappe des altérites. Inversement la majorité des eaux de la nappe des fissures sont caractérisées par les marqueurs de l'interaction eau-roche, où l'on observe un regroupement de ces points d'eau non pollués.

En fait, l'analyse en composantes principales est très significative parce qu'elle a mis en évidence la pollution de la nappe des altérites et de certains ouvrages de la nappe de fissures. Elle permet de distinguer les différentes pollutions résultant de la forte pression anthropique qui seront détaillées ultérieurement.

L'observation du chimisme de ces eaux corrobore assez bien ce qui vient d'être dit : les eaux de la nappe des altérites sont très chargées en ions en comparaison avec celles des fissures et ce qui est et il faut le noter est un phénomène spécifique à l'agglomération de Ouagadougou car la logique voudrait que les eaux des nappes profondes soient plus minéralisées (temps de séjour plus long). Il y a aussi qu'il n'y a pas un mélange entre les eaux de la nappe superficielle et celles de fissure. C'est dire qu'il y a souvent une stratification des eaux. Ici c'est l'origine superficielle de la minéralisation (pollution) qui est en cause et il est nécessaire d'étudier les eaux par famille pour mieux comprendre le fonctionnement de chaque système aquifère.

Au regard des premiers résultats analytiques du contexte géologique hydrogéologique et climatique de la zone d'étude, il est intéressant d'étudier les eaux par famille pour mieux appréhender leur processus de minéralisation, les variations temporelles des différents ions d'une part, et les types de pollution anthropique d'autre part.

II - LES CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES EAUX DE SURFACE

Le tableau 4.5 présente les valeurs caractéristiques des éléments majeurs qui présentent un aperçu statistique de la composition chimique des eaux. On trouvera en annexe III.1 les résultats des 14 analyses complètes.

TABEAU 4.5 : Concentrations caractéristiques en éléments majeurs 14 analyses

mg/l	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ²⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
Moyenne	23.27	5.75	11.89	8.88	92.02	21.53	8.07	15.88
Médiane	22.60	4.45	10.55	10.04	97.60	16.02	3	0.44
mini	14.58	1.71	5.54	2.20	47.60	9.22	3	0.44
maxi	45	12.80	24.40	12.71	152.50	39.04	17	52.80
écart type	7.26	3.37	4.76	3.64	28.23	8.55	6.33	16.89
CV%	31.20	28.40	40.07	41.02	30.70	39.70	78.50	106.34

Analyse des résultats

Les ions dominants sont les ions bicarbonates et calcium. Les teneurs en bicarbonates varient entre 47.60 mg/l et 152.50 mg/l. Les teneurs en calcium varient entre 14.58 mg/l et 45 mg/l. La valeur minimale de calcium est atteinte en octobre à la fin de la saison de pluies à Ouagadougou, et elle augmente en juillet et en août pendant le maximum de la pluviosité et d'humidité relative. Le sodium, le potassium ont des indices de variation proches. Les maximums des concentrations du potassium sont atteints en juillet et dépassent parfois légèrement les seuils de potabilité de 12 mg/l de l'OMS, et ceux du sodium sont atteints en saison sèche (novembre).

Les concentrations en nitrates et en sulfates sont très variables avec des coefficients de variations respectifs de 78.50 % et 106 %. Ces valeurs semblent être liées à la situation géographique des deux retenues Ouaga 2 et Ouaga 3. Rappelons ici que Ouaga 3 se remplit par l'intermédiaire d'une vanne de fond la reliant à celle de Ouaga 2 alimentée par le canal du Mogho Naaba long de 4.30 km.

Les concentrations très élevées en nitrates, sulfates et potassium montrent à l'évidence l'impact des apports de surface qui entraînent une augmentation pendant les mois les plus arrosés. Les principales causes en sont le manque de système d'assainissement collectif et de collecte des ordures ménagères, et l'inexistence de station d'épuration.

III - LES EAUX ISSUES DE LA NAPPE PROFONDE DE FISSURES/FRACTURES (EAUX DE FORAGES)

Pour la zone d'étude et sur quatre cycles hydrologiques, le réseau d'observation à maille serrée compte au total 27 points dont 11 forages, un piézomètre, 10 puits. Nous prenons en compte dans ce chapitre ces 11 forages sélectionnés (moyenne des prélèvements mensuels) et les résultats de quelques analyses ponctuelles sur une cinquantaine de forages bien répartis dans la zone d'étude (*figure 4.7*). Ces valeurs sont donc représentatives de la zone d'étude. Les différents forages sont dans une zone de socle constituée essentiellement de roches granitoïdes composées de quartz, des feldspaths potassiques (orthose et microcline) de l'ordre de 35 %, de plagioclase de biotite et de hornblende verte. Le plagioclase a une composition qui varie de l'albite à l'oligoclase pour les roches acides granitiques et de l'oligoclase à l'andésine pour les roches intermédiaires granodioritiques et les roches basiques (diorites). Le quartz est peu soluble (Mbonu, 1991), les feldspaths potassiques sont peu solubles Appelo et al (1996) ; seuls les plagioclases, la biotite et la hornblende s'altèrent plus ou moins rapidement.

Les résultats sont représentés en annexes IV.2.

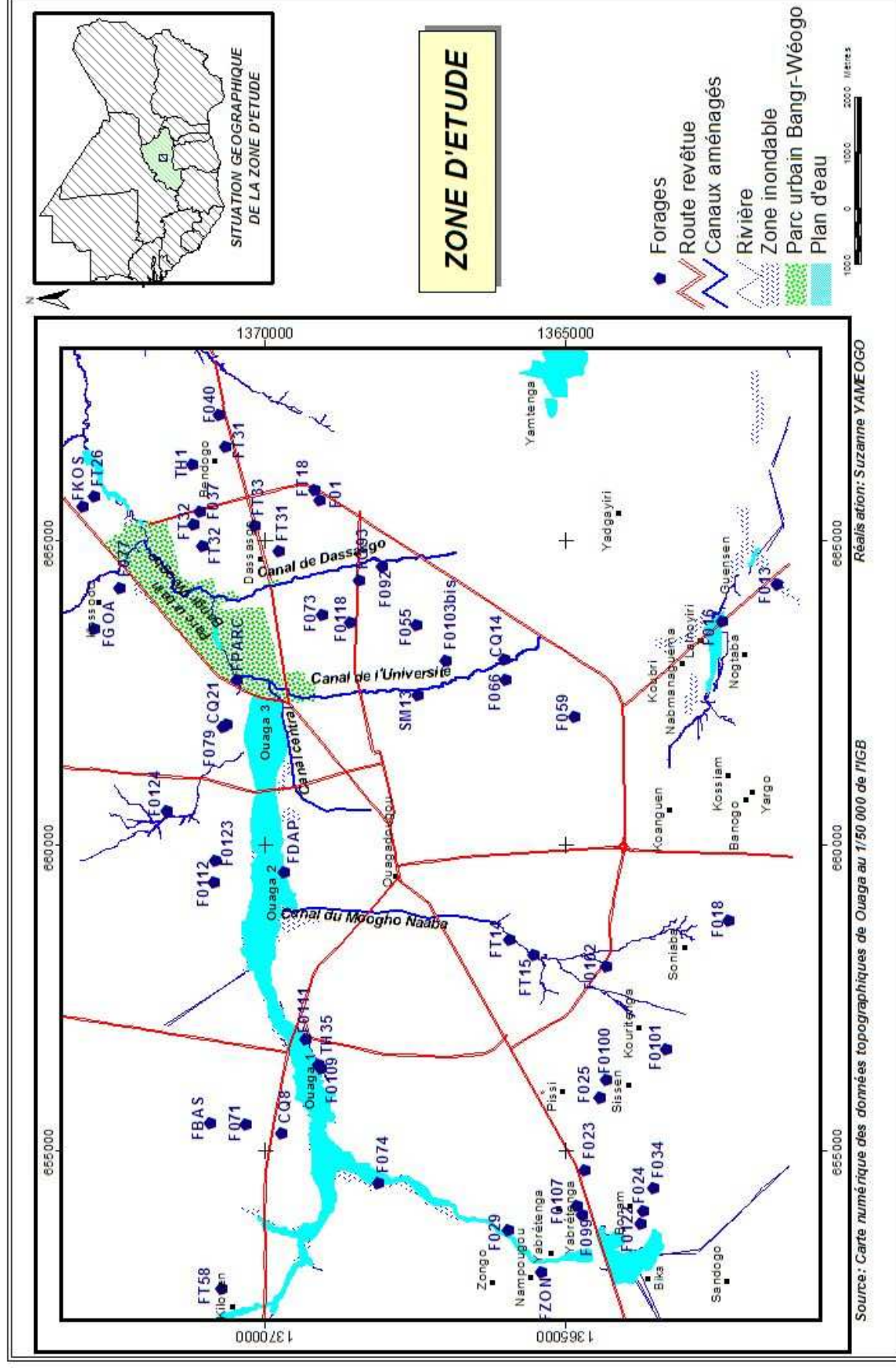


FIGURE 4.7 : Carte de 55 forages de l'agglomération de Ouagadougou

III.1 - Les caractéristiques chimiques

Les valeurs moyennes et médianes des concentrations des différents éléments de l'eau figurent dans le tableau 4.6. (70 analyses)

TABLEAU 4.6 : Concentrations caractéristiques en éléments majeurs de 70 analyses

mg/l	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	SiO ₂
Moyenne	24.27	11.74	11.39	4.25	144.49	12.09	2.81	16.28	99.60
Médiane	22.80	12.96	10.95	2.50	164.70	9.01	1.00	0.44	100
mini	9.70	1.44	3.98	0.40	71.00	0.42	0.00	0.00	92
maxi	40.39	23.95	25.38	21.18	219.60	56.00	14.00	52.00	104
écart type	7.54	4.87	4.13	2.75	38.00	11.26	3.15	16.63	3.54
CV%	31.08	41.80	37.19	68.50	26.30	93.08	112.05	102.12	3.55

L'analyse du tableau ci-dessus montre que les teneurs des éléments tels que calcium, magnésium, et sodium, sont variables. Les chlorures, le potassium, les sulfates et les nitrates présentent une grande variabilité avec un minimum de 0.4 et un maximum de 21.18 mg/l pour l'ion potassium, de 0.42 à 56 mg/l pour le chlorure, de 0.00 à 52 mg/l pour le nitrate et de 0.00 mg/l à 14 mg/l pour le sulfate. Les bicarbonates varient moins. Quant à la silice sa teneur est relativement stable avec un indice de variation de 3.6 %.

Les histogrammes des figures 4.8 et 4.9 représentent la fréquence des paramètres chimiques pour l'ensemble de ces eaux de forages.

III.1.1 - Les cations

Les cations présentent un ordre d'abondance de type $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$.

Les teneurs en calcium s'inscrivent entre 9.7 et 40.4 mg/l. La teneur moyenne est de 25.60 mg/l et la médiane de 23.95. Les valeurs sont regroupées autour 20 mg/l et 35 mg/l au niveau de l'histogramme (*figure 4.8a*) ; celles qui dépassent 35 mg/l proviennent des ouvrages dont les eaux ont une charge minérale élevée par rapport à l'ensemble.

On observe une très grande variabilité pour le magnésium. La valeur médiane de 12.80 mg/l est supérieure à la moyenne de 11.74. Quarante-cinq analyses ont une valeur supérieure à la moyenne. Deux échantillons ont une teneur supérieure à 20 mg/l et ce sont aussi ceux dont la charge minérale est élevée. On peut penser que leur composition est probablement influencée directement ou indirectement par les phénomènes de pollution. Les concentrations en sodium sont très variables et comprises entre 3.98 mg/l et 25.38 mg/l. La valeur moyenne est de 11.4 mg/l. Cinquante sept analyses

ont des valeurs comprises entre 5 mg/l et 15 mg/l. Dix (10) ont des teneurs en sodium comprises entre 15 et 25 mg/l.

La teneur moyenne en potassium est de 4.25 mg/l c'est en fait l'ion le moins abondant. Il montre une grande variabilité avec une valeur minimale de 0.4 et un maximum de 21.2 mg/l. Son coefficient de variation corrobore très bien cette observation. Trois analyses ont des teneurs qui dépassent 12 mg/l, la norme actuelle de potabilité fixée par l'Organisation Mondiale de Santé. Ces teneurs élevées montrent que certaines eaux de la nappe profonde sont soumises aux pressions de la surface.

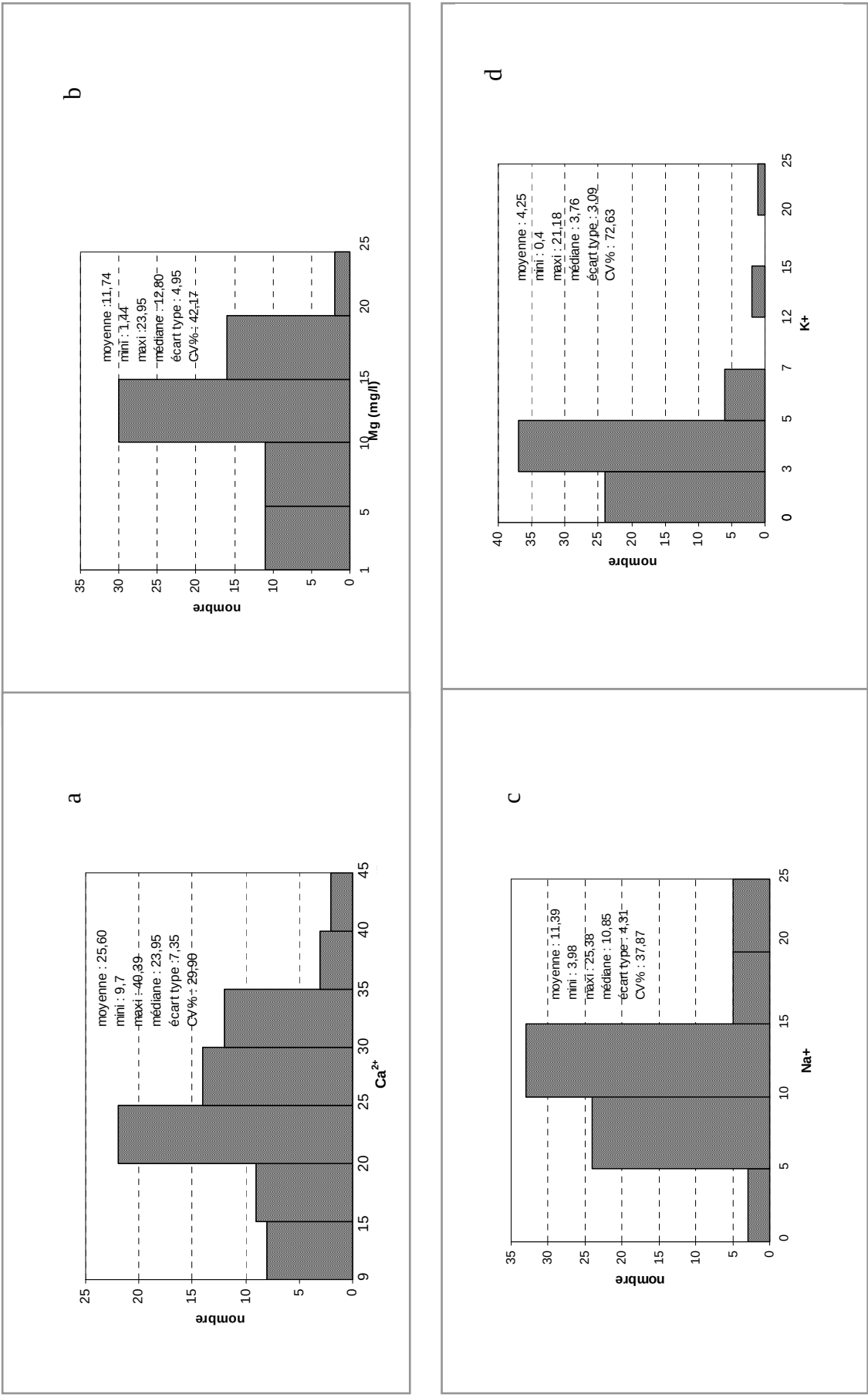


FIGURE 4.8 : Distribution des teneurs en cations des eaux des forages de 70 analyses.

III.1.2 - Les anions

On a vu précédemment que les bicarbonates constituent l'essentiel de la minéralisation des eaux. Ils dominent largement tous les autres anions. La médiane de 146.4mg/l est légèrement au dessus de la moyenne 144.5mg/l ; ceci se traduit par le fait que 50% des analyses ont une valeur supérieure à 146.4 mg/l. La plupart des valeurs se situent entre 100 et 190 mg/l soient respectivement 1.64 méq/l et 3.11 méq/l.

On remarque que les concentrations en chlorures, en sulfates et en nitrates sont relativement faibles vis-à-vis des bicarbonates. Toutefois, elles peuvent être importantes dans certaines eaux, et nous verrons que ce phénomène est associé à l'apport de polluants depuis la surface suivant l'environnement immédiat de chacun de ces ouvrages.

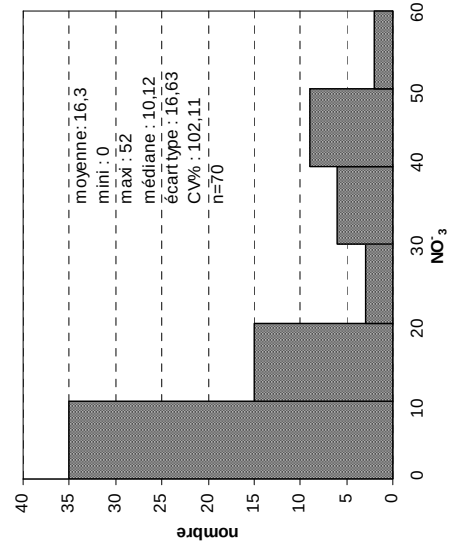
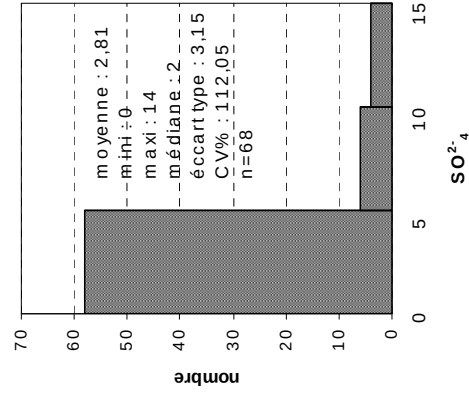
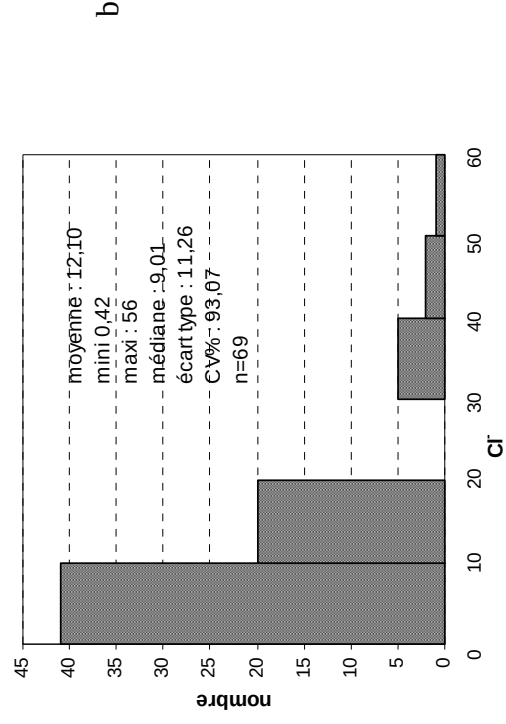
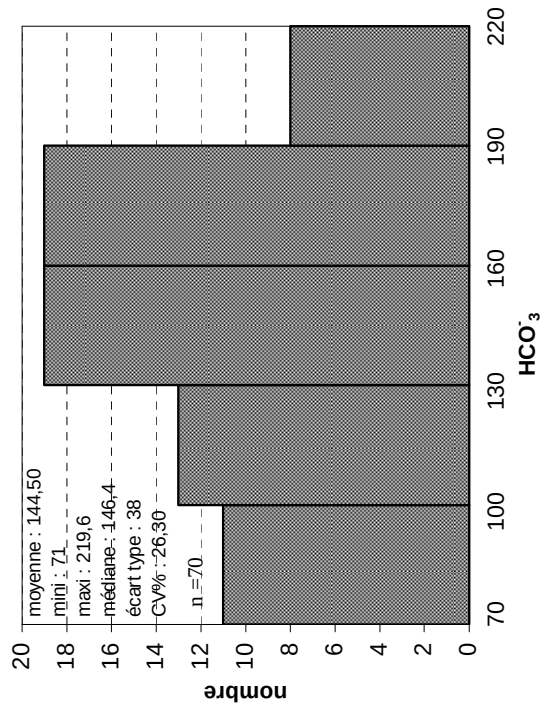


FIGURE 4.9 : Distribution des teneurs en anions des eaux des forages suivis

III.2 - Les corrélations

Les corrélations linéaires entre certains éléments chimiques pertinents permettent de rechercher l'origine de la minéralisation en évaluant les degrés de dépendance entre les différents paramètres concernés. L'évaluation se fait à l'aide des coefficients de corrélation déterminés par des calculs statistiques. La corrélation entre deux paramètres sera d'autant plus significative que le coefficient de corrélation R sera proche de la valeur 1. Ainsi les corrélations ont été établies entre tous les éléments majeurs pris deux à deux ; ce qui nous a permis d'obtenir des diagrammes binaires de corrélation pour les interprétations. Les analyses à concentrations exceptionnelles ont été supprimées ce qui améliore le coefficient R pour le calcium et les bicarbonates qui passe de 0.21 au niveau du tableau 4.4 à 0.61 sur le tableau 4.7.

Les corrélations portent seulement sur les résultats de 70 analyses de nos points d'observation dont la campagne est plus complète.

TABLEAU 4.7 : Matrice de corrélation des eaux de la nappe de fissures/fractures de 70 analyses

Matrice des corrélations :

	T°C	pH	c25°C	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	SiO ₂
T°C	1,00											
pH	0,13	1,00										
c25°C	0,18	0,31	1,00									
Ca ²⁺	-0,07	0,12	0,78	1,00								
Mg ²⁺	0,29	0,12	0,79	0,74	1,00							
Na ⁺	-0,34	0,34	0,04	-0,14	-0,33	1,00						
K ⁺	0,26	0,16	0,43	0,35	0,28	-0,15	1,00					
HCO ₃ ⁻	0,40	0,16	0,55	0,61	0,70	0,10	0,11	1,00				
Cl ⁻	-0,42	-0,23	0,47	0,64	0,27	-0,06	0,45	-0,08	1,00			
SO ₄ ²⁻	-0,40	-0,23	0,32	0,63	0,26	-0,12	0,46	-0,06	0,92	1,00		
NO ₃ ⁻	0,36	0,54	0,52	0,29	0,36	-0,05	0,09	0,04	-0,15	-0,26	1,00	
SiO ₂	0,39	0,19	0,08	-0,17	0,12	-0,22	-0,10	0,06	-0,49	-0,66	0,55	1,00

Au regard des résultats de ce tableau on peut faire plusieurs remarques :

Il existe :

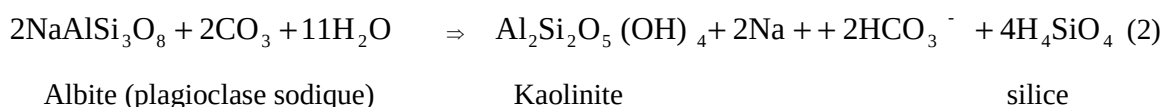
- un lien très fort entre chlorures et sulfates ;
- une bonne corrélation entre la conductivité, le calcium et le magnésium et plus discrète avec les bicarbonates et nitrates ;
- une bonne relation entre magnésium et bicarbonates et une plus discrète entre calcium et bicarbonates ;
- une bonne corrélation entre calcium, et magnésium, mais une plus faible entre le calcium les chlorures et les sulfates.

III.2.1 - Relations attendues suite à l'hydrolyse des silicates

Il existe une corrélation significative entre les teneurs en calcium et en silice (*figure 4.10 a*) et entre le calcium et le magnésium. Par ailleurs l'évolution des teneurs en sodium (*figure 4.10 c*) est indépendante de la concentration de la silice dans l'eau.

Selon Appelo et al, (1994) l'altération des silicates augmente les teneurs en cations et en silice. L'eau d'infiltration traverse le sol se charge en CO₂ et cette eau riche en CO₂ va attaquer les minéraux aluminosilicates des roches (plagioclase, biotite, etc.) de la roche réservoir. L'interaction eau-roche réservoir conduit à la formation de la kaolinite (§ I.2.1.4) et/ou de la montmorillonite néoformée (préférentiellement dans le climat relativement sec), et à la libération des cations, de la silice et des bicarbonates dans l'eau.

Par exemple l'altération de l'albite en kaolinite peut être représentée par la relation suivante :



De même, l'altération de l'albite en montmorillonite est représentée par la relation suivante :



Plus l'altération des silicates est forte, plus la composition chimique de l'eau accuse une augmentation de la concentration en cations, en bicarbonates et en silice.

Nous verrons dans le paragraphe suivant que les résultats obtenus montrent que lorsque les teneurs en cations sont élevées celles de la silice augmentent également d'après Fritz et Tardy, (1976) et que la kaolinite a tendance à se transformer en montmorillonite.

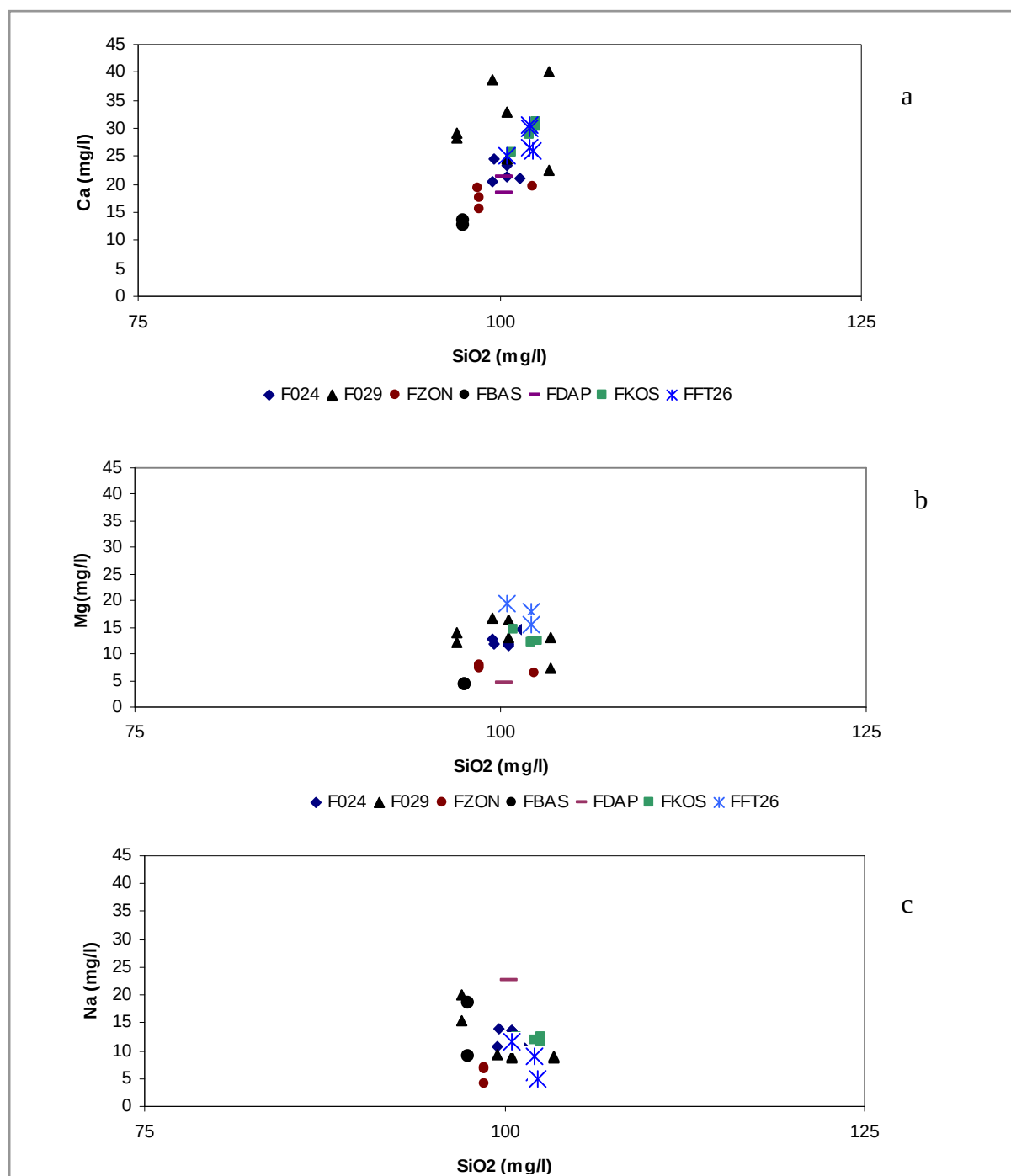


FIGURE 4.10 : Relation entre les teneurs en calcium, magnésium, sodium et la silice des eaux de forages suivis

III.2.2 - Les relations des cations avec les bicarbonates

Sur les figures 4.11 et 4.12 les relations entre les teneurs en cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) et en HCO_3^- sont représentées. On observe qu'à l'exception de quelques points pour les fortes valeurs, la concentration cationique (Ca^{2+} et Mg^{2+}) augmente linéairement avec la teneur en bicarbonates. La croissance à la fois de ces cations et des bicarbonates reflète la mise en solution de ces ions lors de l'altération des silicates.

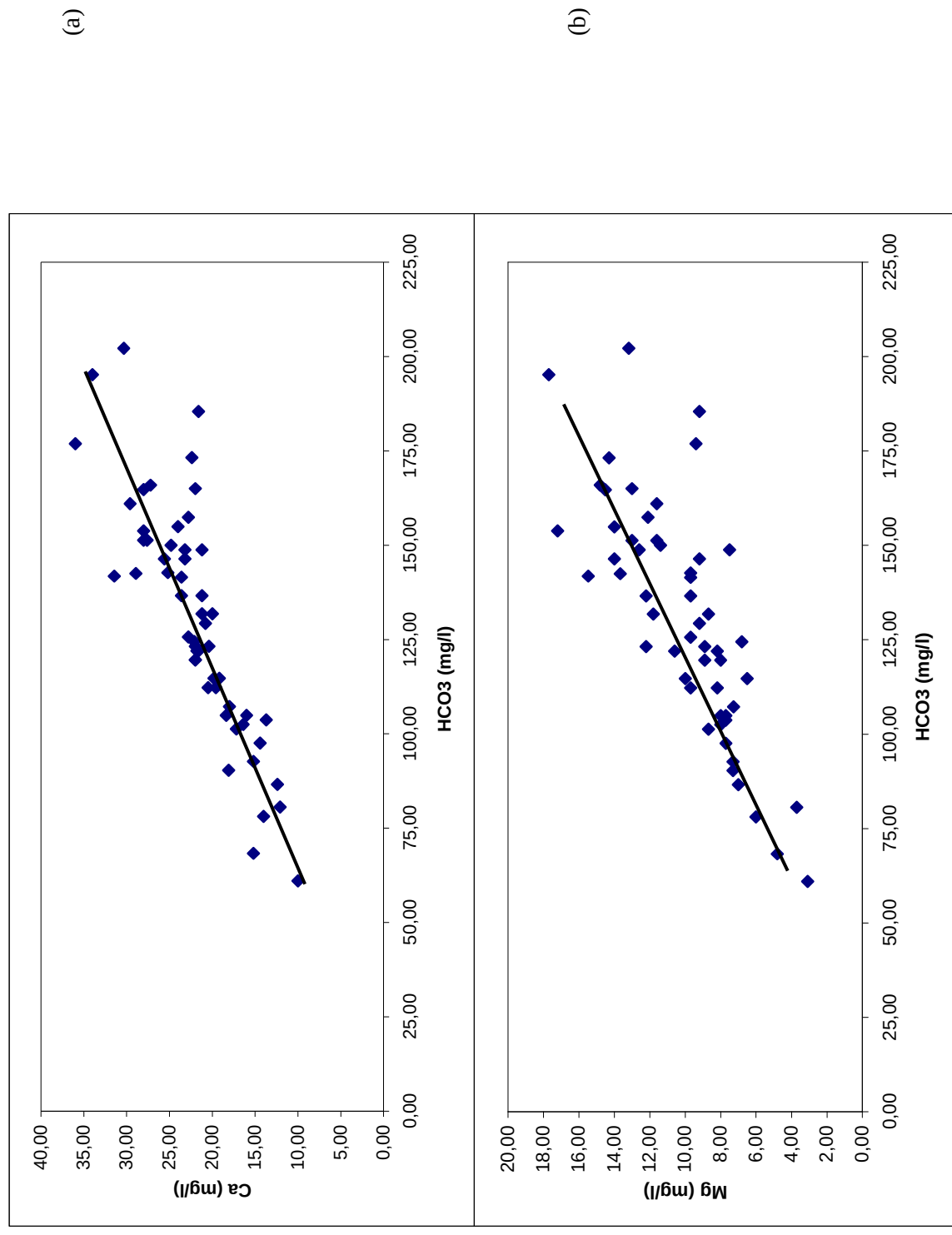
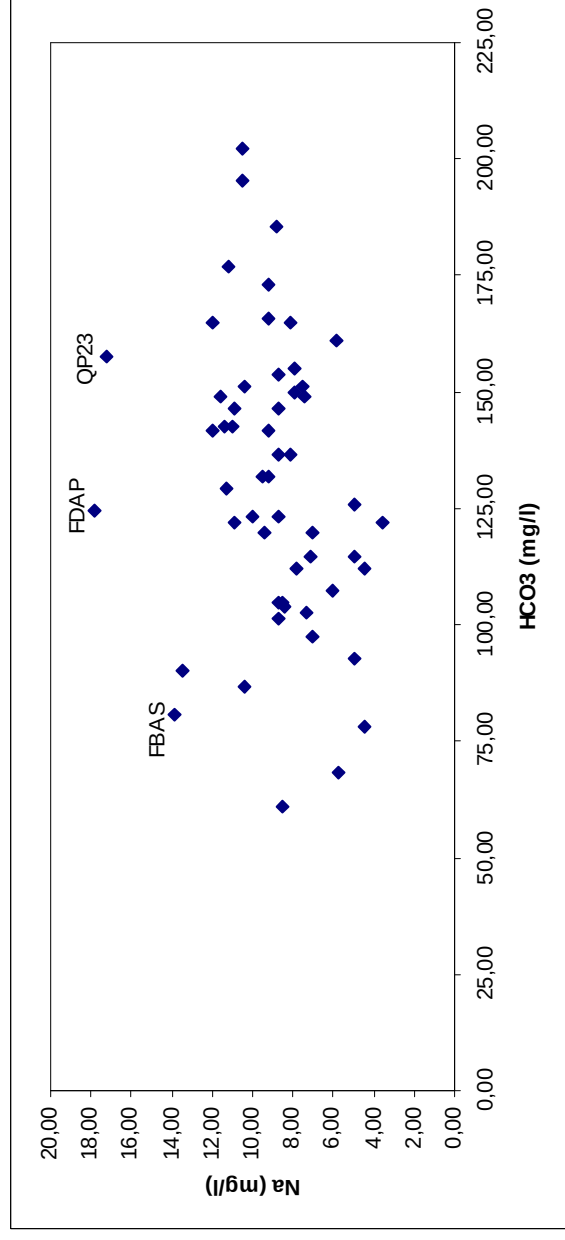


FIGURE 4.11 : Relation entre les teneurs en Ca^{2+} , en Mg^{2+} et en HCO_3^- des eaux de la nappe de fissures/fractures de Ouagadougou

(c)



(d)

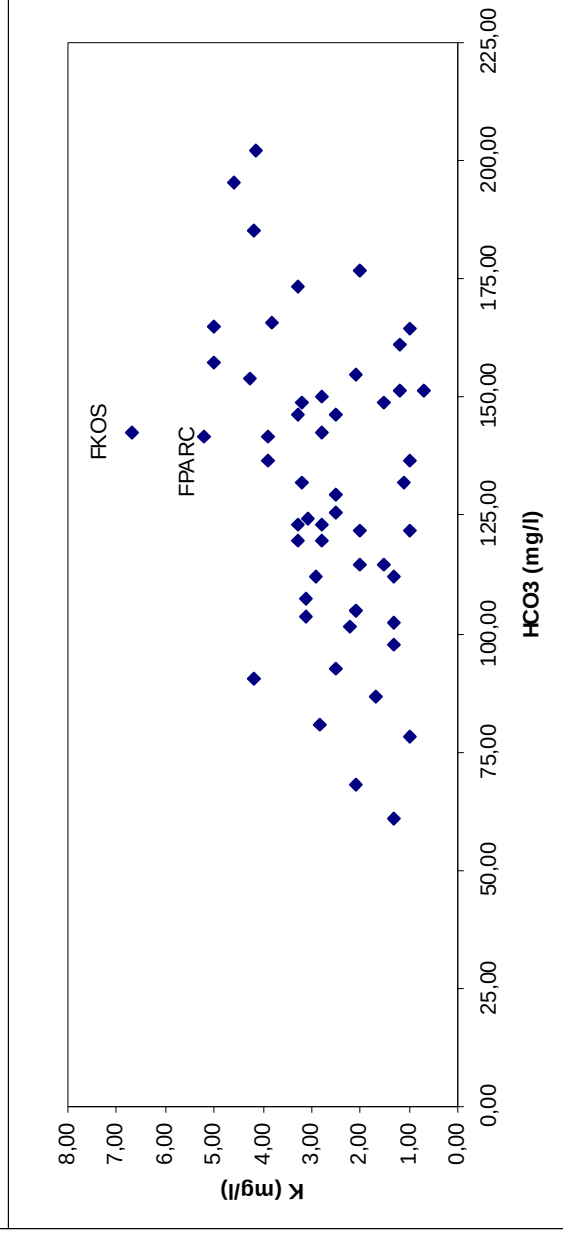


FIGURE 4.12 : Relation entre la teneur en Na⁺, en K⁺ et en HCO₃⁻ des eaux de la nappe de fissures/fractures de Ouagadougou

Les figures 4.12 (c) et (d) montrent que les corrélations entre Na, K et HCO_3^- sont moins significatives ; ce qui indique que les concentrations en Na et K peuvent être influencées par d'autres phénomènes que l'altération des silicates. Cette observation confirme celle de l'analyse en composantes principales qui indique que le potassium et le sodium pourraient avoir une origine externe au système eau-roche. Ce qui est la conséquence d'une forte pression anthropique.

III.2.3 - Les relations de la silice avec les bicarbonates

La relation entre la teneur en silice et celle des bicarbonates (*figure 4.13*) montre que la silice évolue linéairement avec les bicarbonates. On remarque qu'un seul point se distingue c'est le FKOS qui est sous forte pression anthropique.

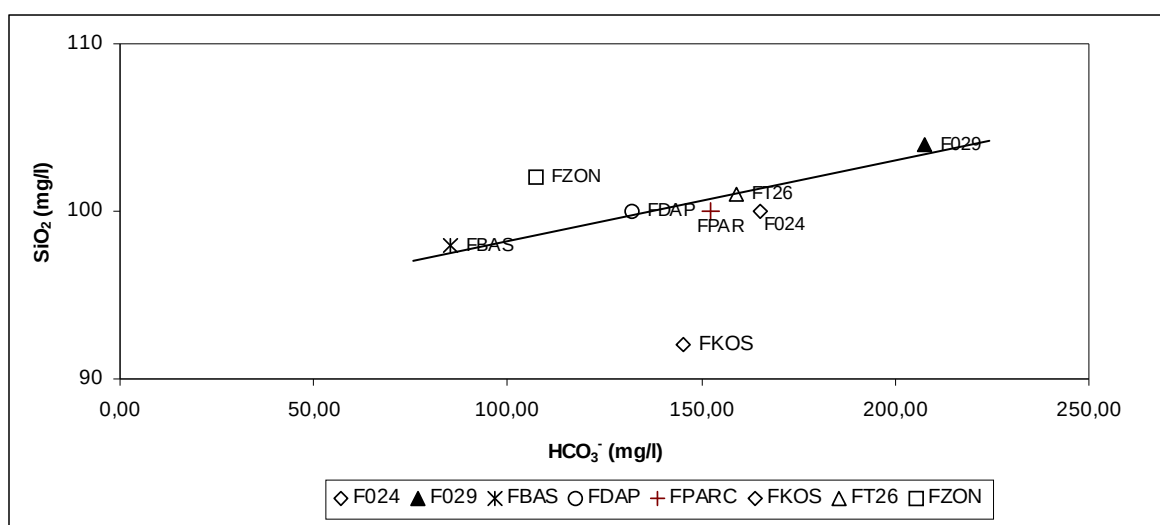


FIGURE 4.13 : Relation entre les teneurs moyennes en silice et en bicarbonates des eaux de forages suivis

III.2.4 - Les relations du sodium et du potassium avec les chlorures

L'évolution de la teneur en Na et K semble indépendante de la concentration en chlorures dans l'eau (figure 4.14). On remarque que la corrélation est plus lâche dans les deux cas. Ce qui est normal car il n'existe pas de minéraux riches en chlorure dans les roches de la zone d'étude. On ne rencontre des chlorures que dans l'apatite qui est en inclusion dans la biotite.

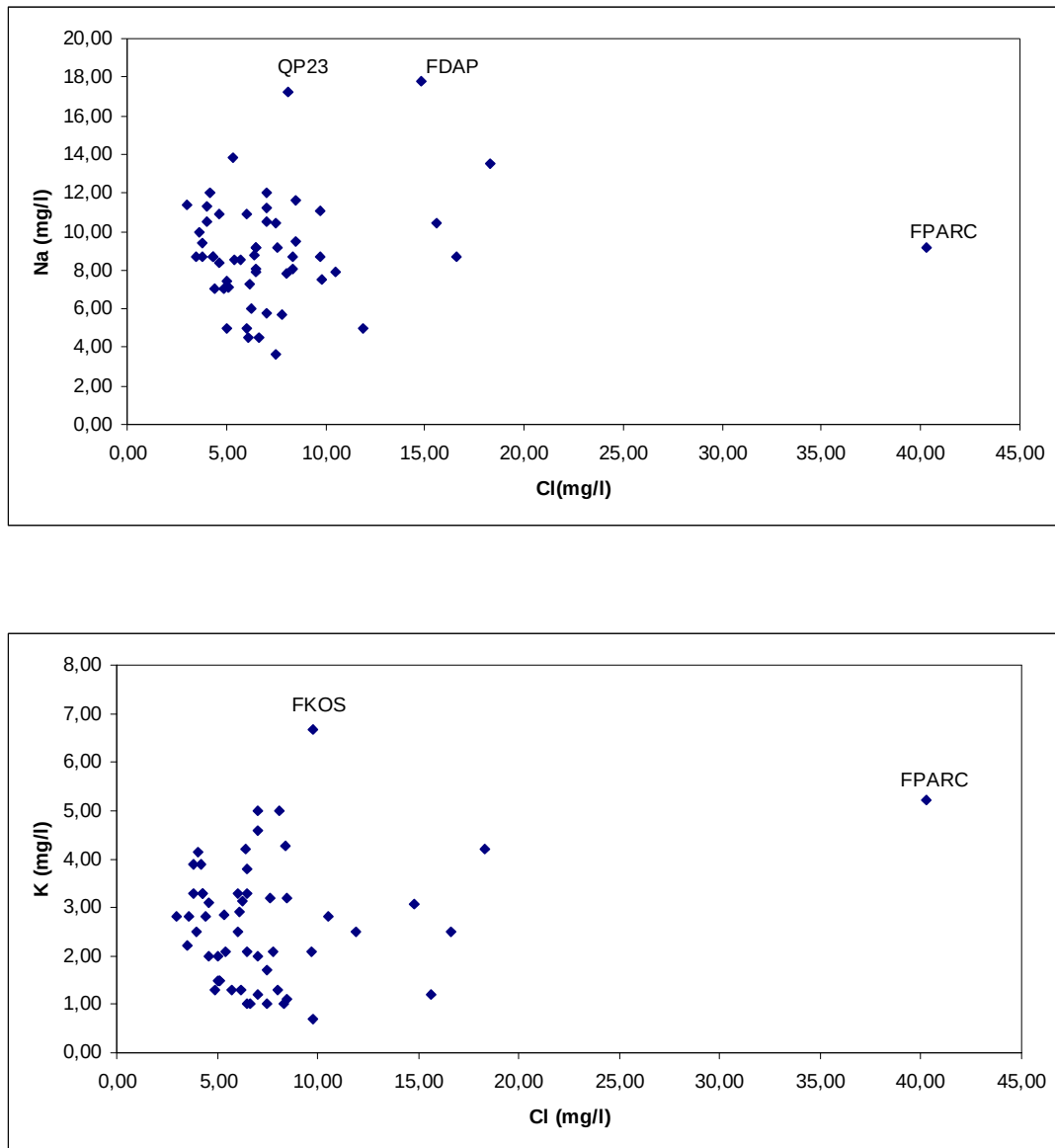


FIGURE 4.14 : Relation entre les teneurs en sodium, potassium et en chlorures des eaux des aquifères de fissures/fractures

III.2.5 - Les relations des sulfates et nitrates avec les chlorures

En général, les chlorures se rencontrent sous forme de traces dans les roches du socle cristallin (Travi et al., 1987) et il est de même pour les nitrates et les sulfates qui sont essentiellement fournis soit par oxydation des pyrites soit par l'apport météorique (Ousmane B., 1983).

On n'observe aucune relation significative entre les chlorures et les sulfates. Quelques points dans lesquels les concentrations en chlorures et sulfates sont fortes se distinguent. C'est le cas du FPARC pour lequel une origine commune anthropique est probable, mais dont les valeurs en chlorures ne s'accompagnent pas de valeurs élevées en nitrates. Ces dernières disparaissent peut être par dénitrification, ou sont absentes dans la source de pollution.

Il en est de même pour les teneurs en nitrates et en chlorures qui sont essentiellement élevées aux forages FT26 et FKOS mais sans excès de sulfates.

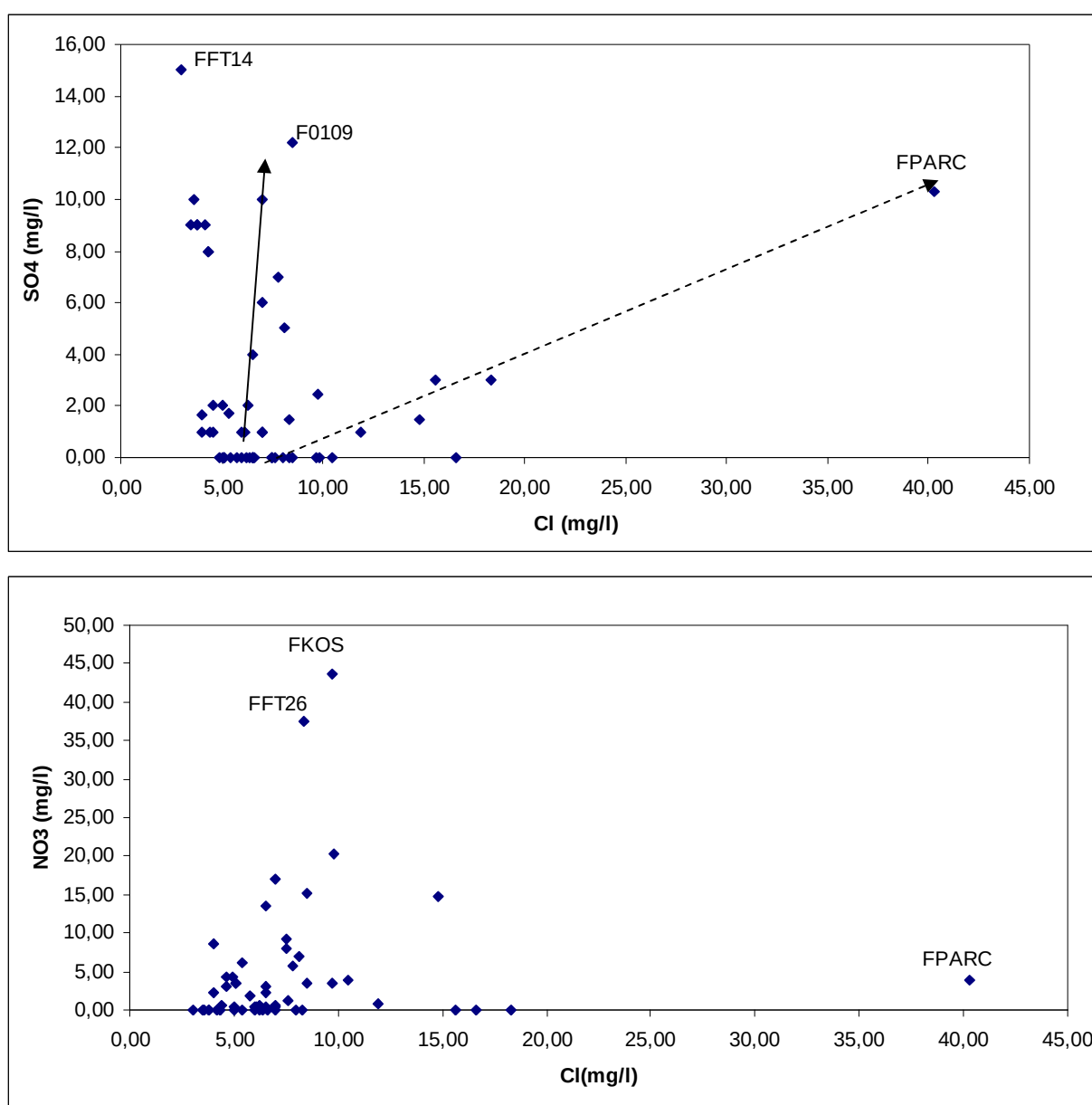


FIGURE 4.15 : Relation entre les teneurs en sulfates, nitrates et en chlorures des eaux de la nappe de fissures/fractures

III.3 - Faciès géochimiques des eaux

Les résultats des analyses chimiques des eaux des forages sont reportés sur le diagramme de Piper afin d'identifier les faciès chimiques.

L'analyse du diagramme (Figure 4.16) révèle deux types de faciès et une évolution vers un troisième faciès. Il s'agit du faciès bicarbonaté calcique pour une dizaine d'échantillons, et bicarbonaté calcique et magnésien. On voit que la majorité des analyses se situe dans le triangle des cations où aucun cation n'est dominant. On note dans le triangle des anions un début d'évolution du pôle bicarbonaté vers le pôle chlorures + nitrates traduisant une certaine atteinte anthropique. Ceci est particulièrement vrai pour certains forages ayant fait l'objet de suivi mensuel (FDAP, FPARC, FKOS, FFT26).

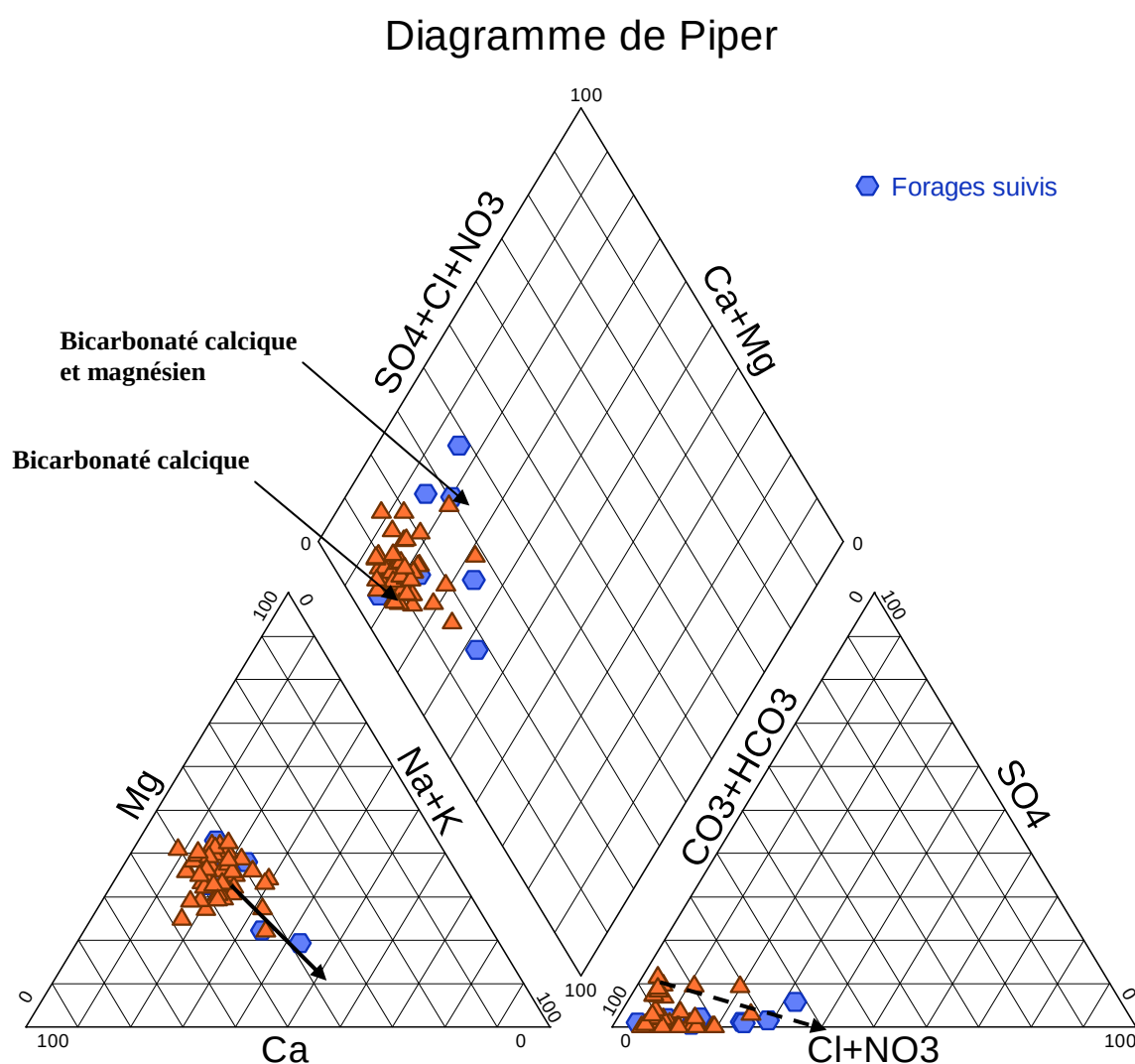


FIGURE 4.16 : Faciès chimique des eaux issues de forages

Le faciès bicarbonaté calcique et magnésien prédomine ; cependant quelques eaux évoluent vers le pôle chlorure + nitrate et correspondent aux échantillons qui ont des teneurs élevées en nitrates

souvent associées aux chlorures (FKOS, FT26). Cependant, le FPARC présente des teneurs élevées en chlorures et sulfates non associées à des nitrates.

La composition chimique des eaux de l'agglomération de Ouagadougou est de type bicarbonaté calcique pour les eaux qui se renouvellent rapidement : c'est le cas des forages situés dans une zone d'alimentation rapide (*FKOS et FT26 à la Figure 4.6*) et de type bicarbonaté calcique et magnésien pour celles qui ont séjourné dans la roche pendant longtemps. A ce faciès se mélangent des eaux récentes chargées de polluants d'origine anthropique.

La dominance cationique change selon les zones, ce qui reflète la variété des minéraux primaires soumis au processus d'altération dans le contexte de socle granitique recouvert d'altérites composées essentiellement d'argile kaolinique d'épaisseur importante suivant les zones (Compaoré, 1997).

La forte concentration en sodium de certaines eaux (FDAP, FBAS, F0107) confirme la l'influence anthropique et la participation de certaines roches basiques n'est pas à négliger. Ce groupe de forages se situe dans les zones d'étude II et III à forte pression anthropique ; ce qui explique cet enrichissement en chlorures qui d'une manière générale est faible dans les réservoirs cristallins (Travi et al, 1997).

III.4 - Evolution temporelle des anions

L'étude de l'évolution temporelle des bicarbonates sur la figure 4.17 semble montrer une légère augmentation des concentrations en saison sèche (novembre, décembre et janvier) pour les forages F029 et FBAS et novembre à décembre pour les forages FT26, FKOS et FPARC c'est-à-dire dans la période qui suit immédiatement la saison des pluies.

Ces teneurs baissent nettement au FT26 en juillet et août, vraisemblablement par dilution en pleine saison des pluies.

Pour les chlorures à la figure 4.18 tout spécialement et pour les sulfates à un degré moindre à la figure 4.19, on observe une augmentation importante au cœur de la saison des pluies. Ceci est particulièrement significatif pour le forage comme FPARC, où les concentrations en chlorures et en sulfates sont élevées. Cette observation accrédite l'idée d'une arrivée d'eau souillée depuis les horizons supérieurs et la surface.

Pour les nitrates à la figure 4.20, seuls les forages FKOS et FT26 accusent une baisse significative en juillet au cœur de la saison des pluies et en octobre 2004 à la fin de cette même saison de pluies quand la nappe est en charge. On pourrait penser à un effet de dilution, mais l'épaisseur des altérites ne plaide pas dans ce sens. On remarquera que le forage FPARC n'est pas affecté par ce phénomène.

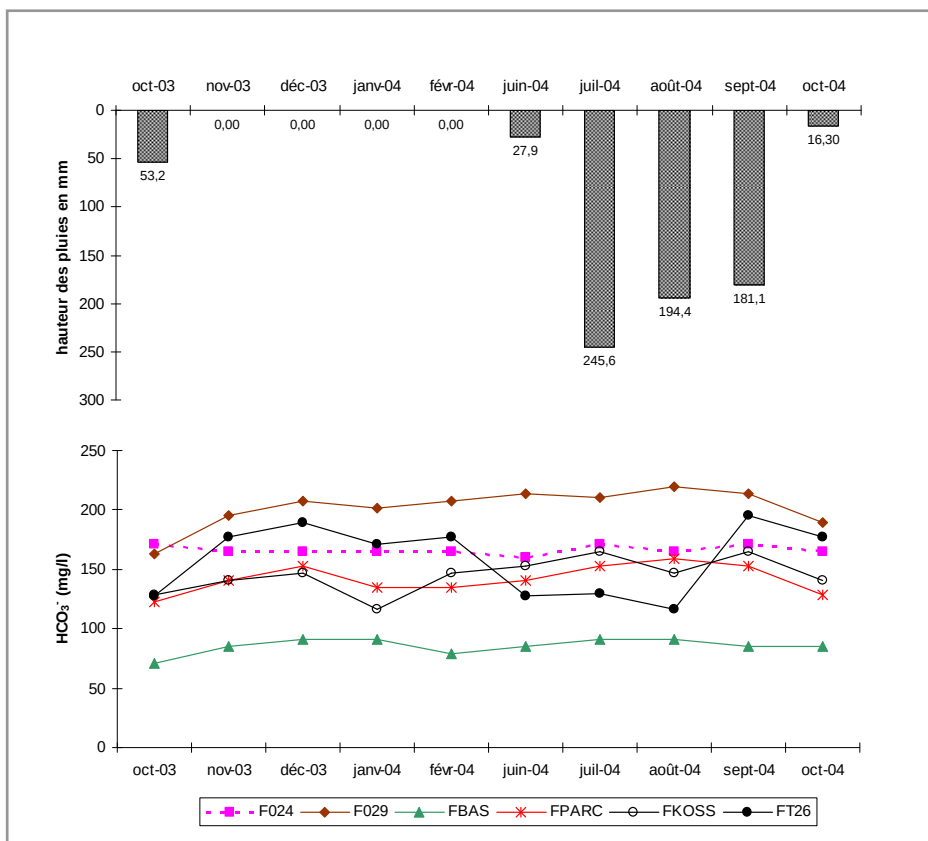


FIGURE 4.17 : Variation temporelle des teneurs en HCO_3^- dans les eaux de forages suivis

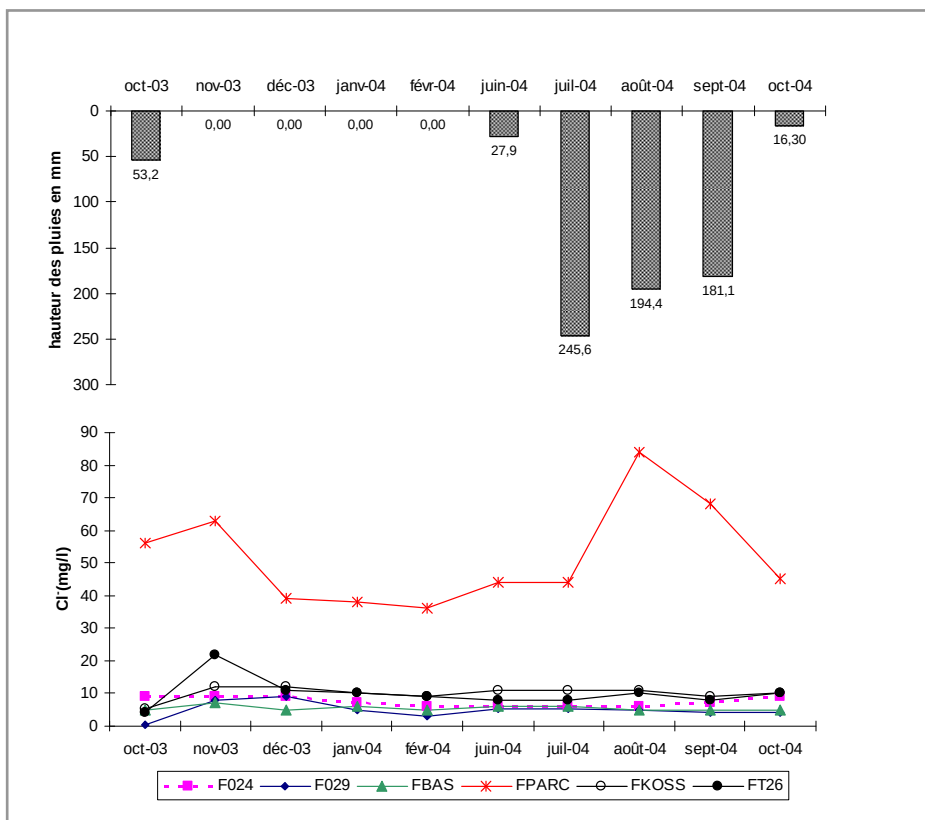


FIGURE 4.18 : Variation temporelle des teneurs en Cl^- dans les eaux de forages suivis

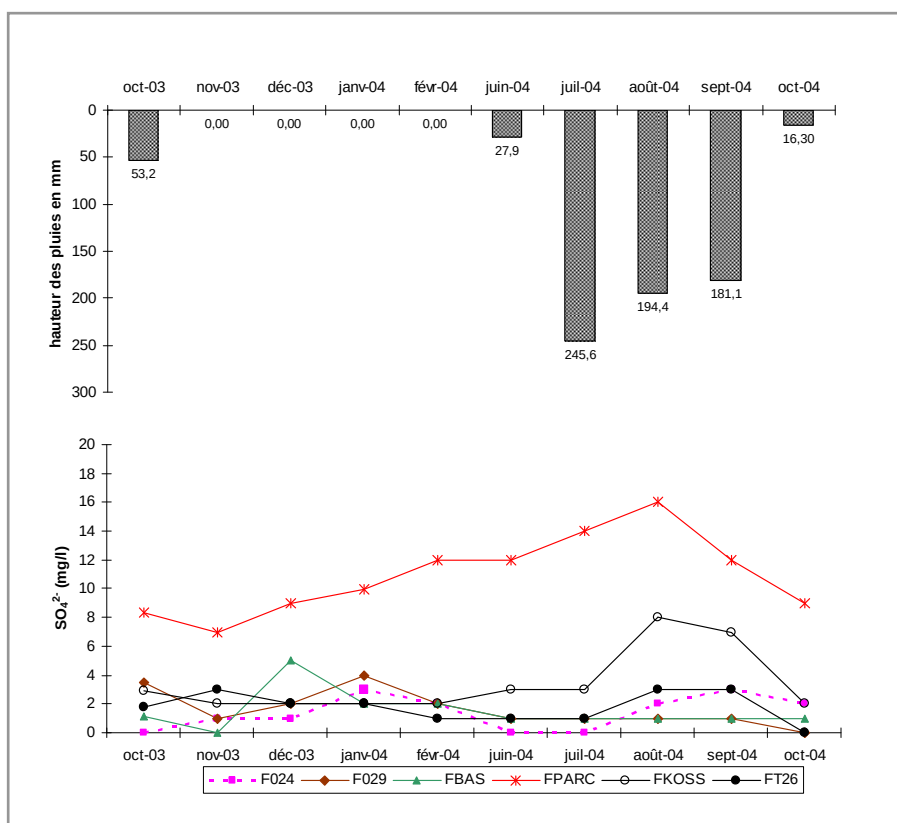


FIGURE 4.19 : Variation temporelle des teneurs en sulfates dans les eaux de forages suivis

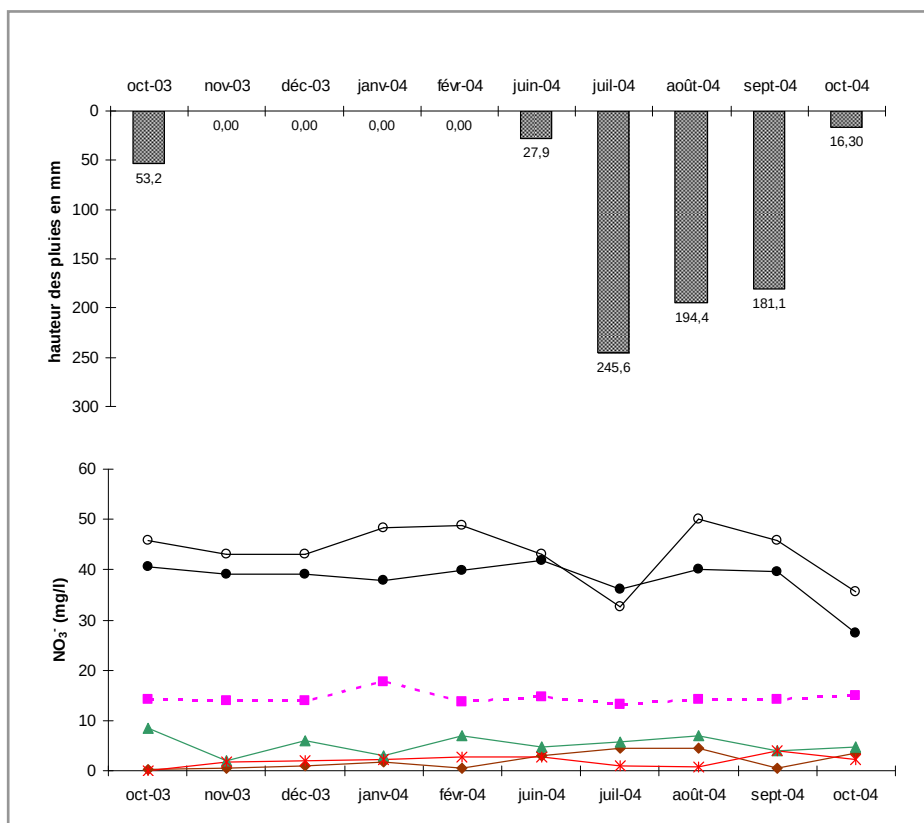


FIGURE 4.20 : Variation temporelle des teneurs en nitrates dans les eaux de forages suivis

L'analyse de l'évolution temporelle des teneurs des différents anions révèle que :

- 1) plusieurs processus interviennent dans la minéralisation des eaux souterraines de la zone d'étude. Il s'agit : de l'arrivée des eaux souillées en certains endroits de la nappe, avec des phénomènes de concentration et de dilution pour les éléments anthropiques externes au système aquifère ; des phénomènes d'altération de minéraux qui augmentent les teneurs en bicarbonates ;
- 2) il existe deux familles de forages : les forages à eaux peu minéralisées où les tendances saisonnières montrent des teneurs relativement stables des ions d'une part ; les forages à eaux plus minéralisées FKOS et FT26 voisins montrant des augmentations simultanées pour les nitrates et les sulfates (*figure 4.21*) en fin de saison des pluies d'autre part ;
- 3) la présence conjointe de nitrates et sulfates dans ces deux ouvrages s'explique par le fait qu'ils exploitent la même fracture. (§ *Carte de fracturation figure 4.4*). Ce sont des ouvrages très vulnérables à la pollution. Ces résultats confirment que le système de fracturation des aquifères est à prendre en compte pour localiser les zones particulièrement vulnérables donc à protéger.

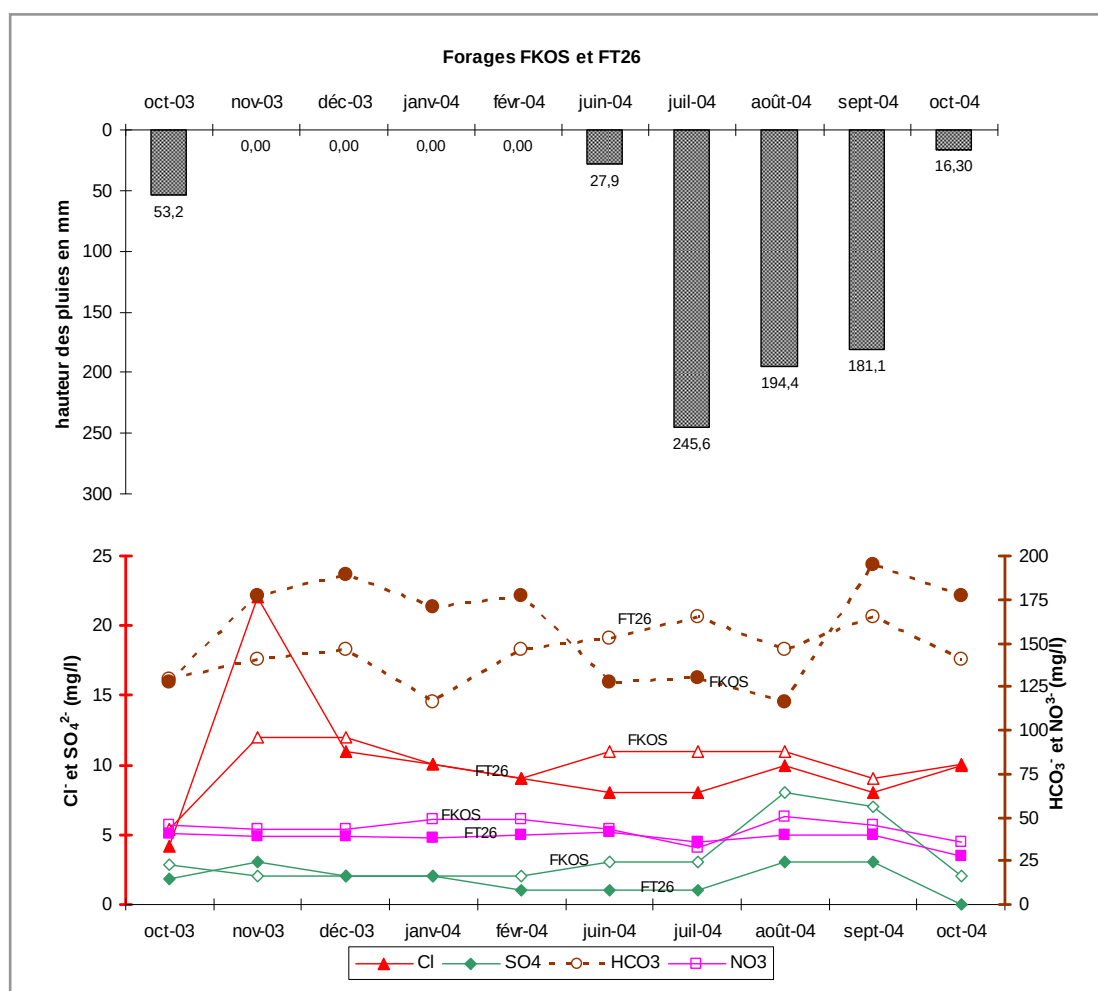


FIGURE 4.21 : Variation temporelle des teneurs en bicarbonates, chlorures, nitrates et sulfates dans les eaux des FKOS et FT26

III.5 – Conclusion

La représentation sur le diagramme de Piper (*figure 4.16*) de certaines eaux du socle de Ouagadougou indique bien, pour la grande majorité de celles-ci, une composition à dominante bicarbonatée calcique et magnésienne. Ces résultats confirment ceux de Savadogo sur les roches du Burkina, 1984 ; comme celles de Korogho en Côte d'Ivoire (Faillat, 1986 ; Jourda 2005) et du Liptako (Ousmane, 1988). Toutes ces eaux sont de même famille chimique, elles ne diffèrent généralement entre elles que par leur niveau de concentrations ioniques qui varie suivant l'environnement immédiat fortement anthropisé de l'agglomération de Ouagadougou.

De ce constat, il ressort que chaque ouvrage semble avoir sa réaction propre en socle cristallin, la configuration en poches plus ou moins discontinue des nappes n'autorise pas une circulation générale des eaux. Ceci semble confirmer les observations hydrogéologiques qui montrent que les différents forages sont atteints de manière différente par les pluies efficaces.

IV - LES EAUX SOUTERRAINES DE LA NAPPE DES ALTERITES

Les paragraphes précédents ont montré la complexité de la caractérisation chimique des eaux de la ville. L'objectif de ce paragraphe est de rechercher l'impact de la forte pression anthropique domestique au niveau de la nappe des altérites captée par les puits traditionnels et les puits modernes à grand diamètre.

Dans ce paragraphe l'étude de la nappe des altérites est faite à partir des résultats d'analyses d'une dizaine de puits et d'un piézomètre (CIEH) choisis dans le cadre de l'étude. Ces ouvrages captent le premier aquifère des altérites, constitué essentiellement par le recouvrement quaternaire (cuirasses latéritiques, argiles kaoliniques, sables) et les arènes grenues.

IV.1 - Les caractéristiques chimiques des eaux

Le traitement statistique de 100 analyses incomplètes en ce qui concerne la silice (40 analyses) présente les valeurs des concentrations moyennes et caractéristiques avec des écarts types parfois supérieurs aux valeurs moyennes pour les ions K^+ , et SO_4^{2-} (tableau 4.8).

TABLEAU 4.8 : Concentrations moyennes en éléments majeurs de 100 analyses des eaux de la nappe des altérites

mg/l	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	SiO_2 n = 40
Moyenne	30.61	10.39	22.82	10.04	121.93	43.35	8.05	35.49	41.40
Médiane	26.00	9.99	16.80	5.76	98.85	34.04	1.00	19.18	36
mini	6.80	1.44	4.20	0.40	17.00	2.89	0.00	0.00	17
maxi	78.00	30.96	88.00	47.29	378.20	165.88	37.00	157.52	100
écart type	17.15	5.58	18.02	10.82	81.73	34.49	9.24	34.46	22.50
CV %	56.03	53.71	78.96	105.60	67.03	79.56	114.77	97.10	54.30

Par ordre d'importance, les bicarbonates sont les ions dominants avec un maximum de 378 mg/l. On voit que les sulfates, potassium, et nitrates, varient énormément avec des coefficients de variation élevés de l'ordre de 115 %, 106 %, 97 %. La teneur moyenne en potassium est de 10.25 mg/l.

La présence des nitrates, des chlorures, du sodium et du potassium semble être la conséquence des activités anthropiques.

IV.1.1 - Les cations

La figure 4.22 montre la répartition statistique des cations.

L'histogramme d'abondance des cations montre une distribution dissymétrique pour le Na^+ et K^+ , alors que celui du Ca^{2+} et Mg montre une distribution plus ou moins normale avec des coefficients de variation relativement élevés 56% et 54%. Les valeurs de Ca^{2+} sont majoritairement comprises entre 15mg/l et 30 mg/l et celles du magnésium entre 5mg/l et 15 mg/l.

Si on considère les valeurs en mg/l, les cations présentent l'ordre d'abondance suivant :

$$\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+.$$

L'ion sodium arrive après l'ion Ca^{2+} et est très abondant dans certaines eaux. Une dizaine d'analyses ont des concentrations en Na^+ supérieure à 45 mg/l. Ce sont celles des puits PDAP et PZOB avec pour environnement immédiat des latrines.

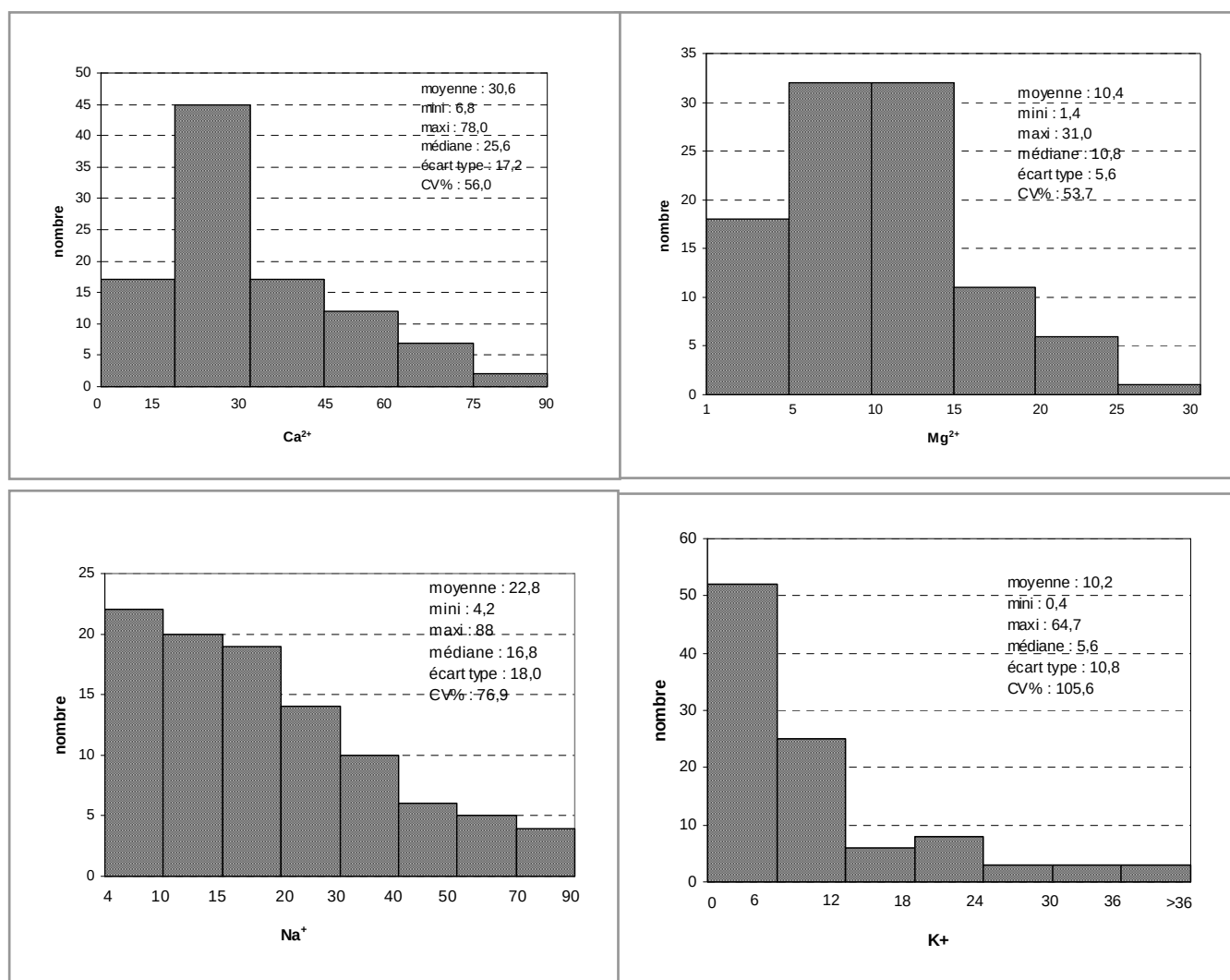


FIGURE 4.22 : Distribution des teneurs en cations de 100 analyses des eaux des puits de la nappe des altérites

IV.1.2 - Les anions

En ce qui concerne les anions, les histogrammes de la figure 4.23 sont dissymétriques dans l'ensemble. Les ions bicarbonates dominent largement les autres. C'est l'ion dont les variations de concentration ont les plus grandes amplitudes. On enregistre un minimum de 17 mg/l et un maximum de 378.5 mg/l soit 6.2 méq/l. Ensuite viennent les chlorures, les nitrates, puis les sulfates qui sont importants dans dix-sept cas.

On observe des coefficients de variations très élevées pour les ions sulfates et les nitrates avec un écart type supérieur à la valeur moyenne pour les sulfates. Quant aux ions nitrates, les concentrations peuvent être particulièrement élevées comme au mois d'août au PDAP avec 157.5 mg/l.

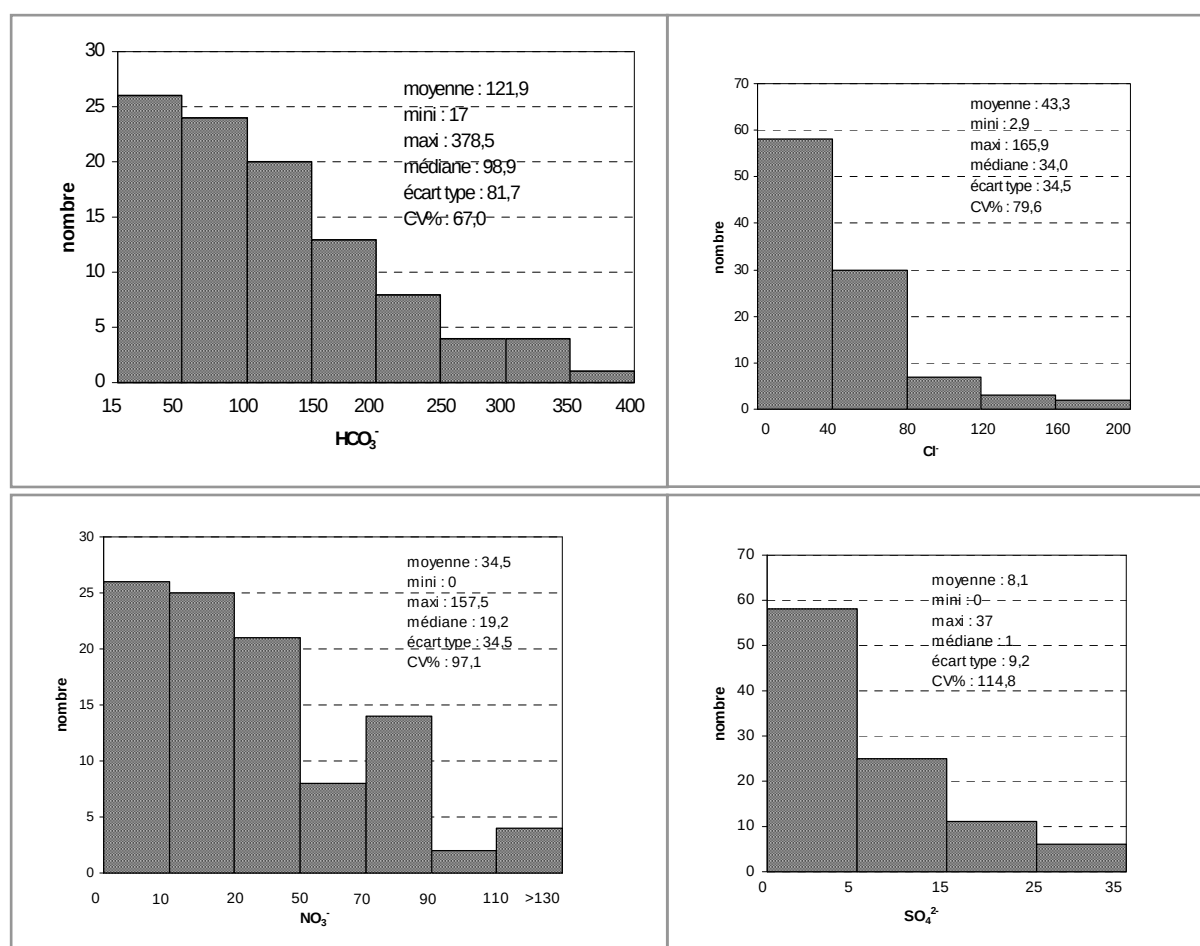


FIGURE 4.23 : Distribution des teneurs en anions de 100 analyses des eaux des puits de la nappe des altérites

Cette concentration est trois fois supérieure aux normes de potabilité de l'OMS (50 mg/l). Etant donné son importance sanitaire, cette question sera examinée en détail dans le chapitre sur la pollution.

D'une manière générale, les analyses présentant des fortes concentrations de HCO_3^- ont comme cations dominants le Ca^{2+} ou le Na^+ . Les analyses influencées par les fortes concentrations en NO_3^- et Cl^- montrent des cations dominants variables soit : $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$ ou $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$.

L'aquifère de la nappe des altérites est essentiellement constitué de roches fortement lessivées ce qui normalement expliquerait la faible minéralisation générale hormis pour les éléments anthropiques comme les ions nitrates, chlorures et sulfates.

IV.2 - Les corrélations

Dans le tableau 4.9 ci-après sont reportés les indices de corrélation entre les différents éléments chimiques.

TABLEAU 4.9 : Matrice de corrélation des eaux de la nappe des altérites

	T°C	pH	c25°C	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	SiO ₂
T°C	1											
pH	-0,57	1,00										
c25°C	0,46	-0,18	1,00									
Ca ²⁺	0,18	0,06	0,72	1,00								
Mg ²⁺	0,60	-0,17	0,45	0,62	1,00							
Na ⁺	0,31	0,14	0,88	0,74	0,49	1,00						
K ⁺	0,12	0,32	0,68	0,76	0,64	0,86	1,00					
HCO ₃ ⁻	-0,03	0,22	0,73	0,90	0,45	0,84	0,82	1,00				
Cl ⁻	0,53	-0,13	0,60	0,70	0,67	0,78	0,67	0,64	1,00			
SO ₄ ²⁻	-0,27	0,25	0,06	0,57	0,32	0,39	0,53	0,62	0,62	1,00		
NO ₃ ⁻	0,68	-0,23	0,21	0,08	0,65	0,07	0,16	-0,19	0,17	-0,38	1,00	
SiO ₂	0,29	-0,60	-0,06	-0,27	0,18	-0,39	-0,27	-0,36	-0,41	-0,57	0,39	1,00

A l'examen de ce tableau, quelques remarques s'imposent :

- le calcium est très bien lié avec les bicarbonates, le potassium, le sodium, les chlorures et plus discrètement avec le magnésium ;
- la conductivité est bien corrélée avec le sodium, les bicarbonates, le calcium, et dans un moindre degré avec le potassium, et les chlorures ;
- le sodium est très bien corrélé au potassium, aux bicarbonates, et aux chlorures ;
- le potassium est lié aux bicarbonates et plus faiblement aux chlorures et sulfates ;
- le magnésium est très peu lié aux chlorures, aux nitrates et au potassium ;

- les bicarbonates sont liés aux chlorures et aux sulfates de manière discrète ;
- enfin chlorures et sulfates sont discrètement liés.

IV.2.1 - Les relations des cations avec les bicarbonates

D'une manière générale, les diagrammes binaires (*figure 4.24*) établissent les relations de chaque élément (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), avec les HCO_3^- et montrent qu'il existe une corrélation linéaire significative entre ces cations et les ions bicarbonates.

Pour le calcium, il apparaît clairement que la mise en solution à partir des minéraux aluminosilicates calciques sous l'action du CO_2 dissous dans l'eau est le processus dominant $\text{Ca} = f(\text{HCO}_3^-)$. La relation est bien établie entre ces deux éléments à travers un coefficient de corrélation proche de $R = 0.9$. Le système étudié étant ouvert, le CO_2 biogénique diffuse très facilement dans la nappe au niveau des zones où la surface piézométrique est très peu profonde en période de hautes eaux. Ce processus augmente l'acidité des eaux à certains endroits et fournit une partie importante des bicarbonates à la nappe. Il y a le CO_2 atmosphérique mais ce sont surtout les activités biologiques qui produisent du CO_2 à partir des matières organiques du sol, pédologiques et anthropiques. La relation est bonne pour le sodium et le potassium, mais plus lâche pour le magnésium en raison d'un probable apport extérieur au système roche.

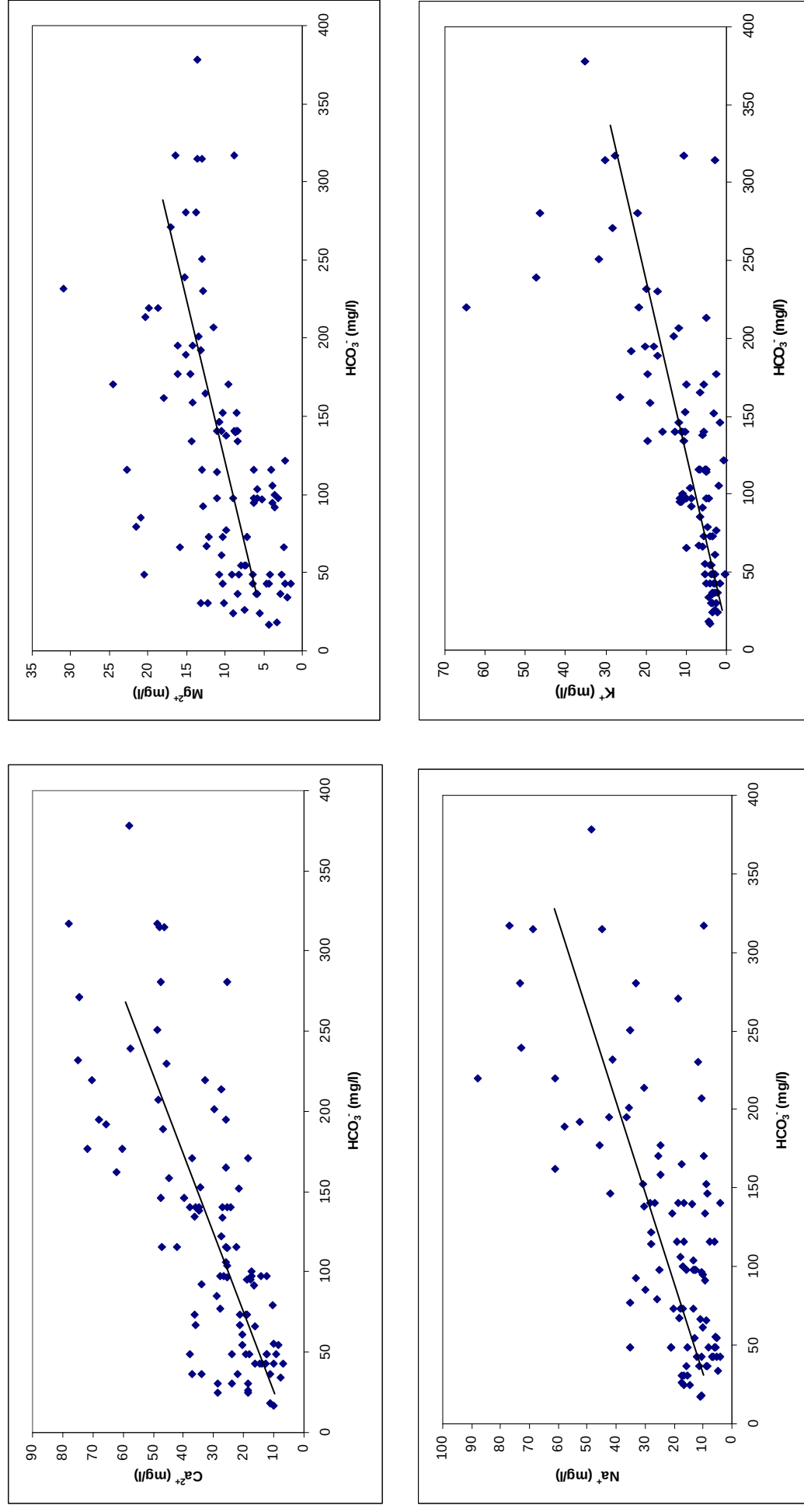


FIGURE 4.24 : Relation entre les teneurs en Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et HCO_3^- des eaux de la nappe d'altérites de Ouagadougou

IV.2.2 - Les relations des cations avec la silice

Il n'y a pas de relation perceptible des concentrations en calcium, magnésium, et potassium avec la silice. Il existe par contre un lien plus ou moins significatif avec le sodium (*Figure 4.25*) où un seul point (à charge minérale élevée) s'écarte. La relation $\text{SiO}_2 / \text{Na}^+$ semble provenir du phénomène d'altération des silicates qui libère des bicarbonates de la silice et du sodium.

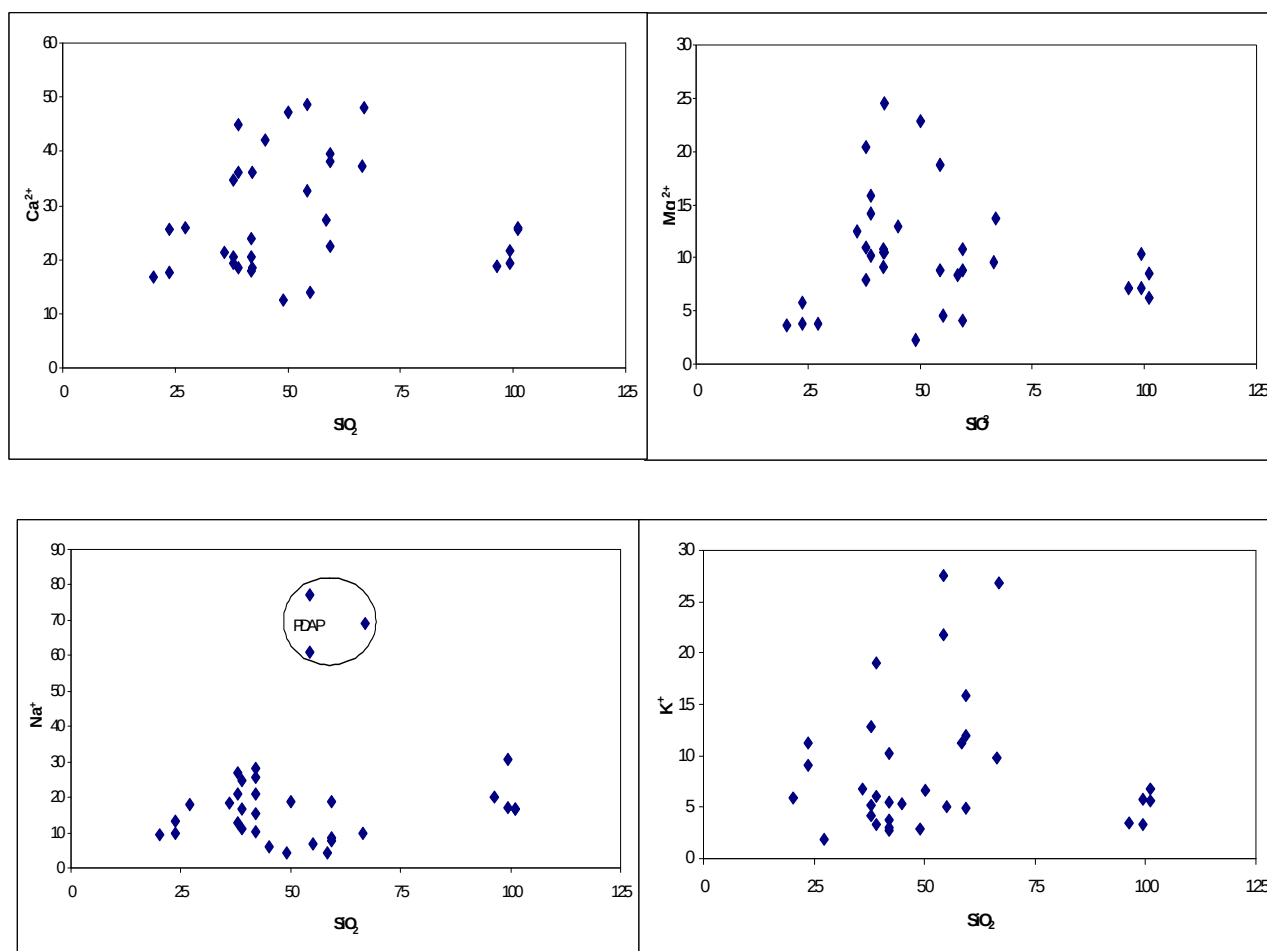


FIGURE 4.25 : Relation entre les teneurs en Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et SiO_2 des eaux de la nappe des altérites de Ouagadougou

IV.2.3 - Les relations des cations avec les chlorures

Sur les figures 4.26 a, b, c, d on observe une corrélation linéaire entre chlorures et sodium mais également entre chlorures et calcium, magnésium et potassium, hormis quelques points qui s'en détachent.

On remarque que les teneurs en chlorures et sodium varient de façon univoque avec l'augmentation de la minéralisation (*figure 4.26 c*) jusque dans les eaux des puits, les plus concentrés PDAP et PZOB. Pour le magnésium on observe deux tendances : la première concerne les eaux les moins minéralisées et la deuxième les eaux les plus minéralisées (flèche en tireté). Ceci laisse penser qu'il existe des sources de pollution spécifiques dans l'environnement de ces deux familles.

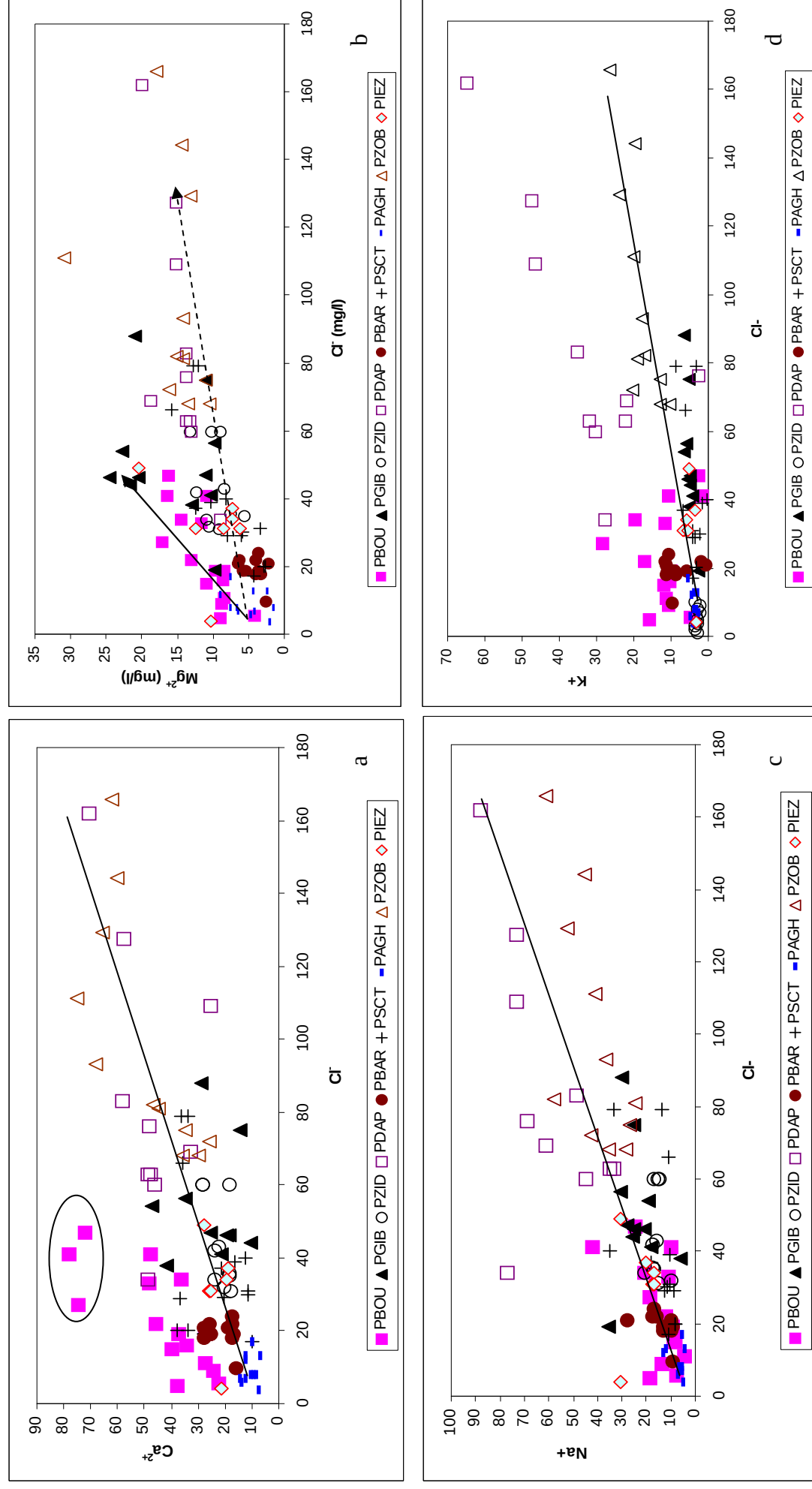


FIGURE 4.26 : Relation entre les teneurs en Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et Cl^- des eaux de la nappe d'altérites de Ouagadougou

IV.2.4 - Les relations entre anions et chlorures

Pour les ions bicarbonates, on ne note aucune relation significative avec les chlorures (figure 4.27 a) ce qui semble confirmer que ces fortes concentrations en chlorures dans l'eau sont influencées par d'autres phénomènes que l'altération des silicates.

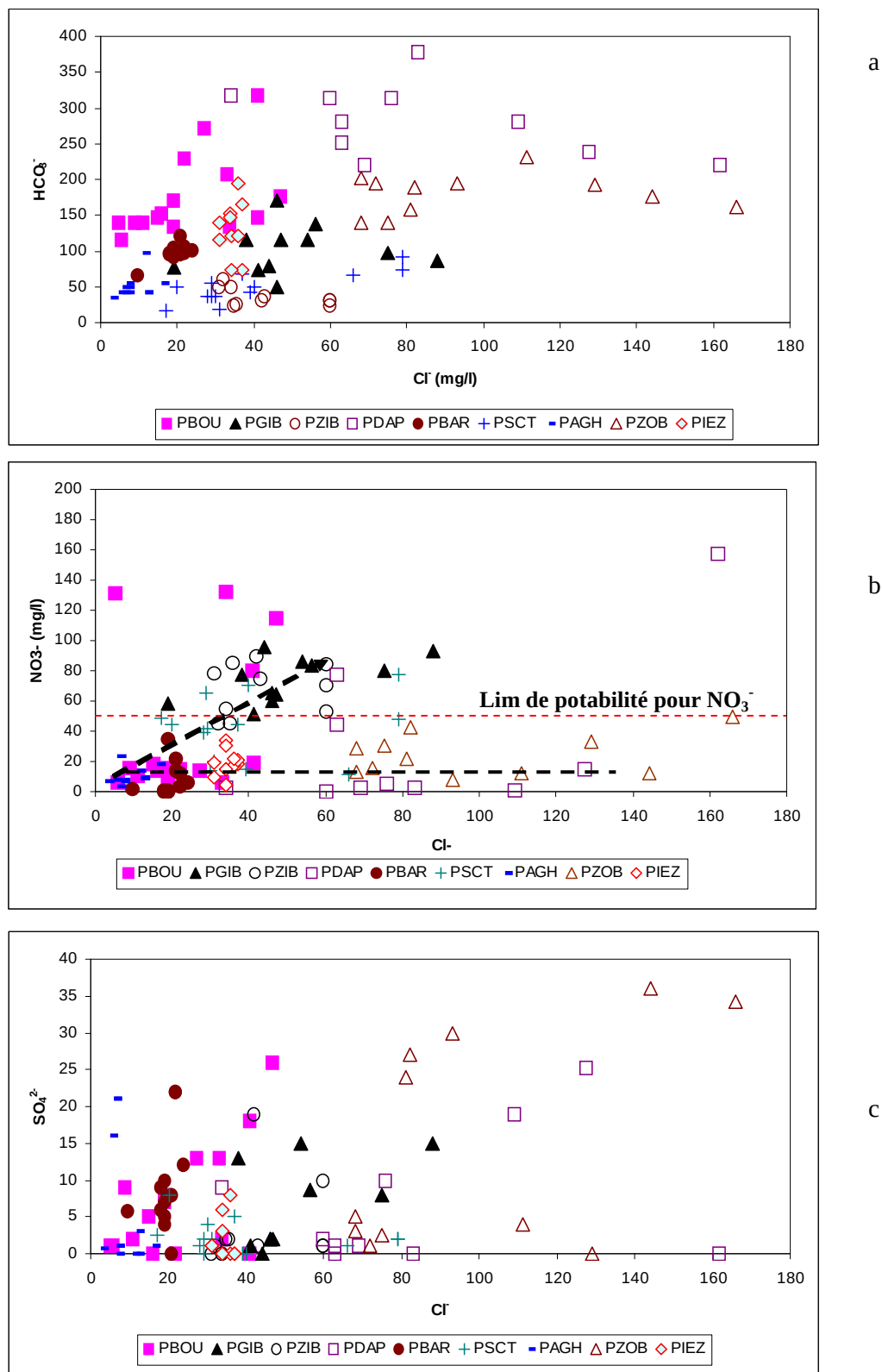


FIGURE 4.27 : Relation entre les teneurs en HCO_3^- NO_3^- SO_4^{2-} et Cl^- des eaux de la nappe des altérites de Ouagadougou

Une relation entre chlorures et sulfates est perceptible (*figure 4.27 c*) avec une augmentation simultanée ; les fortes concentrations se retrouvent dans les mêmes eaux surtout à la fin de la saison des pluies en octobre période où la nappe se recharge.

Pour la relation nitrates-chlorures deux tendances se révèlent. L'une consiste en une augmentation simultanée des nitrates avec les chlorures jusqu'à des pics de 100 mg en nitrates (*flèche en tirets de la figure 4.27 b*) ensuite, on observe un décrochage qui intervient après le pic de recharge dans certains puits, exemple du PDAP. L'autre se traduit par des valeurs faibles en nitrates alors que les concentrations en chlorures augmentent beaucoup. Il est alors possible que les nitrates aient subi un phénomène de dénitrification.

IV.3 - Faciès géochimiques des eaux des altérites

On note trois faciès (figure 4.28). Quelque soit la saison, les faciès de type chloruré prédominent dans la zone d'étude ; ils sont suivis de faciès de type bicarbonaté calcique et magnésien avec quatre échantillons sur neuf. Seul le PDAP se retrouve au pôle carbonaté sodique et potassique en saison sèche.

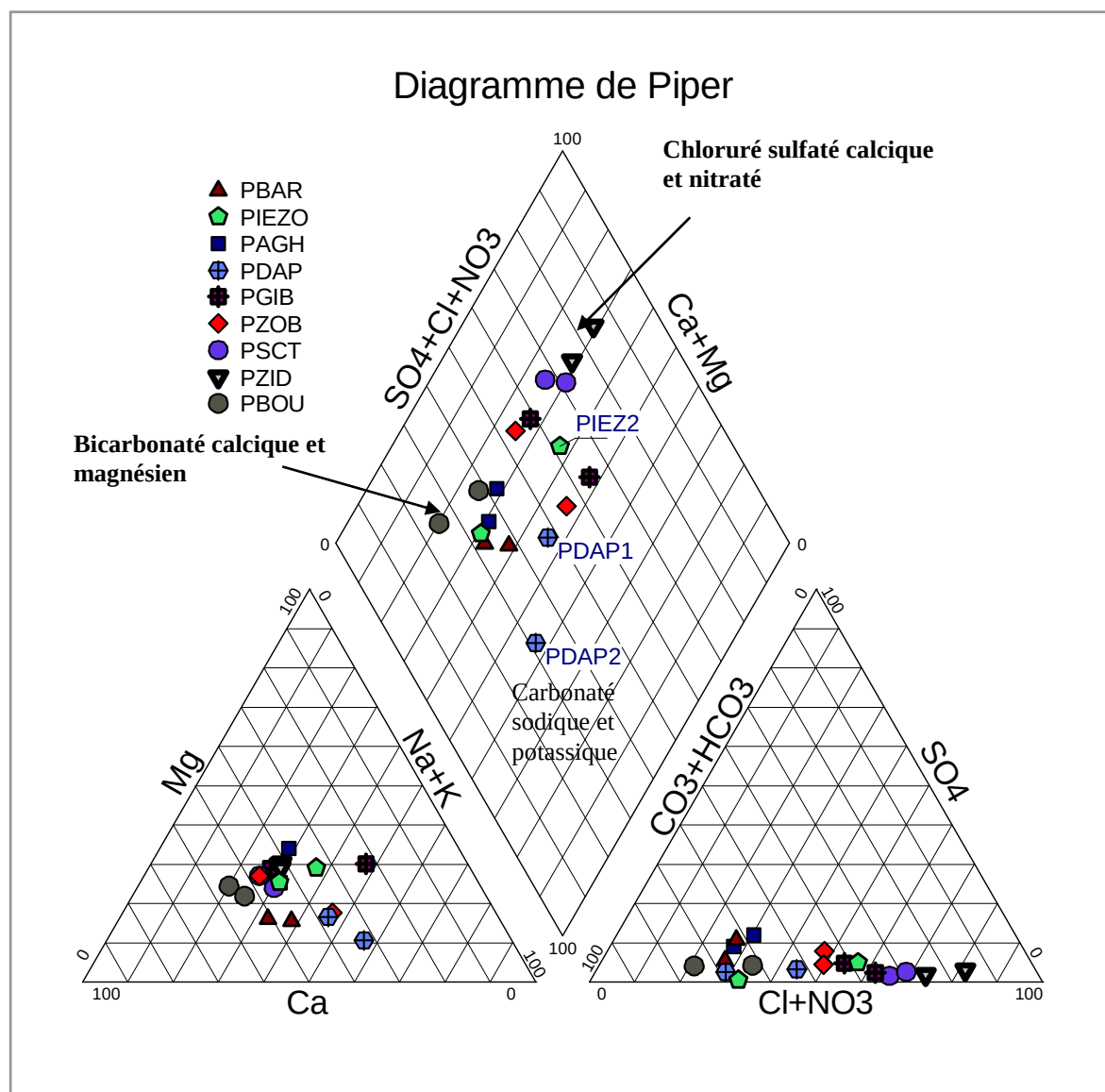


FIGURE 4.28 : Faciès chimique des eaux de puits (concentrations moyennes des ions en mg/l chaque point d'eau est représenté deux fois 1 : la saison de pluies ; 2 : saison sèche)

Pour l'ensemble des prélèvements les faciès de type chloruré font plus de 55 % des eaux analysées et cette prédominance des chlorures associés aux nitrates et sulfates s'explique par la forte pression anthropique.

IV.4 - Evolution temporelle des éléments

La comparaison en début de saison pluvieuse, le suivi de la variation temporelle des ions, montre une brusque augmentation de certains ions en août pour les puits PBOU, PDAP, et PSCT due à la pollution anthropique.

IV.4.1 - Evolution temporelle de cations

En juillet on remarque une croissance des teneurs en sodium (Na^+) au puits PSECT. On observe un pic de concentration du Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ au mois d'août au PBOU et PDAP dans lesquels les eaux deviennent plus minéralisées. Pendant ce mois, les teneurs en calcium et sodium augmentent au puits PGIB. En septembre, mois pendant lequel les nappes sont en recharge, on observe une augmentation des teneurs en calcium et magnésium au PZOB. Ces augmentations peuvent être dues à l'arrivée des eaux polluées de surface, comme aussi à la remontée du niveau piézométrique jusqu'à la zone superficielle polluée.

Ces cations qui augmentent en même temps semblent indiquer le même processus de minéralisation des eaux de ces nappes. Tous ces pics sont suivis par une diminution des teneurs ce qui met en évidence un phénomène de dilution dans des réserves préexistantes.

IV.4.2 - Evolution temporelle des anions

Dans ces mêmes puits les chlorures augmentent simultanément avec les nitrates en juillet pour le PSECT et en août pour les puits PBOU, PDAP et PGIB ce qui semble indiquer la même source pour ces ions.

L'augmentation des concentrations en nitrates dès les fortes pluies varient de près d'un facteur 3 entre la saison des pluies et la saison sèche (*figure 4.29*). Elle est due au phénomène de pluviolessivage Faillat, (1987). Les polluants drainés par les eaux d'infiltration, atteignent leur concentration maximale au mois d'août et sont par la suite dilués. Les concentrations en nitrates baissent ensuite en même temps que les hauteurs des pluies. On n'observe pas une surconcentration des polluants qui semblent se dissoudre et se disperser dans des réserves d'eau importantes par rapport aux apports saisonniers de la recharge.

L'importance des teneurs en nitrates (157.5 mg/l au puits PDAP en août 2004) et le rôle que joue ce dernier du point de vue potabilité des eaux impose d'examiner en détail le problème de sa provenance seulement esquissée ici.

Les ions qui sont conservatifs comme les chlorures ont des teneurs qui augmentent en saison humide, (puits PBOU, PGIB). Ils se reconcentrent dans les puits PBAR, PZOB, PAGH en saison sèche par évaporation.

Ces graphes montrent qu'il existe une très bonne corrélation entre la concentration du calcium, magnésium, sodium et les hauteurs de précipitations d'une part celles des nitrates, des chlorures, et des

hauteurs de précipitations d'autre part. Ces évolutions temporelles simultanées signifient clairement que les polluants rejoignent les nappes pendant la période de recharge qui survient pendant les fortes pluies des mois de juillet et d'août pour certains ouvrages et septembre pour d'autres.

L'étude de la variation temporelle montre que les teneurs de certains en cations et anions augmentent sous l'effet de l'infiltration directe des eaux de pluie comme par exemple dans le puits PBOU (*figure 4.29*) alors que d'autres ont vu les concentrations en cations et anions baisser entre octobre 2003 et en début de saison des pluies de 2004 dans certains puits comme par exemple dans le puits PZOB (*figure 4.30*). Le phénomène de lessivage lors de l'infiltration de l'eau de pluies, de même que les phénomènes d'interaction eau-roche réservoir peuvent expliquer l'augmentation des teneurs en cations dans les eaux pendant la recharge

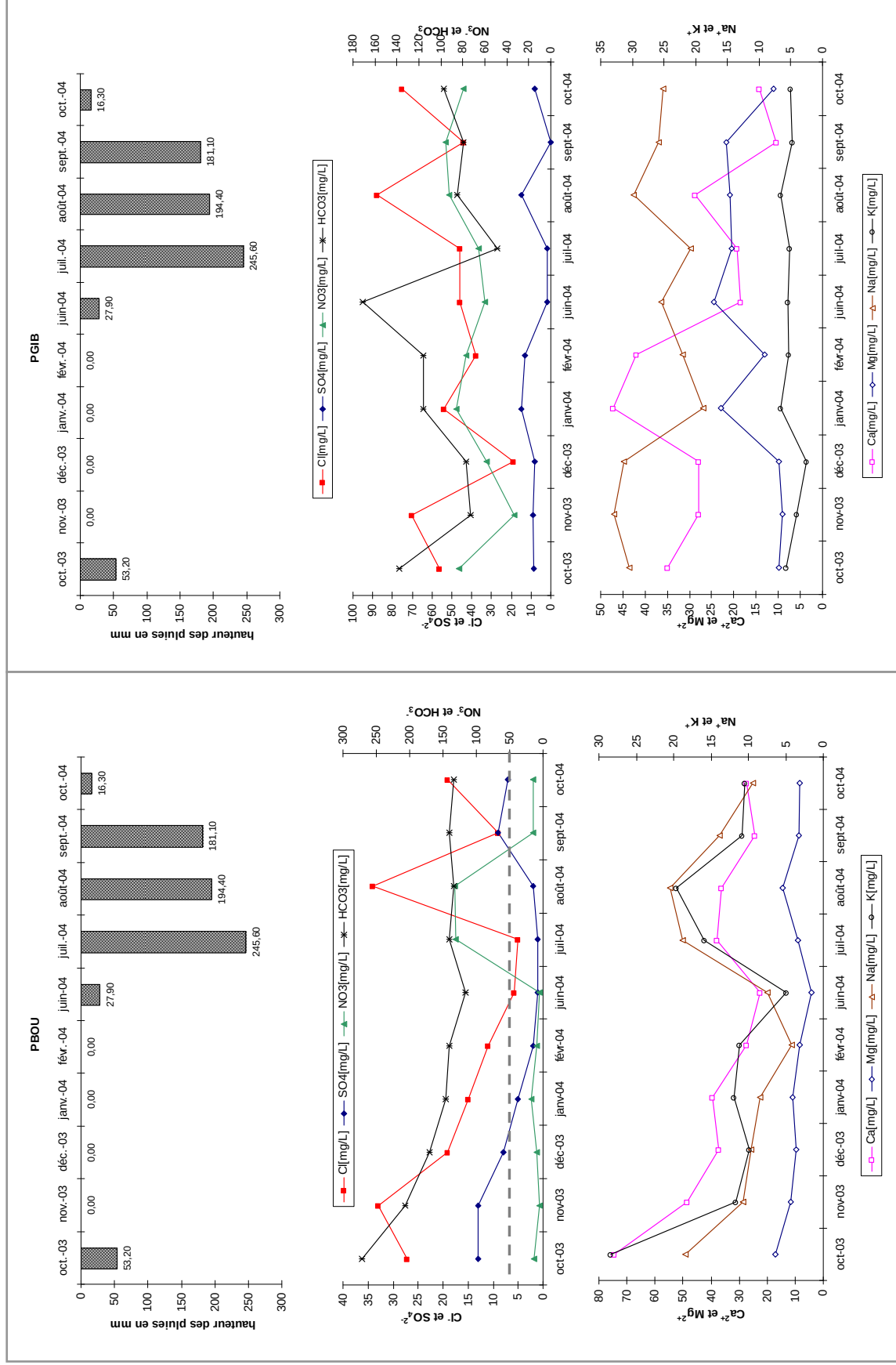


FIGURE 4.29 : Variation temporelle des teneurs en anions et en cations dans les eaux des PBOU et PGIB

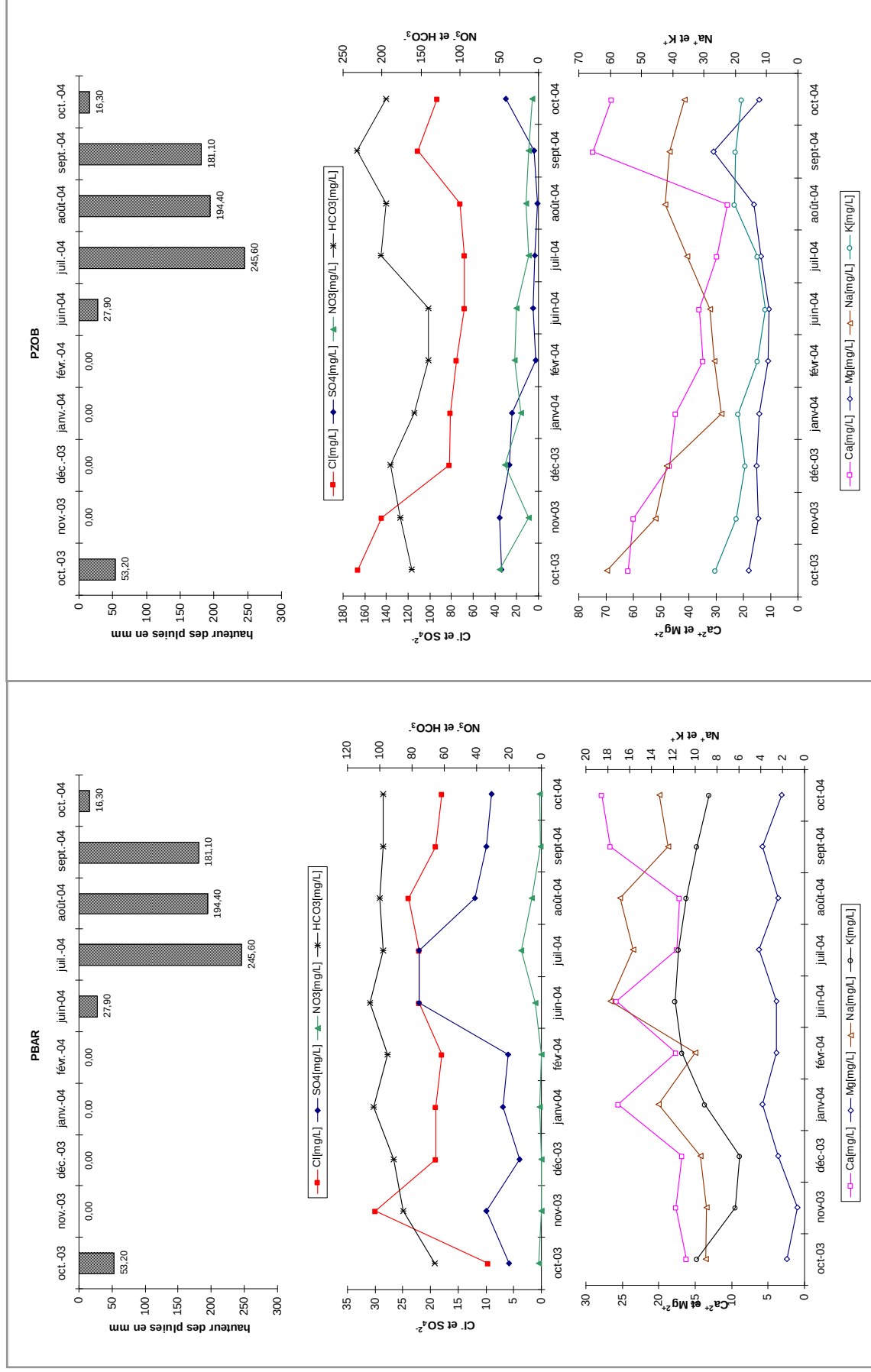


FIGURE 4.30 : Variation temporelle des teneurs en anions et en cations dans les eaux des PBAR et PZOB

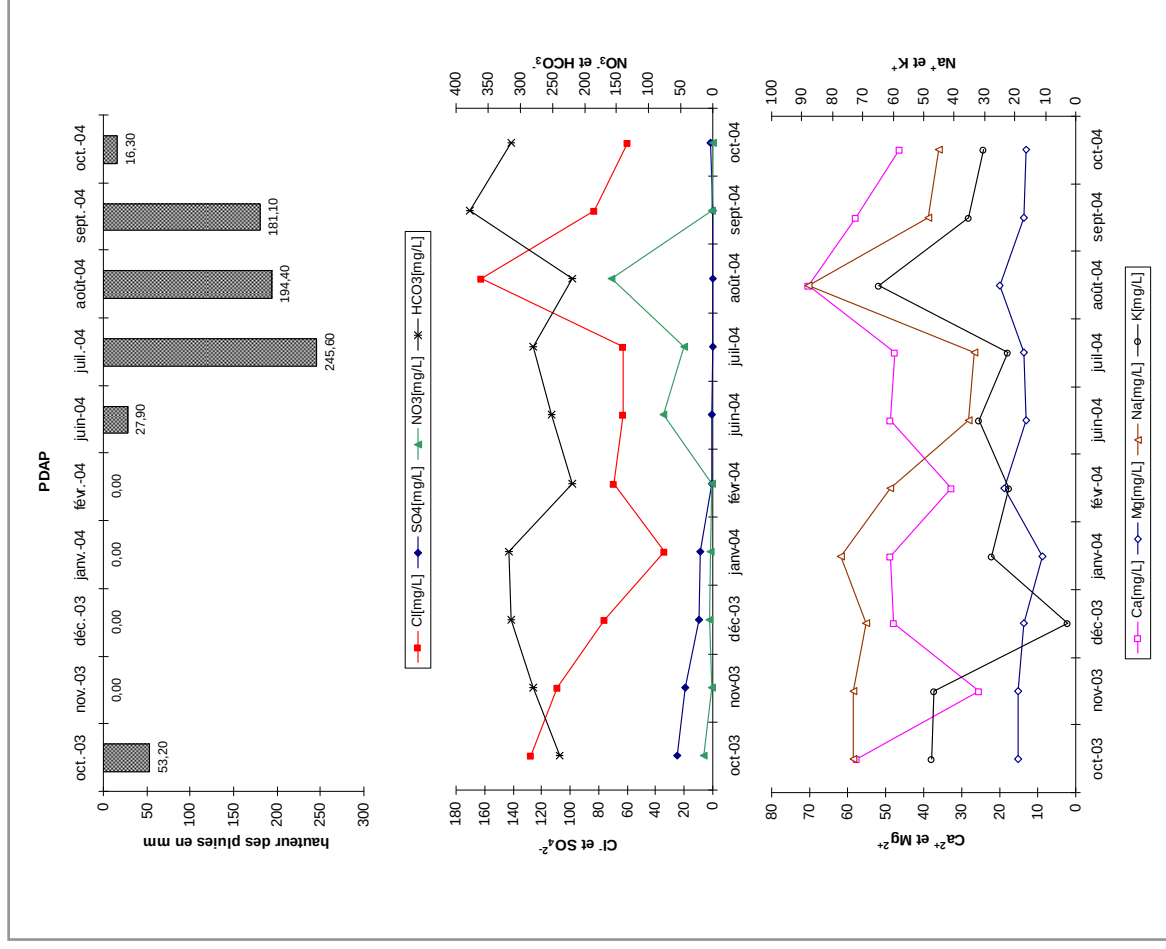
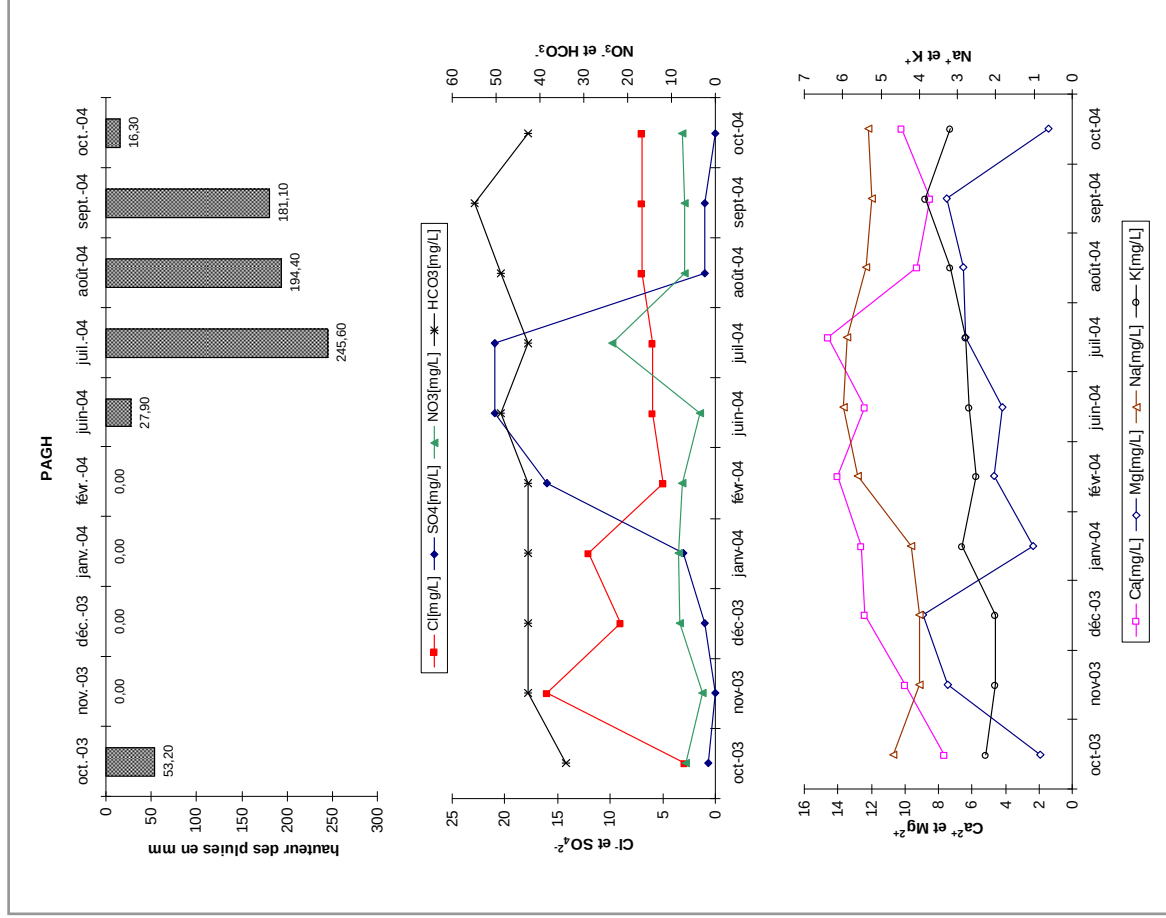


FIGURE 4.31 : Variation temporelle des teneurs en anions et en cations dans les eaux des puits PZID et PDAP

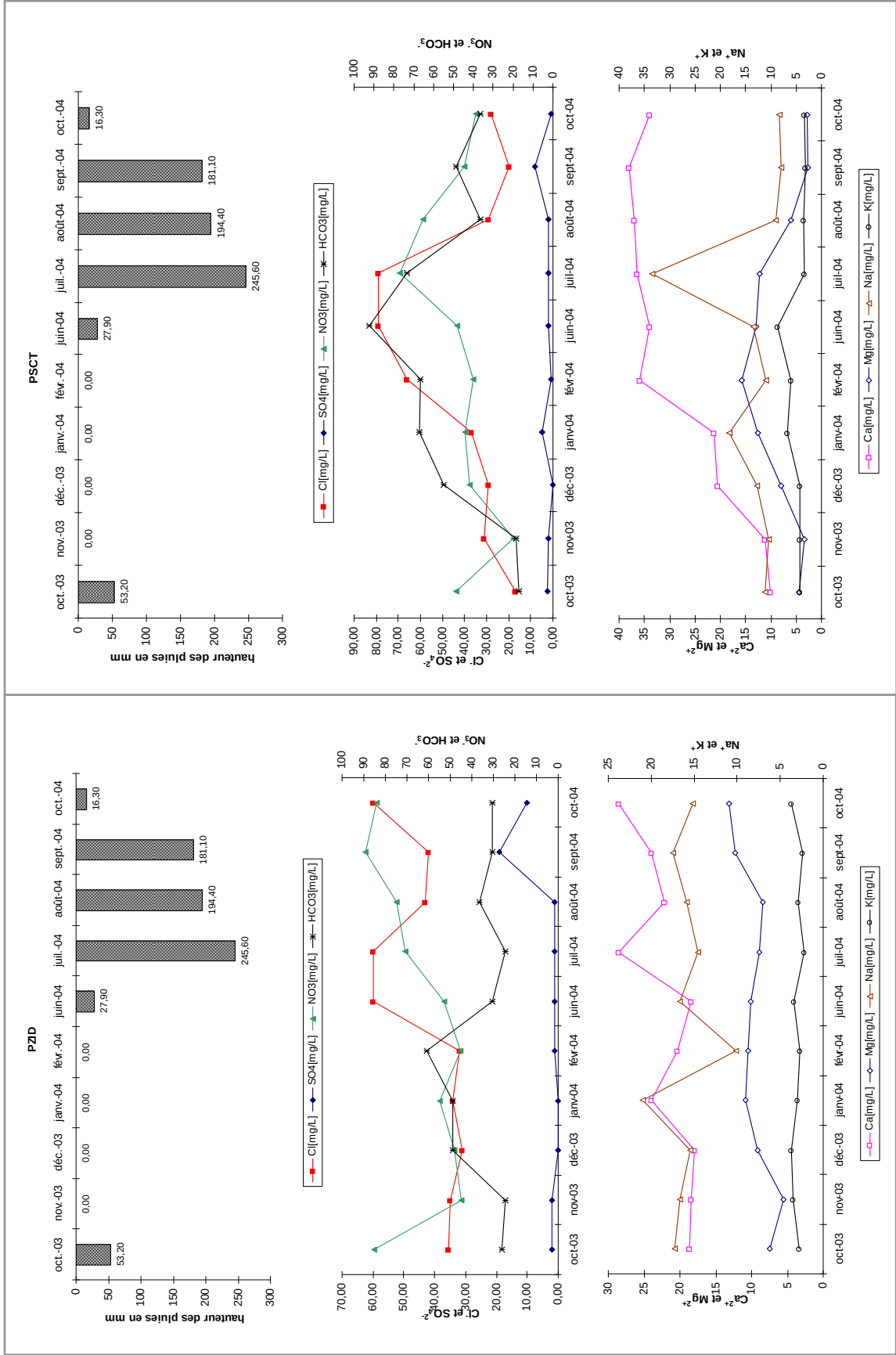


FIGURE 4.32 : Variation temporelle des teneurs en anions et en cations dans les eaux des PAGH et PSCT

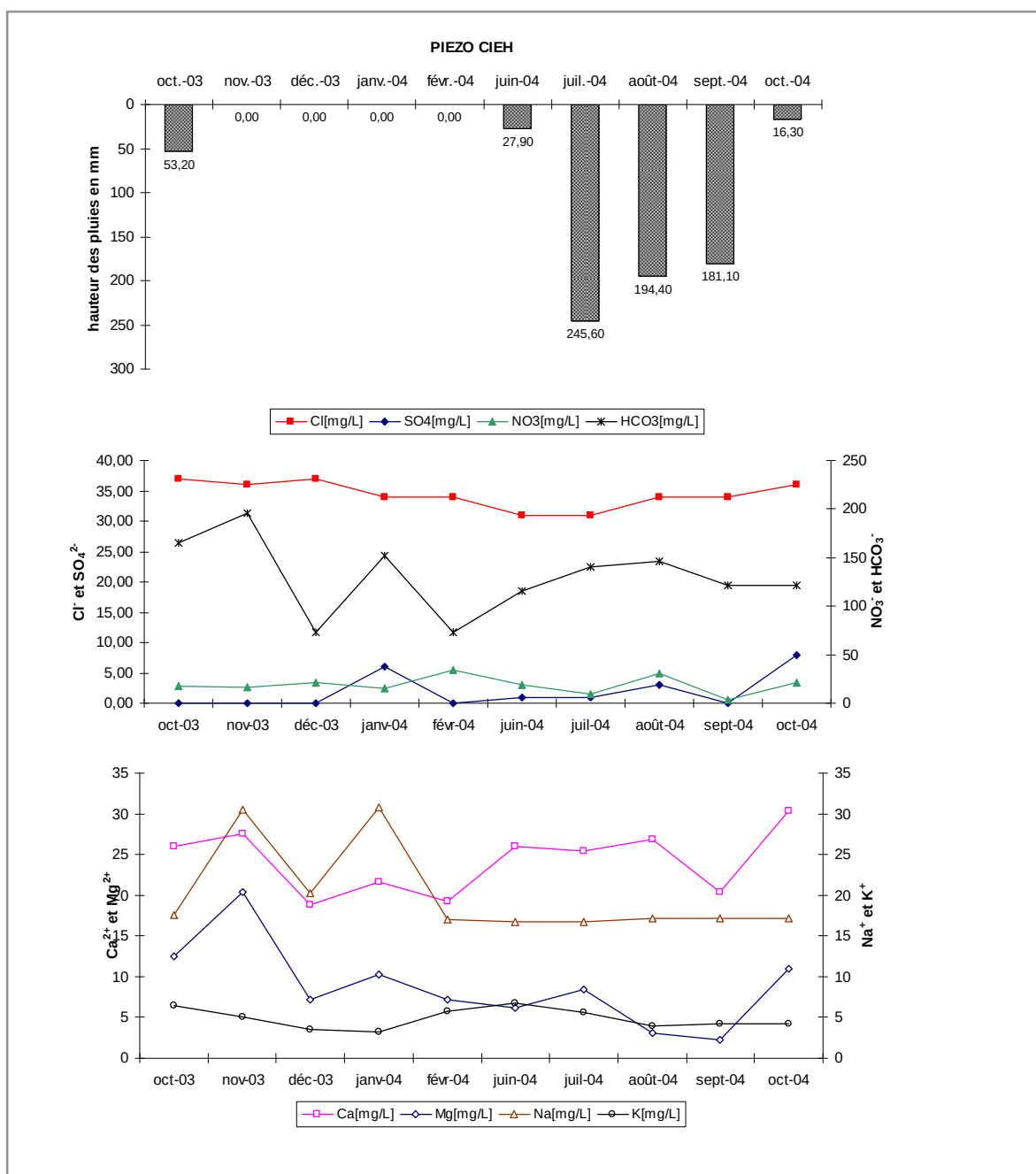


FIGURE 4.33 : Variation temporelle des teneurs en anions et en cations dans les eaux du PIEZO

V - ACQUISITION ET EVOLUTION DE LA MINERALISATION DE L'EAU

Dans ce paragraphe, il convient de discuter sur les différents processus contribuant à la minéralisation des eaux à travers l'approche thermodynamique et les diagrammes d'équilibre construits à partir des teneurs en éléments chimiques majeurs.

L'approche thermodynamique permet d'étudier l'évolution chimique de l'eau en fonction de son état d'équilibre vis-à-vis des minéraux primaires et néoformés de la roche réservoir lors du prélèvement.

V.1 - Indices de saturation

Si on considère une réaction chimique entre l'eau et un minéral, la constante d'équilibre thermodynamique de cette réaction, $K(T)$ s'écrit :

$$K(T) = PAI \quad (4)$$

PAI est appelé produit d'activité ionique. L'écart à l'équilibre est défini par l'indice de saturation IS qui s'écrit :

$$IS = \log(PAI) - \log(T) \quad (5)$$

Quand $IS = 0$ l'eau est à l'équilibre avec le minéral

$IS < 0$ l'eau est sous saturée, et capable de dissoudre le minéral

$IS > 0$ l'eau est sursaturée, et capable de précipiter le minéral

Dans cette optique, les calculs des indices de saturation ont été réalisés à l'aide du logiciel PHREEQ du programme thermodynamique WATEQ Debye.

Ces calculs ont été effectués pour les eaux des points ayant fait l'objet de suivi mensuel, représentant l'aquifère fissuré et l'aquifère des altérites.

Les principaux paramètres statistiques d'indices de saturation calculés sont dans le tableau 4.10.

TABLEAU 4.10 : Paramètres statistiques des indices de saturation (IS) des eaux des nappes de Ouagadougou. Alt : aquifère des altérites ; fract : aquifère de fissures/fractures

Nom (type aquifère)	Calcite	Dolomite	Gypse	Halite	SiO ₂
PAGH (alt)	-2,41	-4,80	-3,32	-8,77	-0,38
PBAR (alt)	-1,45	-3,22	-2,93	-8,14	-0,75
PBOU (alt)	-1,31	-2,82	-2,80	-8,09	-0,34
PDAP (alt)	-0,99	-2,20	-2,72	-6,88	-0,66
PGIB (alt)	-1,58	-3,01	-3,04	-7,52	-0,50
PSCT (alt)	-2,16	-4,40	-3,48	-7,81	-0,53
PZOB (alt)	-1,36	-2,81	-2,51	-7,13	-0,52
PZID (alt)	-2,28	-4,52	-3,38	-7,72	-0,51
PIEZ (alt)	-1,72	-3,40	-3,22	-7,63	-0,11
F024 (fract)	-1,73	-3,26	-3,97	-8,65	-0,13
F029 (fract)	-1,05	-2,03	-3,63	-8,95	-0,11
FZON (fract)	-1,83	-3,63	-3,69	-8,98	-0,10
FBAS (fract)	-1,76	-3,62	-3,90	-8,68	-0,12
FDAP (fract)	-1,31	-2,73	-3,76	-8,14	-0,10
FPAR (fract)	-1,41	-2,73	-2,84	-8,00	-0,10
FKOS (fract)	-0,99	-1,88	-3,48	-8,54	-0,16
FT26 (fract)	-1,11	-2,00	-3,73	-8,71	-0,12
Moyenne	-1,56	-3,12	-3,32	-8,14	-0,31
mini	-2,41	-4,80	-3,97	-8,98	-0,75
maxi	-0,99	-1,88	-2,51	-6,88	-0,10
médiane	-1,45	-3,01	-3,38	-8,14	-0,16
écart type	0,44	0,88	0,44	0,63	0,23
CV%	-28,20	-28,17	-13,41	-7,74	-73,89

Compte tenu des incertitudes sur les valeurs des constantes thermodynamiques utilisées dans les calculs (Drever, 1988) et sur la précision des mesures de pH et de l'alcalinité dosée (le même jour) une fois au laboratoire, les intervalles de ± 0.2 sont proposées pour une eau considérée comme saturée.

Il est intéressant de remarquer que toutes les eaux sont sous-saturées vis-à-vis de la calcite, et de la dolomite. On remarque qu'aucune eau n'est saturée vis-à-vis du gypse et de l'halite.

Pour la silice, sur 17 eaux traitées 9 échantillons sont saturés ou en équilibre avec la silice ; Parmi ces eaux, 8 caractérisent les eaux de la nappe de fissures/fractures et 1 (piézomètre du CIEH) celle de la nappe des altérites qui présente un comportement atypique.

L'analyse des indices de saturation ne permet pas de comprendre le mécanisme géochimique de minéralisation des eaux à partir de la précipitation des minéraux carbonatés (calcite) généralement absents dans les roches de socle granitique. Il apparaît clairement que la mise en solution des minéraux aluminosilicates calciques sous l'action du CO_2 dissous dans l'eau est le processus dominant dans l'acquisition et l'évolution de la minéralisation des eaux des nappes de Ouagadougou.

V.2 - Diagrammes d'équilibre

Les diagrammes d'équilibre permettent de situer la composition minéralogique de l'eau en fonction de sa teneur en cations (Ca, Na, K) en silice et en fonction du pH et de la température de solution. Nous avons vu précédemment que plus la pCO_2 de l'eau augmente plus l'altération est forte et les concentrations ioniques et la silice dissoute augmentent.

Evolution de la minéralisation

On peut voir aisément que la répartition des eaux en fonction du type d'aquifère rencontré montre une évolution depuis la nappe superficielle (puits des altérites) vers un milieu plus fermé de nappe profonde avec des eaux plus minéralisées.

Les diagrammes d'équilibres sur les figures 4.34 a b, c, d, montrent une situation d'équilibre kaolinite/ montmorillonite pour les eaux les plus minéralisées de l'aquifère fissuré, dans le domaine de la kaolinite pour les milieux les plus dilués des altérites.

Sur les quatre diagrammes correspondant au système CaO , MgO , Na_2O , K_2O (Al_2O_3 SiO_2 - H_2O), ont été reportées les eaux de différents aquifères en utilisant les activités calculées.

L'observation de ces diagrammes impose deux remarques :

1) Dans le système Na_2O et K_2O (Al_2O_3 SiO_2 - H_2O) sur les figures 4.34 c et d, les eaux issues de la nappe des altérites s'écartent des autres en se plaçant dans le domaine de stabilité Kaolinite - feldspath potassique. Le feldspath potassique est moins soluble que le feldspath sodique qui s'altère plus rapidement.

2) Dans le système CaO , MgO (Al_2O_3 SiO_2 - H_2O), sont regroupées les eaux issues de la nappe des formations fissurées/fracturées. Elles sont toutes dans le domaine d'équilibre de la Kaolinite - montmorillonite.

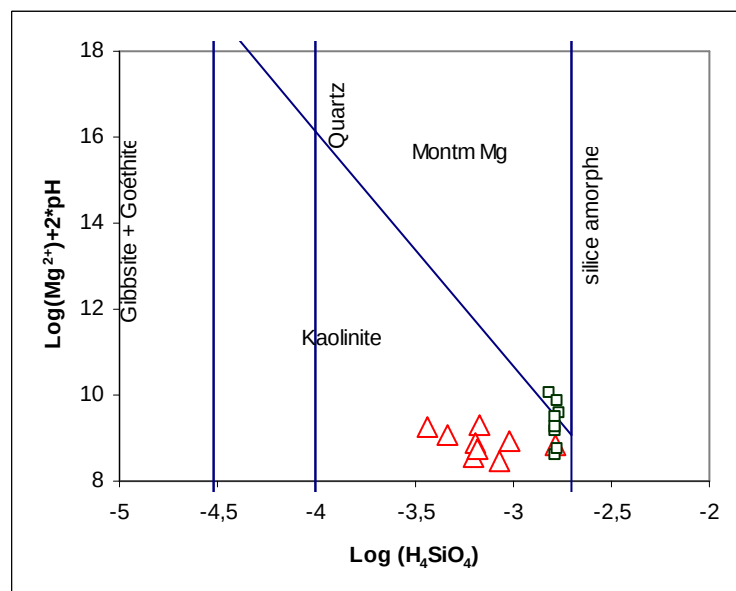
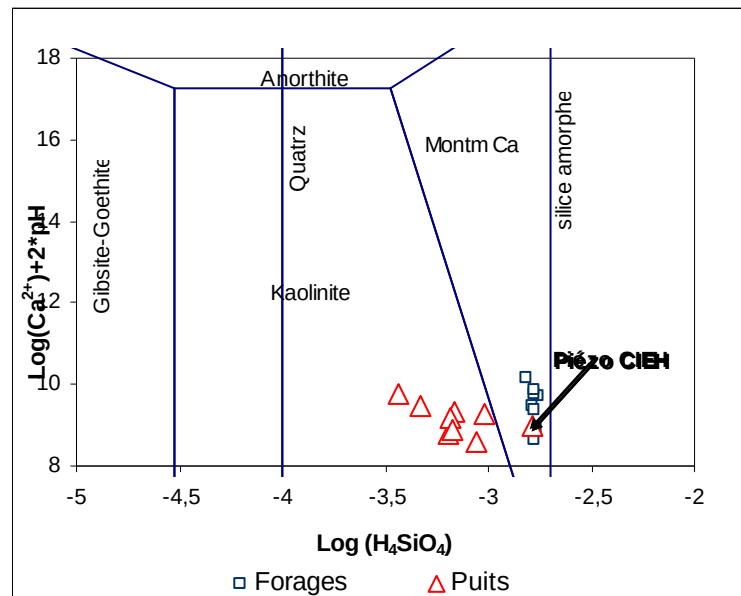
Les forages sont des milieux beaucoup plus confinés que les puits ; l'écoulement de l'eau se fait soit verticalement ou latéralement et l'eau plus ou moins minéralisée arrive de la surface chargée

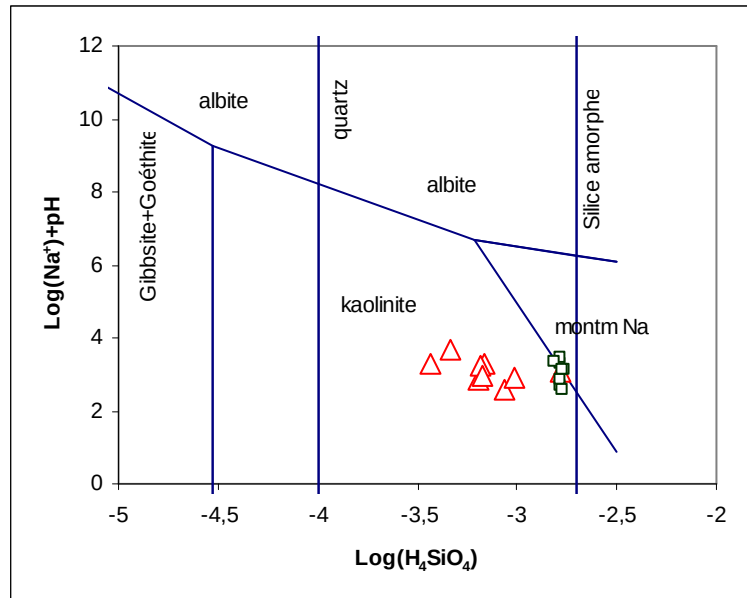
d'éléments comme la silice, les cations et les bicarbonates. Dans ce milieu confiné, les éléments ne sont pas exportés et l'eau devient plus concentrée d'où cet équilibre Kaolinite/montmorillonite.

A priori, ces résultats permettent de dire que l'hydrolyse des aluminosilicates est le principal phénomène d'altération qui intervient dans l'acquisition de la minéralisation des eaux du socle granitique recouvert d'altérites d'épaisseur variable suivant les zones. En comparant les eaux des deux types de réservoirs, il se trouve que la silice est beaucoup plus importante en profondeur qu'en surface ce qui signifierait :

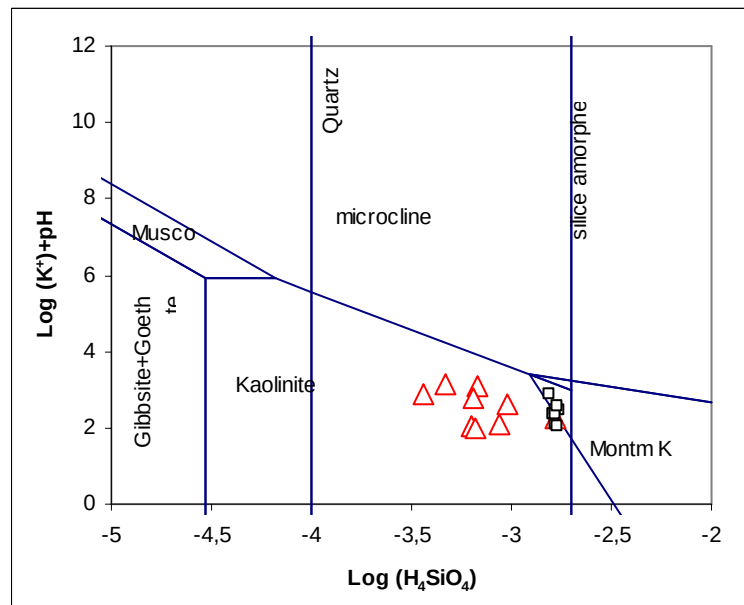
- ⇒ un système ouvert avec une évolution chimique en condition de lessivage par les eaux d'infiltration qui explique cette faible minéralisation. Ce sont des eaux qui se renouvellent rapidement par le phénomène de recharge directe par les pluies ;
- ⇒ un système confiné dans lequel la cinétique est plus lente avec un faible écoulement et un temps de séjour plus long. Dans ce cas, l'eau se minéralise encore lors de sa mise en contact avec les roches qu'elle altère ce qui va augmenter sa charge ionique. Cette augmentation pourrait traduire une certaine « stratification » mise en évidence par Kikietta, (1978) ; Travi et Dia, (1980).

L'utilisation des diagrammes d'équilibre permet d'apprécier le fonctionnement hydrique et hydrochimique au niveau des puits et forages et on remarque que le tout semble être conforme au climat de type soudano-sahélien de Ouagadougou humide pendant seulement trois à quatre mois, et sec le reste de l'année.





c



d

FIGURE 4.34 (a, b, c, d) : Diagramme de stabilité des minéraux silicatés (données traitées par le logiciel Aqua)

V.3 – Conclusion

La qualité chimique d'une eau est fonction du chemin qu'elle a suivi depuis la surface du sol jusqu'au système aquifère. Elle subit d'abord une modification en surface sous l'effet de l'évaporation et ensuite évolue au niveau de la zone non saturée et enfin dans la nappe où elle est en contact plus ou moins long avec la roche-réservoir pour l'acquisition de sa minéralisation.

Dans l'agglomération de Ouagadougou, les faciès chimiques rencontrés sont de type bicarbonaté calcique pour certains forages, et de type calcique et magnésien pour la plupart ; les eaux de certains puits voient leur charge minérale augmenter par apport d'infiltration d'eaux usées.

Les eaux sont toutes sous-saturées vis-à-vis de la calcite et de la dolomite, du gypse et de l'halite, ce qui 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 des HCO_3^- dont l'origine est essentiellement contrôlée par la diffusion du CO_2 atmosphérique et organique dans le milieu cristallin.

CHAPITRE V - CONTRIBUTION DES ISOTOPES DE L'EAU A LA CONNAISSANCE DES EAUX DE LA VILLE DE OUAGADOUGOU

I.1 - Les isotopes stables de la molécule d'eau

L'étude isotopique des eaux souterraines de l'agglomération de Ouagadougou nécessite la connaissance du signal d'entrée des systèmes hydrogéologiques que sont les eaux de précipitation sur la ville. L'utilisation des isotopes stables et isotopes radioactifs peut permettre de mieux comprendre le fonctionnement de l'aquifère de socle de la zone d'étude et de caractériser la qualité des eaux dans cet environnement hautement anthropique. Cependant, dans le cadre de cette étude, les difficultés de terrain n'ont pas permis d'avoir des données sérieées suffisantes sur les eaux souterraines pour une investigation détaillée du fonctionnement du système aquifère. Le suivi de précipitations n'est fonctionnel que depuis l'année 2004 seulement.

On s'aidera des résultats sur les précipitations recueillies dans les stations du réseau de l'AIEA en Afrique de l'Ouest dont la station de Bamako au Mali, (station la plus proche, 700 km de la zone d'étude), la station de Niamey au Niger, de Kano au Nigéria, de Bolgatanga au Nord Ghana, et en Afrique centrale avec la station de N'Djamena au Tchad. La station de Bamako dispose de la chronique la plus longue de la période 1962 à 1979 et de 1991 à 1998.

I.1.1 - Généralités et principe

La molécule d'eau est constituée de deux éléments (O et H) possédant chacun trois isotopes stables ou radioactifs. L'abondance relative d'un isotope dépend de plusieurs facteurs dont le lieu de précipitation de la pluie (altitude, latitude, distance à l'océan), le cycle d'évaporation-condensation, et les échanges eau-minéraux.

Les isotopes stables (^{18}O , ^2H) sont en général en faible concentration dans les eaux naturelles. Leur utilisation en hydrologie est importante (Fritz et Fontes, 1980 ; Clark et Fritz 1997) et repose sur leur qualité de traceurs permettant de localiser la zone d'alimentation, de déterminer l'effet d'évaporation, d'établir les phénomènes d'échanges entre continuité et /ou discontinuité hydraulique des systèmes aquifères, de recueillir des informations sur l'origine et le temps de séjour de l'eau au sein de l'aquifère et d'apprécier sa vulnérabilité (Blavoux, 1978). Tous ces volets nécessitent une bonne caractérisation du signal d'entrée du système.

Dans la présente étude qui reste au stade de la contribution, ont été utilisés deux catégories d'isotopes : les isotopes stables dont l'oxygène 18 (^{18}O) et le deutérium (^2H) de la molécule d'eau et l'isotope radioactif le tritium (^3H).

Dans l'eau, l'abondance relative des isotopes stables ^{18}O et ^2H est exprimée par la notation delta (δ) ‰ définie par Craig en 1961 tel que :

$$\delta = \left[\frac{R_{\text{échantillon}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right] * 1000 \quad R \text{ représente le rapport d'abondance isotopique } ^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ et } ^2\text{H}/^1\text{H}.$$

Le standard utilisé est le SMOW (Standard Mean Ocean Water) qui a par définition une valeur de 0 ‰ (Craig, 1961a). Les valeurs positives de δ indiquent que l'échantillon est enrichi par rapport au standard et les valeurs négatives montrent un appauvrissement.

A partir des données des multiples stations de l'AIEA, il a été établi que le facteur principal qui contrôle les variations spatiales isotopiques moyennes des eaux météorites est la température. Les autres effets plus ou moins dépendants de la température sont des variations en fonction de l'altitude, de la latitude, de la continentalité et de la saison :

- ⇒ effet d'altitude : les masses d'air s'appauvrissent en ^{18}O et ^2H au fur et à mesure que l'altitude augmente ;
- ⇒ effet de latitude : les teneurs en isotopes lourds deviennent plus négatives lorsque la latitude augmente ;
- ⇒ effet de continentalité : pour les mêmes latitudes, les valeurs sont plus négatives à l'intérieur des continents qu'à proximité des côtes ;
- ⇒ effet de saison : les pluies d'hiver sont plus appauvries en isotopes lourds que les pluies d'été. Dans les zones arides et semi-arides le phénomène d'évaporation des gouttes de pluies pendant leur chute dans l'atmosphère peut entraîner une modification de la composition isotopique des précipitations. Par ailleurs, au cœur de la saison humide, l'humidité relative est élevée et les teneurs en isotope lourds diminuent. Les données de la littérature montrent qu'en Afrique de l'Ouest dans le secteur inter-tropical-sahel, le mois le plus pluvieux enregistre les teneurs les plus basses. C'est l'effet de masse.

Il existe une corrélation linéaire entre $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ de la pluie. Craig a montré en 1961 que la pente de la droite de corrélation reste constante et égale +8 dans tous les lieux géographiques pour les eaux météorites n'ayant pas subi d'évaporation :

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + d (= 10)$$

L'ordonnée à l'origine $d = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$ est appelé « excès en deutérium » ; d varie en fonction de la température et de l'humidité qui prévalent au moment où se forme la vapeur. Il est proche de 10 ‰ lorsque les précipitations sont d'origine océanique et il est supérieur à 10 ‰ lorsque la vapeur

océanique est alimentée de façon notable par une évaporation continentale. Pour l'Afrique « d » est compris entre 10 et 15 (In Erikson, 1983).

I.1.2 - Signal pluie en Afrique de l'Ouest

Dans le cadre de cette étude les données des teneurs isotopiques du Global Network for Isotopes in Precipitation (GNIP) sont utilisées pour établir les droites de régression en vue de comparer ces données à celles de la ville de Ouagadougou la zone d'étude. Les villes concernées sont Bamako, Niamey, N'Djamena, Kano et les données de courte durée, obtenues à Bolgatanga au Nord Ghana par Akiti en 1980, qui permettent de dégager les tendances de variations des teneurs isotopiques en fonction de la saison, de la hauteur des pluies mensuelles ainsi que les variations interannuelles.

Les teneurs en ^{18}O et ^2H des pluies mensuelles aux stations de Bamako et Niamey, représentées sur les tableaux 5.1 a et b illustrent les variations du signal pluie au cours d'une saison :

- les teneurs en isotopes stables sont plus faibles (négatives) au cœur de la saison des pluies (juillet, août, septembre). Ce phénomène est caractéristique des pays touchés par la mousson (Fontes, 1976 ; Taupin, 1999) comme le Mali, Niger et le Burkina sous influence des vents de mousson qui génèrent des précipitations plus orageuses et appauvries en ^{18}O . Les tableaux plus complets sont reportés en annexes ;

- les teneurs en isotopes stables du début (avril mai et juin) et de la fin de la saison des pluies (octobre) sont plus enrichies par l'effet d'évaporation pendant la chute de la pluie. Des études antérieures, (Travi et al, 1987 ; Renaud, 1993 ; Dakouré, 2003), confirment cet effet dans les zones sahéliennes, tropicales sèches et humides. Les pluies faibles en début de saison proviennent de vapeurs d'eau atmosphériques locales.

TABLEAUX 5.1 a ; b : Teneurs mensuelles en isotopes stables dans les précipitations à Bamako et à Niamey pour les périodes de 1991 à 1996

station	Latitude	longitude	Altitude		
de Bamako	12°59	7°59	381		
Mois	Année	¹⁸ O‰	² H‰	d	Lame en mm
juillet	1991	-7,20	-45,70	11,90	352
août	1991	-8,20	-52,50	13,10	145
septembre	1991	-5,90	-33	14,20	93
octobre	1991	-4,30	-15,80	18,60	114
juin	1992	-1,90	-6	9,20	193
juillet	1992	-6,10	-41,70	7,10	195
août	1992	-6,30	-43,10	7,30	193
septembre	1992	-5,30	-33,40	9	264
juin	1993	-2,10	-2,10	14,70	178
juillet	1993	-4,40	-21,40	13,80	178
août	1993	-7	-44,10	11,90	178
septembre	1993	-6,80	-40,60	13,80	136
mai	1994	-2,56	-13,90	6,58	49
juin	1994	-1,51	-2,50	9,58	123
juillet	1994	-5,88	-36,80	10,24	236
août	1994	-8,12	-53,80	11,16	427
septembre	1994	-6,13	-39,70	9,34	312
octobre	1994	-5,12	-28,90	12,06	61
avril	1995	-4,89	-30,10	9,02	13
mai	1995	-0,99	3,10	11,02	103
juin	1995	-2,78	-110	11,24	38
juillet	1995	-4,63	-30	7,04	76
août	1995	-8,02	-56,10	8,06	63
juin	1996	-1,98	-10,80	5,04	122
juillet	1996	-1,88	-7,30	7,74	133
août	1996	-5,56	-34,70	9,78	259
septembre	1996	-6,35	-40,10	10,70	187

Niamey	latitude	longitude	Altitude		
ORSTOM	13°29	2°10	220		
Mois	Année	¹⁸ O‰	² H‰	d	Lame en mm
Avril	1992				5,00
Mai	1992				14,00
Juin	1992	-1,14	-2,10	7,02	101,00
Juillet	1992	-3,71	-24,10	5,58	179,00
Août	1992	-4,56	-30,90	5,58	157,00
Septembre	1992	-4,29	-26	8,32	34,00
juin	1993	-1,12	-5,50	3,46	82,00
juillet	1993	-0,54	-9,50	-5,18	134,00
août	1993	-4,15	-25,80	7,40	182,00
septembre	1993	-2,27	-20,90	-2,74	54,00
Avril	1994	1,90	10,80	-4,40	24,00
Mai	1994	-0,50	-6,80	-2,80	55,00
Juin	1994	-0,81	-1,20	5,28	76,00
Juillet	1994	-3,13	-14,90	10,14	163,00
Août	1994	-7,62	-52,20	8,76	273,00
Septembre	1994	-6,50	-40,50	11,50	72,00
Octobre	1994	-0,52	1,40	5,56	14,00
Juin	1995	-2,39	-9,30	9,82	88,00
Juillet	1995	-3,59	-18,30	10,42	128,00
Août	1995	-7,45	-53,70	5,90	209,00
Septembre	1995	-3,85	-31,70	-0,90	108,00
Juin	1996	-5,80			111,60
Juillet	1996	-2,40			85,30
Août	1996	-4,70			232,10

Sur le diagramme $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ (figure 5.1) les points représentatifs des précipitations de chaque station se situent soit légèrement sur la droite météorite mondiale (DMM), soit au-dessus de cette droite, soit nettement en dessous de celle-ci.

Les premiers points sur la DMM (Bamako 1991-1998) avec une pente de 7.9 ; les seconds (Bolgatanga 1978-1979) dessus et parallèles à la DMM avec une pente de 8.3 signifient que les précipitations n'ont subi aucune modification après la condensation qui les a générées.

Les derniers points (N'Djamena, Niamey et Kano) s'alignent en dessous de la DMM avec des pentes en dessous de 8 traduisant une évaporation partielle des gouttes d'eau au cours de leur chute. Les pentes sont respectivement de 6.37 pour N'Djaména, 6.72 pour Niamey et 7.07 pour Kano au Nigéria. Cette pente de 6 pour NDjaména a déjà été obtenue par d'autres auteurs tels que Onugba, 1990 ; R. Njitchoua 1997 et Kandjangaba 2007

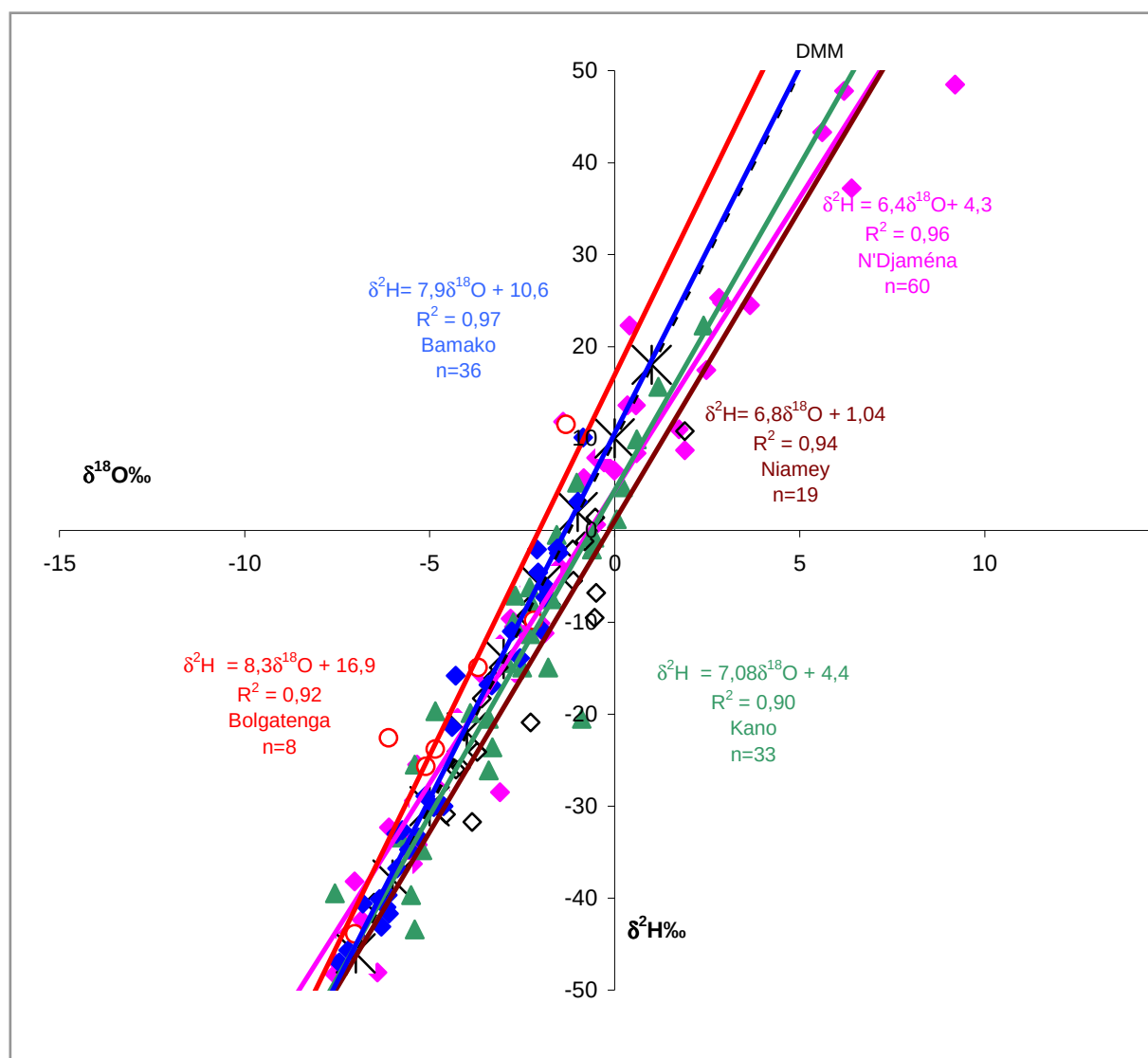


FIGURE 5.1 : Relation $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ et $\delta^2\text{H}\text{‰}$ (a) dans les précipitations des villes en Afrique de l'Ouest (Bamako, Bolgatanga, N'Djaména, Niamey, et de Kano au Nigéria)

A l'échelle régionale sur la figure 5.2 on observe :

- ⇒ un enrichissement très léger et progressif en allant de l'Ouest vers l'Est en fonction de l'augmentation de l'aridité des zones (Dray et al, 1983) ;
- ⇒ que les teneurs annuelles moyennes pondérées en isotopes lourds (^{18}O) de Ouagadougou sont comparables à celles de Bamako, et Niamey bien que ces dernières soient antérieures. Elles masquent l'effet de continentalité ;
- ⇒ que les valeurs de -3.6 ‰ et -3.3 ‰ vs SMOW sont enregistrées respectivement à Kano se rapportant à neuf (9) années de mesure et à N'Djamena (1964-1995) ; elles sont plus enrichies ce qui pourrait être dû à des précipitations relativement plus évaporées dans ces zones ;
- ⇒ que l'excès en deutérium > 10 au niveau de Ouagadougou laisse penser à une origine mixte, océanique et continentale (Taupin, 1999) de la vapeur atmosphérique.

TABLEAU 5.2 : Teneurs isotopiques moyennes interannuelles comparées entre Ouagadougou et les stations Africaines voisines

Nom de la station	latitude	Longitude	Altitude	Valeurs interannuelles moyennes pondérées de ^{18}O ^2H en Afrique de l'Ouest						écart type	pluie en mm
				Année	Référence	$\delta^{18}\text{O}_{\text{‰}}$	écart type	$\delta^2\text{H}_{\text{‰}}$	écart type		
Bamako	12°69	7°59	381	62-79 ; 91-98	I. A. E. A., 1998	-4,20	±0,10	-27,10	±0,70		16767 ; 5720
Barago	12°34	0°57	280	88-89	Mathieu et al, 1993	-4,80	±		±	655	
Bobo-Dioulasso	11°17	4°32		97-98	Dakouré 1998	-3,80				1987	
Bolgatenga (Ghana)	12°	1°31		78-79	Akiti., 1980	-4,30	±1,70	-14,98	±7,50	535	
Kano (Nigéria)	12°05	8°53	476	61-66 ; 71-73	in Onugba 1990	-3,60	±0,20	-18,40	±1,80	6597	
N'Djaména	12°13	15°03	294	64-75 ; 77-78 ; 95	I. A. E. A., 1995	-3,30	±0,10	-14,10	±0,80	7494	
Niamey	13°29	2°10	223	92-96	I. A. E. A., 1996	-4,10	±0,30	-21,60	±3,10	2562	
Sénégal (4 stations)				1981	Travi et al, 1987	-6,10		-38,60		(juillet et août) 2375	
Ouagadougou	12°21	1°31	316	2004-2006	Yaméogo 2008	-4,30	±0,50	-20,50	±2,80	1942	

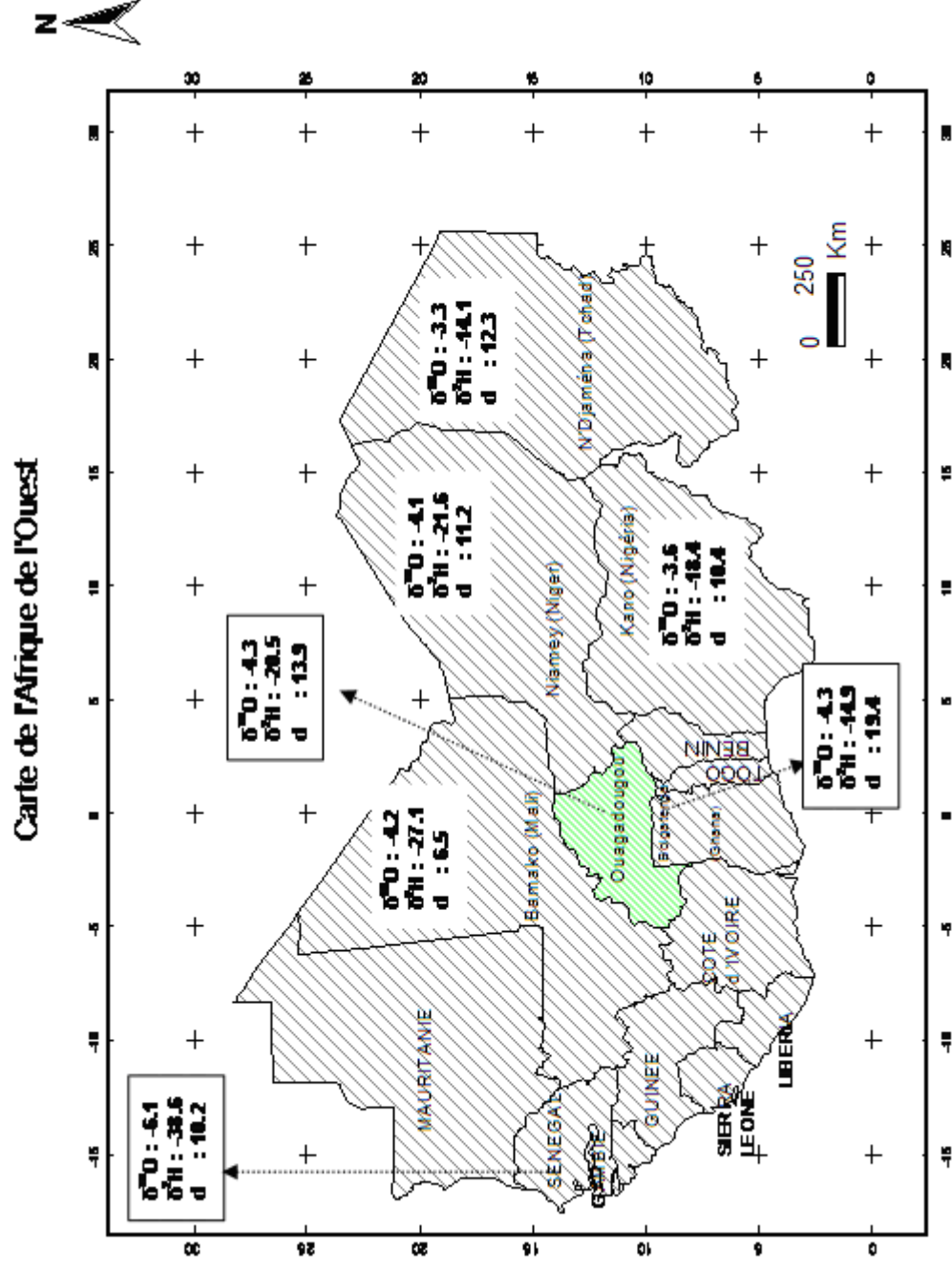


FIGURE 5.2 : Valeurs interannuelles des moyennes pondérées de ^{18}O , ^2H à l'échelle régionale (Afrique de l'Ouest)
 d : représente l'excès en deutérium calculé

I.1.3 - Le signal pluie à Ouagadougou

Une revue bibliographique fournit quelques résultats d'études antérieures menées au Burkina Faso :

- une étude sur les eaux de pluies de la période de 1988 et 1989 à Barogo, réalisée par Mathieu en 1993 donne une droite de régression avec l'équation suivante :

$$\delta^2\text{H} = 7.73 \pm 0.32 \delta^{18}\text{O} + 7.8 \pm 4.0 \text{ avec } n = 41 \text{ et } r = 0.96$$

- une étude sur les eaux de pluies de la période de 1997 et 1998 à Bobo-Dioulasso (360 km à l'Ouest de Ouagadougou), réalisée par Dakouré en 1999 donne la droite d'équation suivante :

$$\delta^2\text{H} = 8.04 \delta^{18}\text{O} + 10.27 \text{ avec } n = 19 \text{ et } r = 0.93$$

Pour caractériser le signal pluie à Ouagadougou, les pluies des années 2004, 2005 et 2006 ont été échantillonnées à une station installée à cet effet. Les pluies sont collectées tous les jours et conservées dans un bidon totaliseur de 5 litres. A la fin de chaque mois, un échantillon, correspondant à la moyenne pondérée de la pluie pour le mois écoulé est prélevé pour le dosage.

Les teneurs moyennes pondérées se rapportent à trois années de mesures pour ^{18}O et ^2H . Dans l'ensemble les teneurs en ^{18}O varient de - 0.9 à - 6.12 ‰ (écart type de 1.5) autour d'une moyenne arithmétique de -3.6 ‰ SMOW pour ^{18}O et de +1.8 à - 32.8‰ avec un écart type de 12.7 et une moyenne de -15.8 ‰ pour le ^2H (*tableau 5.3*).

On observe une grande variabilité dans les teneurs en ^{18}O et ^2H dans les eaux de pluies de Ouagadougou. Les valeurs les plus négatives traduisent l'effet de masse. Elles sont enregistrées avec les hauteurs de précipitations élevées de juillet et août. L'effet d'évaporation se traduit sur les pluies de début de saison avril, mai et juin et de fin de saison octobre qui sont plus enrichies; ceci confirment les résultats d'études antérieures de certains auteurs Djoret (2000) ; Kandjangaba (2007).

TABLEAU 5.3 : Teneurs moyennes pondérées des isotopes stables ^{18}O et ^2H dans les pluies de Ouagadougou (2004 à 2006)

Pluie Ouaga	lame en mm	$\delta^{18}\text{O}_{\text{‰}}$	$\delta^2\text{H}_{\text{‰}}$	d
juil-04	245,60	-5,05	-27,90	12,50
août 04	194,40	-4,81	-25,60	12,88
sept-04	181,10	-4,45	-23,00	12,60
oct-04	16,30	-4,81	-29,30	9,18
Moyenne pondérée		-4,80	-25,84	
avr-05	29,10	-1,36	1,80	12,70
mai-05	50,20	-3,89	-16,50	14,60
juin-05	88	-3,67	-15,70	13,70
juil-05	250,60	-6,12	-32,80	16,20
août 05	282	-3,89	-16,50	14,60
sept-05	123,20	-3,2	-10,70	15,00
oct-05	21,90	-1,07	6,20	14,80
Moyenne pondérée		-4,27	-19,19	
mai-06	13,30	-2,80	-18,70	3,70
juin-06	66,40	-0,90	8,60	15,80
juil-06	168,00	-3,70	-13,10	16,50
août-06	212,40	-4,60	-24,40	12,40
Moyenne pondérée		-3,69	-15,35	

Les pluies de 2006 semblent légèrement plus enrichies que celles de 2005 et 2004 (*tableau 5.3*). Cet enrichissement est sans doute dû à la faible quantité de pluies tombée au cours de cette année.

D'une manière générale, les pluies de 2006 (615 mm) sont déficitaires par rapport à celles de 2005 (846 mm) et 2004 (772 mm). Et si on considère que les fortes pluies sont plus appauvries en ^{18}O comme on peut le voir sur la figure 5.3 ceci explique l'enrichissement en isotopes lourds des pluies de 2006.

Les valeurs de l'excès en deutérium ($d = \delta^2\text{H} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$) calculées (§ *tableau 5.3*) montrent des valeurs supérieures à 10. On observe une variabilité qui confirme l'origine mixte de la vapeur atmosphérique et montre que les masses d'air d'origine océanique, sont légèrement enrichies par des masses d'eaux d'origine continentale (Kandjangaba 2007).

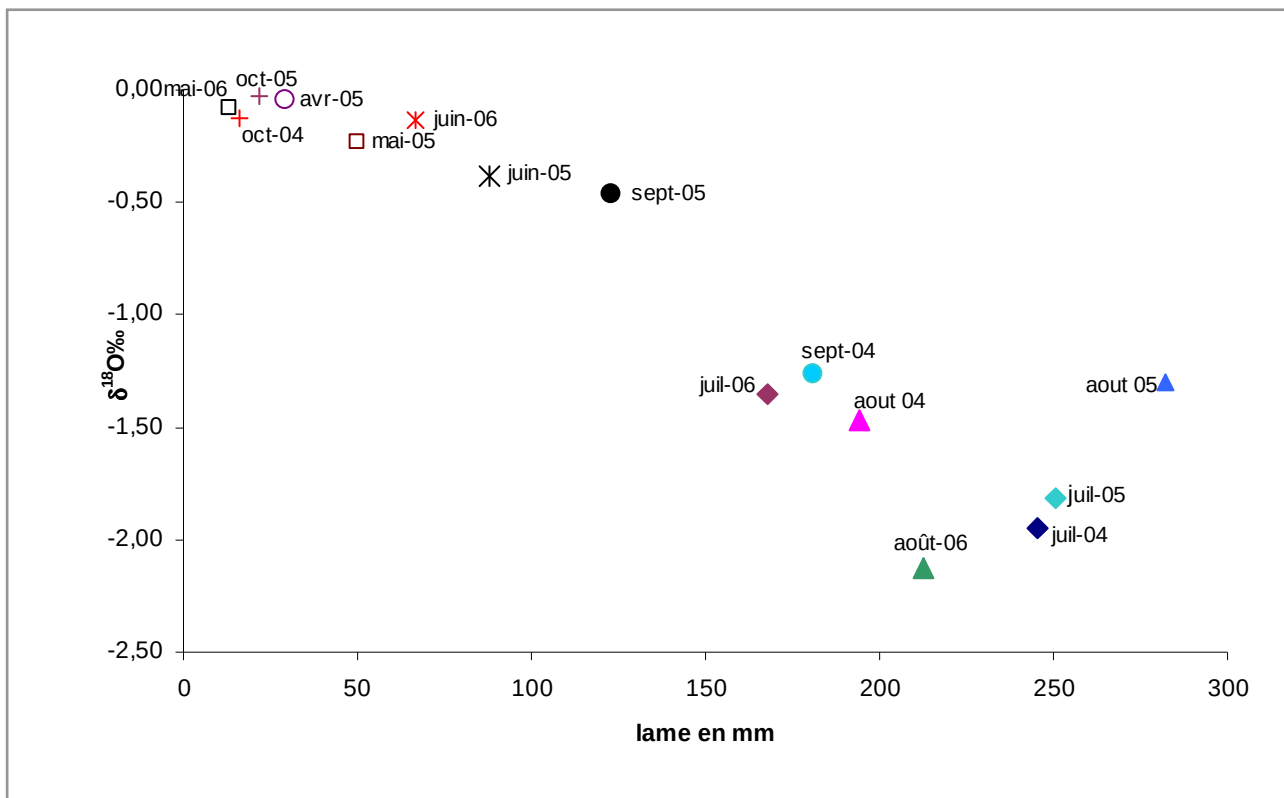


FIGURE 5.3 : Relation entre ^{18}O et hauteur de pluies mensuelles à Ouagadougou (2004 à 2006)

La droite de corrélation de la région de Ouagadougou (*figure 5.4*) a pour équation :

$$\delta^2\text{H} = 8.17 \delta^{18}\text{O} + 14.3 \text{ avec } n=13 \text{ et } r=0.97$$

La droite obtenue est parallèle à la DMM définie par Craig (1961). Elle est très voisine de celle de Dakouré (1999) pour les pluies à Bobo et celle de Mathieu (1989) pour les pluies de Barogo.

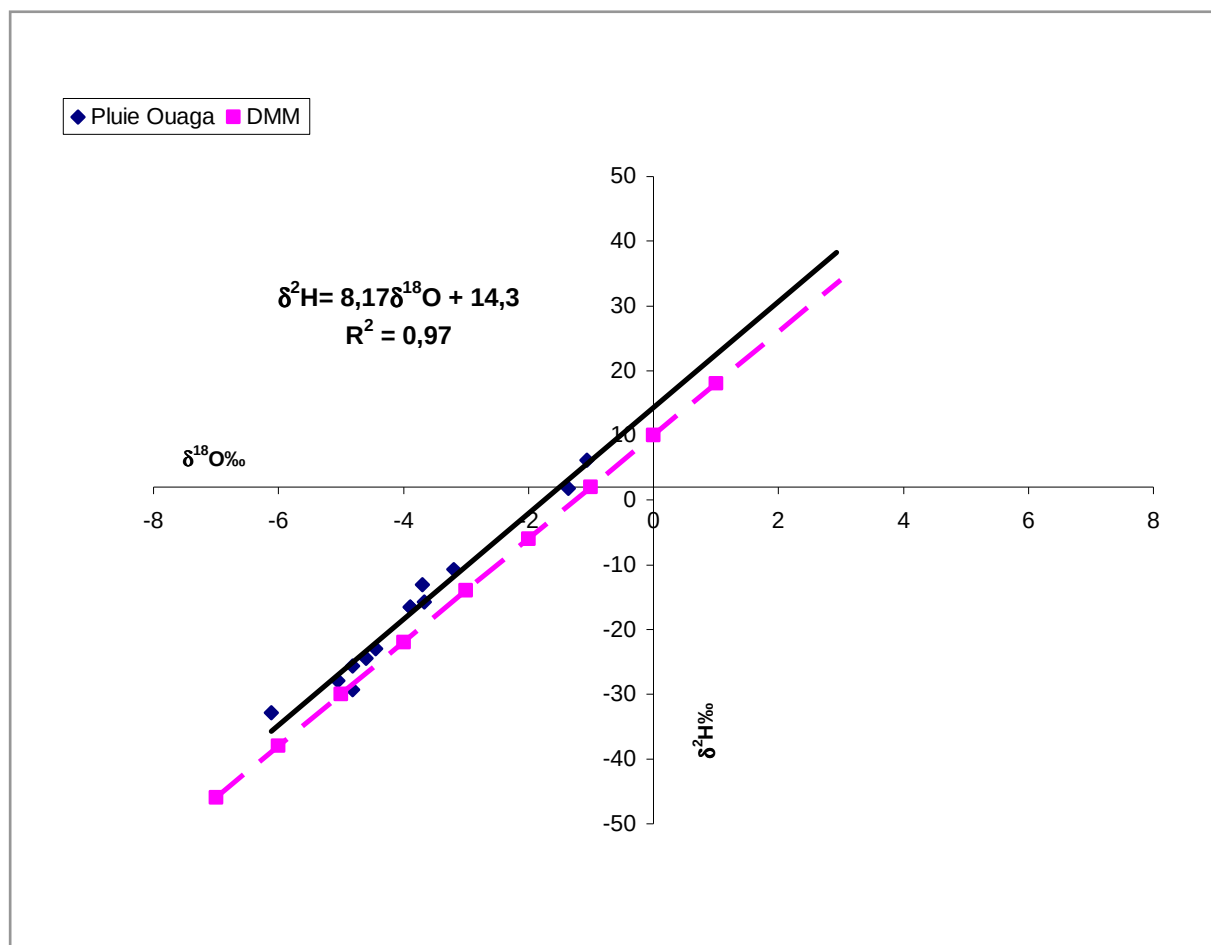


FIGURE 5.4 : Relation $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ dans les précipitations de Ouagadougou 2004-2006

Le climat à Ouagadougou est de type soudano-sahélien et le régime de précipitations est celui de la mousson (§ chapitre I.4.1). La saison de pluies dure 5 à 6 mois. Elle commence en mai et se termine en octobre pour une année moyenne.

Barogo est un village situé à 75 km au Nord-est de Ouagadougou, et Bobo deuxième ville du pays à 360 km à l'Ouest ; les deux régions sont sous influence du climat soudano-sahélien caractérisé par les mêmes saisons aussi contrastées et influencées par la mousson.

La pente de 8 montre que les précipitations ne sont pas évaporées. Une atmosphère de forte humidité relative autour de 95 % et la diminution de l'évapotranspiration potentielle en juillet - août sont les principaux facteurs explicatifs de ces faibles teneurs en isotopes lourds ; cela signifie également que la pluie ne s'évapore pas au cours de son trajet. La relation $\delta^{18}\text{O}$ hauteur de pluie mensuelle révèle que le phénomène d'évaporation est d'autant plus important que la hauteur de pluie est faible (figure 5.3). Les pluies les plus faibles sont les plus enrichies en ^{18}O .

L'évolution du comportement isotopique est le reflet du déplacement du F.I.T donc de la circulation des pressions atmosphériques régionales. Les teneurs en isotopes lourds décroissent

progressivement pendant que le F.I.T se déplace chargée de vapeur océanique du sud vers le nord au Sahara (§ figure 1.8 et paragraphe I.3.3). Au mois d'août, il amorce sa descente vers le sud et passe pour la deuxième fois sur la ville de Ouagadougou, et les pluies deviennent progressivement faibles et s'enrichissent en isotopes lourds.

I.1.4 - Les eaux souterraines

Un échantillonnage spécifique a été mené pendant les années 2005 et 2006 à la mi-septembre à la fin de la saison des pluies. En 2005 uniquement 7 forages et le piézomètre du CIEH ont été prélevés et en 2005 et en 2006 tous les puits et forages en exploitation des trois zones cibles ont été prélevés afin d'avoir une image isotopique des nappes dans le contexte de socle granitique de Ouagadougou.

Les résultats sont portés dans le tableau 5.4.

Les teneurs s'inscrivent entre -0.93 et -4.89‰ SMOW, avec une moyenne de -3.5 et un écart type de -1.04 pour ^{18}O et entre -5.9 et -27.8‰ SMOW avec une moyenne de -19.3 et un écart type de 6.3 pour le ^2H . Les teneurs maximales se trouvent au forage FPARC à proximité d'une masse d'eau stagnante venant du canal central.

TABLEAU 5.4 : Teneurs en ^{18}O - ^2H des eaux souterraines de Ouagadougou

Forages 2005/2006	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	d
FQP29	-4,89	-27,8	11,32
FZON	-3,50	-20,20	7,76
FPARC	-0,93	-5,90	1,50
FFT26	-4,50	-25,40	10,56
FKOS	-4,49	-26,40	9,52
FGOA	-4,55	-25,90	10,50
FQP24	-4,86	-27,50	11,38
FDAP	-3,87	-23,60	7,36
FBAS	-4,35	-26,20	8,56
Puits 2006	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	d
PBOUL	-2,10	-10,80	6
PGIB	-3,20	-15,10	10,50
PZIDA	-2,80	-13,40	9
PDAP	-2,10	-10	6,80
PBAR	-3,40	-19,02	8,18
PIEZO	-3,30	-19,20	7,20
PAGHA	-3,40	-20,60	6,60
PSECT	-3,10	-15,70	9,10

Ces teneurs ont été reportées dans le diagramme $^2\text{H} - ^{18}\text{O}$ (figure 4.5) en regard de la droite de précipitations.

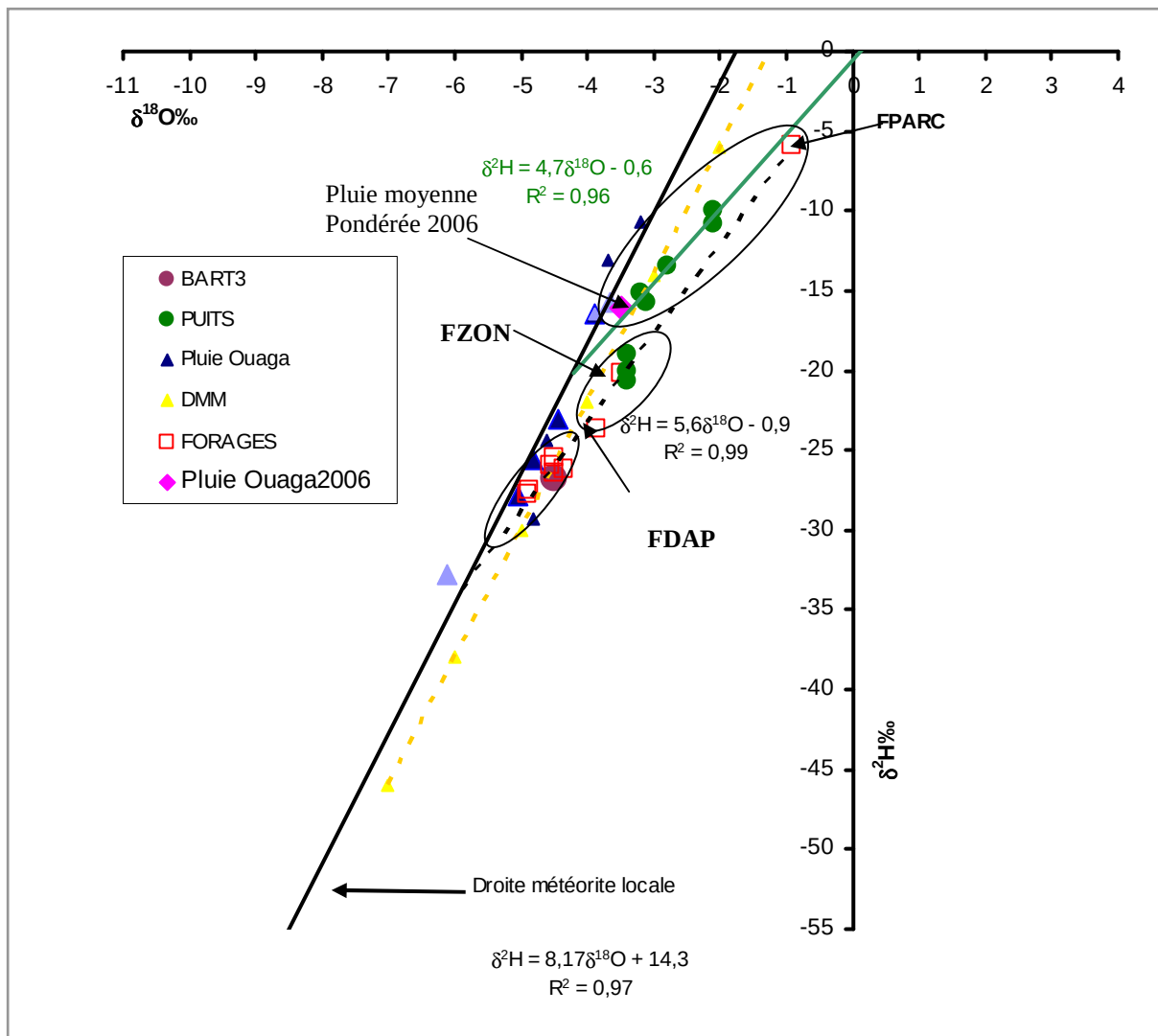


FIGURE 5.5 : Relation $\delta^{18}\text{O} - ^2\text{H}$ pour les eaux souterraines de Ouagadougou (les triangles bleus foncés représentent les pluies de juillet, août et septembre plus appauvries en ^{18}O)

I.1.4.1 - Relation $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ des eaux de forages

Dans un premier temps, lorsqu'on compare les valeurs de ^{18}O des eaux souterraines avec celles des précipitations, on remarque que presque tous les forages sont proches de la droite météorite locale ce qui semble indiquer qu'ils sont alimentés par les pluies efficaces.

Sur 9 forages, 3 sont manifestement sous la DML ce sont FZON, FDAP et FPARC et sont alimentés par les eaux évaporées de surface. Parmi ces forages celui du FPARC avec des eaux très chargées en chlorures et sulfates accuse une alimentation partielle par une eau de surface stagnante soumise à une forte évaporation comme en témoigne sa position sur le diagramme de la figure 5.5 et qui s'est enrichie en sels chlorures et sulfates,

Si on considère les variations des teneurs en ^{18}O , le delta varie entre -0.93 et -4.86 ‰, ce qui est important et signifie qu'il n'y a pas de recharge similaire entre les différents ouvrages et donc un marquage variable d'un ouvrage à l'autre. Ces résultats sont conformes aux observations hydrogéologiques (§ recharge). On peut alors distinguer la façon dont les forages sont alimentés à partir du diagramme $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$.

1.1.4.2 - Relation $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ des eaux des puits

Les ouvrages concernés sont en majorité des puits captant la nappe des altérites avec un niveau statique situé entre 1 et 3 mètres. Pour ces ouvrages, on peut penser que l'évaporation enrichit l'eau de surface en ^{18}O avant l'infiltration.

Effectivement, 5 puits échantillonnés en 2006 s'alignent suivant une droite d'équation de : $\delta^2\text{H} = 4.67 \delta^{18}\text{O} - 0.57$, dont l'origine sur la droite météorite locale correspond approximativement aux pluies efficaces de l'année 2006 (figure 5.5). Les puits sont alimentés par une infiltration d'eau de surface au cours de la saison 2006.

Trois (3) puits dont les eaux ne sont pas polluées PAGHA, PBAR, PIEZO CIEH se retrouvent sur la droite d'évaporation des forages, ils sont alimentés par des eaux de surface évaporées.

A l'échelle du bassin, les valeurs en ^{18}O varient beaucoup et il est possible de penser que vu que la nappe sub affleure elle subit plutôt une intense évaporation in-situ après l'infiltration rapide. Ceci semble traduire une recharge hétérogène et sélective car toutes les pluies ne rechargent pas la nappe.

I.2 - Le tritium

I.2.1 - Généralités et principe

Cet isotope radioactif de l'hydrogène est considéré comme élément traceur et surtout dateur de l'eau. Sa période de demi-vie est de 12.32 ± 0.05 ans et sa teneur s'exprime en unité tritium (UT).

Le ^3H dans les eaux naturelles a deux origines : naturelle et artificielle.

Le ^3H naturel est produit dans l'atmosphère essentiellement par l'action des neutrons du rayonnement cosmique sur l'azote atmosphérique avec une teneur dans les précipitations, sous les latitudes moyennes de l'hémisphère Nord de l'ordre de 5 UT (Roether, 1967).

Suite à des essais thermonucléaires aériens de 1952, les teneurs en tritium des précipitations ont atteint quelques milliers d'UT avec un pic de 3000 UT en 1963 pour les hautes latitudes.

Pour les basses latitudes, le pic de 1963 a été plus faible et la décroissance exponentielle qui suit est un peu moins rapide. L'injection du tritium dans la troposphère par les jets Stream et le recyclage des précipitations par évapotranspiration seraient responsables de ces effets.

Au cours de notre étude, les mesures de concentration en tritium ont porté sur onze (11) échantillons d'eau de pluie de Ouagadougou pendant la période de 2004 et 2005 et huit (8) échantillons d'eau souterraine en 2005.

Les données enregistrées à la station de Bamako seront utilisées pour montrer d'une part la décroissance du tritium dans ces eaux de pluie et d'autre part, pour situer dans ce contexte les mesures obtenues à Ouagadougou sur quelques eaux souterraines.

I.2.2 - Le signal pluie régional

Les teneurs en tritium des pluies de Bamako sont reportées sur le graphique de la figure 5.6 qui donne un aperçu de la décroissance exponentielle des teneurs en tritium des eaux de pluies.

La diminution rapide de teneurs en tritium qui a débuté en 1964 après le pic de 1963 du à l'arrêt des essais thermonucléaires aériens, s'est poursuivie jusqu'à des valeurs de 15 UT en 1979. La décroissance est ensuite très faible et une teneur de 3.7 UT a été mesurée en 1998.

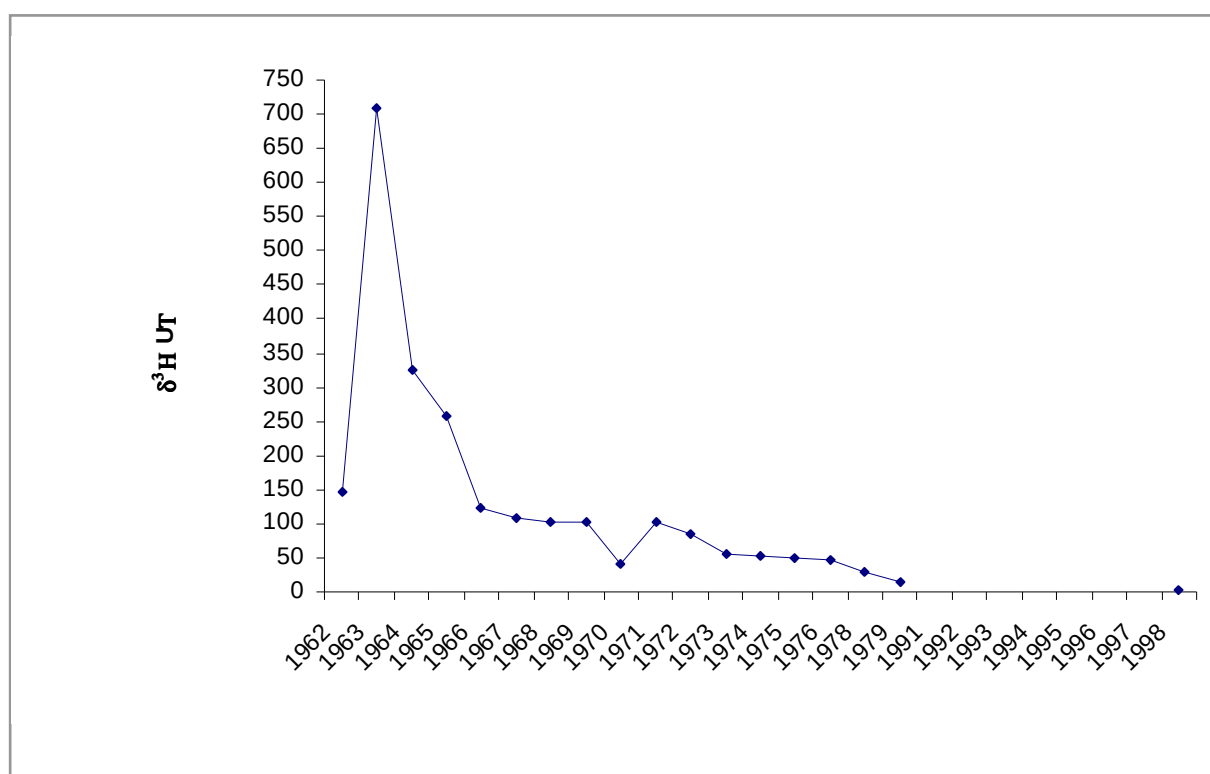


FIGURE 5.6 : Courbe de décroissance de l'activité du Tritium dans les eaux de Bamako

I.2.3 - Les teneurs actuelles en ^3H des pluies de Ouagadougou

Il n'existe pas une longue chronique de teneurs en tritium au Burkina Faso et les mesures disponibles à Ouagadougou et Bobo-Dioulasso sont insuffisantes pour caler le « signal entrée ».

Les données disponibles sont celles mesurées en septembre 1981, 23 UT à Ouagadougou (A.N. Savadogo 1984), de mai 1985 dans le cadre d'un projet 8 UT et celles de (Dakouré, 1999) avec des moyennes pondérées obtenues à Bobo-Dioulasso en 1997 et 1998, sont respectivement de 5.4UT et 5.1UT.

A Ouagadougou on dispose seulement de deux années de mesures faites dans le cadre de cette étude en 2004 et 2005. On trouve respectivement des moyennes pondérées 4.93 UT et 4.08 UT. (Tableau 5.5).

TABLEAU 5.5 : Tritium dans les précipitations mensuelles à Ouagadougou

Pluie Ouaga	lame en mm	^3H		^3H
juil-04	245,60	3,50		
août 04	194,40	6,00		
sept-04	181,10	5,40		
oct-04	16,30	8,50		
Année 2004 moyenne		5,85	Moy pondérée	4,93
Pluie Ouaga	lame en mm			^3H
avr-05	29,10	3,60		
mai-05	50,20	3,50		
juin-05	88	3,70		
juil-05	250,60	4,10		
août 05	282	4,30		
sept-05	123,20	4,10		
oct-05	21,90	4,50		
Année 2005 moyenne		3,97	Moy pondérée	4,08

Ces résultats de Ouagadougou donnent une teneur moyenne de 4.5 UT. On peut les comparer à ceux de Bobo-Dioulasso situé à 360 km à l'Ouest de Ouagadougou pour les périodes de 1997 et 1998, qui sont du même ordre de grandeur.

A partir des données de la figure 5.7, on remarque que :

- il n'existe pas de correspondance entre la concentration en ^3H et la hauteur de pluie mensuelle pour les deux années de mesures. Cependant, les teneurs maximales s'observent en octobre pour 2004 et 2005 avec respectivement 8.5 UT et 16.3 mm de pluie pour l'année 2004, et 4.5 UT et 21.9 mm de pluie pour 2005 ;
- les compositions en tritium présentent une légère décroissance annuelle entre 2004 et 2005.

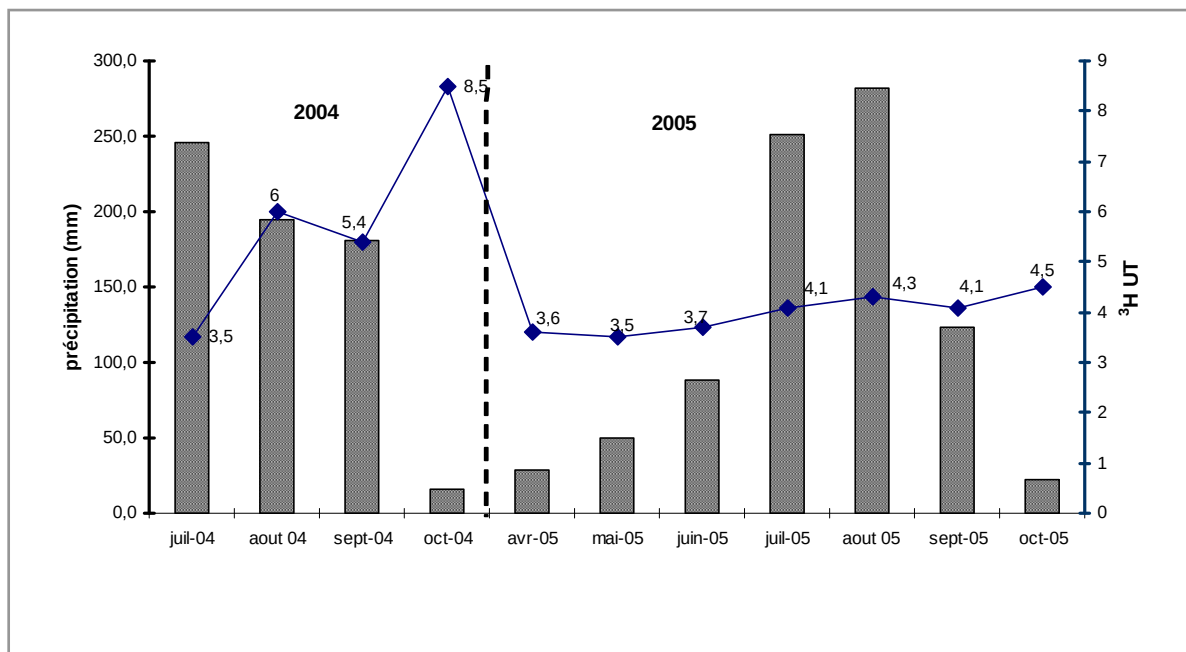


FIGURE 5.7 : Teneurs en tritium dans les précipitations de Ouagadougou 2004 et 2005

I.2.4 - Le tritium dans les eaux souterraines

Les teneurs mesurées dans les eaux de forages sont reportées sur le tableau 5.6. Selon Fontes, 1985 une activité inférieure à 3 UT en Afrique de l'Ouest correspond à une recharge avant 1952.

Le petit nombre de points de prélèvements et d'analyses concernant les teneurs en tritium des eaux souterraines de Ouagadougou, ne permet pas de faire une interprétation globale.

Néanmoins, à partir des résultats obtenus pour les eaux souterraines on peut émettre 3 hypothèses en les classant en trois familles :

- des eaux récentes avec des teneurs en tritium de 4.5 UT sont proches de celles des eaux de pluies à Ouagadougou c'est le cas du piézomètre du CIEH qui capte les altérites à 20 mètres de profondeur ;

- les teneurs en tritium comprises entre 2 et 4 UT indiquent que les prélèvements représentent un mélange entre une eau ancienne et des apports récents : ce sont certains forages captant les eaux du socle cristallin de type granitique (FBAS, FPARC, FGOA, FZON) ;

- les teneurs en tritium comprises entre 0 et 1 UT montrent des eaux anciennes. Pour Fontes. J.C (1985), elles auraient un âge minimum de 40 ans. On peut toujours estimer que la grande partie des eaux s'est infiltrée avant 1952 (début des essais thermonucléaires aériens). Ceci dénote que ces eaux suivent des circulations lentes et ont des âges minimum de 55 ans. Les ouvrages concernés sont (F029, FT26, F024) ;

- La chimie (§ ACP figure 4.6) a montré que les forages sont à mi-chemin entre temps de séjour long et temps de séjour court, ceci voudrait dire que beaucoup de forages auraient un temps de séjour

supérieur à 55 ans. L'interprétation décisive fera intervenir les teneurs en ^{14}C du carbone total dissous, traceur utilisé pour dater les eaux.

TABLEAU 5.6 : Teneurs en ^3H des eaux que quelques ouvrages de la ville de Ouagadougou

Forages	Date de prélèvement	^3H UT
Forage QP29	10/09/2005	$0,3 \pm 0,3$
Forage N° 3 (FZON)	10/09/2005	$3,1 \pm 0,4$
Forage PARC urbain	10/09/2005	$3 \pm 0,4$
Forage FT26	10/09/2005	$<0,3 \pm 0,3$
Piézo CIEH	10/09/2005	$4,5 \pm 0,4$
Forage Goanghin/N° 22	10/09/2005	$3,4 \pm 0,3$
Forage QP24	10/09/2005	$1 \pm 0,3$
Forage BASSOLET/N° 27	10/09/2005	$2,3 \pm 0,3$

L'interprétation des teneurs en tritium des eaux de Ouagadougou, confirme les observations hydrogéologiques : la recharge est hétérogène, sélective, et est assurée par les pluies efficaces ou parfois rapide par infiltration verticale à travers les fractures qui sont les zones où la minéralisation des eaux est acquise plus rapidement et où la vulnérabilité à la pollution augmente.

I.3 - Conclusion partielle

La présente étude a permis de caractériser le signal pluie à Ouagadougou accompagnée d'une comparaison avec les eaux souterraines. Ce signal sera amélioré ultérieurement.

❖ Sur les eaux de pluies, on note une variabilité aussi bien annuelle qu'interannuelle pour les teneurs en oxygène 18 (^{18}O) et deutérium (^2H). Les eaux de l'année 2006 ($-3.69 \delta^{18}\text{O} \text{ ‰}$ pour 460 mm) sont moins négatives que celles de 2005 ($-4.26.69 \delta^{18}\text{O} \text{ ‰}$ pour 845 mm) et celles de 2004 ($-4.80. \delta^{18}\text{O} \text{ ‰}$ pour 634 mm). La droite météorite locale obtenue à partir des couples $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ disponibles est la suivante : $\delta^2\text{H} = 8.17 \delta^{18}\text{O} + 14.3$. Elle est très proche de la droite météorite mondiale.

❖ Sur le diagramme $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$, la majorité des forages ont des teneurs proches de celles des pluies efficaces moyennes annuelles. Trois points se distinguent par le fait qu'ils concernent des eaux évaporées.

❖ Les eaux des puits de Ouagadougou s'organisent autour d'une droite d'évaporation d'équation $\delta^2\text{H} = 4.67 \delta^{18}\text{O} - 0.57$. Leurs teneurs initiales sont conformes aux pluies efficaces moyennes de la saison 2006. Trois s'en distinguent par le fait qu'elles soient relatives à des eaux moins évaporées et pas polluées.

❖ On peut penser à deux mécanismes de recharge pour les aquifères : une recharge directe à partir des pluies peu ou pas évaporées prépondérante pour la très grande majorité des forages, et une

recharge indirecte à partir d'eaux stagnantes fortement évaporées qui est surtout le fait des puits de la nappe des altérites, ou encore penser à une forte évaporation à partir de la nappe peu profonde.

❖ Les teneurs en tritium se situent autour de 4.5 UT ; résultats comparables à ceux trouvés à Bobo-Dioulasso (5 UT).

❖ Le tritium (^3H) a confirmé que les différentes recharges sont actuelles pour la grande majorité des points d'eau et les faibles teneurs en tritium marquent la proportion élevée d'eaux anciennes. Cependant, les eaux des nappes devraient faire l'objet de dosage du ^{14}C pour définir l'âge de chacune d'entre elle. Ceci rendra compte au mieux du système de renouvellement et d'écoulement souterrain dans cet aquifère discontinu à matrice silicatée.

CONCLUSION SUR L'HYDROCHIMIE ET L' HYDROCHIMIE ISOTOPIQUE

L'application des outils hydrogéochimiques dans l'investigation des eaux souterraines du système aquifère de Ouagadougou a permis de préciser la complexité de son fonctionnement général.

Les aquifères de socle de l'agglomération de Ouagadougou sont caractérisés par des conductivités électriques comprises entre 99 et 1253 $\mu\text{S/cm}$. Le pH indique que les eaux sont légèrement acides à neutres avec des valeurs comprises entre 5.4 et 7.6. Les températures annuelles de la nappe profonde varient entre 31 et 34 °C avec une moyenne de 32°C. Les teneurs en bicarbonates sont comprises entre 17 mg/l et 378 mg/l soit 6.2még/l. Une assez bonne corrélation est observée entre la conductivité et l'alcalinité tout particulièrement pour les eaux des forages ; ceci confirme que les bicarbonates constituent l'essentiel de leur minéralisation. Les eaux des puits affectées d'une pollution par des éléments anthropiques, s'écartent de cette relation avec des valeurs de conductivités très élevées.

La recharge a entraîné des variations dans la minéralisation des eaux. Dans certains ouvrages, on observe une baisse de la conductivité électrique sous l'effet de la dilution par les eaux d'infiltration. Les eaux de certains puits ont vu leur conductivité électrique augmenter ; ce qui dénoterait d'un apport dans la minéralisation de ces dernières l'infiltration d'eaux usées. La seule mesure de la conductivité est une façon pratique de mettre en évidence la pollution. Les eaux à minéralisation élevée se rencontrent principalement au niveau des puits.

Les faciès géochimiques des eaux sont dominés par les bicarbonatés calciques et magnésiens qui représentent 60 % des échantillons recueillis. Les faciès chlorurés calciques et nitrates sont également importants tandis que les eaux bicarbonatées calciques sont minoritaires.

Toutes ces eaux ne diffèrent généralement entre elles que par leur niveau de concentration ionique qui varie suivant l'environnement immédiat fortement anthropique dans l'agglomération de Ouagadougou.

L'analyse en composantes principales (**ACP**) a bien hiérarchisé l'hydrochimie par :

- la complexité sur le système ;
- l'importance de la pollution révélée par le 1^{er} axe factoriel F1 (39%) ;
- l'importance du processus de minéralisation de l'eau au contact de la roche par le deuxième axe factoriel F2 (15%), par l'hydrolyse des silicates, phénomène prédominant ;

La faible représentativité des axes 39 % et 15% est indicateur de :

- l'hétérogénéité géochimique dans l'acquisition de la minéralité ;
- l'hétérogénéité des lignes de flux dans ce contexte d'aquifères discontinus de socle de Ouagadougou.

Les variations temporelles montrent que les teneurs de certains cations et anions ont baissé en début de saison des pluies dans certains puits, alors que d'autres ont vu les concentrations en cations et anions augmenter sous l'effet de l'infiltration directe des eaux de pluie. Le phénomène d'apport d'éléments de sub surface lors de l'infiltration de l'eau de pluies, de même que les phénomènes d'interaction eau-roche réservoir peuvent expliquer l'augmentation des teneurs en cations dans les eaux pendant la recharge sélective au niveau des différents ouvrages de la zone d'étude qui réagissent différemment.

De ce constat, il ressort que chaque ouvrage a sa réaction propre dans la zone de socle cristallin de Ouagadougou. La configuration en poches plus ou moins discontinues des nappes n'autorise pas vraiment une circulation en flot des eaux et ceci va dépendre des caractéristiques hydrogéologiques de l'ouvrage ou groupe d'ouvrages voisins exploitant la même fracture. Tout ceci est confirmé par les observations hydrogéologiques.

Pour l'acquisition de la minéralité, il apparaît clairement que la mise en solution des minéraux aluminosilicates calciques sous l'action du CO_2 dissous dans l'eau est le processus dominant dans l'acquisition et l'évolution de la minéralisation des eaux des nappes de Ouagadougou. Elles sont toutes sous-saturées vis-à-vis de la calcite et de la dolomite, du gypse et de l'halite, ce qui indique que le phénomène prédominant est l'hydrolyse des silicates qui fournirait une partie non négligeable des cations, de la silice et des HCO_3^- dont l'origine est essentiellement contrôlée par la diffusion du CO_2 atmosphérique et organique dans le milieu cristallin.

L'étude isotopique a permis de caractériser le signal pluie à Ouagadougou accompagnée d'une comparaison avec les eaux souterraines. Il a pour droite d'équation :

$$\delta^2\text{H} = 8.17 \delta^{18}\text{O} + 14.3 \text{ très proche de la droite météorite mondiale.}$$

Sur les eaux de pluies, on note une variabilité aussi bien annuelle qu'interannuelle pour les teneurs en oxygène 18 (^{18}O) et deutérium (^2H).

La valeur de l'excès en deutérium supérieure à 10 confirme l'origine mixte de la vapeur atmosphérique et montre que les masses d'air d'origine océanique, sont légèrement enrichies par des masses d'eaux d'origine continentale.

Sur le diagramme $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ la majorité des forages ont des teneurs conformes aux pluies efficaces. Trois points se distinguent par le fait qu'ils sont évaporés.

Les eaux de quelques puits de Ouagadougou s'organisent autour d'une droite d'équation :

$$\delta^2\text{H} = 4.67 \delta^{18}\text{O} - 0.57.$$

Leurs teneurs sont conformes aux pluies efficaces moyennes de la saison 2006. Trois points d'eau s'en distinguent également par le fait que leurs eaux soient moins évaporées et non polluées.

Toutes ces analyses amènent à penser que l'on peut avoir deux mécanismes de recharge pour les nappes : une recharge directe à partir des pluies peu ou pas évaporées et une recharge indirecte à partir d'eau fortement évaporées.

Le tritium (^3H) a confirmé que les différentes recharges sont actuelles pour la grande majorité des points et les faibles teneurs en tritium obtenues marquent la proportion élevée d'eaux anciennes dans les mélanges. Cependant, les eaux des nappes devraient faire l'objet de dosage du ^{14}C qui contribuera à définir l'âge de chacune d'entre elle et ceci rendra compte au mieux du système de renouvellement et d'écoulement souterrain dans cet aquifère discontinu à matrice silicatée de la ville de Ouagadougou.

PARTIE III - POLLUTION, VULNERABILITE

CHAPITRE VI - POLLUTION DES NAPPES AQUIFERES DE OUAGADOUGOU

I - LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES

Les résultats des analyses chimiques ont montré des eaux à majorité bicarbonatées calciques et magnésiennes. Les faciès chlorurés calciques et nitrates sont également importants tandis que les eaux à faciès bicarbonatés calciques sont minoritaires. Le faciès chloruré et nitraté des échantillons recueillis est lié à une forte pollution anthropique. La comparaison des mesures des éléments physico-chimiques (*Tableaux en annexe VI*) avec les normes de l'OMS montre que les teneurs en NO_3^- et en NO_2^- et les conductivités électriques des eaux des puits présentent des valeurs supérieures aux normes admissibles. Ces eaux contiennent des teneurs en nitrates de 73 mg/l en moyenne et des teneurs globales en sels minéraux de 590 mg/l.

I.1 - Les résultats de l'étude des éléments majeurs

L'ensemble des analyses représentées sur le diagramme de Piper (*figure 4.5*) laisse apparaître que le calcium domine dans 90 % des cas avec une moyenne de 23 mg/l, le sodium dans un seul cas avec 60 mg/l au PDAP, et le potassium est presque toujours le cation le moins abondant.

L'anion dominant est toujours le bicarbonate avec une teneur moyenne de 128 mg/l loin devant les chlorures et les nitrates (moyennes : 13 mg/l ; 9.1mg/l). Cependant les teneurs en nitrates dépassent parfois les normes de potabilité de l'OMS dans une majorité des puits et dans certains forages. Les concentrations en sulfates sont toujours relativement faibles.

Trois familles chimiques ont été individualisées :

- ⇒ une famille majoritairement constituée d'eaux à faciès bicarbonaté calcique et magnésien (55% des forages, trois puits + piézomètre du CIEH) ;
- ⇒ une deuxième famille composée d'eaux à faciès bicarbonaté calcique (45 % des forages) ;
- ⇒ une troisième famille à faciès chloruré nitraté, calcique ou sodique. (90% des puits suivis).

Les nitrates sont toujours présents dans ces eaux. Le bicarbonate reste l'anion dominant dans toutes ces eaux si on examine séparément nitrates et chlorures. Ces types d'eaux sont généralement à proximité de latrine familiale.

L'analyse factorielle a été utilisée sur l'ensemble des eaux pour identifier les facteurs susceptibles d'expliquer les variations de la composition chimique des eaux de l'agglomération de Ouagadougou. Après analyse, trois facteurs permettant d'expliquer 65 % de l'ensemble des variables ont été sélectionnés. Le premier facteur F1 rend compte de 39 % de la variance et montre une corrélation positive entre Na^+ et K^+ , Na et Cl^- , nitrates et sulfates. Il est attribué au lessivage de sels de surface et à la pollution domestique et agricole. Le second facteur F2 est responsable à 15 % de la

variance et présente une corrélation positive entre la conductivité les bicarbonates, le magnésium et le pH. Il traduit la minéralisation naturelle par l'hydrolyse des silicates, et donne une estimation du temps de séjour de l'eau (intensité de l'interaction eau-roche). Cependant l'augmentation des bicarbonates et donc de la conductivité peut aussi être causée par la minéralisation de matière organique d'origine anthropique entraînée par l'infiltration. L'ACP a montré la grande complexité du système aquifère et a mis en exergue l'interférence de nombreux facteurs de minéralisation quand on raisonne globalement ou séparément sur les eaux de puits ou sur les eaux de forages.

Les résultats de cette première analyse ont permis de classer les eaux en deux familles, les eaux polluées (Famille A) et les eaux non polluées (Famille B) sur lesquelles une analyse en composantes principales a été effectuée.

I.1.1 - Analyses en composantes principales sur les eaux polluées (*Famille A figure 6.1*)

Dans ce paragraphe, toutes les eaux polluées sans préjuger leur origine sont prises en compte. Les ouvrages concernés sont en majorité des puits captant la nappe superficielle et quelques forages situés en zone III.

TABLEAU 6.1 : Coefficients de corrélation entre les différents éléments chimiques des eaux polluées de la ville de Ouagadougou

Matrice des corrélations :

	T°C	pH	c25°C	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	SiO ₂
T°C	1,00													
pH	0,19	1,00												
c25°C	0,29	-0,36	1,00											
Ca ²⁺	-0,12	-0,27	0,69	1,00										
Mg ²⁺	0,56	-0,16	0,45	0,36	1,00									
Na ⁺	-0,14	-0,31	0,74	0,68	0,06	1,00								
K ⁺	-0,23	-0,10	0,53	0,71	0,16	0,86	1,00							
HCO ₃ ⁻	0,01	0,00	0,71	0,89	0,40	0,69	0,68	1,00						
Cl ⁻	-0,24	-0,57	0,44	0,59	0,14	0,77	0,66	0,44	1,00					
SO ₄ ²⁻	-0,60	-0,18	-0,02	0,57	-0,03	0,42	0,53	0,45	0,71	1,00				
NO ₃ ⁻	0,43	-0,28	0,18	-0,12	0,30	0,08	0,13	-0,27	0,02	-0,44	1,00			
NO ₂ ⁻	0,00	-0,11	-0,09	-0,05	0,40	0,09	0,43	-0,13	0,17	0,07	0,58	1,00		
NH ₄ ⁺	-0,11	-0,17	0,69	0,63	0,22	0,90	0,95	0,64	0,60	0,31	0,24	0,42	1,00	
SiO ₂	0,65	0,16	0,21	-0,04	0,74	-0,41	-0,38	0,11	-0,43	-0,42	0,00	-0,03	-0,27	1,00

Au regard des résultats du tableau 6.1 où figurent les paramètres on peut faire plusieurs remarques :

- le potassium est bien corrélé avec l'ion ammonium, les bicarbonates et les chlorures dans une moindre mesure ;
- le lien est fort entre sodium ammonium, potassium et chlorure ;

- il existe une très bonne corrélation entre le calcium et les bicarbonates, le potassium et dans une moindre mesure avec le sodium et l'ammonium ;

- une bonne relation existe entre chlorures et sulfates, elle est plus discrète avec l'ammonium ;

- une bonne corrélation est trouvée entre conductivité, sodium, et bicarbonates.

En comparaison avec les indices de corrélations de la première analyse (toutes origines confondues du tableau 4.4), on remarque que l'ACP permet d'affiner l'analyse effectuée à partir de l'ensemble des eaux qui était brouillée par la forte pression anthropique. On observe :

- l'augmentation du nombre de corrélations significatives entre les différents paramètres ;

- l'amélioration du pourcentage de certains indices malgré l'ajout de trois (3) paramètres (silice, nitrite et ammonium) ;

- les indices de corrélation par rapport aux bicarbonates sont passés de 0.01 à 0.71 avec la conductivité, de 0.21 à 0.9 avec le calcium, de 0.12 à 0.40 pour le magnésium et de 0.10 à 0.7 avec le sodium et le potassium.

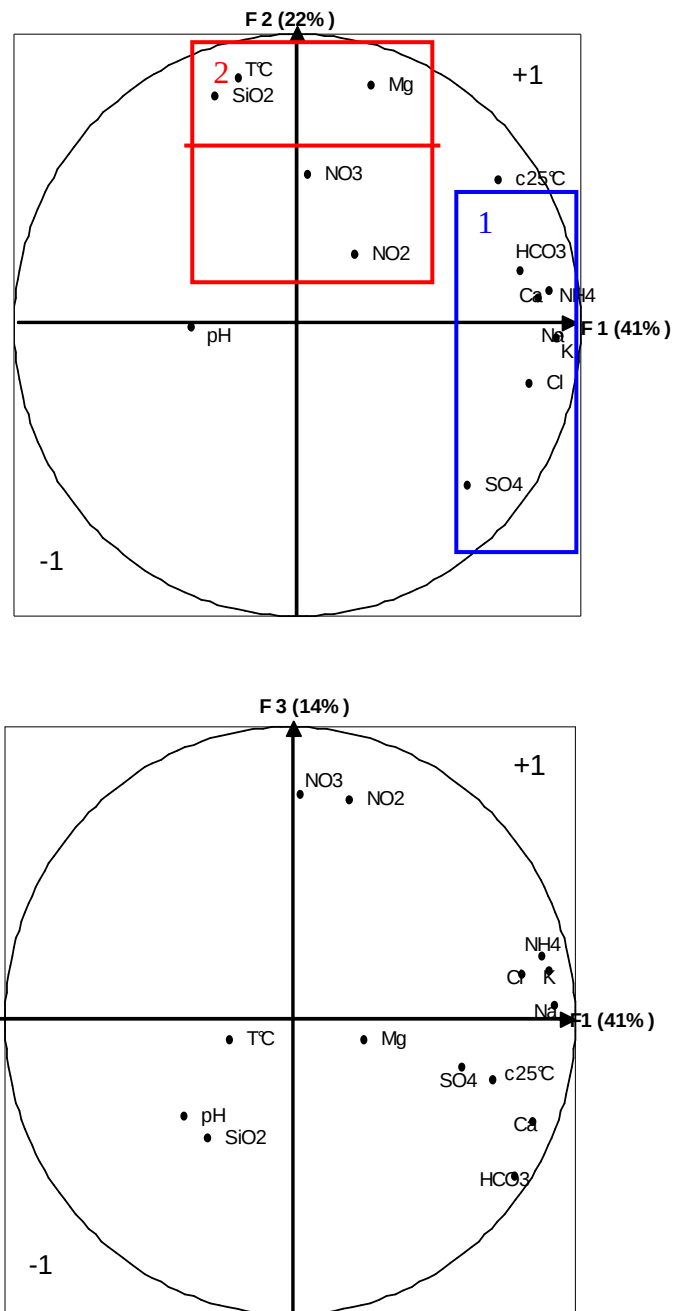


FIGURE 6.1 : ACP des données physico-chimiques des eaux polluées de douze ouvrages de la ville de Ouagadougou

L'analyse en composantes principales (*figure 6.1*) réalisée sur la famille A montre en prenant toujours en compte les mêmes paramètres (13) que :

- les trois axes permettent d'expliquer 77 % de l'ensemble des variances ce qui est bien significatif.

L'axe F1 représente 41% de la variance. Ce pourcentage est un indicateur de l'hétérogénéité géochimique dans l'acquisition de la minéralisation (Vallès 2007). Il est lié à la minéralisation de l'eau entre le sol et l'aquifère et aux pressions de surface. L'axe F1 regroupe les chlorures, le sodium, le potassium, l'ion ammonium et les sulfates. Dans ce groupe, l'association des ions chlorures, sodium, potassium, ammonium et sulfate correspond au pôle d'origine anthropique de la minéralisation de l'eau. Le reste, la conductivité, les bicarbonates et le calcium est indicateur du milieu influencé par les eaux récentes soumises à un mécanisme d'acquisition rapide de la minéralisation (pollution anthropique).

Sur F1 le calcium et les bicarbonates sont bien corrélés. L'axe F2 oppose les nitrates et nitrites aux sulfates. Il indique une pollution par de l'azote d'origine agricole et/ou domestique et industrielle.

On remarque également sur cet axe F2 le regroupement de la température, de la silice et du magnésium. Cette association (silice et magnésium) est caractéristique de la minéralité d'altération dans un environnement semi-captif (§ *paragraphe II.3.2*) dans un contexte de socle granitique.

En première approximation, l'axe F2 a deux rôles : il indique dans un premier temps le temps de résidence des eaux (silice, magnésium) ; ensuite il oppose les eaux récentes nitrates et nitrites aux sulfates et pH et dans un degré moindre aux chlorures. Il explique le processus de nitrification se produisant aux effluents.

I.1.2 - Analyses en composantes principales les eaux non polluées (*Famille B figure 6.2*)

L'analyse corrélative effectuée sur la famille B, avec seulement 11 paramètres montre une légère augmentation des indices (en rouge) dans le tableau 6.2 par rapport aux indices du tableau 4.1 qui prenait en compte toutes les eaux.

TABLEAU 6.2 : Coefficients de corrélation entre les différents éléments chimiques des eaux non polluées de la ville de Ouagadougou

Matrice des corrélations :

	T°C	pH	c25°C	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ³⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
T°C	1,00										
pH	-0,02	1,00									
c25°C	-0,21	0,28	1,00								
Ca ²⁺	-0,20	0,15	0,41	1,00							
Mg ²⁺	-0,06	0,07	0,31	0,74	1,00						
Na ⁺	-0,25	-0,13	0,29	0,17	0,13	1,00					
K ⁺	-0,14	-0,13	0,24	0,29	0,22	0,19	1,00				
HCO ₃ ³⁻	-0,14	0,06	-0,02	0,22	0,11	0,07	0,12	1,00			
Cl ⁻	0,00	-0,23	-0,09	0,08	0,16	0,34	-0,03	-0,12	1,00		
SO ₄ ²⁻	-0,14	0,21	0,07	0,16	0,01	0,12	0,31	0,21	-0,26	1,00	
NO ₃ ⁻	-0,06	-0,41	0,04	-0,06	0,10	0,39	-0,03	-0,08	0,31	-0,25	1,00

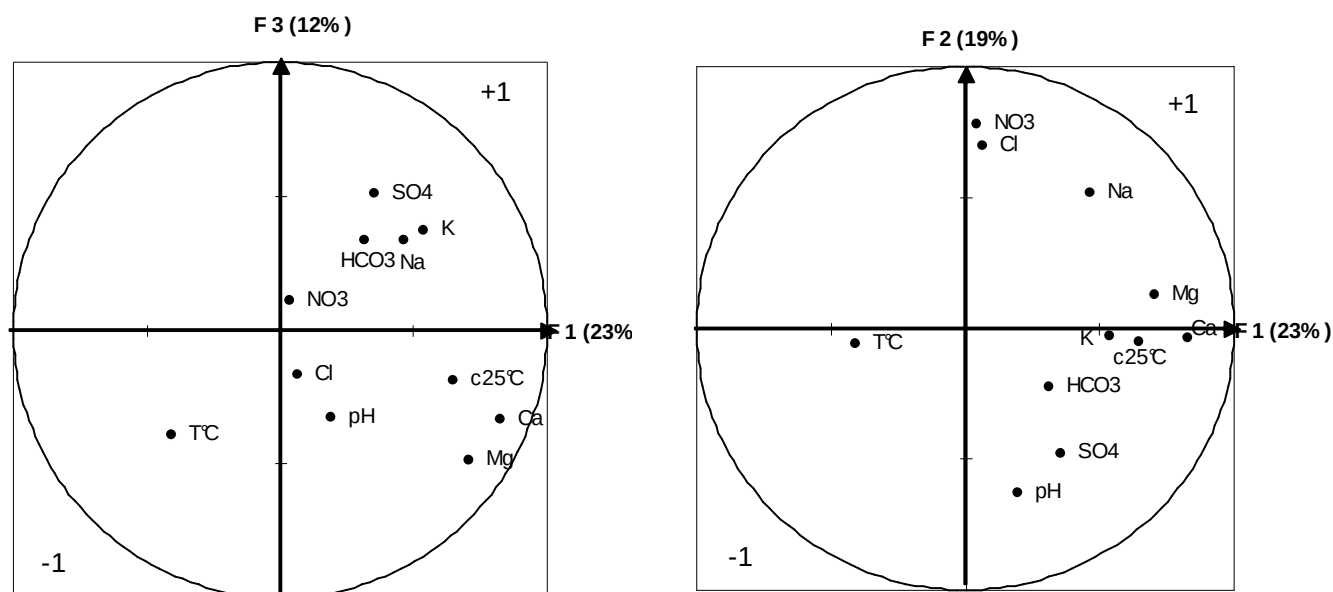


FIGURE 6.2 : ACP des eaux non polluées

On observe que le calcium se corrèle bien avec le magnésium.

L'analyse de l'ACP montre que :

L'axe F1 bien que peu représentatif (23%) regroupe la conductivité, le calcium, le magnésium, le sodium et les bicarbonates. Il traduit la minéralisation naturelle de l'eau ainsi que le degré d'altération des roches. Sa faible représentativité est indicateur de :

- l'hétérogénéité géochimique dans l'acquisition de la minéralité ;
- l'hétérogénéité des lignes de flux dans ce contexte d'aquifères discontinus de socle.

L'axe F2 oppose nitrates, chlorures, et sodium aux sulfates et pH. Il correspond au pôle anthropique car il oppose des eaux jeunes (nitrates, chlorures et sodium) à des eaux plus âgées qui ont interagi avec l'encaissant.

Ce qui ressort de cette nouvelle approche est que la pollution par les nitrates constitue le facteur prépondérant de la minéralisation des points d'eaux de la ville de Ouagadougou. Il reste difficile de montrer une structuration marquée par l'hydrochimie dans ce contexte de socle fracturé et, la complexité hydrogéologique de ce système aquifère de socle granitique fracturé reste entière.

I.1.3 - Analyse Discriminante

Une deuxième approche à partir de l'analyse discriminante a été utilisée dans l'étude des eaux de la ville. Les 67 points d'eau ont été préalablement classés en quatre groupes en fonction de l'environnement immédiat de chaque ouvrage, et des types et origines de la pollution :

1. groupe I constitué par 55 points d'eau non pollués ;
2. groupe II constitué par tous les points puits creusés à proximité de latrine : PDAP, PGIB, PSCT, PZOB, et PZID (pollution domestique) ; le PBOU (pollution agricole) est maintenu dans le groupe II ;
3. groupe III composé par : BART3 (barrage Ouaga3), PBAR, PIEZO, FPARC (pollution urbaine) ;
4. groupe IV constitué par FKOSS et FFT26 (pollution industrielle).

L'objectif de l'analyse est de déterminer les critères permettant de définir les groupes établis à priori et de vérifier que ces groupes déterminés à priori ont une réalité statistique (individus bien ou mal classés). Chaque groupe peut être représenté par son centre de gravité. En effet, l'analyse discriminante consiste à rechercher les axes sur lesquels les centres de gravité se projettent avec le maximum de dispersion (*figure 6.3*).

Les trois éléments (NH_4^+ , NO_2^- , et SiO_2) ne sont pas intégrés dans l'analyse représentée sur le tableau 6.3 parce qu'ils n'ont pas été dosés dans toutes les eaux. On a une classification des 67 points d'eau soit 100% de découpage en quatre groupes. La meilleure discrimination est définie. Cette analyse montre des résultats qui confirment que la classification faite à priori est bien fondée. Sur le tableau 6.3 et la figure 6.3 on remarque que :

F1 qui représente 93 % de la variance est la seule fonction capable de séparer les eaux non polluées, des eaux du groupe IV (pollution industrielle) et celles du groupe III (pollution urbaine) confondues et du groupe II (pollution domestique). Ces deux groupes III et IV ne se distinguent pas vraiment et s'alignent sur la même verticale ; ce qui signifie que l'on ne peut séparer ces deux types de pollution.

F2 avec 5.7 % de la variance permet de différencier la pollution industrielle et la pollution urbaine des autres types de pollution, elles sont plus ou moins alignées.

On peut dire que l'axe F1 quantifie la pollution et révèle que la pollution domestique est prépondérante dans l'agglomération de Ouagadougou.

Le tableau 6.4 montre une corrélation entre les NO_3^- et le Ca^{2+} . Par contre le Ca^{2+} est anti corrélé au Mg^{2+} . Selon F1, les eaux polluées sont riches en NO_3^- et Ca^{2+} et pauvres en Mg^{2+} .

Quant à l'axe F2, il permet de séparer la pollution industrielle marquée par une température et un pH élevés.

L'axe F3 qui représente seulement 1.2 % n'a pas de signification particulière.

TABLEAU 6.3 : Fonctions discriminantes canoniques ; tableau de classification des points d'eau selon les types et origines de pollution

Fonction	% (variance)
F1	93
F2	5.7
F3	1.2

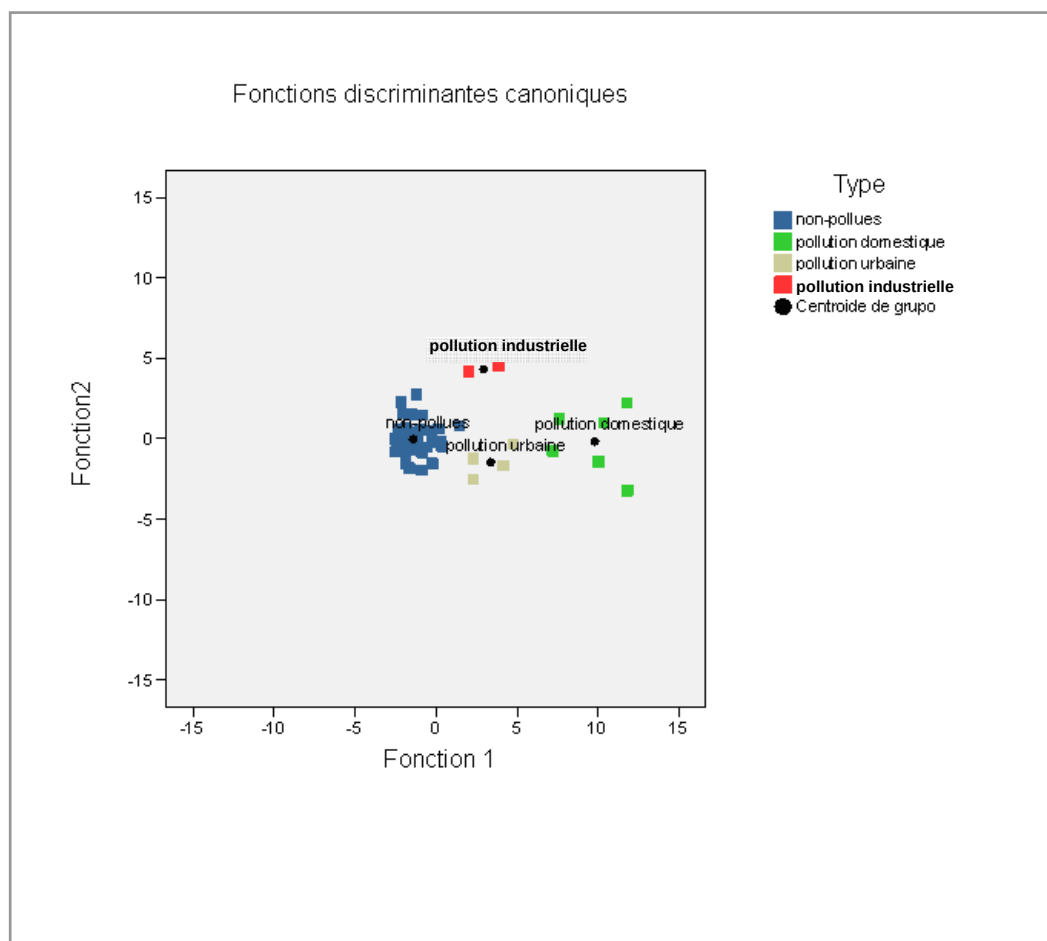


FIGURE 6.3 : Analyse discriminante des données hydro chimiques des eaux de 67 ouvrages : classification des types de pollutions

TABLEAU 6.4 : Coefficients de corrélation des fonctions discriminantes canoniques

	F1	F2	F3
TDS	-0.010	0.021	-0.023
T°C	-0.045	0.322	0.255
pH	-0.084	0.342	0.530
c25°C	0.000	-0.001	0.000
Ca	0.195	-0.056	0.123
Mg	-0.193	0.003	0.098
Na	-0.083	-0.043	0.183
K	0.095	-0.054	0.072
HCO3-	0.000	0.001	0.001
Cl	0.098	-0.065	-0.005
SO4	0.049	0.006	-0.117
NO3-	0.136	0.059	0.018
(constante)	-0.549	-14.675	-12.564

Cette analyse discriminante montre qu'il existe une logique dans la séparation des points d'eau en groupes distincts et que la pollution dominante est celle des latrines et fosses septiques qui jouxtent les puits dans chaque parcelle de la ville de Ouagadougou. Elle précise que le type de pollution qui prédomine à Ouagadougou est la pollution domestique.

I.2 - Etude de la répartition spatiale des nitrates sur 1800 puits à Ouagadougou

Considérant le caractère discontinu du système aquifère de la ville de Ouagadougou, une étude généralisée de la pollution à travers 1800 puits a été réalisée. Les données acquises sur ces puits concernent systématiquement la conductivité, le pH, les nitrates pour les paramètres physico-chimiques. Pour les caractéristiques physiques, la localisation géographique avec un GPS Garmin III, la profondeur du niveau de la nappe et la distance de 4 à 30 m séparant les puits des latrines, ont été acquises.

Les données recueillies sur le terrain ont été traitées par les approches géostatistique et chrono statistique en vue de caractériser la structure spatiale des teneurs des nitrates.

Avant de pouvoir cartographier les nitrates, il convient en effet d'étudier la structure spatiale de leurs variations qui peut donner des indications intéressantes sur le déterminisme des concentrations mesurées.

I.2.1 - Analyses corrélative et spectrale de la répartition spatiale des teneurs en nitrates

I.2.1.1 - Le variogramme

Les 1800 puits constituent une base de données spatialisée très importante en nombre, et il est alors possible d'étudier la variabilité spatiale des teneurs en nitrates.

Le calcul du variogramme a été utilisé avec toutes ces valeurs. Il fait apparaître une structure emboîtée avec une portée à courte distance $a_1 = 350$ m environ et une superstructure à une échelle plus vaste avec une portée $a_2 = 2400$ m environ. Après avoir atteint ce palier de semi-variance maximale, la variabilité diminue lentement jusqu'à $a_3 = 5\ 500$ m (*figure 6.4*).

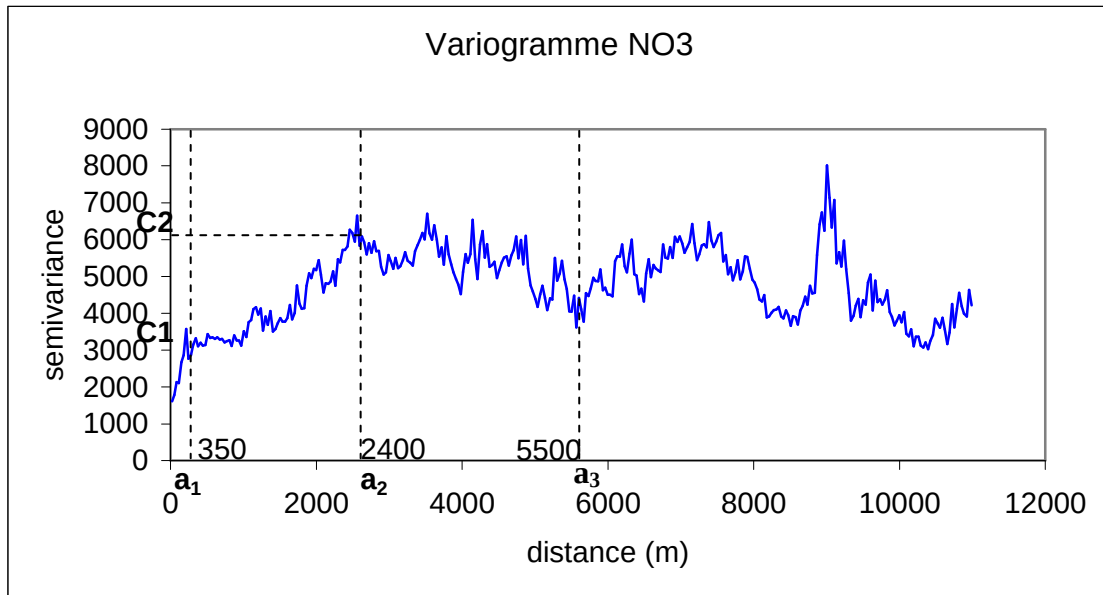


FIGURE 6.4 : Courbe de variation de la semi-variance

Ces deux niveaux emboîtés en termes d'échelle correspondent à deux mécanismes responsables des variations de teneur en nitrate :

- ⇒ le premier mécanisme est local, et probablement lié à la présence ou non de latrines ou d'autres sources de pollution telle que l'aménagement des espaces verts (jardins), les sites de maraîchage (zone de culture), les ordures ménagères ;
- ⇒ le deuxième mécanisme est beaucoup plus général et/ou micro-régional probablement lié aux caractères physiques et au comportement hydrodynamique de l'aquifère par des phénomènes de dilution, de dispersion, de dénitrification, de vulnérabilité de la ressource ;
- ⇒ On remarque qu'à $a_3 = 5500$ m la semi-variance montre une structure en tâche.

1.2.1.2 - Le corrélogramme simple

Le corrélogramme sur la figure 6.5 montre un coefficient d'auto-corrélation moyen à faible distance (0.54 entre 0 et 35 m pour 1022 couples de points). Il décroît rapidement avec la distance, et s'annule vers 2300 m pour devenir négatif jusqu'à 5500 m.

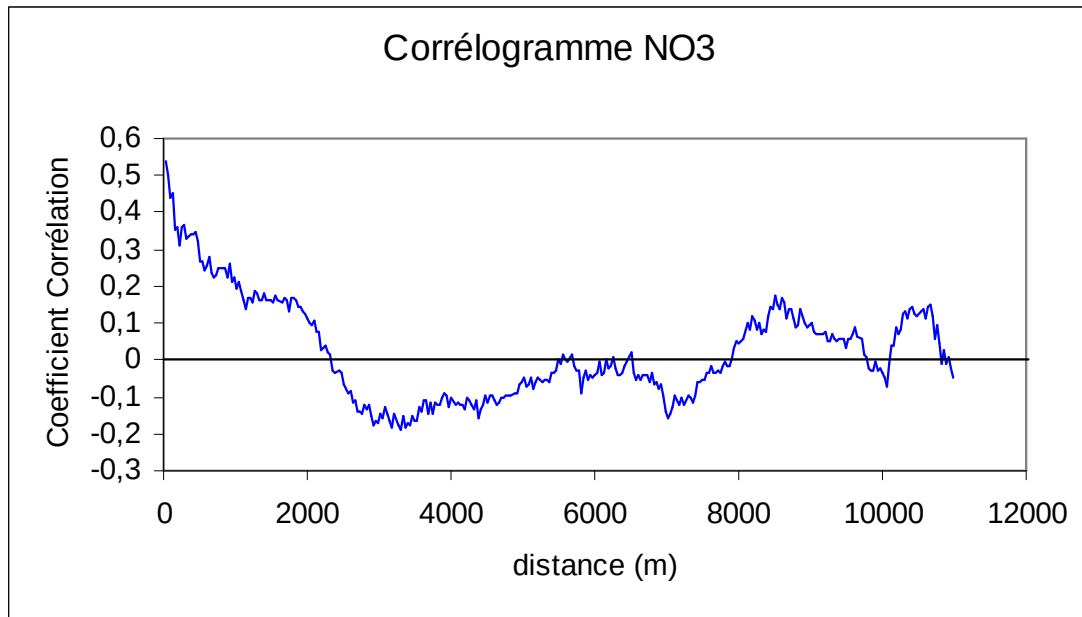


FIGURE 6.5 : Courbe de variation du coefficient d'auto-corrélation

Ce type de variations avec des coefficients de corrélations rapidement négatifs et une semi-variance qui diminue après avoir atteint une valeur maximale, est caractéristique de structures en tâches ; ce qui confirme l'interprétation du variogramme. Ces tâches peuvent présenter une certaine périodicité dans leur distribution spatiale. Ceci est fréquent en hydrochimie lorsque l'on s'intéresse à des paramètres liés à des pollutions.

Dans un tel cas de figure, les hypothèses implicites du krigeage ne sont pas vérifiées. La variabilité n'est pas distribuée de manière homogène ; elle est plus forte en périphérie des tâches de pollution et faible à l'extérieur des tâches et éventuellement à l'intérieur.

I.2.2 - Construction de la carte de distribution des teneurs en nitrates

L'utilisation de techniques habituelles de construction de carte comme le krigeage est tout à fait justifié ici comme pourrait l'être certaines méthodes empiriques d'interpolation. Il peut être utile dans ce cas d'étude de réaliser une carte de distribution spatiale par cette méthode empirique d'interpolation restreint aux points de prélèvement. La carte élaborée à partir de l'analyse spatiale de Arc View 3.2 (figure 6.6) confirme cette distribution en tâches révélée par le variogramme et le corrélogramme.

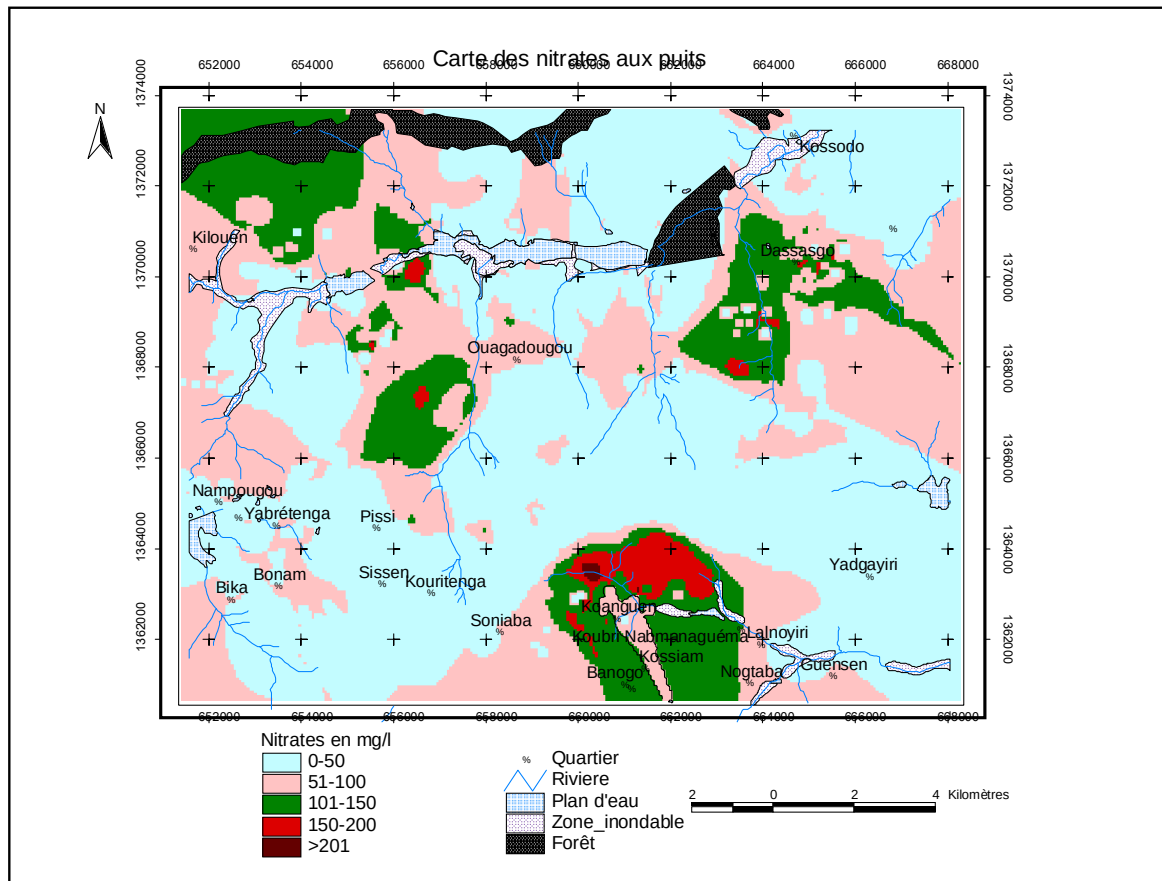


FIGURE 6.6 : Carte de distribution des nitrates au 1800 puits de l'agglomération de Ouagadougou

Cette carte permet de cerner la variabilité spatiale de la pollution des eaux de la nappe des altérites que captent les 1800 puits, qu'ils soient traditionnels ou modernes. Elle met en évidence les zones du Centre-Sud, Nord-Est, et du Nord-Ouest qui sont les plus affectées par les nitrates. Elle confirme les résultats de l'analyse discriminante : **la prépondérance de la pollution domestique. La structure en tâches est confirmée et la variabilité au sein des tâches également.**

I.3 - La pollution Bactérienne des puits des zones d'étude

Du point de vue bactériologique, les résultats de deux campagnes (2003 et 2004) sur les eaux des puits suivis montrent que la plupart présentent une souillure par les coliformes fécaux, streptocoques fécaux et coliformes totaux. La présence des coliformes fécaux constitue un bon indice de pollution essentiellement attribuée à une contamination fécale (figure 6.7).

Sur un échantillon de huit puits testés, cinq présentent une eau impropre à la consommation, alors que leurs eaux sont utilisées pour la boisson et pour les autres usages domestiques ; ce sont : le puits PDAP avec un nombre $N > 100$, le puits PSCT, le puits AGHA, le puits GIB et le puits PZOB. Ces résultats montrent que les puits contiennent aussi des germes pathologiques en plus des nitrates et des chlorures (§ paragraphe III.4.2).

Ces résultats doivent appeler tous les utilisateurs de l'eau en particulier les propriétaires de puits dans la ville de Ouagadougou à une prise de conscience sur l'altération de la qualité de l'eau de consommation à cause de leur contenu minéral et bactériologique.

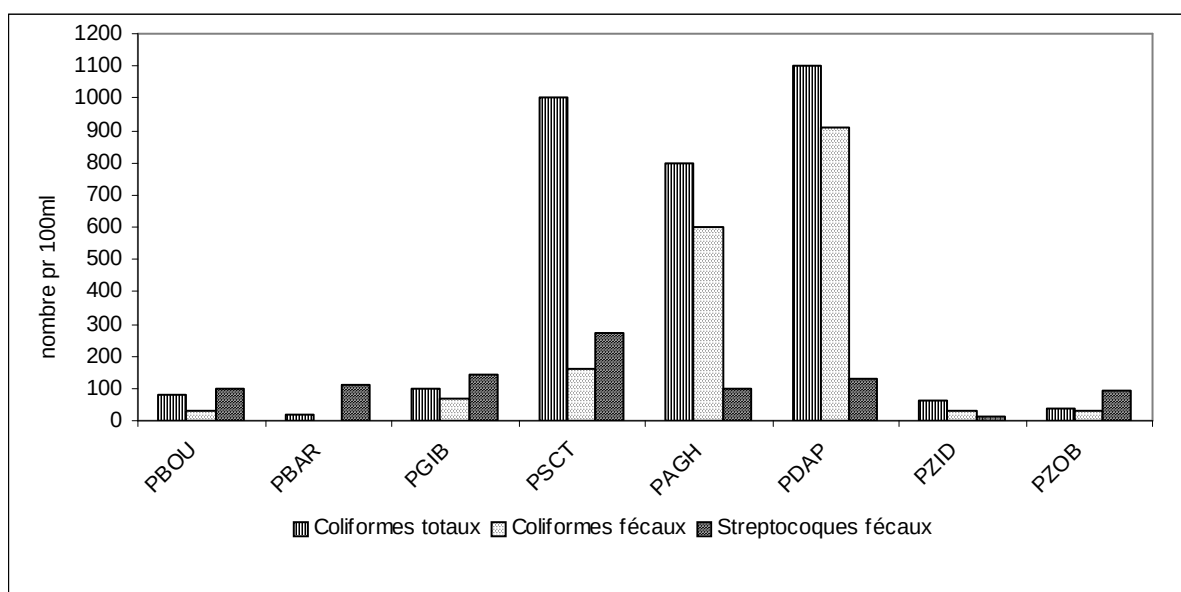


FIGURE 6.7 : Histogramme de fréquence de la qualité bactériologique des eaux des puits suivis à Ouagadougou (2003-2004)

Au regard de l'altération de la qualité des eaux captées par les puits localisés dans l'environnement immédiat des déchets domestiques (latrine), des ordures ménagères et des zones de culture, il convient d'envisager des solutions de protection des ouvrages de captage destinés à la consommation humaine.

Selon A. TANDIA et al. (1999) les distances minimales puits/latrines pour avoir une protection optimale du puits est de 48 mètres pour des latrines qui doivent fonctionner plus de deux décennies ;

ce qui a permis de fixer les distances minimales à respecter pour la construction de latrines entre 50 et 100 mètres au maximum. Mais cette distance est largement supérieure à la taille des parcelles à Ouagadougou dont la superficie dépasse exceptionnellement 300 m². La meilleure solution serait de construire des latrines étanches et vidangeables ou de ne point creuser de puits dans les concessions ou il y a déjà ces fosses d'aisance dont les profondeurs ne dépassent généralement pas 2 mètres, et de sensibiliser la population à utiliser l'eau des bornes fontaines de meilleure qualité pour leurs besoins domestiques.

Ces résultats interpellent tous les acteurs de l'eau pour une mise en place d'un système de protection des nappes non encore contaminées plus profondes et moins vulnérables.

I.4 - Aperçu des éléments mineurs ou en trace sur une campagne d'échantillonnage des eaux des points suivis (septembre 2006)

Les points d'eau suivis au cours de cette étude sont utilisés sans aucun traitement préalable, pour la boisson et les usages domestiques (excepté l'eau de Ouaga 3). C'est pourquoi en complément de l'analyse classique des éléments majeurs, quelques éléments traces ont été dosés à partir d'échantillons acidifiés mais non filtrés sur le terrain, par spectrométrie de masse avec plasma couplé par induction (IPC-MS) au laboratoire de Montpellier. Les résultats d'analyse sont reportés sur le tableau 6.5.

A l'exception de Al et de Mn, les teneurs en éléments trace ne dépassent pas les valeurs admissibles pour une eau potable destinée à la consommation humaine.

Les concentrations rencontrées en ces deux éléments dépassent respectivement les normes de potabilité qui sont < 0.2 mg/l pour l'Al et à 100 µg/l pour le Mn.

La présence de telle concentration en Al s'explique par le fait que l'eau n'a pas été filtrée et peut être attribuée à la présence de la matière fine en suspension. Il s'agit de l'eau de surface de Ouaga 3 qui contient 4736 µg/l et le puits qui est situé à dix mètres au Sud-est du barrage en contient 1966 µg/l.

La présence de Mn dans les eaux des FPARC et FFT26 peut être liée à des problèmes de corrosion du matériel d'exhaure (tubages et des pompes en acier) ou à l'environnement immédiat des deux ouvrages. Ce phénomène est fréquent dans les aquifères du socle Ouest Africain (In NBONU 1991).

Sur cet aperçu, la qualité des eaux de la ville semble être bonne par rapport aux teneurs des éléments trace. La présence de Al dans les eaux du barrage est attribuée à la forte présence de matières en suspension des ces eaux.

TABLEAU 6.5 : Teneurs en éléments trace des points d'eau suivis de Ouagadougou

Nom	Type	Li	B	Al	Ti	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Mo	Cd	Cs	Ba	Pb	U
1. PAGH	(alt)	0,69	1,00	52,03	3,44	0,10	16,37	22,87	1,72	145,90	0,05	11,77	120,30	0,03	0,30	0,09	177,80	0,43	0,02
2. PBAR	(alt)	0,75	7,50	1966,00	6,71	4,08	38,91	29,12	6,15	32,76	0,16	14,12	241,80	0,06	0,60	0,14	173,40	4,45	0,34
3. PBOU	(alt)	0,20	17,30	56,32	4,10	0,23	7,65	28,30	10,48	53,80	0,32	20,70	819,20	0,64	0,19	0,07	402,10	0,83	0,99
4. PDAP	(alt)	0,13	22,41	48,10	3,55	0,22	127,00	27,97	0,41	21,06	0,69	48,90	731,40	2,35	0,17	0,76	337,00	0,65	0,49
5. PGIB	(alt)	0,39	4,32	19,63	2,37	0,33	87,85	26,99	2,47	20,39	0,20	19,72	440,60	0,14	0,21	0,55	445,40	1,62	0,09
6. PSCT	(alt)	0,59	2,38	81,57	2,60	0,93	8,15	23,42	2,30	13,03	0,04	8,32	192,10	0,07	0,66	0,09	200,20	0,94	0,02
7. PZOB	(alt)	0,36	27,93	59,18	3,74	0,37	38,10	31,95	2,99	44,71	0,13	27,35	621,20	0,18	0,42	0,60	467,00	1,03	0,17
8. PZID	(alt)	0,95	7,95	8,24	2,12	0,41	28,01	21,00	0,52	6,21	0,07	10,43	504,80	0,05	0,36	0,12	536,60	0,15	0,03
9. PIEZ	(alt)	7,17	2,78	34,24	8,99	0,89	16,47	22,76	5,67	56,60	0,21	2,23	705,80	0,53	1,15	0,02	238,70	2,57	0,45
10. F024	(fract)	15,10	1,60	28,38	9,54	0,80	91,23	20,41	7,69	48,39	0,09	0,55	433,40	1,81	0,44	0,00	373,40	0,88	0,20
11. F029	(fract)	14,21	1,13	12,37	9,58	0,22	12,34	27,99	7,80	32,14	0,21	0,53	413,10	1,63	0,25	0,01	271,70	1,22	0,61
12. FZON	(fract)	20,83	2,17	2,94	7,94	0,13	67,54	22,63	0,53	9,57	0,05	0,27	241,60	0,30	0,07	0,00	96,30	0,09	0,52
13. FBAS	(fract)	8,16	0,67	30,13	11,41	0,78	3,27	22,51	7,42	32,38	0,10	1,38	214,80	0,27	0,15	0,02	121,70	2,21	0,11
15. FPAR	(fract)	11,44	1,88	16,13	9,04	0,11	179,60	30,18	0,99	11,09	0,15	0,77	1093,00	2,50	0,27	0,01	462,00	0,65	0,61
16. FT26	(fract)	15,75	1,08	5,60	9,26	0,11	235,70	29,64	1,22	24,77	0,12	0,33	465,10	0,36	0,07	0,00	180,20	0,16	0,99
17. BART3	Ouaga3	1,47	5,27	4736,00	30,76	4,31	102,40	24,19	5,24	32,21	0,15	14,89	118,50	0,08	0,08	0,16	145,10	12,15	0,98
Normes		µg/l	µg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
				<0,2		50	100	50	1	5	50				5		100	25	

I.5 - Qualité de quelques points du réseau de surface

La situation est alarmante car la qualité des ressources en eau souterraine est sans cesse mise à l'épreuve compte tenu de la croissance des sources de pollution tant diffuses que ponctuelles, car avec l'urbanisation de la ville, les principaux marigots aménagés en canaux « bétonnés » à ciel ouvert constituent le réseau de drainage des eaux pluviales et toutes sortes de déchets solides et liquides (*figure 6.8*). Mais ces canaux bétonnés sont plus ou moins étanches et réduisent la propagation des polluants qu'ils drainent. Leur étanchéité perturbe l'infiltration des eaux ; par exemple après la construction du canal de l'Université on observe une perturbation du niveau statique du piézomètre du C.I.E.H (phénomène déjà signalé précédemment à la figure 3.11 et au paragraphe I.2.2.5).

I.5.1 - Quelques points de prélèvement

Le canal central représenté sur la photographie 1 au niveau de la Société Nationale d'Electricité du Burkina (SONABEL), draine les eaux pluviales, celles du marché central et environ, de l'hôpital, et contourne la retenue Ouaga 3 (barrage n° 3) par le pont de l'hôpital.

Les eaux des deux canaux (canal central et canal de l'Université § I.2.2.5) se rencontrent au niveau du PARC urbain Bangr Wéogho et s'écoulent jusqu'à l'exutoire du bassin (*photo 2*), où elles se mêlent aux eaux usées de l'usine de la tannerie et de la brasserie de Kossodo. Toutes ces eaux vont dans le Nakanbé qui ne présente pas d'écoulement à l'exutoire en dehors des épisodes pluvieux.

Pour prévenir les risques de pollution de l'eau souterraine, une des approches est la connaissance des zones spécialement dangereuses et vulnérables. Six (6) sites d'eaux résiduelles ont fait l'objet de suivis. Ces sites d'échantillonnage sont les suivants :

- deux (2) points de prélèvement au niveau du canal central, (CC SONABEL) sur la photo et l'autre les eaux usées du pont de l'hôpital (CC HOPITAL) ;
- deux (2) points de prélèvement d'effluents industriels organiques, les rejets de l'industrie de tannerie (TAN-ALIZ S), et de la brasserie (BRAKINA) ;
- un point de prélèvement au PARC urbain (FILET PARC) ;
- le dernier point (TAN-ALIZ EXUTOIRE) de prélèvement est à l'exutoire du bassin zone aval à la zone industrielle de Kossodo.

I.5.2 - Interprétation des résultats

L'analyse du tableau 6.6 ci-dessous montre que :

- la conductivité varie entre 310 $\mu\text{S/cm}$ et 5680 $\mu\text{S/cm}$ Elle varie énormément et est liée à la concentration des substances dissoutes et à leur nature ;
- la température est très variable, avec un minimum de 24.6 °C qui correspond aux températures mesurées aux mois de novembre et décembre. La valeur de 39.9 °C a été enregistrée dans les eaux résiduelles de l'usine de Brasserie au mois de juin pendant lequel la température est à la hausse

à Ouagadougou. Ces résultats corroborent ceux de l'analyse discriminante qui a montré que selon l'axe F1, les eaux polluées sont riches en NO_3^- et Ca^{2+} et pauvres en Mg^{2+} alors que l'axe F2, permet de séparer la pollution industrielle marquée par une température et un pH élevés (*tableau 6.6*) ;

- les éléments tels que calcium, sodium, et les chlorures sont variables. Les sulfates, le magnésium, et surtout les nitrates présentent une grande variabilité avec un minimum de 2.6 mg/l et un maximum de 168 mg/l pour l'ion sulfate, de 0.5 à 49.4 mg/l pour le magnésium, de 1 mg/l (CC HOPITAL), à 844 mg/l (TAN-ALIZ SORTIE) pour le nitrate. Ce taux de nitrate très élevé pourrait être attribué à une lâchée d'eau contenant beaucoup de matière riche en azote. Les bicarbonates varient moins. Quant au potassium les teneurs sont moins élevées.

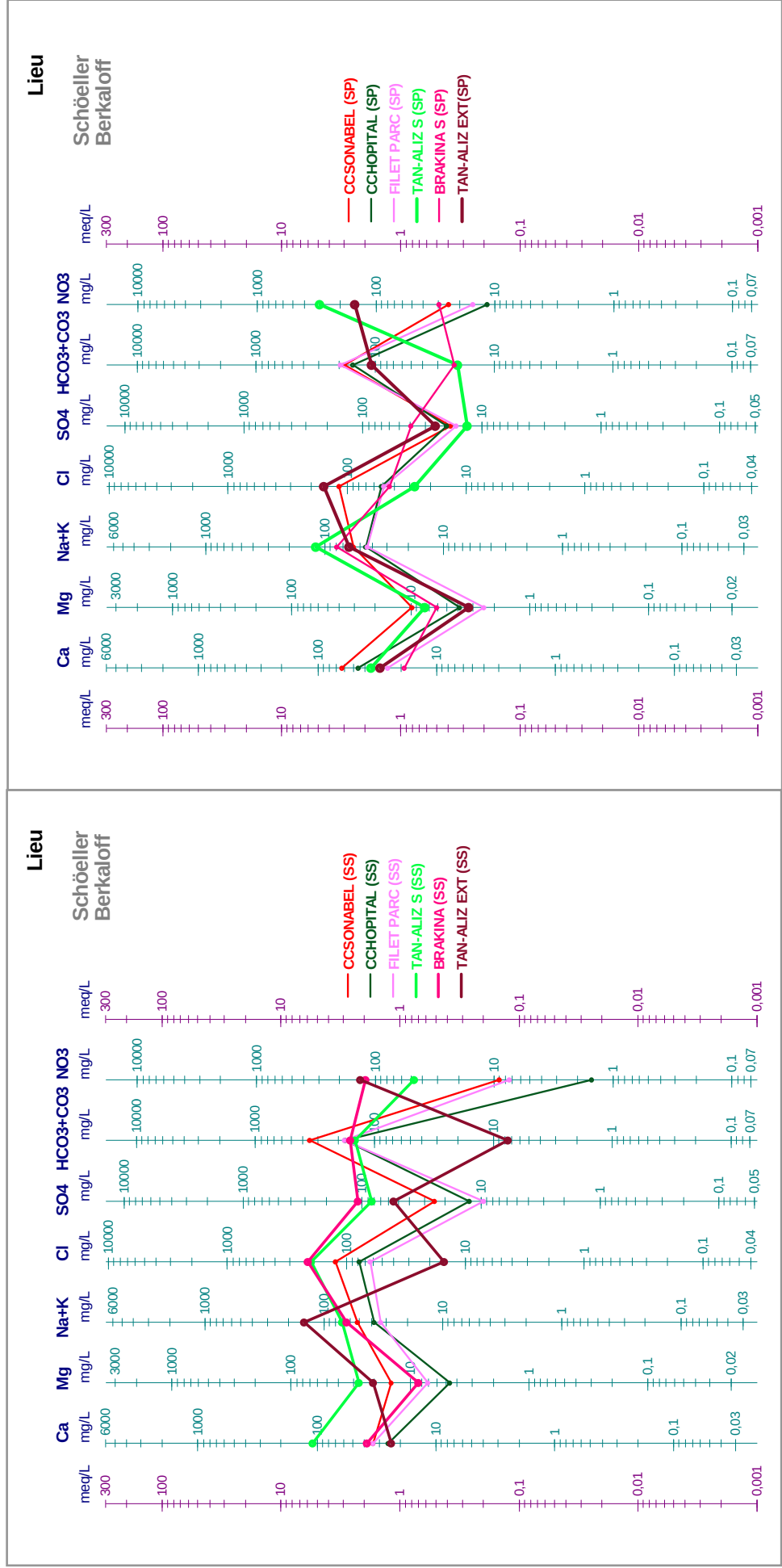


FIGURE 6.8 : Diagrammes de Schoeller-Berkaloff des eaux résiduares de zones d'étude II et III. SS : saison sèche ; SP : saison de pluies

Les fortes teneurs en nitrates sont enregistrées dans les effluents de la tannerie. Si on prend en compte les deux saisons, les nitrates varient en moyenne entre 2 mg/l et 134 mg/l en saison sèche (*figure 6.7a*) et entre 12 mg/l et 300 mg/l en saison de pluie (*figure 6.7b*).

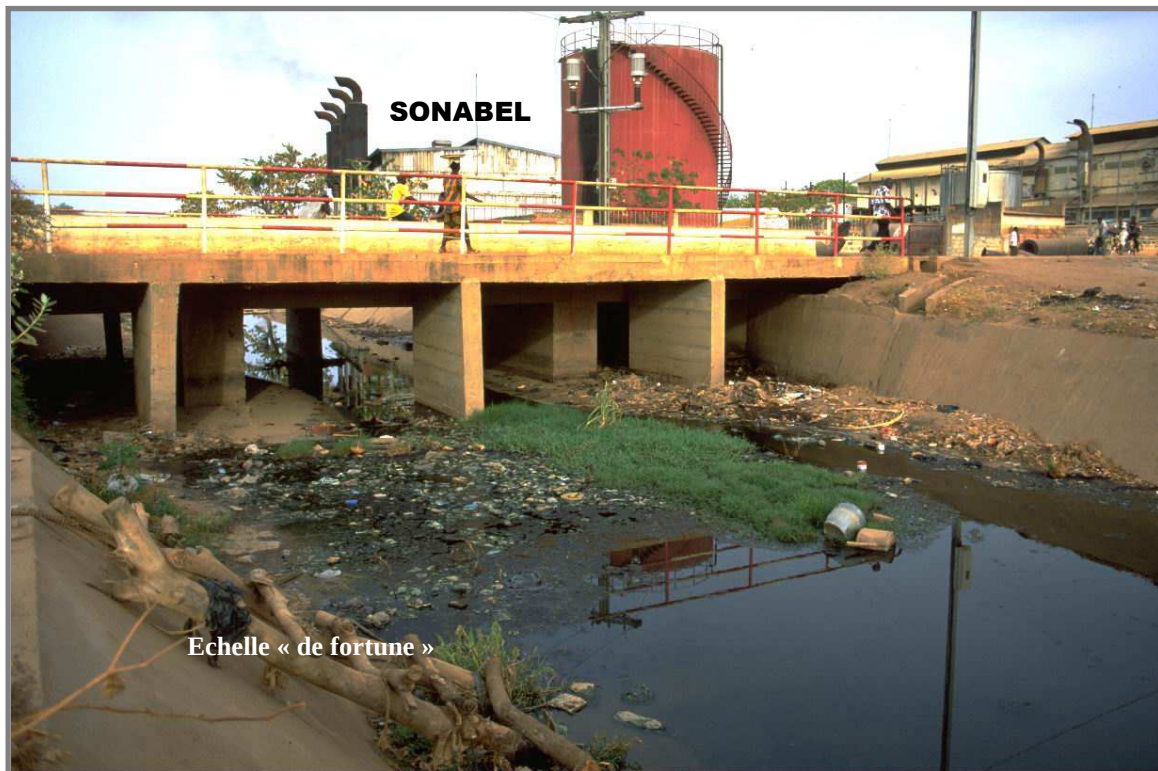
Les eaux de Brakina et Tan-Aliz exutoire sont les plus chargées en nitrates en saison sèche. Les concentrations élevées en Na + K et Cl sont dues aux phénomènes de reconcentration par évaporation.

Pendant la saison des pluies, ce sont les eaux de la tannerie qui présentent des concentrations élevées en Na + K et Cl et des taux très élevés en nitrates d'un facteur de 3 à 6 avec 300 mg/l à la sortie de la station et 150 mg/l dans les eaux à l'exutoire du bassin (*photographie n°2*).

On constate qu'en saison sèche les eaux résiduaires sont plus ou moins concentrées en nitrate, et beaucoup plus en chlorure et sulfate, avec des conductivités très élevées par endroits qui diminuent ensuite en saison des pluies avec l'arrivée d'eaux pluviales en quantité importante en juillet.

TABLEAU 6.6 : Résultats d'analyses (mg/l) de quelques points eaux résiduelles (CC : Canal Central ; TAN-ALIZ : Tannerie ; BRAKINA : usine de brasserie)

n	Nom	T°C	pH	c25°C	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3
1	CCSONABEL-2003-10-30	36,80	7,80	920	38,40	11,30	41,10	19,90	299,00	178,20	27,00	9,00
2	CCHOPITAL2003-10-30	31,90	7,00	485	30,40	5,00	42,40	20,20	177,00	86,09	27,00	5,00
3	FILET PARC-2003-10-30	30,50	7,20	412	39,20	2,20	35,46	16,95	183,00	66,06	9,00	9,00
4	TAN-ALIZ S-2003-10-30	33,50	9,00	2500	56,00	2,90	45,00	25,00	50,80	55,06	10,00	46,00
5	BRAKINA S-2003-10-30	32,50	10,50	1505	38,00	10,80	42,00	23,00	55,06	95,10	18,00	32,00
6	TAN-ALIZ EXT-2003-10-30	32,40	7,40	515	46,00	7,00	23,00	16,00	299,00	140,15	20,00	10,00
7	CCSONABEL-2003-11-20	31,60	8,20	630	36,00	9,12	36,40	17,90	226,00	114,13	35,00	6,00
8	CCHOPITAL-2003-11-20	27,90	7,10	528	30,40	5,52	30,00	13,50	201,00	88,10	17,00	1,00
9	FILET PARC-2003-11-20	24,60	6,80	484	30,80	8,64	21,00	13,00	189,00	78,09	12,00	5,00
10	TAN-ALIZ S-2003-11-30	30,40	7,20	2600	116,00	49,44	32,00	35,00	292,00	368,40	41,00	32,00
11	BRAKINA-2003-11-30	32,80	7,20	2100	54,00	12,72	36,00	33,00	317,00	388,43	168,00	165,00
12	CCSONABEL-2003-12-22	28,50	7,80	1095	31,20	19,44	35,00	16,00	475,80	134,15	14,00	12,00
13	CCHOPITAL-2003-12-22	24,60	6,90	335	20,00	3,84	15,00	18,00	152,50	68,00	8,00	2,00
14	FILET PARC-2003-12-22	29,30	6,40	440	36,40	5,52	12,00	21,00	170,80	49,05	7,00	10,00
15	TAN-ALIZ S-2003-12-22	27,60	10,30	2150	100,00	4,80	43,00	31,00	0,00	27,03	126,00	62,00
16	BRAKINA-2003-12-22	34,40	11,20	1080	22,00	4,32	34,00	26,00	0,00	30,03	49,00	75,00
17	TAN-ALIZ EXT-2003-12-22	30,20	9,00	5680	23,60	20,40	95,00	52,00	7,60	15,02	54,00	134,00
18	CCSONABEL-2004-06-30	33,10	8,10	1100	14,80	9,84	32,00	20,00	150,00	125,00	22,00	41,80
19	CCHOPITAL-2004-06-30	31,10	6,70	478	18,00	1,68	28,16	15,00	200,00	46,00	25,00	26,40
20	FILET PARC-2004-06-30	30,50	6,80	410	20,40	3,60	23,00	14,00	200,00	41,00	20,00	28,60
21	TAN-ALIZ S-2004-06-30	33,80	11,20	1680	26,40	18,72	150,00	59,00	0,00	13,00	15,00	844,00
22	BRAKINA-2004-06-30	39,90	11,10	2200	4,40	2,16	50,00	55,00	0,00	18,00	50,00	52,80
23	TAN-ALIZ EXT-2004-06-30	36,00	8,80	3340	21,60	0,48	53,00	32,00	10,00	166,00	27,00	440,00
24	CCSONABEL-2004-07-30	29,30	7,80	986	20,00	3,50	32,00	23,00	200,00	125,00	22,00	31,24
25	CCHOPITAL-2004-07-30	30,80	6,80	465	15,00	2,30	25,00	12,00	200,00	46,00	25,00	12,32
26	FILET PARC-2004-07-30	29,50	7,10	502	18,00	1,50	24,00	19,00	200,00	41,00	20,00	8,36
27	TAN-ALIZ S-2004-07-30	26,10	7,30	1150	24,00	1,30	54,00	26,00	10,00	13,00	15,00	6,60
28	BRAKINA-2004-07-30	31,10	10,10	830	14,00	5,20	45,00	22,00	10,00	18,00	50,00	3,52
29	TAN-ALIZ EXT-2004-07-30	28,50	6,70	482	22,00	2,30	42,00	21,00	10,00	166,00	27,00	2,64
30	CCSONABEL-2004-10-30	31,30	7,50	700	176,00	14,40	40,40	22,20	72,08	38,00	2,75	15,80
31	CCHOPITAL-2004-10-30	30,20	6,70	394	120,00	6,72	25,80	13,50	44,05	28,00	2,60	2,60
32	CCSONABEL-2004-11-30	29,20	8,00	982	182,00	18,00	36,40	15,90	323,30	100,11	36,00	1,30
33	CCHOPITAL-2004-11-30	25,80	6,60	310	88,00	5,04	21,20	10,80	85,40	33,04	22,00	19,40



PHOTOGRAPHIE 1 : Canal central de Ouagadougou avec des déchets liquides et solides. L'échelle sert à prélever l'eau du canal pour arroser les plantes cultivées dans l'environnement immédiat où se pratique l'horticulture. (CC SONABEL)



PHOTOGRAPHIE 2 : Dernier point de prélèvement à l'exutoire du bassin zone aval à la zone industrielle (zone de Kossodo Tan-Aliz exutoire). Ce site est à 300 m des forages FT26 et FKOS

FIGURE 6.9 : Deux sites de prélèvement d'eaux usées de Ouagadougou

Photographies : Suzanne YAMEOGO, juin 2001

I.6 - Conclusion partielle

D'une manière générale, la qualité chimique de l'eau à Ouagadougou est bonne dans les forages. Cependant, cette qualité est mise en cause par des teneurs élevées en nitrates dans les eaux des puits de la capitale Ouagadougou. La présence des nitrates en concentrations importantes est attribuée à la pollution domestique prépondérante et à un moindre degré à l'activité agricole et industrielle. En outre, il est fort probable que les concentrations élevées en Al et en Mn rencontrés dans certaines eaux soient associées au problème de forte concentration de matière en suspension pour les eaux de surface et au problème de corrosion d'équipement de forage pour les eaux de forage.

Le taux élevé en nitrates dans les rejets (de la tannerie et de la brasserie) est permanent et atteint l'aquifère profond capté par les forages FKOS et FT26 situés dans cette zone et qui contiennent en permanence des taux supérieurs à 50 mg/l de nitrate. Ceci confirme que tous ces sites constituent des sources de pollution potentielle pour les nappes aquifères de l'agglomération de Ouagadougou, et plus particulièrement pour la zone d'étude III (zone industrielle de Kossodo) un milieu très fracturée avec une perméabilité induite importante qui augmente la vulnérabilité des aquifères et corrobore la carte de vulnérabilité dans cette partie de la ville.

CHAPITRE VII – VULNERABILITE DES AQUIFERES INFERIEURS DE L'AGGLOMERATION DE OUAGADOUGOU

I - PROBLEMATIQUE

L'absence ou l'insuffisance d'infrastructures d'assainissement (présence de décharges, d'ordures, latrines et fosses septiques non étanches), l'inadéquation du système d'évacuation des eaux pluviales et usées, permettent d'appréhender l'ampleur de la catastrophe qui menace les ressources en eau souterraine de Ouagadougou.

Ces carences font que le plus souvent la pollution de ces eaux est constatée après ses méfaits. Ce qui veut dire que l'eau a migré de sa position initiale et a atteint par recharge les systèmes aquifères qui sont vulnérables à cause du dense réseau de fractures qui les affecte et de la faible épaisseur des altérations.

Le terme de vulnérabilité des aquifères comprend deux niveaux d'approche :

- la vulnérabilité intrinsèque, qui prend en compte les conditions physiques du milieu naturel ;
- la vulnérabilité spécifique qui fait intervenir non seulement les paramètres naturels mais aussi les propriétés de contaminant, sa nature et sa mise en place (Murat V et al. 2003).

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer la vulnérabilité intrinsèque à la pollution des aquifères profonds de Ouagadougou qui permettra d'identifier les zones à haut risque de contamination indépendamment du type de polluant.

Cette carte devrait en principe permettre de cibler les zones où des mesures rigoureuses de protection devraient être adoptées.

Les facteurs intrinsèques de vulnérabilité

Pour la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque, la méthode DRASTIC développée par l'agence américaine de la protection de l'environnement (EPA), (Aller et al. 1987), est une méthode empirique à cotation numérique qui repose sur trois hypothèses de bases :

- les sources de contamination potentielles se trouvent à la surface du sol ;
- les contaminants potentiels atteignent l'aquifère par le mécanisme de l'infiltration efficace ;
- la nature du contaminant potentiel n'est pas prise en compte dans le calcul de l'indice.

La méthode DRASTIC prend en compte 7 paramètres physiques qui sont :

- D : la profondeur de la nappe ;
- R : la recharge efficace ;
- A : le type d'aquifère ;
- S : le type de sol ;
- T : la topographie ou pente ;
- I : l'impact de la zone vadose ;

- C : la conductivité hydraulique de l'eau.

Compte tenu du contexte hydrogéologique d'aquifères discontinus du socle de Ouagadougou nous nous sommes inspirés de la méthode DRASTIC pour choisir nos paramètres selon notre contexte d'étude.

Notre cartographie a pris en compte par ordre d'importance :

- la densité de fracturation que nous appellerons (F) ;
- la profondeur de la nappe (D)

II - LA CARTE DE SUSCEPTIBILITE A LA POLLUTION DE L'AQUIFERE INFERIEUR (CARTE DE VULNERABILITE INTRINSEQUE)

L'élaboration de la carte de vulnérabilité a consisté à réaliser la carte de susceptibilité en prenant en compte deux paramètres physiques naturels du milieu énumérés ci-dessus.

Les fractures assurent un acheminement rapide quand l'épaisseur de la zone non saturée est faible, et jouent un rôle inverse de la zone non saturée qui a un rôle de rétention notamment quand son épaisseur est très importante.

Dans un premier temps une carte de densité de fracturation a été réalisée : son élaboration a consisté à prendre en compte la carte des alignements morpho structuraux (linéaments) à l'échelle 1/50 000 qui a été maillée de 2 km x 2 km. Les longueurs cumulées des linéaments dans chaque maille ont été pris en compte et un poids a été affecté au centre de chaque maille. Ce poids correspond à la densité de fracturation au niveau de chaque maille.

Dans un deuxième temps, les niveaux statiques des ouvrages profonds ont été mesurés et pris en compte pour élaborer par interpolation des profondeurs mesurées, la carte de profondeur de la nappe. Ce paramètre est aussi important car il représente l'épaisseur de la zone non saturée. (Un nivellement a été préalablement effectué)

L'intégration et la combinaison des deux cartes de ces facteurs hydrogéologiques, en format GRID dans le SIG avec Arc View 3.2, a permis de calculer des indices de susceptibilité à la pollution. Ces indices obtenus ont été regroupés en quatre classes (très faible, faible, moyenne et forte).

Par ordre d'importance, les résultats indiquent que la partie Nord, le secteur Est et le Sud-est de la ville sont dominées par la classe de susceptibilité moyenne (représentée sur la carte par la couleur verte), suivie par la classe de susceptibilité très faible à faible au centre et au centre sud et enfin la classe de susceptibilité forte se trouve dans la zone Nord-ouest et Nord-est et une petite zone du secteur Sud-est de la ville (couleur jaune).

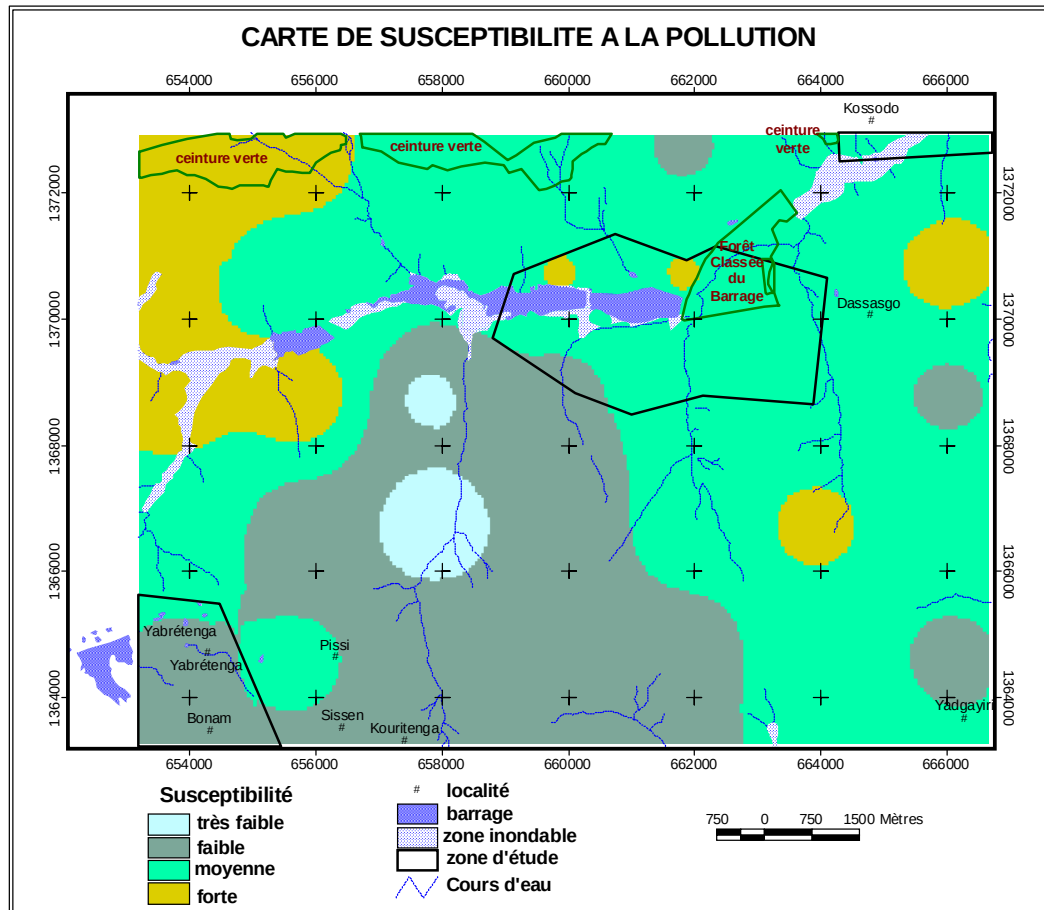


FIGURE 7.2 : Carte de vulnérabilité intrinsèque à la pollution

Si la densité de fracturation est élevée on aura une perméabilité induite (§ paramètres dynamiques II.3.3) qui sera importante ce qui va entraîner une infiltration rapide comme déjà souligné précédemment.

Si l'épaisseur de la zone non saturée est faible, le niveau de la nappe est proche de la surface du sol et devient très vulnérable à la contamination ; donc la susceptibilité sera forte à ces endroits.

Cette carte (*figure 7.2*) représente la carte de **vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère inférieur de Ouagadougou** qui varie du très faible au fort. Elle indique le degré de vulnérabilité à la pollution des différents secteurs de Ouagadougou.

1. Les classes « **très faible et faible** », n'occupent pas une grande partie de la zone d'étude, seulement 20 % de la superficie de la ville
2. La classe « **moyenne** », occupe environ 65 % de la zone d'étude.
3. La classe « **forte** », se rencontre au Nord-ouest, au Nord-est, au Sud-est, autour du barrage Ouaga2 et à proximité du PARC urbain Bangr-Wéogho elle représente 15% de la zone d'étude.

Le secteur Nord-ouest de la ville a peu de points de suivis bien que la vulnérabilité à la pollution de la nappe soit forte à cause de son degré de fracturation. Il mérite une protection.

III – LA CARTE DES RISQUES

La carte distribution spatiale des nitrates des 1800 puits qui captent la nappe supérieure à la figure 6.6, pourrait être assimilée à une carte des risques qui prend en compte l'environnement immédiat de chaque ouvrage essentiellement fait de latrines, de puits perdus et de rejets domestiques. La distance séparant ces ouvrages de captage avec les latrines se situent entre 2 m à 30 m. Cette carte révèle qu'il existe un risque réel dans le grand centre urbain de Ouagadougou.

Si on compare la carte de vulnérabilité avec la carte de répartition spatiale de nitrates des 1800 puits, des remarques très importantes s'imposent :

- ⇒ l'extrême Nord-ouest de la zone d'étude dont la vulnérabilité est forte présente aussi des plages de concentrations fortes à très fortes en nitrates au niveau de la carte des 1800 puits. Ces valeurs dépassent largement la norme OMS de 50 mg/l, d'un facteur 1 à 3.
- ⇒ le Nord-est dont la vulnérabilité est également forte présente des teneurs fortes en nitrates (d'un facteur 1 à 3) ;
- ⇒ le secteur centre Sud présente également des plages de concentrations en nitrates de plus de 50 mg/l. Les teneurs sont comprises entre 50 et 100 mg/l (facteur 1 à 2) ;
- ⇒ le secteur Nord à vulnérabilité moyenne et à taux de nitrates pour l'instant faible mérite une attention particulière dans un aménagement futur.

Ces résultats complètent la carte des nitrates des aquifères inférieurs de Ouagadougou. Ils permettent de localiser de manière plus fine les zones particulièrement vulnérables qui sont les plus à risque et doivent donc faire l'objet d'actions prioritaires.

IV - Conclusion partielle

L'élaboration de la carte de vulnérabilité à la pollution des aquifères inférieurs de socle de l'agglomération de Ouagadougou a nécessité une cartographie thématique concernant les différents paramètres qui sont : la densité de fracturation du milieu, la profondeur de la zone non saturée.

Dans l'agglomération de Ouagadougou, la vulnérabilité est très forte au Nord-Ouest, et au Nord-Est, elle est moyenne au centre et au Sud-est.

L'avantage de cette ébauche de la carte de vulnérabilité est qu'elle met en évidence les principales zones à risque. Elle n'est pas statique. Elle pourrait évoluer avec d'autres paramètres hydrogéologiques pris en compte dans nos prochaines études et constituer un outil de référence très pertinent pour la prévention de la pollution et une meilleure protection des aquifères inférieurs de Ouagadougou.

La répartition spatiale des teneurs en nitrates des aquifères des altérites (*figure 6.6*) peut constituer en première approximation une carte des risques. Les teneurs sont trop élevées au Nord-Ouest, au Nord-est, au centre-Sud.

La distribution spatiale des teneurs en nitrates à Ouagadougou est calquée surtout sur celle où la population est dense, et également sur celle liée aux différentes activités socio-économiques, donc dépendante de l'occupation de l'espace urbain.

V - RECOMMANDATIONS ET PRIORITES

La présente étude a permis de dresser une ébauche de la vulnérabilité de l'aquifère inférieur à partir de deux paramètres, et de montrer l'efficacité de la distribution spatiale des nitrates dans la gestion des nappes d'eau souterraine (puits) en domaine de socle cristallin. La configuration en poches plus ou moins discontinues des nappes n'autorise pas vraiment une migration généralisée des polluants. Dans ces conditions, la mise en place d'un dispositif de suivi pour une alerte rapide sur la contamination par les nitrates et par les germes pathogènes devrait concerner chaque ouvrage ou un groupe d'ouvrages voisins.

Il conviendrait de prendre des dispositions urgentes pour éliminer les sources de pollution des nappes surtout celle des altérites sensées être les plus polluées car non protégées. En comparaison avec les données sur les puits. Les forages sont pour l'heure les ouvrages les moins atteints par le phénomène de pollution qui prend de l'ampleur au niveau des puits répertoriés dans la ville et qui alimentent encore une large partie de la population.

Pour les ouvrages ayant déjà une charge polluante très élevée en plus de la contamination bactériologique, dans un premier temps sur le plan local et individuel il faudra :

- ⇒ éliminer d'abord par traitement la pollution bactériologique par utilisation de pastille de chlore dans chaque puits de la capitale ;
- ⇒ interdire la construction de puits dans les parcelles qui ont une superficie de moins de 300 m², et où il y a déjà une latrine ;
- ⇒ interdire ou réglementer les activités polluantes (polluant chimique, bactériologique industriel, etc.) autour des ouvrages de captages (puits et forages) existants ;
- ⇒ mettre en place des questionnaires d'enquête pour évaluer le niveau de connaissance des risques liés à la consommation d'eau non potable des consommateurs ;
- ⇒ mettre au point un programme de sensibilisation et d'information pour la population concernée par la consommation d'eau non potable (programme impliquant la municipalité, les associations, les structures communautaires et le Genre).

Dans un deuxième temps sur le plan collectif :

- ⇒ mettre en place dans chaque secteur de la ville des bacs pour les ordures ménagères qui ne seront plus drainées par les principaux canaux à ciel ouvert traversant la ville et contaminant plus ou moins les nappes ;
- ⇒ préconiser des travaux d'assainissement collectif dans le respect des normes internationales en vigueur pour protéger les zones non encore polluées. C'est bien onéreux, mais ce n'est pas impossible pour le bien être des collectivités ;

- ⇒ mettre en place une législation burkinabé pour réglementer le suivi systématique de la qualité de l'eau en zone urbaine et périurbaine car les informations sont largement insuffisantes dans ce domaine ;
- ⇒ mettre en place des périmètres de protection en fonction des conditions hydrogéologique et structurale de la zone d'étude.

Cette étude a également permis de montrer que le suivi pouvait se limiter à quatre prélèvements seulement par an sous le climat que connaît la ville de Ouagadougou, (un prélèvement en saison sèche, suivi d'un deuxième en début de saison des pluies, le troisième pendant les mois les plus arrosés et le dernier en fin de saison de pluies, mois pendant lesquels s'effectue la recharge). Un suivi régulier de la qualité devrait permettre un contrôle régulier de l'évolution de la qualité des eaux des aquifères, surtout au niveau des zones sensées être très vulnérables pour prévenir toute aggravation du phénomène de pollution.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Cette étude visait à caractériser l'hydrochimie, la qualité des eaux et à faire une première ébauche de la vulnérabilité des aquifères inférieurs de Ouagadougou.

Nous présentons les résultats essentiels acquis lors de ce travail, la complexité de l'étude, et les perspectives.

Située au centre du pays, à une altitude comprise entre 280 m et 300 m, la capitale est bâtie sur ce qu'on appelle le môle de Ouagadougou essentiellement constitué de formations de socle cristallin et cristallophyllien du paléo protérozoïque. Ces formations sont recoupées par des intrusions des dolérites, de pegmatites et d'aprites d'âge méso protérozoïque, et tronçonnées par de grandes fractures orientées Nord-sud et Est-ouest ; le tout enfoui sous une épaisse couverture d'altérites.

L'analyse des données météorologiques disponibles montre une moyenne pluviométrique de 787 mm sur l'ensemble de la ville depuis un siècle.

Il apparaît également qu'après une succession des années sèches entrecoupées par des années humides moins nombreuses, la pluviométrie est nettement déficitaire depuis 1975. Elles permettent néanmoins une recharge annuelle plus ou moins importante. Les températures varient entre 26.6 °C et 33.1 °C et l'évapotranspiration est de 1.9 m par an sur une normale de 30 ans.

Sur la base des informations géologiques des coupes de forages exécutées dans la zone d'étude on distingue dans le profil d'altération trois niveaux plus ou moins aquifères mais généralement deux nappes :

- celle supérieure avec la cuirasse quand elle est noyée. Elle est captée par les puits
- celle inférieure regroupant les arènes et la roche fissurée/fracturée soit deux horizons aquifères qui se différencient par leur comportement hydrodynamique : un horizon supérieur capacitif celui des altérites et un horizon inférieur transmissif celui du socle fissuré. Les forages de notre zone d'étude captent ces deux derniers horizons.

Les paramètres hydrodynamiques de ces aquifères inférieurs montrent qu'ils sont très intéressants du point de vue hydrogéologique. Les conductivités hydrauliques sont comprises entre 0.12 et $2,78.10^{-4}$ m/s. Les transmissivités vont de 0.29 et $6,46.10^{-3}$ m²/s.

Les températures des eaux sont comprises entre 25 et 34°C ; les températures des eaux de puits (25°C - 32°C) sont proches de celles de l'atmosphère ambiante témoignant de l'ouverture du système étudié donc de sa vulnérabilité vis-à-vis de la pollution provenant éventuellement de la surface du sol.

Les pH sont faibles montrant des eaux acides à neutres (pH compris entre 5.8 et 7,4) ; ce sont donc des eaux agressives.

Les valeurs de conductivité varient de 99 à 1253 µS/cm. Les eaux à minéralisation élevée se rencontrent au niveau des puits de la ville de Ouagadougou aux eaux polluées.

La conductivité augmente avec la recharge en certains points d'eau en août témoignant d'un apport d'ions par les eaux d'infiltration ; par contre, elle baisse ensuite avec les phénomènes de dilution.

Les faciès géochimiques des eaux sont dominés par les bicarbonatés calciques et magnésiens qui représentent plus de 60 % des échantillons recueillis. Les faciès bicarbonatés calciques sont également importants tandis que les eaux chlorurées calciques et sodiques sont minoritaires. Les faciès chlorurés et nitrates sont aussi importants et témoignent des apports de surface. Ces données sont conformes au contexte hydrogéologique de la zone étudiée. Les bicarbonates dont l'origine est essentiellement contrôlée par la diffusion du CO₂ atmosphérique et organique constituent l'essentiel de la minéralisation des eaux des nappes de Ouagadougou.

L'application des outils hydrogéochimiques dans l'investigation des eaux souterraines du système aquifère de Ouagadougou a permis d'apprécier la complexité de son fonctionnement général.

L'ensemble des données a été traité par les méthodes statistiques. Particulièrement l'analyse statistique multi variable a permis dans un premier temps de mettre en évidence deux axes importants :

- axe F1 marqueur de l'augmentation de la pollution ;
- axe F2 marqueur du temps de séjour, et du phénomène de stratification ;

Dans un deuxième temps, cette analyse a permis de montrer l'évolution de la minéralisation en fonction de :

- l'hydrolyse des silicates, phénomène prédominant dans le processus de minéralisation des eaux de notre zone d'étude ;
- la pollution anthropique.

Les eaux de la nappe des altérites sont très chargées en ions en comparaison avec celles de la nappe profonde des fissures. Ce phénomène est bien spécifique à Ouagadougou car c'est l'origine superficielle de la minéralisation donc la pollution qui en est la cause.

Les calculs thermodynamiques ont montré que les eaux dans leur majorité sont sous-saturées vis-à-vis de la calcite, la dolomite, le gypse et l'halite. Sur les diagrammes d'équilibre elles se situent dans le domaine de stabilité kaolinite/montmorillonite pour les eaux de l'aquifère fissuré et celles issues du réservoir des altérites se trouvent dans le domaine de la kaolinite excepté celles du piézomètre du CIEH qui présente un comportement atypique. Ce piézomètre s'alimente à partir d'apports d'eau latéraux dont l'importance a baissé suite à la construction du canal de l'Université en béton.

L'étude isotopique a permis de caractériser le signal pluie à Ouagadougou accompagnée d'une comparaison avec les eaux souterraines. Il a pour droite d'équation :

$$\delta^2\text{H} = 8.17 \delta^{18}\text{O} + 14.3 \text{ très proche de la droite météorite mondiale.}$$

Sur les eaux de pluies, on note une variabilité aussi bien annuelle qu'interannuelle pour les teneurs en oxygène 18 (^{18}O) et deutérium (^2H).

La valeur de l'excès en deutérium supérieure à 10 confirme l'origine mixte de la vapeur atmosphérique et montre que les masses d'air d'origine océanique, sont légèrement enrichies par des masses d'eaux d'origine continentale.

Sur le diagramme $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ la majorité des forages ont des teneurs conformes à celles des pluies efficaces. Trois points se distinguent par le fait qu'ils sont évaporés.

Les eaux des puits de Ouagadougou s'organisent autour d'une droite d'équation :

$$\delta^2\text{H} = 4.67 \delta^{18}\text{O} - 0.57.$$

Le tritium (^3H) a confirmé que les différentes recharges sont actuelles pour la grande majorité des points d'eau et les faibles teneurs en tritium marquent des mélanges avec des proportions élevées d'eaux anciennes. Cependant, les eaux des nappes devraient faire l'objet de dosage du ^{14}C pour définir l'âge de chacune d'entre elle. Ceci rendra mieux compte du système de renouvellement et d'écoulement souterrain dans cet aquifère discontinu.

L'interprétation des analyses multi variables, plus particulièrement l'analyse discriminante a permis de classer nettement les différents types de pollution des eaux des nappes de Ouagadougou en quatre groupes en fonction de leur environnement immédiat. Il ressort de cette analyse que l'axe F1 est la seule fonction capable de séparer les eaux non polluées des eaux issues de la pollution industrielle. Il révèle la prépondérance de la pollution domestique dans notre zone d'étude. Quant à l'axe F2 il aligne plus ou moins la pollution industrielle et la pollution urbaine.

La pollution par les nitrates observée dans notre zone d'étude reste encore un phénomène réel. Elle est surtout localisée à la périphérie de la ville, où la densité de la population est très élevée et le système d'assainissement archaïque ou inexistant.

Globalement les eaux de forages présentent une bonne potabilité, sur la base des normes de l'OMS.

Du point de vue bactériologique, les résultats de deux campagnes sur les eaux des puits suivis montrent que la plupart des eaux présentent une souillure par les coliformes fécaux, les streptocoques fécaux et les coliformes totaux. La présence des coliformes fécaux constitue un bon indicateur de pollution essentiellement attribuée à une contamination fécale.

La qualité des eaux de la ville semble être bonne par rapport aux teneurs des éléments trace. La présence de Aluminium dans les eaux du barrage Ouaga 3 est attribuée à la forte présence de matières en suspension des ces eaux.

La carte de vulnérabilité intrinsèque à la pollution établie montre que les zones à l'extrême Nord-ouest et Nord-est de la ville sont caractérisées par une vulnérabilité élevée par rapport à 65% de la ville qui présente une vulnérabilité moyenne.

La superposition de la carte des nitrates des 1800 puits répertoriés dans la zone d'étude et celle de la vulnérabilité a permis de conclure que les résultats de l'évaluation de la vulnérabilité sont fiables. De plus, elle montre que l'évolution spatiale des taux de nitrates dépend davantage de la densité des populations périurbaines ; elle est donc calquée sur la carte de l'occupation des sols de la zone d'étude.

Les cartes résultant de la répartition spatiale des nitrates et d'évaluation de la vulnérabilité sont utiles pour l'aménagement des territoires, et pour l'examen de projets d'étude de l'environnement. Elles ne peuvent cependant pas remplacer des études hydrogéologiques locales pour un projet spécifique.

Les coupes hydrogéologiques, la piézométrie, les analyses hydrochimiques (dosages des nitrates), surtout les cartes répartition des nitrates et de vulnérabilité mettent en exergue la pollution élevée de l'aquifère de la nappe des altérites de Ouagadougou provenant des infiltrations de surface et la vulnérabilité de la nappe des fissures/fractures à une pollution éventuelle. Ce qui rend urgent la définition des règles de construction des fosses septiques et des latrines en respectant les normes, et surtout l'installation d'ouvrages d'assainissement public dans certaines parties de la zone d'étude. Ces règles devront délimiter les zones favorables ou non à l'installation de ces ouvrages.

Perspectives de ce travail

Malgré l'application des outils hydrogéochimiques dans l'investigation des eaux souterraines de Ouagadougou, la complexité du fonctionnement général du système aquifère demeure.

Le caractère discontinu des aquifères rend aussi discontinus les secteurs pollués qui restent en relation directe avec l'environnement immédiat. Il serait souhaitable que dans le futur on puisse acquérir des données complémentaires pour évaluer la vulnérabilité des aquifères sur deux cartes différentes dans notre cas où plusieurs aquifères plus ou moins confinés ou libres se superposent.

Pour faire face au problème de pollution, il faudra en priorité parvenir à déterminer les aires d'alimentation en vue de mettre en place des périmètres de protection pour les ouvrages très vulnérables mais non encore pollués. La détermination de ces aires devrait être réalisée à partir d'autres méthodes de simulation mathématique simple qui vont intégrer les paramètres structurales, hydrodynamiques, et la piézométrie.

La réalisation d'une carte de profondeur de la surface piézométrique de la nappe des altérites permettra de circonscrire les zones sensibles à la pollution si on considère que la profondeur pour la construction de latrines ne dépasse pas 2 m.

Pour ce qui concerne la minéralisation, un contrôle régulier de l'évolution de la minéralisation des eaux de ces aquifères, surtout au niveau des eaux de puits permettrait de prévenir toute aggravation du phénomène de pollution qui reste localisée et ponctuelle.

Enfin, au regard du processus de migration des polluants qui rejoignent les nappes en hautes eaux pour ensuite se disperser par dilution, il serait mieux que dans les prochaines études le mécanisme de suivi de la pollution se ramène à 3 ou 4 prélèvements dans l'année : un en basses eaux (mai), le deuxième en hautes eaux (août-septembre) et le troisième en décembre-janvier en phase de baisse.

BIBLIOGRAPHIE

- Akiti. T.T (1980).** Etude géochimique et isotopique de quelques aquifères du Ghana. *Thèse de Docteur-Ingénieur. Université de Paris XI- Orsay.*
- Aller et al (1987).** DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution in potential using hydrogeology settings ; *United States Environmental Protection Agency, EPA/600/2-87/035, 622 p.*
- Appelo. C. A. J et D. Postma (1996).** Geochemistry groundwater and pollution. *Bakelma, Rotterdam, 484 p.*
- Babut M. (1984).** Les eaux d'alimentation en zone tropicale ivoirienne. Approche de la qualité chimique (éléments toxiques et indésirables) et de la vulnérabilité des aquifères. *Thèse de 3^e cycle. Université de Lille II, 25 mai 1984 ; 182 p.*
- Bazie. P, B Dieng, A Ackerer (1995).** Bilan des transferts verticaux d'eau en zone non-saturée sous climat soudano-sahélien : application à l'estimation de la recharge des nappes. *Revue des Sciences de l'eau, 8 p : 237-260.*
- Bessoles (1977).** Géologie de l'Afrique : craton Ouest-Africain. *Mémoire B.R.G.M n° 88.*
- Bgs, Cna, Sapal & Uach (1996).** Effects of wastewater reuse on urban groundwater resources of Leon Mexico. *Final Report, February 1996. British Geological Survey. Technical Report WD/95/64.*
- Blavoux. Bernard (1978).** Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium : possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée. *Thèse d'état. Université Pierre et Marie Curie, de Paris 6. 316 p.*
- Bouchaou. L, P. Chauve, J Mania, J. Mudry, et Jl. Michelot (1994).** Apport des traçages artificiel et naturel à la connaissance des circulations et des zones de recharge en région sem-aride : cas de l'atlas de Beni Mellal au (Maroc)..*Revue des Sciences de l'eau p 43-55.*
- Bourrie. G (1978).** Acquisition de la composition chimique des eaux en climat tempéré. Application aux granites des Vosges et de la Margeride. *172 p.*
- Bryan, J (1997).** Groundwater pollution from infiltration of urban storm water runoff. *Groundwater in the urban environment vol1 P 131-140.*
- Castaing, C, P Chevremont et al (2003).** Notice explicative de la carte Géologique au 1/200 000. *Feuille ND-30-V de Ouagadougou. 1^{ère} édition.*
- Chettri. Madhu, and Smith. G. D (1995).** Nitrate pollution in groundwater in selected district of Nepal. *Hydrogeology Journal vol 3, n°1, p : 71-77.*
- Chilton et al (1997).** Environmental isotope in Hydrology, Processes and management, 1, *680 p.*

- Clark. I et P. Fritz (1997). Environnement isotopes in hydrogeology. *Lewis Publishers. New York.* 328 p.
- Collin. J.J (1987). Pollution des eaux souterraines. *BRGM- SGN, département EAU, 46 pages.*
- 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 du Vaucluse.* 171 p.
- Djoret. D (2000). Etude de la recharge de la nappe du Chari Baguirmi (TCHAD) par les méthodes chimiques et isotopiques. *Thèse de doctorat Université d'Avignon et des pays du vaucluse.* 146 p.
- Faillat. JP (1986). Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest). *Thèse d'état. USTL Montpellier.*
- Faillat. JP (1987). Aquifères fissurés en zone tropicale humide : Structure hydrodynamique et hydrochimie en Afrique de l'Ouest. *Hydrogéologie, 2 p 109-112.*
- Faillat. JP and Rambauda (1988). La teneur en nitrates des fissures de la zone tropicale humide en relation avec les problèmes de déforestation. *CR Académie des Sciences de Paris* 306 p. *Serie II p 1115-1120.*
- Faillat. JP et B Blavoux (1989). Caractères hydro chimiques des nappes de roches endogènes fissurées en zone tropicale humide : l'exemple de la côte d'Ivoire. *Journal of African Earth Sciences. Vol 9, p 31-40.*
- Filippi. C, F Milville et D Thiery (1990). Evaluation de la recharge naturelle des aquifères en climat soudano-sahélien par modélisation hydrologique globale : Application à dix sites au Burkina Faso. *Journal des sciences hydrologiques, 35, 1-2.*
- Fontes. J (1976). Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles. Quelques aspects. *Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles. Université Pierre et Marie Curie Paris VI.*
- Forslund, J (1986). Groundwater quality today and tomorrow. *World. Health. Statistique quart, 39p.*
- Gaubl. E (1993). Hydrodynamique, transport de polluants et modélisation en milieu fluvio-glacière. 5 Application à la nappe de la plaine de Pontarlier-Doubs). *Thèse de doctorat. Université de Franche-Comté.* 126 p.
- Gac J.Y et Orange D (1991). Bilan géochimique des apports atmosphériques en domaines sahélien et soudano-guinéen d'Afrique de l'Ouest. Bassin supérieur du Sénégal et de la Gambie. *Géodynamique 5 (1) 1990, p : 51-65*
- Joseph. A et Fangi. J.P (2007). Modélisation d'une recharge effective de nappe alluviale en région subdésertique : cas de l'oasis de Téloua au Niger. *Journal of African Earth Sciences. P : 317-326.*

- Kadjangaba. E (2000).** Synthèse des données isotopiques et hydro chimiques du bassin du lac Tchad (Niger, Nigéria, Cameroun, Tchad). *Diplôme d'études approfondies (D E A) Sciences de l'eau dans l'environnement continental. Université d'Avignon et des pays du Vaucluse* 74 p.
- Kadjangaba. E (2007).** Etude hydrochimique et isotopique du système zone non saturée-nappe dans la zone urbaine de N'djamena : Impact de la pollution. *Thèse de Doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse*, 185 p.
- Klimas. Algirdas A (1995).** Impact of urbanization and Protection of water resources in the Vilnius District Lithuania. *Hydrogeology Journal* vol 3, n°1, p : 24-35.
- Kikieta. A (1978).** Contribution à l'étude hydrogéologique des massifs granitiques et cristallins basiques en Afrique Intertropicale : Hydrogéologie du bassin versant de la Bougouriba (Haute Volta). *Thèse de 3è cycle. Institut National Polytechnique de Lorraine*. 147 p.
- Landreau. A, Mariotti. A, Simon. B (1988).** La dénitrification naturelle dans les eaux souterraines. *Hydrogéologie* n° 1, p: 35-43.
- Leonardi. V, Arthaud. F, Grillot J.C, Avetissian. V, and Bochnaghian. P (1996).** Modélisation d'un aquifère basaltique fracturé tenant compte des données géologiques-climatiques et hydrauliques : cas des basaltes perchés de Garni (Arménie). *Journal of Hydrology* vol 179. P : 87-109.
- 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*.
- Menani. M. R (2001).** Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madler, Nord-est algérien, selon la méthode Drastique. *Sécheresse* n° 2, vol 12, p : 95-101.
- Millville. 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 Université Paris VI*, 216 p.
- Moukolo. N C.B.Gaye (2001).** Problème de contamination des nappes phréatiques par les rejets domestiques dans les métropoles d'Afrique Noire. Cas de la nappe de Brazzaville au Congo. *Sécheresse* n° 3, vol 12, pp175-182.
- Mudry. J, B Blavoux (1986).** Utilisation de l'analyse en composantes principales (sur les variétés centre réduites) pour l'étude du fonctionnement hydro cinématique de trois aquifères karstiques du sud-est de la France. *Hydrogéologie*, n°1, p : 53-59.
- Murat. V (2003).** Etude comparative de méthode d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution : Application aux aquifères du piedmont laurentien. *Mémoire de maîtrise Université Québec INRS-Géo ressources Québec*. 127 p.
- Menani. M. R(2001).** Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher, Nord-Est algérien, selon la méthode Drastic : *Sécheresse* n° 2, vol 12, pp95-101.

- Nkotagu. H (1996).** Origin of high nitrate in ground- Water in Tanzania. *Journal of African Earth Sciences* Vol 21, n°4 pp: 471-478.
- Njitchoua. R , Dever. L, Fontes. J C, et Naah. E (1997).** Geochemistry, origin and recharge mecanism of groundwaters from the Garoua Sandstone aquifer norther Cameroon. *Journal of Hydrogeology*, 190 pp 123-140.
- Mariotti. A (1994).** Dénitrification in situ dans les eaux souterraines processus naturels ou provoqués. *Revue Hydrology* n°3 p : 43-68.
- Mariotti. A (1994).** La dénitrification des eaux souterraines principes et méthodes de son identification. *Journal Hydrology* 88 p : 1-23.
- Moukolo. N, C.B. Gaye (2001).** Problèmes des nappes phréatiques par les rejets domestiques dans les métropoles d'Afrique Noire. Cas de la nappe de Brazzaville au Congo. Science et changements planétaires. *Sécheresse* Vol 12 n°3 p : 175-182.
- Onugba. A (1990).** Contribution à la connaissance des systèmes aquifères de la Haute Benoué (Nigéria) : Etude hydro chimique et isotopique de zones témoins du socle et du sédimentaire. Vulnérabilité des forages à la pollution. *Thèse de doctorat. Université d'Avignon et des pays de Vaucluse.* 183 p.
- Onugba. A, Blavoux. B, Travi. Y (1990).** Pollution par les nitrates des aquifères de socle en haute Benoué, Nigéria. *Colloque Géologie africaine, 115 è congrès national des sociétés savantes, Avignon, 13 p.*
- Ousmane. B, et al. (1990).** Etude préliminaire de la pollution des eaux souterraines et de son origine dans l'arrondissement de Tera/Liptako/Niger, 6 pages.
- Ousmane. B (1988).** Etude géochimique et isotopique des aquifères du socle de la bande sahélienne du Niger (Liptako, Sud-Maradi et Zinder-Est). *Thèse Univ. Niamey.* 175 p.
- Ousmane. B, J.Ch Fontes J.F Aranyossy, A. Joseph (1983).** Hydrologie isotopique et hydrochimie des aquifères discontinus de la bande sahélienne et de l'Aïr (Niger). *IAEA-SM-270/59 p : 365-395.*
- Rodier. J (1996).** Analyse de l'eau. 8è édition dunod Paris.
- Rogoto Hobah. (1993).** Complément d'inventaire des forages et éléments de synthèse hydrogéologique de l'agglomération De Ouagadougou. *Mémoire de fin d'étude Sciences et techniques de l'eau. Université de Ouagadougou, 47 pages+ annexes.*
- Savadogo. A. N (1984).** Géologie et Hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta. Etudes régionale du bassin versant de la Sissili. *Thèse de Doctorat ès. Grenoble I.*
- Savadogo. A.N, Sarrot-Reynauld. J (1983).** Utilisation des nouvelles données isotopiques et chimiques pour la connaissance du mode d'alimentation des nappes du socle cristallin de Haute-Volta. *108^{ème} congrès nationale des sociétés savantes Grenoble.*
- Savadogo. A N. Yameogo S. (2002).** The Urban pollution of surficial and groundwater Aquifers Vulnerability in Africa : Pollution par les nitrates des nappes aquifères de l'agglomération de Ouagadougou. *Rapport 28 p + annexes.*

- Sinha. U. K, Kulkarni. K. M, Sharma. S, Ray. A, Bodhankar. N (2002).** Assessment of aquifer system using isotope techniques in urban centres Raipur, Calcuta and Jodhpur, India. *International Atomic Energy Agence 'AIEA-TECDOC-1298*). July 2002. 77-94
- S. Yaméogo et al. (2006)** , Spatial and temporal variations of groundwater pollution in Ougadougou city, Burkina Faso, *Groundwater pollution in Africa*. Edited by YangxinXu and Brent. H. Usher, p.157-167. UNEP, UNESCO.
- Tandia. A, Diop. E. S et Gaye. C. B (1999).** Pollution par les nitrates des nappes phréatiques sous environnement semi-urbain non Assaini : exemple de la nappe de Yeumbeul, Sénégal. *Note technique, Journal of African Earth Sciences*, vol 29, n° 4, p : 809-822.
- Tardy. (1969).** Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. *Mem. Du service de la carte Géol. D'Alsace et de Lorraine*, n° 31.
- Travi. Y, Dia. O (1986).** Interprétation hydrochimique sur les nappes de formation de socle du Sénégal oriental. *Programme C.E.A.O. Rapport département de géologie. Dakar*, 9 p.
- Travi. Y, et O. Dia, D. Fohlen (1988).** Hydrogéochimie des eaux souterraines de quelques formations de socle au Sénégal Oriental. 14 pages.
- Travi. Y, et J Murdy. (1997).** Méthode pour l'évaluation et la gestion du risque nitrate dans les aquifères de socle de la zone sahélienne de l'Afrique de l'Ouest. *Hydrogéologie*, n°1, p13-21.
- Travi Y, J.Y. GAC, J.Ch. Fontes, B. Fritz (1987).** Reconnaissance chimique et isotopique des eaux de pluie au Sénégal. *Géodynamique* 2 (1), p : 43- 53.
- Yaméogo S. et A. N. Savadogo (2002).** Les ouvrages de captage de la ville de Ouagadougou et leur vulnérabilité à la pollution : *ENVIROWATER 2002 5è conférence Inter régionale sur l'environnement et l'Eau au Burkina Faso*.P.378-386.

ANNEXES

Annexe I : Paramètres climatiques de la zone d'étude

I.1 : Variation saisonnière des écoulements du Massili de la période 1975-2004

I.2 : Pluies annuelles à Ouagadougou de 1902 à 2004

Annexe II : Paramètres hydrogéologiques

III.1 : Les paramètres hydrogéologiques des systèmes aquifères du socle

III.2 : Tableau des données piézométriques

Annexe III : Résultats des analyses physico-chimiques

Annexe III.1 : Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de surface

Annexe III.2 : Résultats des analyses physico-chimiques des eaux des puits et piézomètre du CIEH

Annexe III.3 : Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de forages

Annexe IV : Résultats des analyses isotopiques

Annexe V : Elaboration de la carte de vulnérabilité

ANNEXE I

Paramètres climatiques de la zone d'étude

						DEBITS	MENSUELS	ET ANNUELS		Edition du	28/08/2006	... 16H30	
	Capteur:	120270180	2-1 ... Gonsé										
	Pays:	Burkina-Faso										Latitude :	2°28'00"
	Bassin:											Longitude :	1°19'00"
	Superficie:	2100 km2											
valeurs	en m3/s												
année	Janv	Fevr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nove	Dece	annuel
1975	0	0	0	0	0	-1,21	2,3	2,73	-8,84	-0,135	0	0	-1,26
1976	0	0	0	0	0,157	-1,23	1	2,78	1,19	0,515	0,083	0,065	-0,589
1977	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1978	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1979	0	0	0	0	0	-0,509	-1,08	-1,62	-6,63	-0,442	0	0	-0,854
1980	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1981	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1982	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1983	0	0	0	0	0	-3,67	2,33	4,72	1,05	0,031	0	0	-0,989
1984	0	0	0	0	0	-0,067	-0,531	0,721	-1	0	0	0	-0,194
1985	0	0	0	0	0,061	0,354	2,5	3,66	6,56	0,115	0	0	1,11
1986	0	0	0	0	0,062	0,435	1,87	4,49	21,9	0,073	0	0	2,38
1987	0	0	0	0	0,031	1,21	0,699	2,72	1,1	-0,547	-	0	-0,578
1988	0	0	0	0	0,177	0,481	3,75	8,34	-1,87	0	0	0	-1,23
1989	0	0	0	0	0	-0,378	-1,88	10,1	5,19	0,403	0,028	0	-1,51
1990	-0,056	0	0	0	0,073	0,787	-1,63	2,49	1,92	0,193	0	0	-0,6
1991	0	0	0	0	-12,8	0,824	3,1	-6,7	-0,58	-0,084	0	0	-2,04
1992	0	0	0	0	0	-0,138	-2,94	-10,9	13,5	-0,235	0	0	-2,3
1993	0	0	0	0	0	-	-	-6,55	-2,47	-	0	0	-1,02
1994	0	0	0	0	0	-0,592	-1,42	34,3	-10,5	-1,15	-0,156	-	-4,43
1995	0	0	0	0	0,019	1,3	1,02	2,93	-3,07	-0,276	0,095	0,061	-0,733
1996	0,015	0,008	0	0,039	0,177	-0,515	-1,52	-4,15	-4,68	1,22	0,11	0	-1,04
1997	-0,088	0	0	-0,235	0,243	0,826	0,733	-2,23	1,82	-0,446	-0,203	0	-0,571
1998	0	0	0	0	0	0,202	0,937	5,03	13,5	0	0	0	1,63
1999	0	0	0	0	0	-	-	-10,7	-11,3	-0,813	0,135	-0,118	-2,31
2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
2001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
2002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
2003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
2004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Moy.	0,006	0	0	0,011	0,551	0,64	1,36	5,11	4,74	0,278	0,034	0,01	1,09

I.1 : Variation saisonnière des écoulements du Massili de la période 1975-2004.

Années	Cumul en mm	Moyenne 1902 à 2004		Années	Cumul en mm	Moyenne 1902 à 2004		Années	Cumul en mm	Moyenne 1902 à 2004
1902	851,0	786,83		1936	808,2	786,83		1972	1060,0	786,83
1903	775,0	786,83		1937	616,7	786,83		1973	745,9	786,83
1904	894,7	786,83		1938	792,4	786,83		1974	924,1	786,83
1905	773,1	786,83		1939	858,9	786,83		1975	755,6	786,83
1906	979,9	786,83		1940	852,6	786,83		1976	1106,2	786,83
1907	676,6	786,83		1941	837,2	786,83		1977	568,9	786,83
1908	711,0	786,83		1942	823,6	786,83		1978	764,2	786,83
1909	959,0	786,83		1943	1008,6	786,83		1979	730,8	786,83
1910	645,9	786,83		1944	583,8	786,83		1980	593,2	786,83
1911	575,0	786,83		1945	732,2	786,83		1981	713,6	786,83
1912	600,9	786,83		1946	721,4	786,83		1982	634,7	786,83
1913	407,6	786,83		1947	495,5	786,83		1983	674,6	786,83
1914	671,4	786,83		1948	768,8	786,83		1984	571,4	786,83
1915	774,4	786,83		1951	878,5	786,83		1985	673,9	786,83
1916	666,0	786,83		1952	896,3	786,83		1986	794,0	786,83
1917	976,4	786,83		1953	884,3	786,83		1987	784,5	786,83
1918	916,8	786,83		1954	949,8	786,83		1988	734,9	786,83
1919	650,5	786,83		1955	1040,4	786,83		1989	797,8	786,83
1920	873,1	786,83		1956	1102,0	786,83		1990	675,9	786,83
1921	718,4	786,83		1957	993,4	786,83		1991	900,7	786,83
1922	999,5	786,83		1958	766,4	786,83		1992	698,7	786,83
1923	772,1	786,83		1959	989,8	786,83		1993	750,6	786,83
1924	816,4	786,83		1960	803,5	786,83		1994	727,8	786,83
1925	794,8	786,83		1961	696,2	786,83		1995	700,2	786,83
1926	567,6	786,83		1962	1183,2	786,83		1996	677,4	786,83
1927	1001,7	786,83		1963	656,8	786,83		1997	587,8	786,83
1928	1037,5	786,83		1964	1103,2	786,83		1998	668,3	786,83
1929	928,5	786,83		1965	852,2	786,83		1999	800,2	786,83
1930	903,6	786,83		1966	648,1	786,83		2000	599,3	786,83
1931	648,1	786,83		1967	764,4	786,83		2001	619,4	786,83
1932	705,0	786,83		1968	773,6	786,83		2002	656,2	786,83
1933	807,6	786,83		1969	1045,3	786,83		2003	847,7	786,83
1934	746,2	786,83		1970	728,8	786,83		2004	772,0	786,83

I.2 : Pluies annuelles à Ouagadougou de 1902 à 2004

ANNEXES II

Paramètres hydrogéologiques
de 200 forages de Ouagadougou

lieu	Sect	X	Y	Côte Z	NS	NS-Rsol	Côte de l'eau	Altérations	Toit du socle	PT	PT-Alt	Q m3/h	Alt Saturées	Q/essai air lift	s en m	m2/h/m	T en m2/S	K m/s	S	Géologie
C26	1	660455	1367234	303,50	17,88	17,43	286,07	31,00	272,50	43,65	12,65	12,00	13,12							
C27	1	660394	1367234	303,50	13,12	12,67	290,83	37,00	266,50	55,00	18,00	11,70	23,88							
C24	2	659339	1366890	300,00	13,48	13,03	286,97	27,00	273,00	50,00	23,00	36,00	13,52							
C28	2	659439	1348578	304,00	6,00	5,55	298,45	26,00	278,00	44,00	18,00	40,00	20,00							
CQ67	3	660280	1366035	308,90	16,80	16,35	292,55	26,00	282,90	40,20	14,20	5,60	9,20							
CQ68	3	661084	1368252	297,70	10,37	9,92	287,78	18,00	279,70	46,52	28,52	5,40	7,63							
CQ70	3	660328	1368278	297,70	19,00	18,55	279,15	35,50	262,20	44,50	9,00	13,00	16,50							
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			
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			
CQ69	4	662138	1368749	298,80	18,00	17,55	281,25	26,00	272,80	48,00	22,00	6,00	8,00							
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			
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			
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			
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			
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			Granite
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	1,00E-03		Pgtite+grant fis
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	1,00E-03		Grtefis+filon
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			
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			
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							
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					
CQ13	14	658558	1362986	320,00	4,39	3,94	216,06	24,14	295,86	73,34	49,20	5,40	19,75	7,48	26,18					
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			
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			
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	8,57E-05		granite fissuré
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			granite fissuré
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			Grte + pegtite
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			Grte + pegtite
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-04	3,34E-05		Grte +fil de pegt
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			Granite
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	1,57E-04		Gmte fis+ pegt
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		2,00E-04			Granite rose
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			Granite
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			Fil de Qrzt +grte
FPM	15	665908	1359091	310,20	10,20	9,75	300,45	23,00	287,20	52,00	29,00	7,00	12,80							
FT60	15	662532	1363128	309,10	27,68	27,23	281,87	36,80	272,30	62,00	25,20	6,75	9,12							
DIV	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						
CQ25	15	661892	1364108	315,80	6,80	6,35	309,45	10,00	305,80	58,00	48,00	13,00	3,20							
DIV	15	666608	1373229	289,30	10,00	9,55	279,75	34,00	255,30	74,00	40,00	6,70	24,00							
DIV	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						
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			
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		3,50E-04			Filon de Q +grte
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			
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			
QP84	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	1,00E-01		Grte alt et fis
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		6,84E-04			
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			
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			
TH46	16	658893	1365628	304,20	9,13	8,68	295,52	26,86	277,34	67,29	40,43	10,30	17,73							
CQ52	16	659911	1361823	324,20	19,07	18,62	305,58	28,87	295,33	48,58	19,71	8,00	9,80							
C8	16	659763	1361239	330,30	34,49	34,04	296,26	45,00	285,30	73,00	28,00	6,17	10,51							
QP99	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			
QP107	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			
QP34	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			

lieu	Sect	X	Y	Côte Z	NS	NS-Rsol	Côte de l'eau	Altérations	Toit du socle	PT	PT-Alt	Q m3/h	Alt Saturées	Q/essai air lift	s en m	m2/h/m	T en m2/S	K m/s	S	Géologie
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			
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			
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			Ortose +quartz
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			granite rose fis
PY9413	17	665241	1360940	299,80	20,95	20,50	279,30	35,00	264,80	62,08	27,08	9,00	14,05	15,00	7,50		8,40E-04			Pegmatite +grant
PY9415	17	655215	1361185	316,70	28,60	28,15	288,55	41,25	275,45	55,95	14,70	9,00	12,65	5,50	12,00		5,25E-04			Ortose +qrtz fis
PY9416	17	658381	1361017	327,60	22,60	22,15	305,45	39,80	287,80	63,24	23,44	32,40	17,20	5,10	12,50		2,90E-05			Pegtite très fract
PY9417	17	655495	1360804	317,70	27,50	27,05	290,65	31,06	286,64	59,25	28,19	8,00	3,56	6,00	6,30		4,32E-04			Pegtite +granite
QP101	17	656968	1362940	329,30	31,25	30,80	298,50	52,00	277,30	79,00	27,00	8,00	20,75				3,50E-04			
QP122	17	653975	1363376	306,50	6,35	5,90	300,60	20,10	286,40	46,00	25,90	70,00	13,75	12,08	0,51					
SM20	17	654268	1364471	300,40	8,60	8,15	292,25	30,60	269,80	52,00	21,40	9,00	22,00	9,13	28,38		1,30E-04			
TH37	17	659935	1362933	304,00	31,25	30,80	273,20	52,00	252,00	79,00	27,00	8,00	20,75	5,85	20,65		1,30E-04			
FT12	17	654729	1364684	307,10	8,60	8,15	298,95	30,60	276,50	52,00	21,40	9,00	22,00							
FT14	17	658863	1365628	304,20	8,60	8,15	296,05	26,75	277,45	55,00	28,25	19,30	18,15	8,30	12,49	0,66	2,70E-04			
FT15	17	658593	1365227	305,60	7,90	7,45	298,15	26,87	278,73	61,00	34,13	12,00	18,97							
TH36	17	657288	1366295	315,70	16,90	16,45	299,25	34,89	280,81	73,33	38,44	8,50	17,99							
TH37	17	659935	1362933	300,40	31,09	30,64	269,76	60,82	239,58	79,09	18,27	8,00	29,73							
F024	17	654194	1363336	322,20	8,02	7,57	314,63	20,00	302,20	55,56	35,56	36,00	11,98	5,00	23,07	0,22	1,30E-04			
TH47	17	660121	1362009	321,10	20,63	20,18	300,92	39,00	282,10	49,65	10,65	24,00	18,37							
CQ33	17	656061	1364138	319,50	16,34	15,89	303,61	19,74	299,76	32,47	12,73	5,00	3,40							
CQ34	17	685752	1363691	285,80	9,94	9,49	276,31	20,00	265,80	36,70	16,70	5,00	10,06							
CQ59	17	657721	1364454	313,10	15,20	14,75	298,35	22,50	290,60	46,60	24,10	6,00	7,30	7,60	5,12	1,48	7,00E-04			
PY9003	17	658999	1362832	317,40	16,08	15,63	301,77	41,10	276,30	64,20	23,10	5,40	25,02							
PY9004	17	659252	1360775	328,80	22,18	21,73	307,07	52,00	276,80	68,60	16,60	7,20	29,82							
PY9007	17	657271	1363960	317,80	12,77	12,32	305,48	41,00	276,80	55,20	14,20	10,00	28,23							
PY9009	17	658308	1361999	325,90	13,08	12,63	313,27	30,00	295,90	49,20	19,20	6,00	16,92							
PY9010	17	658006	1362120	325,20	18,42	17,97	307,23	45,00	280,20	61,20	16,20	11,64	26,58							
PY9011	17	657884	1361728	328,00	16,00	15,55	312,45	41,00	287,00	55,25	14,25	43,20	25,00							
F551A	17	654901	1372090	311,20	7,60	7,15	304,05	15,00	296,20	38,00	23,00	5,40	7,40							
F557B	17	659895	1370089	291,00	4,72	4,27	286,73	33,00	258,00	45,00	12,00	24,00	28,28	3,60						
F557A	17	659895	1370089	291,00	10,49	10,04	280,96	21,00	270,00	51,00	30,00	6,00	10,51	13,00						
F560B	17	657399	1368078	304,50	12,50	12,05	292,45	27,00	277,50	51,00	24,00	5,00	14,50	3,72						
F562A	17	655920	1367886	299,00	5,69	5,24	293,76	43,00	256,00	63,00	20,00	18,00	37,31	3,00						
F565A	17	662872	1367125	300,60	11,61	11,16	289,44	36,00	264,60	49,00	13,00	18,00	24,39	11,50						
F565B	17	665374	1368122	298,40	10,37	9,92	288,48	24,00	274,40	40,00	16,00	9,00	13,63	10,28						
F504A	17	662344	1375142	305,10	16,73	16,28	288,82	24,00	281,10	49,00	25,00	6,75	7,27	2,30						
F505A	17	659857	1377125	297,90	13,66	13,21	284,69	17,00	280,90	40,00	23,00	5,40	3,34	4,70						
QP31	18	656530	1362544	332,00	18,64	18,19	313,81	37,00	295,00	60,69	23,69	32,40	18,36	20,00			7,31E-04			Pegtite très fract
FT55b	18	657003	1363786	320,00	15,20	14,75	305,25	22,50	297,50	46,60	24,10	6,00	7,30	8,10	9,00		2,25E-04			
FT55	18	652965	1366917	302,10	6,35	5,90	296,20	20,10	282,00	46,00	25,90	70,00	13,75	12,00	1,18	10,17	0,0002			
FT68	18	654990	1366682	302,00	22,10	21,65	280,35	33,00	269,00	54,60	21,60	18,00	10,90							
F029	18	654153	1365487	298,40	16,36	15,91	282,49	31,50	266,90	47,57	16,07	6,30	15,14	10,00	20,50	0,49	4,90E-04			
PEA27	19	656080	1368564	295,00	4,06	3,61	291,39	34,64	260,36	62,09	27,45	9,00	30,58	8,37	15,84		2,70E-04			
QP64	19	656462	1368012	302,30	7,73	7,28	295,02	26,00	276,30	39,50	13,50	6,50	18,27				3,10E-04			
QP74	19	654669	1367886	294,30	6,33	5,88	288,42	33,50	260,80	50,30	16,80	9,00	27,17	5,87	9,64		5,30E-04			
SM2	19	655493	1368682	295,50	7,65	7,20	288,30	31,00	264,50	67,64	36,64	19,00	23,35							
UB1-9	19	656793	1368505	299,20	7,73	7,28	291,92	23,00	276,20	39,00	16,00	7,20	15,27							
FZON	19	653127	1365083	302,10	6,35	5,90	296,20	20,10	282,00	46,00	25,90	7,00	13,75	3,54						
QP65	21	656047	1367930	299,10	6,50	6,05	293,05	40,00	259,10	63,00	23,00	18,00	33,50				8,00E-04			
FDAP	21	660030	1369605	290,00	4,80	4,35	285,65	25,51	264,49	55,00	29,49	6,00	20,71							
QP71	22	655682	1370181	298,70	6,95	6,50	292,20	21,45	277,25	55,50	34,05	6,95	14,50				2,30E-04			
QP72	22	655820	1369700	295,50	10,46	10,01	285,49	30,95	264,55	69,82	38,87	2,30	20,49	7,10	12,59	0,56	1,70E-04			
PEA5 *	22	654967	1369526	298,10	4,37	3,92	294,18	31,44	266,66	52,30	20,86	14,50	27,07				3,10E-04			
PEA8	22	656298	1370930	303,90	15,57	15,12	288,78	45,33	258,57	64,84	19,51	15,10	29,76				6,00E-04			
QP63	22	657716	1371124	293,80	5,55	5,10	288,70	20,03	273,77	51,02	30,99	16,70	14,48				2,70E-04			
CQ6	22	658227	1371432	296,10	7,20	6,75	289,35	16,00	280,10	50,00	34,00	10,00	8,80							
FBAS	22	655699	1370790	300,90	16,57	16,12	284,78	35,44	265,46	47,61	12,17	8,00	18,87							
CMPVI	22	657109	1371518	296,50	11,68	11,23	285,27	31,00	265,50	50,00	19,00	12,00	19,32							
QP112	23	659854	1370717	296,50	9,47	9,02	287,48	32,06	264,44	60,06	28,00	9,90	22,59	9,25	10,06	0,50	9,00E-04			

lieu	Sect	X	Y	Côte Z	NS	NS-Rsol	Côte de l'eau	Altérations	Toit du socle	PT	PT-Alt	Q m3/h	Alt Saturées	Q/essai air lift	s en m	m2/h/m	T en m2/S	K m/s	S	Géologie
QP123	23	660236	1370706	297,80	10,46	10,01	287,79	21,00	276,80	55,00	34,00	9,00	10,54	7,06	29,45	0,19	9,00E-04			
QP124	23	661085	1371549	295,30	10,12	9,67	285,63	33,00	262,30	69,80	36,80	2,50	22,88	5,30	17,69	0,60	5,00E-04			
QP56	23	659660	1371327	301,80	11,93	11,48	290,32	35,05	266,75	48,71	13,66	10,80	23,12				5,02E-04			
QP83	23	661390	1370676	292,80	7,55	7,10	285,70	24,00	268,80	49,00	25,00	20,07	16,45	8,50	12,12	0,70	6,30E-04			
QP86	23	660644	1370719	296,70	10,46	10,01	286,69	46,00	250,70	63,73	17,73	12,00	35,54	7,10	12,59	0,56	1,70E-04			
FPM	23	658926	1370637	296,20	12,00	11,55	284,65	22,00	274,20	33,00	11,00	5,00	10,00							
FT22'	23	661485	1372064	299,90	13,35	12,90	287,00	27,00	272,90	46,00	19,00	7,75	13,65							
FT26	23	666494	1372794	283,40	12,62	12,17	271,23	21,00	262,40	49,00	28,00	6,00	8,38							
SM3	23	657389	1369952	292,00	7,12	6,67	285,33	36,00	256,00	76,65	40,65	13,50	28,88							
TYD	23	660532	1369754	291,50	3,45	3,00	288,50	42,00	249,50	57,00	15,00	36,00	38,55							
QP47	24	658532	1370901	294,40	7,55	7,10	287,30	20,00	274,40	60,85	40,85	6,00	12,45	9,60	6,95	1,38	3,90E-04			
PEA1	24	664669	1373062	287,20	3,80	3,35	283,85	17,00	270,20	51,80	34,80	30,16	13,20	7,20	11,80	0,61	4,80E-04			Granite
CQ21	24	662581	1370503	291,70	7,50	7,05	284,65	20,00	271,70	53,60	33,60	15,00	12,50	8,30	1,12	7,41	7,00E-04			
/CLJBO	24	662667	1371303	297,70	16,00	15,55	282,15	24,00	273,70	44,00	20,00	5,85	8,00							
QP49	25	662932	1371707	297,50	13,30	12,85	284,65	24,47	273,03	60,21	35,74	9,90	11,17	6,20	11,57	0,54	2,90E-04			
QP52	25	662575	1371652	298,90	13,30	12,85	286,05	43,06	255,84	70,50	27,44	5,70	29,76	7,40	10,25	0,72	2,90E-04			
FPM	25	664338	1374938	300,10	9,47	9,02	291,08	19,00	281,10	35,00	16,00	9,00	9,53							
TH25	25	661856	1370449	288,10	9,11	8,66	279,44	13,00	275,10	55,07	42,07	10,73	3,89							
QP77	26	664928	1372343	287,50	8,97	8,52	278,98	17,67	269,83	60,65	42,98	9,09	8,70	6,72	11,31	0,48	7,00E-04	1,00E-03		Grte altn de gab
QP79	26	662521	1370573	291,00	7,63	7,18	283,82	17,00	274,00	51,80	34,80	30,10	9,37	9,27	3,49	1,39	4,80E-04	1,00E-01		Grte gris fis
NK1258	26	667127	1374247	288,00	12,76	12,31	275,69	31,00	257,00	57,70	26,70	18,70	18,24	22,10	18,73		1,30E-04	5,05E-02		pegтите+amphlite
NK19	26	668831	1375025	297,90	13,00	12,55	285,35	28,00	269,90	61,00	33,00	13,50	15,00	13,87	3,27		5,28E-04			
NK29	26	667059	1374200	287,70	13,11	12,66	275,04	16,50	271,20	60,00	43,50	18,70	3,39	12,60	4,42		3,50E-04			amphibolite
FKOS	23	666322	1372992	286,00	7,65	7,20	278,80	16,00	270,00	50,50	34,50	8,60	8,35							
NK07	26	666729	1374153	286,30	12,71	12,26	274,04	23,00	263,30	55,00	32,00	11,70	10,29							
NK08	26	667178	1374770	291,20	14,08	13,63	277,57	29,00	262,20	55,00	26,00	23,40	14,92							
FT32	27	665658	1370934	292,90	8,38	7,93	284,97	35,00	257,90	52,00	17,00	12,00	26,62	9,71	2,07		6,46E-04			
QP37	27	666246	1370960	294,30	12,67	12,22	282,08	37,00	257,30	55,36	18,36	10,80	24,33	8,45	4,41		8,00E-04			
TH1	27	667062	1371095	296,20	9,69	9,24	286,96	27,31	268,89	52,54	25,23	36,00	17,62	11,00	6,80	1,62	3,30E-03			
FT32	27	666021	1370987	293,70	8,38	7,93	285,77	35,00	258,70	52,00	17,00	12,00	26,62	12,10	4,87	2,48	6,46E-03			
TH2	27	666045	1372151	286,00	10,57	10,12	275,88	27,00	259,00	72,50	45,50	5,86	16,43							
CQ16	27	664811	1366183	310,80	13,70	13,25	297,55	32,00	278,80	56,00	24,00	5,00	18,30	8,50	3,81	2,23	4,00E-04			
C25	27	666566	1370925	296,70	8,30	7,85	288,85	17,40	279,30	45,50	28,10	31,00	9,10							
QP5	28	666246	1370960	294,30	15,65	15,20	279,10	18,80	275,50	61,00	42,20	3,20	3,15	3,20	16,92		1,00E-03			
FT18	28	666742	1370221	299,70	10,47	10,02	289,68	28,94	270,76	63,72	34,78	24,00	18,47	9,60	8,05	1,19	9,50E-04			
FT31	28	665550	1369608	296,60	9,87	9,42	287,18	40,00	256,60	70,00	30,00	17,10	30,13	11,46	13,63		3,17E-04			
FT33	28	667719	1370354	299,30	13,85	13,40	285,90	23,00	276,30	40,00	17,00	18,00	9,15	10,50	13,20		1,50E-04			
GND27	28	667690	1369389	300,40	11,14	10,69	289,71	26,50	273,90	55,20	28,70	15,60	15,36	2,90	19,09		5,18E-04			amphibolite
GND37	28	667088	1368339	309,00	9,96	9,51	299,49	32,00	277,00	72,00	40,00	15,60	22,04	6,66	1,20		3,00E-04			pgтите fis+mgтите
GND38	28	666697	1368138	308,00	23,80	23,35	284,65	30,00	278,00	66,20	36,20	48,80	6,20	8,45	4,99		6,00E-04			amph fissurée
QP1	28	666431	1368912	304,30	23,67	23,22	281,08	43,00	261,30	61,00	18,00	18,00	19,33	11,20	5,14	2,18	3,00E-04			
QP40	28	668902	1370641	291,50	10,40	9,95	281,55	38,00	253,50	54,60	16,60	15,60	27,60	11,60	14,23	0,82	5,70E-04			amphibolite
QP6	28	669087	1370631	290,60	9,69	9,24	281,36	40,00	250,60	72,00	32,00	15,60	30,31	11,20	4,58	2,18	3,00E-04			Pgтите fis + amphi
GND1257	28	669751	1371704	287,30	4,22	3,77	283,53	18,00	269,30	44,82	26,82	13,50	13,78	13,85						
FT02	28	666358	1370402	298,50	10,90	10,45	288,05	18,00	280,50	55,09	37,09	7,00	7,10							
FT03	28	666279	1368373	304,80	23,50	23,05	281,75	49,00	255,80	58,80	9,80	18,00	25,50							
FT18	28	666607	1368990	306,10	23,67	23,22	282,88	35,80	270,30	61,00	25,20	18,00	12,13							
FT31	28	665550	1369608	300,70	14,30	13,85	286,85	22,65	278,05	40,00	17,35	18,00	8,35							
FT33	28	665994	1369947	298,30	7,59	7,14	291,16	40,50	257,80	70,00	29,50	17,10	32,91	9,60	18,62	0,52	3,17E-04			
CQ9	28	656869	1371117	300,90	16,57	16,12	284,78	35,44	265,46	47,61	12,17	8,00	18,87							
CQ17	28	665524	1368277	298,00	13,70	13,25	284,75	21,14	276,86	33,00	11,86	10,00	7,44							
UB1-33	28	667478	1369824	300,30	23,40	22,95	277,35	26,00	274,30	60,00	34,00	6,50	2,60							
EA6-33	28	668411	1370567	290,50	13,20	12,75	277,75	24,00	266,50	55,00	31,00	11,70	10,80							
BUMIGEB	28	666145	1370616	296,90	11,00	10,55	286,35	25,00	271,90	72,00	47,00	6,00	14,00							
C1	28	659734	1366554	301,60	34,04	33,59	268,01	39,00	262,60	50,00	11,00	6,00	4,96							
CQ23	28	668113	1369767	295,90	7,50	7,05	288,85	36,00	259,90	57,00	21,00	15,00	28,50	7,90	8,92	0,89	4,00E-04			
PEA7	29	669034	1370281	295,20	14,44	13,99	281,21	23,80	271,40	66,00	42,20	46,80	9,36	34,60	20,47		4,40E-04			amphibolite

lieu	Sect	X	Y	Côte Z	NS	NS-Rsol	Côte de l'eau	Altérations	Toit du socle	PT	PT-Alt	Q m3/h	Alt Saturées	Q/essai air lift	s en m	m2/h/m	T en m2/S	K m/s	S	Géologie
QP118	29	664334	1368374	302,20	15,25	14,80	287,40	36,00	266,20	63,80	27,80	9,20	20,75	9,23	5,20		2,74E-04			
QP55	29	664294	1367230	307,10	15,30	14,85	292,25	36,90	270,20	73,60	36,70	9,00	21,60	5,75			4,45E-04			
QP92	29	665289	1367833	296,10	13,30	12,85	283,25	21,00	275,10	33,00	12,00	10,00	7,70				2,40E-04			
QP93	29	665062	1368232	295,50	12,70	12,25	283,25	28,00	267,50	58,00	30,00	18,00	15,30	10,36	7,17		9,93E-04			
FT20	29	664604	1367752	305,70	12,30	11,85	293,85	30,00	275,70	67,00	37,00	27,00	17,70	8,00	6,90		2,40E-04			
FT36	29	665382	1366709	303,30	24,34	23,89	279,41	36,00	267,30	61,00	25,00	6,75	11,66							
CQ13	29	663931	1366916	306,40	12,61	12,16	294,24	50,00	256,40	56,00	6,00	10,00	37,39	12,07						
FT39	30	664278	1365200	316,10	26,09	25,64	290,46	45,57	270,53	61,60	16,03	7,90	19,48	3,77	6,51		5,18E-04			
FT43	30	665681	1365472	315,90	35,40	34,95	280,95	36,77	279,13	62,21	25,44	9,90	1,37	4,50	3,30		2,64E-04			
CQ14	30	665468	1365533	315,00	37,75	37,30	277,70	37,00	278,00	55,00	18,00	5,40	0,00	6,00	1,61		0,0004			
QP59	30	662717	1364520	320,40	23,95	23,50	296,90	31,00	289,40	55,00	24,00	12,20	7,05	12,00	4,45		2,64E-04			
QP66	30	663350	1365692	307,40	5,97	5,52	301,88	26,62	280,78	44,60	17,98	7,90	20,65				5,18E-04			
FT38	30	664447	1366427	311,00	14,33	13,88	297,12	48,50	262,50	69,00	20,50	5,40	34,17							
CQ14	30	663696	1370790	306,40	7,20	6,75	299,65	26,62	279,78	44,60	17,98	10,00	19,42							
SM5	30	657268	1370044	293,50	7,12	6,67	286,83	32,00	261,50	40,00	8,00	13,50	24,88	4,00						
UB10	30	661892	1364108	315,80	9,18	8,73	307,07	23,00	292,80	43,00	20,00	12,00	13,82							
UB11	30	661892	1364108	315,80	10,40	9,95	305,85	39,00	276,80	53,00	14,00	12,00	28,60							
EA7-39	30	661892	1364108	315,80	7,73	7,28	308,52	23,00	292,80	39,00	16,00	7,20	15,27							
UF2	30	665861	1372642	286,90	7,65	7,20	279,70	16,00	270,90	50,50	34,50	8,60	8,35							
EA6-7	30	667182	1374155	287,00	12,00	11,55	275,45	23,00	264,00	55,00	32,00	11,70	11,00							
FZON	30	664832	1374633	300,70	13,71	13,26	287,44	28,00	272,70	48,00	20,00	9,00	14,29							

Tableaux des données piézométriques

Piézo CIEH prof : 20 m							
Date	Niveau statique en m	Date	Niveau statique en m	Date	Niveau statique en m	Date	Niveau statique en m
04/06/1978	6,70	25/09/1978	6,09	03/05/1979	7,45	03/03/1980	7,54
04/07/1978	6,71	27/09/1978	6,10	08/05/1979	7,46	28/03/1980	7,73
08/04/1978	6,71	28/09/1978	6,08	09/05/1979	7,48	14/04/1980	7,82
09/04/1978	6,73	29/09/1978	6,08	14/05/1979	7,47	25/04/1980	7,87
10/04/1978	6,70	02/10/1978	6,06	17/05/1979	7,50	07/05/1980	7,95
20/06/1978	6,77	03/10/1978	6,06	18/05/1979	7,50	23/05/1980	8,02
21/06/1978	6,78	05/10/1978	6,03	21/05/1979	7,52	02/06/1980	8,05
23/06/1978	6,76	06/10/1978	6,04	23/05/1979	7,51	05/06/1980	8,08
26/06/1978	6,80	06/10/1978	6,05	27/05/1979	7,55	12/06/1980	8,05
28/06/1978	6,76	10/10/1978	6,05	31/05/1979	7,55	16/06/1980	8,04
29/06/1978	6,77	11/10/1978	6,06	05/06/1979	7,56	19/06/1980	8,04
05/07/1978	6,78	13/10/1978	6,05	08/06/1979	7,61	24/06/1980	8,30
07/07/1978	6,73	16/10/1978	6,07	12/06/1979	7,61	27/06/1980	8,10
08/07/1978	6,73	17/10/1978	6,07	15/06/1979	7,61	01/07/1980	8,01
09/07/1978	6,73	18/10/1978	6,07	20/06/1979	7,62	08/07/1980	8,07
11/07/1978	6,72	19/10/1978	6,07	25/06/1979	7,62	10/07/1980	8,10
17/07/1978	6,70	20/10/1978	6,10	27/06/1979	7,62	11/07/1980	8,07
18/07/1978	6,68	23/10/1978	6,10	29/06/1979	7,62	17/07/1980	8,08
19/07/1978	6,65	25/10/1978	6,11	02/07/1979	7,61	18/07/1980	8,02
20/07/1978	6,65	27/10/1978	6,12	09/07/1979	7,64	21/07/1980	8,06
21/07/1978	6,65	30/10/1978	6,15	12/07/1979	7,62	22/07/1980	8,08
22/07/1978	6,65	02/11/1978	6,18	16/07/1979	7,58	24/07/1980	8,06
25/07/1978	6,62	06/11/1978	6,19	20/07/1979	7,58	28/07/1980	8,04
26/07/1978	6,64	13/11/1978	6,27	05/09/1979	7,13	29/07/1980	8,03
27/07/1978	6,61	16/11/1978	6,30	10/09/1979	7,05	30/07/1980	8,04
31/07/1978	6,61	22/11/1978	6,36	18/09/1979	6,84	04/08/1980	7,98
01/08/1978	6,66	25/11/1978	6,38	20/09/1979	6,82	19/09/1980	7,34
03/08/1978	6,57	29/11/1978	6,40	25/09/1979	6,70	22/09/1980	7,30
04/08/1978	6,55	01/12/1978	6,40	26/09/1979	6,71	25/09/1980	7,25
06/08/1978	6,52	04/12/1978	6,45	27/09/1979	6,69	06/10/1980	7,27
08/08/1978	6,50	06/12/1978	6,46	30/09/1979	6,67	07/10/1980	7,27
09/08/1978	6,49	12/12/1978	6,56	03/10/1979	6,69	13/10/1980	7,25
10/08/1978	6,48	15/12/1978	6,58	07/10/1979	6,61	15/10/1980	7,29
11/08/1978	6,48	18/12/1978	6,57	09/10/1979	6,60	18/10/1980	7,34
14/08/1978	6,45	22/12/1978	6,64	11/10/1979	6,59	01/11/1980	7,43
16/08/1978	6,48	01/01/1979	6,70	18/10/1979	6,57	24/11/1980	7,87
17/08/1978	6,40	08/01/1979	6,74	22/10/1979	6,61	02/12/1980	7,68
18/08/1978	6,37	10/01/1979	6,75	25/10/1979	6,62	02/12/1980	8,17
21/08/1978	6,36	15/01/1979	6,78	28/10/1979	6,61	05/02/1981	7,97
23/08/1978	6,34	17/01/1979	6,80	29/10/1979	6,64	26/02/1981	8,11
24/08/1978	6,32	23/01/1979	6,86	04/11/1979	6,69	06/03/1981	8,28
25/08/1978	6,31	29/01/1979	6,89	06/11/1979	6,67	03/04/1981	8,44
28/08/1978	6,27	31/01/1979	6,90	07/11/1979	6,67	12/04/1981	8,54
29/08/1978	6,25	05/02/1979	6,94	11/11/1979	6,70	30/04/1981	8,57
30/08/1978	6,25	07/02/1979	6,96	13/11/1979	6,73	11/05/1981	8,61
31/08/1978	6,25	13/02/1979	6,98	20/11/1979	6,68	27/05/1981	8,64
01/09/1978	6,24	22/02/1979	7,05	26/11/1979	6,85	11/06/1981	8,64
05/09/1978	6,21	23/02/1979	7,09	28/11/1979	6,88	18/06/1981	8,67
06/09/1978	6,20	02/03/1979	7,10	02/12/1979	6,93	02/07/1981	8,68
07/09/1978	6,20	05/03/1979	7,12	06/12/1979	6,96	06/07/1981	8,67
08/09/1978	6,19	13/03/1979	7,13	11/12/1979	6,99	07/07/1981	8,68
12/09/1978	6,18	19/03/1979	7,18	17/12/1979	7,03	10/07/1981	8,66
13/09/1978	6,18	22/03/1979	7,21	20/12/1979	7,04	13/07/1981	8,65
15/09/1978	6,16	26/03/1979	7,24	27/12/1979	7,13	17/07/1981	8,65
18/09/1978	6,14	02/04/1979	7,30	04/01/1980	7,18	21/07/1981	8,62
19/09/1978	6,12	10/04/1979	7,34	14/01/1980	7,21	23/07/1981	8,63
20/09/1978	6,11	17/04/1979	7,38	21/01/1980	7,30	29/07/1981	8,59
21/09/1978	6,13	23/04/1979	7,42	01/02/1980	7,33	12/08/1981	8,33
22/09/1978	6,13	27/04/1979	7,41	15/02/1980	7,45	18/08/1981	8,25

Date	Niveau statique en m	Date	Niveau statique en m	Date	Niveau statique en m	Date	Niveau statique en m
27/08/1981	8,09	27/08/1983	8,62	27/10/1986	9,36	24/08/1989	9,72
01/09/1981	7,98	08/09/1983	8,46	07/11/1986	9,36	28/08/1989	9,65
10/09/1981	7,91	19/09/1983	8,32	05/02/1987	9,72	31/08/1989	9,58
14/09/1981	7,87	25/09/1983	8,27	20/02/1987	9,77	04/09/1989	9,52
22/09/1981	7,78	04/10/1983	8,26	06/03/1987	9,90	07/09/1989	9,44
29/09/1981	7,69	15/12/1983	8,73	16/03/1987	10,00	12/09/1989	9,36
19/10/1981	7,67	06/01/1984	8,88	22/04/1987	10,16	13/09/1989	9,33
28/12/1981	8,06	31/01/1984	8,99	21/05/1987	10,32	18/09/1989	9,25
09/02/1982	8,27	06/02/1984	9,18	09/06/1987	10,45	19/09/1989	9,23
17/02/1982	8,28	12/03/1984	9,24	01/07/1987	10,30	21/09/1989	9,20
11/03/1982	8,42	08/04/1984	9,32	14/07/1987	10,29	25/09/1989	9,13
30/03/1982	8,54	10/05/1984	9,42	06/08/1987	10,12	28/09/1989	9,08
13/04/1982	8,61	25/05/1984	9,42	02/09/1987	9,77	03/10/1989	9,04
28/04/1982	8,59	11/07/1984	9,45	18/09/1987	9,69	09/10/1989	8,96
03/05/1982	8,61	18/07/1984	9,42	01/10/1987	9,58	11/10/1989	8,94
13/05/1982	8,63	24/07/1984	9,39	05/10/1987	9,54	16/10/1989	8,89
18/05/1982	8,65	25/07/1984	9,39	26/10/1987	9,51	23/10/1989	8,86
01/06/1982	8,71	30/07/1984	9,35	01/02/1988	9,98	30/10/1989	8,82
07/06/1982	8,67	01/08/1984	9,36	16/03/1988	10,19	03/11/1989	8,83
09/06/1982	8,67	06/08/1984	9,30	07/04/1988	10,30	13/11/1989	8,82
17/06/1982	8,65	08/08/1984	9,29	11/04/1988	10,35	20/11/1989	8,89
24/06/1982	8,65	13/08/1984	9,26	21/04/1988	10,30	24/11/1989	8,86
01/07/1982	8,62	17/08/1984	9,23	26/04/1988	10,30	29/11/1989	8,88
06/07/1982	8,54	22/08/1984	9,20	04/05/1988	10,33	14/12/1989	8,99
26/07/1982	8,45	29/08/1984	9,17	26/05/1988	10,36	21/12/1989	9,00
01/08/1982	8,39	05/09/1984	9,15	01/06/1988	10,41	28/12/1989	8,98
09/08/1982	8,35	08/11/1984	9,88	09/08/1988	10,02	03/01/1990	9,05
17/08/1982	8,29	23/11/1984	9,24	31/08/1988	9,71	10/01/1990	9,03
23/08/1982	8,21	05/02/1985	9,66	01-sept	9,70	16/01/1990	9,11
30/08/1982	8,10	23/03/1985	10,46	26/09/1988	9,39	23/01/1990	9,15
06/09/1982	8,01	06/06/1985	10,21	27/09/1988	9,36	31/01/1990	9,15
13/09/1982	8,02	17/06/1985	10,20	28/09/1988	9,34	05/02/1990	9,17
19/09/1982	8,05	30/06/1985	9,98	31/10/1988	9,26	14/02/1990	9,22
23/09/1982	8,04	29/07/1985	9,93	16/11/1988	9,30	28/02/1990	9,29
18/10/1982	8,09	08/08/1985	9,82	10/01/1989	9,03	16/03/1990	9,36
25/10/1982	8,14	12/08/1985	9,81	16/01/1989	9,11	21/03/1990	9,40
01/11/1982	8,20	23/08/1985	9,72	23/01/1989	9,15	28/03/1990	9,43
08/11/1982	8,26	25/08/1985	9,72	08/02/1989	9,63	10/04/1990	9,51
16/11/1982	8,31	16/09/1985	9,45	28/03/1989	9,78	19/04/1990	9,56
28/11/1982	8,40	17/09/1985	9,45	03/04/1989	9,80	03/05/1990	9,62
13/01/1983	8,61	22/09/1985	9,50	17/04/1989	9,87	17/05/1990	9,71
07/02/1983	8,71	30/09/1985	9,34	27/04/1989	9,90	29/05/1990	9,77
01/03/1983	8,83	18/12/1985	9,75	10/05/1989	10,00	11/06/1990	9,78
06/04/1983	8,95	24/01/1986	9,90	23/05/1989	10,05	18/07/1990	9,70
09/05/1983	9,12	20/02/1986	10,03	29/05/1989	10,07	23/07/1990	9,70
27/05/1983	9,17	18/03/1986	10,25	01/06/1989	10,07	26/07/1990	9,68
01/06/1983	9,13	27/04/1986	10,42	15/06/1989	10,11	02/08/1990	9,61
10/06/1983	9,16	11/05/1986	10,46	29/06/1989	10,11	06/08/1990	9,59
20/06/1983	9,18	24/05/1986	10,44	10/07/1989	10,09	08/08/1990	9,59
24/06/1983	9,13	30/06/1986	10,44	24/07/1989	9,99	14/08/1990	9,56
27/06/1983	9,12	24/07/1986	10,24	26/07/1989	9,98	27/08/1990	9,32
04/07/1983	9,05	01/08/1986	10,17	28/07/1989	9,98	03/09/1990	9,08
11/07/1983	9,01	07/08/1986	10,14	31/07/1989	9,94	06/09/1990	9,19
17/07/1983	9,03	12/08/1986	10,10	02/08/1989	9,94	10/10/1990	8,88
23/07/1983	8,97	27/08/1986	9,94	07/08/1989	9,89	29/10/1990	8,90
25/07/1983	8,95	03/09/1986	9,73	10/08/1989	9,88	20/11/1990	8,98
01/08/1983	8,93	05/09/1986	9,70	16/08/1989	9,82	07/12/1990	9,10
11/08/1983	8,78	16/09/1986	9,64	18/08/1989	9,78	13/12/1990	9,14
18/08/1983	8,70	13/10/1986	9,34	22/08/1989	9,73	03/01/1991	9,29

Date	Niveau statique en m	Date	Niveau statique en m	Date	Niveau statique en m	Date	Niveau statique en m
22/01/1991	9,37	28/08/1992	8,43	15/01/1996	8,06	14/08/2000	9,25
05/02/1991	9,43	18/09/1992	7,88	23/02/1996	8,30	21/08/2000	9,20
17/04/1991	9,75	01/10/1992	7,83	11/03/1996	8,37	04/09/2000	9,06
19/04/1991	9,77	02/10/1992	7,78	01/04/1996	8,47	11/09/2000	9,02
06/05/1991	9,77	06/10/1992	7,77	02/05/1996	8,67	18/09/2000	9,01
21/05/1991	9,78	08/10/1992	7,77	07/06/1996	8,77	11/10/2000	8,92
22/05/1991	9,82	12/10/1992	7,75	12/06/1996	8,73	17/10/2000	8,96
28/05/1991	9,70	16/10/1992	7,75	19/06/1996	8,67	23/10/2000	9,00
29/05/1991	9,70	29/10/1992	7,79	23/07/1998	9,76	30/10/2000	8,95
30/05/1991	9,70	06/11/1992	7,80	28/07/1998	9,80	06/11/2000	9,00
04/06/1991	9,63	17/11/1992	7,86	03/08/1998	9,76	13/11/2000	9,08
05/06/1991	9,61	13/01/1993	8,28	10/08/1998	9,72	20/11/2000	9,03
06/06/1991	9,61	21/01/1993	8,31	17/08/1998	9,65	28/11/2000	9,09
13/06/1991	9,65	26/01/1993	8,31	25/08/1998	9,56	04/12/2000	9,12
17/06/1991	9,61	19/02/1993	8,44	01/09/1998	9,53	11/12/2000	9,19
18/06/1991	9,49	03/03/1993	8,52	09/09/1998	9,28	18/12/2000	9,19
21/06/1991	9,49	04/03/1993	8,50	14/09/1998	9,40	04/01/2001	9,15
25/06/1991	9,44	15/03/1993	8,58	21/09/1998	9,15	10/01/2001	9,18
09/07/1991	9,34	09/04/1993	8,75	01/10/1998	9,22	15/01/2001	9,18
15/07/1991	9,26	13/04/1993	8,76	07/10/1998	9,12	22/01/2001	9,20
16/07/1991	9,27	20/04/1993	8,82	12/10/1998	9,32	29/01/2001	9,24
22/07/1991	9,27	26/04/1993	8,12	20/10/1998	9,10	15/06/2001	9,67
14/08/1991	9,07	17/05/1993	9,12	27/10/1998	9,83	22/06/2001	9,70
16/08/1991	8,90	24/05/1993	9,07	04/11/1998	9,06	29/06/2001	9,70
20/08/1991	8,82	28/06/1993	9,10	10/11/1998	9,08	06/07/2001	9,72
23/08/1991	8,75	30/06/1993	9,05	17/11/1998	9,10	16/07/2001	9,71
27/08/1991	8,65	09/07/1993	9,08	30/11/1998	9,18	17/07/2001	9,57
06/09/1991	8,19	13/07/1993	9,00	13/12/1998	9,36	02/08/2001	9,63
10/09/1991	8,24	15/07/1993	8,96	21/12/1998	9,41	17/08/2001	9,58
12/09/1991	8,24	19/07/1993	8,98	04/01/1999	9,45	04/09/2001	9,40
16/09/1991	8,14	23/07/1993	8,98	11/01/1999	9,51	20/09/2001	9,42
24/09/1991	8,08	30/07/1993	8,92	18/01/1999	9,72	15/10/2001	9,14
14/10/1991	7,94	02/08/1993	8,87	26/01/1999	9,56	30/10/2001	9,20
31/10/1991	7,95	09/08/1993	8,78	01/02/1999	9,61	20/11/2001	9,26
27/11/1991	8,07	11/08/1993	8,78	08/02/1999	9,67	07/12/2001	9,34
03/12/1991	8,10	20/08/1993	8,62	15/02/1999	9,68	15/01/2002	9,49
10/12/1991	8,12	25/08/1993	8,47	16/03/1999	9,84	15/02/2002	9,64
21/01/1992	8,38	03/09/1993	8,40	24/03/1999	9,87	15/03/2002	9,68
07/05/1992	8,93	28/09/1993	8,00	25/03/1999	9,75	15/04/2002	9,70
20/05/1992	9,00	13/01/1995	7,72	08/04/1999	9,95	15/05/2002	9,87
02/06/1992	9,05	08/02/1995	7,90	27/04/1999	10,01	30/06/2002	10,05
17/06/1992	9,09	13/02/1995	7,93	10/06/1999	10,20	15/07/2002	10,00
23/06/1992	9,06	27/02/1995	8,00	08/07/1999	10,35	22/07/2002	10,00
29/06/1992	9,08	06/03/1995	8,04	02/08/1999	10,21	19/08/2002	9,70
30/06/1992	9,08	13/03/1995	8,08	18/08/1999	10,86	02/09/2002	9,74
03/07/1992	9,09	18/03/1995	8,36	03/09/1999	9,83	09/09/2002	9,70
06/07/1992	9,08	02/05/1995	8,42	21/09/1999	9,76	16/09/2002	9,66
07/07/1992	9,10	15/05/1995	8,53	04/10/1999	8,96	23/09/2002	9,55
10/07/1992	9,08	19/06/1995	8,66	22-oct	9,52	30/09/2002	9,49
13/07/1992	9,03	17/07/1995	8,57	15/11/1999	8,85	07/10/2002	9,42
14/07/1992	9,05	31/07/1995	8,49	21/12/1999	8,76	14/10/2002	9,35
23/07/1992	8,98	31/08/1995	8,28	12/01/2000	9,12	21/10/2002	9,31
27/07/1992	8,94	11/09/1995	8,02	26/06/2000	9,72	28/10/2002	9,28
28/07/1992	8,90	25/09/1995	8,03	03/07/2000	9,66	04/11/2002	9,26
30/07/1992	8,88	23/10/1995	7,68	10/07/2000	9,56	11/11/2002	9,25
04/08/1992	8,84	30/10/1995	7,70	17/07/2000	9,53	18/11/2002	9,23
07/08/1992	8,77	20/11/1995	7,82	24/07/2000	9,50	29/11/2002	9,21
10/08/1992	8,75	05/12/1995	7,90	31/07/2000	9,44	16/12/2002	9,19
25/08/1992	8,45	08/01/1996	8,06	07/08/2000	9,35	23/12/2002	9,21

Date	Niveau statique en m	Date	Niveau statique en m			
30/12/2002	9,19	23/08/2004	9,10			
06/01/2003	9,20	30/08/2004	8,95			
15/01/2003	9,25	06/09/2004	8,90			
20/01/2003	9,24	13/09/2004	8,88			
27/01/2003	9,27	18/10/2004	8,83			
03/02/2003	9,25	25/10/2004	8,80			
17/02/2003	9,26	08/11/2004	8,88			
24/02/2003	9,24	15/11/2004	8,90			
03/03/2003	9,28	22/11/2004	8,93			
10/03/2003	9,30	29/11/2004	8,96			
24/03/2003	9,32	05/12/2004	8,97			
31/03/2003	9,35	13/12/2004	9,02			
07/04/2003	9,38	20/12/2004	9,08			
14/04/2003	9,39	27/12/2004	9,13			
21/04/2003	9,43					
28/04/2003	9,47					
05/05/2003	9,48	Piézomètre profondeur en m	QP121 x : 654073 y : 1363605 prof : 72,80	QP106 x : 653984 y : 1363236 prof : 67,05	QP98 x : 659624 y : 1364987 prof : 69,15	QP 104 x : 658999 y : 1363233 prof : 69,75
12/05/2003	9,59					
19/05/2003	9,82					
26/05/2003	9,60					
02/06/2003	9,57	Date de mesure				
09/06/2003	9,53	28/05/2001	5,86	10,67	6,98	12,54
16/06/2003	9,51	22/06/2001	5,61	10,65	6,85	12,55
23/06/2003	9,48	17/07/2001	4,96	7,18	6,76	12,58
30/06/2003	9,40	18/07/2001	4,96	7,18	6,41	12,52
07/07/2003	9,35	17/08/2001	3,71	8,47	6,24	11,46
17/07/2003	9,30	04/09/2001	3,02	4,99	4,61	12,18
30/07/2003	9,16	20/09/2001	2,82	4,42	5,36	12,09
04/08/2003	9,11	15/10/2001	2,72	6,55	5,16	12,08
11/08/2003	9,08	30/10/2001	2,95	6,58	5,28	12
18/08/2003	9,05	20/11/2001	3,47	7,92	5,5	12,12
16/09/2003	8,49	07/12/2001	3,71	8,62	5,72	12,2
22/09/2003	8,12	15/01/2002	4,35	9,91	6,16	12,38
06/10/2003	8,49	15/02/2002	4,82	10,82	6,48	12,5
20/10/2003	8,64	15/03/2002	5,32	11,33	6,8	12,66
27/10/2003	8,69	15/05/2002	5,98	12,8	7,37	12,84
06/11/2003	8,64	15/07/2002	6,01	13,18	7,61	13,09
10/11/2003	8,67	19/08/2002	5,12	11,23	6,98	12,94
17/11/2003	8,62	23/09/2002	3,25	7,53	5,7	12,41
24/11/2003	8,68	23/10/2002	3,03	7,65	5,84	12,32
11/12/2003	8,67	23/11/2002	3,58	6,06	6,09	12,42
29/12/2003	8,80	20/12/2002	4,01	9,62	6,41	12,5
05/01/2004	8,81	20/01/2003	4,52	10,76	6,78	12,66
12/01/2004	8,89	22/02/2003	4,98	11,25	7,16	12,81
19/01/2004	8,89	29/03/2003	5,56	12,1	7,58	12,99
24/02/2004	8,97	24/04/2003	5,94	12,99	7,87	13,14
02/03/2004	8,98	17/05/2003	6,34	13,76	8,02	13,25
23/03/2004	9,01	20/06/2003	6,28	10,53	7,79	13,26
31/05/2004	9,18	22/07/2003	4,45	10,55	6,93	12,97
08/06/2004	9,20	23/08/2003	2,94	8,28	5,81	12,96
14/06/2004	9,20	21/10/2003	2,67	7,82	5,09	12,04
21/06/2004	9,20	22/11/2003	3,06	8,65	5,14	12
28/06/2004	9,28	22/12/2003	3,75	9,93	5,15	12,1
05/07/2004	9,28	26/02/2004	4,63	11,31	6,18	12,34
20/07/2004	9,32	30/06/2004	5,59	12,13	6,9	12,94
26/07/2004	9,33	30/07/2004	4,5	10,49	6,16	12,69
02/08/2004	9,25	30/10/2004	2,8	5,89	4,61	11,84
09/08/2004	9,23	27/11/2004	3,4	6,48	4,87	11,93
16/08/2004	9,18	27/12/2004	3,4	6,48	4,87	11,93

ANNEXE III

Résultats des analyses physico-chimiques

III.1 : Eaux de surface Ouaga.2 (T2) Ouaga.3(T3)

Nom	T°C	pH	c25°C	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3	SiO2	Bal
T2-2001-10-15	29,70	6,90	206	18,80	12,80	10,60	2,54	128,10	20,02		19,00		-8%
T2-2001-11-20	30,00	6,70	290	22,80	9,90	24,40	2,20	152,50	16,02		16,80		-2%
T3-2001-08-02	32,80	7,90	220	28,00	4,80	12,30	6,80	93,20	18,02		52,80		-3%
T3-2001-08-17	32,30	6,10	350	26,40	11,40	10,50	7,40	79,30	39,04		17,60		7%
T3-2001-10-15	31,90	6,70	225	18,80	4,60	9,31	10,40	73,20	19,02		18,00		2%
T3-2001-10-30	28,00	6,40	220	18,40	5,50	9,50	12,70	79,30	16,02		26,40		1%
T3-2001-11-20	27,50	6,20	250	23,60	4,30	12,00	10,90	97,60	16,02		48,40		-9%
T3-2003-10-10	31,10	7,01	170	14,58	1,71	8,17	9,68	49,00	9,22	4,46	4,97	19,00	9%
T3-2003-11-21	29,10	7,50	196	18,40	3,12	10,40	5,54	47,60	19,02	8,00	2,00		8%
T3-2003-12-22	25,80	6,10	205	19,60	3,36	12,70	7,27	79,00	20,02	4,00	1,00	19,22	1%
T3-2004-01-24	25,70	6,60	232	22,40	7,68	5,54	11,40	109,80	19,02	3,00	0,44	12,55	-3%
T3-2004-02-20	28,20	7,40	255	24,00	4,08	7,70	12,30	110,00	20,02	3,00	0,44	13,71	-5%
T3-2004-06-24	32,20	8,10	265	25,00	3,84	17,70	12,50	97,60	35,00	17,00	6,60	17,19	-7%
T3-2004-07-30	31,20	6,40	280	45,00	3,36	15,65	12,71	97,60	35,00	17,00	7,92	17,19	7%
T3-2004-08-30		6,90	219	45,00	3,36	15,20	11,50	115,90	20,00	32,00	6,60		
T3-2004-09-30	32,00	7,30	175	50,00	3,12	12,30	8,28	91,50	17,02	10,00	4,40		
T3-2004-10-30	28,00	6,70	199	35,00	2,64	13,90	8,67	91,50	18,02	8,00	5,30		

III.2 : Eaux de puits et piézomètre du CIEH

Nom	T°C	pH	c25°C	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3	SiO2	Bal
PBOU-2001-10-15	29,20	6,50	352	45,60	12,90	11,77	17,05	230,00	22,02	0,00	15,00		-4%
PBOU-2001-11-20		5,80	237	34,40	8,60	8,80	10,30	152,50	16,02	0,00	13,60		-1%
PBOU-2002-07-20	30,20	6,40	490	47,60	10,80	42,10	1,60	146,40	41,02	0,00	80,10		3%
PBOU-2003-07-20	31,10	6,60	682	72,00	16,10	24,50	2,60	177,00	47,02	26,00	115,00		-4%
PBOU-2003-08-20	30,50	6,60	620	78,00	16,40	9,70	10,50	317,00	41,05	18,00	19,00		-8%
PBOU-2003-10-10	31,80	6,80	540	74,61	17,12	18,47	28,40	271,00	27,23	12,96	14,11	57,00	8%
PBOU-2003-11-21	28,30	6,50	415	48,40	11,52	10,70	11,70	207,00	33,04	13,00	6,00		-6%
PBOU-2003-12-22	27,30	6,20	337	37,20	9,60	9,65	9,87	170,80	19,02	8,00	10,00	54,00	-5%
PBOU-2004-01-24		6,20	354	39,60	10,80	8,43	11,90	146,40	15,02	5,00	18,00	58,00	5%
PBOU-2004-02-20	28,20	6,20	273	27,20	8,40	4,22	11,20	140,30	11,01	2,00	10,12		-6%
PBOU-2004-06-24	29,00	6,10	380	22,40	4,08	7,49	4,91	115,90	5,72	1,00	5,72	49,00	-4%
PBOU-2004-07-30	29,20	6,30	644	38,00	8,88	18,77	15,89	140,30	5,00	1,00	131,12		-8%
PBOU-2004-08-30		6,50	633	36,20	14,40	20,50	19,60	134,20	34,00	2,00	132,44		-9%
PBOU-2004-09-30	30,20	6,20	362	24,40	8,64	13,90	10,80	140,00	9,01	9,00	15,40		-3%
PBOU-2004-10-30	29,50	6,20	303	27,20	8,40	9,37	10,50	134,00	19,02	7,00	15,40		-7%
PGIB-2001-10-15		6,90	220	25,60	11,00	28,10	5,00	73,20	41,05	1,00	51,00		-7%
PGIB-2001-11-20	31,70	6,40	195	34,94	9,82	30,52	5,81	114,70	47,05	2,00	64,20		-10%
PGIB-2003-10-10	31,70	6,40	195	34,94	9,82	30,52	5,81	138,00	56,30	8,66	83,41	41,00	-15%
PGIB-2003-11-21	30,10	6,10	394	28,00	9,10	32,90	4,10	73,20	70,08	9,00	33,00		
PGIB-2003-12-22	29,60	6,10	416	28,00	9,80	31,40	2,53	77,00	19,02	8,00	58,00	47,40	14%
PGIB-2004-01-24	29,60	6,20	275	47,20	22,80	18,90	6,60	115,90	54,06	15,00	86,24	41,10	1%
PGIB-2004-02-20	31,30	6,60	301	42,00	12,96	22,03	5,30	115,90	38,04	13,00	77,00	47,40	-11%
PGIB-2004-06-24	30,90	6,60	250	18,40	24,56	25,38	5,47	170,80	46,05	2,00	59,84	47,00	-10%
PGIB-2004-07-30	30,50	6,20	310	19,20	20,48	20,86	5,14	48,80	46,05	2,00	65,56		7%
PGIB-2004-08-30		6,40	255	28,80	20,88	29,80	6,60	85,40	88,00	15,00	92,64		-16%
PGIB-2004-09-30	31,40	6,10	275	10,40	21,60	25,80	4,81	79,30	44,05	0,00	95,90		-7%
PGIB-2004-10-30	31,10	6,20	305	14,20	11,04	25,20	5,10	97,60	75,08	8,00	79,60		-11%
PBAR-2001-10-15	30,10	6,60	250	18,80	6,35	10,00	11,40	95,00	21,02	8,00	22,00		-10%
PBAR-2001-11-20		6,00	245	25,60	5,30	10,70	10,90	96,70	19,02	5,00	35,20		-6%
PBAR-2002-07-20	28,70	6,50	270	27,60	2,20	28,00	0,50	122,00	21,02	0,00	13,60		0%
PBAR-2003-10-10	29,90	6,90	178	16,15	2,44	9,02	9,81	66,00	9,66	5,80	1,79	21,00	5%
PBAR-2003-11-21				17,60	1,00	9,00	6,30	85,40	30,03	10,00	0,00		
PBAR-2003-12-22	27,30	7,30	195	16,80	3,60	9,50	5,93	91,50	19,02	4,00	0,00	17,00	-11%
PBAR-2004-01-24	25,90	6,80	250	25,60	5,76	13,34	9,10	103,70	19,02	7,00	1,00	19,00	3%
PBAR-2004-02-20	27,70	5,90	220	17,60	3,84	10,00	11,20	95,00	18,02	6,00	0,00	19,00	-7%
PBAR-2004-06-24	29,30	6,50	268	25,80	3,88	17,73	1,83	105,90	22,02	22,00	3,52	22,00	-8%
PBAR-2004-07-30	29,90	6,30	260	17,50	6,25	15,65	11,50	97,60	22,00	22,00	12,32	22,00	-9%
PBAR-2004-08-30		6,70	255	17,20	3,60	16,90	10,80	100,10	24,00	12,00	6,16		-10%
PBAR-2004-09-30	30,20	6,70	285	26,60	5,76	12,50	9,80	97,60	19,02	10,00	0,40		5%
PBAR-2004-10-30	28,20	6,50	204	27,80	3,12	13,30	8,76	97,60	18,02	9,00	0,90		3%

Nom	T°C	pH	c25°C	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3	SiO2	Bal
PZOB-2003-10-03	30,20	6,20	785	65,80	13,20	52,60	23,80	192,00	129,14	0,00	33,00		-5%
PZOB-2003-10-10	29,80	6,10	975	62,08	17,98	61,07	26,33	162,00	165,88	34,18	49,24	39,00	-6%
PZOB-2003-11-21	30,10	6,00	695	60,24	14,44	45,60	19,70	177,00	144,16	36,00	12,00		-8%
PZOB-2003-12-22	29,80	5,90	620	46,80	15,12	42,00	17,00	189,10	82,01	27,00	43,00	32,00	1%
PZOB-2004-01-24	29,80	6,10	590	44,80	14,17	24,56	19,10	158,60	81,09	24,00	22,00	28,00	-7%
PZOB-2004-02-20	29,80	6,10	440	34,80	11,04	26,78	12,90	140,30	75,08	2,50	30,80	28,20	-9%
PZOB-2004-06-24	28,80	5,90	460	36,00	10,46	28,16	10,31	140,30	68,00	5,00	28,60	30,00	-7%
PZOB-2004-07-30	30,90	6,00	490	29,60	13,48	35,46	12,95	201,30	68,00	3,00	12,76		-8%
PZOB-2004-08-30		6,30	605	25,80	16,08	42,40	20,20	195,00	72,01	1,00	15,40		-5%
PZOB-2004-09-30	30,90	5,90	752	75,00	30,96	41,10	19,90	232,00	111,12	4,00	12,00		9%
PZOB-2004-10-30		6,20	620	68,00	14,16	36,40	17,90	195,20	93,10	30,00	7,50		0%
PAGH-2001-10-15			180	10,00	7,40	5,70	5,40	55,00	16,02	1,00	18,00		-5%
PAGH-2001-11-20		6,30	202	12,40	8,90	13,00	4,50	97,60	11,01	0,00	14,00		-2%
PAGH-2002-07-20	31,30	5,80	140	6,80	4,30	12,00	4,00	42,70	12,00	0,00	9,68		5%
PAGH-2003-10-10	29,80	6,10	99	7,67	1,88	4,69	4,26	34,00	2,89	0,73	6,85	55,00	6%
PAGH-2003-11-21	31,30	5,70	96	10,00	7,40	4,00	2,00	42,70	16,02	0,00	3,00	42,00	
PAGH-2003-12-22	26,20	88,00	55	12,40	8,90	4,00	2,00	42,70	9,01	1,00	8,00	41,00	
PAGH-2004-01-24	26,20	5,90	115	12,60	2,31	4,20	2,88	42,70	12,00	3,00	8,36		-7%
PAGH-2004-02-20	28,50	5,60	145	14,00	4,64	5,60	2,50	42,70	5,01	16,00	7,48		8%
PAGH-2004-06-24	29,60	5,80	150	12,40	4,16	5,97	2,70	48,80	6,01	21,00	3,52		-6%
PAGH-2004-07-30	31,70	5,90	130	14,60	6,40	5,87	2,79	42,70	6,01	21,00	23,56		-4%
PAGH-2004-08-30		6,00	135	9,30	6,50	5,40	3,18	48,80	7,01	1,00	7,04		8%
PAGH-2004-09-30	32,00	5,40	140	8,50	7,50	5,25	3,85	54,90	7,01	1,00	7,04		6%
PAGH-2004-10-30	-	6,60	110	10,20	1,44	5,34	3,18	42,70	7,01	0,00	7,48		-1%
PDAP-2003-10-10	31,50	6,60	915	57,70	15,19	73,01	47,29	239,00	127,60	25,14	14,44	29,00	0%
PDAP-2003-11-21	31,00	6,40	567	25,60	15,12	73,20	46,43	280,60	109,12	19,00	1,00		-8%
PDAP-2003-12-22	30,30	6,50	756	48,00	13,68	69,00	2,68	314,60	76,08	10,00	5,00	27,00	-7%
PDAP-2004-01-24	29,70	6,70	740	48,70	8,80	77,10	27,60	317,20	34,04	9,00	3,00	22,00	6%
PDAP-2004-02-20	30,10	6,50	738	32,80	18,72	61,15	21,80	219,60	69,08	1,00	2,20	22,00	7%
PDAP-2004-06-24	30,90	6,80	776	48,64	13,08	35,21	31,78	250,60	63,00	1,00	77,44		-8%
PDAP-2004-07-30	30,60	6,60	725	47,56	13,70	33,38	22,24	280,60	63,00	0,00	44,40		-5%
PDAP-2004-08-30		6,40	1253	70,40	19,92	88,00	64,70	219,60	162,00	0,00	157,52		0%
PDAP-2004-09-30		6,50	868	58,00	13,64	48,40	35,10	378,20	83,09	0,00	2,20		-5%
PDAP-2004-10-30	31,50	6,70	750	46,40	12,96	45,00	30,30	314,60	60,01	2,00	0,00		-6%
PZID-2003-10-10	31,30	5,70	295	18,62	7,47	17,29	2,78	26,00	35,65	1,95	85,31	38,00	-10%
PZID-2003-11-21	31,00	5,70	287	18,40	5,52	16,70	3,50	24,40	35,04	2,00	45,00		1%
PZID-2003-12-22	30,80	6,20	302	18,00	9,12	15,47	3,69	48,80	31,07	0,00	78,00	34,40	-10%
PZID-2004-01-24	29,70	5,90	300	24,00	10,80	21,00	3,00	48,80	34,04	0,00	55,00	34,00	8%
PZID-2004-02-20	30,60	6,50	283	20,40	10,50	10,10	2,75	61,00	32,04	1,00	45,32	26,00	-5%

Nom	T°C	pH	c25°C	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3	SiO2	Bal
PZID-2004-06-24	31,90	5,60	290	18,40	10,16	16,69	3,37	30,50	60,00	1,00	52,80	26,00	-9%
PZID-2004-07-30	31,20	6,20	300	28,50	8,96	14,60	2,21	24,40	60,00	1,00	70,84		-7%
PZID-2004-08-30	31,20	6,20	338	22,20	8,40	15,90	2,89	36,60	43,00	1,00	74,80		-8%
PZID-2004-09-30	31,50	5,90	350	24,00	12,30	17,50	2,41	30,50	42,05	19,00	89,30		-7%
PZID-2004-10-30	31,00	5,90	405	28,50	13,10	15,20	3,70	30,50	60,02	10,00	84,00		-7%
PSCT-2002-07-20	31,90	6,20	297	12,40	8,20	35,10	0,40	48,80	40,01	0,00	70,70		-4%
PSCT-2002-08-20	32,60	5,60	268	16,40	10,30	10,50	1,50	42,70	39,00	0,00	14,50		3%
PSCT-2002-10-20	31,70	6,30	183	11,20	5,80	11,45	2,30	36,60	30,00	4,00	14,08		-5%
PSCT-2003-10-10	31,60	5,60	188	10,14	4,35	11,13	4,18	17,00	17,14	2,56	48,78	36,00	-5%
PSCT-2003-11-21	31,50	5,70	172	11,20	3,36	10,42	4,21	18,30	31,03	2,00	20,00		-5%
PSCT-2003-12-22	31,40	5,70	228	20,60	7,92	12,76	4,17	54,90	29,03	0,00	42,00	38,00	-1%
PSCT-2004-01-24	30,60	6,00	619	21,20	12,48	18,15	6,80	67,10	37,04	5,00	44,00	32,00	2%
PSCT-2004-02-20	30,60	6,40	643	36,00	15,84	11,00	6,00	66,60	66,07	1,00	11,00		8%
PSCT-2004-06-24	32,00	6,30	619	34,00	12,88	33,38	8,76	92,50	79,00	2,00	77,00		-6%
PSCT-2004-07-30	32,00	5,60	405	36,40	12,16	13,47	3,37	73,20	79,00	2,00	47,96		-10%
PSCT-2004-08-30		6,00	204	37,00	6,00	8,99	3,56	36,60	29,00	2,00	65,12		6%
PSCT-2004-09-30	32,20	5,40	163	38,00	2,64	7,95	3,18	48,80	20,02	8,00	44,40		6%
PSCT-2004-10-30	32,00	5,70	185	34,00	2,88	8,33	3,32	36,40	28,03	1,00	38,70		8%
PIEZ-2003-10-10	30,80	6,50	345	26,00	12,50	17,55	6,40	165,00	31,03	0,00	18,00		-9%
PIEZ-2003-11-21	30,20	6,70	395	27,60	20,40	30,50	5,10	213,50	49,05	0,00	15,90		-6%
PIEZ-2003-12-22	32,30	7,10	305	18,80	7,20	20,21	3,46	73,20	37,04	0,00	21,12	96,00	-2%
PIEZ-2004-01-24	32,00	6,50	312	21,60	10,32	30,75	3,26	152,30	4,00	6,00	14,96	99,00	6%
PIEZ-2004-02-20	31,10	6,50	310	19,20	7,20	16,95	5,70	73,20	34,04	0,00	34,32	99,00	-5%
PIEZ-2004-06-24	32,90	6,70	320	26,00	6,24	16,69	6,75	115,90	31,03	1,00	19,36	100,00	-7%
PIEZ-2004-07-30	32,30	7,10	344	25,50	8,50	16,69	5,56	140,30	31,03	1,00	9,24		-8%
PIEZ-2004-08-30		7,20	333	26,80	3,10	17,20	4,00	146,40	34,00	3,00	30,80		
PIEZ-2004-09-30		7,00	363	20,40	2,20	17,20	4,20	122,00	34,04	0,00	4,00		
PIEZ-2004-10-30		6,80	313	30,40	11,00	17,20	4,20	122,00	36,01	8,00	21,60		

III.3 : Eaux des forages suivis

Nom	T°C	pH	c25°C	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3	SiO2	Bal
F024-2003-10-10	34,30	6,2	320	23,20	12,96	12,50	4,58	170,80	9,01	0,00	14,08	—	-6%
F024-2003-11-21	32,70	6,3	307	22,80	13,20	11,46	4,44	164,70	10,02	1,00	9,24	101,80	-5%
F024-2003-12-22	32,50	6,3	309	21,20	14,60	10,40	4,98	164,70	9,01	1,00	14,00	99,96	-6%
F024-2004-01-24	32,50	6,2	309	24,40	12,00	14,01	4,79	164,70	7,01	3,00	17,60	99,86	-4%
F024-2004-02-20	33,30	6,3	303	20,40	12,72	10,85	4,88	164,70	6,01	2,00	13,64	100,93	-8%
F024-2004-06-30	32,70	6,3	307	21,40	12,00	13,56	4,14	160,20	6,01	0,00	24,64	100,93	-7%
F024-2004-07-30	32,30	6,6	308	23,50	11,60	13,56	4,23	170,80	6,01	0,00	13,20	—	-6%
F024-2004-08-30	30,00	6,4	257	22,20	11,80	14,00	4,60	164,70	6,00	2,00	14,08	—	-5%
F024-2004-09-30	33,50	6,3	289	21,20	13,20	14,00	4,98	170,80	7,01	3,00	14,08	—	-6%
F024-2004-10-30	33,20	6,4	294	22,80	24,40	12,00	4,10	164,70	9,01	2,00	14,96	—	-8%
F029-2003-10-10	32,60	6,1	314	26,61	12,81	13,84	4,32	163,00	0,44	3,45	0,29	104,00	6%
F029-2003-11-21	31,80	6,9	295	38,40	6,72	10,22	3,40	213,50	0,42	1,00	3,08	—	-5%
F029-2003-12-22	32,10	6,2	310	27,60	14,20	12,20	3,00	213,50	8,01	1,00	0,44	97,41	-6%
F029-2004-01-24	30,00	6,7	302	29,20	12,24	20,05	4,68	201,30	5,01	4,00	1,76	97,41	1%
F029-2004-02-20	32,80	6,7	305	28,40	13,92	15,30	12,80	207,40	3,00	2,00	0,44	103,84	-2%
F029-2004-06-30	31,70	6,3	325	40,20	7,44	8,70	4,60	213,50	5,40	1,00	3,08	99,86	-9%
F029-2004-07-30	31,50	6,6	295	38,60	16,64	9,20	3,37	210,10	5,40	1,00	4,40	100,93	1%
F029-2004-08-30	31,80	6,5	287	33,00	12,96	8,80	3,47	219,60	5,01	1,00	4,40	100,93	-8%
F029-2004-09-30	32,80	6,4	298	24,40	16,32	9,08	3,66	213,50	4,00	1,00	0,44	103,84	-7%
F029-2004-10-30	32,70	6,5	284	22,40	13,20	8,99	3,51	189,10	4,00	0,00	3,52	—	-9%
FBAS-2003-10-10	31,60	6,3	156	9,70	2,48	13,97	2,72	71,00	5,01	1,14	8,53	99,00	4%
FBAS-2003-11-21	31,40	6,5	159	13,20	1,44	15,10	2,51	85,40	7,01	0,00	2,00	—	-4%
FBAS-2003-12-22	29,70	6,9	155	10,00	4,56	15,33	2,17	91,50	5,01	5,00	6,00	97,92	-7%
FBAS-2004-01-24	28,40	6,8	158	12,80	4,32	18,58	1,93	91,50	6,07	2,00	3,00	97,92	2%
FBAS-2004-02-20	32,10	6,5	155	13,70	4,32	8,92	3,90	79,30	5,01	2,00	7,04	—	-3%
FBAS-2004-06-24	32,20	6,5	163	12,20	4,80	11,47	2,12	85,40	6,00	1,00	4,84	—	-3%
FBAS-2004-07-30	29,80	6,6	169	14,80	2,16	13,90	2,18	91,50	6,00	1,00	5,72	—	-6%
FBAS-2004-08-30	30,00	6,2	150	15,20	4,56	8,80	2,31	91,50	5,00	1,00	7,04	—	-6%
FBAS-2004-09-30	32,70	6,5	155	14,80	2,68	8,52	2,21	85,40	5,01	1,00	4,00	—	-8%
FBAS-2004-10-30	31,10	6,6	153	15,20	2,48	8,50	2,20	85,40	5,01	1,00	4,71	—	-7%
FDAP-200-09-20	30,00	7,6	224	18,00	20,40	12,50	2,50	122,00	17,02	1,00	20,70	—	-3%
FDAP-2001-10-15	29,70	6,9	206	18,80	12,80	10,60	2,54	128,00	16,02	1,00	19,00	—	-6%
FDAP-2001-11-20	30,00	6,7	223	22,80	9,90	24,40	2,20	152,50	16,02	3,00	16,80	—	-3%
FDAP-2002-07-20	30,30	6,3	255	20,60	12,20	20,00	0,40	140,30	20,00	1,00	16,30	—	6%
FDAP-2003-10-10	30,80	6,6	265	21,55	7,87	15,44	2,92	109,00	12,43	1,45	13,27	99,00	2%
FDAP-2004-06-24	29,80	6,8	293	18,40	4,56	25,38	3,47	130,30	16,00	2,00	15,84	—	-7%
FDAP-2004-07-30	28,60	6,3	324	21,40	7,96	22,54	2,81	134,20	16,00	1,00	15,40	—	-2%
FDAP-2004-08-30	30,00	6,3	242	24,80	11,50	9,18	2,50	140,30	15,00	0,00	11,00	—	-3%
FKOS-2003-10-15	32,40	7,1	276	22,40	17,04	13,50	4,50	152,50	16,02	3,00	52,00	—	-9%

Nom	T°C	pH	c25°C	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3	SiO2	Bal
FKOS-2003-10-10	32,90	6,4	335	27,63	12,71	12,57	5,23	129,00	5,39	2,89	45,77	110,00	1%
FKOS-2003-11-21	32,40	6,8	348	25,60	14,84	12,45	4,86	140,30	12,01	2,00	43,00	—	
FKOS-2003-12-22	32,40	6,8	348	25,60	14,64	12,45	4,86	146,40	12,01	2,00	43,00	—	-4%
FKOS-2004-01-24	32,90	6,7	344	28,80	12,24	11,98	4,64	115,90	10,01	2,00	48,40	—	1%
FKOS-2004-02-20	33,10	6,8	371	29,80	12,96	5,21	6,20	146,40	9,01	2,00	48,84	—	-8%
FKOS-2004-06-24	33,50	6,9	350	30,40	12,40	11,47	14,83	152,50	11,01	3,00	43,12	—	-2%
FKOS-2004-07-30	30,30	6,6	331	31,20	17,00	12,52	4,33	164,70	11,01	3,00	32,56	—	0%
FKOS-2004-08-30	30,00	6,4	350	32,00	16,32	9,27	4,81	146,40	11,01	8,00	50,16	—	-3%
FKOS-2004-09-30	34,40	6,3	380	30,40	15,36	10,27	4,62	164,70	9,01	7,00	45,76	—	-7%
FKOS-2004-10-30	33,10	6,5	362	21,80	14,64	8,99	4,33	140,30	10,01	2,00	35,64	—	-7%
FPRC-2003-10-10	30,00	6,4	393	40,39	14,06	10,85	3,19	122,00	56,00	8,33	0,88	100,00	0%
FPRC-2003-11-21	30,00	6,2	320	38,80	11,50	10,70	2,10	140,30	33,04	8,00	7,02	—	-2%
FPRC-2003-12-22	28,10	6,3	345	24,80	16,56	10,72	2,28	152,50	39,04	9,00	1,76	—	-10%
FPRC-2004-01-24	28,60	6,2	339	34,40	14,40	11,88	2,18	134,20	38,04	10,00	2,20	—	1%
FPRC-2004-02-20	30,40	6,1	344	29,60	14,16	5,10	6,00	134,20	36,04	14,00	2,64	—	-8%
FPRC-2004-06-24	31,20	6,3	348	33,20	14,44	8,16	21,18	140,30	44,05	12,00	2,64	—	-1%
FPRC-2004-07-30	30,20	6,5	444	34,00	16,10	8,72	12,41	152,50	44,05	12,00	0,88	—	-4%
FPRC-2004-08-30	29,80	6,3	422	24,60	12,72	8,52	2,70	158,60	84,04	16,00	0,75	—	
FPRC-2004-09-30	30,70	6,1	348	24,80	10,56	7,95	2,41	152,50	68,00	12,00	3,96	—	
FPRC-2004-10-30	29,20	6,1	358	16,00	13,68	8,14	2,41	128,10	45,05	9,00	2,20	—	
FT26-2003-10-10	32,80	6,5	358	29,79	15,50	11,90	4,88	128,00	4,16	1,82	40,66	101,00	9%
FT26-2003-11-21	30,00	6,1	274	32,40	15,10	12,70	4,10	183,00	9,01	2,00	37,90	—	-5%
FT26-2003-12-22	32,60	6,5	354	25,20	19,44	11,54	3,75	189,10	11,01	2,00	39,00	100,88	-8%
FT26-2004-01-24	32,70	6,5	351	30,00	17,76	6,16	4,27	170,80	10,01	2,00	37,84	102,51	-6%
FT26-2004-02-20	33,10	6,6	367	26,00	17,04	4,88	5,60	176,90	9,01	1,00	29,92	102,66	-9%
FT26-2004-06-24	32,90	6,5	363	26,40	18,00	8,82	3,27	128,00	8,01	1,00	41,80	102,51	4%
FT26-2004-07-30	28,90	6,8	355	30,60	15,50	9,01	3,76	130,00	8,01	1,00	36,08	102,51	5%
FT26-2004-08-30	30,60	6,3	350	24,40	18,72	8,89	4,04	115,90	8,01	3,00	40,66	—	
FT26-2004-09-30	—	6,5	324	24,50	21,40	9,18	4,33	195,20	10,01	3,70	39,60	—	
FT26-2004-10-30	—	6,6	340	20,60	15,36	—	—	176,90	10,01	0,00	27,30	—	
FZON-2003-10-10	30,30	6	180	23,20	7,10	6,56	2,40	110,50	15,04	3,00	0,60	—	-4%
FZON-2003-11-21	30,60	6,1	189	21,60	5,28	4,25	2,23	91,50	15,02	0,00	0,44	—	-5%
FZON-2003-12-22	30,00	6,1	182	19,60	6,48	6,55	2,41	111,70	9,01	—	0,00	—	-5%
FZON-2004-01-24	30,00	6,4	180	19,20	7,90	6,87	2,50	109,80	5,01	4,00	0,44	—	-1%
FZON-2004-02-20	31,80	6	173	15,60	7,20	3,98	3,80	103,70	5,01	2,00	0,00	—	-7%
FZON-2004-06-24	31,00	6,2	195	17,60	7,50	6,64	3,76	103,70	6,01	1,00	1,76	—	1%

NOM	X	Y	T°C	PH	C25°C	CA2+	MG2+	NA+	K+	HCO3-	Cl-	SO42-	NO3-
F024	654194	1363336	33,00	6,00	307,00	22,00	13,00	12,00	5,00	165,00	7,00	1,00	17,00
F029	654153	1365487	31,99	6,48	301,25	30,35	13,19	10,50	4,15	202,19	4,03	1,68	2,29
FZON	653127	1365083	30,70	6,18	182,50	18,00	7,27	6,01	3,12	107,23	6,26	2,00	0,55
FBAS	655699	1370790	30,70	6,53	156,33	12,07	3,71	13,82	2,85	80,60	5,36	1,71	6,19
FDAP	660030	1369605	29,73	6,57	294,00	22,12	6,80	17,79	3,07	124,50	14,81	1,48	14,84
FPARC	663187	1370452	29,69	6,29	344,38	31,45	15,48	9,18	5,21	141,83	40,29	10,29	3,80
FKOS	666322	1372992	32,52	6,70	346,50	28,91	13,66	11,03	6,68	142,48	9,74	2,48	43,62
FT26	666494	1372794	32,17	6,57	358,00	28,00	17,21	8,72	4,26	153,80	8,37	1,47	37,55
F092	665289	1367833	32,90	7,50	182,00	24,80	11,40	7,90	2,80	150,00	10,50	0,00	3,96
F093	665062	1368232	33,00	7,00	215,00	21,20	12,60	11,60	3,20	148,80	8,50	0,00	15,20
F099	654112	1364391	35,60	7,50	116,00	19,60	8,20	7,80	1,30	112,20	8,00	0,00	0,00
F0100	656449	1363966	35,70	7,20	163,00	15,20	7,30	5,00	2,50	92,70	6,00	0,00	0,00
F0101	656968	1362940	32,00	7,00	102,00	22,80	9,70	5,00	2,50	125,70	11,90	1,00	0,88
F0102	658406	1363963	35,10	7,50	176,00	15,20	4,80	5,70	2,10	68,30	7,80	7,00	5,72
F0103bis	663676	1366728	33,00	6,98	170,00	23,20	14,00	8,70	2,50	146,40	16,60	0,00	0,00
F0107	654266	1364471	30,70	7,50	79,00	10,00	3,10	8,50	1,30	61,00	5,75	0,00	1,76
F0109	663666	1369189	32,70	10,20	167,00	20,00	11,80	9,50	1,10	131,80	8,50	12,20	3,52
F0111	660569	1369687	32,40	9,30	431,00	16,40	8,00	7,30	1,30	102,50	6,20	0,00	0,00
F0112	659854	1370717	31,80	7,00	155,00	12,40	7,00	10,40	1,70	86,60	7,50	0,00	7,90
F0118	664334	1368374	31,40	7,00	182,00	14,40	7,70	7,00	1,30	97,60	4,90	0,00	4,40
F0120	656138	1364080	32,60	7,00	221,00	21,60	10,60	3,60	1,00	122,00	7,50	0,00	9,20
F0122	654001	1363350	31,35	7,00	265,00	24,00	14,00	7,90	2,10	154,90	6,50	0,00	3,08
F0123	660236	1370706	30,50	7,00	550,00	27,60	11,60	7,50	0,70	151,30	9,80	0,00	20,20
F0124	661085	1371549	32,00	7,80	160,00	18,40	7,70	8,70	2,10	104,90	9,70	0,00	3,52
FGOA	664231	1372793	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9.TH35	656708	1368920	31,00	9,20	350,00	13,70	7,70	8,40	3,10	103,70	4,60	1,00	3,10
15.QP13	664991	1361029	31,00	8,20	600,00	21,60	9,20	8,80	4,20	185,40	6,40	0,00	0,00
15.QP16	664354	1361961	31,00	7,60	261,00	27,20	14,80	9,20	3,80	165,90	6,50	0,00	2,20
15.QP18	659203	1361848	31,00	7,60	219,00	21,20	8,70	9,20	3,20	131,80	7,60	0,00	1,30
16.QP25	656138	1364080	31,00	7,80	298,00	16,00	8,00	8,50	2,10	104,90	5,40	0,00	0,00
17.44QP34	654583	1363142	30,20	7,70	187,00	21,20	12,20	8,10	1,00	136,60	8,30	0,00	0,00
17.474QP23	654893	1364329	32,00	6,70	566,00	22,80	12,10	17,20	5,00	157,40	8,10	5,00	7,00
19.QP74	654669	1367886	30,00	7,40	610,00	20,80	9,20	11,30	2,50	129,30	4,00	1,00	8,60
22.QP71	655682	1370181	33,00	7,50	291,00	22,00	8,90	7,00	2,80	119,60	4,40	1,00	0,70
27.FT32	665658	1370934	32,00	7,90	450,00	20,40	8,90	8,70	3,30	123,20	4,30	8,00	0,00
27.QP37	666246	1370960	32,00	7,20	620,00	18,10	7,30	13,50	4,20	90,30	18,30	3,00	0,00
27.TH1	667062	1371095	32,00	8,20	400,00	17,20	8,70	8,70	2,20	101,30	3,50	9,00	0,00
28.FT31	665550	1369608	32,00	7,70	167,00	19,20	6,50	7,10	1,50	114,70	5,10	0,00	3,50
28.QP1	666431	1368912	31,00	7,90	540,00	23,60	9,70	12,00	3,90	141,50	4,20	9,00	0,00
28.QP40	668902	1370641	30,00	8,80	690,00	25,60	9,20	10,90	3,30	146,40	6,00	1,00	0,40
29.QP55	664294	1367230	32,00	7,50	275,00	20,50	9,70	4,50	2,90	112,20	6,10	1,00	0,40
30.QP59	662717	1364520	31,00	7,70	228,00	21,80	8,20	10,90	2,00	122,00	4,60	2,00	4,40
30.QP66	663350	1365692	31,00	7,00	530,00	19,80	10,00	5,00	2,00	114,70	5,00	2,00	0,00
7.FT14	658863	1365628	30,20	7,60	207,00	25,20	9,70	11,40	2,80	142,70	3,00	15,00	0,00
17.FT15	658593	1365227	30,00	8,70	650,00	36,00	9,40	11,20	2,00	176,90	7,00	6,00	0,40
28.FT18	666607	1368990	31,00	8,20	640,00	22,40	14,30	9,20	3,30	173,20	6,50	0,00	13,60
28.FT31	667354	1370530	32,00	7,70	167,00	19,20	6,50	7,10	1,50	114,70	5,10	0,00	3,50
27.FT32	666021	1371076	32,00	7,90	450,00	20,40	8,90	8,70	3,30	123,20	4,30	8,00	0,00
28.FT33	665997	1370031	32,00	8,30	440,00	23,20	7,50	7,40	1,50	148,80	5,00	0,00	0,40
21.FT58	652855	1370604	30,00	8,60	740,00	34,00	17,70	10,50	4,60	195,20	7,00	1,00	0,70
14.SM13	663083	1367218	30,10	7,70	257,00	29,60	11,60	5,80	1,20	161,00	7,00	10,00	0,00
30.CQ14	663696	1365716	29,30	7,70	191,00	23,60	9,70	8,70	3,90	136,60	3,80	9,00	0,00
24.CQ21	662581	1370503	30,30	7,70	163,00	22,00	8,00	9,40	3,30	119,60	3,80	9,00	0,00
CQ8	655519	1369573	32,00	7,30	430,00	22,00	12,20	10,00	2,80	123,20	3,60	10,00	0,00
QP73	664463	1368857	30,00	7,60	190,00	28,00	13,00	10,40	1,20	151,30	15,60	3,00	0,00
QP77/Koss	664928	1372343	30,00	7,70	297,00	28,00	14,50	8,10	1,00	164,70	6,50	4,00	0,40
QP79/Koss	662521	1370573	29,00	7,70	65,00	14,00	6,00	4,50	1,00	78,10	6,60	0,00	0,00

Les concentrations des ions sont exprimées en mg/l

ANNEXE IV

Résultats des analyses isotopiques

ANNEXE V

Elaboration de la carte de vulnérabilité

METHODOLOGIE POUR L'ELABORATION DE LA CARTE DE VULNERABILITE SOUS ENVIRONNEMENT ARCVIEW 3.2a

IDENTIFICATION DES FACTEURS

Les facteurs identifiés par ordre d'importance sont :

- Densité de fracturation du socle
- Epaisseur de la zone non saturée

TRANSFORMATION DES DIFFERENTS FACTEURS EN COUCHES IMPLIQUEES DANS LES SIG

Chaque facteur a été transformé en couche :

- Couverture de la densité de fracturation ou MNT
- Couche de l'épaisseur de la zone non saturée ou MNT

Remarque :

Dans notre contexte géologique, l'épaisseur de la zone non saturée correspond au niveau statique (altérites non saturées).

CLASSIFICATION

Les différents facteurs ont été classifiés en 4 classes :

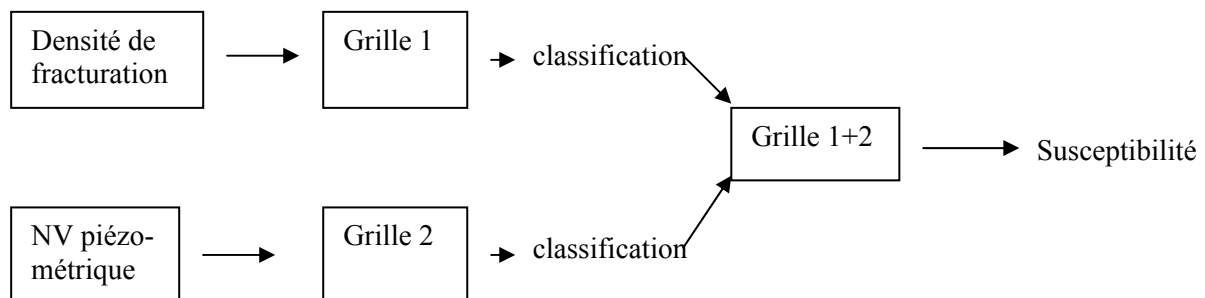
- très faible
- faible
- moyenne
- forte

A chaque classe nous avons affecté un poids.

RESULTATS

Pour réaliser les différentes requêtes le modèle suivant a été adopté.

* Susceptibilité à la pollution



VULNERABILITE INTRINSEQUE = SUSCEPTIBILITE A LA POLLUTION

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Table des figures

<u>FIGURE 1.1</u> : Situation géographique du Burkina Faso	16
<u>FIGURE 1.2</u> : Principaux bassins versant nationaux	18
<u>FIGURE 1.3</u> : Variation du débit moyen mensuel du Massili à Gonsé	19
<u>FIGURE 1.4</u> : Bassin versant du Massili	20
<u>FIGURE 1.5</u> : Bassin versant de la ville de Ouagadougou	22
<u>FIGURE 1.6</u> : Migration des isohyètes au cours des 50 dernières années au Burkina Faso	23
<u>FIGURE 1.7</u> : Pluies moyennes mensuelles à Bobo, Gaoua, Fada, Ouagadougou, Pô, et Dori ; moyennes mensuelles sur 30 ans	24
<u>FIGURE 1.8</u> : Circulation des masses d'air au dessus du Burkina (d'après Carbonnel, 1985 modifié)	25
<u>FIGURE 1.9</u> : Variation des pluies moyennes annuelles à Ouagadougou de 1902 à 2004	27
<u>FIGURE 1.10</u> : Variations moyennes mensuelles des températures à Ouagadougou aéroport	28
<u>FIGURE 1.11</u> : Variations moyennes mensuelles de l'humidité relative à Ouagadougou aéroport	28
<u>FIGURE 1.12</u> : Variations moyennes mensuelles de l'évapotranspiration Penmam à Ouagadougou Aéroport	29
<u>FIGURE 2.1</u> : Carte géologique du craton Ouest Africain (Bessoles 1977)	32
<u>FIGURE 2.2</u> : Carte géologique du Burkina extraite de Casting et al. 2003	33
<u>FIGURE 2.3</u> : Aspect des granitoïdes de la carrière de Kanazoé	39
<u>FIGURE 2.4</u> : Aspect de l'ensemble granitique intrusif dans l'ensemble de tonalite, granodiorite	40
<u>FIGURE 2.5</u> : Carte géologique simplifiée de la ville de Ouagadougou ; modifiée	43
<u>FIGURE 2.6</u> : Coupe schématique Nord-Sud de la géologie de Ouagadougou	45
<u>FIGURE 2.7</u> : Relation entre nombre de linéaments et leurs longueurs cumulées	48
<u>FIGURE 2.8</u> : Image LANDSAT 1988 extraite de l'image 195/52 ; composition colorée RGB	49
<u>FIGURE 2.9</u> : Carte de linéaments à partir de l'image LANDSAT ci-dessus	50
<u>FIGURE 2.10</u> : Carte de linéaments de Ouagadougou à partir des photographies aériennes	51

<u>FIGURE 2.11</u> : Cartes des rosaces directionnelles de linéaments relevés sur image (a) et sur photographies aériennes (b)	52
<u>FIGURE 3.1</u> : Schéma de gisement des eaux souterraines de socle	58
<u>FIGURE 3.2</u> : Coupes types de forages avec corrélations litho stratigraphiques	60
<u>FIGURE 3.3</u> : Histogramme de distribution des profondeurs et débits de forages du socle de Ouagadougou (PT : Profondeur Totale, QAF : Q débit de foration)	63
<u>FIGURE 3.4</u> : Carte de fracturation avec 11 forages à débits > 35 m ³ /h	65
<u>FIGURE 3.5</u> : Relation profondeur et débit des forages. Socle de Ouagadougou	66
<u>FIGURE 3.6</u> : Histogramme de fréquence des profondeurs des altérations / et altérations saturées ; EA : épaisseur d'altérations ; ESA : épaisseur d'altération saturée	68
<u>FIGURE 3.7</u> : Relation entre épaisseur d'altérations saturées et épaisseur d'altération totale	69
<u>FIGURE 3.8</u> : Carte des épaisseurs d'altération saturée à Ouagadougou	70
<u>FIGURE 3.9</u> : Bloc diagramme montrant la morphologie du toit du socle de l'agglomération de Ouagadougou	71
<u>FIGURE 3.10</u> : Carte de transmissivité en m ² /s à Ouagadougou	74
<u>FIGURE 3.11</u> : Piézomètre et pluviométrie à Ouagadougou (CIEH). 798 mm : pluies annuelles. Moyenne pluviométrique (1978-2004) : 709 mm	77
<u>FIGURE 3.12</u> : Fluctuations de niveaux piézométriques et des précipitations de 4 piézomètres de Ouagadougou (2001-2004)	78
<u>FIGURE 3.13</u> : Variation du niveau piézométrique de QP 106 et QP121	80
<u>FIGURE 4.1</u> : Carte de localisation des zones cibles et des points de prélèvement	87
<u>FIGURE 4.2</u> : Histogramme de fréquence des paramètres physico-chimiques des eaux de l'agglomération de Ouagadougou	90
<u>FIGURE 4.3</u> : Variation de logPCO ₂ , du pH et des teneurs en HCO ₃ ⁻ dans les eaux de l'agglomération de Ouagadougou	95
<u>FIGURE 4.4</u> : Corrélation entre conductivité et alcalinité des eaux de l'agglomération de Ouagadougou (HCO ₃ en méq/l)	96
<u>FIGURE 4.5</u> : Faciès de l'ensemble des eaux de la ville de Ouagadougou	98
<u>FIGURE 4.6</u> : Analyse en composantes principales des données physico-chimiques de l'ensemble des eaux. Projection du nuage de points dans l'espace : (a) des individus dans le plan des axes F1-F2 (b) des variables	100
<u>FIGURE 4.7</u> : Carte de forages de l'agglomération de Ouagadougou	105
<u>FIGURE 4.8</u> : Distribution des teneurs en cations dans les eaux des forages suivis	108
<u>FIGURE 4.9</u> : Distribution des teneurs en anions des eaux des forages suivis	110

<u>FIGURE 4.10</u> : Relation entre les teneurs en calcium, magnésium, sodium et la silice des eaux de forages suivis	113
<u>FIGURE 4.11</u> : Relation entre les teneurs en Ca^{2+} , en Mg^{2+} et en HCO_3^- des eaux de la nappe de fissures/fractures de Ouagadougou	114
<u>FIGURE 4.12</u> : Relation entre la teneur en Na^+ , en K^+ et en HCO_3^- des eaux de la nappe de fissures/fractures de Ouagadougou	115
<u>FIGURE 4.13</u> : Relation entre les teneurs moyennes en silice et en bicarbonates des eaux de forages suivis	116
<u>FIGURE 4.14</u> : Relation entre les teneurs en sodium, potassium et celles en chlorures des eaux de la nappe de fissures/fractures	117
<u>FIGURE 4.15</u> : Relation entre les teneurs en sulfates, nitrates et en chlorures des eaux de la nappe de fissures/fractures	118
<u>FIGURE 4.16</u> : Faciès chimiques des eaux issues de forages	119
<u>FIGURE 4.17</u> : Variation temporelle des teneurs en HCO_3^- dans les eaux de forages suivis	121
<u>FIGURE 4.18</u> : Variation temporelle des teneurs en Cl^- dans les eaux de forages	121
<u>FIGURE 4.19</u> : Variation temporelle des teneurs en sulfates dans les eaux de forages suivis	122
<u>FIGURE 4.20</u> : Variation temporelle des teneurs en nitrates dans les eaux de forages suivis	122
<u>FIGURE 4.21</u> : Variation temporelle des teneurs en bicarbonates, chlorures, nitrates et sulfates dans les eaux des FKOS et FT26	123
<u>FIGURE 4.22</u> : Distribution des teneurs en cations dans les eaux des puits de la nappe d'altérites	126
<u>FIGURE 4.23</u> : Distribution des teneurs en anions dans les eaux des puits de la nappe d'altérites	127
<u>FIGURE 4.24</u> : Relation entre les teneurs en Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et celles des HCO_3^- des eaux de la nappe d'altérites de Ouagadougou	130
<u>FIGURE 4.25</u> : Relation entre les teneurs en Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et celles de la SiO_2 des eaux de la nappe d'altérites de Ouagadougou	131
<u>FIGURE 4.26</u> : Relation entre les teneurs en Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et celles des Cl^- des eaux de la nappe d'altérites de Ouagadougou	132
<u>FIGURE 4.27</u> : Relation entre les teneurs en HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-} et Cl^- des eaux de la nappe des altérites de Ouagadougou	133
<u>FIGURE 4.28</u> : Faciès chimique des eaux de puits	135
<u>FIGURE 4.29</u> : Variation temporelle des teneurs en anions et en cations dans les eaux des puits PBOU et PGIB	138
<u>FIGURE 4.30</u> : Variation temporelle des teneurs en anions et en cations dans les eaux des PBAR et PZOB	139

<u>FIGURE 4.31</u> : Variation temporelle des teneurs en anions et en cations dans les eaux des puits PZID et PDAP	140
<u>FIGURE 4.32</u> : Variation temporelle des teneurs en anions et en cations dans les eaux des PAGH et PSCT	141
<u>FIGURE 4.33</u> : Variation temporelle des teneurs en anions et en cations dans les eaux du PIEZO	142
<u>FIGURE 4.34</u> (a, b, c, d) : Diagramme de stabilité des minéraux silicatés (données traitées par le logiciel Aqua	148
<u>FIGURE 5.1</u> : Relation $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ et $\delta^2\text{H}\text{‰}$ (a) dans les précipitations des villes en Afrique de l'Ouest (Bamako, Bolgatenga, N'Djaména, Niamey, et de Kano au Nigéria)	154
<u>FIGURE 5.2</u> : Valeurs interannuelles des moyennes pondérées de ^{18}O , ^2H à l'échelle régionale (Afrique de l'Ouest)	157
<u>FIGURE 5.3</u> : Relation entre ^{18}O et hauteur de pluies mensuelles à Ouagadougou (2004 à 2006)	160
<u>FIGURE 5.4</u> : Relation $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ dans les précipitations de Ouagadougou 2004-2006	161
<u>FIGURE 5.5</u> : Relation $\delta^{18}\text{O}$ vs ^2H pour les eaux souterraines de Ouagadougou (les triangles bleus foncés représentent les pluies de juillet, août et septembre plus appauvries en ^{18}O)	163
<u>FIGURE 5.6</u> : Courbe de décroissance de l'activité du Tritium dans les eaux de Bamako	165
<u>FIGURE 5.7</u> : Teneurs en tritium dans les précipitations de Ouagadougou 2004 et 2005	167
<u>FIGURE 6.1</u> : ACP des données physico-chimiques des eaux polluées de douze ouvrages de la ville de Ouagadougou	177
<u>FIGURE 6.2</u> : ACP des eaux non polluées	179
<u>FIGURE 6.3</u> : Analyse discriminante des données hydrochimiques des eaux de 67 ouvrages : classification des types de pollutions	182
<u>FIGURE 6.4</u> : Courbe de variation de la semi-variance	185
<u>FIGURE 6.5</u> : Courbe de variation du coefficient d'auto-corrélation	186
<u>FIGURE 6.6</u> : Carte de distribution des nitrates des 1800 puits de l'agglomération de Ouagadougou	187
<u>FIGURE 6.7</u> : Histogramme de fréquence de la qualité bactériologique des eaux des puits suivis à Ouagadougou (2003-2004)	188
<u>FIGURE 6.8</u> : Diagrammes de Schoeller-Berkaloff des eaux résiduaires de zones d'étude II et III SS : saison sèche ; SP : saison de pluies	193
<u>FIGURE 6.9</u> : Deux sites de prélèvement d'eaux usées de Ouagadougou	196
<u>FIGURE 7.1</u> : Carte de susceptibilité à la pollution	200

Liste des tableaux

<u>TABLEAU 2.1</u> a, b : Nombre de linéaments et leurs longueurs cumulées	47
<u>TABLEAU 3.1</u> : Paramètres hydrogéologiques des forages du socle de Ouagadougou	61
<u>TABLEAU 4.1</u> : Paramètres physico-chimiques in situ des eaux de surface (N=14)	91
<u>TABLEAU 4.2</u> : Paramètres physico-chimiques in situ des eaux de puits (N=100)	91
<u>TABLEAU 4.3</u> : Paramètres physico-chimiques in situ des eaux de forage (N=70) (nappe des arènes et de la roche fissurée)	91
<u>TABLEAU 4.4</u> : Coefficients de corrélation entre les éléments physico-chimique des eaux	99
<u>TABLEAU 4.5</u> : Concentrations caractéristiques en éléments majeurs	103
<u>TABLEAU 4.6</u> : Concentrations caractéristiques en éléments majeurs pour les eaux des forages	106
<u>TABLEAU 4.7</u> : Matrice de corrélation des eaux de la nappe de fissures/fractures de Ouagadougou	111
<u>TABLEAU 4.8</u> : Concentrations moyennes en éléments majeurs des eaux de la nappe des altérites	125
<u>TABLEAU 4.9</u> : Matrice de corrélation des eaux de la nappe des altérites	128
<u>TABLEAU 4.10</u> : Paramètres statistiques des indices de saturation (IS) des eaux des nappes de Ouagadougou	144
<u>TABLEAU 5.1</u> a ; b : Teneurs mensuelles en isotopes stables dans les précipitations à Bamako et à Niamey pour les périodes de 1991 à 1996	153
<u>TABLEAU 5.2</u> : Teneurs isotopiques moyennes interannuelles comparées entre Ouagadougou et les stations Africaines voisines	156
<u>TABLEAU 5.3</u> : Teneurs moyennes pondérées des isotopes stables ^{18}O et ^2H dans les pluies de Ouagadougou (2004 à 2006)	159
<u>TABLEAU 5.4</u> : Teneurs en ^{18}O - ^2H et ^3H des eaux souterraines de Ouagadougou	162
<u>TABLEAU 5.5</u> : Tritium dans les précipitations mensuelles à Ouagadougou	166
<u>TABLEAU 5.6</u> : Teneurs en ^3H des eaux que quelques ouvrages de la ville de Ouagadougou	168
<u>TABLEAU 6.1</u> : Coefficients de corrélation entre les différents éléments chimiques des eaux polluées de la ville de Ouagadougou	175
<u>TABLEAU 6.2</u> : Coefficients de corrélation entre les différents éléments chimiques des eaux non polluées de la ville de Ouagadougou	179
<u>TABLEAU 6.3</u> : Fonctions discriminantes canoniques ; tableau de classification des points d'eau selon les types et origines de pollutions	181

<u>TABLEAU 6.4</u> : Coefficients de corrélation des fonctions discriminantes canoniques	183
<u>TABLEAU 6.5</u> : Teneurs en éléments trace des points d’eau suivis de Ouagadougou	190
<u>TABLEAU 6.6</u> : Résultats d’analyses de quelques points eaux résiduelles (CC : Canal Central ; TAN-ALIZ : Tannerie ; BRAKINA : usine de brasserie)	195

Résumé

La croissance démographique de Ouagadougou la capitale du Burkina Faso entraîne une pénurie d'eau dans les zones périphériques de la ville qui sont confrontées aux problèmes d'alimentation en Eau, en quantité et surtout en QUALITE. Cette étude a pour but de faire un état de la ressource en eau souterraine et de sa vulnérabilité.

Ouagadougou est bâtie au centre du pays, entre 280 m et 300 m d'altitude sur des formations de socle cristallin et cristallophyllien du paléo protérozoïque. Ces formations sont recoupées par des intrusions et de grandes fractures orientées Nord-sud et Est-ouest. Le tout est recouvert par une épaisse couverture d'altérites. On y distingue trois niveaux plus ou moins aquifères mais généralement deux nappes : celle supérieure avec la cuirasse quand elle est noyée, captée par les puits et l'autre inférieure regroupant les arènes et la roche fissurée/fracturée, captée par les forages. Les paramètres hydrodynamiques des aquifères inférieurs de fissures sont très intéressants grâce aux fractures qui constituent dans cet environnement de socle les voies privilégiées d'accès aux ressources en eau mais aussi et d'arrivée de polluants.

Les outils hydrogéochimiques permettent de comprendre la complexité des aquifères de socle de Ouagadougou, leur fonctionnement et d'identifier la pollution au niveau des eaux des puits qui voient leur conductivité augmenter avec l'alcalinité (bicarbonates) par suite de minéralisation de la matière organique des charges anthropiques.

Une cartographie des nitrates sur 1800 puits répertoriés à Ouagadougou basée sur une approche géostatistique par analyse variographique met en évidence trois grandes zones avec des concentrations excessives des nitrates allant parfois jusqu'à 150 mg/l. La dégradation de la qualité des eaux qui s'accompagne de la présence des coliformes et streptocoques fécaux est due à l'environnement immédiat de ces ouvrages côtoyant couramment latrines et eaux usées.

L'essai de cartographie de la vulnérabilité de la nappe inférieure a été effectué à partir de deux paramètres : la densité de fracturation et l'épaisseur des altérites. Cette première ébauche indique deux zones très vulnérables sur lesquelles une grande attention doit être portée à l'occupation des sols et l'assainissement.

Mots clés : socle cristallin, aquifères superficiel et profond, chimie des eaux, pollution urbaine, vulnérabilité, Ouagadougou, Burkina Faso.

Abstract:

The rapid growth of Ouagadougou population, the capital of Burkina-Faso (with more than 1 million inhabitants) results in drinking water shortage; the drinking water network development does not follow this rapid spontaneous housing appearance in peripheral areas of the city (Ouagadougou) which are confronted to drinking water problems in quantity and mainly in QUALITY.

This study aims the investigation of groundwater situation and the appreciation of its quality and its vulnerability.

Ouagadougou is situated in the centre of Burkina-Faso, to an altitude comprised between 280 m and 300 m, laid on palaeo Proterozoic crystalline and foliated crystalline bedrock formations with discordant intrusion of dolerite, pegmatite and aplite of meso Proterozoic age and cut into sections by high fractures oriented South North and East West. All is covered by thick weathered zone.

One distinguishes in these formations more and less three aquifer levels but generally two groundwater table: the superficial water table in laterite when it is drowned captured by wells and the deep water table comprising granitic sand and fractured bedrock captured by boreholes.

Hydrodynamic parameters of boreholes are very interested with transmissivity values varying between $2,9.10^{-5}$ and $6,5.10^{-3}$ m²/s. Fractures are in this bedrock environment the main access road to water resources but also and mainly the arrival road of pollutants.

Hydrogeochemical tools enable to understand Ouagadougou bedrock aquifers complexity and to show the important pollution in water wells which have seen their conductivity increase with alkalinity (bicarbonate) mainly due to the mineralization of organic matter from anthropogenic charges.

Nitrate cartography on 1800 wells indexed in Ouagadougou based on geostatistic approach by variogram analysis show three zones with nitrate excessive concentrate values approaching 150 mg/l. Water quality degradation accompanied by faecal streptococcus and coli forms presence is due to wells proximity from latrines and waste water.

The vulnerability cartography test was carried according to two parameters: fracture density and weathered zone thickness. This first approach shows two most vulnerable zones on which a great attention must be paid for soil occupation and hydraulic urban.

Key words: crystalline bedrock, superficial and deep aquifers, water chemistry, urban pollution, vulnerability, Ouagadougou, Burkina Faso.